



УДК 574.4

<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.52.49>

Влияние температуры и влажности почвы на сезонную и суточную динамику почвенной эмиссии CO₂ в сосняке бруснично-лишайниковом в Печоро-Илычском заповеднике (Северный Урал, Россия)

Р. В. Кудрявцев¹, М. Н. Мигловец^{2*}

¹Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, г. Сыктывкар,
Россия

²Институт биологии ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», г. Сыктывкар, Россия
E-mail: kudriavtsevroman@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты сравнительного исследования характера почвенной эмиссии CO₂ с поверхности почвы на ненарушенном и пройденном беглым низовым пожаром участках сосняка бруснично-лишайникового на территории Печоро-Илычского заповедника. Проанализирована зависимость суточного и сезонного хода эмиссии от температуры и влажности почвы в годы с заметно отклоняющимися от средних многолетних погодными показателями.

Ключевые слова: сосняк, почвенная эмиссия CO₂, температура, влажность, сезонная динамика, суточная динамика, Печоро-Илычский заповедник.

Для цитирования: Кудрявцев Р. В., Мигловец М. Н. Влияние температуры и влажности почвы на сезонную и суточную динамику почвенной эмиссии CO₂ в сосняке бруснично-лишайниковом в Печоро-Илычском заповеднике (Северный Урал, Россия) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2025. Т. 52. С. 49–65. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.52.49>

Research article

Influence of Temperature and Moisture of Soil on the Seasonal and Diurnal Dynamics of Soil CO₂ Emissions in the Cowberry-Lichen Pine Forest in the Pechora-Ilych Nature Reserve (Northern Urals, Russia)

R. V. Kudryavtsev¹, M. N. Miglovets^{2*}

¹Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russian Federation

²Institute of Biology KomiSC UB RAS, Syktyvkar, Russian Federation

Abstract. The first results of a study of soil CO₂ emissions in the Pechora-Ilych Nature Reserve (middle taiga subzone, south-east of Komi Republic) have been obtained. The intensity of

CO₂ emissions from the soil surface was studied in an undisturbed area of cowberry-lichen pine forest and in an area affected by a ground fire. Soil CO₂ fluxes were measured using a chamber method from late May to late August in 2022 and 2024. It was found that soil temperature in the 0–20 cm layer has a significant positive effect on soil respiration, while volumetric soil water content at a depth of 20 cm inhibits this process. However, soil temperature at a depth of more than 20 cm and surface soil moisture do not significantly affect soil respiration. The average CO₂ emission rates from the soil surface were $227 \pm 30 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ and $242 \pm 29 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ in the undisturbed and fire-affected plots, respectively. The seasonal peak in CO₂ emissions was observed from mid-July to early August, which is associated with optimal hydrothermal conditions during this period. The daily maximum was observed in the evening hours in the undisturbed plot and at midday in the fire-affected plot. The differences are due to the more rapid warming of the post-pyrogenic soil due to the absence of living ground cover. The amplitude of diurnal fluctuations in CO₂ emissions is $44\text{--}80 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ in the undisturbed plot and $100\text{--}185 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ in the post-pyrogenic plot. The results indicate a significant contribution of fire-affected areas to overall CO₂ emissions. Significant variations in temperature and precipitation patterns during the seasons under study further linked the seasonal pattern of emissions to seasonal weather anomalies. For example, a cold May leads to lower CO₂ fluxes in early summer, as it slows soil thaw and leads to low soil microbiota activity. It was also found that after a ground fire, organic matter in the surface soil layer is unevenly distributed, leading to significant fluctuations in CO₂ emissions. According to the results, 10–15 years after a fugitive ground fire, cowberry-lichen pine forests in the middle taiga subzone may become a source of increased carbon dioxide emissions from the soil.

Keywords: pine forest, soil CO₂ emission, temperature, moisture, seasonal dynamics, daily dynamics, Pechora-Ilychsky Reserve.

For citation: Kudryavtsev R. V., Miglovec M. N. Influence of Temperature and Moisture of Soil on the Seasonal and Diurnal Dynamics of Soil CO₂Emissions in the Cowberry-Lichen Pine Forest in the Pechora-Ilych Nature Reserve (Northern Urals, Russia). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2025, vol. 52, pp. 49–65. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.52.49> (in Russian)

Введение

Изучение потоков парниковых газов в ненарушенных и трансформированных природных сообществах актуально в связи с глобальным изменением климата в XXI в. Диоксид углерода (CO₂) – один из основных парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу Земли в результате естественных процессов и антропогенной деятельности. Известно, что молекулы диоксида углерода в атмосфере поглощают инфракрасные лучи, тем самым повышая глобальную температуру воздуха. Содержание CO₂ в атмосфере до эпохи промышленной революции не превышало 280 частиц на миллион [Mapping ..., 2014], к настоящему времени этот показатель приближается к отметке в 420 частиц на миллион [Глобальная ..., 2021].

Согласно актуальным оценкам, только 4–10 % суммарных выбросов CO₂ в атмосферу связаны с хозяйственной деятельностью человека [Куликова, Тас-Оол, Балакина, 2022; Фёдоров, Алтунин, Фролов, 2022]. Наиболее значимая их часть обусловлена естественными природными процессами – дыханием живых организмов (в том числе микроорганизмов), природными пожарами и сейсмической активностью. Большой вклад в естественную эмиссию CO₂ вносят почвы. Ежегодный глобальный суммарный поток CO₂ из почв составляет $35 \cdot 10^{13} \text{ кг}$ [Greenhouse ..., 2016]. Меняющиеся климатические условия служат причиной усиления природных выбросов CO₂ в атмосферу, что значительно обостряет проблему глобального потепления. При

повышении температуры воздуха значительно увеличивается активность микроорганизмов, участвующих в процессе разложения органического вещества почвы с выделением диоксида углерода [Левитин, 2015].

До 58 % запасов углерода в почвах России сосредоточены в лесах [Запасы ... , 2013]. Для эффективного изучения естественных биогеохимических процессов в лесных сообществах, в том числе почвенной эмиссии CO_2 , требуется проведение исследований на территориях, не затронутых хозяйственной деятельностью человека, включая участки, подвергшиеся исключительно природным трансформациям (пожары, ветровалы).

В России хорошо изучены потоки диоксида углерода из почвы в лесах Центральной России [Молчанов, Курбатова, Ольчев, 2017], Карелии [Годовая ... , 2021], Красноярского края [Влияние ... , 2020], Приморья [Влияние ... , 2022]. В Республике Коми исследования эмиссионных потоков CO_2 проводили на равнинных территориях [Осипов, 2018; Кузнецов, 2022], однако в Предуралье характеристики процесса неизвестны. Под влиянием Уральской горной цепи здесь формируются специфические климатические условия с большим годовым ходом температуры и интенсивным увлажнением. Природное состояние экосистем сохраняется на территории Печоро-Илычского заповедника: его площадь составляет 7213 км^2 , 86 % которой покрыты коренными малонарушенными лесами.

Цель настоящей работы – изучить влияние температуры и влажности почвы на сезонную и суточную динамику почвенной эмиссии CO_2 в сосняке бруснично-лишайниковом подзоне средней тайги на территории Печоро-Илычского заповедника.

Материалы и методы

Исследования выполнены на почвах в сосняке бруснично-лишайниковом в окрестностях пос. Якша Троицко-Печорского района Республики Коми. Территория характеризуется полого-холмистым рельефом и умеренно континентальным климатом. Сухие сосняки чередуются с олиготрофными болотами, встречаются небольшие лесные озёра, связанные с выходом на поверхность грунтовых вод. Особенности климата территории обусловлены преобладанием циклонов в зимний период и антициклонов – в летний, велика роль Уральских гор. Среднегодовая температура воздуха составляет $+0,8^\circ\text{C}$, средняя температура января $-17,9^\circ\text{C}$, июля $+16,3^\circ\text{C}$, характерны резкие перепады температур. Среднегодовое количество осадков составляет 627 мм, их основная часть выпадает с середины лета до середины осени [Загирова, Михайлов, 2021].

Для изучения динамики потоков CO_2 с поверхности почвы были определены два участка, на которых заложили пробные площади (ПП) размером $50 \times 50 \text{ м}$. Первая ПП располагалась на ненарушенном участке. Древостой в пределах ПП представлен *Pinus sylvestris* L. в здоровом состоянии без примесей других пород и подлеска. Напочвенный покров хорошо развит, представлен лишайниками *Cladonia rangiferina* L., *Cl. stellaris* Opiz, *Cl. arbuscula* Wallr., *Cl. fimbriata* L., мхами *Hylocomium splendens* Hedw., *Pleurozi-*

um schreberi Willd. ex Brid., кустарничками *Vaccinium vitis-idaea* L., *V. myrtillus* L. Проективное покрытие лишайников 100 %, кустарничков – 80 %, зелёных мхов – 25 %. Вторая ПП заложена на участке, пройденном в 2011 г. беглым низовым пожаром. Древостой представлен *Pinus sylvestris* L. с примесью *P. sibirica* Du Tour, состояние деревьев угнетённое. Напочвенный покров после пожара частично восстановился, однако изменился видовой состав. Преобладают лишайники *Cladonia crispata* Ach., *Cl. fimbriata* L., *Cl. cornuta* L., *Cl. sulphurina* Michx., *Cl. carneola* Fr., *Cl. borealis* S. Stenroos, *Trapeliopsis granulosa* Hoffm., *Placynthiella uliginosa* Schrad., отмечены мхи *Dicranum polysetum* Sw., *Pleurozium schreberi* Willd. ex Brid., *Pohlia nutans* Hedw. Проективное покрытие лишайников 50 %, зелёных мхов – 5 %. На обеих ПП сделаны почвенные прикопки для изучения структуры верхней части почвенного профиля.

В центре каждой ПП в межкроновом пространстве на расстоянии 1 м друг от друга разместили по пять пластиковых оснований диаметром 20 см, углубив их в почву на 5–7 см. Живой напочвенный покров в пределах оснований предварительно удалили.

Почвенную эмиссию СО₂ измеряли с конца мая по конец августа в 2022 и 2024 гг. Для работы использовали инфракрасный почвенный газоанализатор Li-8100A (LI-COR, США) в комплекте с тёмной металлической камерой закрытого типа диаметром 20 см, которую устанавливали на основания. На каждом основании измерения проводили в пяти повторностях с экспозицией 2,5 мин. и интервалом 1,5 мин. Сезонные измерения осуществляли регулярно с интервалом в 7–10 дней с 11:00 до 15:00 по московскому времени (МСК), суточные – три раза в течение сезона в 2022 г. на первой ПП и один раз в середине июля непрерывно в течение суток в 2024 г. на второй ПП. Всего выполнены 12 измерений на одном участке в 2022 г. и 11 измерений на двух участках в 2024 г.

Одновременно с измерениями почвенной эмиссии СО₂ фиксировали характер погодных условий, а также температуру и влажность почвы. Температуру почвы на глубине 5, 10, 20 и 50 см определяли с использованием датчиков S-TMB с погрешностью $\pm 0,2$ °C, содержание влаги в почве на глубине 5 и 20 см – датчиков S-SMC (погрешность $\pm 0,031$ м³/м³, или $\pm 3,1$ %), автоматическая регистрация данных проводилась с помощью микрологгеров Ново Н-21 (все Onset, США). Температуру под подстилкой измеряли комплектным датчиком, который подключали к газоанализатору и углубляли в подстилку на 3–5 см до границы минерального слоя. Количество осадков отмечали по данным ГМС «М-И Якша» Росгидромета.

Для статистической обработки данных использовали процессор Excel из пакета MS Office 2016 и язык программирования R. Вычисляли достоверность различий показателей между участками, среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение, коэффициент корреляции Спирмена между интенсивностью почвенной эмиссии СО₂ и параметрами окружающей среды. Построение графиков производили в Excel.

Результаты и обсуждение

Метеорологические условия. Погодные условия 2022 и 2024 гг. сильно различались и значительно отклонялись от средних многолетних показателей. В течение обоих сезонов наблюдали неустойчивый ход погодных условий с перепадами температуры (рис. 1). В 2022 г. лето было значительно теплее, чем в 2024 г., с начала июля до конца августа в полуденные часы температура воздуха часто превышала отметку в $+30^{\circ}\text{C}$. В 2024 г. отмечены аномально холодный май с поздним сходом снежного покрова и прохладный август. Следует отметить, что температура воздуха в мае является важным фактором, определяющим динамику почвенной эмиссии CO_2 в начале вегетационного сезона, поскольку в этот период происходит оттаивание и прогрев почвы [Zheng, Hunt, Running, 1993], от степени которого зависит активность микроорганизмов.

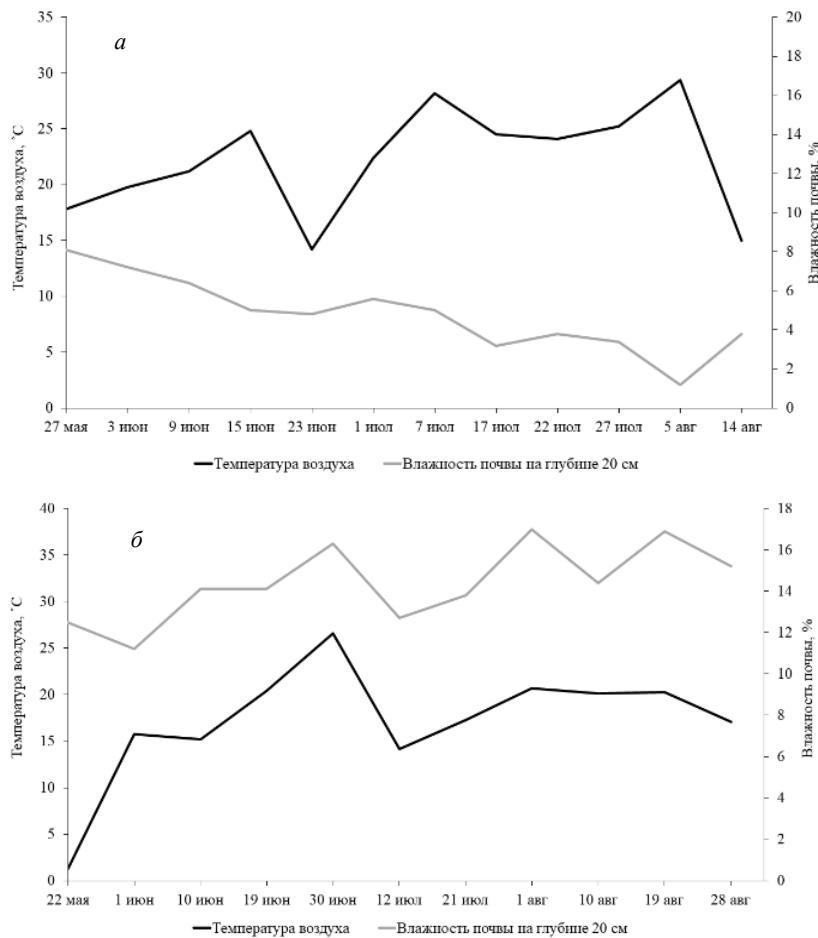


Рис. 1. Температура воздуха и влажность почвы на пробных площадях в Печоро-Ильчском заповеднике в летний сезон в период измерений потоков CO_2 (12:00 МСК): *а* – 2022 г.; *б* – 2024 г.

Выпадение осадков также было крайне неравномерным (рис. 2). В 2022 г. периоды с избыточным количеством осадков наблюдали во второй половине мая, в конце июня и в середине августа, с середины июля до середины августа сохранялась сухая и жаркая погода. В 2024 г. наблюдали очень влажный июнь, осадки выпадали в больших количествах в течение всего месяца. Недостаток осадков отмечен в июле, однако в августе вновь наблюдали частые дожди. Экстремальные осадки (67 мм за сутки) отмечены 10 августа, что стало абсолютным суточным максимумом для метеостанции «М-П Якша», ведущей наблюдения с 1931 г.

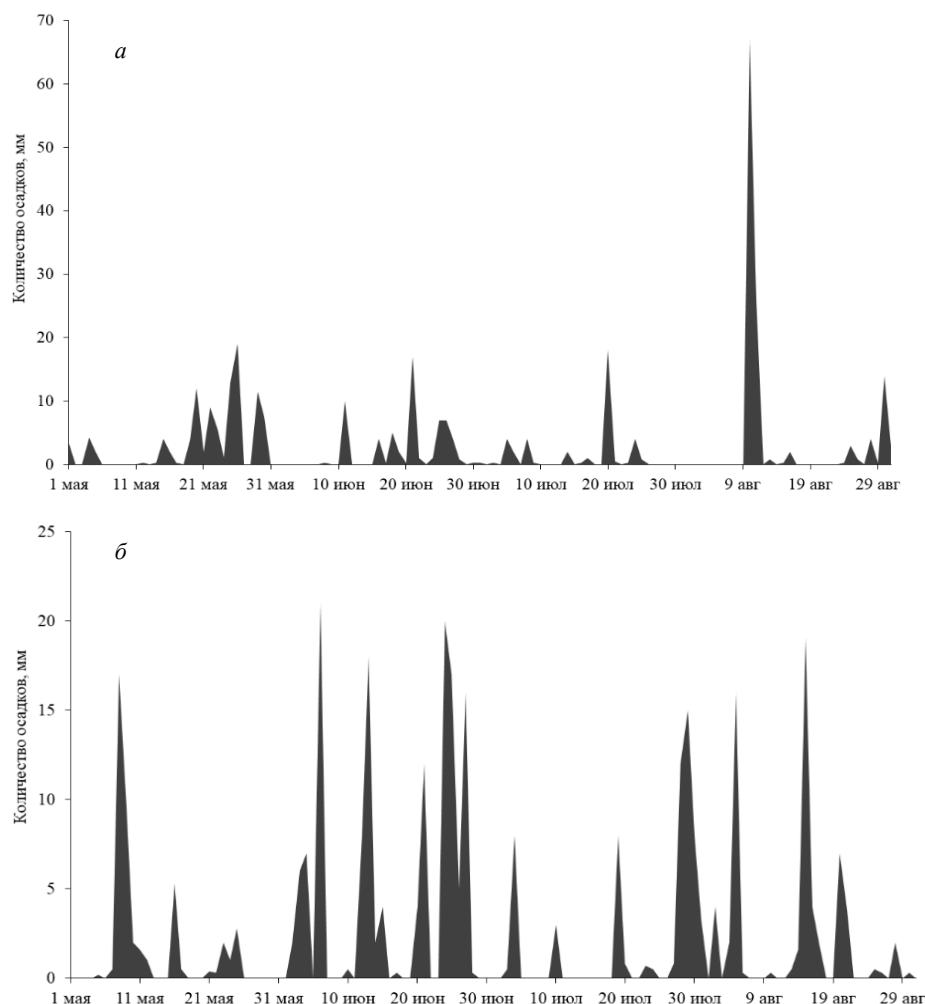


Рис. 2. Распределение суточных сумм осадков в течение летнего сезона: *a* – 2022 г.; *б* – 2024 г. (по данным ГМС «М-П Якша» Росгидромета)

В сравнении со средними многолетними значениями (1991–2020 гг., данные ГМС «М-П Якша»), летние месяцы в 2022 и 2024 гг. имели значительные отклонения по температуре и осадкам (табл. 1). Так, в мае 2022 г. и в июне 2024 г. выпало более двух месячных норм, а в июле 2022 г. – только половина. Температура в мае 2024 г. оказалась на 5,1 °С ниже среднего многолетнего значения, август 2022 г. стал самым тёплым за последние 30 лет.

Таблица 1

Метеорологические показатели и их средние многолетние значения для пос. Якша (по данным ГМС «М-П Якша» Росгидромета)

| Месяц | Температура воздуха, °С | | | Сумма осадков, мм | | |
|--------|-------------------------|--------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|
| | 1991–2020 гг. | 2022 г. | 2024 г. | 1991–2020 гг. | 2022 г. | 2024 г. |
| Май | +7,7 | +6,7 (–1,0) | +2,6 (–5,1) | 50 | 101 (202 %) | 44 (88 %) |
| Июнь | +14,2 | +13,6 (–0,6) | +16,2 (+2,0) | 63 | 61 (97 %) | 144 (229 %) |
| Июль | +17,1 | +19,0 (+1,9) | +17,6 (+0,5) | 80 | 38 (48 %) | 61 (76 %) |
| Август | +13,3 | +16,7 (+3,4) | +13,5 (+0,2) | 76 | 122 (161 %) | 64 (84 %) |

Примечание: в скобках указаны отклонения от климатической нормы (1991–2020 гг.).

Эдафические условия. Почвы на выбранных участках олиготрофные, представляют собой иллювиально-железистые подзолы, типичные для сосновых лишайниковой группы типов леса [Почвы ... , 2013]. По результатам обследования почвенных прикопок установили, что на участке, пройденном беглым низовым пожаром, толщина органического слоя примерно вдвое больше, чем на ненарушенном, при этом живой напочвенный покров местами практически отсутствовал. При устойчивых низовых пожарах толщина подстилки обычно уменьшается, что связано с выгоранием органического вещества [Старцев, Дымов, Прокушкин, 2017].

Строение верхнего, наиболее значимого в исследовании слоя почвы включает органический горизонт *O*, иллювиальный горизонт *E*, переходный горизонт *BFy* и железистый горизонт *B*. Толщина верхних минеральных горизонтов также варьировалась на двух участках (табл. 2), в послепожарной почве визуально отмечено значительно более низкое содержание тонких корней, которые являются вторым по значимости источником почвенного диоксида углерода [Определение ... , 2010].

Таблица 2

Характеристика мощности почвенных горизонтов на пробных площадях в Печоро-Илычском заповеднике

| Почвенный горизонт | Ненарушенный участок | Участок, пройденный пожаром |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| <i>O</i> | 0–2 см | 0–5 см |
| <i>E</i> | 2–10 см | 5–8 см |
| <i>BFy</i> | 10–16 см | 8–11 см |
| <i>B</i> | От 16 см | От 11 см |

В связи с деградацией живого напочвенного покрова на послепожарном участке температура почвы под подстилкой в течение всего сезона 2024 г. была на 3–5 °С выше, чем на ненарушенном (рис. 3). Пиковые значения температуры (15 °С на ненарушенном и 21 °С на постпирогенном участке) отмечены в конце июля – начале августа.

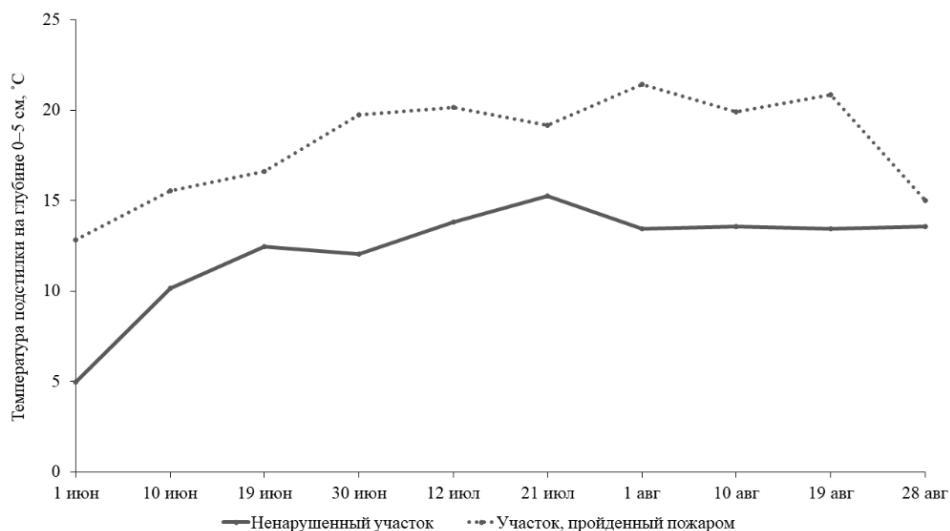


Рис. 3. Динамика температуры подстилки на пробных площадях в Печоро-Илычском заповеднике в течение сезона 2024 г.

Сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ на ненарушенном участке. В течение двух вегетационных сезонов с разными погодными условиями интенсивность почвенной эмиссии CO₂ на ненарушенном участке имела относительно сходную динамику с выраженным ростом в начале, максимумом в середине и снижением в конце сезона. В 2022 г. пик эмиссии наблюдали в середине июля (рис. 4, а), в 2024 г. он был смещён к началу августа (рис. 4, б).

Выявленные различия сезонного хода эмиссии CO₂ обусловлены в первую очередь гидротермическим режимом. В периоды с высокой температурой воздуха и почвы, а также при недостаточном увлажнении скорость выделения CO₂ из почвы увеличивалась, однако выявленные различия оказались ниже порога статистической достоверности. В более тёплый и сухой сезон 2022 г. максимальное значение эмиссии на пяти точках ненарушенного участка соснового леса составило 355 мг м⁻²·ч⁻¹, в 2024 г. – 315 мг м⁻²·ч⁻¹. Полученные результаты согласуются с данными о влиянии климатических факторов на почвенную эмиссию CO₂ в лесах других регионов [Анализ ... , 2014; Влияние ... , 2020]. Установлена прямая зависимость почвенного дыхания от температуры воздуха и почвы и обратная – от влажности почвы (табл. 3). Резкий выброс CO₂ из почвы наблюдали в августе 2022 г. после экстремальных осадков. Явление могло быть связано с быстрой реакцией почвенных микроорганизмов на интенсивное увлажнение после засушливого периода, подобные результаты фиксировали в Китае [Influence ... , 2022].

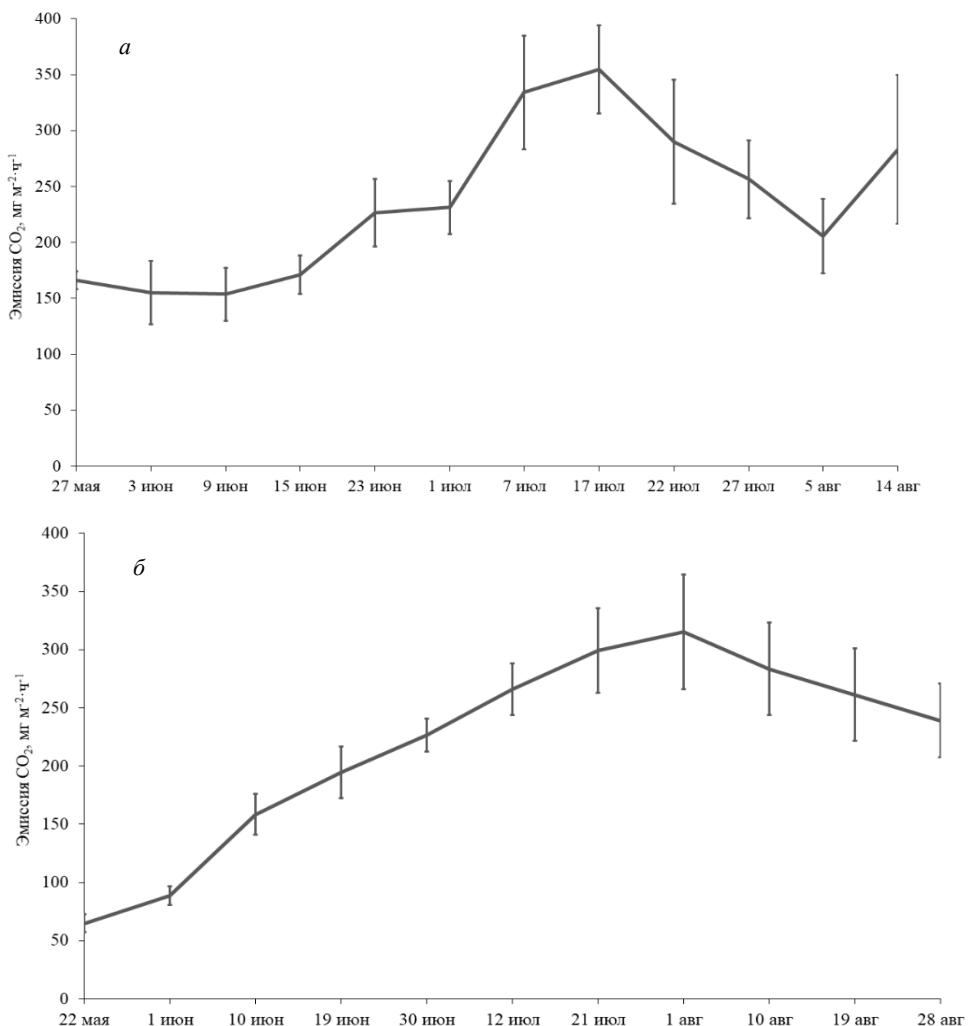


Рис. 4. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO_2 на ненарушенном участке сосняка бруслично-лишайникового в Печоро-Ильчском заповеднике: *а* – 2022 г.; *б* – 2024 г. Планка погрешности соответствует среднеквадратическому отклонению

Корреляция (*r*) почвенной эмиссии CO_2 с факторами окружающей среды на ненарушенном участке

| Параметры | Температура воздуха | Температура почвы на различной глубине, см | | | | | Влажность почвы на различной глубине, см | |
|-----------|---------------------|--|-------------|-------------|-------------|------|--|--------------|
| | | Под подстилкой | 5 | 10 | 20 | 50 | 5 | 20 |
| <i>r</i> | 0,72 | 0,82 | 0,92 | 0,75 | 0,61 | 0,30 | -0,25 | -0,63 |

Примечание: выделены значения корреляции при $p < 0,05$.

Таблица 3

Среднее за сезон значение интенсивности потока CO_2 с поверхности почвы (с начала июня по конец августа) по данным двух лет наблюдений составило $227 \pm 30 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что сопоставимо с данными других авторов в сходных типах леса Республики Коми (190 $\text{мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ [Осипов, 2018]) и Тюменской области (200 $\text{мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ [Гончарова, Матышак, 2014]), но значительно ниже, чем в сосняках лишайниковых на юге Финляндии (356 $\text{мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ [Partitioning ..., 2021]).

Влияние беглого низового пожара на почвенную эмиссию CO_2 . Сравнительный анализ потоков CO_2 с поверхности почвы на ненарушенном и пройденном беглым низовым пожаром участках показал, что различия в сезонной динамике начинают проявляться лишь к концу лета (рис. 5). На ненарушенном участке спад эмиссии начался с началом августа, в то время как на горелом участке пик наблюдался во второй половине августа. Помимо сдвига по времени, максимум эмиссии на участке после пожара ($349 \pm 33 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) оказался выше, чем на участке, где отсутствовало воздействие пожара ($315 \pm 49 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), однако различия статистически недостоверны.

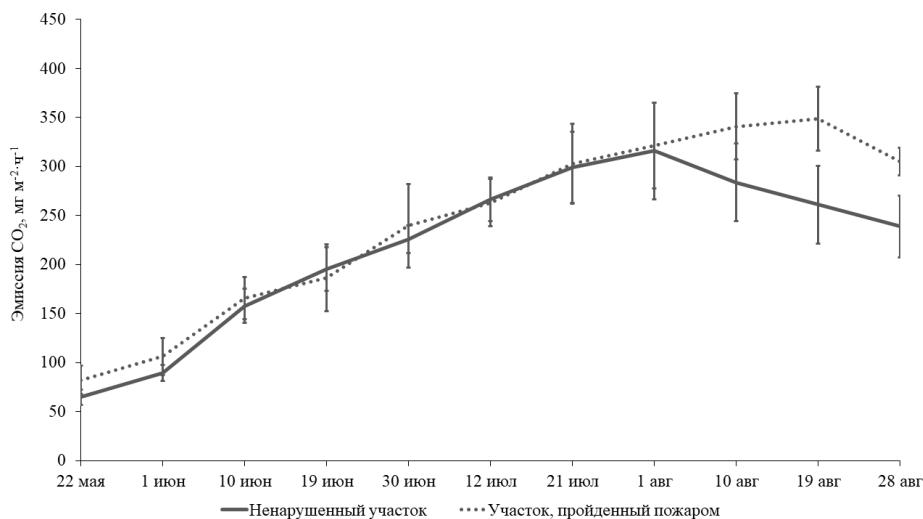


Рис. 5. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO_2 в 2024 г. на ненарушенном и после-пожарном участках в Печоро-Ильчском заповеднике. Планка погрешности соответствует среднеквадратическому отклонению для пяти точек измерений

Выявленные различия сезонной динамики эмиссии CO_2 на двух участках, на наш взгляд, обусловлены двумя факторами. Во-первых, при нарушении почвенного покрова наблюдали более значительный прогрев почвы под подстилкой, а температура является ключевым фактором активности микроорганизмов. Во-вторых, мощность органического слоя спустя 13 лет после беглого низового пожара увеличилась, в то время как после устойчивых пожаров запас органического вещества, как правило, заметно сокращается, и почвенное дыхание, соответственно, замедляется [Динамика ...,

2015]. Кроме того, экспериментально доказано, что наличие в почве постпирогенного угля ускоряет процесс разложения тонких корней, что в свою очередь может приводить к дополнительным выбросам CO_2 [Брянин, Макото, 2017]. Среднее значение эмиссии за сезон 2024 г. на послепожарном участке составило $242 \pm 29 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Суточная динамика почвенной эмиссии CO_2 на ненарушенном и послепожарном участках. Суточная динамика почвенной эмиссии CO_2 в летний период на ненарушенном участке была обусловлена суточным ходом температуры воздуха. В начале вегетационного сезона минимальные показатели наблюдали в ночные и утренние часы, максимальные – в вечернее время, в середине сезона суточный ход снижался и становился недостоверным (рис. 6). Повышение температуры воздуха в короткой перспективе вызывает повышение температуры подстилки, где сосредоточена основная биомасса почвенных микроорганизмов, поэтому изменения интенсивности потока CO_2 происходили с задержкой на 1–2 ч после смены тенденции температуры воздуха. Суточная амплитуда колебаний интенсивности эмиссии составила $44\text{--}80 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Сходная суточная динамика также была зафиксирована на верховых болотах Западной Сибири [Головацкая, Дюкарев, 2011]. Наиболее поздние суточные максимумы почвенной эмиссии CO_2 (с 16:00 до 20:00) отмечены в Красноярском крае [Динамика ... , 2016]. В середине вегетационного сезона суточная динамика выражена менее ярко, чем в начале, что связано с прогревом всех горизонтов, вносящих вклад в почвенное дыхание.

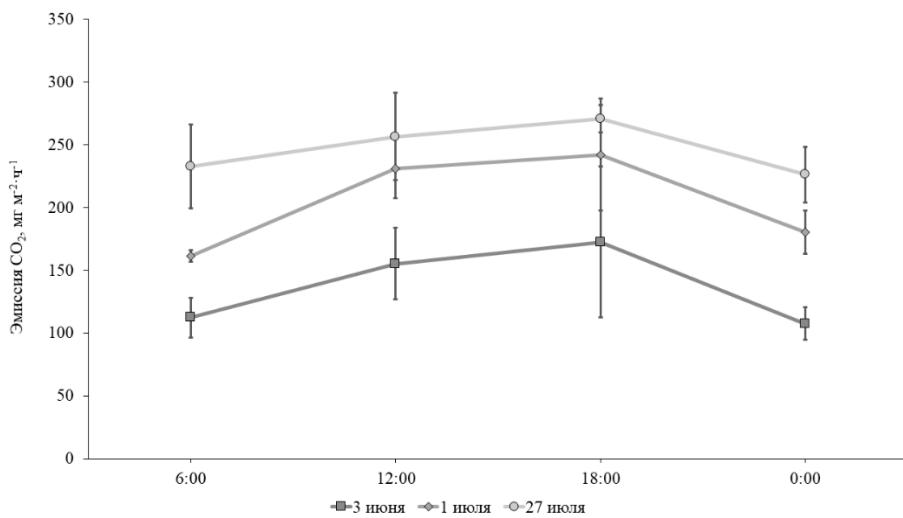


Рис. 6. Суточная динамика почвенной эмиссии CO_2 в 2022 г. на ненарушенном участке в Печоро-Ильчском заповеднике. Планка погрешности соответствует среднеквадратическому отклонению

На участке, пройденном пожаром, суточный ход эмиссии CO_2 с поверхности почвы также соответствовал суточному ходу температуры воздуха, однако задержка реакции отсутствовала (рис. 7): суточный максимум в сере-

дине сезона наблюдали в полуденные часы, а минимум – после полуночи. Анализ суточной динамики почвенной эмиссии CO_2 в послепожарных сосняках на других территориях ранее не проводился.

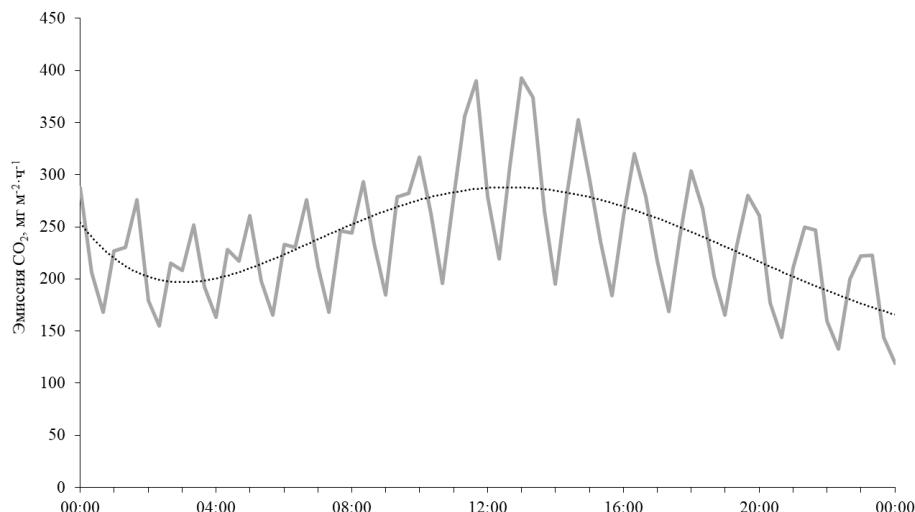


Рис. 7. Суточная динамика почвенной эмиссии CO_2 21 июля 2024 г. на участке, пройденном пожаром в Печоро-Ильчском заповеднике. Данные для пяти точек измерений с линией тренда

Данные по разным точкам измерений нельзя рассматривать в общем массиве, поскольку на послепожарном участке интенсивность почвенной эмиссии CO_2 сильно различалась на точках измерений (имеются достоверные различия при $p < 0,05$), поэтому вместо средних значений использовали линию тренда. Амплитуда суточных колебаний на участке, пройденном пожаром, составляла 100–185 $\text{мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, это в 2–2,5 раза больше, чем на участке, не затронутом пожаром.

Заключение

В ходе исследования получены первые данные по почвенной эмиссии CO_2 в сухих сосняках Печоро-Ильчского заповедника (Северный Урал, среднетаёжная подзона, юго-восток Республики Коми). Впервые проведён сравнительный анализ сезонной и суточной динамики почвенной эмиссии CO_2 на ненарушенном и постпирогенном участках сосняка бруснично-лишайникового.

Максимальная скорость эмиссии CO_2 с поверхности почвы на участке, пройденном беглым низовым пожаром составляет $349 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, на ненарушенном участке – $315 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что выше, чем в сосняках лишайниковой группы в других регионах России. Средняя сезонная скорость эмиссии равна $227 \pm 30 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ и $242 \pm 29 \text{ мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно. Пик эмиссии наблюдается в середине июля или начале августа в зависимости от погодных условий, на участке после пожара пик смещён к концу августа. Высокая темпера-

тура и умеренная засуха способствуют повышению интенсивности эмиссии CO_2 с поверхности почвы. Установлена положительная связь почвенного дыхания с температурой воздуха и почвы в слое 0–20 см и отрицательная связь с влажностью почвы на глубине 20 см. Холодный май замедляет процесс оттаивания почвы, что вызывает более слабые потоки CO_2 в начале лета и более поздний максимум. Суточная динамика дыхания почвы обусловлена суточным ходом температуры. Амплитуда суточных колебаний составляет 44–80 $\text{мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ на ненарушенном участке и 100–185 $\text{мг м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ на горельнике.

В настоящей работе рассмотрена почвенная эмиссия CO_2 в условиях погодных аномалий различного характера, которые в результате изменения климата в ближайшем будущем будут наблюдаться чаще [Mokhov, Semenov, 2016]. Согласно полученным результатам, через 10–15 лет после беглого низового пожара сосняки бруслично-лишайниковые среднетаёжной подзоны могут стать источником повышенных выбросов диоксида углерода из почвы. Учитывая связь почвенного дыхания с температурой и влажностью почвы, продолжающееся изменение климата будет усугубляться поступлением в атмосферу больших объёмов дополнительного CO_2 из почв.

Результаты исследования подчёркивают важность повышения эффективности противопожарных мероприятий в лесничествах, а также могут способствовать грамотной оценке значимости своевременного тушения пожаров. Сокращение числа беглых низовых пожаров и пройденной ими площади в таёжных лесах предположительно будет способствовать снижению объёмов почвенных выбросов CO_2 и сдерживать темпы парникового эффекта.

Список литературы

Анализ основных факторов, влияющих на почвенную эмиссию углекислого газа чернозёмами Стрелецкой степи / А. Тембо, М. Самарджич, В. И. Васенев, О. В. Рыжков, Д. В. Морев, И. И. Васенев // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 519–524.

Брянин С. В., Макото К. Постпирогенный уголь ускоряет разложение органического вещества в почвах boreальных лесов // Комплексная переработка каустобиолитов угольного ряда на основе инновационных технологий – фундаментальный базис модернизации экономики Дальнего Востока : сб. тр. конф. Благовещенск, 2017. С. 56–59.

Влияние ветровала на эмиссию диоксида углерода и запасы тонких корней в почвах Центрального Сихотэ-Алиня / А. В. Иванов, М. А. Сало, В. Ю. Толстикова, С. В. Брянин, Д. Г. Замолодчиков // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1255–1264.

Влияние климатических факторов на эмиссию CO_2 из почв в среднетаёжных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы / А. В. Махныкина, А. С. Прокушкин, О. В. Меняйло, С. В. Верховец, И. И. Тычков, А. В. Урбан, А. В. Рубцов, Н. Н. Копшурникова, Е. А. Ваганов // Экология. 2020. № 1. С. 51–61. <https://doi.org/10.31857/S0367059720010060>

Глобальная декарбонизация: текущие тенденции и прогнозы / С. Р. Сулейманов, С. В. Сочнева, Н. В. Трофимов, Э. А. Галлямов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16, № 3 (63). С. 32–37. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-32-37>

Годовая эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы ельника черничного в средней тайге Республики Карелия / Е. В. Мошкина, А. В. Мамай, И. Н. Курганова, Е. В. Шорохова, И. В. Ромашкин, В. О. Лопес де Гереню // Заповедники и национальные парки – научно-исследовательские лаборатории под открытым небом : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Петрозаводск : КНИЦ РАН, 2021. С. 146–148.

- Головацкая Е. А., Дюкарев Е. А. Сезонная и суточная динамика выбросов CO₂ с поверхности олиготрофных торфяных почв // Метеорология и гидрология. 2011. Т. 36. С. 413–419.
- Гончарова О. Ю., Матышак Г. В. Продуцирование диоксида углерода почвами северной тайги Западной Сибири (Надымский стационар) // Криосфера Земли. 2014. Т. 18, № 2. С. 66–71.
- Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири / А. В. Махныкина, А. С. Прокушkin, Е. А. Ваганов, С. В. Верховец, А. В. Рубцов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2016. Т. 9, № 3. С. 338–357. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357>
- Динамика дыхания почвы на разных стадиях послепожарной восстановительной сукцессии на примере разновозрастных гарей Эвенкии / О. В. Масягина, С. Ю. Евграфова, С. В. Титов, А. С. Прокушkin // Экология. 2015. № 1. С. 23–32. <https://doi.org/10.7868/S0367059715010114>
- Загирова С. В., Михайлов О. А. Экосистемный обмен диоксида углерода и влаги в сосновке бруснично-лишайниковом восточно-европейской средней тайги // Экология. 2021. № 3. С. 1–12. <https://doi.org/10.31857/S0367059721030100>
- Запасы органического углерода в почвах России / Д. Г. Щепащенко, Л. В. Мухортова, А. З. Швиденко, Э. Ф. Ведрова // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>
- Кузнецов М. А. Эмиссия диоксида углерода с поверхности болотно-подзолистой почвы вырубки ельника черничного влажного (средняя тайга, Республика Коми) // Научные основы устойчивого управления лесами : материалы Всерос. науч. конф., посвящ. 30-летию ЦЭПЛ РАН. М. : Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2022. С. 234–235.
- Куликова М. П., Тас-Оол Л. Х., Балакина Г. Ф. Направления снижения антропогенной нагрузки от выбросов парниковых газов на окружающую среду в контексте устойчивого развития Республики Тыва // Экономика. Профессия. Бизнес. 2022. № 4. С. 69–77. <https://doi.org/10.14258/epb202259>
- Левитин М. М. Микроорганизмы в условиях глобального изменения климата // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50, № 5. С. 641–647. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.641rus>
- Молчанов А. Г., Курбатова Ю. А., Ольчев А. В. Влияние сплошной вырубки леса на эмиссию CO₂ с поверхности почвы // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2017. № 2. С. 190–196.
- Определение вклада дыхания корней растений в эмиссию CO₂ из почвы методом субстрат-индуцированного дыхания / И. В. Евдокимов, А. А. Ларionова, М. Шмитт, В. О. Лопес де Гереню, М. Бан // Почвоведение. 2010. № 3. С. 349–355.
- Осипов А. Ф. Влияние межгодовых различий метеорологических характеристик вегетационного периода на эмиссию CO₂ с поверхности почвы среднетаежного сосновка бруснично-лишайникового (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1455–1463. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18120080>
- Почвы и почвенный покров Печоро-Ильчского заповедника (Северный Урал) / ред.: С. В. Дёгтева, Е. М. Лаптева. Сыктывкар : Изд-во УрО РАН, 2013. 328 с.
- Старцев В. В., Дымов А. А., Прокушkin А. С. Почвы постприогренных лиственничников средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17080111>
- Фёдоров В. М., Алтунин И. В., Фролов Д. М. Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения // Жизнь Земли. 2022. Т. 44, № 4. С. 402–414. https://doi.org/10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414
- Greenhouse gas emissions from soils – a review / C. Oertel, J. Matschullat, K. Zurba, F. Zimmermann, S. Erasmi // Geochemistry. 2016. Vol. 76, N 3. P. 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Influence of extreme rainfall events on soil carbon release in the Loess Hilly Region, China / Y. Sun, C. Liu, M. Zhao, L. Liu, S. Liang, Y. Wang, Y. Chen // Catena. 2022. Vol. 220, Part A. 106652. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106652>

Mapping global atmospheric CO₂ concentration at high spatiotemporal resolution / Y. Jing, J. Shi, T. Wang, R. Sussmann // Atmosphere. 2014. Vol. 5, N 4. P. 870–888. <https://doi.org/10.3390/atmos5040870>

Mokhov I. I., Semenov V. A. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change // Russ. Meteorol. Hydrol. 2016. Vol. 41. P. 84–92.

Partitioning of forest floor CO₂ emissions reveals the belowground interactions between different plant groups in a Scots pine stand in southern Finland / K. Ryhti, L. Kulmala, J. Pumpanen, J. Isotalo, M. Pihlatie, H. Helmsaari, J. Leppälämmi-Kujansuu, A. Kieloaho, J. Back, J. Heinonsalo // Agric. Forest Meteorol. 2021. Vol. 297. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108266>

Zheng D., Hunt Jr. E. R., Running S. W. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications // Climate Res. 1993. Vol. 2, N 3. P. 183–191.

References

Tembo A., Samardzhich M., Vasenev V.I., Ryzhkov O.V., Morev D.V., Vasenev I.I. Analiz osnovnykh faktorov, vliyayushchikh na pochvennyu emissiyu uglekislogo gaza cher-nozemami Streletskoi stepi [Analysis of the main factors influencing soil carbon dioxide emission by chernozems of the Streletskaya steppe]. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 2, pp. 519–524. (in Russian)

Bryanin S.V., Makoto K. Postpirogennyi ugol uskoryaet razlozhenie organicheskogo veshchestva v pochvakh borealnykh lesov [Post-pyrolytic coal accelerates the decomposition of organic matter in boreal forest soils]. *Kompleksnaya pererabotka kaustobiolitov ugolnogo ryada na osnove innovatsionnykh tekhnologii – fundamental'nyi bazis modernizatsii ekono-miki Dal'nego Vostoka* [Complex processing of coal series caustobioliths based on innovative technologies is a fundamental basis for modernizing the economy of the Far East: Proc. Sci. Conf., Blagoveschensk, Russia]. 2017, pp. 56–59. (in Russian)

Ivanov A.V., Salo M.A., Tolstikova V.Yu., Bryanin S.V., Zamolodchikov D.G. Vliyanie vetrovala na emissiyu dioksida ugleroda i zapasy tonkikh kornei v pochvakh Tsentral'nogo Sikhote-Alinya [Influence of windblow on carbon dioxide emissions and fine root reserves in soils of the Central Sikhote-Alin]. *Eurasian Soil Sci.*, 2022, no. 10, pp. 1255–1264. (in Russian)

Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Menyailo O.V., Verkhovets S.V., Tychkov I.I., Urban A.V., Rubtsov A.V., Koshurnikova N.N., Vaganov E.A. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na emissiyu SO₂ iz pochv v srednetaezhnykh lesakh Tsentral'noi Sibiri: emissiya kak funktsiya temperatury i vlazhnosti pochvy [Influence of climatic factors on CO₂ emissions from soils in the middle taiga forests of Central Siberia: emission as a function of temperature and soil moisture]. *Russ. J. Ecol.*, 2020, no. 1, pp. 51–61. <https://doi.org/10.31857/S0367059720010060> (in Russian)

Suleimanov S.R., Sochneva S.V., Trofimov N.V., Gallyamov E.A. Global'naya dekarbonizatsiya: tekushchie tendentsii i prognozy [Global decarbonization: current trends and forecasts]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2021, vol. 16, no. 3 (63), pp. 32–37. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-32-37> (in Russian)

Moshkina E.V., Mamai A.V., Kurganova I.N., Shorokhova E.V., Romashkin I.V., Lopes de Gerenu V.O. Godovaya emissiya dioksida ugleroda s poverkhnosti pochvy elnika chernichnogo v srednei taige Respubliki Kareliya [Annual carbon dioxide emissions from the soil surface of a blueberry spruce forest in the middle taiga of the Republic of Karelia]. *Zapovedniki i natsional'nye parki – nauchno-issledovatel'skie laboratori pod otkrytym nebom* [Nature reserves and national parks are open-air research laboratories: Proc. Allrus. Sci. Conf., Petrozavodsk, Russia]. Petrozavodsk, Karelian SC RAS Publ., 2021, pp. 146–148. (in Russian)

Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. Sezonnaya i sutochnaya dinamika vybrosov CO₂ s poverkhnosti oligotrofnykh torfyanikh pochv [Seasonal and daily dynamics of CO₂ emissions from the surface of oligotrophic peat soils]. Russ. Meteorol. Hydrol., 2011, vol. 36, pp. 413–419. (in Russian)

Goncharova O.Yu., Matyshak G.V. Produtsirovaniye dioksida ugleroda pochvami severnoi taigi Zapadnoi Sibiri (Nadymskii statsionar) [Carbon dioxide production by soils of the northern taiga of Western Siberia (Nadym stationary)]. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 66–71. (in Russian)

Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Vaganov E.A., Verkhovets S.V., Rubtsov A.V. Dinamika potokov SO₂ s poverkhnosti pochvy v sosnovykh drevostoyakh Srednei Sibiri [Dynamics of CO₂ fluxes from the soil surface in pine stands of Central Siberia]. *J. Siberian Fed. Univ. Biol.*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 338-357. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357> (in Russian)

Masyagina O.V., Evgrafova S.Yu., Titov S.V., Prokushkin A.S. Dinamika dykhaniya pochvy na raznykh stadiyakh poslepozharnoi vosstanovitelnoi suktsessii na primere raznovozrastnykh garei Evenkii [Dynamics of soil respiration at different stages of post-fire restoration succession using the example of uneven-aged burnt areas in Evenkia]. *Russ. J. Ecol.*, 2015, no. 1, pp. 23-32. <https://doi.org/10.7868/S0367059715010114> (in Russian)

Zagirova S.V., Mikhailov O.A. Ekosistemnyi obmen dioksida ugleroda i vлаги v sosnyake brusnichno-lishainikovom vostochno-evropeiskoi srednei taigi [Ecosystem exchange of carbon dioxide and moisture in a lingonberry-lichen pine forest of the East European middle taiga]. *Russ. J. Ecol.*, 2021, no. 3, pp. 1-12. <https://doi.org/10.31857/S0367059721030100> (in Russian)

Shchepashchenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh Rossii [Organic carbon reserves in soils of Russia]. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, no. 2, pp. 123-132. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123> (in Russian)

Kuznetsov M.A. Emissiya dioksida ugleroda s poverkhnosti bolotno-podzolistoи pochvy vyrubki el'nika chernichnogo vlazhnogo (srednyaya taiga, Respublika Komi) [Carbon dioxide emission from the surface of bog-podzolic soil of a clear-cut moist blueberry spruce forest (middle taiga, Komi Republic)]. *Nauchnye osnovy ustochivogo upravleniya lesami* [Scientific foundations of sustainable forest management: Proc. Allrus. Sci. Conf., Moscow, Russia]. Moscow, Tsentr po problemam ekologii i produktivnosti lesov RAN Publ., 2022, pp. 234-235. (in Russian)

Kulikova M.P., Tas-Ool L.Kh., Balakina G.F. Napravleniya snizheniya antropogennoi nagruzki ot vybrosov parnikovykh gazov na okruzhayushchuyu sredu v kontekste ustochivogo razvitiya Respubliki Tyva [Directions for reducing the anthropogenic load from greenhouse gas emissions on the environment in the context of sustainable development of the Republic of Tyva]. *Economics Profession Business*, 2022, no. 4, pp. 69-77. <https://doi.org/10.14258/epb202259> (in Russian)

Levitin M.M. Mikroorganizmy v usloviyakh globalnogo izmeneniya klimata [Microorganisms in the context of global climate change]. *Agricultural Biology*, 2015, vol. 50, no. 5, pp. 641-647. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.641rus> (in Russian)

Molchanov A. G., Kurbatova Yu. A., Olchev A. V. Vliyanie sploshnoi vyrubki lesa na emissiyu SO₂ s poverkhnosti pochvy [Impact of clear-cutting on CO₂ emissions from the soil surface]. *Biol. Bull.*, 2017, no. 2, pp. 190-196. (in Russian)

Evdokimov I.V., Larionova A.A., Shmitt M., Lopes de Gerenu V.O., Ban M. Opredelenie vklada dykhaniya kornei rastenii v emissiyu CO₂ iz pochvy metodom substrat-indutsirovannogo dykhaniya [Estimation of the contribution of plant root respiration to CO₂ emission from soil using the substrate-induced respiration method]. *Eurasian Soil Sci.*, 2010, no. 3, pp. 349-355. (in Russian)

Osipov A. F. Vliyanie mezgodovykh razlichii meteorologicheskikh kharakteristik vegetatsionnogo perioda na emissiyu SO₂ s poverkhnosti pochvy srednetaezhnogo sosnyaka brusnichno-lishainikovogo (Respublika Komi) [Influence of interannual differences in meteorological characteristics of the growing season on CO₂ emissions from the soil surface of a middle-taiga lingonberry-lichen pine forest (Komi Republic)]. *Eurasian Soil Sci.*, 2018, no. 12, pp. 1455-1463. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18120080> (in Russian)

Pochvy i pochvennyi pokrov Pechoro-Ilychskogo zapovednika (Severnyi Ural) [Soils and soil cover of the Pechora-Ilych Nature Reserve (Northern Urals)]. Degteva S.V., Lapteva E.M. (eds.). Syktyvkar, UB RAS Publ., 2013. 328 p. (in Russian)

Startsev V.V., Dymov A.A., Prokushkin A.S. Pochvy postpirogennykh listvennichnikov srednei Sibiri: morfologiya, fiziko-khimicheskie svoistva i osobennosti pochvennogo organicheskogo veshchestva [Soils of post-pyrogenetic larch forests of Central Siberia: morphology, physicochemical properties and characteristics of soil organic matter]. *Eurasian Soil Sci.*, 2017, no. 8, pp. 912-925. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17080111> (in Russian)

Fedorov V.M., Altunin I.V., Frolov D.M. Vliyanie dioksida ugleroda antropogenного genezisa na termicheskii rezhim atmosfery i ego izmeneniya [Influence of anthropogenic carbon dioxide on

- the thermal regime of the atmosphere and its changes]. *Life of the Earth*, 2022, vol. 44, no. 4, pp. 402-414. https://doi.org/10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414 (in Russian)
- Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmi S. Greenhouse gas emissions from soils – a review. *Geochemistry*, 2016, vol. 76, no. 3, pp. 327-352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Sun Y., Liu C., Zhao M., Liu L., Liang S., Wang Y., Chen Y. Influence of extreme rainfall events on soil carbon release in the Loess Hilly Region, China. *Catena*, 2022, vol. 220, pt. A. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106652>
- Jing Y., Shi J., Wang T., Sussmann R. Mapping global atmospheric CO₂ concentration at high spatiotemporal resolution. *Atmosphere*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 870-888. <https://doi.org/10.3390/atmos5040870>
- Mokhov I. I., Semenov V. A. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 84-92.
- Ryhti K., Kulmala L., Pumpanen J., Isotalo J., Pihlatie M., Helmisaari H., Leppälämmi-Kujansuu J., Kieloaho A., Back J., Heinonsalo J. Partitioning of forest floor CO₂ emissions reveals the belowground interactions between different plant groups in a Scots pine stand in southern Finland. *Agric. Forest Meteorol.*, 2021, vol. 297, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108266>
- Zheng D., Hunt Jr E. R., Running S. W. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. *Climate Res.*, 1993, vol. 2, no. 3, pp. 183-191.

Сведения об авторах

Кудрявцев Роман Викторович
аспирант
Сыктывкарский государственный
университет им. Питирима Сорокина
Россия, 167001, г. Сыктывкар,
Октябрьский пр-т, 55
e-mail: kudriavtsevroman@mail.ru

Мигловец Михаил Николаевич
кандидат биологических наук, научный
сотрудник
Институт биологии ФИЦ «Коми научный
центр УрО РАН»
Россия, 167982, г. Сыктывкар,
ул. Коммунистическая, 28
e-mail: miglovets@ib.komisc.ru

Information about the authors

Kudryavtsev Roman Viktorovich
Postgraduate
Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
55, Oktyabrsky ave., Syktyvkar, 167001,
Russian Federation
e-mail: kudriavtsevroman@mail.ru

Miglovets Mikhail Nikolaevich
Candidate of Sciences (Biology),
Research Scientist
Institute of Biology Komi SC UB RAS
28, Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, 167982,
Russian Federation
e-mail: miglovets@ib.komisc.ru