

Научная статья  
УДК 631.4  
doi: 10.17223/19988591/72/3

## Запасы углерода в почвах естественной и постагрогенной лесных экосистем и динамика эмиссии CO<sub>2</sub> на территории карбонового полигона «BioCarbon» (г. Новосибирск)

Наталья Александровна Соколова<sup>1</sup>,  
Софья Александровна Куйдина<sup>2</sup>, Денис Александрович Соколов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> *Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН,  
Новосибирск, Россия*

<sup>1, 2</sup> *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Новосибирск, Россия*

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8927-4280>, [nsokolova@issa-siberia.ru](mailto:nsokolova@issa-siberia.ru)

<sup>2</sup> [s.kuidina@g.nsu.ru](mailto:s.kuidina@g.nsu.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7859-7244>, [sokolovdenis@issa-siberia.ru](mailto:sokolovdenis@issa-siberia.ru)

**Аннотация.** Для территорий Западной Сибири исследования пулов углерода и в особенности его эмиссии в лесах крайне немногочисленны. В связи с этим целью исследования было сравнение пулов углерода и динамика эмиссии CO<sub>2</sub> в естественном и молодом вторичном березняках на территории карбонового полигона «BioCarbon» (г. Новосибирск). Общий углерод и азот определяли методом сухого сжигания на CHN-анализаторе 2400 Series II. Содержание органического углерода почв устанавливали методом бихроматного окисления (метод Тюрина). Запасы углерода в почвах определялись расчетным путем в слое 0–20, 0–50 и 0–100 см. Измерения потоков CO<sub>2</sub> с поверхности почвы проводились ежемесячно с мая по сентябрь в 2023–2024 гг. при помощи портативного инфракрасного газоанализатора LI-COR 8250. Запасы углерода в почве под спелым березняком в слое 0–20 см составили 38 т/га, в слое 0–50 см – 46 т/га. В почве залежи под вторичным березняком запасы углерода в слое 0–20 см были меньше (33 т/га), но в полуметровой толще превышали показатели естественной почвы (62 т/га). В почве под естественным лесом запасы углерода в подстилке (2,2 т/га) выше, чем под вторичным лесом (1,8 т/га). В среднем за два года наблюдения эмиссия CO<sub>2</sub> была минимальной в мае (2,1–3,3 мкмоль/м<sup>2</sup>с); максимальная интенсивность потока CO<sub>2</sub> с поверхности почвы под спелым березняком достигается в июле (13,3 мкмоль/м<sup>2</sup>с), тогда как под вторичным лесом максимальная эмиссия CO<sub>2</sub> отмечена в июне (10,8 мкмоль/м<sup>2</sup>с). Исследования показывают, что агрогенная трансформация свойств дерново-подзолистых почв приводит к повышению чувствительности дыхания почв к изменению гидротермических условий и вариабельности потока CO<sub>2</sub> по годам.

**Ключевые слова:** запасы углерода, лесные экосистемы, эмиссия углекислого газа, постагрогенное восстановление, температура почв

**Источник финансирования:** работа выполнена при поддержке проекта Министерства образования и науки Российской Федерации № FSUS-2024-0024 и по договору о НИР № 1162-2022 от 01.12.2022 г.

Для цитирования: Соколова Н.А., Куйдина С.А., Соколов Д.А. Запасы углерода в почвах естественной и постагрогенной лесных экосистем и динамика эмиссии CO<sub>2</sub> на территории карбонового полигона «BioCarbon» (г. Новосибирск) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 72. С. 60–81. doi: 10.17223/19988591/72/3

Original article

doi: 10.17223/19988591/72/3

## Carbon pools emissions in the soils of natural and post-agrogenic forest ecosystems and the dynamics of CO<sub>2</sub> of the “BioCarbon” carbon polygon (Novosibirsk)

Natalia A. Sokolova<sup>1</sup>, Sofia A. Kuydina<sup>2</sup>, Denis A. Sokolov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> *Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>1, 2</sup> *Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8927-4280>, [nsokolova@issa-siberia.ru](mailto:nsokolova@issa-siberia.ru)

<sup>2</sup> [s.kuidina@g.nsu.ru](mailto:s.kuidina@g.nsu.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7859-7244>, [sokolovdenis@issa-siberia.ru](mailto:sokolovdenis@issa-siberia.ru)

**Summary.** In Western Siberia, studies on carbon pools in forest ecosystems, particularly regarding carbon dioxide emissions from natural and post-agrogenic forests, are extremely limited. Therefore, the aim of this study was to compare carbon pools and examine the dynamics of CO<sub>2</sub> emissions in natural and secondary birch forests within the “BioCarbon” carbon polygon in Novosibirsk Oblast. The research was conducted from 2022 to 2024 on test areas of the “BioCarbon” carbon polygon located at the Central Siberian Botanical Garden site, under natural birch forest and approximately 20-year-old fallow land. The test areas (TA2, natural birch forest, and TA4, secondary birch forest) are situated within the transition zone from the upper floodplain terrace of the Ob River to the subaerial complex of the denudation-accumulative Pre-Salair plain (See Fig. 1). The soils are classified as Albic Luvisols (loamic) (See Fig. 2). Bulk density, porosity, and soil moisture content were determined using the thermostatic-weight method. Total carbon and nitrogen were measured at the ISSA SB RAS testing laboratory by dry combustion using a 2400 Series II CHN analyzer. Soil organic carbon (SOC) content was determined by wet oxidation with K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> in 50% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. Carbon pools in soils were calculated for the 0-20, 0-50, and 0-100 cm layers. Carbon pools in the litter were measured using the frame-square method according to the Ministry of Natural Resources’ recommendations. CO<sub>2</sub> fluxes from the soil surface were measured once monthly in the morning from May to September using a portable LI-COR 8250 infrared gas analyzer. During greenhouse gas flux measurements, soil temperature and humidity sensors were used at depths of 5-10 cm. The total carbon content in the studied soils varied within a relatively narrow range, not exceeding 2.3%. Notably, the soil under the natural forest exhibited a more pronounced decrease in soil organic carbon content with depth, whereas the agrogenically transformed soil at the TA4 site showed a gradual decrease in carbon content down the profile (See Table 1). The total carbon pool in the soil under the natural birch forest was 38 t/ha in the 0-20 cm layer and 46 t/ha in the 0-50 cm layer. In contrast, under the secondary birch forest, the total carbon pool was lower in the 0-20 cm layer (33 t/ha) but exceeded that of the natural soil in the 0-50 cm layer (62 t/ha). Conversely, the carbon pool in the litter was higher under the natural forest (2.2 t/ha) than under the secondary forest (1.8 t/ha). Over the two years of observation, average CO<sub>2</sub> emissions were minimal in May (2.1-3.3 μmol/m<sup>2</sup>s). The maximum

CO<sub>2</sub> flux from the soil surface under the natural birch forest occurred in July (13.3 μmol/m<sup>2</sup>s), whereas under the secondary forest, the peak emission was observed in June (10.8 μmol/m<sup>2</sup>s). By September, emission values declined again (See Fig. 3). Hydrothermal conditions in the topsoil varied across the test sites. Soil properties, which influence these conditions, affect the CO<sub>2</sub> flux from the soil surface during the growing season. This relationship is demonstrated by the dependence of CO<sub>2</sub> flux on temperature in the 0-5 cm soil layer over two years (See Fig. 4). Thus, the incorporation of infertile soils within the Novosibirsk Scientific Center into agricultural use has led to long-term changes in their properties. The agrogenic transformation of soil properties increases the sensitivity of soil respiration to changes in hydrothermal conditions and contributes to greater variability in CO<sub>2</sub> flux over the years.

*The article contains 4 Figures, 1 Tables, 50 References.*

**Keywords:** carbon pools, forest ecosystems, carbon dioxide emissions, postagrogenic restoration, soil temperature

**Fundings:** the work was carried out with the support of the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSUS-2024-0024 and under the research agreement No. 1162-2022 dated 12/01/2022.

**For citation:** Sokolova NA, Kuydina SA, Sokolov DA. Carbon pools emissions in the soils of natural and post-agrogenic forest ecosystems and the dynamics of CO<sub>2</sub> of the “BioCarbon” carbon polygon (Novosibirsk). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;72:60-81. doi: 10.17223/19988591/72/3

## Введение

В связи с деятельностью человека концентрации парниковых газов в атмосфере возрастают быстрее, чем происходит секвестрация углерода в биосфере. По мнению большинства ученых, это способствует ускорению глобального потепления, сопряженного с увеличением количества климатических аномалий на региональном уровне, что имеет негативные как экологические, так и экономические последствия [1]. Глобальные тренды декарбонизации экономики, направленные на уменьшение последствий климатических изменений, открывают для нашей страны новые возможности. Учитывая огромный потенциал Российской Федерации в секвестрации углерода биологическими системами, развертывание сети карбоновых полигонов, а также карбоновых ферм может стать востребованным высокотехнологичным бизнесом [2]. Сегодня на территории России в различных природных и агроэкосистемах организована сеть карбоновых полигонов с целью мониторинга процессов эмиссии и депонирования соединений углерода, выступающих источниками парниковых газов. Особенно велика роль почв как природного долговременного резервуара органического углерода. Кроме того, карбоновые полигоны предоставляют возможность для унификации методологии исследований и воспроизводимости их результатов. Так, предложен ряд параметров количественной и качественной оценки почвенного органического вещества, для определения которых существуют утвержденные стандартные методики [3].

Ранее показано, что в бореальных лесах скорость круговорота углерода ниже, чем в других экосистемах, поэтому сокращение площади лесов явля-

ется одним из главных факторов увеличения концентраций парниковых газов в атмосфере, а накопление запасов углерода в почве и древесине становится приоритетной задачей. На примере опыта разных стран выявлено, что оптимальной стратегией консервации углерода является сохранение естественных лесов, а также управление рубками и содействие лесовосстановлению [4]. Исследования запасов, секвестрации и потерь углерода в лесных экосистемах России в настоящее время ведутся на 19 разных карбоновых полигонах [5–8]. В Новосибирской области с 2022 г. ведутся исследования лесных экосистем на карбоновом полигоне «BioCarbon».

Опыт прогнозного моделирования углеродного баланса естественных лесных экосистем в среднем Поволжье показывает, что при существующем климатическом тренде до 2100 г. в березняках и осинниках будут преобладать потери углерода из экосистем, тогда как в молодых вторичных лесах, напротив, будет происходить его аккумуляция [9]. Моделирование динамики пулов углерода в лесных экосистемах южной тайги в зависимости от различных факторов показывает, что при возрастании температур воздуха во всех типах леса продуктивность экосистем возрастает. При этом возрастает и скорость минерализации органического вещества в почвах и уменьшается его запас в подстилке [10]. В вышеперечисленных исследованиях на территории Европейской части России (ЕТР) березовые леса рассматриваются в качестве вторичных, т.е. переходных после антропогенного воздействия к зональным типам леса. На территории Западной Сибири березовые леса являются коренными типами леса [11], поэтому исследования запасов углерода в спелых березняках могут быть экстраполированы на значительные территории.

Динамика различных пулов углерода при восстановлении лесных экосистем после антропогенного воздействия также достаточно хорошо изучена для территории Восточной Европы и ЕТР. Показано, что на постагрогенных территориях происходит восстановление растительности и экологических функций почв [12–15]. При постагрогенном восстановлении происходит сначала увеличение, а затем снижение скорости круговорота углерода в экосистеме до достижения устойчивого состояния [16, 17]. Это связывается с запасами углерода в почве: сначала идет минерализация органического углерода удобрений, а затем накопление подстилки и подземной фитомассы и увеличение общего пула углерода в почвах. Внутрисезонная динамика почвенного дыхания зависит в первую очередь от температуры почвы [18]. Кроме того, в связи с увеличением разнообразия растительности возрастают неоднородность состава подстилки, разнообразие и специфичность почвенных ферментов [19].

Для территорий Западной Сибири исследования пулов углерода в лесных экосистемах и в особенности его эмиссии в естественных и постагрогенных лесах крайне немногочисленны. В связи с этим целью настоящего исследования было сравнение пулов углерода и динамика эмиссии CO<sub>2</sub> в естественном и молодом вторичном березняках на территории карбонового полигона «BioCarbon» в Новосибирской области.

## Материалы и методы

Карбоновый полигон «BioCarbon», расположенный в Новосибирской области, представляет собой четыре постоянных пробных площади, три из которых находятся в пределах участка лесоклиматических исследований Центрального сибирского ботанического сада и являются фрагментами зональных травяных березовых и осиновых лесов Западной Сибири на дренированных возвышенных равнинах. Две пробных площади представлены березовыми лесами – спелым березняком и вторичным березняком на залежи возрастом около 20 лет (рис. 1).

Пробные площади № 2 (ПП2, спелый березовый лес) и № 4 (ПП4, вторичный березовый лес) расположены в пределах переходной зоны от верхней надпойменной террасы реки Обь, сложенной песчано-супесчаными гляциально-паводковыми отложениями к субэразальному комплексу денудационно-аккумулятивной Присалаирской равнины [20].

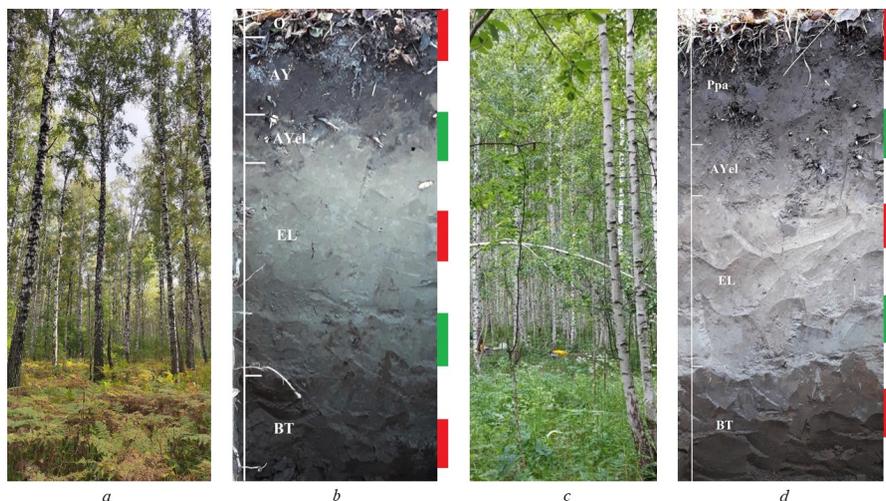
Район исследований относится к лесостепной зоне Западной Сибири, где зональными являются серые почвы, оподзоленные и выщелоченные черноземы. В то же время особенности почвенного покрова пробных площадок карбонового полигона характеризуются азональностью в связи с близостью к долине р. Обь и влиянием литолого-геоморфологической специфики территории Новосибирского научного центра. Почвы на пробных площадях принадлежат к одному отделу: дерново-подзолистая типичная среднетощая сверхглубокоосветленная супесчаная на ПП2 и агродерново-подзолистая типичная мощная глубоко-контактно-осветленная легкосуглинистая постагрогенная на ПП4.



Рис. 1. Схема расположения района исследований  
[Fig. 1. The location of the research area]

В пределах пробных площадей, в связи с расположением на выровненных участках и невыраженностью нанорельефа, строение профиля и основные свойства почв варьируют незначительно. Почва под спелым березняком имеет формулу профиля АУ–ЕЛ–ВТ, типичную для дерново-подзолистых почв региона, а под молодым березняком, соответственно, Рра–ЕЛ–ВТ (рис. 2). Пробная площадь № 4 расположена на участке, в 90-е гг. XX в. использовавшемся под посадки картофеля и овощных культур, но с начала 2000-х гг. заброшенном и подверженном зарастанию лесом.

Доминирует в древесном ярусе на обеих пробных площадях береза повислая (*Betula pendula* Roth) с разницей в высоте деревьев (20–30 м в спелом березняке, 10–15 м во вторичном) и количестве деревьев на пробную площадь (от 80 в спелом березняке до 1000 во вторичном). Подлесок в спелом березняке представлен рябиной (*Sorbus sibirica* Hedl.) и черемухой (*Padus avium* Mill.), тогда как во вторичном березняке как таковой отсутствует, за исключением малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.), вероятно, занесенной из расположенных поблизости дачных сообществ. В травянистом ярусе спелого березняка доминируют традиционные для травяных лесов Сибири сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.) и орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn). В травянистом ярусе вторичного березняка наряду с лесными видами (медуница мягчайшая (*Pulmonaria mollissima* A. Kern.), грушанка малая (*Pyrola minor* L.), чина весенняя (*Lathyrus vernus* L. Bernh.), хвощ (*Equisetum sylvaticum* L.)) присутствуют синантропные виды (валериана лекарственная (*Valeriana officinalis* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Desv.), недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora* DC.), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (L.) Scop.)).



**Рис. 2.** Фото пробных площадей и профили почв: *a, b* – ПП2, спелый березняк, дерново-подзолистая; *c, d* – ПП4, вторичный березняк, агродерново-подзолистая постагрогенная

[**Fig. 2.** Photos of test areas (TA) and soil profiles: *a, b* - TA2, natural birch forest; Albic Luvisol; *c, d* - TA4, secondary birch forest on fallow; Plaggic Albic Luvisol]

Полевые исследования почв выполнялись в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, методических указаний и рекомендаций по обследованию и оценке состояния почвенного и растительного покрова, используемых при почвенных, агрохимических и экологических изысканиях, установлении загрязнения почв и растений, мониторинге загрязнения окружающей среды. Диагностику почв выполняли по «Классификации и диагностике почв России» [21].

На пробных площадках отбирались смешанные пробы из генетических горизонтов почвенных разрезов, в соответствии с действующими нормативными документами [22–24]. В лабораторных условиях отобранные образцы сушили на воздухе при комнатной температуре. Затем проводили рассев всех образцов на стандартных ситах с диаметром ячеек 1 мм. Из отсеянных образцов каждой фракции вручную отбирали и взвешивали грубые корни диаметром более 1 мм [25]. Общие запасы корней определялись расчетным путем исходя из их содержания в образце и параметров почвы (объемный вес). Содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) и азота ( $N_{\text{общ}}$ ) определяли в испытательной лаборатории ИПА СО РАН методом сухого сжигания при помощи CHN-анализатора 2400 Series II (Perkin Elmer, США). Содержание углерода органических соединений ( $C_{\text{орг}}$ ) устанавливали методом мокрого сжигания 0,4 н  $K_2Cr_2O_7$  в 50% растворе  $H_2SO_4$  (метод Тюрина в модификации согласно [26]). Качество органического вещества почв оценивали тремя способами: 1) по отношению  $C_{\text{общ}}/N_{\text{общ}}$ ; 2) по отношению  $C_{\text{орг}}$  и  $C_{\text{общ}}$  при расчете степени внутримолекулярной окисленности [27, 28]; 3) при окислительном фракционировании. В последнем случае в зависимости от времени нагревания и температуры в  $C_{\text{орг}}$  выделяются фракции трудно-, средне- и легкоокисляемых соединений [29].

Плотность сложения, порозность и содержание влаги определяли термостатно-весовым методом в двукратной повторности [30].

Запасы углерода в почвах определялись расчетным путем в т/га в слоях 0–20, 0–50 и 0–100 см исходя из содержания общего или органического углерода и физических свойств почв (плотности сложения) [31]. Расчет производился по формуле:

$$З(C) = C_{\text{общ}} \times dV \times h,$$

где  $З(C)$  – запасы углерода;  $C_{\text{общ}}$  – содержание углерода в генетическом горизонте, %;  $dV$  – плотность сложения горизонта,  $г/см^3$ ;  $h$  – мощность горизонта, см.

Запасы углерода в подстилке измеряли методом рамок-квадратов: снимали слой подстилки в пределах квадрата  $0,5 \times 0,5$  м, определяли его массу, содержание влаги, а затем по ГОСТ 23740-2016 содержание органического вещества и углерода, согласно рекомендациям Минприроды [32].

Измерение общего дыхания почвы ( $R$ ), включающего дыхание как корней растений, так и гетеротрофов, на пробных площадях Карбонового полигона «BioCarbon» проводилось в 2023 и 2024 гг. Измерения проводились в утренние часы ежемесячно с июня по сентябрь в 2023 г., с мая по сентябрь в 2024 г. Предварительно в почву на глубину 10 см были врезаны

стационарные кольца, фиксирующие объем исследуемого воздуха. При помощи портативного инфракрасного газоанализатора LI-COR 8250 регистрировали потоки углекислого газа с поверхности почвы. Закрытые камеры размещали как под кронами деревьев, так и в межкрупном пространстве (в двух повторностях). Во время измерения потоков парниковых газов при помощи сенсоров учитывали температуру и влажность почвы в слое 5–10 см.

Для непрерывной регистрации температур верхнего слоя почвы организована система мониторинга при помощи автоматических логгеров Termochron на глубине 5, 10 и 20 см. Одновременно фиксировали температуру воздуха под пологом леса на высоте 2 м над уровнем почвы.

Статистическую обработку данных проводили в программах PAST v.2.17 и MS Excel. В таблице приведены средние значения, стандартные ошибки (*SE*); на графиках – минимальные, максимальные, медианные значения, 25 и 75 перцентили.

### Результаты исследования и обсуждение

Характерной морфологической особенностью почв исследуемых экосистем является наличие мощных элювиальных горизонтов. Серогумусовый горизонт (AY) дерново-подзолистой почвы имеет относительно небольшую мощность (12 см). Преобладание серых и светло-серых оттенков в цветовой гамме гумусовых горизонтов (AY, P) свидетельствует о низком содержании органических веществ, что является нормой для дерново-подзолистых почв. Агродерново-подзолистая почва (под вторичным березняком) характеризуется более мощным гумусовым горизонтом и более насыщенной темно-серой окраской в верхней части профиля. Дифференциация профиля ярко выражена по окраске, грансоставу и плотности, несмотря на легкий (супесчано-легкосуглинистый) состав.

Более мощный гумусовый горизонт в почвах под вторичным березняком является, очевидно, следствием интенсивного агрогенного использования с гомогенизацией свойств пахотного горизонта. Это подтверждается небольшим уплотнением в нижней части гумусового горизонта по сравнению с выше- и нижележащей толщей, а также распределением содержания общего и органического углерода по профилю почв (табл. 1). В связи с морфологической неоднородностью в нижней части серогумусового и ниже агрогенного горизонтов выделен подгоризонт AYel.

Проведенные исследования показали, что содержание общего углерода в изученных почвах варьирует в сравнительно узком диапазоне значений и не превышает 2,3%. Максимальные значения отмечаются в серогумусовом (AY) и агрогенном (Pra) горизонтах (от 1,5 до 2,3%). Минимальное количество  $C_{\text{общ}}$  ожидаемо фиксируется в элювиальных (EL) и текстурно-дифференцированных (BT) горизонтах, где значения опускаются до 0,2%. В переходных (AYel) подгоризонтах содержание общего углерода составляет 1,0–1,1%. При этом следует отметить, что в агрогенно преобразованной почве участка ПП4 наблюдается постепенное снижение содержания углерода вниз по профилю (табл. 1).

Таблица 1 [Table 1]

**Содержание общего и органического углерода и различных фракций органического вещества**  
 [The content of total and organic carbon and various fractions of organic matter]

Горизонт [Horizon]	Глубина отбора проб, см [Depth, cm]	Плотность слоложения, г/см <sup>3</sup> [Bulk density, g/cm <sup>3</sup> ]	C <sub>орг</sub> , % [SOC, %]	C <sub>общ</sub> , % [C <sub>tot</sub> , %]	C <sub>общ</sub> /N <sub>общ</sub> [C <sub>tot</sub> /N <sub>tot</sub> ]	СВО*, % [DIO*, %]	Содержание [Content]		
							трудно- [hard-]	средне- [medium]	легко- [easy]
ПП 2. Дерново-подзолистая почва под спелым березняком									
О	0-3	0,10 ± 0,02	30,08 ± 0,06**	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
AY	3-10	0,87 ± 0,07	1,88 ± 0,38	2,33 ± 0,47	15	19,3	0,0	61,2	38,8
AYel	10-20	1,12 ± 0,06	0,99 ± 0,20	1,10 ± 0,22	18	10,0	0,0	65,7	34,3
EL	35-45	1,21 ± 0,05	0,25 ± 0,05	0,25 ± 0,05	20	0,0	31,3	62,9	5,8
BT	90-100	1,25 ± 0,07	0,24 ± 0,05	0,26 ± 0,05	8	7,7	32,3	44,6	23,1
ПП4. Агрдерново-подзолистая почва под вторичным березняком									
О	0-2	0,09 ± 0,02	27,88 ± 2,76**	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Ppa	5-15	1,06 ± 0,06	1,16 ± 0,23	1,54 ± 0,31	16	24,7	5,0	67,8	27,2
AYel	33-39	1,27 ± 0,08	0,91 ± 0,18	1,01 ± 0,20	13	9,9	20,6	57,3	22,1
EL	50-60	1,23 ± 0,06	0,24 ± 0,05	0,28 ± 0,06	23	14,3	38,7	61,3	0,0
BT	90-100	1,29 ± 0,09	0,23 ± 0,05	0,23 ± 0,05	8	0,0	69,7	26,8	3,5

*Примечание.* \* СВО – степень внутримолекулярной окисленности органического вещества; \*\* определено по ГОСТ 28268-89; н/о – не определялось.  
 [Note. \* DIO - degree of intramolecular oxidation of organic matter; \*\* determined according to GOST 28268-89; н/о - not determined].

Содержание углерода органических соединений несколько ниже и в целом коррелирует с  $C_{\text{общ}}$ . При этом коэффициент корреляции Пирсона в почве спелого березняка демонстрирует более высокие значения, по сравнению с почвой вторичного – 0,97 против 0,95 при  $n = 8$ . Отмеченное свидетельствует об увеличении доли органических соединений, устойчивых к бихроматному окислению, которое выражается в увеличении значений степени внутримолекулярной окисленности органического вещества почв вторичного березняка. Увеличение доли трудноокисляемых соединений в составе  $C_{\text{орг}}$  также говорит о большем содержании кислородсодержащих функциональных групп в составе органического вещества [28] и, как следствие, большей его подвижности и включении в биологический круговорот. Более ранними исследованиями [33, 34] установлено, что в процессе восстановительных сукцессий в первую очередь происходит приращение пула легкодоступных соединений, что подтверждают и наши результаты.

Соотношение C/N в верхней толще почв характеризуется несколько отличными значениями: в верхних гумусовых горизонтах ненарушенной почвы оно выше, чем в почве залежи (16,5 и 14,5 соответственно), тогда как в элювиальном горизонте картина обратная (20 и 23 соответственно). Вышеуказанные особенности подтверждают выраженное агрогенное влияние на количество и качество органического вещества дерново-подзолистых почв. Показано, что увеличение соотношения C/N при постагрогенном восстановлении вначале происходит именно в верхней толще почвы, тогда как в более глубоких горизонтах изменения происходят позже [35].

Расчёты показали, что большими запасами углерода в слое 0–20 см характеризуется дерново-подзолистая почва под зрелым березовым лесом ПП2 (38 т/га). Это объясняется стабильным поступлением в почву органического вещества вместе с опадом древесной и травянистой растительности. Запасы углерода в верхней 20-сантиметровой толще в агродерново-подзолистой почве участка ПП4 снижены по сравнению с ненарушенной почвой (33 т/га). Это согласуется с данными, приводимыми О. Калининой и др. [36], в соответствии с которыми запасы органического вещества в верхней 20-см толще снижены по сравнению с естественными почвами. В то же время запасы углерода в слое 0–50 и 0–100 см в почве залежи под вторичным лесом превышают таковые в ненарушенной почве (46 и 62 т/га; 65 и 81 т/га соответственно). Вероятно, такие значения связаны с особенностями расчета, поскольку плотность сложения почвы под вторичным лесом выше (см. табл. 1) вследствие агрогенной трансформации, что отмечается и в других работах [37].

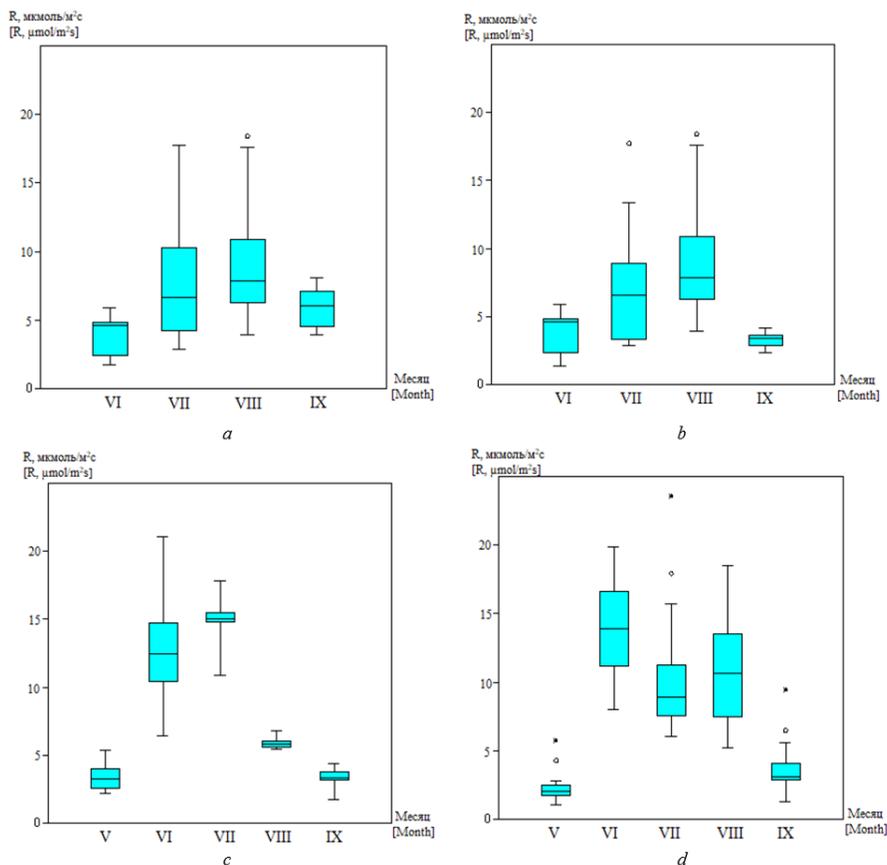
Мощность подстилки практически не различается на пробных площадях под спелым березняком и под вторичным березняком на залежи (2–3 см), тогда как содержание влаги в ней (32,4% и 40,9%) и запасы органического вещества (3,1 и 2,4 т/га соответственно) и углерода (2,2 и 1,8 т/га соответственно) отличаются значительно. Наши данные показывают существенно более низкие запасы органического вещества в подстилках по сравнению с Предуральем [5], что можно объяснить различием в составе

растительного опада: подстилка на пробных площадях почти наполовину состоит из легкоразлагаемого опада трав, который быстрее вовлекается в биологический круговорот. Запасы средних и тонких корней (растений травянистого яруса) в верхней полуметровой толще в почве под зрелым лесом выше, чем под вторичным (42,4 т/га против 34,9 т/га). Вышеуказанное свидетельствует о том, что в ненарушенной почве потенциал поступления органического вещества в почву выше, а скорость вовлечения в биогенный круговорот ниже. В агрогенно трансформированной почве специфическое органическое вещество, вероятно, перешло в пул легкодоступного органического вещества почв вследствие внесения удобрений [38], что иллюстрируют более высокие запасы почвенного углерода. Кроме того, приведенные данные показывают, что 20-летнего срока пребывания в залежи недостаточно для восстановления как запаса потенциально минерализуемого органического вещества, так и качественного состояния системы органических веществ почв [39].

Динамика дыхания почв на пробных площадях различалась по годам. С начала вегетационного сезона в 2023 г. эмиссия  $\text{CO}_2$  закономерно увеличивалась и была максимальной в августе, а к сентябрю снова ее интенсивность снижалась. Динамика была сходной на обеих пробных площадях, однако, начиная с июля, поток  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы в спелом березняке был незначительно выше, чем во вторичном (7,45 и 7,06 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$  в июле; 9,9 и 8,63 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$  в августе и 5,87 и 3,26 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$  в сентябре соответственно). Очевидно, это связано как с нарастанием температуры, так и с изменением химического состава опада, отчего зависит, в том числе, и скорость его разложения [40].

В 2024 г. динамика интенсивности почвенного дыхания была иной. Для спелого березняка значения потока  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы нарастали к июлю (15,05 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$ ), а затем в августе и сентябре были существенно ниже (5,85 и 3,42 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$  соответственно). Для вторичного березняка максимальные значения интенсивности дыхания фиксировались в июне (14,9 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$ ), в июле были существенно ниже, чем в спелом лесу (9,86 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$ ), а в августе снова повышались (до 11,5 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$ ). Снижение интенсивности дыхания почв под вторичным лесом в июле связано, по нашему мнению, с более резкими колебаниями влажности подстилки и верхнего слоя почвы [41].

Таким образом, в среднем за два года наблюдения максимальная интенсивность потока  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы под спелым березняком достигается в июле (13,3 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$ ), тогда как под вторичным лесом максимальная эмиссия  $\text{CO}_2$  отмечена в июне (10,8 мкмоль/ $\text{m}^2\text{c}$ ) (рис. 3). Следует отметить, что, несмотря на более интенсивное выделение  $\text{CO}_2$  в июле почвой естественного леса, в июне и августе дыхание почв на залежи было более активным. Ранее показано, что в сукцессионном ряду последовательно увеличивается содержание углерода микробной биомассы, а также интенсивность базального дыхания дерново-подзолистых почв от пахотных к залежным под молодым и вторичным лесом [42].



**Рис. 3.** Дыхание почв ( $R$ )  $\mu\text{кмоль}/\text{м}^2\text{с}$  под спелым (*a, c*) и вторичным березняком (*b, d*) в течение вегетационных периодов 2023 (*a, b*) и 2024 гг. (*c, d*)  
**[Fig. 3.** Soil respiration ( $R$ )  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  under natural (*a, c*) and secondary (*b, d*) birch forests during the growing season 2023 (*a, b*) and 2024 (*c, d*)

Кроме того, установлено, что суммарное годовое дыхание почв достигает уровня естественных экосистем одновременно с восстановлением запасов фитомассы, тогда как запасы углерода в почвах могут оставаться сниженными [43]. Коэффициент вариальности параметра потока  $\text{CO}_2$  для спелого березняка максимален в июне (56%), в остальные месяцы находится в пределах 26–33%. Для вторичного березняка на залежи самые высокие коэффициенты вариальности потока  $\text{CO}_2$  отмечены в мае и июне (около 44%), в остальные месяцы близки к показателям естественной почвы (26–34%). Очевидно, вариальность дыхания почв связана с условиями конкретного года и свойствами самих почв. Поскольку исследуемые участки расположены в весьма умеренных по увлажнению автоморфных позициях, колебания обеспеченности влагой в весенний-раннелетний период приводят к изменению потока  $\text{CO}_2$ . Такая значительная изменчивость в течение вегетационного сезона отмечена и для лесов Бурятии [44].

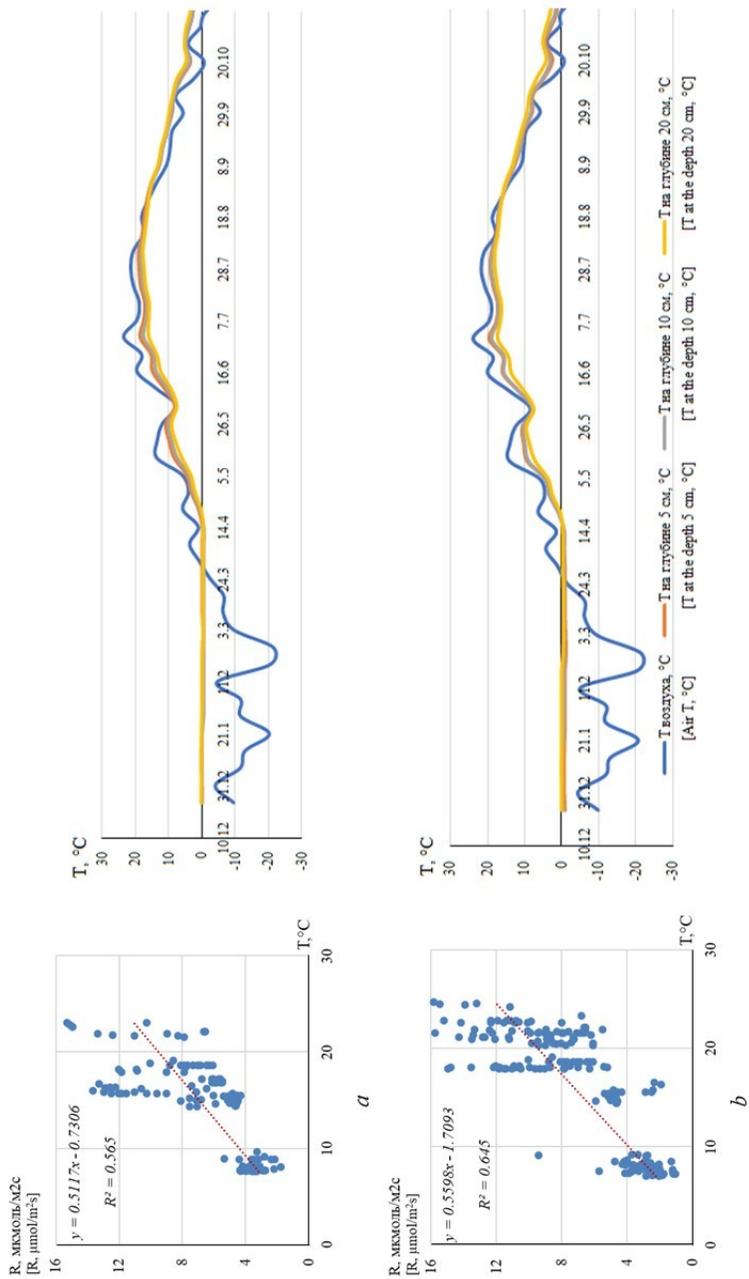
Более ранними работами установлено, что органическое вещество почв бореальных лесов более чувствительно к повышению средних температур, чем почвы других типов леса [45], поэтому для полноты картины необходимо учитывать ход температуры почв в деятельном слое в течение вегетационного периода и в целом года. Гидротермические условия в верхнем слое почв 0–20 см отличаются на разных пробных площадях на одной глубине и еще сильнее по годам. Это свидетельствует об изменении исходных свойств почв при агрогенной трансформации (более быстрое прогревание верхнего горизонта, меньшая водоудерживающая способность и т.д.), что снижает устойчивость почвы к изменению внешних условий. Морфологические признаки изменений свойств почв сохраняются, по данным исследователей, до 40 лет и более [46].

Колебания температур в верхних горизонтах почвы весьма сглажены по сравнению с температурами воздуха (рис. 4), что связано с влиянием ежегодного опада и подстилки, а также с высотой снежного покрова в лесу. В поверхностном слое температура почвы опускается только до  $-1,5 \div -2^\circ\text{C}$ , тогда как на глубине в 20 см невысокие положительные температуры сохраняются до конца января. В то же время разница между температурами поверхностного слоя почвы и слоя 10–20 см более заметна в почве залежи, особенно в периоды прогревания/охлаждения, что также связано со сниженными запасами подстилки [47].

Поскольку температура верхнего гумусового слоя почв оказывает существенное влияние на интенсивность почвенного дыхания [48, 49], то и свойства почв, от которых зависят ее теплофизические характеристики (теплоемкость, теплопроводность, водоудерживающая способность), влияют на поток  $\text{CO}_2$  с поверхности почв в вегетационный период.

Об этом свидетельствуют и функции зависимости потока  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы от температуры в слое 0–5 см за два года (рис. 4). Можно отметить, что вариабельность дыхания почв (включающая дыхание гетеротрофов) увеличивается с возрастанием температуры, что связано частично с изменением параметров влажности почвы и подстилки, которая также оказывает значительное влияние на поток  $\text{CO}_2$  [50].

Все вышеуказанное свидетельствует о том, что вовлечение в сельскохозяйственный оборот малоплодородных почв, расположенных на территории Новосибирского научного центра, повлекло долговременное изменение их свойств. Минерализация неспецифического органического вещества корней в дерново-подзолистой почве в период сельскохозяйственной эксплуатации увеличила запасы легко мобилизуемого почвенного углерода в метровой толще. В то же время запасы потенциально мобилизуемого органического вещества (в подстилке и корнях травянистых растений) существенно снижены. Агрогенная трансформация физико-химических, водно-физических и теплофизических свойств почв приводит к повышению чувствительности дыхания почв к изменению гидротермических условий и вариабельности потока  $\text{CO}_2$  по годам.



**Рис. 4.** Зависимость дыхания почв (R) (по оси ординат) от температуры (по оси абсцисс) на глубине 5 см и ход температур воздуха и почв в 2023–2024 гг.: *a* – спелый березняк; *b* – вторичный березняк [Fig.4. Dependence of soil respiration (R) (on the Y-axis) from the soil temperature at 5 cm depth (on the X-axis) and the course of air and soil temperatures in 2023-2024: *a* - natural birch forest; *b* - secondary birch forest]

## Выводы

Проведенные исследования по оценке запасов и эмиссии в  $\text{CO}_2$  в почвах карбонового полигона BioCarbon позволяют сделать следующие выводы.

1. Запасы общего углерода в верхнем слое 0–20 см почвы под березняком на залежи снижены по сравнению с естественным лесом (33 и 38 т/га). Основная часть запасов (71–77% от общих) приходится на верхнюю полуметровую толщу. В целом почвы характеризуются неравномерным распределением углерода по профилям с преобладанием в серогумусовом (под спелым березняком) и постагрогенном (на залежи) горизонтах.

2. Качественный состав органического вещества (степень внутримолекулярной окисленности, соотношение C/N) характеризуется преобладанием средне- и легкоокисляемых органических соединений в верхней полуметровой толще (80–100%) и снижением их доли (30–68%) в нижнем полуметре. Изменения соотношений различных по устойчивости к окислению фракций в профиле постагрогенной почвы выражены более резко, что указывает на миграцию легкоподвижных органических соединений вследствие антропогенного влияния.

3. Запасы потенциально мобилизуемого углерода в подстилке и корнях травянистых растений выше в спелом березняке (2,2 и 42,4 т/га соответственно), по сравнению со вторичным (1,8 и 34,9 т/га соответственно), что является признаком недостижения климаксной стадии сукцессии и свидетельствует о том, что 20 лет нахождения в залежи недостаточно для восстановления естественных функций почв.

4. Динамика почвенного дыхания в течение вегетационного периода характерна для бореальных лесов: поток  $\text{CO}_2$  минимален при низких положительных температурах весной (2,3–3,4 мкмоль/ $\text{m}^2\text{с}$ ), с мая нарастает к июню-июлю (9,9–15,0 мкмоль/ $\text{m}^2\text{с}$ ) и снова снижается в сентябре (3,3–5,9 мкмоль/ $\text{m}^2\text{с}$ ). Интенсивность дыхания связана как с гидротермическими условиями конкретного года, так и со свойствами почв, поэтому при дальнейших исследованиях необходим одновременный учет не только температуры, но и влажности и других параметров.

## Список источников

1. Морковина С.С., Шашкин А.П. Карбоновые полигоны в лесных экосистемах: опыт и направления исследований // Инновации и технологии в лесном хозяйстве. Санкт-Петербург: материалы Всерос. научно-практической конф. Санкт-Петербург, 2024. С. 214–219. doi: 10.21178/160524.214
2. Нурғалиев Д.К., Селивановская С.Ю., Кожевникова М.В., Галицкая П.Ю. Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации // Георесурсы. 2021. Т. 23, № 3. С. 8–16. doi: 10.18599/grs.2021.3.2
3. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Approaches and methods for studying soil organic matter in the carbon polygons of Russia (review) // Eurasian Soil Science. 2022. № 7. С. 849–860. doi: 10.1134/s106422932207002x
4. Королева Т.С., Шунькина Е.А. Обзор мирового опыта консервации углерода в существующих лесных резервуарах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 4. С. 22–39.

5. Байтурина Р.Р., Султанова Р.Р., Асылбаев И.Г. Оценка запаса углерода в лесной подстилке и верхнем слое почв насаждений основных лесообразующих пород // *Journal of Agriculture and Environment*. 2023. № 12 (40). 16. doi: 10.23649/JAE.2023.40.24
6. Байтурина Р.Р., Султанова Р.Р. Анализ запасов углерода в почвах на участках Карбонового полигона Республики Башкортостан // *Леса России и хозяйство в них*. 2024. № 1 (88). С. 93–100. doi: 10.51318/FRET.2023.88.1.009
7. Александрова Л., Гордеев А.С., Бабичук В.Р., Курынцева П.А., Селивановская С.Ю. Оценка запасов углерода в почве на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» // *Российский журнал прикладной экологии*. 2023. № 4 (36). С. 12–21. doi: 10.24852/2411-7374.2023.4.12.21
8. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // *Почвы и окружающая среда*. 2022. Т. 5, № 2. doi: 10.31251/pos.v5i2.169
9. Розенберг Г.С., Коломыйц Э.Г., Шарая Л.С. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальном потеплении (опыт прогнозного моделирования) // *Успехи современной биологии*. 2011. Т. 131, № 4. С. 367–381.
10. Шанин В.Н., Быховец С.С., Чертов О.Г., Комаров А.С. Оценка средствами имитационного моделирования влияния внешних факторов на динамику органического углерода в лесах разных типов // *Лесоведение*. 2018. № 5. С. 335–346. doi: 10.1134/S0024114818050091
11. Юрковская Т.К., Сафронова И.Н. Зональное деление растительного покрова Западной Сибири // *Ботанический журнал*. 2019. Т. 104, № 1. С. 3–11. doi: 10.1134/S0006813619010113
12. Del Galdo I., Six J., Peressotti A., Cotrufo M.F. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes // *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9 (8). PP. 1204–1213. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00657.x
13. Laganiere J., Angers D.A., Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. PP. 439–453. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x
14. Vladychenskii A.S., Telesnina V.M., Rummyantseva K.A., Chalaya T.A. Organic matter and biological activity of postagrogenic soils in the Southern Taiga using the example of Kostroma Oblast // *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46 (5). PP. 518–529. doi: 10.1134/S1064229313050141
15. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopez De Guereny V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The dynamics of carbon pools and biological activity of retic albic podzols of the southern taiga during postagrogenic evolution // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54, № 3. PP. 337–351. doi: 10.1134/S1064229321030108
16. Deng L., Wang K.B., Tang Z.S., Shangguan Z.P. Soil organic carbon dynamics following a long-term natural vegetation restoration: Evidence from stable carbon isotopes ( $\delta^{13}C$ ) // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2016. Vol. 221. PP. 235–244. doi: 10.1016/j.agee.2016.01.048
17. Kalinina O., Giani L., Goryachkin S., Lyuri D., Kurganova I., Lopes de Guereny V., Kuzakov Y., Cherkinsky A., Chertov O. Post-agricultural restoration: implications for dynamics of soil organic matter pools // *Catena*. 2019. Vol. 181. 104096. doi: 10.1016/j.catena.2019.104096
18. Lyuri D.I., Karelin D.V., Kudikov A.V., Goryachkin S.V. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone // *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46, № 9. PP. 935–947. doi: 10.1134/S1064229313070041

19. Ovsepyan L., Kurganova I., Gerenyu de V.L., Kuzyakov Y. Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil // *Science of Total Environment*. 2020. Vol. 743. 140829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140829
20. Зольников И.Д., Богуславский А.Е., Лямина В.А. Геолого-геоморфологическая основа ландшафтов Академгородка / *Динамика экосистем Новосибирского Академгородка*. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. 438 с.
21. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
22. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. М. : Стандартинформ, 2019. 6 с.
23. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М. : Стандартинформ, 2018. 10 с.
24. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М. : Стандартинформ, 2018. 3 с.
25. Dyzbinski R., Kelvakis A., McCabe J., Panock S., Anuchitlertchon K., Vasarhelyi M., McCormack M.L., McNickle G.G., Poorter H., Trinder C., Farrior C.E. How are nitrogen availability, fine-root mass, and nitrogen uptake related empirically? Implications for models and theory // *Glob. Change Biol.* 2019. № 25. PP. 885–899. doi: 10.1111/gcb.14541
26. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М. : Стандартинформ, 2021. 12 с.
27. Когут Б.М., Фрид А.С. Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // *Почвоведение*. 1993. № 9. С. 119–123.
28. Abakumov E.V., Popov A.I. Determination of the carbon and nitrogen contents and oxidizability of organic matter and the carbon of carbonates content in one soil sample // *Eurasian Soil Science*. 2005. № 2. PP. 186–194.
29. Androkhanov V.A., Sokolov D.A. Fractional composition of redox systems in soils of coal mine dumps // *Eurasian Soil Science*. 2012. № 45. PP. 399–403. doi: 10.1134/S1064229312020032
30. ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. М. : Стандартинформ, 1989. 8 с.
31. Кленов Б.М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 176 с.
32. Методика количественного определения объема поглощений парниковых газов. Приложение № 2 к приказу Минприроды России № 371 от 27.05.2022 г. 95 с.
33. Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // *Geoderma*. 2013. Vol. 192. PP. 189–201. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.08.003
34. Wang Y., Xue D., Kuzyakov Y., Wang Z.L., Hu N., Lou Y., Zhang Q., Zhang L., Zhu P., Gao H., Zhang S., Zhang H., Li D., Song Z., Kurganova I. Post-agricultural restoration of soil organic carbon pools across a climate gradient // *Catena*. 2021. Vol. 200. 105138. doi: 10.1016/j.catena.2020.105138
35. Deng L., Shangguan Zh. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China // *Land Degradation and Development*. 2017. Vol. 28, № 1. PP. 151–165. doi: 10.1002/ldr.2537
36. Kalinina O., Goryachkin S., Luyri D., Giani L. Chronosequential development of post-agrogenic soils of different climatic zones in Russia under self-restoration // *Catena*. 2015. Vol. 129. PP. 18–29. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.016
37. Зорина С.Ю., Соколова Л.Г., Казановский С.Г., Дорофеев Н.В. Изменение состава растительности и свойств почв в ходе их постагрогенного развития в лесостепной зоне Прибайкалья // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. Т. 15, № 5. С. 74–96. doi: 10.12731/2658-6649-2023-15-5-927
38. Лопес Де Гереню В.О., Курганова И.Н., Галибина Н.А., Капица Е.А., Шорохова Е.В. Влияние температуры и минеральных добавок азота и фосфора на процессы

- разложения и состав почвенно-коровых субстратов // Почвоведение. 2021. № 1. С. 45–59. doi: 10.31857/S0032180X21010081
39. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Новая оценка баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. М. : Наука, 2021. С. 153–173.
40. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Галибина Н.А., Капица Е.А., Шорохова Е.В. Влияние температуры на интенсивность биогенного разложения коры осины // Сибирский экологический журнал. 2020. Т. 27, № 6. С. 792–804. doi: 10.15372/SEJ20200610
41. Wang Y., Wang Z.-L., Wang H., Guo C., Bao W. Rainfall pulse primarily drives litterfall respiration and its contribution to soil respiration in a young exotic pine plantation in subtropical China // Canadian Journal of Forest Research. 2012. Vol. 42. PP. 657–666. doi: 10.1139/x2012-017
42. Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., Stolnikova E.V. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO<sub>2</sub> respiration activity // European Journal of Soil Biology. 2011. Vol. 47. PP. 169–174. doi: 10.1016/j.ejsobi.2011.04.002
43. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменение запасов углерода и эмиссии CO<sub>2</sub> в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в Европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580–594. doi: 10.7868/80032180X17050070
44. Иванов А.В., Замолодчиков Д.Г., Сало М.А., Кондратова А.В., Пилецкая О.А., Брянин С.В. Дыхание почв лесных экосистем юга Дальнего Востока // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1023–1033. doi: 10.31857/S0032180X23600397
45. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates // Eurasian Soil Science. 2012. Vol. 45. PP. 68–79. doi: 10.1134/S1064229312010085
46. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на лёгких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115–129. doi: 10.7868/S0032180X16010111
47. Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в чернозёмной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354–1366. doi: 10.7868/S0032180X1511009X
48. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Почикалов А.В., Гитарский М.Л. Микробная и корневая составляющие дыхания дерново-подзолистых почв южной тайги // Лесоведение. 2017. № 3. С. 183–195.
49. Мухин В.А., Диярова Д.К., Гитарский М.Л., Замолодчиков Д.Г. Климат и эмиссионная составляющая углеродного цикла лесных экосистем // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития : тезисы докладов Всероссийской научной конференции (Москва, 20–22 марта 2017 г.). М. : Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2017. С. 128–129.
50. Мухин В.А., Диярова Д.К., Веселкин Д.В. Влажность как фактор CO<sub>2</sub>-эмиссионной активности древесного дебриса // Лесоведение. 2015. № 3. С. 208–213.

## References

1. Morkovina SS, Shashkin AP. Karbonovye poligony v lesnyh jekosistemah: opyt i napravlenija issledovanij [Carbon polygons in forest ecosystems: experience and research directions]. In: *Innovacii i tehnologii v lesnom hoz'jajstve. Materialy nauch. konf.* [Innovations and technologies in forestry (St. Petersburg, Russia, 16–17 May, 2024)]. St. Petersburg: Publishing House

- of the Saint-Peterburg Forestry Research Institute; 2024. pp. 214-219. In Russian. doi: 10.21178/160524.214
2. Nurgaliev DK, Selivanovskaja SJu, Kozhevnikova MV, Galickaja PJu. Some challenges and opportunities for Russia and regions in terms of the global decarbonization trend *Georesursy = Georesources*. 2021;23(3):8-16. In Russian, English summary. doi: 10.18599/grs.2021.3.2
  3. Abakumov EV, Polyakov VI, Chukov SN. Approaches and methods for studying soil organic matter in the carbon polygons of Russia (review). *Eurasian Soil Science*. 2022;55(7):849-860. doi: 10.1134/s106422932207002x
  4. Koroleva TS, Shun'kina EA. The review of world experience preservation of carbon in the existing forest tanks. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozjajstva = Proceedings of the Saint-Peterburg Forestry Research Institute*. 2014;4:22-39. In Russian, English summary
  5. Bajturina RR, Sultanova RR. Analiz zapasov ugleroda v pochvah na uchastkah Karbonovogo poligona Respubliki Bashkortostan [Analysis of soil carbon stocks in the carboniferous areas of the Republic of Bashkortostan]. *Lesa Rossii i hozjajstvo v nih = Forests of Russia and Economy in Them*. 2024;1:93-100. In Russian, English summary. doi: 10.51318/FRET.2023.88.1.009
  6. Bajturina RR, Sultanova RR, Asylbaev IG. An evaluation of carbon stock in forest floor and topsoil of plantations of main forest forming species. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023;12:16. In Russian, English summary. doi: 10.23649/JAE.2023.40.24
  7. Aleksandrova L, Gordeev AS, Babichuk VR, Kurnyceva PA, Selivanovskaja SJu. Ocenka zapasov ugleroda v pochve na territorii karbonovogo poligona «Karbon – Povolzh'e» [The estimation of carbon content in soil on the territory of carbon polygon “Carbon-Povolzhye”]. *Rossiiskij zhurnal prikladnoj jekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2023;4:12-21. In Russian, English summary. doi: 10.24852/2411-7374.2023.4.12.21
  8. Kurganova IN, Lopes De Gerenju VO, Ipp SL, Kaganov VV, Horoshaev DA, Ruhovich DI, Sumin JuV, Durmanov ND, Kuzjakov JaV. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soil and vegetation. *Pochvy i okruzhajushhaja sreda = The Journal of Soils and Environment*. 2022;2(5). In Russian, English summary. doi: 10.31251/pos.v5i2.169
  9. Rozenberg GS, Kolomyc JeG, Sharaja LS. Carbon balance and sustainability of forest ecosystems under global warming (experience of predictive modeling). *Uspekhi sovremennoj biologii = Biology Bulletin Reviews*. In Russian, English summary. 2011;131(4):367-381.
  10. Shanin VN, Byhovec SS, Chertov OG, Komarov AS. The effect of various external factors on dynamics of organic carbon in different types of forests: a simulation-based assessment. *Lesovedenie = Forestry*. In Russian, English summary. 2018;5:335-346. doi: 10.1134/S0024114818050091
  11. Yurkovskaya TK, Safronova IN. Zonal regularities of vegetation cover of Western Siberia. *Botanicheskij Zhurnal*. 2019;104(1):3-11. doi: 10.1134/S0006813619010113
  12. Del Galdo I, Six J, Peressotti A, Cotrufo MF. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*. 2003;9(8):1204-1213. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00657.x
  13. Laganier J, Angers DA, Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*. 2010;16:439-453. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x
  14. Vladychenskii AS, Telesnina VM, Rumyantseva KA, Chalaya TA. Organic matter and biological activity of postagrogenic soils in the Southern Taiga using the example of Kostroma Oblast. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(5):518-529. doi: 10.1134/S1064229313050141
  15. Kurganova IN, Telesnina VM, Lopez De Guereño VO, Lichko VI, Karavanova EI. The dynamics of carbon pools and biological activity of retic albic podzols of the southern taiga during postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(3):337-351. doi: 10.1134/S1064229321030108
  16. Deng L, Wang KB, Tang ZS, Shangguan ZP. Soil organic carbon dynamics following a long-term natural vegetation restoration: Evidence from stable carbon isotopes ( $\delta^{13}C$ ). *Agric. Ecos. Envir.* 2016;221:235-244. doi: 10.1016/j.agee.2016.01.048
  17. Kalinina O, Giani L, Goryachkin S, Lyuri D, Kurganova I, Lopes de Gerenyu V, Kuzyakov Y, Cherkinsky A, Chertov O. Post-agricultural restoration: Implications for dynamics of soil organic matter pools. *Catena*. 2019;181:104096. doi: 10.1016/j.catena.2019.104096

18. Lyuri DI, Karelin DV, Kudikov AV, Goryachkin SV. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(9):935-947. doi: 10.1134/S1064229313070041
19. Ovsepyan L, Kurganova I, Lopes de Gerenyu V, Kuzyakov Y. Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil. *Science of Total Environment*. 2020;743:140829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140829
20. Zol'nikov ID, Boguslavskij AE, Ljamina VA. Geologo-geomorfologicheskaja osnova landshaftov Akademgorodka [The geological and geomorphological basis of the landscapes of Akademgorodok]. In: *Dinamika jekosistem Novosibirskogo Akademgorodka* [Dynamics of ecosystems of Novosibirsk Akademgorodok]. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN; 2013. 438 p. In Russian
21. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnosis of soil of Russia]. Smolensk: Oykumena; 2004. 342 p. In Russian, English summary
22. GOST R 58595-2019. Soils. Sampling. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 6 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200168814> (access 18.12.2024).
23. GOST 17.4.4.02-2017. Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. 10 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200158951> (access 18.12.2024).
24. GOST 17.4.3.01-2017. Nature protection. Soils. Soils. General requirement for sampling. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. 3 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508> (access 18.12.2024).
25. Dybzinski R, Kelvakis A, McCabe J, Panock S, Anuchitlertchon K, Vasarhelyi M, McCormack ML, McNickle GG, Poorter H, Trinder C, Farrior CE. How are nitrogen availability, fine-root mass, and nitrogen uptake related empirically? Implications for models and theory. *Glob. Change Biol*. 2019;25:885-899. doi: 10.1111/gcb.14541
26. GOST 26213-2021. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. 12 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200180714> (access 18.12.2024).
27. Kogut BM, Frid AS. Comparative assessment of methods for determining humus content in soils. *Eurasian Soil Science*. 1993;9:119-123.
28. Abakumov EV, Popov AI. Determination of the carbon and nitrogen contents and oxidizability of organic matter and the carbon of carbonates content in one soil sample. *Eurasian Soil Science*. 2005;38(2):165-172.
29. Androkhonov VA, Sokolov DA. Fractional composition of redox systems in the soils of coal mine dump. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(4):399-403. doi: 10.1134/S1064229312020032
30. GOST 28268-89. Soils. Methods of determination of moisture, maximum hygroscopic moisture and moisture of steady plant fading. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 8 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200023556> (access 18.12.2024).
31. Klenov BM. Ustojchivost' gumusa avtomorfnyh pochv Zapadnoj Sibiri [Stability of humus of automorphic soils of Western Siberia]. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN; 2000. 176 p. In Russian
32. Metodika kolichestvennogo opredelenija ob'ema pogloshhenij parnikovyh gazov. Prilozhenie № 2 k prikazu Minprirody Rossii № 371 ot 27.05.2022 [A method for quantifying the volume of greenhouse gas uptake. App. No. 2 to the Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 371 dated 05.27.2022]. 95 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/350962750>. In Russian
33. Poeplau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*. 2013;192:189-201. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.08.003
34. Wang Y, Xue D, Kuzyakov Y, Wang ZL, Hu N, Lou Y, Zhang Q, Zhang L, Zhu P, Gao H, Zhang S, Zhang H, Li D, Song Z, Kurganova I. Post-agricultural restoration of soil organic carbon pools across a climate gradient. *Catena*. 2021;200:105138. doi: 10.1016/j.catena.2020.105138
35. Deng L, Shangguan Zh. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China. *Land Degradation and Development*. 2017;28(1):151-165. doi: 10.1002/ldr.2537
36. Kalinina O, Goryachkin S, Luyri D, Gianni L. Chronosequential development of post-agrogenic soils of different climatic zones in Russia under self-restoration. *Catena*. 2015;129:18-29. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.016

37. Zorina SYu, Sokolova LG, Kazanovsky SG, Dorofeev NV. Plant composition and soil properties during postagrogenic evolution in the Cis-Baikal forest-steppe zone. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023;15(5):74-96. In Russian, English summary. doi: 10.12731/2658-6649-2023-15-5-927
38. Lopes De Gerenyu VO, Kurganova IN, Galibina NA, Kapitsa EA, Shorokhova EV. The effects of temperature and mineral nitrogen and phosphorus on the decay processes and composition of Soil-Bark substrates. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(1):49-62. doi: 10.1134/S1064229321010087
39. Zamolodchikov DG, Grabovskiy VI, Chestnyh OV. Novaya otsenka balansa ugleroda v leash federal'nyh okrugov Rossiyskoy Federatsii [A new assessment of the carbon balance in the forests of the federal districts of the Russian Federation]. In: *Bioraznoobrazie i funktsionirovanie lesnyh ekosistem* [Biodiversity and functioning of forest ecosystems]. Moscow: Nauka Publ.; 2021. 327 p. In Russian
40. Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Galibina NA, Kapitsa EA, Shorokhova EV. The effect of temperature on the rate of biogenic decomposition of aspen bark. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2020;6:792-804. In Russian, English summary. doi: 10.15372/SEJ20200610
41. Wang Y, Wang ZL, Wang H, Guo C, Bao W. Rainfall pulse primarily drives litterfall respiration and its contribution to soil respiration in a young exotic pine plantation in subtropical China. *Canadian Journal of Forest Research*. 2012;42:657-666. doi: 10.1139/x2012-017
42. Susyan EA, Wirth S, Ananyeva ND, Stolnikova EV. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia - Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO<sub>2</sub> respiration activity. *European Journal of Soil Biology*. 2011;47:169-174. doi: 10.1016/j.ejsobi.2011.04.002
43. Karelin DV, Goryachkin SV, Kudikov AV, Lunin VN, Dolgikh AV, Lyuri DI, Lopes de Gerenyu VO. Changes of carbon pool and CO<sub>2</sub> emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(5):559-572. doi: 10.1134/S1064229317050076
44. Ivanov AV, Zamolodchikov DG, Salo MA, Kondratova AV, Piletskaya OA, Bryanin SV. Soil respiration in forest ecosystems in the south of the Far East. *Eurasian Soil Science*. 2023;56(9):1201-1209. doi: 10.1134/s1064229323601142
45. Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Lancho JFG, Oehm CT. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates. *Eurasian Soil Science*. 2012;45:68-79. doi: 10.1134/S1064229312010085
46. Telesnina VM, Vaganov IE, Karlsen AA, Ivanova AE, Zhukov MA, Lebedev SM. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(1):102-115. doi: 10.1134/S1064229316010117
47. Karelin DV, Lyuri DI, Goryachkin SV, Lunin VN, Kudikov AV. Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the chernozems forest-steppe. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(11):1229-1241. doi: 10.1134/S1064229315110095
48. Karelin DV, Zamolodchikov DG, Pochikalov AV, Kaganov VV, Gitarskii ML. Microbial and root components of respiration of sod-podsolic soils in boreal forest. *Lesovedenie = Forestry*. In Russian, English summary. 2017;3:183-195.
49. Mukhin VA, Diyarova DK, Gitarskiy ML, Zamolodchikov DG. Klimat i emissionnaya sostavlyajuschaya uglerodnogo tsikla lesnyh ekosistem [Climate and the emission component of the carbon cycle of forest ecosystems]. In: *Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushey sredy. Materialy nauch. konf.* [Monitoring of the state and pollution of the environment. Key results and development paths (Moscow, Russia, 20-22 March, 2017)]. Moscow: Publishing House of Institute of Global Climate and Ecology of the Russian Hydrometeorological Institute and the RAS; 2017. pp. 128-129. In Russian
50. Mukhin VA, Diyarova DK, Veselkin DV. Moisture content - the factor of the CO<sub>2</sub> emission activity of woody debris. *Lesovedenie = Forestry*. In Russian, English summary. 2015;3:208-213.

***Информация об авторах:***

**Соколова Наталья Александровна**, канд. биол. наук, зав. лабораторией географии и генезиса почв, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН; н. с. ИЦКП, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (Новосибирск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-4280>

E-mail: [nsokolova@issa-siberia.ru](mailto:nsokolova@issa-siberia.ru)

**Куйдина Софья Александровна**, студент, м. н. с. лаборатории рекультивации почв, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН; лаборант ИЦКП, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (Новосибирск, Россия).

E-mail: [s.kuidina@g.nsu.ru](mailto:s.kuidina@g.nsu.ru)

**Соколов Денис Александрович**, д-р биол. наук, зав. лабораторией рекультивации почв, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3409-9745>

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

***Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.***

***Information about the authors:***

**Natalia A. Sokolova**, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Soil Geography and Genesis, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS; researcher at the Research Centre of Carbon Polygon, Novosibirsk National Research State University (Novosibirsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-4280>

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

**Sofia A. Kuydina**, junior researcher in the Laboratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS; laboratory assistant at the Research Centre of Carbon Polygon, Novosibirsk National Research State University (Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: [s.kuidina@g.nsu.ru](mailto:s.kuidina@g.nsu.ru)

**Denis A. Sokolov**, Doc. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3409-9745>

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

***The Authors declare no conflict of interest.***

*Статья поступила в редакцию 16.12.2024;  
одобрена после рецензирования 28.01.2025; принята к публикации 11.12.2025.*

*The article was submitted 16.12.2024;  
approved after reviewing 28.01.2025; accepted for publication 11.12.2025.*