

ДЫХАНИЕ ПОЧВ В ПРИРОДНЫХ ЦЕНОЗАХ

УДК 631.433.3:630*114.35:582.475

ЭМИССИЯ CO₂ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ НА 10-ЛЕТНЕЙ ВЫРУБКЕ СРЕДНЕТАЕЖНОГО СОСНЯКА ЧЕРНИЧНОГО НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

© 2023 г. А. Ф. Осипов* (ORCID: 0000-0003-0618-9660)

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

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

Поступила в редакцию 27.01.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 12.05.2023 г.

Для оценки роли промышленных рубок на цикл углерода в лесных экосистемах необходимо получение экспериментальных данных по дыханию почв нарушенных территорий. Исследования проводили в Республике Коми в течение бесснежных периодов 2019–2021 гг. на вырубке среднетаежного сосняка черничного спустя 10 лет после сплошной рубки. Почва – Gleyic Folic Albic Podzol (Arenic). Эмиссию CO₂ измеряли камерным методом при помощи LI COR 8100. На период наблюдений дана характеристика погодных условий и динамики температуры почвы на глубине 10 см. Выявлено, что погодные условия оказывают существенное влияние на интенсивность дыхания почвы. Теплое сухое лето ведет к более интенсивному потоку CO₂ с ее поверхности. Показано, что пасечные участки по сравнению с волоками характеризуются меньшей в 1.3–1.9 раза среднемесячной эмиссией CO₂. Установлена достоверная положительная взаимосвязь (R^2 = от 0.12 до 0.86) между температурой почвы и выделением CO₂ с ее поверхности. В год с обильным выпадением осадков на волоках отмечается достоверная взаимосвязь между потоком CO₂ и влажностью верхнего органогенного горизонта почвы, тогда как в более сухой год она отсутствует в отличие от пасечных участков, где наблюдаются обратные зависимости. Пасечные участки в течение бесснежного периода с дыханием почвы эмитируют в атмосферу 303–379 г С/м², волока 419–573 г С/м², что в пересчете на площадь всей лесосеки (5 га) составляет 60–75 т CO₂. Большая (86–90%) часть выноса углерода происходит с мая по сентябрь, а вклад летних месяцев составляет 56–65%. Полученные данные послужат для определения роли заготовки древесины в углеродном цикле таежных лесов.

Ключевые слова: дыхание почвы, сплошная рубка, Gleyic Folic Albic Podzol (Arenic), лесные экосистемы

DOI: 10.31857/S0032180X23600087, **EDN:** DXJQJP

ВВЕДЕНИЕ

Обмен CO₂ между почвой и атмосферой является вторым по величине потоком углеродного цикла и контролируется комплексом абиотических (климат, свойства почвы и т.д.) и биотических (тип экосистемы, состав растительного опада, комплекс организмов деструкторов органического вещества и т.д.) факторов [15, 19, 24, 27]. Леса бореального пояса, покрывающие около 1/3 поверхности планеты, выполняют важную роль в глобальном круговороте углерода [16]. Катастрофические явления естественной и антропогенной природы ведут к нарушениям их углеродного цикла. Среди антропогенных факторов наиболее негативное влияние на этот процесс в таежной зоне оказывают промышленные рубки, среди которых преобладают сплошные [8, 25]. Установлено, что сплошные рубки оказывают как положительное [10, 17], так и отрицательное [13,

23, 30] воздействие на дыхание почвы (SR), что требует накопления экспериментальных данных для оценки роли хозяйственной деятельности на эмиссию CO₂ с поверхности почвы пострубочных сообществ. Это особенно актуально для лесных экосистем России, где исследования дыхания почв в первые годы восстановительной сукцессии после заготовки древесины единичны [10, 13].

Лесные экосистемы на территории России занимают около 20% от мировых и, следовательно, выполняют значимую роль в глобальных биогеохимических циклах [20]. Вместе с тем они охвачены активным лесопользованием. Так, по данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации [5] с 2015 по 2019 гг. в стране ежегодно вырубалось 205–238 млн м³ древесины. На территории Республики Коми в сходный временной интервал объем вырубленной древесины составлял 8.3–9.9 млн м³ в год, что со-

ответствует площади вырубок 40–65 тыс. га [4]. В работе [7] показано, что за последние годы в регионе исследований изменилась технология лесозаготовительных работ: на смену традиционной рубке с использованием бензопилы и трелевкой целых деревьев пришли многооперационные машины (пара харвестер–форвардер) с сортиментной вывозкой древесины. Трансформация дыхания почвы и роль отдельных технологических элементов рубки спустя 3 года после сплошной рубки сосняка черничного в Республике Коми с использованием современных комплексов заготовки древесины показана в работе [13]. Вместе с тем насаждения, формирующиеся после примененной традиционной рубки леса, занимают значительные площади и находятся на разных стадиях восстановительной сукцессии. Следовательно, оценка дыхания почвы этих сообществ позволит выявить долговременное влияние сплошных рубок на круговорот углерода в них и снизить неопределенности при характеристике роли хозяйственной деятельности в этом процессе.

Цель настоящей работы – определить эмиссию CO_2 с поверхности почвы вырубки среднетаежного сосняка черничного спустя 10 лет после сплошной рубки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена в подзоне средней тайги Республики Коми. Территория расположена на отложениях четвертичной системы, которые включают осадки не менее трех оледенений, представленные моренными валунными суглинками и флювиогляциальными песками. Климат района исследований – умеренно-континентальный со средней температурой июля $+17.5^\circ\text{C}$ и января -14.2°C . Общее количество осадков составляет 620 мм в год. Вегетационный период длится в среднем 141 день – с середины мая до конца сентября, а период без устойчивого снежного покрова – с начала мая до конца октября. Доминирующими лесообразователями являются ель, сосна и береза, а в почвенном покрове преобладают типичные подзолистые и болотно-подзолистые почвы [1].

Исследования проводили в 2019–2021 гг. на вырубке сосняка черничного ($61^\circ35'14''\text{ N}$, $51^\circ01'07''\text{ E}$), на которой была заложена пробная площадь размером 0.24 га и проведена реконструкция древостоя до рубки путем учета пней (рис. 1). Исходное насаждение сосняка густотой древостоя около 1300 экз./га имело запас древесины порядка 300 $\text{м}^3/\text{га}$. Сплошная рубка на площади 5 га проведена в зимний период 2008 г. с использованием бензопил и хлыстовой трелевкой деревьев. Ширина пасечных участков с относительно слабо нарушенным почвенным покровом составляет 22–

25 м, волоков (пути вывоза древесины с лесосеки) – 5–6 м. Таким образом, на долю волоков приходится около 20% от площади лесосеки. Древесный ярус пострубочного сообщества на пасечных участках в настоящее время формируют ель, береза и сосна (состав $8\text{E}2\text{B} + \text{C}$), густотой 746 экз./га с запасом древесины 31 $\text{м}^3/\text{га}$ и полнотой 0.37. Преобладают тонкомерные деревья со средним диаметром $9.5 \pm 0.2\text{ см}$; высотой – $6.9 \pm 0.3\text{ м}$. В подросте густотой $6.6 \pm 0.2 \times 10^3$ экз./га доминируют деревья сосны средней категории крупности. Почва – торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-гумусово-железистая (Gleyic Follic Albic Podzol (Arenic)), песчаная. Средняя высота подстилки $7.9 \pm 0.6\text{ см}$, масса органического вещества в ней – $5.2 \pm 0.5\text{ кг/м}^2$. Концентрация углерода – $48.6 \pm 1.7\%$, азота – $1.20 \pm 0.13\%$. Порубочные остатки (кроны деревьев, вершины) были сложены на волоках, что в зимний период рубки препятствует нарушению структуры верхних горизонтов почвы. Органогенный горизонт средней мощностью $7.5 \pm 0.3\text{ см}$, уплотнен (плотность сложения 0.12 г/см^3 против 0.07 г/см^3 на пасеках, $p < 0.001$), с запасом органического вещества $9.0 \pm 0.6\text{ кг/м}^2$. Концентрация углерода – $49.4 \pm 1.7\%$, азота – $1.60 \pm 0.18\%$. На волоках отмечен активный лесовозобновительный процесс. Подрост густотой $12.2 \pm 4.2 \times 10^3$ экз./га образован, главным образом, березой мелкой и средней категории крупности, а участие сосны составляет 22%.

Измерение эмиссии CO_2 проводили 1–2 раза в месяц с мая по октябрь, используя газоанализатор LI COR 8100 (LI-COR Inc., США) с почвенной камерой 20 см. Пластиковые основания, установленные вдоль границ пробной площади за ее пределами, высотой 10 см в 10-кратной повторности (по 5 на пасечных участках и волоках) были заглублены в органогенный горизонт на 5 см, а общий объем камеры составил 6400 см^3 . В течение одного дня наблюдений выполняли 30–50 определений величины потока CO_2 . Измерения представляли собой чередующиеся циклы, время которых задавали согласно рекомендациям завода-изготовителя. Длительность экспозиции 2 мин (камера опущена, в ней происходит накопление CO_2 , анализатор строит график изменения концентрации CO_2 в камере и выполняет расчет величины потока), период между наблюдениями 2 мин (камера поднята, происходит возврат состава воздуха к условиям, предшествующим измерению). На одном основании делали 3–5 измерений эмиссии CO_2 . Всего за 3 года наблюдений выполнено около 1200 определений величины потока CO_2 с поверхности почвы вырубки сосняка черничного, которые по годам были распределены следующим образом: 38% в 2019 г., 40 – в 2020 г., 28% в 2021 г. Измерения примерно пополам распределялись между пасечными участками

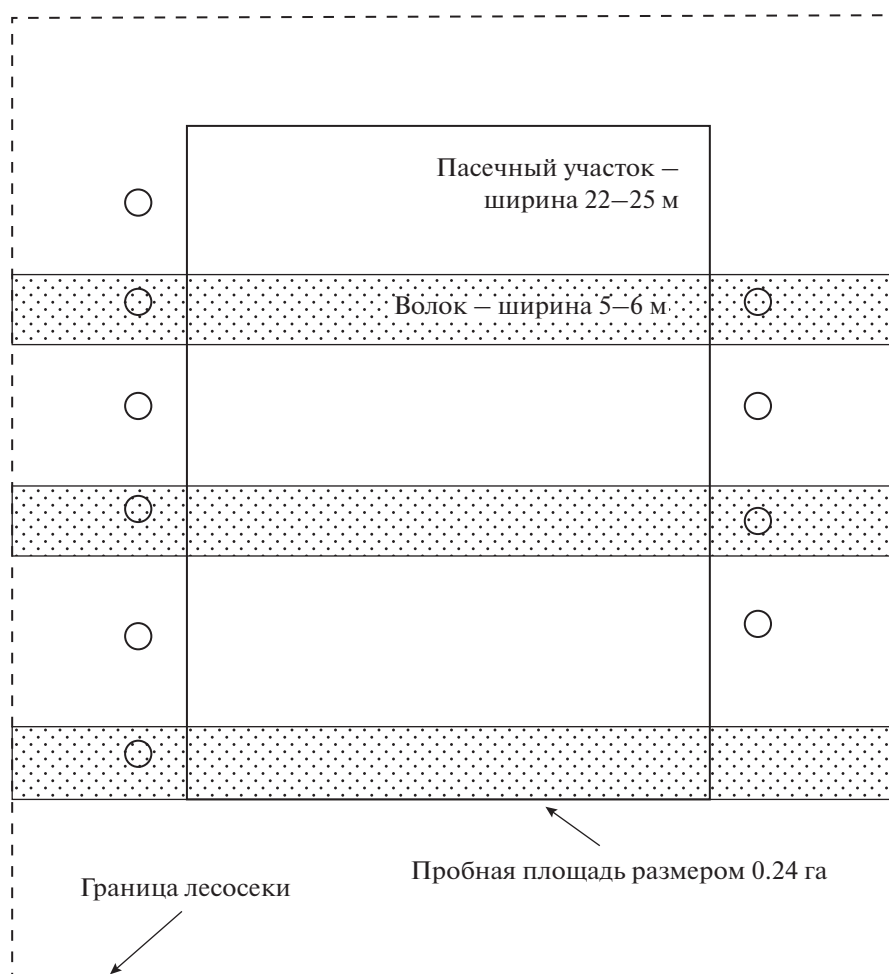


Рис. 1. Схема расположения оснований для измерения эмиссии CO₂. Рисунок выполнен не в масштабе. Круги — места установки оснований.

и волоками. Живые надземные органы растений напочвенного покрова убирали. Температуру (глубина 10 см) и влажность (глубина 5 см) почвы определяли датчиками, идущими в комплекте с анализатором. Постоянное наблюдение за температурой почвы осуществляли при помощи автоматического регистратора НОВО U-12 (Onset, США). Погодные условия описаны по метеостанции аэропорта Сыктывкар им. П.А. Истомина (61°39'50.4" N, 50°51'05.0" E), расположенному примерно в 10 км на северо-запад, используя открытые данные [21]. В качестве климатической нормы принимали базовый период с 1991 по 2020 гг., рассчитанный по метеоданным, приведенным на сайте Института биологии Коми НЦ УрО РАН [28]. Содержание углерода и азота определяли в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН на CHNS-O элементном анализаторе EA 1110 (Carlo Erba, Италия).

Влияние гидротермических свойств почвы на SR описывали при помощи экспоненциальных уравнений, приведенных к линейному виду:

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

где $\ln SR$ — логарифмированные данные по дыханию почвы, α и β — коэффициенты уравнения, X — температура (на глубине 10 см) или влажность (в слое 0–5 см) почвы.

Логарифмирование исходных данных перед регрессионным анализом выполняли для получения нормального распределения остатков моделей и однородности дисперсий их ошибок.

Температурный коэффициент Q_{10} , характеризующий рост величины SR при повышении температуры на 10°C, рассчитывали по [19]:

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

где Q_{10} — температурный коэффициент, e — значение экспоненты, α — коэффициент уравнения (1).

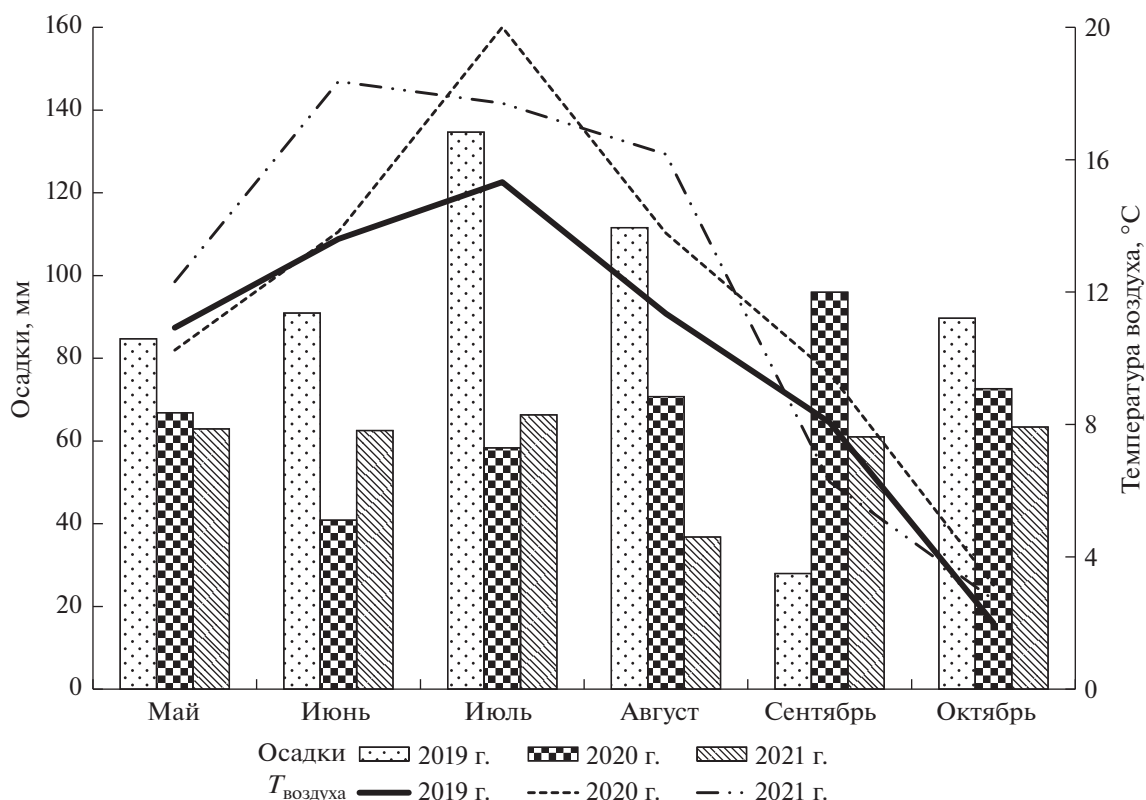


Рис. 2. Динамика среднемесячной температуры воздуха и поступление осадков в годы исследований.

Поступление углерода с поверхности почвы в атмосферу с SR ($C-CO_2$) оценивали по среднесуточным значениям температуры почвы, измеренных НОВО U-12, по уравнению:

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

где SR_{period} – вынос $C-CO_2$ за временной интервал, г C/m^2 , R_{10} – величина SR при температуре $10^\circ C$, Q_{10} – температурный коэффициент, T – среднесуточная температура почвы на глубине 10 см.

Вынос $C-CO_2$ рассчитывали для трех временных отрезков: лето (июнь–август), вегетационный период (май–сентябрь) и бесснежный период (май–октябрь).

Статистическую обработку выполняли при помощи Microsoft Excel 2010 и R 4.03 [29]. Рассчитывали средние значения и их ошибки. Метод Шапиро–Уилка применяли при оценке нормальности распределения исходных данных и остатков линейных моделей регрессии. Парные сравнения проводили при помощи t -теста (p_t). Для оценки различий между среднемесячными значениями SR в течение бесснежного периода применяли критерий Краскела–Уоллиса (p_{kw}) вследствие ненормального распределения набора исходных данных и отсутствия однородности групповых

дисперсий. Однородность групповых дисперсий проверяли при помощи критерия Бартлетта. Статистический анализ выполняли при 95%-ном уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в период наблюдений. Динамика среднемесячной температуры воздуха и количества поступающих осадков в течение бесснежных периодов 2019–2021 гг. приведена на рис. 2. Наиболее благоприятные погодные условия наблюдались в 2021 г. Так, средняя температура воздуха в течение бесснежного периода, вегетации и летних месяцев составила 12.3, 14.2 и $17.4^\circ C$ соответственно, что сопоставимо с данными в эти периоды 2020 г. и 1.2–1.3 раза выше, чем в 2019 г. В 2021 г. Сумма среднесуточных температур воздуха более $+5$ и $+10^\circ C$ была в 1.1–1.3 раза выше, чем в 2020 и 2019 гг. соответственно и составила 2334 и $1918^\circ C$. Количество поступающих осадков в отдельные периоды 2021 г. Было сопоставимо или в 1.1 раза ниже, чем в 2020 г. и 1.5–2.0 раза ниже, чем в 2019 г. Так, с мая по октябрь 2021 г. выпало 353 мм, в течение вегетации – 290, летних месяцев – 166 мм. Относительно низкое (0.99) значение гидротермического коэффициента Селянинова также наблюдалась в 2021 г., отно-

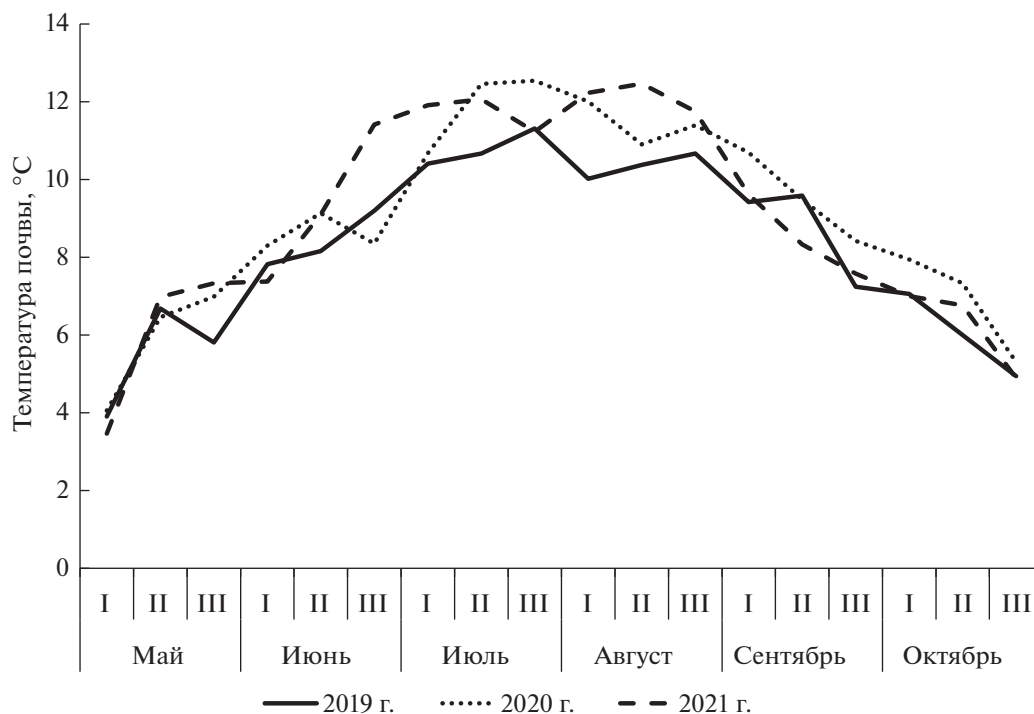


Рис. 3. Динамика температуры почвы на глубине 10 см в течение бесснежного периода: I, II, III — декады.

сительно высокое (2.34) — в 2019 г., а в 2020 г. оно составило 1.16. Сравнение погодных условий в течение наблюдений с многолетними данными показало, что по температурному режиму вегетационные периоды 2020 и 2021 гг. были теплее на 1.3–2.0°C, тогда как 2019 г. был немного (на 0.3°C) холоднее. По количеству поступающих осадков вегетационный период 2020 г. был сопоставим (333 мм) со среднестатистическим годом, 2021 г. характеризовался меньшим ($\approx 10\%$) количеством, а в 2019 г. оно превысило климатическую норму в 1.4 раза (450 мм).

Динамика температуры почвы на глубине 10 см в бесснежный период. Температура почвы (T_s) в начале анализируемых периодов в годы исследований различалась (рис. 3). Так, теплая погода в апреле и ранний сход снега привели к тому, что в 2020 и 2021 гг. на 1 мая T_s составила 2.0 и 2.9°C соответственно, тогда как в 2019 г. — 1.4°C. Затем происходило постепенное прогревание, достигая максимальных величин в III декаде июля в 2019 и 2020 гг., а в 2021 г. накопление тепла почвенной толщей продолжалось до II декады августа. В конце октября T_s изменялась от 3.7 до 5.4°C с более высоким значением в 2020 г. Следует отметить близкие ($p_t = 0.836$) средние T_s в течение бесснежных периодов 2020 и 2021 гг., которая составляла 9.0°C. В 2019 г. эта величина была ниже в 1.1 раза ($p_t < 0.05$) и равнялась 8.3°C.

Эмиссия CO₂ в течение бесснежного периода.

Ход сезонной эмиссии CO₂ с поверхности почвы вырубки сосняка черничного имеет “классический” характер, установленный ранее для лесных почв ненарушенных таежных экосистем [9, 12, 22, 24]. Это выражается в относительно большом значении дыхания почвы в июле–августе и низкой интенсивностью в осенние месяцы (рис. 4). Однако период максимальной эмиссии CO₂ из почвы различался в годы исследования. Так, в 2019 г. более активное выделение CO₂ наблюдалось в июле (2.9–4.4 г C/(м² сут) в зависимости от технологического элемента, $CV = 7–37\%$), тогда как в 2020–2021 гг. его пик смещался на август и составил соответственно 2.0–3.1 г C/(м² сут) ($CV = 16–25\%$) для пасечных участков и 3.9–5.5 г C/(м² сут) ($CV = 9–17\%$) для волоков с более высокими значениями в 2021 г. Наблюдаемый сдвиг максимума потока CO₂ связан с особенностями накопления тепла в почве в периоды наблюдений, показанный выше. Следует отметить достоверность различий величин среднemesячной эмиссии CO₂ в течение бесснежного периода, что подтверждается факторным анализом ($p_{kw} < 0.001$ во всех случаях). Однако парные сравнения между интенсивностью среднemesячной эмиссии в течение бесснежного периода показали, что избыточное поступление осадков и высокий уровень грунтовых вод в августе 2019 г. привело к подавлению дыха-

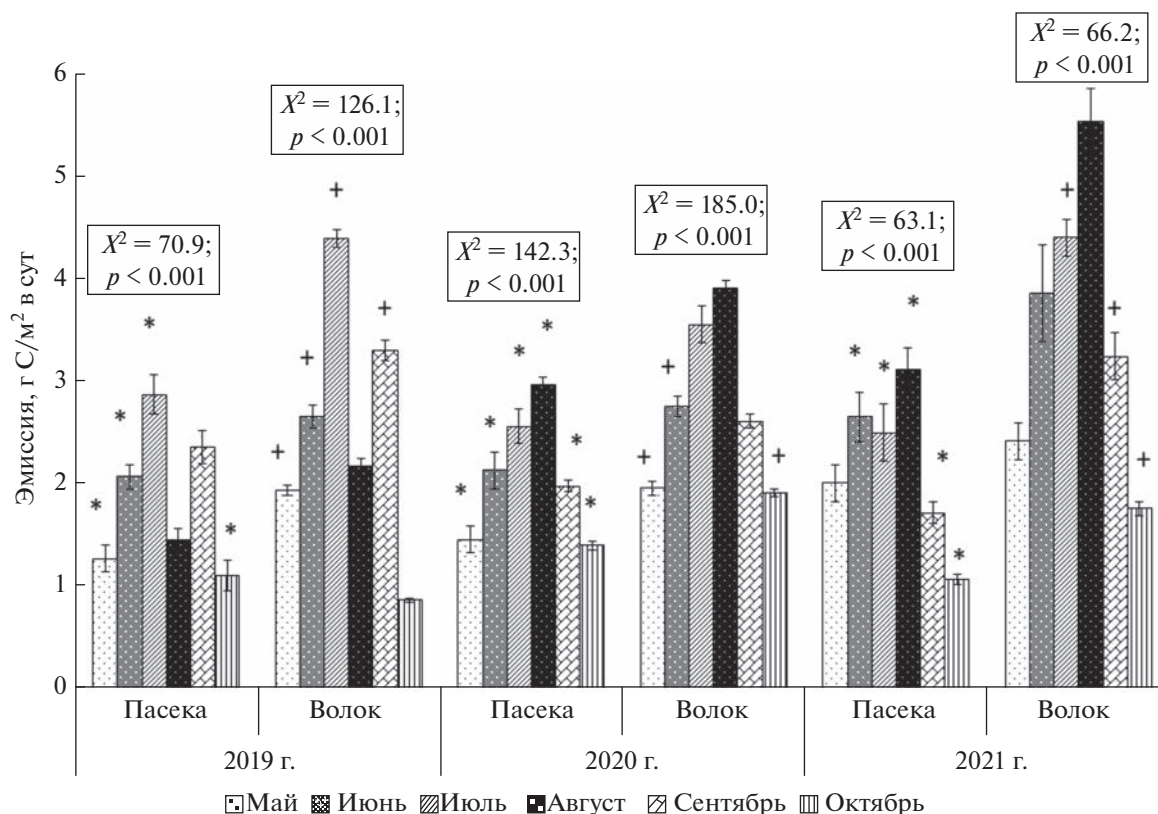


Рис. 4. Эмиссия CO₂ с поверхности почвы в течение бесснежного периода. В рамке — результат критерия Краскела—Уоллиса. Месяцы с отсутствием межгодовой вариации показаны значком * для пасечных участков и + для волоков.

ния почвы, значение которого в этот месяц было сопоставимо ($p_i > 0.05$) с маем и октябрём. Для данных 2020–2021 гг. установлены близкие величины выделения CO₂ в мае и осенние месяцы, а также в августе и июле как на пасечных участках, так и волоках. Во все годы наблюдений эмиссия в июне и июле не различалась на пасечных участках, а теплое лето 2021 г. привело к более интенсивному дыханию почвы в сентябре, сопоставимому с июльским.

При анализе межгодовой вариации среднемесячных значений дыхания почвы вырубке сосняка черничного установлены сходные величины для мая и июня 2019–2020 гг., как для пасечных участков, так и волоков. Ранний сход снега и прогрев почвы обусловили большую (в 1.2–1.6 раза) эмиссию в мае 2021 г., которая составила 2.01–2.42 г C/(м² сут). Поток CO₂ в июне, июле, августе и сентябре с поверхности пасечных участков не различался для данных 2020 и 2021 гг. и был значимо (в 1.1–2.1 раза, $p_i < 0.05$) выше по сравнению с аналогичными месяцами 2019 г. Большие значения (3.9–5.5 г C/(м² сут), выше в 1.2–2.5 раза) выделения CO₂ с поверхности почвы волоков наблюдались в летние месяцы 2021 г. В сентябре 2019 и 2021 гг. величины дыхания почвы волоков

схожи, что связано с теплой погодой и отрицательной аномалией осадков в 2019 г. Эмиссия CO₂ в октябре с поверхности почвы волоков не различалась в 2020 и 2021 гг., а на пасечных участках в 2019 и 2020 гг., и в 2019 и 2021 гг.

Сравнение между собой результатов исследований с учетом технологических элементов показало, что интенсивность дыхания почв волоков значимо ($p_i < 0.05$) выше, чем пасечных участков. Так, в 2019 г. величины среднемесячной эмиссии волоков превышали аналогичные данные на пасеках в 1.3–1.5 раза, за исключением октября ($p_i = 0.145$), в 2020 г. — в 1.3–1.4 раза, в 2021 г. — в 1.5–1.9 раза, кроме мая ($p_i = 0.121$).

В работе [10] отмечено, что на вырубке южно-таежного ельника на дерново-подзолистой суглинистой почве дыхание почвы с нарушенным гумусовым горизонтом на путях движения лесозаготовительной техники составило 2.1–6.2 г C/(м² сут), что в 2–4 раза ниже, чем с поверхности ненарушенных участков. Приведенные данные по эмиссии сходны с полученными нами результатами SR волоков и существенно выше, чем для пасечных участков исследуемой вырубке сосняка. Большее выделение CO₂ с поверхности волоков отмечено в июле, а пасек — в июне. Авторами так-

Таблица 1. Характеристика уравнений ($\ln SR = \alpha X + \beta$) зависимости эмиссии CO₂ от температуры (T_s) и влажности (Ms) почвы

Фактор (год)	Коэффициент*		R^2	p -value	Q_{10}	R_{10} , г C/(м ² сут)
	α	β				
Пасечные участки						
T_s (2019)	0.098(0.039)	−0.458(0.376)	0.12	0.015	2.68	1.69
T_s (2020)	0.116(0.016)	−0.519(0.170)	0.46	<0.001	3.20	1.91
T_s (2021)	0.132(0.007)	−0.783(0.078)	0.73	<0.001	3.73	1.71
Ms (2019)	−0.029(0.223)	0.537(0.068)	0.00	0.896		
Ms (2021)	−3.614(0.864)	1.078(0.152)	0.37	<0.001		
Волока						
T_s (2019)	0.092(0.012)	−0.088(0.123)	0.27	<0.001	2.52	2.31
T_s (2020)	0.071(0.006)	0.291(0.061)	0.39	<0.001	2.04	2.73
T_s (2021)	0.135(0.005)	−0.345(0.056)	0.86	<0.001	3.87	2.74
Ms (2019)	−1.357(0.185)	1.327(0.056)	0.27	<0.001		
Ms (2021)	−3.065(0.461)	1.495(0.078)	0.27	<0.001		

* В скобках приведены ошибки коэффициентов.

же выявлена достоверная межгодовая вариация эмиссии CO₂ в годы исследований. Дыхание почвы вырубки осушенного сосняка в условиях Финляндии в течение летних месяцев варьировало от 0.9 до 4.7 г C/(м² сут) с большими величинами в августе [23], что в 1.2–1.5 раза выше, чем поток CO₂ с поверхности пасечных участков вырубки сосняка черничного в условиях Республики Коми.

Ранее показано, что на пасечных участках вырубки сосняка черничного в условиях Республики Коми дыхание почвы изменялось от 0.6 до 2.7 г C/(м² сут), волоков — от 0.9 до 2.4 г C/(м² сут) [13]. В течение 2019 г. с избыточным выпадением осадков эмиссия CO₂ с поверхности почвы волоков была выше, тогда как в 2020 г. технологические элементы вырубки были сопоставимы по величине среднемесячного потока CO₂ с их поверхности. Сделано заключение, что рост потока CO₂ в период с активным выпадением осадков связан с особенностями жизнедеятельности организмов-деструкторов органического вещества, в структуре которых в таежной зоне преобладают микроскопические грибы, зависимые от влажности субстрата [14, 18]. Это особенно важно на вырубках, где открытое пространство способствует активному испарению воды и иссушению верхних горизонтов почвы. Следует отметить, что большее значения дыхания почвы волоков спустя 10–13 лет после сплошной рубки отмечены в 2021 г. Эти значения определялись благоприятными условиями увлажнения. Вероятно, это связано с активным процессом возобновления лесной растительности, корневые системы которых чувствительны к увеличению влажности почвы, вследствие снижения содержания доступного кислорода и подавления жизнедеятельности корней и деструкто-

ров органического вещества в случае переувлажнения [2, 27]. Однако эмиссия CO₂ с волоков в отдельные месяцы 2019 г. превышала аналогичные данные 2020 г., что обусловлено наличием порубочных остатков на их поверхности, для разложения которых в этот год наблюдались относительно благоприятные условия. Небольшие межгодовые различия в величине среднемесячного дыхания почвы на пасечных участках, возможно, обусловлены наличием оставшихся после рубки тонкомерных деревьев ели, которые в годы с избыточным выпадением осадков способны удалить излишки влаги за счет транспирации, а в теплые годы защищают почву от ее потери и сглаживают перепады температур.

Влияние температуры и влажности почвы на эмиссию CO₂. Температура и влажность почвы являются наиболее значимыми абиотическими факторами, определяющими величину дыхания почвы [15, 19]. Установлена положительная, статистически достоверная взаимосвязь между потоком CO₂ с поверхности почвы всех технологических элементов вырубки сосняка черничного и температурой почвы на глубине 10 см (табл. 1). В 2019 и 2021 гг. реакция пасечных участков и волоков на изменение температуры была схожа, что заключалось в сопоставимых величинах (2.6–2.5 и 3.7–3.9 соответственно) температурного коэффициента Q_{10} . В год с избыточным выпадением осадков на пасечных участках наблюдалось относительно низкое значение Q_{10} , что соответствует полученным ранее сведениям о негативном влиянии переувлажнения на температурный отклик дыхания почвы [6, 19, 24]. Наличие разлагающихся на волоках порубочных остатков, вероятно, вносит неопределенности в температурный ответ

Таблица 2. Вынос углерода (г С/м^2) с дыханием почвы технологических элементов вырубki сосняка черничного в течение 2019–2021 гг.

Период расчета	Год		
	2019	2020	2021
Пасечные участки			
01.05–31.10	302.7 ± 14.4	$378.7 \pm 15.5^*$	$346.1 \pm 15.0^*$
01.05–30.09	263.9 ± 11.0	$332.3 \pm 12.28^*$	$309.6 \pm 12.1^*$
01.06–31.08	176.0 ± 5.7	$227.5 \pm 7.6^*$	$223.8 \pm 9.1^*$
Волока			
01.05–31.10	418.6 ± 16.2	$525.7 \pm 15.9^*$	$573.2 \pm 33.1^*$
01.05–30.09	364.4 ± 14.2	452.6 ± 13.8	514.4 ± 30.0
01.06–31.08	242.2 ± 9.6	296.7 ± 9.2	374.8 ± 22.3

Примечание. Приведено среднее значение и ошибка среднего по суммарному выносу углерода с дыханием почвы для указанных периодов, $n = 5$.

* Отсутствуют межгодовые различия.

эмиссии CO_2 с их поверхности, что выражается в меньшей величине Q_{10} в более благоприятный 2020 г., по сравнению с 2019 г. В условиях средней тайги на европейском Северо-Востоке России отмечено положительное влияние снижения количества осадков в теплый период и, соответственно, влажности почвы на величину Q_{10} , как в ненарушенном сосняке на подзоле иллювиально-железистом, так и на вырубке сосняка черничного на торфянисто-подзолисто-глееватой иллювиально-железистой почве [12, 13]. Близкие результаты получены для пасечных участков исследуемой вырубki сосняка черничного в 2021 г.

Влияние влажности почвы на эмиссию CO_2 с поверхности технологических элементов неоднозначно. Для волоков отмечается отрицательная, средняя, достоверная взаимосвязь между этими показателями в годы исследований. На пасечных участках наблюдались обратные закономерности, что выражалось в отсутствии зависимости в сырой 2019 г. и отрицательной, средней, достоверной корреляцией в 2021 г. Реакция дыхания почвы слабонарушенных пасечных участков на изменение влажности сходна с полученными ранее данными для экосистем, формирующихся в условиях повышенной влажности [3, 11, 26, 30], механизм влияния которой описан выше. Напротив, на юге лесной зоны увеличение влажности почв во многом оказывает положительное влияние на поток CO_2 с поверхности почв как ненарушенных лесных экосистем [22], так и вырубok [10, 17].

Вынос углерода в атмосферу с дыханием почвы. С поверхности пасечных участков в течение бесснежного периода с дыханием почвы в атмосферу поступает $303\text{--}379 \text{ г С/м}^2$ (табл. 2), что сопоставимо с сосняком черничным на болотно-подзолистой почве, произрастающим в регионе исследований [11], но ниже примерно в 1.2 раза, чем в ненарушенном сосняке, развивающемся в близких почвенно-экологических условиях [13]. Вклад ве-

гетационного периода составляет 87–89%, а летних месяцев 58–65% от выделения С--CO_2 с мая по октябрь. Анализ межгодовой вариации выноса С--CO_2 показал, что в 2020 и 2021 гг. отсутствовали достоверные различия между исследуемыми периодами ($p_i > 0.05$). В 2019 г. наблюдались меньшие (в 1.1–1.3 раза; $p_i < 0.05$) потери CO_2 с поверхности почвы. Большая эмиссия с поверхности волоков привела к относительно высоким потерям С--CO_2 , которые в 1.3–1.7 раза ($p_i < 0.05$) превышали поток из почв пасечных участков. Так, волока с мая по октябрь в атмосферу выделили $419\text{--}573 \text{ г С/м}^2$. Вклад отдельных временных интервалов был сопоставим с пасаками и составил 86–90% для вегетационного периода и 56–65% для летних месяцев. Меньшая интенсивность потерь углерода наблюдалась в 2019 г., а большая – в 2021 г. Следует отметить, что бесснежные периоды 2020 и 2021 гг. были сопоставимы, тогда как достоверные отличия выявлены в течение вегетации и летних месяцев. Рассчитано, что с поверхности всей лесосеки (5 га) вынос углерода составил 16.3, 20.4, 19.6 т углерода в течение бесснежных периодов 2019, 2020 и 2021 гг. соответственно, что эквивалентно 60–75 т CO_2 . Доля волоков в общем потоке CO_2 с поверхности лесосеки составила 26–29%.

Сравнение полученных данных с литературными показало, что с потери углерода с поверхности почвы пасечных участков вырубki сосняка черничного, проведенной при помощи лесозаготовительных комплексов в условиях Республики Коми, ниже в 1.3–1.4 раза, волоков – в 1.2–1.8 раза [13]. Вероятно, эта разница обусловлена наличием оставленных тонкомерных деревьев на пасаках при ручной валке леса и значительного количества подростa на волоках, дыхание корней которых вносит свой вклад в общую эмиссию CO_2 с поверхности почвы. В течение летних месяцев с поверхности вырубki осушенного сосняка в южной

Финляндии в атмосферу поступает 267–286 г С/м², что в 1.3–1.5 раза больше рассчитанных величин для аналогичного временного интервала [23]. Несколько меньшие величины получены для заболоченной, глеевой, органо-минеральной почвы вырубки ельника в северной Англии, которая за год выделяет в атмосферу около 243–322 г С/м² [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены закономерности сезонной динамики эмиссии CO₂ с поверхности почвы вырубки среднетаежного сосняка черничного с учетом пространственной неоднородности. Выявлено, что большие темпы выделения CO₂ из почв происходят в разные периоды года, обычно в июле или августе, и зависят от погодных условий бесснежных периодов. Избыточное выпадение осадков оказывает негативный эффект на поток CO₂. Сравнительный анализ интенсивности дыхания почвы разных технологических элементов показал, что на волоках она значимо в 1.3–1.9 раза выше, чем пасечных участков, что определяется наличием на них порубочных остатков и возобновлением древесных растений. Температура почвы оказывает достоверное положительное влияние ($R^2 = 0.12–0.86$) на выделение CO₂ с поверхности почвы как на пасечных участках, так и на волоках. Роль влажности почвы на этот процесс неоднозначна и зависит от погодных условий и степени нарушения ее поверхности. Во влажный год на волоках отмечается достоверная взаимосвязь между изучаемыми параметрами, тогда как в более сухой она отсутствует, в отличие от пасечных участков, где наблюдаются обратные зависимости. С поверхности пасечных участков в течение бесснежного периода с дыханием почвы в атмосферу поступает 303–379 г С/м², волоков 419–573 г С/м², большая часть выноса которого (86–90%) приходится на вегетацию, а вклад летних месяцев составляет 56–65%. Общий вынос CO₂ с поверхности лесосеки (5 га) составил 60–75 т CO₂ с вкладом волоков 26–29%. Полученные данные послужат для определения роли промышленных рубок в углеродном цикле таежных лесов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Республики Коми / Отв. ред. Корниенко Е.В. М.: Феория, 2011. 448 с.
2. Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
3. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И., Тимофеева М.В. Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги западной Сибири // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1328–1340.
4. Государственный доклад “О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2019 году”. Сыктывкар: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, 2020. 162 с.
5. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 г. М.: Минприроды России, 2020. 1000 с.
6. Громова М.С., Матвиенко А.И., Макаров М.И., Ченг Ш.К., Меняйло О.В. Температурная чувствительность (Q_{10}) базального дыхания как функция количества доступного углеродного субстрата, температуры и влажности // Почвоведение. 2020. № 3. С. 366–371.
7. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798.
8. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 36–49.
9. Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южно-таежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
10. Молчанов А.Г., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. Влияние сплошной вырубки леса на эмиссию CO₂ с поверхности почвы // Известия РАН. Сер. Биологическая. 2017. № 2. С. 190–196.
11. Осипов А.Ф. Выделение углерода с поверхности почвы спелого сосняка черничного средней тайги Республики Коми // Почвоведение. 2016. № 8. С. 982–990.
12. Осипов А.Ф. Влияние межгодовых различий метеорологических характеристик вегетационного периода на эмиссию CO₂ с поверхности почвы среднетаежного сосняка бруснично-лишайникового (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1455–1463.
13. Осипов А.Ф. Влияние сплошной рубки на дыхание почвы среднетаежного сосняка черничного Республики Коми // Лесоведение. 2022. № 4. С. 395–406. <https://doi.org/10.31857/S0024114822030111>
14. Стороженко В.Г. Участие дереворазрушающих грибов в процессах деструкции и формирования лесных сообществ // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. 34. № 1–2. С. 87–91.
15. Bond-Lamberty B., Thomson A.M. Temperature-associated increases in the global soil respiration record //

- Nature. 2010. V. 464. P. 579–582.
<https://doi.org/10.1038/nature08930>
16. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // *Global and Planetary Change*. 2015. V. 128. P. 24–30.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>
 17. Čater M., Darenova E., Simončič P. Harvesting intensity and tree species affect soil respiration in uneven-aged Dinaric Forest stands // *Forest Ecology and Management*. 2021. V. 480. 118638.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638>
 18. Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Allison S.D., Bauhus J., Eggleton P., Preston C.M., Scarff F., Weedon J.T., Wirth C., Zanne A.E. Plant traits and wood fates across the globe: rotted, burned, or consumed? // *Global Change Biology*. 2009. V. 15. P. 2431–2449.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01916.x>
 19. Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} // *Global Change Biology*. 2006. V. 12. P. 154–164.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>
 20. FAO. Global forest resources assessment 2010. FAO, Rome, 2010. 122 p.
 21. https://rp5.ru/Погода_в_Сыктывкаре.
 22. Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J. Soil respiration in paludified forests of European Russia // *J. Forestry Res.* 2020. V. 31. P. 1939–1948.
<https://doi.org/10.1007/s11676-019-00963-4>
 23. Korkiakoski M., Tuovinen J.P., Penttilä 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.
<https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
 24. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Zhmurin V. Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: the synthesis of a 24-year continuous observation // *Forests*. 2022. V. 13. P. 1374.
<https://doi.org/10.3390/f13091374>
 25. Lindroth A., Holst J., Heliasz M., Vestin P., Lagergren F., Biermann T., Cai Z., Mölder M. Effects of low thinning on carbon dioxide fluxes in a mixed hemiboreal forest // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. V. 262. P. 59–70.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.021>
 26. 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.
<https://doi.org/10.3390/f12010107>
 27. Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L. Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 785. P. 147314.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147314>
 28. Novakovskiy A.B., Elsakov V.V. Hydrometeorological Database (HMDB) for Practical Research in Ecology // *Data Sci. J.* 2014. V. 13. P. 57–63.
<https://doi.org/10.2481/dsj.IFPDA-10>
 29. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2020. <https://www.R-project.org/>.
 30. Yamulki S., Forster J., Xenakis G., Ash A., Brunt J., Perks M., Morison J.I.L. Effects of clear-fell harvesting on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in an upland Sitka spruce stand in England // *Biogeosciences*. 2021. V. 18. P. 4227–4241.
<https://doi.org/10.5194/bg-18-4227-2021>

Carbon Dioxide Emission from the Soil Surface of the 10-Year Felled Area of the Pine Forest in the European North-East of Russia

A. F. Osipov*

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia

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

Experimental data on soil respiration are need for estimating role of industrial logging on carbon cycle of forest ecosystems. Investigations were carried out during snowless periods 2019–2021 years on felled area of pine forest 10 years after clear cutting (Komi Republic, Russia). The soil type is a Gleyic Folic Albic Podzol (Arenic). Emission CO₂ was measured by LI COR 8100. The characteristic of weather conditions and soil temperature dynamic at 10 cm depth were given. The weather conditions were strongly influenced on soil respiration rate. More intensive CO₂ flux from soil surface was observed in warm summer with insufficient precipitation. The mean month CO₂ emission was less by 1.3–1.9 times in apiaries, parts of felled area with low soil cover damages, comparing to skidding tracks where logged trees were extracted. The significant positive correlation ($R^2 = 0.12–0.86$) was detected between soil temperature at 10 cm depth and soil respiration investigated technological elements. A reliable interrelation between CO₂ flux and moisture of forest floor was observed in skidding tracks in a year with abundant precipitation while in a dryer year it wasn't. It is differ from apiaries where found reverse dependencies. Apiaries emitted in atmosphere 303–379 g C m⁻² with soil respiration during snowless period, skidding tracks – 419–573 g C m⁻² which is 60–75 tons of CO₂ in terms of the area of the entire felled area (5 ha). The growing season formed most part (86–90%) of carbon efflux from May to October and input of summertime was 56–65%. The data obtained will serve to determine the role of timber harvesting in the carbon cycle of taiga forests.

Keywords: soil respiration, clear-cutting, pine forest, Gleyic Folic Albic Podzol (Arenic)