

УДК 631.433.3:630*114.35:582.475

ВЛИЯНИЕ ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭМИССИЮ CO₂ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ СОСНЯКОВ РЕСПУБЛИКИ КОМИ¹

© 2023 г. А. Ф. Осипов*

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, ГСП-2, Сыктывкар, 167982 Россия

*E-mail: osipov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 13.09.2022 г.

После доработки 11.10.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В связи с большими разбросами оценок эмиссии CO₂ в лесных экосистемах разных типов актуальным остается получение экспериментальных данных по дыханию их почв. Цель работы – охарактеризовать выделение CO₂ с поверхности почв спелых и приспевающих среднетаежных сосняков с учетом лесорастительных условий. Объектами исследования послужили сосняки сфагновые, черничный и бруснично-лишайниковый, произрастающие на территории лесных стационаров Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Республика Коми). Для измерения эмиссии CO₂ использовали газоанализатор LI-COR 8100 в течение 2008–2017 гг. Дана краткая характеристика погодных условий для периода исследований. В течение бесснежного периода относительно высокие значения потока CO₂ из почвы сосняков выявлены в июле (сосняки сфагновые – 1.9–2.9 г С м⁻² сут⁻¹) и августе (2.5–6.6 г С м⁻² сут⁻¹ – сосняки черничный и бруснично-лишайниковый). Определены межгодовая вариабельность скорости среднемесячной эмиссии CO₂ и влияние погодных условий. Выявлена тесная ($R^2 = 0.49–0.77$) положительная взаимосвязь скорости выделения диоксида углерода с температурой почвы. Корреляция этого процесса с влажностью почвы слабая. В течение летних месяцев с дыханием почвы сосняка черничного в атмосферу выносятся 188–442 г С м⁻², вегетационного периода (01.05–30.09) – 279–563 г С м⁻², бесснежного периода (01.05–31.10) – 308–583 г С м⁻², что в 1.5–1.8 раза выше, чем в сосняках сфагновых и бруснично-лишайниковом в течение бесснежного ($p = 0.014$) и вегетационного ($p = 0.020$) периодов. Достоверного влияния лесорастительных условий на потери С-CO₂ в летние месяцы не выявлено ($p = 0.106$). Сосняки лишайниковый и сфагновые были сопоставимы по величине потока С-CO₂ с поверхности почвы как в течение вегетации, так и бесснежный период ($p > 0.05$). Приведенные данные важны при определении расходной части баланса углерода в лесных экосистемах на европейском северо-востоке России.

Ключевые слова: эмиссия CO₂, температура почвы, влажность почвы, сосняк, температурный коэффициент Q_{10}

DOI: 10.31857/S0024114823040071, EDN: XRZZVT

Эмиссия CO₂ (Rs) с поверхности почвы является крупнейшим потоком, обеспечивающим возврат диоксида углерода в атмосферу (Bond-Lamberty, Thomson, 2010). Вместе с тем обобщенные оценки этого процесса характеризуются большими вариациями полученных значений как на региональном (Mukhortova et al., 2021), так и глобальном уровне (Hashimoto et al., 2015). Синтетический анализ, основанный на прямых измерениях дыхания почвы, был предложен как простое решение для глобальных расчетов потока

CO₂ (Sha et al., 2021). Для этих целей создаются базы данных, примерами которых являются материалы в работах (Mukhortova et al., 2020; Jian et al., 2021). Следовательно, накопление экспериментальных данных, поиск и верификация предикторов для оценки величины эмиссии CO₂ с поверхности почв без прямых измерений продолжают оставаться актуальной задачей исследований (Jian et al., 2020).

Анализ упомянутых выше баз данных по дыханию почвы показал, что определение потоков CO₂ из почвы на территории Российской Федерации проводится в нескольких регионах. Так, уникальные многолетние наблюдения за дыханием почв в лесном и луговом ценозах в связи с климатическими трендами выполнены I.N. Kurganova с

¹ Работа выполнена в рамках темы НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России”, номер государственной регистрации 122040100031-8.

Таблица 1. Краткая характеристика исследуемых сосняков

Тип леса (№ ППП)	Тип почвы	Лесная подстилка		
		мощность, см	С, %	N, %
Чернично-сфагновый (26)	Торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-железистая	18.9	37.0–44.8	0.72–0.94
Чернично-сфагновый (4)	Торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-гумусово-железистая	17.4	34.3–47.3	0.71–0.83
Черничный влажный	Торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-гумусово-железистая	9.5	45.9	1.30
Бруснично-лишайниковый	Подзол иллювиально-железистый	1.8	46.2	1.04

соавт. (2020) в южном Подмоскowie. Эмиссия CO₂ с поверхности южнотаежных заболоченных хвойных лесов исследована D. Ivanov с соавт. (2020). Сезонная динамика, взаимосвязь дыхания почвы с ее температурой и влажностью изучены в среднетаежных еловых (Машика, 2006; Кузнецов, 2010) и сосновых (Осипов, 2015; Osipov, 2018) экосистемах Республики Коми. Детальные исследования потока CO₂ из почв лиственничных и сосновых лесов в широтном градиенте Красноярского края проведены сотрудниками Института леса им. В.Н. Сукачева (Masyagina et al., 2020; Masyagina et al., 2021). Для Западной Сибири подобные работы выполнены А.А. Vobrik с соавт. (2020). В качестве отдельного направления следует отметить влияние промышленного аэротехногенного загрязнения на дыхание почв (Kadulin, Koptsik, 2013; Сморгалов, Воробейчик, 2016; Kadulin et al., 2017), где рассматривается также эмиссия CO₂ с поверхности ненарушенных участков.

Среднегодовую температуру воздуха и осадки на метеостанции, где ведется непрерывный мониторинг, возможно рассматривать как основные предикторы при модельных оценках выноса углерода с потоком CO₂ с поверхности почв (Курганова и др., 2019; Jian et al., 2020). Однако эти значения могут быть сходны для насаждений разных типов. Вместе с тем обобщенных исследований, характеризующих влияние условий произрастания на эмиссию CO₂ с поверхности почв насаждений, растущих в близких климатических условиях, явно недостаточно. Получение и анализ таких данных позволит вводить поправочные коэффициенты, при помощи которых будет возможен расчет выноса CO₂ с использованием сведений по температуре воздуха и осадкам на метеостанциях. Следовательно, оценка дыхания почвы с учетом лесорастительных условий является актуальной задачей.

Целью данной работы является определение эмиссии CO₂ с поверхности почвы среднетаежных сосняков с учетом лесорастительных условий на северо-востоке европейской части России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Работа выполнена в средней тайге Республики Коми. Климат района исследований умеренно-континентальный со среднегодовой температурой воздуха 0.1°C и количеством осадков около 700 мм в год, большая часть которых выпадает в виде дождей. Объектами исследования послужили почвы разных типов сосновых лесов, произрастающих на территории Ляльского и Чернамского лесных стационаров Института биологии Коми НЦ УрО РАН (табл. 1). Древесный ярус фитоценозов формирует сосна (*Pinus sylvestris* L.) с небольшой примесью ели (*Picea abies* (L.) Karst.) и березы. Древостой сосняка черничного IV класса бонитета, а сфагновые и лишайниковый сосняки имеют V класс. Лесная подстилка исследуемых насаждений характеризуется кислой (pH 3.5–4.5) реакцией, верхние минеральные горизонты сложены песками.

Эмиссию диоксида углерода с поверхности почвы сосняков измеряли 1–2 раза в месяц в течение бесснежного (май–октябрь) периода. Для определения скорости потока применяли инфракрасный газоанализатор LI-COR 8100 с почвенной камерой 20 см. При измерении камера устанавливалась на пластиковые основания высотой 10 см, заглубленные в лесную подстилку на 5 см. Растения напочвенного покрова срезали, а в случае повторного прорастания их удаляли. Температуру почвы на глубине 10 см определяли датчиком, входящим в комплектацию прибора, что соответствовало нижней границе или F-горизонту лесной подстилки для почв полугидроморфных ландшафтов и элювиальному горизонту подзола иллювиально-железистого. Влажность лесной подстилки и почвы оценивали весовым методом с последующим переводом в объемные единицы.

Линейные или экспоненциальные уравнения наиболее часто применяют для оценки взаимосвязи потока CO₂ из почв с ее гидротермическими условиями. В данной работе использовали экспоненциальные уравнения, которые были приведены к линейному виду:

$$\ln R_s = \alpha X + \beta, \quad (1)$$

где $\ln R_s$ – логарифмированные данные по дыханию почвы, α и β – коэффициенты уравнения, X – температура/влажность почвы.

Преобразование исходных данных по дыханию почвы было выполнено с целью приведения остатков линейной модели к нормальному распределению и однородности дисперсий ошибок линейной модели.

Для оценки реакции дыхания почвы на изменение ее температуры обычно применяют температурный коэффициент Q_{10} , при расчете которого используется коэффициент α из уравнения 1 (Davidson et al., 2006):

$$Q_{10} = e^{\alpha \times 10} \quad (2)$$

где Q_{10} – температурный коэффициент, e – значение экспоненты, α – коэффициент уравнения 1.

Расчет выноса углерода с эмиссией CO₂ с поверхности почвы (C-CO₂) проводили по среднесуточным значениям температуры почвы, измеренным автономными регистраторами НОВО, используя уравнение 3:

$$R_{s_{\text{period}}} = \sum_{n=1}^n R_{10} Q_{10}^{(T-10)/10}, \quad (3)$$

где $R_{s_{\text{period}}}$ – вынос C-CO₂ за временной интервал, г С м⁻², R_{10} – величина R_s при температуре 10°C, Q_{10} – температурный коэффициент, T – среднесуточная температура почвы на глубине 10 см.

Для приспевающего сосняка чернично-сфагнового и сосняка черничного расчет выноса C-CO₂ для данных 2016 и 2017 гг. проводили по величине среднемесячной эмиссии:

$$R_{s_{\text{period}}} = \sum_{n=1}^n R_s N, \quad (4)$$

где $R_{s_{\text{period}}}$ – вынос C-CO₂ за временной интервал, г С м⁻², R_s – величина среднемесячного потока CO₂, г С м⁻² сут⁻¹, N – число дней в месяце.

Вынос C-CO₂ рассчитывали для летних (июнь–август) месяцев, вегетационного (май–сентябрь) и бесснежного периодов (май–октябрь).

Для статистической обработки данных использовали Microsoft Excel 2010 и R 4.03 (R Core Team, 2020). Рассчитывались средние значения и их ошибки. Нормальность распределения исходных данных и остатков линейных моделей регрессии проверяли методом Шапиро-Уилка. Исходя из этих результатов, для парных сравнений использовались t -критерий (p) или критерий Уилкоксона-Манна-Уитни. Дисперсионный анализ (ANOVA или критерий Краскела-Уоллиса в зависимости от нормальности распределения и однородности дисперсий исходных данных) проводили для оценки различий R_s между объектами исследований и среднемесячными значениями.

Статистический анализ выполнен при 95%-ом уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в период наблюдений. Краткая характеристика погодных условий вегетационных периодов в период исследований приведена на рис. 1. Так, в 2008 г., 2014–2015 гг. они были близки к климатической норме, что выражалось в небольшом отклонении средней температуры воздуха и количества осадков ($\approx 0.7^\circ\text{C}$ и 10% соответственно). Период вегетации 2017 г. характеризовался относительно холодной (ниже на 0.7°C) и сырой (больше на 21%) погодой, тогда как в 2010–2011 гг. и 2013 г. она была теплой ($+1.3\dots+2^\circ\text{C}$), с недостатком (меньше на 18–41%) осадков. Теплая ($+0.9\dots+2.1^\circ\text{C}$) погода с обильным (выше на 26–56%) выпадением осадков наблюдалась в 2009 г., 2012 г. и 2016 г. Гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова в вегетационный период 2013 г. составил 1.0, что свидетельствует о слабо засушливых условиях. В 2010–2011 гг. и 2015 г. погодные условия были влажными, а в остальные годы величины ГТК соответствовали избыточному увлажнению, что характерно для региона исследований.

Сезонная динамика потока CO₂ с поверхности почвы. На рис. 2 представлены данные, характеризующие выделение диоксида углерода с поверхности почвы среднетаежных сосняков. В сфагновых типах сообществ относительно большую скорость (1.9–2.9 г С м⁻² сут⁻¹) потока CO₂ наблюдали в июле. В сосняках черничном и лишайниковом в августе отмечали более высокую интенсивность дыхания почвы в течение бесснежного периода. Так, скорость выделения CO₂ в сосняке черничном в этом месяце в годы исследований изменялась от 2.8 до 6.6 г С м⁻² сут⁻¹, а в бруснично-лишайниковом – от 2.5 до 4.2 г С м⁻² сут⁻¹. Смещение максимума эмиссии в этих типах леса, вероятно, обусловлено большим накоплением тепла в почвах вследствие меньшей мощности лесной подстилки, чем в сосняках сфагновых. Кроме этого, по мере уменьшения светового дня в августе в сосняке черничном на поверхность почвы начинает поступать легкоминерализуемый опад, который сформирован листьями черники (*Vaccinium myrtillus* L.), голубики (*Vaccinium uliginosum* L.) и березы и более активно вовлекается в процессы разложения. Относительно низкие величины дыхания почвы во всех исследуемых сосняках отмечались в мае и октябре, которые были как сопоставимы (сосняк сфагновый и сосняк лишайниковый в 2016 г.), так и различались в годы исследований. Факторный анализ показал, что в сосняках во все периоды наблюдений в течение бесснежного периода существовали досто-

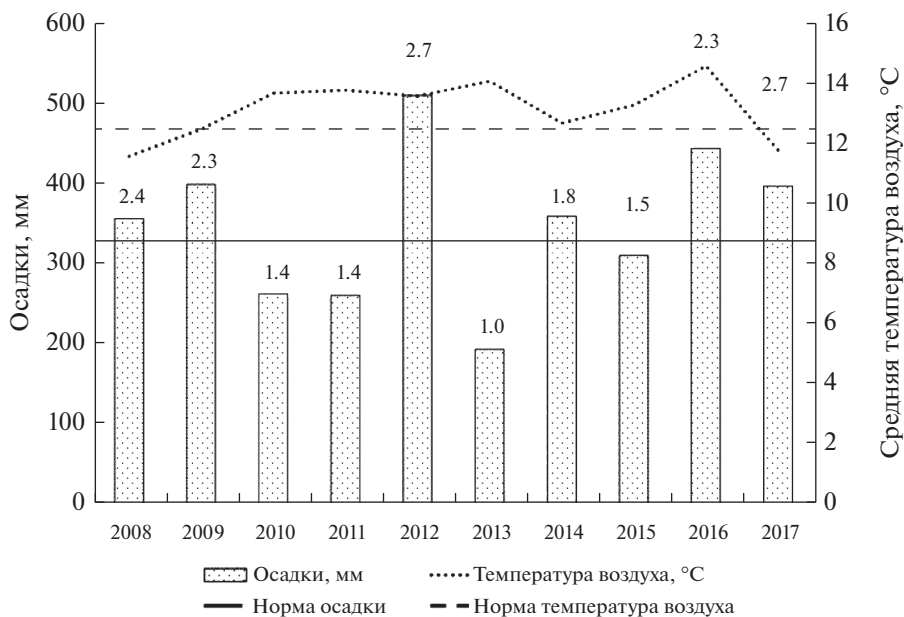


Рис. 1. Средняя температура воздуха и количество поступающих осадков в течение вегетационного периода в годы исследований. Надпись над диаграммой – величина ГТК Селянинова.

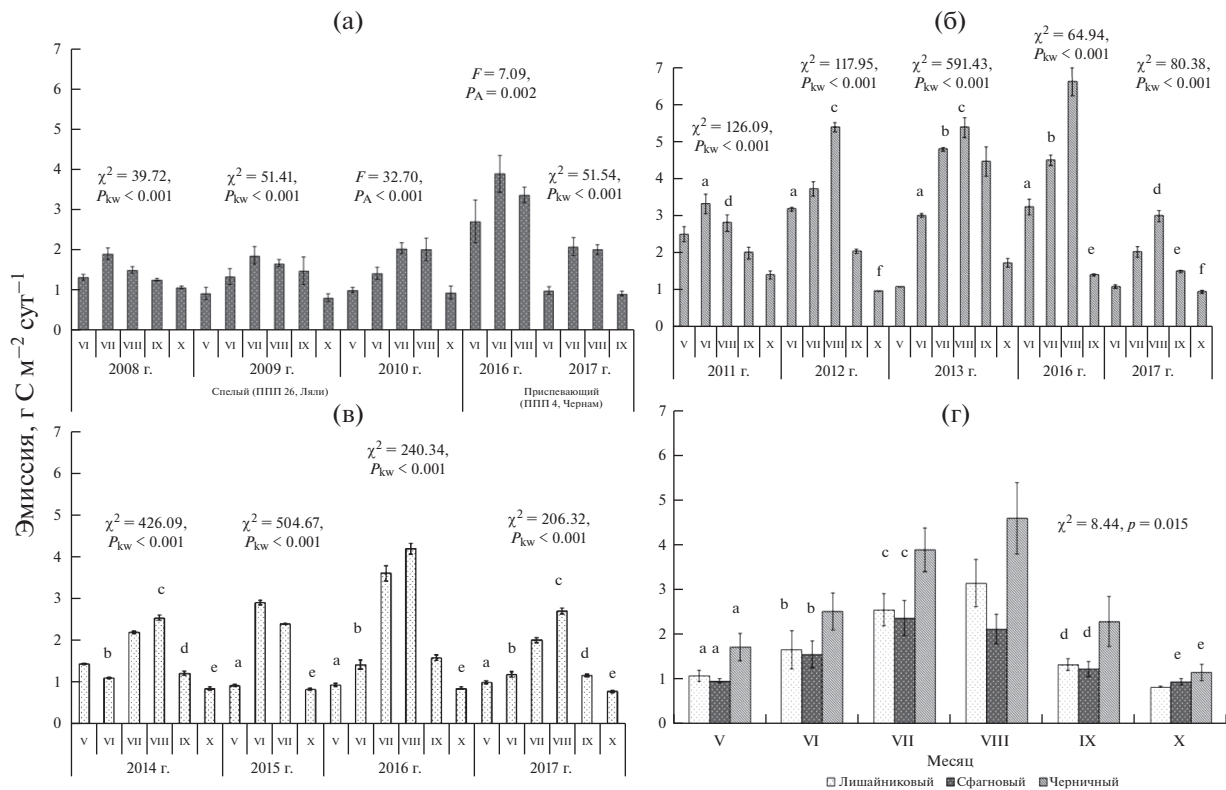


Рис. 2. Выделение углерода с поверхности почвы среднетаежных сосняков: а – чернично-сфагновых; б – черничного; в – бруснично-лишайникового; г – объединенные среднеемесячные данные за все годы исследования. Над диаграммой – результаты факторного анализа. Планки погрешностей – стандартная ошибка. Одинаковыми буквами над столбцами обозначены: на диаграммах а–в показаны месяцы, между которыми отсутствует достоверная межгодовая разница; на диаграмме г – месяцы, в которые не выявлено различий между типами леса.

Таблица 2. Характеристика уравнений ($\ln R_s = \alpha X + \beta$) зависимости эмиссии CO₂ от температуры и влажности почвы

Фактор	Коэффициенты уравнения		R ²	p-value
	α	β		
Сосняки сфагновые				
Температура почвы	0.104	-0.648	0.49	<0.001
Влажность почвы	-0.005	0.661	0.01	0.186
Сосняк черничный				
Температура почвы	0.128	-0.775	0.77	<0.001
Влажность почвы	-0.021	1.253	0.08	0.001
Сосняк бруснично-лишайниковый				
Температура почвы	0.111	-0.815	0.69	<0.001
Влажность почвы	-0.008	0.563	0.02	0.451

верные различия в интенсивности среднемесячной эмиссии CO₂ с поверхности почв.

Условия произрастания оказывают статистически значимое ($p = 0.015$) влияние на интенсивность потока CO₂ с поверхности почвы среднетаежных сосняков (рис. 2г). Сравнение среднемесячных значений CO₂ между отдельными типами леса показало, что в мае достоверные различия Rs между исследованными сообществами отсутствовали ($p > 0.05$). В течение июня – сентября скорость эмиссии диоксида углерода с поверхности почвы сосняка черничного была выше по сравнению с сосняками лишайниковым и сфагновыми в 1.4–2.2 раза, которые, в свою очередь, были сопоставимы по величине дыхания почвы практически во все месяцы, за исключением августа и октября. Довольно близкие величины потока CO₂ в октябре с поверхности почв сосняков черничного и сфагновых, вероятно, обусловлены тем, что их органогенный горизонт предохраняет почву от потери тепла, тогда как быстрое остывание верхних горизонтов подзола иллювиально-железистого в сосняке бруснично-лишайниковом ведет к меньшей скорости дыхания почвы в этот месяц.

Представленные нами данные имеют типичный внутрисезонный ход эмиссии CO₂ с поверхности почвы, приведенный ранее для лесных экосистем средней полосы (Карелин и др., 2014; Ivanov et al., 2020; Kurganova et al., 2020; и др.), европейского севера России (Машика, 2006; Кузнецов, 2010; Kadulin et al., 2017; и др.), Западной и Центральной Сибири (Bobrik et al., 2020; Masyagina et al., 2020; и др.) и Европы (Korkiakoski et al., 2019; Kučinskis, Marozas, 2021; и др.). Как отмечено в приведенных выше работах, сезонная динамика дыхания почвы обусловлена изменениями их температурных условий, развитием подземных органов растений, а также поступлением свежего растительного опада. Максимальные значения потока CO₂ с поверхности почвы исследуемых

нами среднетаежных сосновых сообществ были немного выше по сравнению с сосняками Кольского полуострова и Красноярского края, но ниже в 1.4–2.1 относительно сосняков, произрастающих в южной тайге России, Литве и Финляндии. Следует отметить, что величины дыхания почвы сосняка лишайникового были сходны с насаждениями аналогичного типа в Красноярском крае и выше, чем на Кольском полуострове.

Влияние температуры и влажности почвы на эмиссию CO₂. В табл. 2 представлены обобщенные уравнения, включающие данные по дыханию почвы за весь период наблюдений в среднетаежных сосняках разных типов. Положительная, с достаточно высокими коэффициентами детерминации ($R^2 = 0.49–0.77$) взаимосвязь эмиссии CO₂ с температурой почвы выявлена во всех типах исследуемых сосняков. Влажность почвы оказывает отрицательное влияние на поток диоксида углерода с ее поверхности. Следует также отметить слабую корреляцию ($R^2 = 0.01–0.08$), которая статистически незначима в сосняках сфагновых и бруснично-лишайниковом.

Положительное влияние температуры почвы на интенсивность эмиссии CO₂ с ее поверхности достаточно хорошо освещено для различных типов экосистем (Davidson et al., 2006; Машика, 2006; Курганова и др., 2019; Masyagina et al., 2020; и др.). Вместе с тем авторы отмечают неоднозначную роль влажности почвы. Так, в обзоре, приведенном L. Mukhortova с соавт. (2021), отмечено, что в засушливых условиях увеличение влажности почвы приводит к активизации жизнедеятельности микробиоты и корней и росту скорости дыхания почв, в отличие от переувлажненных сообществ, где наблюдаются ограничение диффузии кислорода и подавление эмиссии CO₂. Данные, показывающие снижение содержания растворенного кислорода при увеличении влажности почвы в среднетаежных сосняках Республики Коми, были

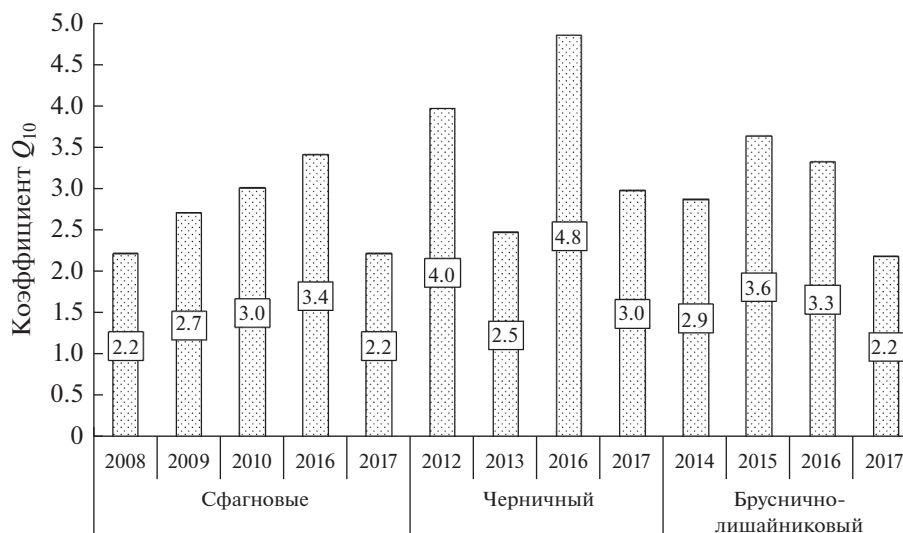


Рис. 3. Величина температурного коэффициента Q_{10} в годы исследований.

приведены ранее К.С. Бобковой (1987). Исследованные нами сосняки произрастают в зоне избыточного увлажнения, что приводит к отрицательному и слабому влиянию влажности почвы на поток диоксида углерода в атмосферу. Близкие к нашим результаты были получены ранее для почв полугидроморфных ландшафтов М.А. Кузнецовым (2010) и Д. Ivanov с соавт. (2020).

Таблица 3. Эмиссия углерода из почвы среднетаежных сосняков, $г\ C\ м^{-2}$

Год	Период		
	01.06–31.08	01.05–30.09	01.05–31.10
Сосняки сфагновые			
2009 г.	137.3 ± 12.9 ¹	203.7 ± 19.1	234.0 ± 21.9
2010 г.	135.8 ± 13.4	196.1 ± 19.4	221.8 ± 22.0
2016 г.	306.8 ± 21.6	— ²	—
2017 г.	157.1 ± 8.2	—	—
Сосняк черничный			
2011 г.	208.8 ± 11.4	300.5 ± 35.6	345.2 ± 42.3
2012 г.	248.6 ± 17.4	347.0 ± 24.3	393.0 ± 27.5
2013 г.	240.9 ± 10.8	347.0 ± 15.6	394.4 ± 17.8
2016 г.	441.9 ± 57.4	562.7 ± 63.7	583.3 ± 64.1
2017 г.	188.6 ± 33.5	278.7 ± 37.5	308.2 ± 37.6
Сосняк бруснично-лишайниковый			
2014 г.	179.6 ± 13.7	244.1 ± 16.5	270.5 ± 17.1
2015 г.	174.2 ± 10.5	243.4 ± 15.4	276.2 ± 18.6
2016 г.	211.8 ± 10.0	281.7 ± 12.4	305.0 ± 15.0
2017 г.	158.9 ± 6.4	220.8 ± 8.8	241.7 ± 9.7

¹ — среднее ± ошибка среднего;

² — не рассчитывали.

Значения температурного коэффициента Q_{10} изменялись в годы исследований (рис. 3). Так, в сосняках сфагновых этот показатель варьировал от 2.2 до 3.4, черничном — от 2.5 до 4.8, бруснично-лишайниковом — от 2.2 до 3.6. В литературе приводятся сведения, что коэффициент Q_{10} зависит от условий увлажнения конкретного периода наблюдений (Davidson et al., 2006; Kurganova et al., 2020). Примерно такие же тенденции получены нами в годы, когда исследования проводились на всех объектах. Так, в теплый и влажный 2016 г. наблюдали относительно высокие значения Q_{10} , которые были выше для сосняков сфагновых и черничного, тогда как в “холодный” и влажный 2017 г. этот показатель был ниже. Нами также не обнаружены значимые корреляции между Q_{10} и гидротермическим коэффициентом или средней температурой воздуха в течение вегетации ($p > 0.05$) во всех исследованных насаждениях сосняков.

Установлено, что величина Q_{10} , по различным оценкам, варьирует в широком диапазоне от 2.0 до 8.0 (Машика, 2006; Kurganova et al., 2020; Ivanov et al., 2020; Kučinskis, Marozas, 2021; и др.), что сходно с нашими результатами. По мнению цитированных выше авторов, тип экосистемы и почвы, режим ее температуры и влажности, а также активность микробных сообществ являются наиболее значимыми факторами, определяющими величину температурного коэффициента Q_{10} .

Вынос углерода с эмиссией CO_2 с поверхности почвы. В табл. 3 приведены результаты расчета выноса углерода в атмосферу с эмиссией CO_2 с поверхности почв среднетаежных сосняков. Так, сосняки сфагновые в течение бесснежного периода эмитируют в атмосферу порядка 222–234 $г\ C\ м^{-2}$, с существенным (59–61%) вкладом летних меся-

цев. Относительно жаркое лето 2016 г. с частыми ливневыми дождями создало более благоприятные условия как для деструкции растительных остатков опада и мощной торфянистой подстилки сосняка сфагнового, так и дыхания корней деревьев. В результате отмечен достаточно активный вынос углерода дыханием почвы. Следует отметить, что достоверных различий выделения диоксида углерода между летними месяцами в остальные годы не выявлено ($p_t > 0.05$), что для спелого сосняка сфагнового может определяться близкими температурами почвы на глубине 10 см в 2009 и 2010 гг. ($p_t = 0.737$).

В течение бесснежного периода с поверхности подзола иллювиально-железистого сосняка бруснично-лишайникового в атмосферу поступило 242–305 г С м⁻². Доля летних месяцев составляет 63–69%, а вегетационного периода 88–92%, с более высоким участием в 2016 г. Потери углерода с поверхности почвы сосняка черничного с мая по октябрь изменялись от 308 до 583 г С м⁻², которые преимущественно (60–75%) отмечались с июня по август. Необходимо подчеркнуть сходные тенденции выноса углерода в годы, когда измерение происходило одновременно в трех типах сосняков. Выявлено достоверное увеличение (в 1.3–2.2 раза) потерь углерода в форме CO₂ в 2016 г. по сравнению с 2017 г., который был холоднее. Более интенсивный (в 2.0–2.2 раза) рост потока С-CO₂ на болотно-подзолистых почвах, вероятно, связан со снижением количества влаги в органогенных горизонтах, обеспечивших благоприятные условия для деструкции органического вещества и дыхания корней.

Сравнивая вынос углерода в атмосферу в сосняках разных условий произрастания установлено, что его потери с поверхности торфянисто-подзолисто-глеевой иллювиально-гумусово-железистой почвы сосняка черничного в 1.5–1.8 раза выше по сравнению с сосняками сфагновыми и бруснично-лишайниковым в течение бесснежного ($\chi^2 = 8.59$, $p = 0.014$) и вегетационного ($\chi^2 = 7.81$, $p = 0.020$) периодов. Достоверного влияния лесорастительных условий на потери С-CO₂ в летние месяцы не выявлено ($\chi^2 = 4.50$, $p = 0.106$). Сосняки лишайниковый и сфагновые сопоставимы по величине потока С-CO₂ с поверхности почвы как в течение вегетации, так и бесснежного периода ($p > 0.05$).

Анализ литературы показал, что величины потерь углерода с дыханием почв сосновых экосистем варьируют в широких пределах. Так, сосняки лишайниковые и кустарничково-зеленомошные на Кольском полуострове эмитируют в течение летних месяцев 180–360 (Kadulin et al., 2017), а осушенный сосняк в Финляндии за этот же период – 267–285 г С м⁻² (Korkiakoski et al., 2019). Близкие к нашим результаты (286–314 г С м⁻²) для сосня-

ков сходных типов в условиях Сибири приводят О.В. Масыгина с соавт. (2020) для вегетационного периода. За год с поверхности почвы южнотаежного заболоченного сосняка Тверской области выделяется 552 г С м⁻², из которых 92% выносятся в теплый период, а вклад летних месяцев составляет 74% (Ivanov et al., 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены закономерности сезонной эмиссии CO₂ с поверхности почв приспевающих и спелых среднетаежных сосняков в зависимости от условий произрастания. Погодные условия бесснежного периода во многом определяют поток углерода в атмосферу с дыханием почв. В относительно холодный вегетационный период с избыточным поступлением осадков отмечается снижение среднемесячной скорости потока CO₂ из почв. Более интенсивное дыхание (308–583 г С м⁻² в течение бесснежного периода) отмечено в сосняке черничном на полугидроморфной почве, тогда как эмиссия CO₂ из болотно-подзолистых почв сосняков сфагновых ниже в 1.5–1.8 раза и сопоставима с подзолом иллювиально-железистым сосняка бруснично-лишайникового в отдельные месяцы и временные интервалы. Рассчитано, что на долю вегетации приходится около 90% от выноса углерода в атмосферу из почв с мая по октябрь, а вклад летних месяцев составляет 63–69%. На скорость среднемесячного потока диоксида углерода и выделение С-CO₂ из почв достоверное влияние оказывают условия произрастания. В среднетаежных сосняках температура почвы оказывает положительное ($R^2 = 0.49–0.77$) влияние на эмиссию CO₂, а роль влажности в этом процессе неоднозначна и не всегда статистически значима ($R^2 = 0.01–0.08$). Полученные данные следует использовать при определении расходной части баланса углерода в лесных экосистемах на европейском северо-востоке России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
- Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
- Кузнецов М.А. Динамика содержания органического углерода в заболоченных ельниках средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Сыктывкар, 2010. 20 с.
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Ромашкин И.В., Жмурич В.А., Кудеярков В.Н. Натурная и модельная оценки дыхания лесной дерново-

- подзолистой почвы в Приокско-Террасном биосферном заповеднике // Лесоведение. 2019. № 5. С. 435–448.
- Машика А.В. Эмиссия диоксида углерода с поверхности подзолистой почвы // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1457–1463.
- Осипов А.Ф. Эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы спелого сосняка черничного в средней тайге Республики Коми // Лесоведение. 2015. № 5. С. 355–366.
- Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л. Механизм стабильности эмиссии CO₂ из лесной подстилки в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение. 2016. № 1. С. 34–43.
- Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Makarov M.I., Timofeeva M.V. Spatial distribution of the components of carbon cycle in soils of forest ecosystems of the northern, middle, and southern taiga of western Siberia // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. № 11. P. 1549–1560.
- Bond-Lamberty B., Thomson A. A global database of soil respiration data // Biogeosciences. 2010. V. 7. № 6. P. 1915–1926.
- Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀ // Global Change Biology. 2006. V. 12. P. 154–164.
- Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M. Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database // Biogeosciences. 2015. V. 12. P. 4121–4132.
- Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J. Soil respiration in paludified forests of European Russia // J. Forest Research. 2020. V. 31. P. 1939–1948.
- Jian J., Bahn M., Wang C., Bailey V.L., Bond-Lamberty B. Prediction of annual soil respiration from its flux at mean annual temperature // Agricultural and Forest Meteorology. 2020. V. 287. № 107961.
- Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K., Stell E., Herrmann V., Horn M., Kholod N., Manzon J., Marchesi R., Paredes D., Bond-Lamberty B.P. A global database of soil respiration data, Version 5.0. ORNL DAAC, 2021. Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Kadulin M.S., Koptsik G.N. Emission of CO₂ by soils in the impact zone of the Severonikel smelter in the Kola subarctic region // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 11. P. 1107–1116.
- Kadulin M.S., Smirnova I.E., Koptsyk G.N. The emission of carbon dioxide from soils of the Pasvik nature reserve in the Kola subarctic // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. P. 1055–1068.
- Korkiakoski M., Tuovinen J.P., Penttila T., Sarkkola S., Ojanen P., Minkkinen K., Rainne J., Laurila T., Lohila A. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting // Biogeosciences 2019. V. 16. P. 3703–3723.
- Kučinskas O., Marozas V. Diurnal and seasonal soil CO₂ efflux variation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in the European hemi-boreal zone, Lithuania // J. Elementology. 2021. V. 26. P. 731–754.
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudryarov V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. № 10. P. 1421–1436.
- Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Menyailo O.V., Mori S., Koike T., Prokushkin S.G. Age-dependent changes in soil respiration and associated parameters in Siberian permafrost Larch stands affected by wildfire // Forests. 2021. V. 12. P. 107.
- Masyagina O.V., Menyailo O.V., Prokushkin A.S., Matvienko A.I., Makhnykina A.V., Evgrafova S.Yu., Mori S., Koike T., Prokushkin S.G. Soil respiration in larch and pine ecosystems of the Krasnoyarsk region (Russian Federation): a latitudinal comparative study // Arabian J. Geosciences. 2020. V. 13. P. 954.
- Mukhortova L., Shchepashchenko D., Shvidenko, A. Soil respiration database. 2020. <http://dare.iiasa.ac.at/107/>
- Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L. Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // Science of The Total Environment. 2021. V. 785. 147314.
- Osipov A.F. Effect of interannual difference in weather conditions of the growing season on the CO₂ emission from the soil surface in the middle-taiga cowberry-lichen pine forest (Komi Republic) // Eurasian Soil Science. 2018. V. 51. № 12. P. 1419–1426.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. <https://www.R-project.org/>
- Sha L., Teramoto M., Noh N.J., Hashimoto S., Yang M., Sanwangsri M., Liang N. Soil carbon flux research in the Asian region: Review and future perspectives // J. Agricultural Meteorology. 2021. V. 77. № 1. P. 24–51.

Forest Growing Conditions Affect the CO₂ Emission from the Soil Surface in the Middle Taiga Pine Forests of the Komi Republic

A. F. Osipov*

Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982 Russia

*E-mail: osipov@ib.komisc.ru

Obtaining the experimental data on soil respiration is relevant due to significant range of CO₂ emission estimates in different ecosystems. The aim of work was to characterize CO₂ emission from soil surface of pine forests growing in different conditions on North-East of European part of Russia. The studies have been carried out in immature and mature pine forests Sphagnosa, Myrtillus and Lichen types located in the Institute of biology of the Komi Science Center, RAS forest stations. Carbon dioxide emission was measured using LI COR 8100 during the May-October periods in 2008–2017. A brief weather conditions characteristic was

given. Higher values of the CO₂ flux from the soil surface was observed in July (1.9–2.9 g C m⁻² day⁻¹ in Sphagnosa type) and August (2.5–6.6 g C m⁻² day⁻¹ in Myrtillus and Lichen types). The year-to-year variability and influence of weather conditions on soil respiration were shown. The soil temperature had a close and positive relationship ($R^2 = 0.49–0.77$) with CO₂ emission whereas correlation with soil moisture was weak. During summertime the efflux of C-CO₂ in a pine forest of Myrtillus type was 188–442 g C m⁻², during the vegetation period (01.05–30.09) – 279–563 g C m⁻² and the snowless period (01.05–31.10) – 308–583 g C m⁻², which is 1.5–1.8 times higher than in the pine forests of Sphagnosa and Lichen types during the snowless period ($p = 0.014$) and growing season ($p = 0.020$). In summertime the losses of carbon were similar ($p = 0.106$). The pine forests of Sphagnosa and Lichen types were comparable in C-CO₂ efflux both during the vegetation and the snowless periods ($p > 0.05$). These data are important in assessing the expenditure part of the carbon balance in forest ecosystems in the European North-East of Russia.

Keywords: CO₂ emission, soil temperature, soil moisture, pine forest, temperature coefficient Q_{10} .

Acknowledgements: This study was performed within the framework of the state budget theme assignment to the Institute of Biology, Komi Science Center, on the theme “Spatiotemporal dynamics of the structure and productivity of phytocenosis in forest and bog ecosystems in the northeast of European Russia” (project no. AAAA-A17-117122090014-8).

REFERENCES

- Bobkova K.S., *Biologicheskaya produktivnost' khvoynykh lesov evropeiskogo Severo-Vostoka* (Biological productivity of coniferous forests of European North-East), Leningrad: Nauka, 1987, 155 p.
- Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Makarov M.I., Timofeeva M.V., Spatial distribution of the components of carbon cycle in soils of forest ecosystems of the northern, middle, and southern taiga of western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 11, pp. 1549–1560.
- Bond-Lamberty B., Thomson A., A global database of soil respiration data, *Biogeosciences*, 2010, Vol. 7, No. 6, pp. 1915–1926.
- Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y., On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} , *Global Change Biology*, 2006, Vol. 12, pp. 154–164.
- Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M., Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database, *Biogeosciences*, 2015, Vol. 12, pp. 4121–4132.
- Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J., Soil respiration in paludified forests of European Russia, *J. Forest Research*, 2020, Vol. 31, pp. 1939–1948.
- Jian J., Bahn M., Wang C., Bailey V.L., Bond-Lamberty B., Prediction of annual soil respiration from its flux at mean annual temperature, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, Vol. 287, № 107961.
- Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K., Stell E., Herrmann V., Horn M., Kholod N., Manzon J., Marchesi R., Paredes D., Bond-Lamberty B.P., *A global database of soil respiration data*, Version 5.0. ORNL DAAC, 2021. Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Kadulin M.S., Koptsik G.N., Emission of CO₂ by soils in the impact zone of the Severonikel smelter in the Kola subarctic region, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 11, pp. 1107–1116.
- Kadulin M.S., Smirnova I.E., Koptsyk G.N., The emission of carbon dioxide from soils of the Pasvik nature reserve in the Kola subarctic, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, pp. 1055–1068.
- Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gintarskii M.L., Factors of spatiotemporal variability of CO₂ fluxes from soils of southern taiga spruce forests of Valdai, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 743–751.
- Korkiakoski M., Tuovinen J.P., Penttila T., Sarkkola S., Ojanen P., Minkkinen K., Rainne J., Laurila T., Lohila A., Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting, *Biogeosciences*, 2019, Vol. 16, pp. 3703–3723. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
- Kučinskas O., Marozas V., Diurnal and seasonal soil CO₂ efflux variation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in the European hemi-boreal zone, Lithuania, *J. Elementology*, 2021, Vol. 26, pp. 731–754. <https://doi.org/10.5601/jelem.2021.26.1.2124>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudayarov V.N., Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 10, pp. 1421–1436.
- Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudayarov V.N., Romashkin I.V., Experimental and model estimates of respiration of the forest sod-podzolic soil in the Prioksko-Terrasny Nature Reserve, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 813–824.
- Kuznetsov M.A., *Dinamika sodержaniya organicheskogo ugleroda v zabolochennykh el'nikakh srednei taigi. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* (Dynamics of organic carbon content in boggy spruce forests in the middle taiga. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2010, 18 p.
- Mashika A.V., Carbon dioxide emission from the surface of podzolic soils, *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol. 39, No. 12, pp. 1312–1317.
- Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Menyailo O.V., Mori S., Koike T., Prokushkin S.G., Age-dependent changes in soil respiration and associated parameters in Siberian permafrost Larch stands affected by wildfire, *Forests*, 2021, Vol. 12, p. 107.

- Masyagina O.V., Menyailo O.V., Prokushkin A.S., Matvienko A.I., Makhnykina A.V., Evgrafova S.Yu., Mori S., Koike T., Prokushkin S.G., Soil respiration in larch and pine ecosystems of the Krasnoyarsk region (Russian Federation): a latitudinal comparative study, *Arabian J. Geosciences*, 2020, Vol. 13, pp. 954.
- Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L., Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change, *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 785, 147314.
- Mukhortova L., Shchepashchenko D., Shvidenko A., *Soil respiration database*, 2020, available at: <http://dare.iiasa.ac.at/107/>
- Osipov A.F., Effect of interannual difference in weather conditions of the growing season on the CO₂ emission from the soil surface in the middle-taiga cowberry–lichen pine forest (Komi Republic), *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 12, pp. 1419–1426.
- Osipov A.F., Emissiya dioksida ugleroda s poverkhnosti pochvy spelogo sosnyaka chernichnogo v srednei taige Respubliki Komi (Carbon dioxide emission from the soil surface in mature bilberry pine forest in Middle Taiga of the Komi Republic), *Lesovedenie*, 2015, No. 5, pp. 356–366.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020, available at: <https://www.R-project.org/>
- Sha L., Teramoto M., Noh N.J., Hashimoto S., Yang M., Sanwangsri M., Liang N., Soil carbon flux research in the Asian region: Review and future perspectives, *J. Agricultural Meteorology*, 2021, Vol. 77, No. 1, pp. 24–51.
- Smorkalov I.A., Vorobeichik E.L., Mekhanizm stabil'nosti emissii CO₂ iz lesnoi podstilki v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya (The mechanism involved in formation of stable CO₂ emission from the forest litter under industrial pollution), *Lesovedenie*, 2016, No. 1, pp. 34–43.