

Научная статья  
УДК 631.417.1  
doi: 10.17223/19988591/72/2

## Запасы почвенного углерода в лесных экосистемах Томь-Яйского междуречья (Западная Сибирь)

Татьяна Валериевна Раудина<sup>1</sup>, Сергей Геннадьевич Копысов<sup>2</sup>,  
Наталья Александровна Чернова<sup>3</sup>,  
Александр Максимович Крупин<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Томск, Россия*

<sup>1, 2, 3</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия*

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8953-883X>, [tanya\\_raud@mail.ru](mailto:tanya_raud@mail.ru)

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5478-7385>, [kas.sgs@mail.ru](mailto:kas.sgs@mail.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1951-7192>, [naitina79@mail.ru](mailto:naitina79@mail.ru)

<sup>4</sup> [krupinam@rambler.ru](mailto:krupinam@rambler.ru)

**Аннотация.** Неотъемлемой частью бореальных ландшафтов являются лесные почвы, играющие ведущую роль в биогеохимическом цикле углерода и содержащие до 40% его общепланетарных запасов. Уровень накопления углерода в этих почвах отличается высокой пространственной неоднородностью, что важно учитывать, оценивая углеродный баланс. В ходе проведенного исследования определены количественные показатели вариабельности содержания углерода и его запасы в серых и темно-серых почвах темнохвойных лесов Западной Сибири на южной границе их распространения. Рассматриваемые почвы отличаются выраженным процессом накопления органических веществ в гумусово-аккумулятивных горизонтах. Так, в верхних 10 см содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) достигает 5–9%, а к иллювиальным горизонтам его содержание падает до 0,3–1%. При этом в серой почве под осинником крупнотравным верхний серогумусовый горизонт отличается самыми низкими значениями (2,4–4,8%). В целом для темно-серых почв запасы  $C_{\text{общ}}$  наибольшие и составляют в слое 0–30 см  $136,2 \pm 11$  т/га. При этом самые высокие отмечаются в почвах под мелко-травными кедровниками ( $127,9 \pm 30,46$  т/га в 30-см слое), а самые низкие под крупнотравным осинником ( $87,4$  т/га в 30-см слое), что связано в первую очередь с более высокой скоростью биологического круговорота, усилением минерализации ежегодно поступающего на поверхность почвы органического вещества в последних. Неоднородная структура древостоев лесных экосистем и микроклиматические различия условий местообитания отражаются на активности гумусово-аккумулятивного процесса, что в свою очередь сказывается на варьировании содержания и запасов почвенного углерода. Исследование позволило выявить различия запасов углерода в зависимости от типа леса, что необходимо учитывать для мониторинга процессов углеродного баланса.

**Ключевые слова:** органический углерод, серые почвы, структурное разнообразие лесов, типы леса, темнохвойные леса

**Источник финансирования:** работа выполнена по государственному заданию Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Для цитирования: Раудина Т.В., Копысов С.Г., Чернова Н.А., Крупин А.М. Запасы почвенного углерода в лесных экосистемах Томь-Яйского междуречья (Западная Сибирь) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 72. С. 38–59. doi: 10.17223/19988591/72/2

Original article

doi: 10.17223/19988591/72/2

## Soil carbon stock in forest ecosystems of the Tom-Yaya interfluve (Western Siberia)

Tatiana V. Raudina<sup>1</sup>, Sergey G. Kopysov<sup>2</sup>, Natalia A. Chernova<sup>3</sup>,  
Aleksandr M. Krupin<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS,  
Tomsk, Russian Federation*

<sup>1, 2, 3</sup> *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8953-883X>, [tanya\\_raud@mail.ru](mailto:tanya_raud@mail.ru)

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5478-7385>, [kas.sgs@mail.ru](mailto:kas.sgs@mail.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1951-7192>, [naitina79@mail.ru](mailto:naitina79@mail.ru)

<sup>4</sup> [krupinam@rambler.ru](mailto:krupinam@rambler.ru)

**Summary.** In the context of climate instability and anthropogenic pressure, terrestrial ecosystems play a crucial role in maintaining biosphere stability by accumulating significant carbon stocks and providing numerous vital ecosystem services. The lowland dark coniferous forests of Western Siberia, located in the subtaiga zone, exhibit an insular distribution pattern, typically persisting in remote or protected areas. These forests are predominantly in various stages of successional restoration, a consequence of the increasing degradation rate of coniferous forests. Therefore, when assessing the forest carbon balance, it is essential to account for the high spatiotemporal heterogeneity of forest ecosystems. Forest soils are an integral component of boreal landscapes, playing a central role in the biogeochemical carbon cycle and containing up to 40% of the planet's total carbon stocks. However, insufficient attention has been given to analyzing this issue. Accordingly, this study aims to assess the quantitative indicators of variability in carbon content and its reserves in Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic) of the dark coniferous forests of Western Siberia, located at the southern boundary of their distribution.

District Forestry (Tomsk Oblast, Tomsk District, near the village of Arkashevo; 56.44° N, 85.26° E) (See Fig. 1). The area is located on the western slope of the Tom-Yaya interfluve and is a flat, gently dissected plain. The predominant parent material is loess-like loam underlain by clays. According to climate zoning, the Tom-Yaya interfluve is part of the Tom-Chulym climatic district. The climate is humid continental cyclonic, with moderately warm summers and snowy winters. The average temperature in July is 18.1°C, while in January it is -19.2°C. Precipitation is unevenly distributed throughout the year, ranging from 550 to 630 mm. The vegetation cover of the Tom-Yaya interfluve consists of a complex of plant communities that combine southern taiga and subtaiga. In the study area, 11 soil profiles were placed in different forest (See Table 1). The soils in the area are slightly frozen, which promotes high biological activity on the surface and rapid decomposition of leaf litter. Air-dried samples were analyzed for actual acidity, loss on ignition, total carbon content (CHNS-O, VELP Scientifica, Italy), and particle size distribution. Carbon stocks were calculated for the 0-20 cm, 0-50 cm, and 0-100 cm layers based on total carbon (TC) content and bulk density.

The soil cover has common morphological features and soil profile structures. The humus profile is extended in the form of a series of transitional horizons. The thickness of the humus horizons ranges from 20-45 cm, depending on the sampling location. Based on particle size distribution, the soils are classified as middle loamy soils and, less often as silty clay (See Fig. 1). The silt fraction predominates in all soil profiles (42-74%), which is typical of soils formed on loess-like deposits. The pH of the soil in the upper horizons is slightly acidic. The pH values gradually increase to pH = 6-6.8 towards the illuvial horizons and parent material. In the presence of carbonates or signs of residual carbonate content (P3, P8, P9, P11), the pH shifts to alkaline, ranging from 7.1 to 8.2.

The soils are characterized by a pronounced accumulation of organic matter in the humus-accumulative horizons. In the upper 10 cm, the TC content reaches 5-9%, while in the illuvial horizons, it drops to 0.3-1%. Compared to all other soils, the upper humus horizon in the Luvic Retic Stagnic Greyzemic Phaeozems (Loamic) under the tall-forb aspen forest has the lowest TC values (2.4-4.8%) (See Fig. 3). In turn, the highest carbon stocks are observed in soils under small-forb Siberian stone pine forest ( $127.87 \pm 30.46$  t/ha in a 30-cm layer) (See Fig. 4). The soil under the tall-forb aspen forest is characterized by the smallest reserves of total carbon (87.38 t/ha in a 30-cm layer), which is primarily due to the higher rate of biological turnover and increased mineralization of organic matter annually entering the soil surface. The heterogeneity of the species and age structure of the forest ecosystem stand, as well as the overall microclimatic differences in habitat conditions, are reflected in the activity of the humus-accumulative process, which in turn affects the variation in the content and soil carbon stocks. The study revealed the heterogeneity of carbon spatial distribution and established that its content depends on the composition of the plant community, which must be considered when monitoring carbon balance processes.

*The article contains 5 Figures, 1 Table, 48 References.*

**Keywords:** organic carbon, Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic), forest diversity, dark coniferous forests

**Fundings:** the work was carried out as a part of the state assignment of the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the RAS.

**For citation:** Raudina TV, Kopysov SG, Chernova NA, Krupin AM. Soil carbon stock in forest ecosystems of the Tom-Yaya interfluvium (Western Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;72:38-59. doi: 10.17223/19988591/72/2

## Введение

В условиях климатической нестабильности и антропогенной нагрузки ключевую роль в формировании устойчивости биосферы играют наземные экосистемы, обладающие способностью к аккумулярованию значительных запасов углерода и предоставляющие множество жизненно важных экосистемных услуг. Одной из глобальных проблем исследования круговорота углерода является оценка его запасов и баланса, определение роли отдельных компонентов на биосферном уровне. Так, лесные экосистемы бореальной зоны России, являющиеся одним из самых больших на суше резервуаров углерода биомассы и почв, играют важную роль в глобальном цикле как накопители углерода, так и источники его эмиссии [1–6]. Однако имеющиеся оценки запаса углерода, полученные различными группами исследователей, различаются существенно, практически на порядок (от 58

до 429 Мт С) [7–11]. Это связано с тем, что лес является многофункциональной и динамичной системой с высоким уровнем мозаичности и сложной структурной организацией, в которой функционирование всех его компонентов происходит в различных интервалах углеродного цикла.

Равнинные темнохвойные леса Западной Сибири на южном пределе распространения (в подтаежной зоне) имеют островной характер [12], сохраняясь, как правило, в слабо доступных местах (террасные комплексы крупных рек и долины мелких рек и ручьев) или на природоохранных территориях. Здесь в настоящий момент господствуют леса, находящиеся на разных стадиях восстановительных сукцессий, что связано с повышением темпов деградации хвойных лесов в результате вспышек массового размножения насекомых-дендрофагов, особенно видов инвайдеров, или усиления антропогенной нагрузки [2, 13–15]. Поэтому при оценке лесного углеродного баланса целесообразно учитывать высокую пространственно-временную неоднородность лесных экосистем (тип леса, сукцессионную стадию, позицию в ландшафте, климатические условия, состав почвообразующих пород) [1, 16].

Неотъемлемой частью бореальных ландшафтов являются лесные почвы, играющие ведущую роль в биогеохимическом цикле углерода и содержащие до 40% его общепланетарных запасов [17, 18]. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки и глобального изменения климата их роль в регулировании газового состава атмосферы возрастает. К тому же уровень накопления углерода в лесных почвах отличается высокой пространственной изменчивостью, что обусловлено взаимодействием комплекса абиотических и биотических факторов. Изменение состава и структуры растительных сообществ является драйвером динамики запасов почвенного углерода, однако анализу этого вопроса уделено недостаточно внимания. Все это усиливает необходимость в уточнении оценок запасов почвенного органического углерода. В настоящее время достаточно много внимания уделяется проблеме мониторинга и прогнозирования изменений запасов углерода в лесных почвах и выявлению основных факторов, определяющих его пространственную вариабельность на разных ландшафтных уровнях [8, 19–26]. Получены данные, касающиеся оценок почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах европейской территории России [9, 24, 27, 28]. Показано, что лесные экосистемы являются существенным поглотителем атмосферного углерода, главным образом за счет массы древесины и органического вещества почвы, а вариабельность запасов весьма высока. В Западной Сибири исследования в почвах таежных лесов более фрагментарны [15, 16, 29, 30]. Так, установлено, что сукцессионные смены лесов юга таежной зоны неизбежно отражаются на активности процессов почвообразования, прежде всего на накоплении органического вещества на поверхности (подстилки) и в гумусовом профиле почв. Таким образом, для получения реалистичных оценок и качественных прогнозов возможных изменений запасов почвенного углерода особую актуальность приобретает получение данных об их пространственной гетерогенности на разных ландшафтных уровнях с учетом типологического разнообразия лесов.

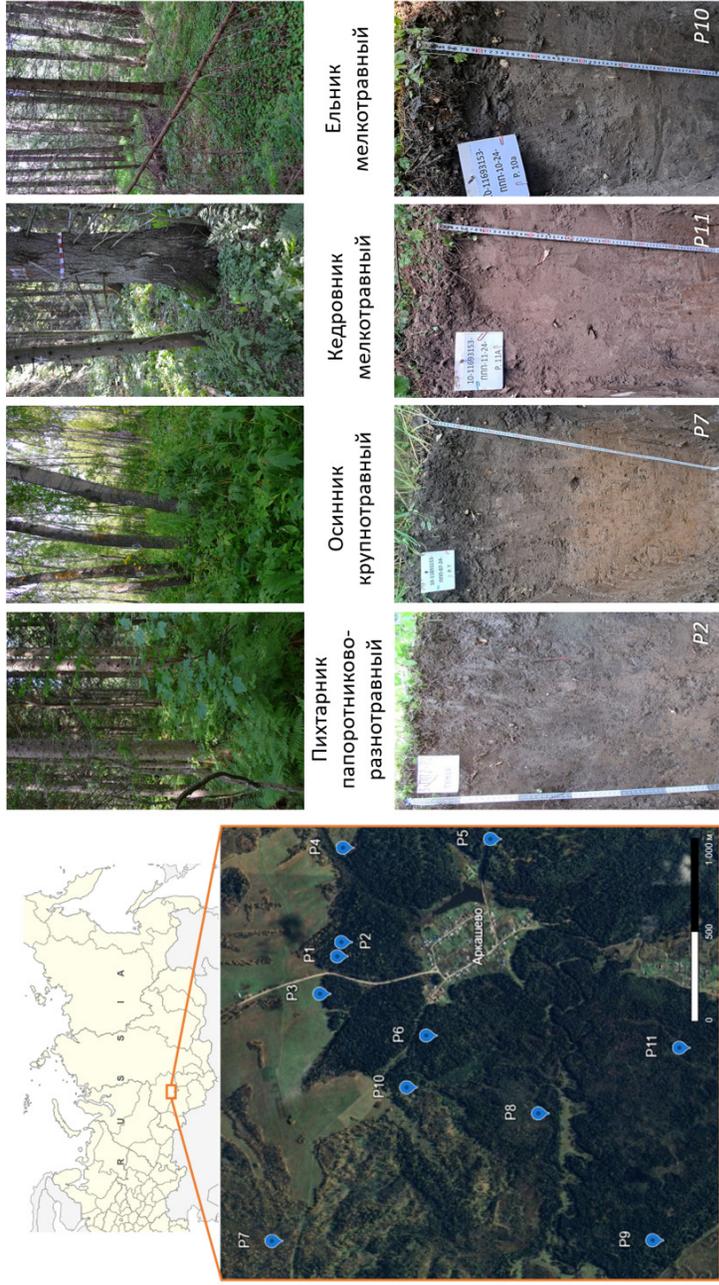
В связи с вышеотмеченным, целью настоящей работы является определение содержания углерода, его запасов в серых и темно-серых почвах темнохвойных лесов Западной Сибири на южной границе их распространения.

### **Материалы и методы**

Исследования проведены в июле–августе 2023 и 2024 гг. на территории Корниловского участкового лесничества (Томская область, Томский район, окрестности д. Аркашево; 56,44° с. ш., 85,26° в. д.) (рис. 1). В геоморфологическом отношении территория приурочена к западному макросклону Томь-Яйского междуречья и представляет плоскую слабо расчлененную равнину. Среди почвообразующих пород преобладают покровные лёссовидные суглинки, подстилаемые глинами. По климатическому районированию Томь-Яйское междуречье входит в состав Томь-Чулымского климатического округа. Климат континентально-циклонический, влажный с умеренно-теплым летом и многоснежной зимой. Средняя температура июля 18,1°C, а января –19,2°C. Количество осадков в течение года распределено неравномерно и составляет 550–630 мм. При этом значительная доля (до 33%) в годовом количестве атмосферных осадков приходится на зимние осадки. Средняя мощность снежного покрова в лесах варьирует от 65 до 85 см. Глубина промерзания почв в значительной степени определяется толщиной снежного покрова и редко превышает 40 см, что обусловлено в первую очередь экологическими факторами. Соответственно, почвы территории малопрмерзающие, что обеспечивает высокую биологическую активность на поверхности и быструю деструкцию листовенного растительного опада [30, 31].

По схеме почвенного-географического районирования России [32] район исследования находится в зоне серых лесных почв, которая протянулась вдоль южной границы бореальной тайги Западной Сибири. Территория Томь-Яйского междуречья согласно лесорастительному районированию Российской Федерации [33] относится к Западно-Сибирскому южно-таежному равнинному району таежной зоны; по природно-ресурсному районированию Томской области [34] – к Томскому округу вторично-мелкотравных и высокопродуктивных хвойных лесов, высоко и среднебонитетных почв Западно-Сибирской таежной зоны, а по целевому назначению – к эксплуатационным лесам. По геоботаническому районированию территория исследования относится к зоне подтайги [12, 35], которая является экотонном бореальной зоны [36].

Растительный покров территории Томь-Яйского междуречья представлен комплексом растительных сообществ, в котором сочетаются южнотаежные и подтаежные элементы.



**Рис. 1.** Район исследования с расположением почвенных разрезов P1–P11, а также общий вид пробных площадок и фото некоторых профилей почв

[ Fig. 1. Study area location with soil profiles P1-P11 and general view of the sites with some soil profiles ]

Таблица 1 [Table 1]

**Характеристика объектов исследования**  
[Research objects characteristics]

№ разреза [Soil profile №]	Координаты [Coordinates]	Рельеф, почвообразующие породы [Topography, parent material]	Тип леса [Forests]	Почвы 2004 [39] [Soils, WRB [40]]
P1	56°27'0" N 85°15'48" E	Эрозионно-денудационная равнина, юго-западный склон крутизной 2°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the southwestern slope of 2° (loess-like loams)]	Пихтарник папоротниково-разнотравный [fern-forb fir forest]	Серая типичная маломощная глубоководная среднесуглинистая [Luvis Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P2	56°26'59" N 85°15'54" E	Эрозионно-денудационная равнина, юго-западный склон крутизной 2°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the southwestern slope of 2° (loess-like loams)]	Пихтарник папоротниково-разнотравный [fern-forb fir forest]	Серая типичная маломощная глубоководная среднесуглинистая [Luvis Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P3	56°27'3" N 85°15'34" E	Эрозионно-денудационная равнина, юго-западный склон крутизной 4°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the southwestern slope of 4° (loess-like loams)]	Пихтарник папоротниково-разнотравный [fern-forb fir forest]	Серая типичная маломощная глубоководная карбонатная среднесуглинистая [Luvis Retic Endocalcic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P4	56°29'57" N 85°16'31" E	Эрозионно-денудационная равнина, западный склон крутизной 2°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the western slope of 2° (loess-like loams)]	Пихтарник папоротниково-разнотравный [fern-forb fir forest]	Серая типичная маломощная глубоководная карбонатная среднесуглинистая [Luvis Retic Endocalcic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P5	56°26'30" N 85°16'36" E	Эрозионно-денудационная равнина, западный склон крутизной 2°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the western slope of 2° (loess-like loams)]	Пихтарник папоротниково-разнотравный [fern-forb fir forest]	Серая типичная маломощная глубоководная среднесуглинистая [Luvis Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]

P6	56°26'42" N 85°15'19" E	Эрозионно-денудационная равнина, юго-восточный склон крутизной 3°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the southwestern slope of 3° (loess-like loams)]	Кедровник папоротниково-мелкотравный [fern-small-forb Siberian stone pine forest]	Темно-серая типичная маломощная сверхглубокоосветленная среднесуглинистая [Luvisc Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P7	56°27'12" N 85°13'58" E	Эрозионно-денудационная равнина, восточный склон крутизной 1°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the western slope of 1° (loess-like loams)]	Осинник крупнотравный [fall-forb aspen forest]	Серая глееватая глубокоосветленная среднесуглинистая [Luvisc Retic Stagnic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P8	56°26'18" N 85°14'50" E	Эрозионно-денудационная равнина, речная терраса, южный склон крутизной 1°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, river terrace, automorphic position of the western slope of 1° (loess-like loams)]	Ельник мелкотравный [small-forb spruce forest]	Темно-серая типичная среднемошная неглубокоосветленная глубококарбонатная среднесуглинистая [Luvisc Retic Endocalcic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P9	56°25'54" N 85°14'0" E	Эрозионно-денудационная равнина, речная терраса, западный склон крутизной 1°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, automorphic position of the western slope of 1° (loess-like loams)]	Кедровник мелкотравный [small-forb Siberian stone pine forest]	Серая глееватая маломощная сверхглубокоосветленная глубокоосветленная тяжелосуглинистая [Luvisc Retic Stagnic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P10	56°26'46" N 85°14'58" E	Эрозионно-денудационная равнина, южный склон крутизной 9°, транзитная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, transit position of the south slope of 9° (loess-like loams)]	Ельник мелкотравный [small-forb spruce forest]	Темно-серая типичная среднемошная сверхглубокоосветленная среднесуглинистая [Luvisc Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]
P11	56°25'51" N 85°15'17" E	Эрозионно-денудационная равнина, речная терраса, южный склон крутизной 3°, автоморфная позиция (лёссовидные суглинки) [Erosion-denudation plain, river terrace, automorphic position of the south slope of 3° (loess-like loams)]	Кедровник мелкотравный [small-forb Siberian stone pine forest]	Серая типичная маломощная сверхглубокоосветленная глубококарбонатная среднесуглинистая [Luvisc Retic Endocalcic Greyzemic Phaeozems (Loamic)]

В качестве модельного объекта для изучения типичных для зоны подтайги Западной Сибири мелколиственных лесов был выбран крупнотравный осинник с почти сплошным многовидовым травяным покровом.

В темнохвойных лесах древесный ярус образован кедром сибирским, елью сибирской и пихтой сибирской в разных сочетаниях, лишь с небольшим участием сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, березы повислой и осины. Южнотаежные темнохвойные леса отличаются повышенным флористическим разнообразием растительных сообществ, что наиболее ярко проявляется в исследованных нами папоротниково-разнотравных пихтарниках, но мелкотравные ельники и кедровники также имеют более высокое видовое разнообразие травяного покрова по сравнению с аналогичными таежными экосистемами средней тайги.

Специфика почвообразующих пород и рельефа обуславливает широкое распространение почв с повышенным залеганием карбонатов [37, 38]. Для оценки пространственной неоднородности запасов почвенного углерода на территории исследования в типичных лесных экосистемах было выбрано 11 постоянных пробных площадей (50 × 50 м), в пределах которых заложено по одному почвенному разрезу в автоморфных позициях с уклоном склона не более 4°, за исключением разреза 10, занимающего транзитное положение в рельефе на южном склоне крутизной 9°. Разрезы 8, 9, 11 расположены на речной террасе на высоте 130–135 м, что сильно отличает их от остальных пробных площадей, заложенных на высотах 179–202 м. Высотная дифференциация несомненно влияет на микроклиматические условия, но эти различия нивелируются типом леса (см. табл. 1).

На основе морфологических признаков, отражающих проявления основных почвообразовательных процессов (гумусоаккумуляции и оподзоливания), изучаемые почвы отнесены к типам серых и темно-серых глубоко- и сверхглубоко осветленных маломощных почв (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) [39, 40]. В типичных биогеоценозах проведены наблюдения за термическим режимом почв с использованием автоматических измерителей почвенной температуры (АИПТ), разработанные в ИМКЭС СО РАН. Температура измерялась на глубинах 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 и 240 см с периодичностью 1 ч.

Образцы почв в виде смешанной пробы (с интервалом 10 см) отбирались с учетом границ генетических горизонтов почвенных разрезов в соответствии с действующими нормативными документами [41]. В предварительно высушенных до воздушно-сухого состояния пробах определены актуальная кислотность, потеря массы при прокаливании (ППП) путём сжигания образца в муфельной печи [42], содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) на элементном анализаторе CHNS-O (VELP Scientifica, Италия), гранулометрический состав по методу Н.А. Качинского с применением пирофосфата натрия для диспергирования почвенных частиц [42]. Запасы углерода рассчитывались послойно (0–20, 0–50 и 0–100 см) расчетным путем исходя из содержания общего углерода и с учетом плотности сложения, определенной методом режущего кольца (50 см<sup>3</sup>) в трехкратной повторности [43].

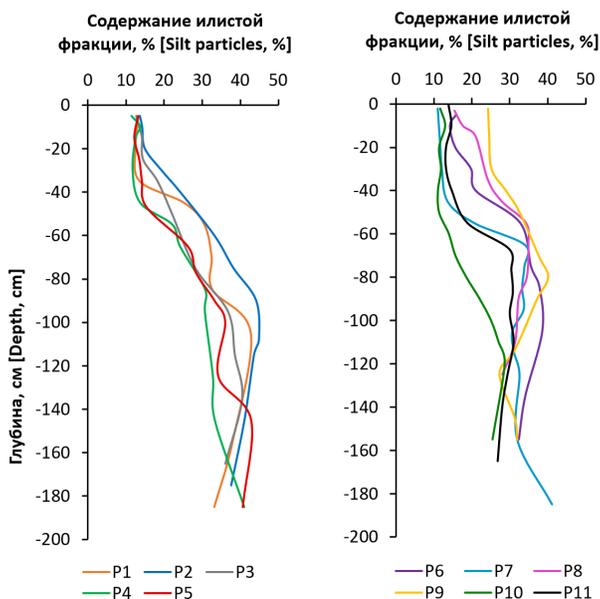
Обработка данных происходила с использованием программного обеспечения STATISTICA-12 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). При сравнении использован U-критерий Манна–Уитни. Результаты считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ . Для построения графического материала использовалась программа MS Excel 2010.

### **Результаты исследования и обсуждение**

Почвенный покров исследованных пробных площадей отражает условия района исследования и имеет общие морфологические черты и строение почвенного профиля. Формируясь в теле относительно рыхлых лессовидных суглинков подстилаемых плотными тайгинскими глинами, почвы имеют специфический профиль, характеризующийся высокой степенью текстурной дифференциации, глубокой оподзоленностью (до 70–80 см).

Гумусовый профиль растянут в виде серии переходных горизонтов. Мощность гумусовых горизонтов согласуется с типовой принадлежностью почв и составляет от 20–30 см в серых и до 30–45 см в темно-серых. Так, профиль состоит из небольшого по мощности дернового горизонта (AW), который сменяется гумусовым (AY или AU). Глубже выделяются светло-серые, светло-бурые элювиальные (AEL, Ael, BEL) и буро-коричневые текстурные (BT, Bt) горизонты, переходящие к бурой, плотной почвообразующей породе. В некоторых профилях встречаются признаки глубинного оглеения (P7 и P9), а также отмечается присутствие карбонатов глубже 80 см (P3 и P8), что отражено в классификационной принадлежности почв. Помимо этого, отмечается языковатость границ перехода между горизонтами, наличие признаки остаточного гумусирования (hh) в виде морфонов (пятен) в области контакта элювиальных, текстурных горизонтов в разрезах 6 и 9.

По гранулометрическому составу почвы относятся к среднесуглинистым, реже – к тяжелосуглинистым разновидностям. В профиле всех почв преобладает фракция пыли (42–74%), что характерно для формирующихся на лессовидных отложениях почв. В нижележащих слоях происходит увеличение доли более тяжелых фракций. Характер распределения илистой фракции (рис. 2) имеет четко выраженный элювиально-иллювиальный тип, что объясняется всей совокупностью формирующих профиль процессов (оподзоливание, лессивирование, оглинивание и др.). В свою очередь темно-серые почвы отличаются более низкими значениями илстых частиц (11–32%) в профиле почв и несколько повышенными значениями физической глины ( $p = 0,045$ ), что способствует стабилизации и накоплению большего количества органического вещества в почвах [44]. При этом в темно-серой почве (P10), находящейся в транзитной позиции склона, наблюдается тенденция к уменьшению илстых частиц в профиле за счет более интенсивного переноса почвенных частиц в нижнюю часть склона.



**Рис. 2.** Распределение илстых частиц (<0,001) по профилю почвенных разрезов 1–11  
 [Fig. 2. Distribution of silt particles (<0.001) along the soil profiles 1-11]

Как отмечает А.Г. Дюкарев, для почв Томь-Колыванской складчатой зоны [45], развивающихся преимущественно на лессовидных и покровных отложениях суглинистого и тяжелосуглинистого состава, характерно преобладание в гранулометрическом составе лессовой фракции, представленной крупнопылеватыми частицами. Такие особенности гранулометрии отражают специфику почвообразующих пород региона и процессы их постседиментационной трансформации [37, 45].

Реакция среды почвенного раствора в верхних горизонтах рассматриваемых почв слабокислая. Вглубь профиля к иллювиальным горизонтам и почвообразующей породе значение pH постепенно возрастает до pH = 6,0–6,8, сменяясь в сторону щелочной (pH = 7,1–8,2) в случае наличия карбонатов или признаков остаточной карбонатности (P3, P8, P9, P11). Величины ППП максимальны в верхних органогенных горизонтах, уменьшаются с глубиной и коррелируют с содержанием общего углерода ( $r = 0,85–0,93$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 103$ ). Высокая активность биологических процессов в верхних горизонтах лесных почв активизирует и процессы агрегации минеральной массы в структуры разного уровня и рыхлое сложение [16]. Так, плотность сложения верхних горизонтов почв составляет 0,7–0,9 г/см<sup>3</sup> в дерновых, 0,9–1,2 г/см<sup>3</sup> в темно- и серогумусовых. В нижних тяжелосуглинистых иллювиальных горизонтах, которые характеризуются очень низкой фильтрационной способностью, она достигает максимальных величин (1,6–1,8 г/см<sup>3</sup>).

Растительность как основной источник поступления органического вещества в почву при взаимодействии с почвенной биотой, перерабатываю-

щей растительный опад, и с абиотическими факторами среды определяет процессы формирования и накопления почвенного органического вещества [25]. В почвах оно образуется преимущественно из надземного и подземного опада древесного яруса и травяного покрова. В свою очередь, накопление углерода в лесной подстилке определяется количеством поступающего опада и интенсивностью его разложения, что существенно зависит от возраста древостоя. Установлена четкая зависимость: с увеличением возраста лесных почв возрастает мощность иллювиального горизонта и его роль в общем запасе почвенного углерода [7]. Серые почвы в ряду текстурно-дифференцированных отличаются более выраженным процессом накопления органических веществ в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах и слабовыраженным подзолистым процессом. При этом содержание гумуса невелико, так как в ходе почвообразовательных процессов (лессиважа и подзолообразования) происходит миграция гумусовых веществ из элювиальных горизонтов в нижележащие слои, и далее основная часть обогащенных органикой минеральных частиц выносится с поверхностным стоком в гидрографическую сеть. Темно-серые типы почв отличаются несколько большим накоплением углерода в темногумусовых горизонтах ( $p < 0,035$ ) и его постепенно-убывающим характером в отличие от серых почв. Для всех почв, за исключением P7, отмечается наибольшее содержание общего углерода в дерновом и гумусовом горизонтах, заметно уменьшающегося с глубиной. Так, в верхних 10 см содержание  $C_{\text{общ}}$  достигает 5–9%, а на глубине к иллювиальным горизонтам его содержание падает до 0,3–1%. При этом в серой почве под осинником крупнотравным  $C_{\text{общ}}$  в верхнем серогумусовом горизонте отличается самыми низкими значениями (2,4–4,8%) по сравнению с другими почвами (рис. 3).

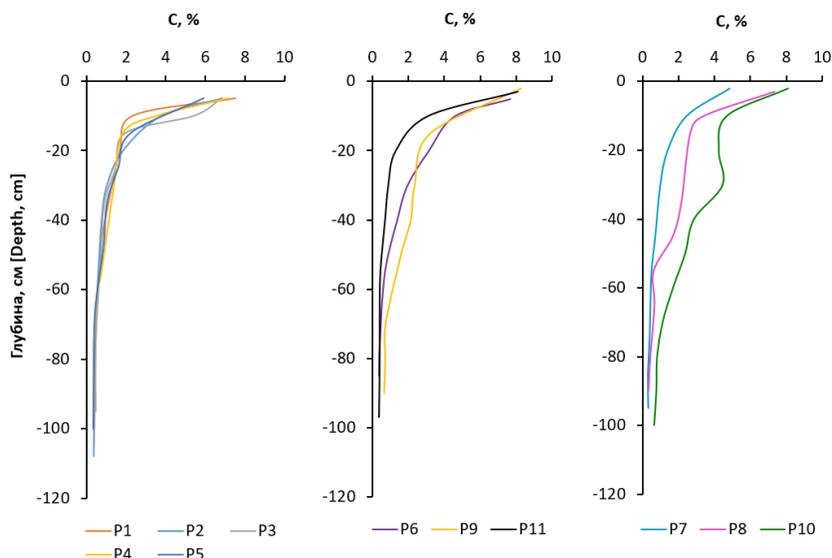


Рис. 3. Профильное распределение  $C_{\text{общ}}$  в разрезах 1–11 с учетом типа леса (см. табл. 1)  
[Fig. 3. Profile distribution of  $C_{\text{total}}$  in the soil profiles 1-11 considering the forest (see table 1)]

Согласно Д.С. Орлову и др. [46], содержание органического углерода в серых лесных почвах уменьшается с глубиной в 2–10 и более раз, поэтому на верхний (0–20 см) слой приходится примерно половина от запасов органического углерода в метровой толще. При этом его запасы в 0–100-см слое в 1,2 и 2,6 раза больше, чем в каштановых и дерново-подзолистых почвах, что делает серые и темно-серые почвы значимым глобальным резервуаром и стоком органического углерода. В целом запасы общего углерода в рассматриваемых темно-серых почвах отличаются наибольшими значениями (рис. 4) и составляют в слое 0–30 см  $136,2 \pm 11$  т/га. Анализ запасов углерода позволил выявить также различия в почвах в зависимости от состава растительных сообществ. Самые высокие их значения отмечаются в почвах под мелкотравными кедровниками ( $127,9 \pm 30,5$  т/га в 30-см слое), варьирующие в более широких пределах от 92,7 т/га на серых почвах до 146 т/га на темно-серых. Особенности почв кедровников являются рыхлое сложение и высокая агрегированность гумусовых горизонтов [47], что создает оптимальные условия водно-воздушного и теплового режима в корнеобитаемой зоне, обуславливает богатство напочвенного покрова, высокую биологическую активность почв и быстрое разложение опада. В мелкотравных ельниках на темно-серых почвах запасы общего углерода также достаточно высоки и находятся в пределах  $127 \pm 5,2$  т/га в 30-см слое. В папоротниково-разнотравных пихтарниках запасы углерода в 0,3-м слое почв отличаются уже более низкими значениями ( $108,3 \pm 10$  т/га). В свою очередь почва под крупнотравным осинником характеризуется наименьшими величинами ( $87,38$  т/га в 30-см слое), что связано с более высокой скоростью биологического круговорота в нем, активностью разложения листовенного и травянистого опада, а также усилением минерализации ежегодно поступающего на поверхность почвы органического вещества.

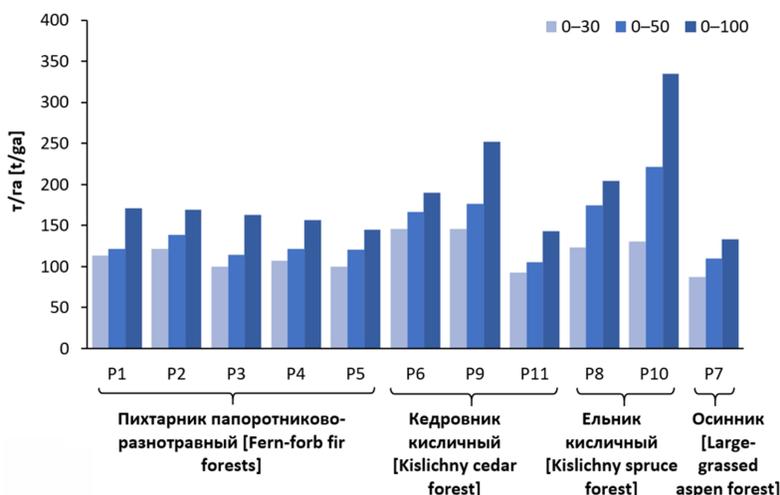


Рис. 4. Запасы общего углерода в разрезах P1–P11 с учетом типа леса [Fig. 4. Total carbon stocks in the soil profiles P1–P11 considering the forest]

В термическом режиме почв проявляются микроклиматические различия условий местообитания, вызванные особенностями инсоляции под древесным пологом, которые влияют на активность гумусово-аккумулятивного процесса и, соответственно, на содержание и запасы почвенного углерода (рис. 5). Так, по данным мониторинга температурного режима почв за 2023–2025 гг., сумма активных температур ( $> 10^{\circ}\text{C}$ ) на глубине 20 см закономерно уменьшается от  $1520^{\circ}\text{C}$  в осиннике до  $1062^{\circ}\text{C}$  в ельнике. Средняя температура на этой глубине составила: в осиннике  $7,2^{\circ}\text{C}$ , пихтарнике  $6,2^{\circ}\text{C}$ , кедровнике  $5,6^{\circ}\text{C}$ , ельнике  $5,4^{\circ}\text{C}$ . Глубина проникновения активных температур в осиннике более 2,5 м, пихтарнике – до 2 м, кедровнике – 1,5–1,8 м, а ельнике – всего 0,8–1,0 м. Соответственно, почвы относятся к группе малопрмерзающих, что обусловлено в большей степени особенностями инсоляции под древесным пологом, специфичностью режимов замерзания и оттаивания почв. В зимний период промерзают только самые верхние почвенные горизонты. Проникновение отрицательных температур на глубину до 20 см и ниже характерно только для почв под темнохвойными древостоями, что обусловлено малой мощностью снежного покрова по сравнению с мелколиственными. При этом при наличии более мощного снежного покрова почвы могут полностью оттаивать, что активизирует биологические процессы. Зимнее вторичное промерзание и оттаивание весной в свою очередь влияет на подвижность органического вещества почв и его вынос по мерзлотному экрану в виде растворов или с илстыми частицами с внутрипочвенным стоком за пределы лесного ландшафта, снижая потенциальную продуктивность.

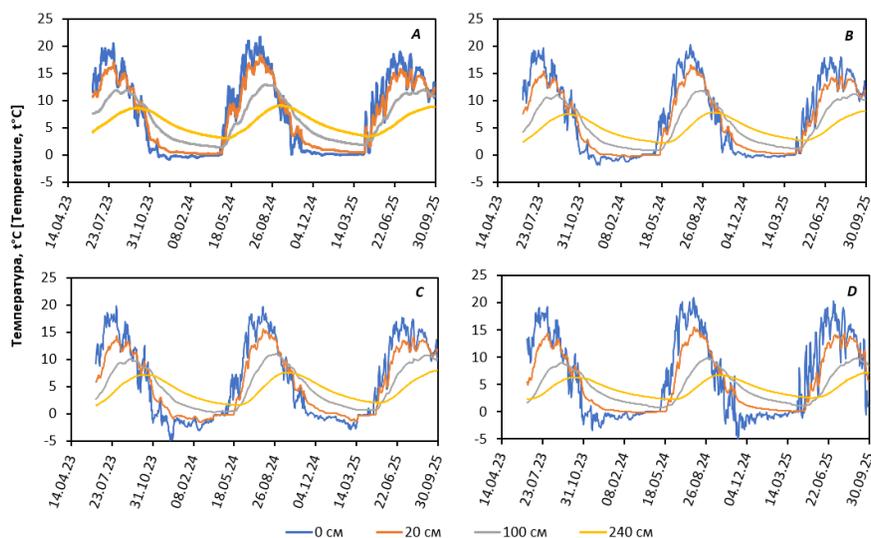


Рис. 5. Средние суточные температуры почв в различных типах леса по глубинам: осинник (A), пихтарник (B), кедровник (C), ельник (D)

[Fig. 5. Average daily temperatures in the soil profiles considering the forests type: aspen forest (A), fir forests (B), Siberian stone pine forests (C), spruce forests (D)]

Обеспеченность термическими ресурсами и влагой, рыхлое сложение в корнеобитаемой зоне, высокая подвижность гумуса и других элементов питания определяют продуктивность и быстрое развитие древесных растений, а при их выпадении и напочвенного покрова [16].

Показано, что изменение инсоляционного и термического режимов насаждения в связи с распадом и сменой древостоя может приводить на разных стадиях сукцессии к значительной изменчивости продуктивности фитоценоза и активности гумусово-аккумулятивного процесса. Соответственно, смена древостоя с темнохвойного на лиственный сопровождается снижением содержания углерода и его общих запасов, что особенно четко проявляется в верхней (0–30 см) части почвенного профиля. Высокая скорость сукцессионных смен, характерная для исследуемых пихтовых и осиновых лесов, которая проявляется в постоянном изменении структуры древостоя, является причиной высокой неоднородности экосистем на всех уровнях – в древостое, подлеске, напочвенном покрове и гумусовом профиле почв [2]. Пространственно-временная динамика лесных сообществ обуславливает внутриландшафтное варьирование содержания углерода и его запасов в почве.

### **Заключение**

Почвы пробных площадей района исследования имеют общие морфологические черты и строение почвенного профиля. Они сформированы на лессовидных суглинках, о чем свидетельствуют данные гранулометрического состава. Характер распределения илистой фракции имеет четко выраженный элювиально-иллювиальный тип, что служит диагностическим признаком протекающих процессов. Основные различия в строении профиля и свойствах почв обусловлены неоднородностью рельефа и связанного с ним перераспределения тепла и влаги, что оказывает влияние на развитие растительного покрова, интенсивность биологического круговорота, усиление гумусонакопления и ослабление текстурной дифференциации. В термическом режиме почв проявляются микроклиматические различия условий местообитания, вызванные особенностями инсоляции под древесным пологом, что, в свою очередь, отражается на варьировании содержания и запасов почвенного углерода. Гумусовый профиль рассматриваемых почв растянут в виде серии переходных горизонтов и достигает глубины 30–50 см в зависимости от условий формирования. Содержание общего углерода преобладает в верхней части профиля, заметно убывает с глубиной. Самые высокие запасы углерода отмечаются в кедровниках и ельниках на темно-серых почвах, а наименьшие зафиксированы в серых почвах осинника. Варьирование содержания углерода обусловлено, прежде всего, неоднородностью видовой и возрастной структуры древостоя лесных экосистем и, как следствие, различной активностью гумусово-аккумулятивного процесса. При смене древостоя с темнохвойного на лиственный происходит уменьшение содержания углерода, особенно в верхней части почвенного профиля, и его общих запасов, вызванное ускорением минерали-

зации органического вещества. Исследование показало, что пространственно-временная неоднородность и микроклиматические особенности разных лесных экосистем обуславливают внутриландшафтное варьирование содержания углерода и его запасов, что необходимо учитывать для мониторинга процессов углеродного баланса.

#### Список источников

1. Лукина Н.В., Гераськина А.П., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Куприн А.В., Чернов Т.И., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Горнова М.В. Биоразнообразии и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. 2020. № 4. С. 1–90. doi: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90
2. Dyukarev A.G., Klimova N.V., Nikiforov A.N., Chernova N.A., Kopysov S.G. Resilience of forest ecosystems to climate change // Contemporary Problems of Ecology. 2022. Vol. 29, № 3. PP. 304–314. doi: 10.15372/SEJ20220305
3. Сергиенко В.Г. Влияние ожидаемого изменения климата на баланс углерода и продуктивность экосистем в лесном секторе Российской Федерации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2018. № 1. С. 74–90. doi: 10.21178/2079–6080.2018.1.74
4. Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12, № 4. С. 631–650.
5. Замолодчиков Д.Г., Грабовский Д.И., Курц В.А. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. 2014. № 2 (39). С. 23–31.
6. Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity // Environmental Development. 2018. PP. 68–75. doi: 10.1016/j.envdev.2018.03.002
7. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н.В. Лукиной. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
8. Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. Красноярск : ТОО ЭКОС, 1994. 224 с.
9. Подвезенная М.А., Рыжова И.М. Изменчивость содержания и запасов углерода в почвах лесных биогеоценозов южной тайги // Лесоведение. 2011. № 1. С. 52–60.
10. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
11. Friedlingstein P., O'sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M. et al. Global carbon budget 2020 // Earth System Science Data. 2020. Vol. 20, № 4. PP. 3269–3340. doi: 10.5194/essd-12-3269-2020
12. Лашинский Н.Н., Писаренко О.Ю. Темнохвойные леса Западно-Сибирской равнины на южном пределе распространения // Растительность России. 2016. № 28. С. 89–107.
13. Kirpotin S.N., Peregona A.M., Byzaakay A.A. et al. Impacts of environmental change on biodiversity and vegetation dynamics in Siberia // Ambio. 2021. Vol. 50, № 11. PP. 1926–1952. doi: 10.1007/s13280-021-01570-6
14. Demidko D.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Kulakov S.S., Smirnov N.A., Chernova N.A. Factors contributing to the outbreaks of small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in Siberian stone pine forests of the West Siberian plain // Russian Journal of Biological Invasions. 2025. Vol. 16, № 2. PP. 193–213. doi: 10.1134/S2075111725700031

15. Kerchev I.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A., Grachev I.G., Nikiforov A.N., Kalashnikova D.A. Effects of an invasive bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. Outbreak on carbon pool dynamics in West Siberian dark coniferous forests // *Forests*. 2024. Vol. 15 (3). 524. doi: 10.3390/f15030542
16. Дюкарев А.Г., Копысов С.Г., Кривец С.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А. Опыт и первые результаты комплексных биогеоэкологических исследований в темнохвойных лесах юга таежной зоны Западной Сибири // *Сибирский лесной журнал*. 2024. № 3. С. 11–24. doi: 10.15372/SJFS20240303
17. Pan Y., Birdsey R.A., Fang J. et al. A large and persistent carbon sink in the World's forests // *Science*. 2011. Vol. 333. PP. 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
18. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // *Glob. Planet. Chang*. 2015. Vol. 128. PP. 24–30. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.02.004
19. Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool // *Carbon Manag.* 2014. Vol. 5. PP. 81–91. doi: 10.4155/cmt.13.77
20. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // *Почвоведение*. 2013. № 2. С. 123–132. doi: 10.7868/S0032180X13020123
21. Честных О.В., Грабовский В.И., Замолотчиков Д.Г. Оценка запасов почвенного углерода лесных районов России с использованием баз данных почвенных характеристик // *Лесоведение*. 2022. № 3. С. 227–238. doi: 10.31857/S0024114822030056
22. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // *Почвоведение*. 2020. № 3. С. 340–350. doi: 10.31857/S0032180X20030028
23. Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // *Лесоведение*. 1999. № 2. С. 13–21.
24. Подвезенная М.А., Рыжова И.М. Зависимость вариабельности запасов углерода в почве от пространственной структуры растительного покрова лесных биогеоценозов // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2010. № 4. С. 3–9.
25. Кузнецова А.И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // *Вопросы лесной науки*. 2021. № 4. С. 1–54. doi: 10.15372/SJFS20240303
26. 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.
27. Сорокин А.С., Телеснина В.М., Подвезенная М.А., Мешалкина Ю.Л., Манакова О.И., Самсонова В.П., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Чекин М.Р., Ильичев И.А., Кулачкова С.А., Филиппова О.И. Оценка основных пулов углерода в смешанных лесах Московской области // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2025. Т. 80, № 3. С. 30–41. doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-30-41
28. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Семенюк О.В. Оценка запасов углерода и потенциала продуцирования CO<sub>2</sub> почвами хвойно-широколиственных лесов // *Почвоведение*. 2023. № 9. С. 1143–1154. doi: 10.31857/S0032180X23600713
29. Дюкарев А.Г., Климова Н.В., Копысов С.Г., Никифоров А.Н., Чернова Н.А. Сукцессионная динамика почв и напочвенного покрова в темнохвойных лесах на юге таежной зоны Западной Сибири // *Почвы и окружающая среда*. 2023. С. 757–761. doi: 10.31251/conf1-2023
30. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Дюкарев Е.А. Температурный режим глубокоподзолённых почв Томь-Яйского междуречья // *Современные проблемы генезиса, географии и картографии почв: материалы науч. конф., Томск. Екатеринбург, 2011. С. 35–38.*

31. Петров А.И., Евсеева Н.С., Каширо М.А. Динамика характеристик снежного покрова в ландшафтах Томь-Яйского междуречья // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 371. С. 183–188.
32. Добровольский Г.В., Урусевская И.С., Алябина И.О. Карта почвенно-географического районирования России масштаба 1:15 000 000 // Доклады по экологическому почвоведению. 2008. Вып. 8, № 2. С. 1–18.
33. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18.08.2014 № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации». М. : Минприроды РФ, 2014.
34. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д., Березин А.Е., Лыготин В.А., Мульдьяров Е.Я. Природно-ресурсное районирование Томской области. Томск : Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 40 с.
35. Ильина И.С., Лапшина Е.И., Лавренко Н.Н. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск : Наука. Сиб. отд., 1985. 250 с.
36. Коломыц Э.Г. Борейальный экотон и географическая зональность : атлас-монография. М. : Наука, 2005. 390 с.
37. Гаджиев И.М. Эволюция почв южной тайги Западной Сибири. Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1982. 278 с.
38. Шейн Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309–317.
39. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
40. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna, Austria : International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
41. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М. : Стандартинформ, 2018. 3 с.
42. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
43. ГОСТ 5180–2015. Методы лабораторного определения физических характеристик. М. : Стандартинформ, 2016. 23 с.
44. Артемьева З.С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М. : ГЕОС, 2010. 240 с.
45. Дюкарев А.Г. Ландшафтно-динамические аспекты таежного почвообразования в Западной Сибири. Томск : Изд-во НТЛ, 2005. 283 с.
46. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М. : Наука, 1996. 256 с.
47. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Почвы припоселковых кедровников // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 2 (22). С. 7–22.

## References

1. Lukina NV, Geraskina AP, Gornov AV, Shevchenko NE, Kuprin AV, Chernov TI, Chumachenko SI, Shanin VN, Kuznetsova AI, Tebenkova DN, Gornova MV. Biodiversity and climate regulating functions of forests: Current issues and prospects for research. *Forest Science Issues*. 2020;3(4):1-90. In Russian, English summary. doi: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90
2. Dyukarev AG, Klimova NV, Nikiforov AN, Chernova NA, Kopysov SG. Resilience of forest ecosystems to climate change. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022;29(3): 304-314. doi: 10.15372/SEJ20220305

3. Sergienko VG. The expected impact of climate change on carbon balance and ecosystem productivity in the forest sector of the Russian Federation. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2018;1:74-90. doi: 10.21178/2079-6080.2018.1.74
4. Vaganov EA, Vedrova EF, Verkhovets SV, Efremov SP, Efremova TT, Kruglov VB, Onuchin AA, Sukhinin AI, Shibistova OB. Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle. *Contemporary Problems of Ecology*. 2005;12(4):631-650.
5. Zamolodchikov DG, Grabovskiy DI, Kurts VA. Upravlenie balansom ugleroda lesov Rossii: proshloe, nastoyashchee i budushchee [Managing the carbon balance of Russia's forests: Past, present, and future]. *Sustainable Forestry*. 2014;2(39):23-31. In Russian
6. Filipchuk A, Moiseev B, Malysheva N, Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity. *Environmental Development*. 2018;26:68-75. doi: 10.1016/j.envdev.2018.03.002
7. Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suktsessionnyy status lesov [Carbon accumulation in forest soils and forest succession status]. Lukina NV, editor. Moscow: KMK Scientific Press Publ.; 2018. 232 p. In Russian
8. Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii [Carbon in the ecosystems of Russia's forests and wetlands]. Alekseev VA, Berdsi RA, editors. Krasnoyarsk: TOO EKOS Publ.; 1994. 224 p. In Russian
9. Podvezennaya MA, Ryzhova IM. Variation of carbon content and reserves in soils of forest biogeocenoses in the Southern taiga. *Forest Science*. 2011;1:52-60. In Russian, English summary
10. Chestnykh OV, Zamolodchikov DG, Utkin AI. Reserves of biological carbon and nitrogen in soils of Russian forest fund. *Forest Science*. 2004;4:30-42. In Russian, English summary
11. Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones MW, Andrew RM, et al. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020;20:3269-3340. doi: 10.5194/essd-12-3269-2020
12. Lashchinskiy NN, Pisarenko OYu. Dark coniferous forests of the West Siberian plain on their southern limit. *Vegetation of Russia*. 2016;28:89-107. In Russian, English summary
13. Kirpotin SN, Peregon AM, Byzaakay AA, et al. Impacts of environmental change on biodiversity and vegetation dynamics in Siberia. *Ambio*. 2021;50(11):1926-1952. doi: 10.1007/s13280-021-01570-6
14. Demidko DA, Kerchev IA, Bisirova EM, Kulakov SS, Smirnov N.A, Chernova NA. Factors contributing to the outbreaks of small Spruce Bark Beetle *Ips amitinus* (Eichhoff) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in Siberian stone pine forests of the West Siberian plain. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2025;16(2):193-213. doi: 10.1134/S2075111725700031
15. Kerchev IA, Bisirova EM, Smirnov NA, Grachev IG, Nikiforov AN, Kalashnikova DA. Effects of an invasive bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. outbreak on carbon pool dynamics in West Siberian dark coniferous forests. *Forests* 2024;15(3):524. doi: 10.3390/f15030542
16. Dyukarev AG, Kopysov SG, Krivets SA, Pats EN, Chernova NA. An experience and first results of complex biogeocenological studies in dark coniferous forests in the south of the taiga zone of Western Siberia. *Siberian Journal of Forest Science*. 2024;3:11-24. In Russian, English summary. doi: 10.15372/SJFS20240303
17. Pan Y, Birdsey RA, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the World's forests. *Science*. 2011;333:988-993. doi: 10.1126/science.1201609
18. Bradshaw CJA, Warkentin IG. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Glob. Planet. Chang*. 2015;128:24-30. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.02.004
19. Scharlemann JP, Tanner EV, Hiederer R, Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Manag*. 2014;5:81-91. doi: 10.4155/cmt.13.77
20. Shchepashchenko DG, Mukhortova LV, Shvidenko AZ, Vedrova EF. Organic carbon reserves in Russian soils. *Eurasian Soil Science*. 2013;2:123. In Russian, English summary. doi: 10.7868/S0032180X13020123

21. Chestnykh OV, Grabovskiy VI, Zamolodchikov DG. Estimate of the soil carbon stock of Russia's forested regions using the soil properties databases. *Forest Science*. 2022;3:227-238. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S0024114822030056
22. Chernova OV, Ryzhova IM, Podvezennaya MA. Assessment of organic carbon pools in forest soils on a regional scale. *Eurasian Soil Science*. 2020;3:340-350. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S0032180X20030028
23. Chestnykh OV, Zamolodchikov DG, Utkin AI, Korovin GN. Distribution of organic carbon reserves in the soils of Russian forests. *Forest Science*. 1999;2:13-21. In Russian, English summary
24. Podvezennaya MA, Ryzhova IM. Relationships between the variability of soil carbon reserves and the spatial structure of plant cover in forest biogeocenoses. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2010;4:3-9. In Russian, English summary
25. Kuznetsova AI. Influence of vegetation on soil carbon stocks in forests (review). *Forest Science Issues*. 2021;4:1-54. In Russian, English summary. doi: 10.15372/SJFS20240303
26. Koptsik GN, Koptsik SV, Kupriyanova IV, Kadulin MS, Smirnova IE. Estimation of carbon stocks in soils of forest ecosystems as a basis for monitoring climatically active substances. *Eurasian Soil Science*. 2023;56(12):2009-2023. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S0032180X23601329
27. Sorokin AC, Telesnina VM, Podvezennaya MA, Meshalkina YuL, Manakova OI, Samsonova VP, Kondrashkina MI, Dyad'kina SE, Chekin MR, Il'ichev IA, Kulachkova SA, Filippova OI. An assessment of the most important carbon pools in the mixed forests of the Moscow region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2025; 80(3):30-41. In Russian, English summary. doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-30-41
28. Ryzhova IM, Podvezennaya MA, Telesnina VM, Bogatyrev LG, Semenyuk OV. Assessment of carbon stock and CO<sub>2</sub> production potential for soils of coniferous-broadleaved forests. *Eurasian Soil Science*. 2023;9:1143-1154. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S0032180X23600713
29. Dyukarev AG, Klimova NV, Kopysov SG, Nikiforov AN, Chernova NA. Successional dynamics of soils and ground cover in dark coniferous forests in the south of the taiga zone of Western Siberia. In: *Pochvy i okruzhayushchaya sreda. Materialy nauch. konf.* [Soils and the environment. Proc. of the Sci. Conf. (Novosibirsk, Russia, 2-6 October, 2023)]. Institute of Soil Science and Agrochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ.; 2023:757-761. In Russian. doi: 10.31251/conf1-2023
30. Dyukarev AG, Pologova NN, Dyukarev EA. Temperaturnyy rezhim glubokopodzolennykh pochv Tom'-Yayskogo mezhdurech'ya [Temperature regime of deeply podzolized soils in the Tom-Yai interfluvium]. In: *Sovremennyye problemy genezisa, geografii i kartografii pochv* [Modern Problems of Soil Genesis, Geography, and Cartography. Proc. of the Sci. Conf. (Tomsk, 21-23 September, 2011)]. Tomsk: Tomsk Publ.; 2011:35-38. In Russian
31. Petrov AI, Evseeva NS, Kashiro MA. Dynamics of snow cover characteristics in landscapes of the Tom-Yaya interfluvium. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013;371:183-188. In Russian, English summary
32. Dobrovolskiy GV, Urusevskaya IS, Alyabina IO. The soil-geographical zoning map of Russia at a scale of 1:15 000 000. *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu*. 2008;8(2):1-18. In Russian
33. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated 08.18.2014 No. 367 "On approval of the List of forest-growing inhabitants of the Russian Federation and the List of forest areas of the Russian Federation." Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2014.
34. Dyukarev AG, Pologova NN, Lapshina ED, Berezin AE, L'gotin VA, Mul'diyarov EY. Prirodno-resursnoe rayonirovanie Tomskoy oblasti [Natural and resource zoning of the Tomsk Region]. Tomsk: Spektr Publ.; 1997. 40 p. In Russian

35. Il'ina IS, Lapshina EI, Lavrenko NN. Rastitel'nyy pokrov Zapadno-Sibirskoy ravniny [Vegetation cover of the West Siberian Plain]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. 250 p. In Russian
36. Kolomyts EG. Boreal ecotone and geographic zonality. Moscow: Nauka Publ.; 2005. 390 p. In Russian
37. Gadzhiev IM. Evolyutsiya pochv yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri [Evolution of the Southern Taiga Soils of Western Siberia]: Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie Publ.; 1982. 278 p. In Russian
38. Shein EV. Granulometric composition of soils: problems of research methods, interpretation of results, and classifications. *Eurasian Soil Science*. 2009;3:309-317. In Russian, English summary
39. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of Russian soils]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 341 p. In Russian
40. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria; 2022. 234 p.
41. GOST 17.4.3.01-2017. Nature protection. Soils. General requirement for sampling. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. 3 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508> (access 18.12.2024).
42. Theory and practice chemical analysis of soils. Vorobyova LA, editor. Moscow: GEOS; 2006. 400 p.
43. GOST 5180-2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standartinform, Publ.; 2016. 23 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200126371> (access 18.12.2024).
44. Artem'eva ZS. Organicheskoe veshchestvo i granulometricheskaya sistema pochvy [Organic matter and soil granulometric system]. Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 240 p. In Russian
45. Dyukarev AG. Landshaftno-dinamicheskie aspekty taezhnogo pochvoobrazovaniya v Zapadnoy Sibiri [Landscape-dynamic aspects of taiga soil formation in Western Siberia]. Tomsk: Izd-vo NTL Publ.; 2005. 283 p. In Russian
46. Orlov DS, Biryukova ON, Sukhanova NI. Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiyskoy Federatsii [Organic matter of the soils of the Russian Federation]. Moscow: Nauka Publ.; 1996. 256 p. In Russian
47. Dyukarev AG, Pologova NN. Soils of *Pinus sibirica* forests near settlements. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2013;2(22):7-22. In Russian, English summary

**Информация об авторах:**

**Раудина Татьяна Валериевна**, канд. биол. наук, доцент кафедры почвоведения и экологии почв, Национальный исследовательский Томский государственный университет; в. н. с. лаборатории мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8953-883X>

E-mail: [tanya\\_raud@mail.ru](mailto:tanya_raud@mail.ru)

**Копысов Сергей Геннадьевич**, канд. геогр. наук, в. н. с. лаборатории мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент кафедры гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-9364>

E-mail: [wosypok@mail.ru](mailto:wosypok@mail.ru)

**Чернова Наталья Александровна**, канд. биол. наук, с. н. с. лаборатории мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО

РАН; доцент кафедры ботаники, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1951-7192>

E-mail: [naitina79@mail.ru](mailto:naitina79@mail.ru)

**Крупин Александр Максимович**, инженер лаборатории мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск, Россия).

E-mail: [krupinam@rambler.ru](mailto:krupinam@rambler.ru)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Tatiana V. Raudina**, Cand. Sci. (Biol.), leading researcher of the Laboratory of the Forest Ecosystem Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS; Assoc. Prof., Department of Soil Science and Soil Ecology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8953-883X>

E-mail: [tanya\\_raud@mail.ru](mailto:tanya_raud@mail.ru)

**Sergey G. Kopysov**, Cand. Sci. (Geography), leading researcher of the Laboratory of the Forest Ecosystem Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS; Assoc. Prof., Department of Hydrology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-9364>

E-mail: [wosypok@mail.ru](mailto:wosypok@mail.ru)

**Natalia A. Chernova**, Cand. Sci. (Biol.), senior researcher of the Laboratory of the Forest Ecosystem Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS; Assoc. Prof., Department of Botany, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1951-7192>

E-mail: [naitina79@mail.ru](mailto:naitina79@mail.ru)

**Aleksandr M. Krupin**, research engineer of the Laboratory of the Forest Ecosystem Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: [krupinam@rambler.ru](mailto:krupinam@rambler.ru)

*The Authors declare no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 25.06.2025;  
одобрена после рецензирования 23.10.2025; принята к публикации 16.12.2025.*

*The article was submitted 25.06.2025;  
approved after reviewing 23.10.2025; accepted for publication 16.12.2025.*