

УДК 631.433.3:630*114.35:582.475

ВЛИЯНИЕ СПЛОШНОЙ РУБКИ НА ЭМИССИЮ CO₂ С ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ СРЕДНЕТАЕЖНОГО ХВОЙНО-ЛИСТВЕННОГО НАСАЖДЕНИЯ (РЕСПУБЛИКА КОМИ)

© 2024 г. А. Ф. Осипов^{a,*} (<http://orcid.org/0000-0003-0618-9660>),В. В. Старцев^a (<http://orcid.org/0000-0002-6425-6502>),А. А. Дымов^{a,b} (<http://orcid.org/0000-0002-1284-082X>)^aИнститут биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167985 Россия^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*e-mail: osipov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 04.08.2023 г.

После доработки 18.12.2023 г.

Принята к публикации 18.12.2023 г.

Воздействие промышленных рубок на углеродный цикл бореальных лесов в настоящее время освещено недостаточно, что требует получения экспериментальных данных о потоках углерода, в частности дыхания почвы, на вырубках для определения влияния хозяйственной деятельности на круговорот углерода. Цель работы – оценить влияние сплошной рубки на эмиссию CO₂ с поверхности почвы хвойно-лиственного насаждения на типичной подзолистой почве (Albic Retisol). Работа выполнена в течение бесснежных периодов с мая по октябрь 2020–2022 гг. в хвойно-лиственном насаждении и его вырубке, проведенной зимой 2020 г. Приведена краткая характеристика погодных условий в годы исследований и динамика температуры почвы на глубине 10 см. Для анализируемых объектов установлена положительная, статистически значимая взаимосвязь между дыханием почвы и ее температурой на глубине 10 см ($R^2 = 0.17–0.75$; $p < 0.001$). Корреляция с влажностью почвы как положительная, так и отрицательная, статистически незначима, за исключением данных, полученных в 2022 г. в ненарушенном фоновом насаждении. В течение бесснежного периода высокие значения потока CO₂ 3.90–5.62 г C/(м² сут) в ненарушенных лесах и 2.3–2.5 г C/(м² сут) на вырубках наблюдались в июле–августе. В 2021 г. пик выделения смещался на июнь. Сплошная рубка оказывает отрицательное влияние на дыхание типичной подзолистой почвы, уменьшая его в 1.2–1.9 раза в условиях средней тайги Республики Коми. Во время летних месяцев с поверхности почвы выделяется 55–66% от эмиссии C–CO₂ в течение бесснежного периода, а вклад вегетационного периода май–сентябрь составляет 84–88%. Полученные данные послужат для определения роли промышленных рубок в углеродном цикле таежных лесов.

Ключевые слова: дыхание почвы, сплошная рубка, температурный коэффициент Q₁₀, Albic Retisol, смешанный лес, восстановительная сукцессия

DOI: 10.31857/S0032180X24050066, EDN: YLINPY

ВВЕДЕНИЕ

Дыхание почвы (SR) является вторым крупнейшим потоком углерода между атмосферой и наземными экосистемами [16]. Однако для региональных и глобальных оценок дыхания почвы по-прежнему характерна высокая неопределенность [14, 26], значимый вклад в которую вносит хозяйственная деятельность человека. В условиях изменяющегося климата лесные экосистемы рассматриваются как долговременный резервуар органического углерода,

так и крупный его поглотитель [10]. Вместе с тем на баланс углерода в лесах существенное влияние оказывают промышленные рубки [6, 29]. Сплошные рубки, характеризующиеся заготовкой более 70% от стоящего на корню объема древесины на лесосеках, являются доминирующим типом рубки в бореальных лесах [28]. Поэтому важно, чтобы в долгосрочной перспективе они не снижали продуктивность почв [34]. Этот способ ведения лесного хозяйства оказывает существенное воздействие на основные факторы, определяющие эмиссию

CO₂ из почв. Так, удаление древесного яруса обуславливает как лучшее прогревание, так и быстрое остывание почв [3, 13], а прекращение транспирации нередко приводит к их переувлажнению [5, 24]. Кроме того, прекращается функционирование корневых систем растений, дыхание которых является составной частью SR, а их деструкция включается в гетеротрофное дыхание [23].

Сложности в прогнозе баланса углерода и дыхания почвы, в частности, вносит тот факт, что круговорот углерода послерубочных сообществ зависит от типа экосистемы, климата, почвенных условий, степени нарушения почвы и скорости восстановления растительного покрова [33]. Следует отметить отсутствие однозначных результатов о трансформации SR после сплошных рубок. По сведениям ряда авторов, наблюдается усиление дыхания почвы [12, 15, 22], тогда как другие исследователи приводят данные о снижении интенсивности эмиссии CO₂ с поверхности почвы послерубочных сообществ [13, 24, 27, 34]. Для уточнения роли заготовки древесины в углеродном цикле лесных экосистем необходимо накопление эмпирических данных путем проведения экспериментальных работ в послерубочных сообществах разных типов и стадий восстановительной сукцессии. Особый интерес представляют работы, характеризующие трансформацию свойств и процессов в экосистемах, сочетающие данные до и после нарушения на одних и тех же участках [4, 18].

Цель работы – оценить влияние сплошной рубки на эмиссию CO₂ с поверхности почвы среднеэтажного хвойно-лиственного насаждения на типичной подзолистой почве на европейском Северо-Востоке России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в подзоне средней тайги Республики Коми в течение мая–октября 2020–2022 гг. Климат района – умеренно континентальный, умеренно холодный. Среднемесячная температура воздуха в июле составляет +16.6°C. Среднегодовая температура +0.4°C, годовое количество осадков 514 мм [2]. Согласно почвенно-географическому районированию Республики Коми [1], исследуемая территория расположена в южной части Вымь-Вычегодского округа типичных подзолистых почв, иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-подзолисто-глеватых иллювиально-гумусовых почв. Почвообразующими породами служат суглинисто-глинистые однородные и слоистые отложения различного генезиса.

Настоящая работа является частью эксперимента по сбору данных в хвойно-лиственном насаждении на типичной подзолистой почве (Albic Retisol) до рубки (исходный лес (ИЛ)) в 2020 г.,

с последующей сплошной рубкой насаждения в декабре 2020 г. и дальнейшем наблюдении на начальных этапах восстановления экосистемы. Описание эксперимента, растительных сообществ и свойств почвы до и после рубки приведено в работе [4]. В качестве контрольного участка для исследований в течение 2021–2022 гг. выбрано хвойно-лиственное насаждение, произрастающее рядом с вырубкой на удалении примерно 400 м от места первоначальных исследований. Точки измерения эмиссии CO₂ на фоновом участке были размещены примерно в 100 м от границы вырубки вглубь лесного массива.

Эмиссию CO₂ измеряли раз в месяц инфракрасным газоанализатором LI COR 8100 (LI-COR Inc., США) с почвенной камерой диаметром 20 см на стационарных основаниях высотой 10 см, которые были врезаны в лесную подстилку (до подгоризонта O(H)) на 5 см за неделю до начала измерений. Изоляция и плотное прилегание камеры к основанию обеспечивается уплотнителем, расположенным на нижней части камеры. До рубки измерения проводили на 7 основаниях (всего более 250 определений потока CO₂; около 50 измерений в месяц), после рубки в фоновом хвойно-лиственном насаждении и пасечных участках было установлено 5 и 6 оснований соответственно, на которых было выполнено по 160 и 230 измерений SR (15–25 определений потока CO₂ в месяц). Надземные зеленые части растений напочвенного покрова срезали. Перед рубкой основания убирала. Во время определения скорости эмиссии CO₂ измеряли температуру на глубине 10 см и влажность почвы в слое 0–5 см датчиками, входящими в комплектацию прибора. Глубина 10 см для оценки влияния температуры почвы выбрана в связи с ее меньшими суточными амплитудами. Выбор слоя 0–5 см для характеристики воздействия влажности почвы на SR обусловлен тем, что в верхних слоях происходит более активное разложение растительного опада и лесной подстилки. Непрерывное измерение (8 измерений в сутки) температуры почвы осуществлялось метеостанциями фирмы НОВО (Onset, США). Результаты по динамике температуры почвы в течение бесснежного периода 2020 г. представлены на основании 118 среднесуточных данных, в 2021 – 130 и 170 в фоновом насаждении и вырубке, в 2022 – 172 и 118 среднесуточных значений соответственно.

Погодные условия описывали по данным метеостанции аэропорта Сыктывкар имени П.А. Истомина (61°39'50.4" N, 50°51'05.0" E), используя открытые данные [20]. Были рассчитаны следующие метеорологические индексы: 1) сумма среднемесячных значений температуры воздуха (ST, °C) с мая по август, июня по август, июня по сентябрь и с мая по сентябрь, соответственно; 2) сумма месячных сумм осадков (SP, мм) за те же периоды, упомянутые выше для суммы температур;

3) индексы влажности (WI): WI(5–8), WI(6–8), WI(6–9) и WI(5–9), которые представляют собой $\lg(SP(5–8)/ST(5–8))$, $\lg(SP(6–8)/ST(6–8))$, $\lg(SP(6–9)/ST(6–9))$ и $\lg(SP(5–9)/ST(5–9))$ соответственно; 4) гидротермический коэффициент Селянинова за летний период. Все оцененные параметры отражают различия в обеспечении растений влагой в течение вегетации [26].

Взаимосвязь эмиссии CO_2 с температурой и влажностью почвы обычно описывается линейными или экспоненциальными уравнениями. В работе применяли экспоненциальные уравнения, приведенные 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 ($^{\circ}C$) или влажность почвы (об. %).

В результате использования подобного уравнения достигается нормальность распределения остатков линейной модели и однородность дисперсий ее ошибок. Для регрессионного анализа объем выборки составил: ИЛ – 250 измерений; фон 82 и 75 данных потока CO_2 , в 2021 и 2022 гг., соответственно; вырубка – 107 и 109 определений потока в 2021 и 2022 гг.

Температурный коэффициент Q_{10} описывает скорость изменения дыхания почвы на изменение температуры и рассчитывается по уравнению [17]:

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

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

Результаты непрерывных измерений температуры почвы применяли для расчета потока углерода с эмиссией CO_2 ($C-CO_2$) для каждого основания, на котором определялось дыхание почвы, используя уравнение (3):

$$SR_{\text{period}} = \sum_{n=1}^n SR_{10} \times Q_{10}^{(T_n - 10)/10}, \quad (3)$$

где SR_{period} – поток $C-CO_2$ за временной интервал, $г C/m^2$, SR_{10} – величина SR при температуре $10^{\circ}C$, Q_{10} – температурный коэффициент, T_n – среднесуточная температура почвы на глубине 10 см. Следовательно, объем выборки для расчета выноса составил: 7, 5 и 6 для ИЛ, фонового насаждения и вырубки соответственно.

При отсутствии данных из-за неработающего датчика расчет потока $C-CO_2$ проводили по величине среднемесячной эмиссии:

$$SR_{\text{period}} = \sum_{n=1}^n SR N,$$

где SR_{period} – поток $C-CO_2$ за временной интервал, $г C/m^2$, SR – величина среднемесячного потока

CO_2 , $г C/(m^2 \text{ сут})$, N – число дней с отсутствующими данными по температуре почвы.

Поток $C-CO_2$ рассчитывали для летних (июнь–август) месяцев, вегетационного (май–сентябрь) и бесснежного периодов (май–октябрь).

Статистическая обработка выполнена в программной среде Microsoft Excel 2010 и R 4.03 [31]. Рассчитывали средние значения и их ошибки. Метод Шапиро–Уилка использовали для оценки нормальности распределения исходных данных и остатков линейных моделей регрессии. Для парных сравнений применяли t -критерий Стьюдента (p_t). Дисперсионный анализ (критерий Краскела–Уоллиса из-за отличия распределения общего массива исходных данных от нормального и неоднородности дисперсий) проводили для оценки различий SR между среднемесячными значениями в течение бесснежного периода. Статистический анализ выполнен при 95%-ном уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в период наблюдений. Краткая характеристика погодных условий в годы наблюдений представлена в табл. 1. Средняя температура воздуха в течение исследуемых бесснежных и вегетационных периодов была сопоставима. Так, с мая по октябрь она изменялась от 11.8 до $12.3^{\circ}C$ а с мая по сентябрь от 13.5 до $14.2^{\circ}C$, с меньшими значениями в 2020 и более высокими в 2021 г. В летние месяцы, напротив, в 2021–2022 гг. средняя температура воздуха была на 1.5 – $1.6^{\circ}C$ выше, чем в 2020 г. ($p_t < 0.05$). Поступление осадков в течение бесснежного и вегетационного периодов 2020 г. составило 405 и 333 мм соответственно, а в 2021–2022 гг. – 353–358 и 290–292 мм. Сумма осадков в летние месяцы варьировала от 166 до 179 мм. Таким образом, бесснежные периоды 2021–2022 гг. были сопоставимы по обеспеченности теплом и влагой, тогда как 2020 г. характеризовался более интенсивным поступлением осадков. Меньшие значения индекса увлажнения для всех анализируемых периодов были отмечены в 2021 г. Гидротермический коэффициент Селянинова в летние месяцы 2020–2022 был сопоставим и изменялся от 1.06 до 1.11, что свидетельствует о достаточном увлажнении.

Динамика температуры почвы на глубине 10 см. Динамика температуры почвы (T_n) на глубине 10 см в течение бесснежного периода представлена на рис. 1. Относительно высокие (12.4 – $13.6^{\circ}C$) значения T_n в хвойно-лиственных насаждениях наблюдались в конце июля–середине августа. Высокая температура воздуха в августе 2022 г. обусловила длительное накопление тепла в фоновом насаждении. В целом динамика температуры почвы была схожа как для ИЛ и фона в годы наблюдений ($p_t > 0.05$), так между данными 2021 и 2022 гг. ($p_t = 0.186$). Установлено, что сплошная рубка

Таблица 1. Метеорологические показатели в годы исследований

Месяц/параметр	2020 г.		2021 г.		2022 г.	
	T, °C	осадки, мм	T, °C	осадки, мм	T, °C	осадки, мм
Май	10.2	67.0	12.3	63.0	7.7	59.0
Июнь	13.8	40.9	18.4	62.6	14.8	67.0
Июль	20.0	58.4	17.7	66.3	19.9	32.5
Август	13.8	70.8	16.2	36.8	18.1	79.3
Сентябрь	9.5	96.0	6.3	61.0	7.3	53.7
Октябрь	3.1	72.7	2.7	63.4	4.3	66.8
Σ(5–8)	57.9	236.8	64.5	228.6	60.5	237.9
Σ(6–8)	47.6	170.0	52.2	165.7	52.8	178.8
Σ(6–9)	57.2	265.9	58.5	226.7	60.1	232.5
Σ(5–9)	67.4	332.8	70.8	289.6	67.8	291.5
WI(5–8)		0.61		0.55		0.59
WI(6–8)		0.55		0.50		0.53
WI(6–9)		0.67		0.59		0.59
WI(5–9)		0.69		0.61		0.63

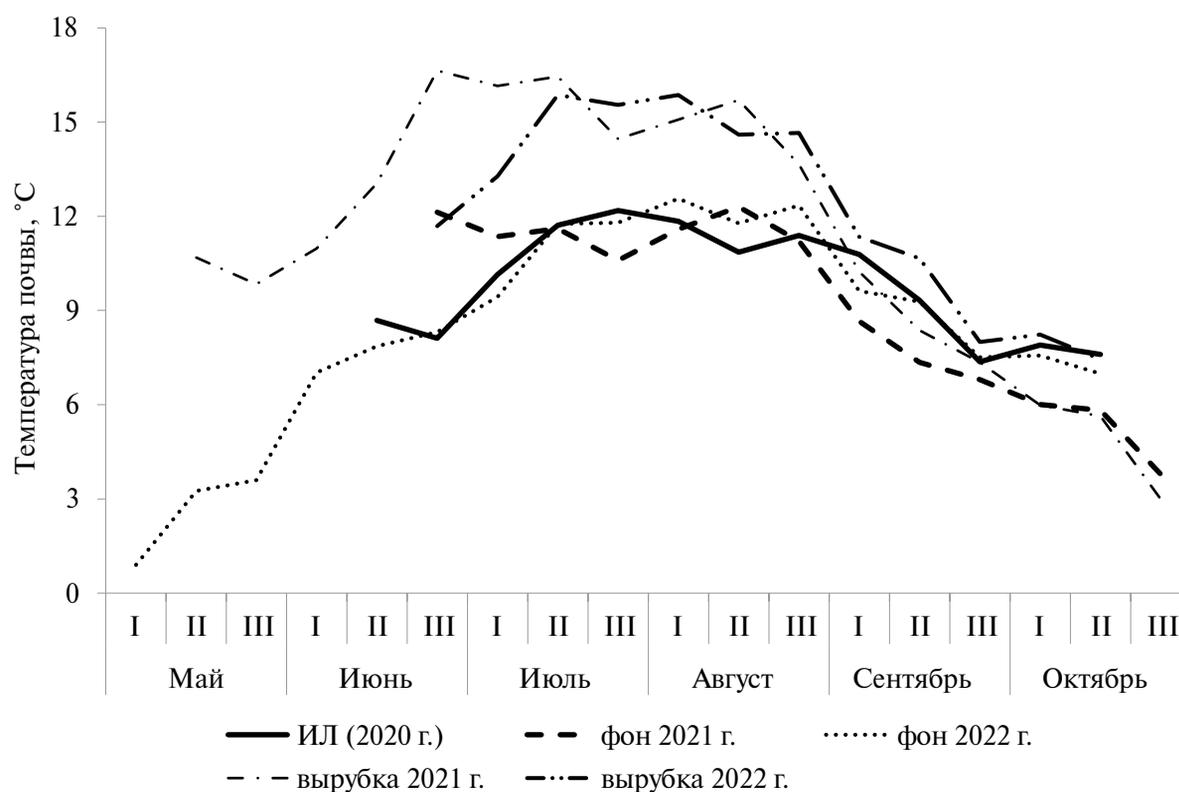


Рис. 1. Динамика температуры почвы на глубине 10 см. I, II, III – номер декады.

оказывает положительное влияние на прогревание верхнего слоя почвы. Так, в летние месяцы среднесуточная T_n на вырубке в 1.2–1.4 выше, чем в хвойно-лиственном насаждении, тогда как осенью она сопоставима. На вырубке отмечаются более благоприятные температурные условия по сравнению с ИЛ и фоновым насаждением ($p_t < 0.001$ во всех случаях). Аналогичные закономерности о влиянии сплошных рубок на температурный режим почв в условиях средней тайги Республики Коми представлены в работах [3, 13].

Влияние температуры и влажности почвы на эмиссию CO_2 с ее поверхности. Температура почвы оказывает положительное, статистически значимое ($p < 0.001$) влияние на интенсивность выделения CO_2 с поверхности почв как ненарушенных насаждений, так и вырубки (табл. 2). Более тесная взаимосвязь ($R^2 = 0.75–0.79$) отмечена для ИЛ и фонового насаждения в 2022 г. Следует отметить сходную очень низкую величину объясненной дисперсии ($R^2 = 0.17–0.18$) между T_n и потоком CO_2 по данным 2021 г. для фонового хвойно-лиственного насаждения и вырубки. Выявлено, что сплошная рубка оказывает отрицательное влияние на температурный отклик почвенного дыхания, что выражается снижением значения коэффициента Q_{10} на вырубке в 1.2–2.5 раза по сравнению с ненарушенным хвойно-лиственным насаждением. Взаимосвязь эмиссии CO_2 с влажностью почвы (W_n) положительная в 2021 г. и отрицательная в 2022 г. Ее статистически значимое воздействие отмечено в 2022 г. в фоновом хвойно-лиственном насаждении, что, вероятно, связано с меньшим

количеством поступающих осадков по сравнению с климатической нормой второй год подряд.

Температура и влажность почвы являются наиболее значимыми абиотическими факторами, определяющими эмиссию CO_2 с поверхности почвы [14]. Известно, что значение T_n для дыхания почвы увеличивается в ненарушенных экосистемах, формирующихся в условиях недостатка тепла и переувлажнения с одновременным снижением воздействия влажности почвы, которое во многом ингибирует дыхание корней и гетеротрофное разложение [7, 9, 11, 21, 26]. Отсутствие корреляции между дыханием и W_n установлено для вырубок хвойных лесов, что обусловлено избытком почвенной влаги после рубки древостоя [13, 24, 34]. Выявлено негативное влияние сплошной рубки на температурный отклик (Q_{10}) эмиссии CO_2 с поверхности почвы, что также показано в настоящей работе на второй год после сплошной рубки хвойно-лиственного насаждения.

Динамика эмиссии CO_2 с поверхности почвы в течение бесснежного периода. Данные, приведенные в табл. 3 свидетельствуют, что динамика эмиссии CO_2 с поверхности подзолистой почвы исходного хвойно-лиственного насаждения имела аналогичные закономерности, полученные ранее для еловых сообществ таежной зоны [8, 9, 11, 21]. Более высокие значения скорости потока (3.90–3.95 г $C/(m^2$ сут)) отмечены в июле–августе, между которыми отсутствуют значимые различия ($p = 0.996$). Выделение CO_2 с поверхности почвы фонового хвойно-лиственного насаждения различалось в годы исследований. Так, в 2022 г.

Таблица 2. Характеристика линейных уравнений ($\ln SR = \alpha X + \beta$) взаимосвязи дыхания почвы с ее температурой (T_s , на глубине 10 см) и влажностью (M_s , в слое 0–5 см)

Фактор (год, объем выборки)	Коэффициент уравнения		R^2	p -value	Q_{10}	SR ₁₀ , г C (м ² сут)
	α	β				
Исходное хвойно-лиственное насаждение						
T_s (2020, $n = 250$)	0.173(0.006)	–1.071(0.071)	0.75	<0.001	5.66	1.94
Фоновое хвойно-лиственное насаждение						
T_s (2021, $n = 83$)	0.058(0.014)	0.762(0.160)	0.17	<0.001	1.78	3.82
T_s (2022, $n = 74$)	0.158(0.019)	–0.528(0.203)	0.79	<0.001	4.88	2.88
M_s (2021, $n = 83$)	0.109(1.170)	1.365(0.189)	0.00	0.927		
M_s (2022, $n = 74$)	–3.215(1.145)	1.470(0.200)	0.29	0.011		
Вырубка						
T_s (2021, $n = 107$)	0.040(0.008)	0.426(0.107)	0.18	<0.001	1.50	2.29
T_s (2022, $n = 109$)	0.068(0.015)	–0.196(0.159)	0.40	<0.001	1.98	1.62
M_s (2021, $n = 107$)	–0.023(0.255)	0.927(0.064)	0.00	0.930		
M_s (2022, $n = 109$)	–0.375(0.613)	0.508(0.154)	0.01	0.546		

динамика эмиссии имела классический сезонный ход кривой с максимальной интенсивностью в июле–августе, тогда как в 2021 г. пик выделения сместился на июнь. Наблюдаемый эффект, вероятно, обусловлен более активным выпадением осадков (66 мм, больше в 1.2–2.0 раза, чем в 2020 и 2022 гг.) и меньшей (на 2.2–2.3°C по сравнению с 2020 и 2022 гг.) среднемесячной температурой воздуха в июле 2021 г. Август 2021 г. был засушливым, что неблагоприятно сказывается на разложении органического вещества растительного опада и лесной подстилки, а также дыхании корней растений.

Как и в фоновом хвойно-лиственном насаждении, увеличенное значение дыхания подзолистой почвы вырубки в 2021 г. наблюдалась в июне, с дальнейшим уменьшением в 2.4 раза осенью. В 2022 г. пик интенсивности эмиссии CO₂ после рубочного сообщества приходился на июнь–июль (2.3–2.5 г C/(м² сут), $p_i = 0.175$ между месяцами). Для всех исследуемых объектов дисперсионным анализом показаны значимые различия величины среднемесячного выделения CO₂ с поверхности их почв ($p < 0.001$).

Анализ различий величины среднемесячной эмиссии в первый год после сплошной рубки показал, что июне и сентябре значимых различий между ИЛ и вырубкой не выявлено ($p_i > 0.05$), тогда как в июле и августе SR на вырубке было меньше в 1.6 раза ($p_i < 0.05$). На второй год после сплошной рубки среднемесячная величина SR вырубки была меньше в 1.2–2.0 раза во все месяцы за исключением октября, когда эмиссия CO₂ с поверхности почвы вырубки превышала в 1.2 раза аналогичный показатель для ИЛ ($p_i = 0.035$). Сравнение фонового насаждения и вырубки показало, что среднемесячное значение потока CO₂ в хвойно-лиственном

насаждении преобладало над аналогичными данными на вырубке в 1.4–1.7 в 2021 г., и в 1.9–3.1 раза в 2022 г. ($p_i < 0.05$) за исключением мая, когда выделение CO₂ было сопоставимо ($p_i > 0.05$). Сходные результаты были представлены ранее при сравнении вырубки среднетаежного сосняка черничного и ненарушенного насаждения в регионе исследований, что, вероятно, связано с переувлажнением почв и низкой их температурой после схода снега, ведущим к невысокой скорости роста и дыхания корней древесных растений в ненарушенных насаждениях, в результате чего в этот период в SR выше доля гетеротрофного дыхания [13]. Интенсивность среднемесячной SR фонового хвойно-лиственного насаждения превышало аналогичные значения ИЛ в 1.3–2.3 раза, что обусловлено более благоприятными погодными условиями в течение летних месяцев 2021–2022 гг.

Сопоставление полученных нами данных с литературными показало, что интенсивность среднемесячной SR исследуемых ненарушенных насаждений превышало в 1.1–4.1 раза величину эмиссии с поверхности почвы сосняка черничного в регионе исследований [13], а из почвы вырубки хвойно-лиственного насаждения – в 1.1–3.4 раза по сравнению с вырубкой сосняка черничного. Эмиссия CO₂ из почв южно-таежного заболоченного ельника чернично-сфагнового была в 1.3–2.3 раза выше, однако фоновое хвойно-лиственное насаждение характеризовалось более высокими (на 25–30%) значениями SR в мае [21]. Дыхание почвы с поверхности вырубки ельника в Англии изменялось от 0.2 до 3.0 г C/(м² сут), фонового ельника от 1 до 4.0 г C/(м² сут), что вполне сопоставимо с полученными данными по вырубке и ненарушенных хвойно-лиственных насаждений [34]. Интенсивность потока CO₂ из почвы южно-таежного ельника была сходна с изученными хвойно-лиственными

Таблица 3. Среднемесячная эмиссия CO₂ с поверхности типичной подзолистой, г C/(м² сут)

Объект (год, объем выборки)	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Сезон ¹
ИЛ (2020, $n = 250$)	— ²	2.91 ± 0.13 ³	3.95 ± 0.09	3.90 ± 0.27	1.54 ± 0.05	0.71 ± 0.03	$\chi^2 = 205.7$; $p < 0.001$
Фон (2021, $n = 83$)	2.87 ± 0.29	5.31 ± 0.58	3.46 ± 0.25	3.96 ± 0.18	1.96 ± 0.09	—	$\chi^2 = 65.2$; $p < 0.001$
Вырубка (2021, $n = 107$)	2.70 ± 0.11	3.34 ± 0.19	2.46 ± 0.14	2.37 ± 0.10	1.38 ± 0.08	—	$\chi^2 = 55.7$; $p < 0.001$
Фон (2022, $n = 74$)	1.16 ± 0.11	4.85 ± 0.24	5.55 ± 0.41	5.62 ± 0.35	2.00 ± 0.06	1.66 ± 0.08	$\chi^2 = 59.5$; $p < 0.001$
Вырубка (2022, $n = 109$)	1.16 ± 0.04	2.49 ± 0.10	2.27 ± 0.13	1.81 ± 0.09	0.78 ± 0.05	0.87 ± 0.06	$\chi^2 = 87.1$; $p < 0.001$

Примечание. ¹ – результат критерия Краскела–Уоллиса по оценке динамики SR в течение периода исследований; ² – нет данных; ³ – среднее ± ошибка среднего.

насаждениями, тогда как SR его вырубки было выше в 1.3–8.0 раза [12].

Влияние сплошной рубки на эмиссию углерода из почвы. В летние месяцы 2020 г. с поверхности почвы ИЛ выделилось 290.5 ± 21.8 г С/м² (табл. 4). Анализ данных по потоку С–СО₂ в течение бесснежного и вегетационного периодов с поверхности фонового хвойно-лиственного насаждения показал, что вклад мая в среднем составил 11 и 9% соответственно. Следовательно, можно предположить, что в эти временные интервалы из почвы в атмосферу поступило 361 и 400 г С/м². В первый год после сплошной рубки поток С–СО₂ в атмосферу с июня по август сократился в 1.2 раза ($p_i = 0.001$), во второй год – в 1.5 раза ($p_i < 0.001$) по сравнению с ИЛ. Сравнение вырубки с фоновым насаждением показало меньшие величины дыхания почвы на ней в 1.7–1.9 раза ($p_i < 0.05$ для анализируемых временных интервалов в годы исследований). В летние месяцы с поверхности почвы вырубки выделялось 55–59% от потока С–СО₂ в течение бесснежного периода, а вклад вегетационного периода составил 84–87%. В фоновом хвойно-лиственном насаждении с июня по август поступление углерода в атмосферу было несколько выше (60–66% от бесснежного периода), тогда как доля вегетационного периода была сопоставима (86–88%) с величиной, полученной для вырубки.

Выделение СО₂ с поверхности почвы фонового насаждения и вырубки в 2021 г. в 1.2–1.3 раза превышало аналогичные данные для исследуемых периодов в 2022 г. ($p_i < 0.05$). Межгодовая вариация во многом обусловлена различающимися погодными условиями в течение вегетационных периодов. Так, температура воздуха в мае и июне 2021 г. была соответственно в 1.6 и 1.2 раза выше, чем в 2022 г., что, в сочетании с достаточным количеством почвенной влаги после схода снега в эти месяцы, создавало благоприятные условия для жизнедеятельности деструкторов органического вещества и дыхания корней в это время, а также увеличило итоговое поступление углерода с эмиссией СО₂, несмотря на снижение интенсивности

дыхания почвы в июле–августе, по сравнению с 2022 г., которые были в 1.1–1.2 раза теплее, чем в 2021 г. В целом, средняя температура воздуха за вегетационный период 2021 г. была в 1.1 раза ниже, по сравнению с 2022 г., а количество осадков было сопоставимо. Вместе с тем 2021 г. отличался более низкой величиной гидротермического коэффициента Селянинова (1.06 в 2021 г., 1.16 в 2022 г.) и меньшими значениями индекса увлажненности, что свидетельствует о более благоприятных условиях увлажнения. На второй год после сплошной рубки отмечается снижение в 1.2–1.3 раза потока С–СО₂, что кроме различий в погодных условиях, связано с уменьшением темпов разложения растительных остатков (тонкие корни, листва), отмерших в процессе рубки. Как отмечено в работе [19], в первый год деструкции теряется больше половинного веса и более 70% от массы углерода и лигнина тонких (<2 мм в диаметре) корней деревьев сосны. Уменьшение скорости деструкции тонких корней лиственных и хвойных пород на второй год экспозиции также показано в работах [30, 32].

Полученные данные по потоку углерода с дыханием подзолистой почвы для ненарушенных насаждений превысили в 2.6 раза результаты, опубликованные для среднетаежного ельника черничного на типичной подзолистой почве [11], что, по мнению авторов связано с разными методами измерений и для заболоченного среднетаежного ельника на торфянисто-подзолисто-глеватой почве [9]. Однако они сопоставимы или несколько ниже потока углерода с поверхности почвы за летние месяцы (373–681 г С/м²) в заболоченном южно-таежном ельнике в Тверской области [21] и в спелом ельнике Эстонии (522–804 г С/м²) за сходный период [25]. При сравнении потерь С–СО₂ для вырубок установлено, что в течение бесснежного периода вырубка среднетаежного сосняка черничного в Республике Коми эмитирует в атмосферу 210–294 г С/м², а доля летних месяцев и вегетации составляет 64 и 90%, соответственно [13]. С мая по июнь с поверхности вырубки осушенного сосняка в южной Финляндии выделяется 267–286 г С/м²,

Таблица 4. Поток углерода с дыханием почвы, г С/м²

Объект (год, объем выборки)	Временной интервал		
	лето (01.06–31.08)	вегетационный период 01.05–30.09	бесснежный период (01.05–31.10)
ИЛ (2020, $n = 7$)	290.5 ± 21.8	361.3 ± 25.9	400.4 ± 26.8
Фон (2021, $n = 5$)	443.9 ± 15.8	643.5 ± 18.8	745.8 ± 19.7
Вырубка (2021, $n = 6$)	244.2 ± 7.8	382.6 ± 12.5	441.9 ± 16.0
Фон (2022, $n = 5$)	384.7 ± 47.3	519.3 ± 57.9	586.6 ± 62.1
Вырубка (2022, $n = 6$)	200.3 ± 7.7	284.4 ± 11.2	336.8 ± 19.5

что сопоставимо или в 1.2–1.4 раза выше рассчитанных величин для аналогичного временного интервала [24]. Несколько меньшие значения получены на севере Англии для заболоченной, глеевой, органо-минеральной почвы вырубки ельника, выделяющей в течение года в атмосферу 243–322 г C/m² [34].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сплошная рубка оказывает негативное влияние на дыхание типичной подзолистой почвы хвойно-лиственного насаждения в условиях средней тайги Республики Коми, что выражается в снижении величины среднемесячной эмиссии CO₂ и, как следствие, в общем потоке CO₂ в атмосферу. На второй год после сплошной рубки отмечается уменьшение интенсивности дыхания по сравнению с первым годом, что обусловлено снижением скорости деструкции отмершей в процессе рубки растительной биомассы. В течение бесснежного периода более высокие значения дыхания почвы отмечается в июле–августе, однако погодные условия могут смещать пик выделения на июнь. Температура почвы оказывает положительное, статистически значимое влияние на эмиссию CO₂ с ее поверхности как в ненарушенных насаждениях, так и в вырубке, хотя ее роль в формировании потока диоксида углерода в атмосферу в отдельные годы невысока. Роль влажности почвы неоднозначна, что выражается разной направленностью (положительное или отрицательное) и наличием или отсутствием статистической значимости воздействия на поток CO₂ в атмосферу в различные годы исследований, что обусловлено погодными условиями. Выявлена отрицательная роль сплошной рубки на температурный отклик (Q_{10}). Полученные данные нужны для определения роли промышленных рубок в углеродном цикле таежных лесов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 23-74-10007 “Изменение почв и компонентов цикла углерода в ходе восстановительной сукцессии после сплошной рубки в средней тайге европейского северо-востока России” <https://rscf.ru/project/23-74-10007/>».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Добровольского Г.В., Таскаева А.И., Забоевой И.В. Сыктывкар, 2010. 356 с.
2. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Под ред. Таскаева А.И. М.: Наука, 1997. 116 с.
3. Дымов А.А., Старцев В.В. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнорубочных рубок // Почвоведение. 2016. № 5. С. 599–608.
4. Дымов А.А., Старцев В.В., Горбач Н.М., Севергина Д.А., Кутявин И.Н., Осипов А.Ф., Дубровский Ю.А. Изменения почв и растительности при разном числе проездов колесной лесозаготовительной техники (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1426–1441.
5. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>
6. 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.
7. Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г. Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO₂ из почвы в лесах Валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37.
8. Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
9. Кузнецов М.А. Выделение CO₂ с поверхности почвы в ельнике чернично-сфагновом // Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2014. С. 87–94.
10. Лукина Н.В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник РАН. 2020. № 6. С. 528–532. <https://doi.org/10.31857/S0869587320060080>
11. Машика А.В. Эмиссия диоксида углерода с поверхности подзолистой почвы // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1457–1463.
12. Молчанов А.Г., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. Влияние сплошной вырубки леса на эмиссию CO₂ с поверхности почвы // Известия РАН. Серия биологическая. 2017. № 2. С. 190–196.
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. *Bond-Lamberty B., Thomson A.* A global database of soil respiration data // *Biogeosci.* 2010. V. 7. P. 1915–1926.
<https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
15. *Čater M., Darenova E., Simončič P.* Harvesting intensity and tree species affect soil respiration in uneven-aged Dinaric forest stands // *For. Ecol. Manag.* 2021. V. 480. P. 118638.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638>
16. *Darenova E., Čater M.* Effect of spatial scale and harvest on heterogeneity of forest floor CO₂ efflux in a sessile oak forest // *Catena.* 2020. V. 188. P. 104455.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104455>
17. *Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y.* On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} // *Glob. Ch. Biol.* 2006. V. 12. P. 154–164.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>
18. *de Bello F., Valencia E., Ward D., Hallett L.* Why we still need permanent plots for vegetation science // *J. Vegetation Sci.* 2020. V. 31(5). P. 679–685.
<https://doi.org/10.1111/jvs.12928>
19. *Fu Y., Feng F., Zhang X., Qi D.* Changes in fine root decomposition of primary *Pinus koraiensis* forest after clear cutting and restoration succession into secondary broad-leaved forest // *Appl. Soil Ecol.* 2021. V. 158. P. 103785.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103785>
20. https://rp5.ru/Погода_в_Сыктывкаре
21. *Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J.* Soil respiration in paludified forests of European Russia // *J. For. Res.* 2020. V. 31. P. 1939–1948.
<https://doi.org/10.1007/s11676-019-00963-4>
22. *Karelin D., Goryachkin S., Zazovskaya E., Shishkov V., Pochikalov A., Dolgikh A., Sirin A. et al.* Greenhouse gas emission from the cold soils of Eurasia in natural settings and under human impact: controls on spatial variability // *Geoderma Reg.* 2020. V. 22. P. e00290.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00290>
23. *Kohout P., Charvátová M., Štursová M., Mašíňová T., Tomšovský M., Baldrian P.* Clearcutting alters decomposition processes and initiates complex restructuring of fungal communities in soil and tree roots // *The ISME J.* 2018. V. 12. P. 692–703.
<https://doi.org/10.1038/s41396-017-0027-3>
24. *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 // *Biogeosci.* 2019. V. 16. P. 3703–3723.
<https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
25. *Kukumägi M., Ostonen I., Uri V., Helmisaari H.-S., Kanal A., Kull O., Lohmus K.* Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce stands of different ages // *Plant and Soil.* 2017. V. 414. P. 265–280.
<https://doi.org/10.1007/s11104-016-3133-5>
26. *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>
27. *Kurth V.J., Bradford J.B., Slesak R.A., D'Amato A.W.* Initial soil respiration response to biomass harvesting and green-tree retention in aspen-dominated forests of the Great Lakes region // *For. Ecol. Manag.* 2014. V. 328. P. 342–352.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.052>
28. *Kuuluvainen T., Gauthier S.* Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change // *For. Ecosyst.* 2018. V. 5. P. 26.
<https://doi.org/10.1186/s40663-018-0142-2>
29. *Mäkipää R., Abramoff R., Adameczyk B., Baldy V., Biryol C., Bosela M., Casals P. et al.* How does management affect soil C sequestration and greenhouse gas fluxes in boreal and temperate forests? – A review // *For. Ecol. Manag.* 2023. V. 529. P. 120637.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120637>
30. *Morozov G., Aosaar J., Varik M., Becker H., Lohmus K., Padari A., Aun K., Uri V.* Long-term dynamics of leaf and root decomposition and nitrogen release in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) and silver birch (*Betula pendula* Roth.) stands // *Scand. J. For. Res.* 2018. V. 34. P. 12–25.
<https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1511111>
31. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. <https://www.R-project.org/>
32. *Sun T., Dong L., Zhang L., Wu Z., Wang Q., Li Y., Zhang H., Wang Z.* Early stage fine-root decomposition and its relationship with root order and soil depth in a *Larix gmelinii* plantation // *Forests* 2016. V. 7(10). P. 234.
<https://doi.org/10.3390/f7100234>
33. *Vestin P., Mölder M., Kljun N., Cai Z., Hasan A., Holst J., Klemedtsson L., Lindroth A.* Impacts of clear-cutting of a boreal forest on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes // *Forests* 2020. V. 11. P. 961.
<https://doi.org/10.3390/f11090961>
34. *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 // *Biogeosci.* 2021. V. 18. P. 4227–4241.
<https://doi.org/10.5194/bg-18-4227-2021>

Influence of Clear Felling on CO₂ Emission from the Podzolic Soil Surface of the Coniferous-Deciduous Forest (Middle Taiga, Komi Republic)

A. F. Osipov^{1,*}, V. V. Startsev¹, and A. A. Dymov^{1,2}

¹*Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

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

The impact of industrial logging on the carbon cycle of boreal forests is characterized by significant uncertainties, which is largely due to the lack of information on carbon fluxes (in particular, soil respiration) in felling sites. The aim of study is to assess the effect of clear felling on CO₂ emission from the soil surface of a coniferous-deciduous forest on a typical podzolic soil (Albic Retisol). The investigation was executed during the snowless periods (May–October) of 2020–2022 in a coniferous-deciduous forest and its felling site carried out in the winter of 2020. The carbon dioxide emission was measured by a LI COR 8100 gas analyzer. A brief description of the weather conditions during the years of research and the dynamics of soil temperature at a depth of 10 cm is given. A positive, statistically significant relationship between soil respiration and soil temperature at a depth of 10 cm ($R^2 = 0.17–0.75$; $p < 0.001$) was detected for the analyzed objects. The correlation with soil moisture was both positive and negative and statistically insignificant except data obtained in 2022 in the undisturbed control forest. The high values of CO₂ flux during the snowless period were observed in July–August and was 3.90–5.62 gC/m²/day and 2.3–2.5 gC/m²/day in undisturbed forests and felled areas, respectively. In 2021, the peak of CO₂ release shifted to June. Clear felling has a negative effect on the soil respiration of Albic Retisol that decreased by 1.2–1.9 times in the conditions of the middle taiga of the Komi Republic. The most (55–66%) of the C–CO₂ efflux during the snowless period was emitted during the summertime, and the vegetation period (May–September) contribution was 84–88%. The obtained data will serve to determine the role of industrial logging in the carbon cycle of taiga forests.

Keywords: soil respiration, clear felling, temperature coefficient Q_{10} , Albic Retisol, mixed forest, restorative succession