

УДК 574.4

## БИОГЕННЫЕ ПОТОКИ CO<sub>2</sub> В СОСНЯКЕ БРУСНИЧНО-ЛИШАЙНИКОВОМ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

С. В. Загирова<sup>1\*</sup>, Р. В. Кудрявцев<sup>2</sup>, М. Н. Мигловец<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, Россия, 167982), \*zagirova@ib.komisc.ru

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина (ул. Коммунистическая, 55, Сыктывкар, Россия, 167982)

В статье обсуждаются результаты исследований экосистемных потоков и почвенной эмиссии диоксида углерода в бесснежный период года в сосняке бруснично-лишайниковом на территории Печоро-Илычского заповедника. Использованы данные измерений обмена CO<sub>2</sub> между лесом и приземным слоем атмосферы методом микровихревых пульсаций и эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы методом статических камер. Сезонный ход скорости нетто-обмена диоксида углерода ( $NEE$ ) и гросс-фотосинтеза ( $P_{gross}$ ) соответствовал повышению температуры воздуха и ФАР, наиболее высокие значения этих показателей отмечены в июне и июле. Снижение температуры и поступающей к лесному пологу солнечной радиации в периоды выпадения дождей приводило к сокращению поглощения CO<sub>2</sub> лесным фитоценозом. Суммарный нетто-обмен CO<sub>2</sub> в экосистеме сосняка бруснично-лишайникового с апреля по сентябрь 2022 г. составил  $-895$  г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>, а гросс-фотосинтез соответствовал  $-2037$  г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>. В течение вегетационного сезона с улучшением температурных условий усиливалось экосистемное дыхание ( $R_{eco}$ ), с мая по август отношение  $R_{eco}/P_{gross}$  повышалось с 0,4 до 0,8. Эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности напочвенного покрова ( $R_{soil}$ ) в исследованном ценозе также повышалась в первой половине вегетационного сезона, тенденция к ее снижению наметилась в конце июля – начале августа. Кратковременный всплеск почвенного потока CO<sub>2</sub> отмечен после обильных дождей в середине августа. В сосняке бруснично-лишайниковом отношение  $R_{soil}/R_{eco}$  варьировало в пределах 0,5–0,8, максимальные значения установлены в июле.

Ключевые слова: сосняк бруснично-лишайниковый; средняя тайга; диоксид углерода; экосистемный обмен; почвенная эмиссия

Для цитирования: Загирова С. В., Кудрявцев Р. В., Мигловец М. Н. Биогенные потоки CO<sub>2</sub> в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаежной подзоны на Европейском Северо-Востоке России // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 3. С. 51–61. doi: 10.17076/eco1882

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (122040100031-8).

# S. V. Zagirova<sup>1\*</sup>, R. V. Kudryavtsev<sup>2</sup>, M. N. Miglovets<sup>1</sup>. BIOGENIC CO<sub>2</sub> FLUXES IN A MID-BOREAL COWBERRY-LICHEN PINE FOREST IN THE EUROPEAN NORTHEAST OF RUSSIA

<sup>1</sup> Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (28 Kommunisticheskaya St., 167982 Syktyvkar, Russia), \*zagirova@ib.komisc.ru

<sup>2</sup> Pitirim Sorokin Syktyvkar State University (55 Kommunisticheskaya St., 167982 Syktyvkar, Russia)

The studies of ecosystem fluxes and soil carbon dioxide emissions during the snowless period of the year in a cowberry-lichen pine forest in the Pechora-Ilychsky Nature Reserve are discussed. Measurements of CO<sub>2</sub> fluxes between the forest and the atmospheric boundary layer were made by using the eddy-covariance system and CO<sub>2</sub> emission from the soil surface was estimated by static chamber method. The seasonal variation of the net exchange of carbon dioxide (*NEE*) and gross photosynthesis (*P<sub>gross</sub>*) corresponded to air temperature and *PAR* changes, with highest values noted in June and July. There was a significant decrease in *NEE* due to a decrease in temperature and solar radiation during rainfall. The total net exchange of CO<sub>2</sub> in the cowberry-lichen pine forest from April to September was  $-895 \text{ g CO}_2/\text{m}^2$ , and gross photosynthesis corresponded to  $-2037 \text{ g CO}_2/\text{m}^2$ . Ecosystem respiration (*R<sub>eco</sub>*) also depended on the air temperature and therefore increased from May to August, and the *R<sub>eco</sub>/P<sub>gross</sub>* ratio grew from 0.4 to 0.8. The CO<sub>2</sub> emission from the soil surface (*R<sub>soil</sub>*) in the pine forest gradually increased from May to July, but with a downward trend in August. However the soil CO<sub>2</sub> flux grew after heavy rains in mid-August. The *R<sub>soil</sub>/R<sub>eco</sub>* ratio in the cowberry-lichen pine forest ecosystem varied between 0.5–0.9 with the maximum values in July.

Keywords: cowberry-lichen pine forest; middle taiga; carbon dioxide; ecosystem exchange; soil emission

For citation: Zagirova S. V., Kudryavtsev R. V., Miglovets M. N. Biogenic CO<sub>2</sub> fluxes in a mid-boreal cowberry-lichen pine forest in the European Northeast of Russia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 3. P. 51–61. doi: 10.17076/eco1882

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Institute of Biology of the Komi Science Center (122040100031-8).

## Введение

Россия остается регионом мира, где потепление климата в последние десятилетия существенно превышает среднее глобальное изменение температуры [Второй..., 2014]. По мнению некоторых авторов [Fernández-Martínez et al., 2019], в последние десятилетия повышение температуры в регионах с холодным климатом усиливало положительный эффект возросшей концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере на нетто-продукцию наземных экосистем (*NEP*). Увеличение температуры и продолжительности вегетационного периода в конце XX века положительно повлияло на продукцию фитомассы и сток углерода в большей части бореальных лесов России [Lapenis et al., 2005]. Бореальные леса вносят значительный вклад в связывание атмосферного CO<sub>2</sub>, однако климатические события в текущем столетии могут превратить их в источник парниковых газов, в первую очередь в зоне распространения многолетней мерзлоты [Gauthier et al., 2015].

Большинство современных модельных расчетов будущего климата России показывают уменьшение увлажнения и увеличение повторяемости засух в текущем столетии [Второй..., 2014]. Под воздействием повышенных температур воздуха у древесных растений происходят изменения в структуре камбия и проводящих тканей осевых органов, а сочетание повышенной температуры воздуха и дефицита осадков вызывает снижение проводимости устьиц и фотоассимиляции CO<sub>2</sub> [Qaderi et al., 2019]. Возможно, по этой причине экстремально высокие температуры и дефицит влаги в приземном слое атмосферы в летний период приводят к снижению фотосинтетического связывания диоксида углерода лесными фитоценозами [Barr et al., 2007; Замолодчиков и др., 2017; Zagirova et al., 2019].

Европейский Северо-Восток России характеризуется умеренно-континентальным климатом, с преобладанием циклонической пасмурной и дождливой погоды, продолжительной зимой и коротким летом, что определяет невысокую биологическую продуктивность

хвойных насаждений [Леса..., 1999]. В ходе эволюции хвойные растения приспособились к условиям прохладного и короткого лета таежной зоны, поэтому при необычно высокой температуре воздуха в период вегетации дефицит влаги в атмосферном воздухе отрицательно влияет на скорость фотосинтеза хвойных деревьев [Zagirova, 2015]. По данным измерений методом турбулентных пульсаций, в еловом насаждении средней тайги при жаркой и сухой погоде в начале вегетации экосистемный поток  $\text{CO}_2$  также снижается [Zagirova et al., 2019]. Однако с повышением температуры в течение летнего сезона усиливается почвенное дыхание в сосняках и ельниках таежной зоны [Углерод..., 2014].

Цель настоящей работы состояла в оценке экосистемных потоков и почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаежной подзоны в бесснежный период года. В задачи исследований входило: 1) оценить сезонный ход обмена  $\text{CO}_2$  между сосновым лесом и приземным слоем атмосферы в весенне-летний период; 2) установить сезонный ход эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности напочвенного покрова и оценить вклад почвенного потока  $\text{CO}_2$  в экосистемное дыхание.

## Объекты и методы

Исследования проводили в 2022 г. на территории Якшинского участкового лесничества Печоро-Илычского заповедника (61°49' с. ш. 56°52' в. д., Республика Коми). На этом участке заповедника преобладают равнинные ландшафты с господством сосновых лесов и сфагновых болот, среди сосняков доминируют лишайниковые и брусничные типы [Закономерности..., 2000].

В исследованном сосняке бруснично-лишайниковом древостой составом 10С, V класса бонитета, полнотой 0,8, запасом древесины 177 м<sup>3</sup>/га [Углерод..., 2014]. В древесном ярусе присутствуют четыре поколения сосны, возраст деревьев колеблется в пределах 70–320 лет. По данным сплошного перечета средняя высота живых деревьев составила 14 м. В напочвенном покрове доминируют кустарнички рода *Vaccinium* и лишайники рода *Cladina*, встречаются зеленые мхи *Hylocomium splendens* Hedw. и *Pleurozium schreberi* Willd. ex Brid. Сосняки лишайниковой группы типов леса в равнинных ландшафтах заповедника сформированы на бедных по минералогическому составу подзолах иллювиально-железистых со средней мощностью подстилки и низким содержанием гумуса (0,3–0,4 %) [Почвы..., 2013].

Система для измерений вертикальных потоков  $\text{CO}_2$  по методу турбулентных пульсаций (eddy covariance) включала ультразвуковой анемометр (Wind Master, Gill Instruments Ltd, США) и инфракрасный газоанализатор открытого типа LI-COR 7500 (LI-COR Ltd, США). Характеристика этого метода подробно рассмотрена в публикации [Baldocchi et al., 1988]. Оборудование установлено на высоте 22 м от поверхности земли. Интенсивность фотосинтетически активной радиации ( $\Phi_{\text{AP}}$ ), температуру воздуха ( $T_a$ ), относительную влажность воздуха ( $RH$ ), дефицит упругости водяного пара в атмосферном воздухе ( $VPD$ ) над пологом леса, температуру ( $T_n$ ) и объемное содержание влаги ( $OB$ ) в почве регистрировали автоматической метеостанцией (Campbell Scientific Inc., США), расположенной вблизи измерительной системы. Для заполнения пропусков в микроклиматических данных использовали данные логгеров Hobo (Onset, США). Для характеристики условий увлажнения вегетационного сезона рассчитывали гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова ( $ГТК$ ), который соответствовал отношению суммы осадков к сумме активных температур  $> 10^\circ\text{C}$  за этот же период.

В районе исследования в бесснежный период 2022 г. преобладал ветер северного направления (рис. 1, А) со средней скоростью 1,8 м/сек. Площадь покрытия измерениями пространства на исследуемом объекте, или «футпринт», рассчитана с использованием онлайн-инструмента (<https://footprint.kljun.net>), основанного на алгоритме [Kljun et al, 2015], который учитывает стабильность атмосферных условий в момент измерений, среднюю скорость и преобладающее направление ветра за 30-мин период регистрации потока. Согласно результатам анализа первичных данных, основная доля воздушных потоков (80 %) в течение сезона сосредоточена в радиусе 150 м от измерительного комплекса (рис. 1, Б).

Первичные данные пульсационных измерений обрабатывали в программе EddyPro (LI-COR Inc., США), полученные средние значения вертикального потока  $\text{CO}_2$  за 30-мин интервал приравнивали к нетто-обмену диоксида углерода ( $NEE$ ) между лесом и приземным слоем атмосферы.  $NEE$  со знаком минус соответствовал потоку  $\text{CO}_2$  из атмосферы в экосистему, а со знаком плюс – от поверхности растительного покрова в атмосферу. Для статистического анализа выбрано 8790 измерений за период наблюдений с 14 апреля по 4 октября 2022 г. Для заполнения пробелов в измерениях и разделения  $NEE$  на экосистемное дыхание ( $R_{\text{eco}}$ ) и gross-фотосинтез ( $P_{\text{gross}}$ ) использовали

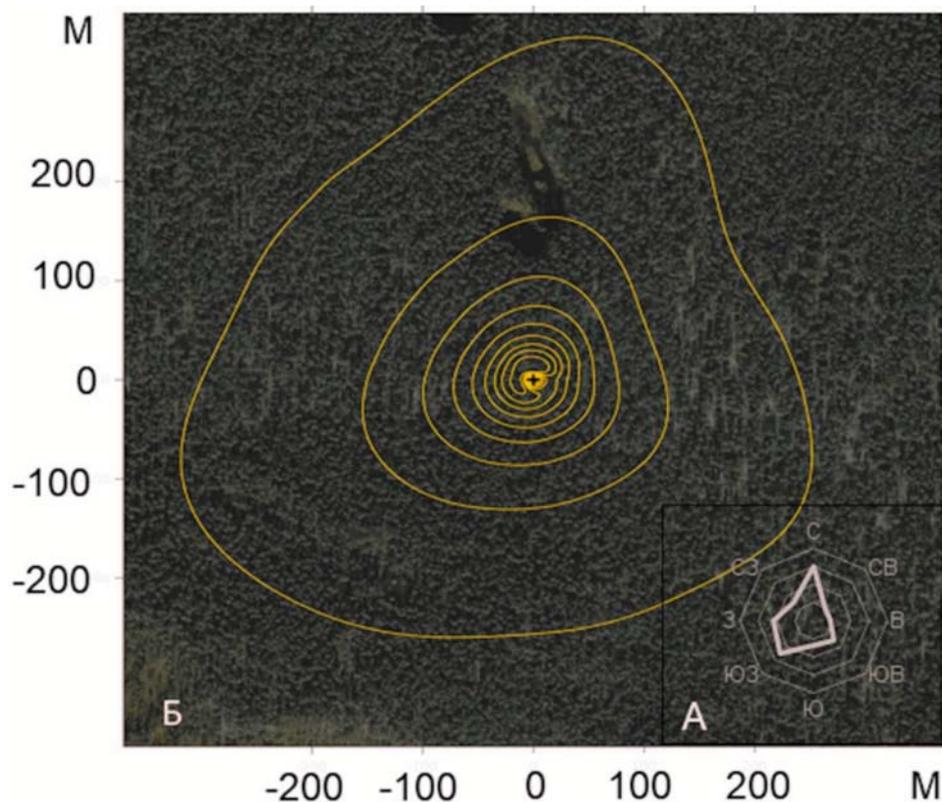


Рис. 1. Преобладающее направление ветра (А) и «футпринт» (Б) в исследуемом пространстве соснового леса. Знак «+» указывает на положение измерительного комплекса. Числовые значения на осях X и Y соответствуют удаленности точки раstra от комплекса (M), изолинии – распределению 10–90 % площади покрытия пространства леса измерениями за сезон, с шагом 10 % от нулевого значения

Fig. 1. The predominant wind direction (A) and the “footprint” (B) in the studied area of the pine forest. The «+» sign indicates the position of the measuring complex. Numerical values on the X and Y axes correspond to the distance of the raster point from the complex (M), the isoline corresponds to the distribution of 10–90% of the forest area covered by the measurements per season, with a step of 10 % from the zero value

онлайн-инструмент Университета Макса Планка (Германия, <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb>).

Скорость потока  $\text{CO}_2$  с поверхности напочвенного покрова ( $R_{\text{soil}}$ ) в зоне «футпринта» измеряли в июне–августе 2022 г. инфракрасным газоанализатором LI-8100A, используя темную почвенную камеру закрытого типа (LI-COR Inc., США), которую устанавливали на основания диаметром 20 см, изготовленные из пластиковых труб. Основания размещены на расстоянии 1 м друг от друга в один ряд: в пределах проекции кроны дерева, на границе проекции кроны и в межкрупном пространстве. Всего использовано три основания, каждое из которых углубляли в подстилку на 5 см без удаления живого напочвенного покрова. В пределах оснований проективное покрытие зеленых мхов и лишай-

ников составляло 60–100 %, кустарничков – 10–30 %. Измерения проводили один раз в неделю с 9.00 до 13.00, в пяти повторностях в каждой точке, экспозиция составляла 1 мин. Температуру и влажность поверхности почвы на глубине 5 и 20 см измеряли датчиками Hobo (Onset, США). Суммарную эмиссию за месяц рассчитывали умножением среднесуточного значения скорости эмиссии, полученного в трех точках измерений, на количество дней. В корреляционном анализе учитывали температуру и влажность воздуха над поверхностью почвы, температуру и влажность почвы на глубине 5 и 20 см. Корреляцию скорости почвенной эмиссии с факторами окружающей среды оценивали по коэффициенту Спирмена в программе R с пакетом Stats для корреляционного и регрессионного анализа.

## Результаты и обсуждение

Погодные условия. В районе исследований весной 2022 г. сохранялась прохладная погода, температура воздуха в апреле-мае была на 1–2 °С ниже, чем за предшествующие десять лет (табл. 1). Переход среднесуточной температуры воздуха над пологом соснового леса к положительным значениям отмечен в начале мая (рис. 2).

В июне установилась умеренно теплая погода, а в июле и августе температура воздуха превышала на 2–3 °С среднемесячные значения за 2011–2021 гг. Сумма активных температур > 10 °С составила 1543 °С. Осадки распределились неравномерно в течение вегетационного периода (рис. 2). В мае и августе 2022 г. дождей выпало в 1,5–2 раза больше, чем в среднем за 2011–2021 гг., при этом недобор осадков в июне составил 20 %, а в июле 47 % (табл. 1). В августе сохранялась теплая погода с обильными дождями. В периоды продолжительных дождей (15–21 мая, 15–28 июня и 8–15 августа) снижались количество поступающей к поверхности лесного полога солнечной радиации и среднесуточная температура. При отсутствии осадков и высокой температуре усиливался дефицит упругости водяного пара в атмосферном воздухе, в некоторые дни июля его значение достигало 1,6 кПа (рис. 2). В период активной вегетации гидротермический коэффициент Селянинова соответствовал 1,7, однако в июле вследствие дефицита осадков он снизился до 0,63.

Сезонный ход температуры органогенного горизонта почвы в сосновом лесу соответствовал изменению температуры воздуха, постепенно увеличиваясь в мае-июле (рис. 3). При этом объемное содержание влаги в почве имело тенденцию к снижению, достигая мини-

муму в первой декаде августа. Вариабельность увлажнения почвы в летние месяцы обусловлена прежде всего неравномерным выпадением осадков.

Экосистемный обмен  $\text{CO}_2$ . В экосистеме соснового леса сток  $\text{CO}_2$  наблюдался уже в середине апреля, несмотря на низкую положительную среднесуточную температуру воздуха (рис. 4).

Сезонный ход скорости нетто-обмена  $\text{CO}_2$  соответствовал изменению температуры воздуха и  $\Phi\text{AP}$ , по мере повышения этих показателей скорость  $NEE$  в лесном насаждении постепенно повышалась, в июне-июле составляла 0,15–0,18 мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{с})$ . В периоды продолжительных и обильных дождей снижение среднесуточной температуры и  $\Phi\text{AP}$  сопровождалось снижением нетто-обмена  $\text{CO}_2$ . Переход соснового леса от стока к источнику  $\text{CO}_2$  регистрировали в конце сентября при среднесуточной температуре воздуха близкой к нулю и  $\Phi\text{AP}$  меньше 100 мкмоль/ $(\text{м}^2 \text{с})$ .

В сосняке бруснично-лишайниковом изменение экосистемного дыхания соответствовало ходу температуры воздуха. Средняя скорость  $R_{\text{eco}}$  в апреле-мае составила  $0,05 \pm 0,02$  мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{с})$ , в июле повышалась до  $0,10 \pm 0,01$  мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{с})$  и оставалась на этом уровне в течение августа (рис. 4). Снижение  $R_{\text{eco}}$  наблюдали в сентябре с ухудшением температурного режима в лесном насаждении. Сезонный ход gross-фотосинтеза соответствовал изменению  $NEE$ , высокие значения скорости  $P_{\text{gross}}$  отмечены в июне-июле при благоприятных свето-температурных условиях для ассимиляции  $\text{CO}_2$ . Отношение  $R_{\text{eco}}/P_{\text{gross}}$  повышалось от 0,4 в апреле-мае до 0,8 в августе-сентябре, что обусловлено снижением gross-фотосинтеза и сохранением активного дыхания в экосистеме соснового леса в конце вегетационного сезона.

Таблица 1. Средняя за месяц температура воздуха и сумма осадков в районе проведения исследований\*  
Table 1. Monthly average air temperature and precipitation in the research area\*

Месяц Month	Температура, °С Temperature, °C		Сумма осадков, мм Precipitation, mm	
	2022 г.	средняя, 2011–2021 гг. mean, 2011–2021	2022 г.	средняя, 2011–2021 гг. mean, 2011–2021
Апрель / April	0,2	1,4	44	50
Май / May	6,7	8,5	101	47
Июнь / June	13,6	14,2	61	76
Июль / July	19,0	17,1	38	72
Август / August	16,7	13,8	122	81
Сентябрь / September	6,6	8,0	51	66

Примечание. \*Для метеостанции Якша (по: <https://rp5.ru>).

Note. \*For the Yaksha weather station (after: <https://rp5.ru>).

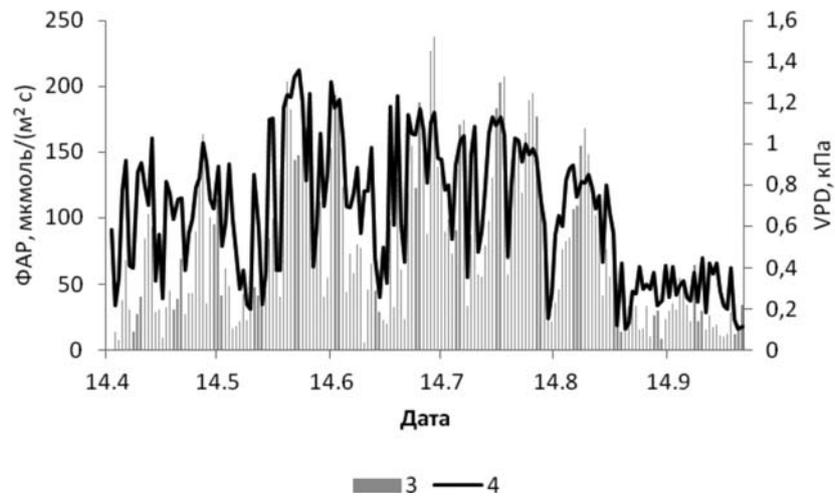
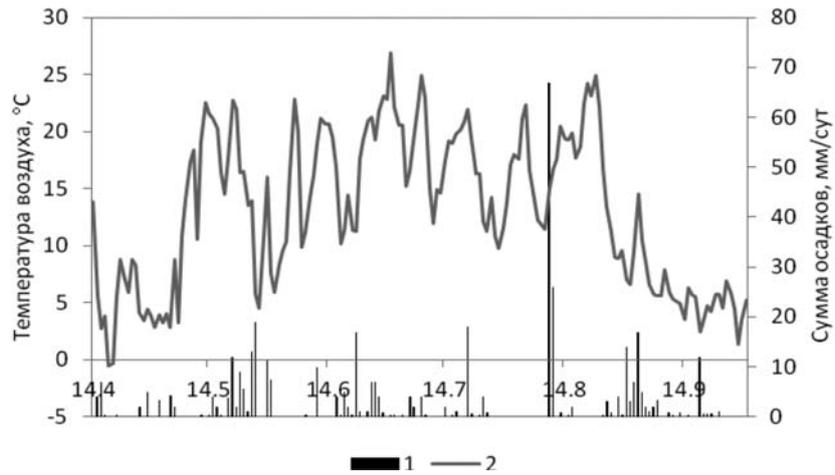


Рис. 2. Сезонная динамика суточной суммы осадков (1), среднесуточных значений  $T_{air}$  (2),  $VPD$  (3) и  $ФАР$  (4) над пологом древостоя в сосняке бруснично-лишайниковом

Fig. 2. Seasonal course of precipitation (1), mean daily  $T_{air}$  (2),  $VPD$  (3) and  $PAR$  (4) above the canopy of a tree stand in a cowberry-lichen pine forest

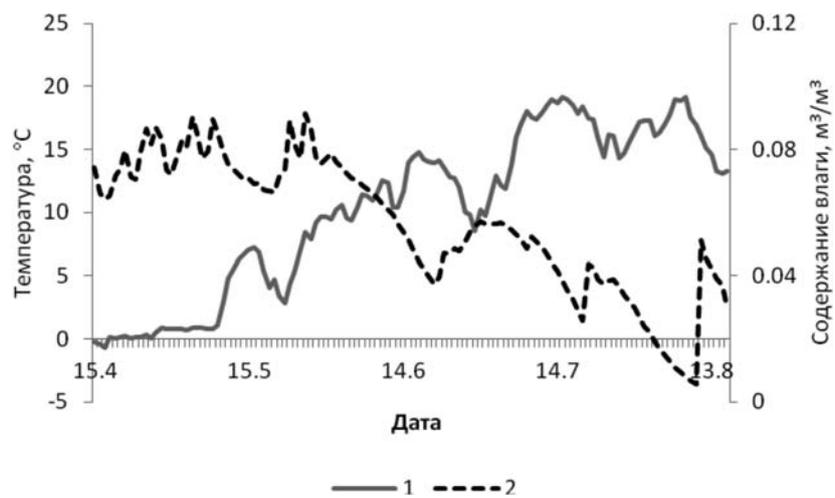


Рис. 3. Сезонный ход среднесуточной температуры (1) и объемного содержания влаги (2) в подстилке сосняка бруснично-лишайникового

Fig. 3. Seasonal course of mean daily soil temperature (1) and volumetric moisture content in litter of a cowberry-lichen pine forest

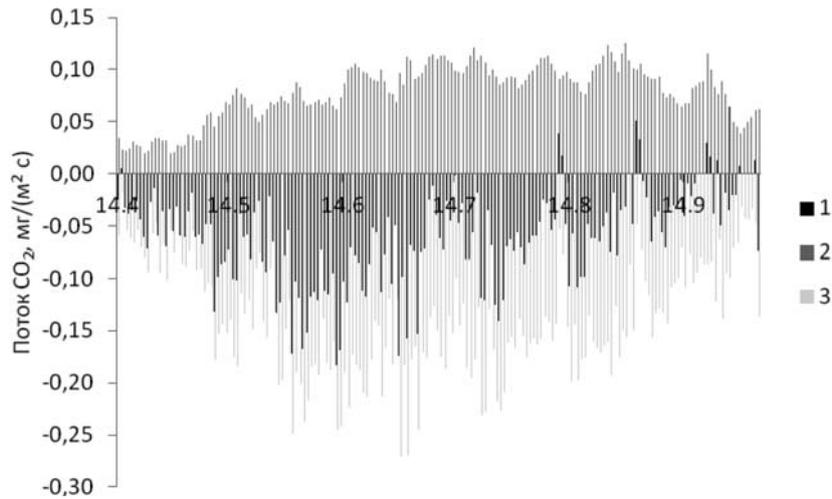


Рис. 4. Сезонный ход скорости нетто-обмена  $\text{CO}_2$  (1), экосистемного дыхания (2) и gross-фотосинтеза (3) в сосняке бруснично-лишайниковом  
 Fig. 4. Seasonal course of net-exchange  $\text{CO}_2$  (1), ecosystem respiration (2) and gross-photosynthesis (3) in a cowberry-lichen pine forest

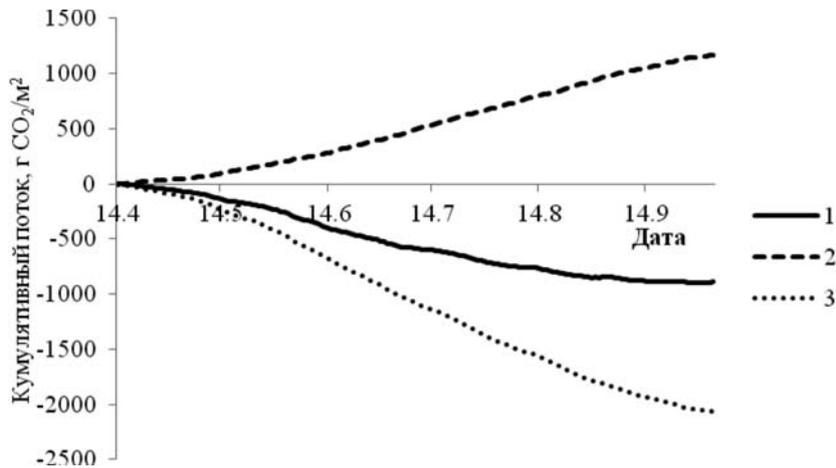


Рис. 5. Кумуляция нетто-обмена  $\text{CO}_2$  (1), экосистемного дыхания (2) и gross-фотосинтеза (3) в сосняке бруснично-лишайниковом  
 Fig. 5. Cumulation of net-exchange  $\text{CO}_2$  (1), ecosystem respiration (2) and gross-photosynthesis (3) in a cowberry-lichen pine forest

В целом с 14 апреля по 4 октября 2022 г. кумуляция нетто-обмена  $\text{CO}_2$  в сосновом насаждении составила  $-895 \text{ г CO}_2/\text{м}^2$  (или  $-244 \text{ г С}/\text{м}^2$ ), экосистемного дыхания  $-1142 \text{ г CO}_2/\text{м}^2$  (или  $311 \text{ г С}/\text{м}^2$ ), gross-фотосинтез достигал  $-2037 \text{ г CO}_2/\text{м}^2$  (или  $-555 \text{ г С}/\text{м}^2$ ) (рис. 5). Суммарный *NEE* в данном типе леса в бесснежный период оказался выше, чем в среднетаежном сосняке лишайниковом Сибири ( $-156 \text{ г С}/(\text{м}^2 \text{ год})$ ) [Чебакова и др., 2014]), но меньше, чем в еловом насаждении европейской средней тайги в период вегетации ( $-327 \text{ г С}/\text{м}^2$  [Zagirova et al., 2019]).

Однако экосистемный обмен  $\text{CO}_2$  леса зависит от погодных условий и характеризуется межгодовой вариабельностью. Так, на исследованном участке сосняка баланс *NEE* в период вегетации 2013 г. был в два раза ниже, чем в 2022 г. [Загирова, Михайлов, 2021]. Возможно, погодные условия 2022 г. оказались более благоприятными для биогенных потоков  $\text{CO}_2$ , так как 2013 г. характеризовался значительным дефицитом осадков в мае–августе, а гидротермический коэффициент Селянинова соответствовал 0,75. По мнению некоторых авторов, увеличение температуры и снижение

содержания влаги в воздухе и почве приводят к снижению на 20 % фотосинтетической продуктивности деревьев сосны обыкновенной в летний период [Суворова, 2009], что обусловлено прежде всего уменьшением проводимости устьиц для  $\text{CO}_2$  у древесных растений [Qaderi et al., 2019]. Этим же можно объяснить снижение суммарного  $NEE$  в сосняке бруснично-лишайниковом в 2013 г. при дефиците осадков и необычно высокой температуре воздуха в период вегетации.

Эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности напочвенного покрова. Сезонный ход эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности напочвенного покрова сосняка бруснично-лишайникового соответствовал изменению температурного режима. Различия среднедневных значений эмиссии между тремя точками измерений не установлены, что позволило объединить их на следующем этапе статистического анализа. Средняя для трех точек скорость потока  $\text{CO}_2$  в начале июня составила  $0,044 \pm 0,007$  мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{с})$ , к середине июля повысилась до  $0,099 \pm 0,016$  мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{с})$  (рис. 6). Во второй половине июля – начале августа наметился тренд к ее снижению, однако всплеск эмиссии  $\text{CO}_2$  наблюдали после обильных дождей в середине августа.

В сезонной динамике скорость потока  $\text{CO}_2$  из почвы в атмосферу зависела от температуры воздуха на поверхности почвы ( $r = 0,52$ ;  $n = 21$ ;  $p < 0,05$ ), температуры почвы на глубине 5 см ( $r = 0,66$ ;  $n = 9$ ;  $p < 0,05$ ) и 20 см ( $r = 0,68$ ;  $n = 26$ ;  $p < 0,05$ ). Установлена отрицательная зависимость  $R_{soil}$  от влажности почвы на глубине 20 см

( $r = -0,55$ ;  $n = 21$ ;  $p < 0,05$ ). Полученные результаты согласуются с исследованиями влияния погодных условий на почвенную эмиссию  $\text{CO}_2$  в разных типах сосняков среднетаежной подзоны [Осипов, 2023].

Отношение почвенной эмиссии к экосистемному дыханию в сосняке бруснично-лишайниковом менялось в течение вегетационного сезона и достигало наибольших значений в июле (табл. 2). Среднесуточное значение  $R_{soil}$  в июне–августе 2022 г. составило  $5,7 \pm 1,8$  г  $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{сут})$ , а суммарный эмиссионный поток за 92 дня –  $543$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  (или  $148$  г  $\text{C}/\text{м}^2$ ). Экосистемное дыхание соснового леса за этот же период достигало  $756$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  (или  $206$  г  $\text{C}/\text{м}^2$ ), в этом случае поток  $\text{CO}_2$  из почвы соответствовал 72 % суммарного экосистемного дыхания. Полученные данные согласуются с результатами измерений экосистемных потоков в ельнике южной подзоны тайги, где отношение  $R_{soil}/R_{eco}$  составило 70 % [Мониторинг..., 2017].

Согласно исследованиям А. Ф. Осипова [2023] в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаежной подзоны на Европейском Севере, суммарная эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы сосняка лишайникового в июне–августе разных лет наблюдений варьировала в пределах  $159\text{--}212$  г  $\text{C}/\text{м}^2$ . Более высокие значения ( $700 \pm 100$  г  $\text{C}/\text{м}^2$ ) получены в сосняках лишайниковых Средней Сибири [Махныкина и др., 2020], а в бореальных лесах разных типов почвенная эмиссия составляла в среднем  $322$  г  $\text{C}/(\text{м}^2 \text{год})$  [Raich, Schlesinger, 1992; Лопес Де Герену и др., 2011].

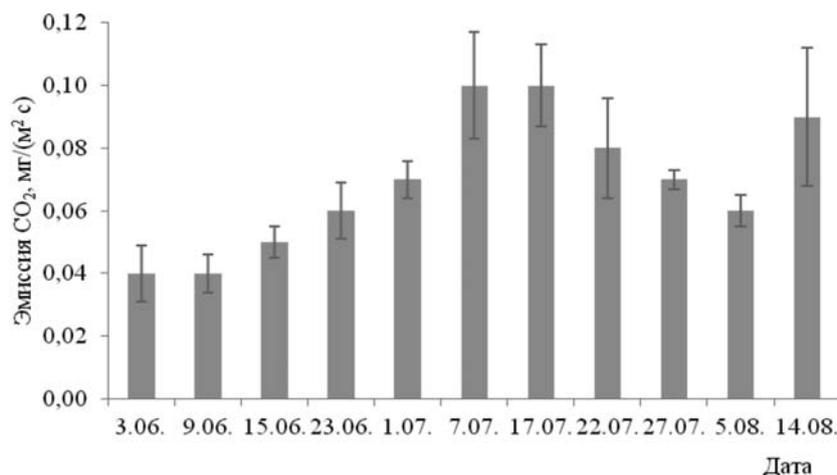


Рис. 6. Сезонный ход эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы в сосняке бруснично-лишайниковом. Столбец соответствует среднему значению для трех точек измерений, бар – стандартному отклонению

Fig. 6. Seasonal change of  $\text{CO}_2$  emission from soil in a cowberry-lichen pine forest. The column corresponds to the average value, the bar corresponds to the standard deviation

Таблица 2. Средняя за месяц скорость экосистемного дыхания и почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> (г CO<sub>2</sub> / (м<sup>2</sup> сут)  
Table 2. Mean month value of ecosystem respiration and emission CO<sub>2</sub> from soil (g CO<sub>2</sub> / (m<sup>2</sup> d)

Месяц Month	$R_{eco}$	$R_{soil}$	$R_{soil} / R_{eco}$
Июнь / June	7,14 ± 1,17*	4,10 ± 0,77	0,57
Июль / July	8,83 ± 0,85	7,26 ± 1,24	0,82
Август / August	8,71 ± 1,06	6,48 ± 1,50	0,74

Примечание. \*Соответствует среднеарифметическому значению и стандартному отклонению.  
Note. \*In accordance with the mean value and standard deviation.

## Выводы

С применением метода турбулентных пульсаций проведена оценка сезонной вариабельности вертикальных потоков CO<sub>2</sub> в сосняке бруснично-лишайниковом средней тайги на Европейском Северо-Востоке России. В беснежный период скорость нетто-обмена диоксида углерода и gross-фотосинтеза увеличивалась с повышением ФАР и температуры воздуха. С 14 апреля по 4 октября суммарный нетто-обмен CO<sub>2</sub> составил –895 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>, а суммарный gross-фотосинтез достигал –2037 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> (–244 и –555 г С/м<sup>2</sup> соответственно). В этот же период суммарное экосистемное дыхание составило 1142 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> (или 311 г С/м<sup>2</sup>), а в июне–августе – 756 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> (или 206 г С/м<sup>2</sup>). Изменение отношения  $R_{eco}/P_{gross}$  от 0,4 в начале до 0,8 в конце вегетационного сезона обусловлено снижением интенсивности gross-фотосинтеза при сохранении активного экосистемного дыхания. Сезонный ход эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности напочвенного покрова в сосняке соответствовал изменению температуры воздуха и почвы, при этом наиболее высокие значения эмиссии отмечены в июле. Доля почвенного дыхания в экосистемном дыхании сосняка бруснично-лишайникового в июне–августе варьировала в пределах 0,5–0,8. Полученные результаты указывают на значительный вклад почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в экосистемное дыхание соснового насаждения, что важно учитывать при прогнозировании углеродного обмена в таежных лесах в связи с изменением климата в регионе.

Авторы благодарны С. П. Швецову и Р. Г. Гуляеву за техническую помощь и участие в обработке первичных материалов, а также администрации Печоро-Ильчского заповедника за содействие в проведении полевых работ.

## Литература

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на терри-

тории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.

Загирова С. В., Михайлов О. А. Экосистемный обмен диоксида углерода и влаги в сосняке бруснично-лишайниковом восточно-европейской средней тайги // Экология. 2021. № 3. С. 1–12. doi: 10.31857/S0367059721030100

Закономерности полувекковой динамики биоты девственной тайги Северного Предуралья / Ред. А. Г. Васильев. Сыктывкар, 2000. 206 с.

Замолодчиков Д. Г., Гитарский М. Л., Шилкин А. В., Марунин А. С., Карелин Д. В., Блинов В. Г., Иващенко А. И. Мониторинг циклов диоксида углерода и водяного пара на полигоне «Лог таежный» (Валдайский национальный парк) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 54–68. doi: 10.21513/2410-8758-2017-1-54-68

Леса Республики Коми / Ред. Г. М. Козубов, А. И. Таскаев. М.: ДИК, 1999. 332 с.

Лопес Де Гереню В. О., Курбатова Ю. А., Курганова И. Н., Тиунов А. В., Аничкин А. Е., Мякшина Т. Н., Кузнецов А. Н. Суточная и сезонная динамика потока CO<sub>2</sub> из почв в различных древостоях муссонного тропического леса // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1074–1082.

Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Меняйло О. В., Верховец С. В., Тычков И. И., Урбан А. В., Рубцов А. В., Кошурникова Н. Н., Ваганов Е. А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO<sub>2</sub> из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. 2020. № 1. С. 51–61. doi: 10.31857/S0367059720010060

Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / Ред. Д. Г. Замолодчиков, Д. В. Карелин, М. Л. Гитарский, В. Г. Блинов. Саратов, 2017. 279 с.

Осипов А. Ф. Влияние лесорастительных условий на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы среднетаежных сосняков Республики Коми // Лесоведение. 2023. № 4. С. 369–378. doi: 10.31857/S0024114823040071

Почвы и почвенный покров Печоро-Ильчского заповедника (Северный Урал) / Ред. С. В. Дегтева, Е. М. Лаптева. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2013. 327 с.

Суворова Г. Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири / Ред. Р. К. Салаяев. Новосибирск: ГЕО, 2009. 195 с.

Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики

Коми / Ред. К. С. Бобкова, С. В. Загирова. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2014. 202 с.

Чебакова Н. М., Выгодская Н. Н., Арнет А., Беллели-Маркезини Л., Курбатова Ю. А., Парфенова Е. И., Валентини Р., Верховец С. В., Ваганов Е. А., Шульце Е.-Д. Энерго-массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). 2. Углеродный обмен и продуктивность // Известия РАН. Серия биологическая. 2014. № 1. С. 65–75. doi: 10.7868/S0002332914010044

Baldocchi D. D., Hincks B. B., Meyers T. P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods // *Ecology*. 1988. Vol. 69, no. 5. P. 1331–1340.

Barr A., Black T., Hogg E., Griffiths T., Morgenstern K., Kljun N., Theede A., Nesic Z. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forests, 1994–2003 // *Glob. Change Biol.* 2007. Vol. 13. P. 561–576. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01220.x

Fernández-Martínez M., Sardans J., Chevallier J., Ciais P., Obersteiner M., Vicca S., Canadell J. G., Bastos A., Friedlingstein P., Sitch S., Piao S. L., Janssens I. A., Penuelas J. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO<sub>2</sub> and temperature // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9. P. 73–79. doi: 10.1038/s41558-018-0367-7

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change // *Science*. 2015. Vol. 349. P. 819–822. doi: 10.1126/science.aaa9092

Kljun N., Calanca P., Rotach M. W., Schmid H. P. A simple two-dimensional parameterisation for flux footprint prediction (FFP) // *Geosci. Model Dev.* 2015. Vol. 8, no. 11. P. 3695–3713. doi: 10.5194/gmdd-8-6757-2015

Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D., Nillson S., Ayyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Glob. Change Biol.* 2005. Vol. 11. P. 2090–2102. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001069.x

Qaderi M. M., Martel A. B., Dixon S. L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation // *Plants*. 2019. Vol. 8. Art. 65. doi: 10.3390/plants80300065

Raich J. W., Schlesinger W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // *Tellus B*. 1992. Vol. 44, no. 2. P. 81–99.

Zagirova S. V. Structure, pigment content, and photosynthesis of *Siberian larch* needles in Northern and SubArctic Urals // *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8, no. 7. P. 871–878. doi: 10.1134/S1995425515070173

Zagirova S. V., Mikhailov O. A., Elsakov V. V. Carbon dioxide and water exchange between spruce forest and atmosphere in spring–summer under different weather conditions // *Contemporary Problems of Ecology*. 2019. Vol. 12. P. 45–58. doi: 10.1134/S1995425519010116

## References

Baldocchi D. D., Hincks B. B., Meyers T. P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*. 1988;69(5):1331–1340.

Barr A., Black T., Hogg E., Griffiths T., Morgenstern K., Kljun N., Theede A., Nesic Z. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forests, 1994–2003. *Global Change Biology*. 2007;13: 561–576. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01220.x

Bobkova K. S., Zagirova S. V. (eds.). Carbon in forest and swamp ecosystems of specially protected natural territories of the Komi Republic. Syktvykar: IB Komi SC UB RAS; 2014. 202 p. (In Russ.)

Chebakova N. M., Vygodskaya N. N., Arnet A., Belelli-Marchesini L., Kurbatova Yu. A., Parfenova E. I., Valentini R., Verkhovets S. V., Vaganov E. A., Schulze E.-D. Energy and mass transfer and productivity of the main ecosystems of Siberia (based on the results of measurements by the method of turbulent pulsations). 2. Carbon exchange and productivity. *Izv. RAS. Ser. biol. = Biology Bulletin*. 2014;1:65–75. doi: 10.7868/S0002332914010044 (In Russ.)

Degteva S. V., Lapteva E. M. (eds.). Soils and soil cover of the Pechora-Ilych Reserve (Northern Urals). Syktvykar: IB Komi SC UB RAS; 2013. 327 p. (In Russ.)

Fernández-Martínez M., Sardans J., Chevallier J., Ciais P., Obersteiner M., Vicca S., Canadell J. G., Bastos A., Friedlingstein P., Sitch S., Piao S. L., Janssens I. A., Penuelas J. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO<sub>2</sub> and temperature. *Nature Climate Change*. 2019;9:73–79. doi: 10.1038/s41558-018-0367-7

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change. *Science*. 2015;349:819–822. doi: 10.1126/science.aaa9092

Kljun N., Calanca P., Rotach M. W., Schmid H. P. A simple two-dimensional parameterisation for flux footprint prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*. 2015;8(11):3695–3713. doi: 10.5194/gmdd-8-6757-2015

Kozubov G. M., Taskaev A. I. (eds.). Forests of the Komi Republic. Moscow: DIK; 1999. 332 p. (In Russ.)

Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D., Nillson S., Ayyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate. *Global Change Biology*. 2005;11:2090–2102. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001069.x

Lopez De Guereñu V. O., Kurbatova Yu. A., Kurganova I. N., Tiunov A. V., Anichkin A. E., Myakshina T. N., Kuznetsov A. N. Daily and seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> flux from soils in various stands of monsoon tropical forest. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2011;9: 1074–1082. (In Russ.)

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. The impact of climatic factors on CO<sub>2</sub> emissions from soils of middle taiga forests in Central Siberia: emission as a function of soil temperature and moisture. *Russian Journal of Ecology*. 2020;51(1):46–56. doi: 10.1134/S1067413620010063

Osipov A. F. Influence of forest growing conditions on CO<sub>2</sub> emissions from the soil surface of medium-taiga pine forests of the Komi Republic. *Lesovedenie = Forest Science*. 2023;4:369–378. doi: 10.31857/S0024114823040071 (In Russ.)

Qaderi M. M., Martel A. B., Dixon S. L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. *Plants*. 2019;8:65. doi: 10.3390/plants80300065

Raich J. W., Schlesinger W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*. 1992;44(2):81–99.

Suvorova G. G. Photosynthesis of coniferous trees in Siberia. Novosibirsk: GEO; 2009. 195 p. (In Russ.)

The second assessment report of the Russian meteorological service on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Roshydromet; 2014. 58 p. (In Russ.)

Vasiliev A. G. (ed.). Patterns of the half-century dynamics of the biota of the virgin taiga in the Northern Urals. Syktyvkar; 2000. 206 p. (In Russ.)

Zagirova S. V. Structure, pigment content, and photosynthesis of *Siberian larch* needles in Northern and SubArctic Urals. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015;8(7):871–878. doi: 10.1134/S1995425515070173

Zagirova S. V., Mikhailov O. A. Ecosystem exchange of carbon dioxide and moisture in the lingonberry-

lichen pine forest of the Eastern European middle taiga. *Ekologiya = Ecology*. 2021;3:1–12. doi: 10.31857/S0367059721030100 (In Russ.)

Zagirova S. V., Mikhailov O. A., Elsakov V. V. Carbon dioxide and water exchange between spruce forest and atmosphere in spring–summer under different weather conditions. *Contemporary Problems of Ecology*. 2019;12:45–58. doi: 10.1134/S1995425519010116

Zamolodchikov D. G., Guitarsky M. L., Shilkin A. V., Marunich A. S., Karelin D. V., Blinov V. G., Ivashchenko A. I. Monitoring of carbon dioxide and water vapor cycles at the Taiga Log landfill (Valdai National Park). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2017;1:54–68. doi: 10.21513/2410-8758-2017-1-54-68 (In Russ.)

Zamolodchikov D. G., Karelin D. V., Guitarsky M. L., Blinov V. G. (eds.). Monitoring greenhouse gas fluxes in natural ecosystems. Saratov; 2017. 279 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 15.03.2024; принята к публикации / accepted: 25.04.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

##### **Загирова Светлана Витальевна**

д-р биол. наук, старший научный сотрудник, заведующая отделом лесобиологических проблем Севера

*e-mail: zagirova@ib.komisc.ru*

##### **Кудрявцев Роман Викторович**

аспирант

*e-mail: kudriavtsevroman@mail.ru*

##### **Мигловец Михаил Николаевич**

канд. биол. наук, научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера

*e-mail: miglovets@ib.komisc.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

##### **Zagirova, Svetlana**

Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher

##### **Kudryavtsev, Roman**

Doctoral Student

##### **Miglovets, Mikhail**

Cand. Sci. (Biol.), Researcher