

УДК 631.433.3:630*114.35:582.475

ВЛИЯНИЕ СПЛОШНОЙ РУБКИ НА ДЫХАНИЕ ПОЧВЫ СРЕДНЕТАЕЖНОГО СОСНЯКА ЧЕРНИЧНОГО РЕСПУБЛИКИ КОМИ¹

© 2022 г. А. Ф. Осипов*

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

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

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 02.11.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Хозяйственная деятельность человека оказывает существенное влияние на цикл углерода в лесных экосистемах. Цель настоящей работы — определить влияние сплошнолесосечной рубки на эмиссию CO_2 (R_s) с поверхности почвы среднетаежного сосняка черничного с учетом отдельных технологических элементов вырубki. Исследование проведено в подзоне средней тайги Республики Коми. Объектами послужили технологические элементы (пасеки и пасечные волока) вырубki сосняка черничного. Рубка проведена с использованием современных лесозаготовительных комплексов с сортиментной вывозкой древесины. Контролем послужил спелый сосняк черничный, произрастающий рядом. Установлена положительная взаимосвязь R_s и температуры почвы как в сосняке черничном, так и на пасечных участках и волоках вырубki. В год с меньшим количеством осадков и более высокими температурами воздуха теснота связи между этими параметрами была выше в сосняке, тогда как на вырубке она оказалась ниже по сравнению с периодом с большим выпадением осадков и меньшими температурами воздуха. Интенсивность эмиссии CO_2 с поверхности почвы пасечных участков была ниже по сравнению с ненарушенным сосняком в отдельные месяцы и периоды исследования (лето, вегетационный период, бесснежный период). Дыхание почв волоков различалось в разные годы исследований. Так, в более влажный 2019 г. наблюдали относительно высокие, сопоставимые с контролем величины потока CO_2 с поверхности волоков, тогда как в более сухой 2020 г. они были ниже по сравнению с сосняком черничным, однако сопоставимы с пасечными участками. Следовательно, принимая во внимание значимую площадь (до 25%), которую занимают волока на вырубках при использовании современных лесозаготовительных комплексов, при оценке углеродного бюджета на вырубках необходимо учитывать роль технологических элементов на ней.

Ключевые слова: средняя тайга, сосняк, дыхание почвы, сплошная рубка, пасека, волок.

DOI: 10.31857/S0024114822030111

Леса бореального пояса играют важную роль в глобальных запасах углерода, аккумулируя примерно 1095×10^{15} г (Bradshaw, Warkentin, 2015) со средним годовым стоком около 0.45 т га^{-1} (Pan et al., 2011). Значимое участие в этих процессах выполняют леса России, для территории которой оценки запасов/поглощения углерода по данным разных авторов разнятся (Filipchuk et al., 2018; Scherachenko et al., 2021). Отмечено, что большая часть углерода в лесных сообществах страны (порядка 75%) сосредоточена в почвенном блоке (Schapoff et al., 2016; Chernova et al., 2021). Существенное влияние на цикл углерода в лесах оказы-

вает хозяйственная деятельность человека, особенно промышленные рубки, изменяя величину и знак углеродного баланса экосистемы (Zamolodchikov et al., 2013; Naudts et al., 2016; Pukkala, 2018). Сплошные рубки ведут к потерям почвенного углерода за счет снижения его массы в лесной подстилке и верхних минеральных горизонтах (Dymov et al., 2017; Mayer et al., 2020), что во многом связано с трансформацией потоков диоксида углерода с поверхности почвы после нарушения (Čater et al., 2021). Вследствие более интенсивного роста температуры воздуха в экосистемах высоких широт, леса бореального пояса потенциально представляют собой крупный источник углерода, что требует понимания влияния хозяйственной деятельности как на круговорот углерода в них, так и на процессы изменения климата (Bradshaw, Warkentin, 2015; Лукина, 2020).

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России” (регистрационный номер 1021051101417-8-1.6.19).

Одной из причин неопределенностей в оценке баланса углерода лесными экосистемами России (особенно потоков углерода) можно назвать недостаток экспериментальных данных, характеризующих трансформацию круговорота углерода после антропогенных и природных нарушений, которыми охвачены значительные площади (Scharoff et al., 2016). Так, по данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Государственный доклад ..., 2020), годичный объем заготовленной древесины с 2015 по 2019 гг. изменялся в пределах 205–238 млн м³, что свидетельствует о существенном влиянии промышленных рубок не только на цикл углерода страны, но и на цикл Северного полушария в целом. На территории Республики Коми за аналогичный период площадь, пройденная рубками, составляет 40–65 тыс. га в год, а годичный объем вырубленной древесины – 8.3–9.9 млн м³ (Государственный доклад ..., 2020). Если оценить влияние рубок на запасы углерода фитомассы древостоев возможно с использованием конверсионных коэффициентов, то для характеристики изменений эмиссии CO₂ с поверхности почвы достоверные предикторы отсутствуют. Это во многом объясняется недостаточным количеством материалов исследований, освещающих последствия влияния рубки леса на динамику дыхания почвы. Так, эффект сплошной рубки на потоки CO₂ как с поверхности почвы, так и экосистемы в целом показан для южнотажных ельников в условиях Московской (Molchanov et al., 2017) и Тверской областей (Mamkin et al., 2019).

Вырубка представляет собой неоднородную поверхность, представленную чередующимися пасаками – участками с относительно слабо нарушенным почвенным покровом – и пасечными волоками, по которым передвигалась лесозаготовительная техника и где сложены порубочные остатки (срубленные сучья, вершины деревьев и т.д.). Также одним из основных технологических элементов вырубки является магистральный волок, объединяющий пасечные волоки и погрузочную площадку или дорогу для вывозки древесины. Можно предположить, что на интенсивность потока CO₂ с поверхности технологических элементов вырубки будет влиять степень их нарушенности, интенсивность лесовозобновительного процесса, а также наличие на них растительных (в том числе порубочных) остатков. Следует отметить, что роль отдельных технологических элементов в дыхании почвы пострубочных сообществ слабо изучена. В этой связи целью настоящей работы – определение влияния сплошной рубки на эмиссию CO₂ с поверхности почвы среднетаежного сосняка черничного с учетом степени ее нарушения. Данная цель предусматривала решение следующих основных задач:

1) оценить ход сезонной динамики эмиссии CO₂ в сосняке черничном и на технологических элементах вырубки сосняка черничного;

2) охарактеризовать влияние температуры и влажности почвы на дыхание почвы;

3) рассчитать вынос углерода с эмиссией CO₂ с поверхности сосняка черничного и технологических элементов вырубки.

Полученные данные можно использовать при определении роли сплошных рубок при оценке цикла углерода лесных экосистем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проведены в подзоне средней тайги в Республике Коми. На территории господствуют отложения четвертичной системы, которые включают осадки не менее трех оледенений, представленные моренными валунными суглинками и флювиогляциальными песками. Климат территории умеренно-континентальный со средней температурой июля +17.5°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. Преобладающими древесными породами здесь являются ель, сосна и береза, а в почвенном покрове доминируют типичные подзолистые и болотно-подзолистые почвы (Атлас ..., 2011).

Работа выполнена с мая по октябрь в 2019 и 2020 гг. на технологических элементах (пасечные участки и пасечные волоки) вырубки сосняка черничного (61°35'35" с.ш., 51°02'25" в.д.), проведенной в 2015 г. с использованием современных лесозаготовительных комплексов и сортиментной вывозки древесины. Тип рубки – сплошная. Площадь вырубки – 14.7 га, ширина пасечных участков варьировала в пределах 10.5–13.5 м (в среднем 12 м), волоков – 3–3.5 м (в среднем 3.3 м). Порубочные остатки сложены на волоках. В настоящее время пострубочное сообщество сформировано единичными тонкомерными деревьями ели, березы и подростом из этих же пород как предварительного, так и последующего возобновления (табл. 1). В качестве контрольного участка выбран спелый сосняк черничный, произрастающий рядом с выружкой. Почва исследуемых сообществ торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-железистая (Folic Retisol), песчаная, подстилаемая с глубины 60 см суглинками. Содержание углерода в растительных остатках лесной подстилки сосняка и на пасеке вырубки 45–48, азота 1.2–1.3%. Мощность органогенного горизонта в сосняке черничном составляет 8.9 ± 0.4 см, на пасеках сплошной вырубки 5.3 ± 0.2 см.

Измерение эмиссии CO₂ (*R_s*) проводили при помощи инфракрасного газоанализатора LI COR 8100

Таблица 1. Краткая характеристика древостоев и подроста на объектах исследования (описание выполнено в 2018 г.)

Древесная порода	Густота деревьев, экз.×10 ³ /га		Средние показатели		Сумма площадей сечений, м ² /га
	древостой	подрост	диаметр, см	высота, м	
Сосняк черничный (контроль)					
Сосна	1.01 ± 0.05*	—	18.5 ± 0.7	18.8 ± 0.3	29.6 ± 1.9
Ель	0.27 ± 0.04	3.85 ± 0.54	9.4 ± 0.3	9.7 ± 0.9/1.8 ± 0.1***	2.6 ± 0.4
Береза	0.17 ± 0.03	0.42 ± 0.06	11.6 ± 0.3	14.0 ± 1.3/3.1 ± 0.6	2.0 ± 0.3
Вырубка сосняка черничного					
Сосна	—	3.78 ± 1.00	но**	0.51 ± 0.07	но
Ель	Единично	1.09 ± 0.25	но	1.45 ± 0.16	но
Береза	Единично	1.21 ± 0.39	но	0.72 ± 0.07	но

* $\pm$ стандартная ошибка среднего.

** Не определяли.

*** Древостой/подрост (к древостою относили деревья с диаметром на высоте 1.3 м более 6 см).

с почвенной камерой 20 см, устанавливаемой на стационарные пластиковые основания. Пластиковое основание высотой 10 см заглубили в лесную подстилку на 5 см. В сосняке черничном было установлено 5, на пасаках и волоках сплошной рубки — по 4 основания. Растения напочвенного покрова были удалены и срезались в случае повторного прорастания. Наблюдения проводили один-два раза в месяц в середине и конце месяца.

Температуру почвы на глубине 10 см определяли датчиком, входящим в комплектацию прибора, во время измерений эмиссии CO₂, а ее непрерывный мониторинг вели автоматическими регистраторами НОВО U12 (Onset, США).

Характеристика погодных условий дана для метеостанции Сыктывкар, расположенной в 10 км, с использованием сведений из открытых источников (https://gr5.ru/Погода_в_Сыктывкаре).

Традиционно для оценки взаимосвязи между R_s и температурой почвы применяются линейные и экспоненциальные уравнения. Использовали линейное уравнение вида:

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

где $\ln R_s$ — логарифмированные данные по дыханию почвы, α и β — коэффициенты уравнения, X — температура почвы на глубине 10 см.

Перед регрессионным анализом исходные данные по дыханию почвы были прологарифмированы для достижения нормальности распределения остатков линейной модели и однородности дисперсий ошибок линейной модели.

Коэффициент α уравнения 1 применяли для расчета температурного коэффициента Q_{10} , показывающего изменение скорости R_s при изменении температуры на 10°C, и рассчитывали по уравнению (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, используя уравнение 3:

$$RS_{\text{period}} = \sum_{n=1}^n R_{10} Q_{10}^{\frac{T-10}{10}},$$

где RS_{period} — вынос C—CO₂ за временной интервал, г См², R_{10} — величина R_s при температуре 10°C, Q_{10} — температурный коэффициент, T — среднесуточная температура почвы на глубине 10 см.

Оценку C—CO₂ выполняли для трех временных интервалов: лето (июнь—август), вегетационный период (май—сентябрь) и бесснежный период (май—октябрь).

Для статистической обработки полученных данных использовались 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. В случае нормального распределения парные сравнения проводили при помощи t-теста (p_t), а множественные попарные — при помощи критерия Тьюки. Непараметрические аналоги (критерий Уилкоксона—Манна—Уитни (p_w) и тест Дана (p_D)) применяли при отличии распределения от нормального соответственно для парных и множественных парных сравнений. 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 (контроль, пасека, волок) и сред-

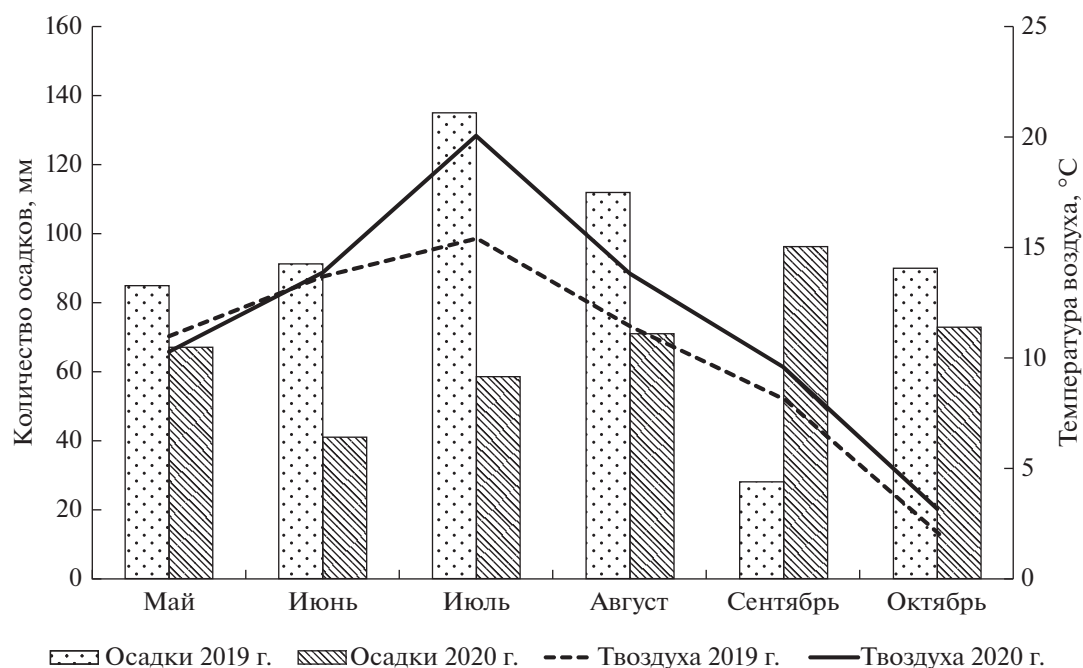


Рис. 1. Количество поступающих осадков (Осадки, мм) и температура воздуха (Т воздуха, °C) по данным метеостанции Сыктывкар в годы исследований (https://tr5.ru/Погода_в_Сыктывкаре).

немесячными значениями. Статистический анализ выполнен при 95% уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в годы наблюдений. Сочетание относительно высокой температуры воздуха и меньшего количества осадков наблюдалось в течение практически всего бесснежного периода 2020 г. (рис. 1). Средняя температура воздуха с мая по октябрь 2019 г. составила 10.2°C, количество осадков — 540 мм, тогда как в 2020 г. — соответственно 11.8°C и 405 мм. Vegetационный период (май—сентябрь) 2019 г. холоднее на 0.3°C по сравнению со среднестатистическим годом, а в 2020 г. теплее на 1.3°C. Поступление осадков в исследуемые вегетационные периоды превышало климатическую норму в 1.4 раза в 2019 г. (450 мм) и было сопоставимо с ней в 2020 г. (333 мм). В целом сумма среднесуточных температур выше 5 и 10°C в 2020 г. превышала аналогичные результаты в 2019 г. в 1.2 раза, а количество осадков в эти дни в 2020 г. было в 1.6 раза меньше.

Динамика температуры почвы. Прогрев почвы сплошной вырубке после таяния снега происходит интенсивнее, чем в контрольном сосняке черничном (рис. 2). Так, к началу мая температура почвы на глубине 10 см на сплошной вырубке была в 1.2—1.6 раза выше, чем в контрольном сосняке черничном. На вырубке также отмечены более высокие максимальные значения температуры 14.3—16.2°C и 11.8—12.8°C в сосняке чернич-

ном. Средняя температура почвы в течение бесснежного периода на сплошной вырубке составила 9.1 и 10.1°C, в период вегетации — 9.9 и 10.9°C, в течение летних месяцев — 11.3 и 12.5°C в 2019 и 2020 гг. соответственно. В фоновом сосняке эти показатели для исследуемых временных интервалов были ниже ($p_w < 0.05$) и составили 7.7—8.6°C, 8.1—9.1°C и 9.4—10.4°C с большими значениями в 2020 г. ($p_w < 0.05$). Отсутствие древесного полога способствует быстрому остыванию поверхности сплошной вырубке сосняка черничного, которое к концу октября составило 2.2 и 4.4°C в 2019 и 2020 гг. соответственно, тогда как в контрольном сосняке черничном оказалось в 1.1—1.6 раза выше.

Сезонная динамика эмиссии CO₂ с поверхности почвы. Кривая хода сезонной динамики эмиссии CO₂ в годы исследований в сосняке черничном имела схожие черты (табл. 2). Она характеризовалась постепенным повышением в 1.9—3.5 раза с мая до 3.0—3.2 г См⁻² сут⁻¹ в июле с последующим снижением к октябрю в 2.2—2.9 раза. В 2020 г. скорость среднемесячных потоков была выше, чем в 2019 г. в 1.3—1.9 раза ($p_D < 0.05$), за исключением июля, когда межгодовые величины дыхания почвы достоверно не различались ($p_D = 0.403$). В результате сплошной рубки сосняка черничного общие закономерности сезонной динамики эмиссии CO₂ не изменились для пасечных участков, тогда как для волоков они не всегда соблюдались. Так, в 2019 г. скорость эмиссии диоксида уг-

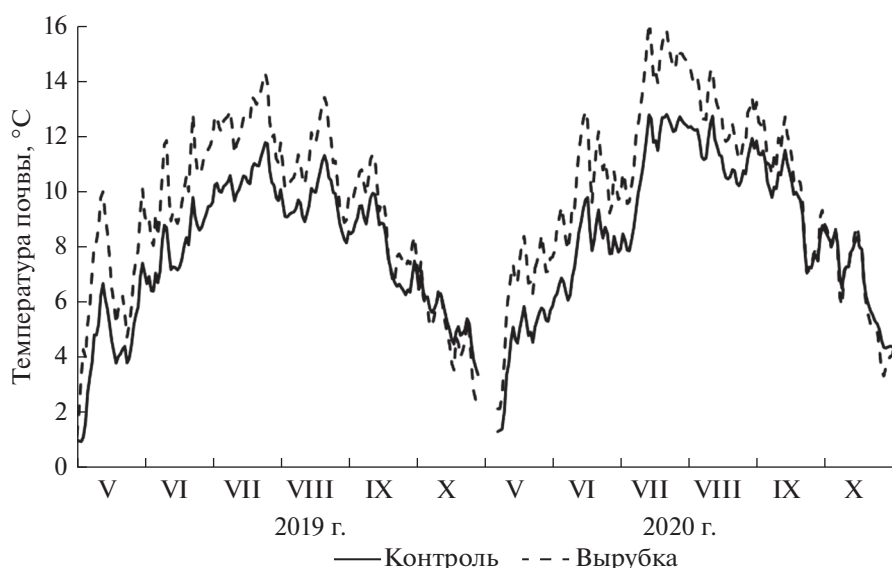


Рис. 2. Динамика температуры почвы на глубине 10 см в течение бесснежного периода.

лерода с поверхности волоков в летние месяцы изменялась в пределах $2.1\text{--}2.3 \text{ г } \text{См}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ и не отличалась между месяцами ($p_D > 0.05$), тогда как в 2020 г. ход сезонной динамики дыхания почвы был схож с сосняком черничным и пасечными участками. Следует также отметить, что на волоках вырубки не выявлены межгодовые различия в величине среднемесячной эмиссии CO_2 , за исключением сентября. Скорость потока диоксида углерода с поверхности почвы пасечных участков в июле, сентябре и октябре не различалась между годами исследований, тогда как в мае, июне и августе 2020 г. отмечены более высокие (в 1.3–1.8 раза) его значения.

Исследования, проведенные ранее в лесных экосистемах таежной зоны, показали, что кривая сезонной динамики эмиссии CO_2 с поверхности почвы совпадает с ходом прогрева почвы. Такие же закономерности были выявлены нами ранее для среднетаежных сосняков черничного (Осипов, 2015) и бруснично-лишайникового (Osipov, 2018). Сходные результаты по изменению дыхания почвы в течение вегетации приводятся для южнотаежных ненарушенных сообществ Д.В. Карелиным с соавт. (2014), Д. Иванов с соавт. (2020) и I.N. Kurganova с соавт. (2020). Следует отметить, что абсолютные величины эмиссии CO_2 в южнотаежных сообществах были в 2–4 раза выше по сравнению с данными для среднетаежных сосняков. В связи с тем, что дыхание подземных органов растений является составной частью потока диоксида углерода с поверхности почвы (Kuzakov, 2006), максимальное развитие которых приходится на конец июля — начало августа, то этот фактор также оказывает значимое влияние на величину R_s в те-

чение сезона (Карелин и др., 2014). Сплошные и выборочные рубки не изменяли направленность динамики выделения CO_2 с поверхности почв как хвойных, так и смешанных лесов в условиях Московской области (Molchanov et al., 2017), Словении (Čater et al., 2021) и Канады (Shabaga et al. 2015), однако интенсивность эмиссии CO_2 с поверхности почв исследованных пострубочных сообществ увеличивалась в 1.5–2.2 раза по сравнению с ненарушенными экосистемами.

Влияние сплошной рубки и технологического элемента вырубки на эмиссию CO_2 с поверхности почвы. Результаты дисперсионного анализ показали, что на вырубке происходят изменения в эмиссии CO_2 (табл. 2) во все периоды наблюдения, за исключением мая 2019 г. В связи с тем, что этот анализ не показывает, между какими элементами существуют различия, нами были проведены попарные сравнения. Выявлено, что интенсивность эмиссии CO_2 с поверхности пасечных участков вырубки сосняка в мае 2019 и 2020 гг. не отличается от выделения CO_2 из почвы сосняка черничного ($p_D > 0.05$), однако в остальные месяцы она достоверно ниже в 1.1–1.7 раза ($p_D < 0.05$). Более высокая разница в потоках диоксида углерода между сосняком и пасечными участками отмечается в октябре, меньшая — в августе, что, вероятно, связано с особенностями температурного режима (более быстрое прогревание и остывание) верхних слоев почвы на вырубке (рис. 2). Сопоставление дыхания почвы фонового сосняка и волоков сплошной вырубки показало, что в 2019 г. различий данного показателя в июне, августе и сентябре не выявлено ($p_D > 0.05$), а в мае выделение диоксида углерода с поверхности волоков

Таблица 2. Среднемесячные значения интенсивности потока CO₂ (г С м⁻² сут⁻¹) и оценка эффекта сплошной рубки на дыхание почвы

Месяц	Контроль ¹	Вырубка сосняка		Влияние рубки и элементов вырубки ²	Попарные сравнения ³		
		пасека	волок		контроль— пасека	контроль— волок	пасека— волок
2019 г.							
Май	0.86 ± 0.02 ⁴	0.85 ± 0.03	1.28 ± 0.13*	$\chi^2 = 12.98, p = 0.002$	0.232	0.002	0.000
Июнь	1.81 ± 0.07*	1.13 ± 0.09	2.08 ± 0.28*	$\chi^2 = 20.46, p = 0.000$	0.000	0.240	0.001
Июль	3.01 ± 0.15	2.26 ± 0.05*	2.27 ± 0.06*	$\chi^2 = 13.71, p = 0.001$	0.001	0.001	0.409
Август	2.20 ± 0.07	1.54 ± 0.04	2.22 ± 0.15*	$\chi^2 = 35.99, p = 0.000$	0.000	0.039	0.000
Сентябрь	1.51 ± 0.07	1.07 ± 0.08*	1.56 ± 0.12	$\chi^2 = 13.15, p = 0.001$	0.000	0.352	0.002
Октябрь	1.05 ± 0.05	0.61 ± 0.03*	0.87 ± 0.07*	$\chi^2 = 35.29, p = 0.000$	0.000	0.011	0.001
2020 г.							
Май	1.64 ± 0.21	1.30 ± 0.14	1.39 ± 0.05*	$F = 2.35, p = 0.131$	0.087	0.208	0.844
Июнь	2.58 ± 0.47	1.52 ± 0.07	1.92 ± 0.16*	$\chi^2 = 17.53, p = 0.000$	0.000	0.006	0.043
Июль	3.14 ± 0.15*	2.16 ± 0.23*	2.04 ± 0.15*	$\chi^2 = 22.31, p = 0.000$	0.000	0.000	0.476
Август	3.11 ± 0.05	2.74 ± 0.07	2.40 ± 0.12*	$\chi^2 = 28.04, p = 0.000$	0.001	0.000	0.010
Сентябрь	1.93 ± 0.08	1.32 ± 0.06*	1.19 ± 0.07	$\chi^2 = 41.78, p = 0.000$	0.000	0.000	0.144
Октябрь	1.45 ± 0.03	0.84 ± 0.03*	0.93 ± 0.07*	$\chi^2 = 44.27, p = 0.000$	0.000	0.000	0.292

¹ — контрольный сосняк черничный;² — результат дисперсионного анализа: в случае использования критерия Краскела—Уоллиса приведено значение χ^2 , для ANOVA — значение F;³ — приведены значения p-value (для мая 2020 г. — тест Тьюки, в остальных случаях — тест Данна);⁴ — среднее ± стандартная ошибка.* Отсутствует достоверная межгодовая вариация величины среднемесячного потока CO₂.

происходило в 1.5 раза активнее ($p_D = 0.002$), чем в сосняке черничном. В 2020 г., напротив, эмиссия CO₂ с поверхности почвы сосняка черничного превышала аналогичные среднемесячные показатели с поверхности волоков вырубки в 1.2–1.6 раза ($p_D < 0.05$).

Сопоставление интенсивности эмиссии CO₂ между технологическими элементами вырубки показало, что в 2019 г. скорость дыхания почвы с поверхности волоков была в 1.4–1.8 раза выше ($p_D < 0.05$), чем с поверхности пасечных участков во все периоды исследований, за исключением июля, когда они были сопоставимы (2.26–2.27 г С м⁻² сут⁻¹). В течение 2020 г. достоверные различия в выделении диоксида углерода наблюдались в июне (на волоках в 1.3 раза выше, $p_D = 0.043$) и августе (на волоках в 1.14 раз ниже, чем на пасечных участках, $p_D = 0.010$), тогда как в остальные месяцы потоки CO₂ с поверхности почвы волоков и пасек были сопоставимы ($p_D > 0.05$). Различная реакция дыхания почвы волоков в годы исследования, вероятно, определяется разложением порубочных остатков, которые были сложены на них с целью укрепления грунта. Известно, что основными деструкторами древе-

сины в бореальной зоне являются различные виды микроскопических грибов, которые чувствительны к влажности субстрата (Cornwell et al., 2009; Стороженко, 2016). Видимо, относительно влажный 2019 г. характеризовался более благоприятными условиями для их жизнедеятельности, что привело к усилению потока диоксида углерода с поверхности волоков. Однако повышенное количество осадков в 2019 г. вызвало снижение величин среднемесячной эмиссии CO₂ с поверхности почвы сосняка черничного, в результате чего она была сопоставима с выделением диоксида углерода с поверхности волоков вырубки. Как отмечается в ряде исследований (Kudeyarov, Kurganova, 2005; Осипов, 2015; Bobrik et al., 2020; Ivanov et al., 2020), увеличение влажности почвы отрицательно сказывается на скорости потока CO₂ с поверхности почв таежных лесов, произрастающих в условиях переувлажнения.

Взаимосвязь эмиссии CO₂ и температуры почвы.

Регрессионный анализ показал значимую ($p < 0.05$) положительную взаимосвязь дыхания почвы от ее температуры как с поверхности почвы сосняка, так и отдельных технологических элементов вырубки сосняка во все периоды исследований (табл. 3). Коэффициенты аппроксими-

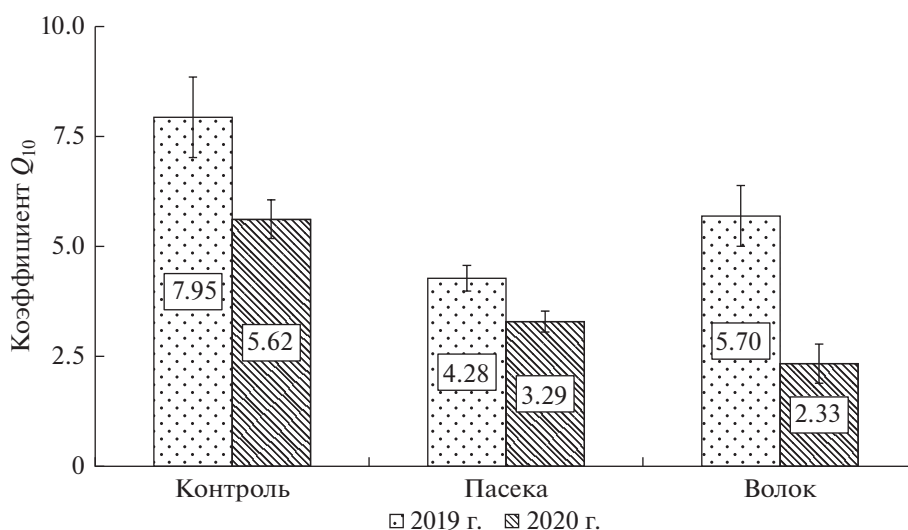


Рис. 3. Температурный коэффициент Q_{10} в годы исследований. Подпись на диаграмме — значение Q_{10} . Планки погрешностей — стандартная ошибка.

мации тренда линейных уравнений, рассчитанных для фонового сосняка и пасечных участков, были сопоставимы ($R^2 = 0.60–0.73$). Технологические элементы вырубki (пасека и пасечный волок) сходным образом реагировали на изменение погодных условий. Так, в более влажный 2019 г. корреляция эмиссии CO_2 с поверхности почвы с ее температурой была выше ($R^2 = 0.67–0.72$) по сравнению с более теплым 2020 г. ($R^2 = 0.35–0.60$). Реакция дыхания почвы фонового сосняка черничного на изменение температурного режима была обратная: увеличение R^2 от 0.60 до 0.73 в более теплый год.

Температурный коэффициент Q_{10} в годы исследований различался (рис. 3). Так, в более влажный 2019 г. наблюдалась более выраженная (выше в 1.3–2.4 раза) реакция эмиссии CO_2 с поверхности почвы при изменении ее температуры на 10°C на всех объектах исследования. Большой контраст между годами наблюдался на волоках, что, вероятно, связано с реакцией деструкторов древесины на уменьшение влажности субстрата в год с меньшим количеством осадков и более высокой температурой воздуха (рис. 1). Как отмечено в ряде работ, величина температурного коэффициента уменьшается при снижении влажности почвы лесных сообществ, что не подтверждается нашими данными (Davidson et al., 2006; Shabaga et al., 2015; Kurganova et al., 2020). Это, возможно, обусловлено особенностями увлажнения почв. Переувлажнение лесных почв на севере лимитирует процессы деструкции органического вещества и жизнедеятельность корней растений, важных участников процесса дыхания почв, тогда как температура почвы является ведущим фактором, определяющим интенсивность выделения диоксида углерода

(Kudeyarov, Kurganova, 2005). Ранее нами (Осипов, 2015; Osipov, 2018) было отмечено, что снижение содержания влаги в верхних почвенных горизонтах среднетаежных сосняков положительно влияет на скорость эмиссии CO_2 и снижает значение температурного коэффициента Q_{10} . Такие же закономерности о влиянии влажности на поток диоксида углерода с поверхности почвы получены в ходе многолетних наблюдений в лиственных лесах Сибири (Masyagina et al., 2021).

Следует отметить, что реакция дыхания почв отдельных технологических элементов вырубki сосняка черничного на изменение температуры почвы на 10°C имеет сходные тенденции с ненарушенными насаждениями сосняков на севере таежной зоны. Однако этот отклик менее выражен (ниже в 1.7–2.4 раза) по сравнению с контрольным сосняком черничным, что, вероятно, определяется снижением дыхания корней деревьев древостоя и связанных с ними микробных сообществ, вносящих свой вклад в эмиссию CO_2 .

Таблица 3. Параметры уравнений ($R_s = \alpha T_s + \beta$) зависимости эмиссии CO_2 (R_s , $\text{г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) от температуры почвы (T_s , $^\circ\text{C}$) на глубине 10 см ($p < 0.001$ во всех случаях)

Объект (год наблюдения)	Коэффициенты уравнения		R^2
	α	β	
Контроль (2019)	0.2073	–1.2890	0.60
Контроль (2020)	0.1727	–0.9106	0.73
Пасека (2019)	0.1454	–1.4344	0.72
Пасека (2020)	0.1192	–0.9337	0.60
Волок (2019)	0.1740	–1.2781	0.67
Волок (2020)	0.0848	–0.5084	0.35

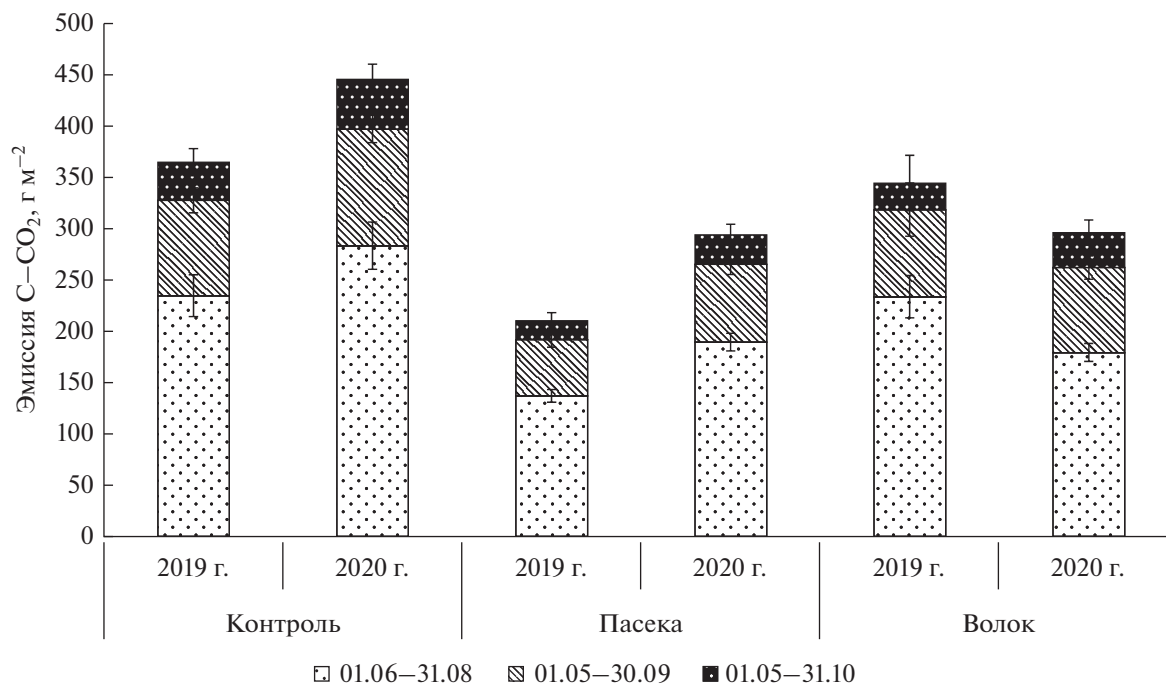


Рис. 4. Расчет выноса углерода с эмиссией CO_2 с поверхности почвы контрольного сосняка черничного и технологических элементов вырубки сосняка черничного.

Вынос углерода с эмиссией CO_2 с поверхности почв. С поверхности почвы контрольного сосняка черничного в течение исследуемых бесснежных периодов в процессе дыхания почвы выделилось $365\text{--}445 \text{ г С м}^{-2}$, а более высокая величина отмечена в 2020 г. ($p_t = 0.003$) (рис. 4). Вегетационный период и летние месяцы 2020 г. характеризовались более активными потерями углерода, превышавшая оценки эмиссии CO_2 с поверхности почвы 2019 г. в 1.2 раза ($p_t = 0.005$ и $p_t = 0.007$ соответственно).

На пасечных участках вырубки сосняка черничного отмечаются сходные тенденции в интенсивности поступления углерода в атмосферу в отдельные годы исследований. Так, в 2020 г. поток С-CO_2 с поверхности почвы был выше в 1.4 раза по сравнению с 2019 г. во все оцениваемые периоды ($p_t < 0.05$). На волоках сплошной вырубки достоверных различий в выносе углерода с дыханием почвы между годами исследования не выявлено для всех временных интервалов ($p_t > 0.05$ во всех случаях). Ранее (Osipov, 2018) показано, что погодные условия вегетационных периодов оказывают значимое влияние на величины выноса С-CO_2 с поверхности почвы сосняков. Как отмечено выше, относительно благоприятный режим температуры воздуха в сочетании с меньшим количеством осадков в 2020 г. привел к более высоким среднемесячным значениям эмиссии CO_2 , что, в свою очередь, увеличило вынос углерода с

поверхности почвы сосняка черничного и пасечных участков вырубки. Это привело к незначительному снижению потока С-CO_2 с поверхности почвы волоков.

В результате сплошной рубки сосняка черничного отмечается снижение в 1.5–1.7 раза эмиссии С-CO_2 с поверхности пасечных участков как в отдельные годы, так и в исследуемые периоды ($p_t < 0.001$ во всех случаях). Вынос углерода с дыханием почвы с поверхности волоков в 2019 г. был сопоставим с сосняком черничным ($p_t > 0.05$ для всех анализируемых периодов), тогда как в 2020 г. он был в 1.5–1.6 раза ниже ($p_t = 0.001$ для всех анализируемых периодов), чем в контрольном сосняке черничном. Сравнение величины потерь С-CO_2 с поверхности отдельных технологических элементов вырубки показало, что в 2019 г. процессы потока С-CO_2 происходили интенсивнее на волоке ($p_t < 0.05$ для всех периодов расчета), тогда как в 2020 г. они были сопоставимы ($p_t > 0.05$ для всех периодов расчета). Мы считаем, что снижение выноса углерода с дыханием почвы на пасечных участках вырубки связано, возможно, с прекращением жизнедеятельности корней древесных растений и ассоциированных с ними микробных сообществ. Согласно обзору, проведенному Р.Д. Хансон с соавт. (2000), в сосняках доля автотрофного дыхания в общем потоке CO_2 с поверхности почвы изменяется от 44 до 90%, а одним из методов его определения является уда-

ление подземных органов. Следовательно, можно предположить, что эмиссия $C-CO_2$ с поверхности пасечных участков вырубки практически полностью сформирована гетеротрофным дыханием, учитывая небольшую массу оставшихся на вырубке деревьев, растений подроста и живого напочвенного покрова, а вклад гетеротрофного дыхания в общий вынос $C-CO_2$ с поверхности почвы контрольного сосняка черничного составляет 58–62%. Для лесной зоны России оценки вклада автотрофного дыхания в общий поток диоксида углерода из почвы разнятся от 7 до 56% в зависимости от типа почвы (Yevdokimov et al., 2010; Goncharova et al., 2019). Полученные результаты вполне сопоставимы с полученными нами данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях Республики Коми с поверхности почвы среднетаежного сосняка черничного с эмиссией CO_2 в течение бесснежного периода выделяется 365–445 г $C\ m^{-2}$, что определяется погодными условиями. Отмечается значимая положительная взаимосвязь температуры и дыхания почвы, которая увеличивается в более прохладный и влажный год. Сплошная рубка оказывает существенное влияние на почвенное дыхание среднетаежного сосняка черничного, которое выражается как в снижении скорости потока CO_2 в отдельные месяцы (в 1.1–1.7 раза), так и в выносе углерода с поверхности почвы (в 1.5–1.7 раза) пасечных участков в течение бесснежного периода. Полагаем, что на севере бореальной зоны снижение дыхания почвы на пасечных участках после рубки сосняка вызвано прекращением дыхания корней деревьев и связанных с ними микробных комплексов. Вынос углерода с дыханием почвы с поверхности волоков характеризуется как сопоставимыми с контрольным сосняком черничным величинами в год с более интенсивным выпадением осадков, так и близкими с пасечными участками значениями в более теплый и сухой год. Следовательно, при определении бюджета углерода на рубках необходимо учитывать оценку дыхания почв в отдельных ее технологических элементах (пасечные участки и волока).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Республики Коми / Отв. ред. Е.В. Корниенко. М.: Феория, 2011. 448 с.

Государственный доклад “О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2019 г.” / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, ГБУ РК “Территориальный фонд информации Республики Коми”. Сыктывкар, 2020. 162 с.

Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 г. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.

Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 из почв южнотайжного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.

Лукина Н.В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник Российской академии наук. 2020. № 6. С. 528–532.

Осинов А.Ф. Эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы спелого сосняка черничного в средней тайге Республики Коми // Лесоведение. 2015. № 5. С. 356–366.

Стороженко В.Г. Участие дереворазрушающих грибов в процессах деструкции и формирования лесных сообществ // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. 34. № 1–2. С. 87–91.

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.

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.

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. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638>

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepashchenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. № 3. P. 325–336.

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. № 10. P. 2431–2449.

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. № 2. P. 154–164.

Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: A review // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. № 7. P. 780–790.

Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity // Environmental Development. 2018. V. 26. P. 68–75.

Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R. Assessment of the contribution of root and microbial respiration to the total efflux of CO_2 from peat soils and podzols in the North of Western Siberia by the method of component integration // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. № 2. P. 206–217.

Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation // Biogeochemistry. 2000. V. 48. № 1. P. 115–146.

https://rp5.ru/Погода_в_Сыктывкаре (дата обращения 29.10.2021)

Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J. Soil respiration in paulified forests of European Russia // J. Forestry Research. 2020. V. 31. № 5. P. 1939–1948.

Kudeyarov V.N., Kurganova I.N. Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates // Eurasian Soil Science. 2005. V. 38. № 9. P. 983–992.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov 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. V. 53. № 10. P. 1421–1436.

Kuz'yakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods // Soil Biology and Biochemistry. 2006. V. 38. № 3. P. 425–448.

Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the southern taiga // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. V. 265. P. 252–268.

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. № 1. P. 1–25.

<https://doi.org/10.3390/f12010107>

Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // Forest Ecology and Management. 2020. V. 466. P. 118127.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>

Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of clear-cutting on soil CO₂ emission // Biology Bulletin. 2017. V. 44. № 2. P. 218–223.

Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J., Luyssaert S. Europe's forest management did not mitigate climate warming // Science. 2016. V. 351. P. 597–600.

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.

Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // Science. 2011. V. 333. № 6045. P. 988–993

Pukkala T. Carbon forestry is surprising // Forest Ecosystems. 2018. V. 5. № 1. P. 11.

<https://doi.org/10.1186/s40663-018-0131-5>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2020. P. 409. <https://www.R-project.org/> (дата обращения 29.10.2021)

Schaphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A. Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // Forest Ecology and Management. 2016. V. 361. P. 432–444.

Schepaschenko, D., Moltchanova, E., Fedorov, S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. 12825.

Shabaga J.A., Basiliko N., Caspersen J.P., Jones T.A. Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting // Forest Ecology and Management. 2015. V. 348. P. 208–219.

Yevdokimov I.V., Larionova A.A., Lopes de Gerenyu V.O., Schmitt M., Bahn M. Experimental assessment of the contribution of plant root respiration to the emission of carbon dioxide from the soil // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. № 12. P. 1373–1381.

Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Grabovsky V.I., Shulyak P.P. The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests // Contemporary Problems of Ecology. 2013. V. 6. № 7. P. 714–726.

Clear Cuttings Affecting the Soil Respiration of the Middle Taiga Blueberry Pine Forest in 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*

Human economic activity has a significant impact on carbon cycles in forest ecosystems. At present time investigations of the influence clear-cuts has on forest soils respiration (*R_s*) are very scarce, which determines the relevance of this study. The aim of this work was to determine the influence of Scots pine forest clear-cuts on *R_s*, taking into account separate technological elements of clear-cut area. The positive relationship of *R_s* with soil temperature has been established, both in the undisturbed Scots pine forest and in the apiary plots and skidding tracks. The relationship strength between these parameters was higher in a year with less precipitation and higher air temperatures in pine forest. On the contrary, at the clear-cut area high correlation between *R_s* and soil temperature was observed in a year with more precipitation and lower air temperatures. The *R_s* intensity from apiary plot's soil surface was lower than on undisturbed pine forest both in separate months

and periods of investigation (summer, growing season, snowless period). The CO₂ emission from skidding tracks surface differed during the years of investigation. Relatively high *R_s* rates that were close to undisturbed pine forest were observed in the more humid 2019. But in the drier 2020 *R_s* of skidding tracks was lower in comparison to pine forest and similar to apiary. Consequently, due to a significant area (to 25%) occupied by skidding tracks when modern timber harvesters are used, it is necessary to take into account roles of separate technological elements during carbon budget estimation on clear-cut areas.

Keywords: soil respiration, clear-cuts, apiary, pine forest, middle taiga, skidding track.

Acknowledgements: This study was performed under the state budget theme assignment to the Institute of Biology, Komi Science Center, on the theme “Zonal regularities in the dynamics of the structure and productivity of primary and anthropogenically modified phytocenoses of forest and bog ecosystems in the European North-East of Russia” (number of registration 1021051101417-8-1.6.19).

REFERENCES

Atlas Respubliki Komi (Atlas of the Komi Republic), Moscow: Feoriya, 2011, 448 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, pp. 1549–1560.

Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G., Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux, *Global and Planetary Change*, 2015, Vol. 128, pp. 24–30.

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, Vol. 480, 118638.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638>

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G., Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, pp. 325–336.

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, Vol. 15, pp. 2431–2449.

Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y., On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀, *Global Change Biology*, 2006, Vol. 12, pp. 154–164.

Dymov A.A., The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: A review, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, pp. 780–790.

Evdokimov I.V., Larionova A.A., Lopes de Gerenyu V.O., Schmitt M., Bahn M., Experimental assessment of the contribution of plant root respiration to the emission of carbon dioxide from the soil, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 12, pp. 1373–1381.

Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V., Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity, *Environmental Development*, 2018, Vol. 26, pp. 68–75.

Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R., Assessment of the contribution of root and microbial respiration to the total efflux of CO₂ from peat soils and podzols in the North of Western Siberia by the method of component integration, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 206–217.

Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Komi v 2019 godu” (State report “On the state of the environment of the Komi Republic in 2019”), Syktyvkar, Ministerstvo prirodnikh resursov i okhrany okruzhayushchei sredy Respubliki Komi, GBU RK “Territorial’nyi fond informatsii Respubliki Komi”, 2020, 162 p.

Gosudarstvennyi doklad. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2019 g. (State report. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2019), Moscow: Minprirody Rossii; MGU imeni M.V. Lomonosova, 2020, 1000 p.

Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A., Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation, *Biogeochemistry*, 2000, Vol. 48, pp. 115–146.

https://rp5.ru/Pogoda_v_Syktyvkare (October 29, 2021)

Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J., Soil respiration in paludified forests of European Russia, *J. Forestry Research*, 2020, Vol. 31, pp. 1939–1948.

Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitsarskii M.L., Faktory prostranstvenno-vremennoi izmenchivosti potokov SO₂ iz pochv yuzhnootaevnogo el’nika na Valdae (Spatiotemporal controls of soil CO₂ fluxes in south taiga spruce forest in European Russia), *Lesovedenie*, 2014, No. 4, pp. 56–66.

Kudeyarov V.N., Kurganova I.N., Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates, *Eurasian Soil Science*, 2005, Vol. 38, pp. 983–992.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov 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, pp. 1421–1436.

Kuzyakov Y., Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods, *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, Vol. 38, pp. 425–448.

Lukina N.V., Global’nye vyzovy i lesnye ekosistemy (Global challenges and forest ecosystems), *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, No. 6, pp. 528–532.

Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A., Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the southern taiga, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 265, pp. 252–268.

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.

<https://doi.org/10.3390/f12010107>

Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J. Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L., Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis, *Forest Ecology and Management*, 2020, Vol. 466, 118127.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>

Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V., Effect of clear-cutting on soil CO₂ emission, *Biology Bulletin*, 2017, Vol. 44, pp. 218–223.

Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J., Luyssaert S., Europe's forest management did not mitigate climate warming, *Science*, 2016, Vol. 351, pp. 597–600.

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.

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, pp. 1419–1426.

Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D., A

large and persistent carbon sink in the world's forests, *Science*, 2011, Vol. 333, pp. 988–993

Pukkala T., Carbon forestry is surprising, *Forest Ecosystems*, 2018, Vol. 5, p. 11.

<https://doi.org/10.1186/s40663-018-0131-5>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2020. <https://www.R-project.org/> (October 29, 2021)

Schaphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A., Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 361, pp. 432–444.

Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, p. 12825.

Shabaga J.A., Basiliko N., Caspersen J.P., Jones T.A. Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 348, pp. 208–219.

Storozhenko V.G., Uchastie derevorazrushayushchikh gribov v protsessakh destruktivnoy formirovaniya lesnykh soobshchestv (Participation of wood-destroying fungi in the processes of destruction and formation of forest communities), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2016, No 1–2, pp. 87–91.

Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Grabovsky V.I., Shulyak P.P., The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, pp. 714–726.