







DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241119>

EDN: <https://elibrary.ru/oetvnf>

УДК 631.433.3

*Научная статья*

## **Дыхание почв вторичных сообществ на начальных стадиях восстановительной сукцессии (Южный Тиман, Республика Коми)**

П.А. Арзубов<sup>1, 2\*</sup> , Н.М. Горбач<sup>2</sup> , А.Ф. Осипов<sup>2</sup> ,  
А.А. Дымов<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, 167001, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, Октябрьский пр-кт, д. 55

<sup>2</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28

\*[arzubov-2000@mail.ru](mailto:arzubov-2000@mail.ru)

**Аннотация.** Для понимания влияния сплошных рубок на эмиссию углекислого газа с поверхности почв требуется получение эмпирических данных на различных территориях. В работе приводятся сведения по оценке динамики дыхания почвы с июня по октябрь 2024 г. на трех участках: фоновый ненарушенный ельник чернично-зеленомошный, 8-летняя вырубка и 18-летняя вырубка, расположенные в средней тайге Республики Коми. Исследуемые сообщества произрастают на типичных подзолистых почвах, формирующихся на пылеватых покровных суглинках. Выявлено возрастание в 1.4 раза скорости потока  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы 8-летней вырубке по сравнению с фоновым насаждением, тогда как с 18-летним послерубочным сообществом различий не отмечено. С поверхности почвы волоков (путей движения лесозаготовительной техники) эмиссия  $\text{CO}_2$  в 2.3 раза больше, чем в ельнике черничном, и в 1.1–1.4 раза выше, чем на пасечных участках с относительно ненарушенным почвенным покровом. Установлена достоверная положительная взаимосвязь между температурой почвы и выделением углекислого газа с поверхности почвы на глубине как 5 см ( $R^2 = 0.39\text{--}0.62$ ), так и 10 см ( $R^2 = 0.20\text{--}0.56$ ). Почва ельника черничного эмитирует за бесснежный период 635–698  $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}$ , пасечные участки – 651–728 и 630–645  $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}$  для 8- и 18-летней вырубке соответственно, волокна тех же возрастов – 1089–1240 и 1180–1341  $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}$ . На волокнах наблюдаются большие амплитуды значений, что, по всей видимости, связано с наличием послерубочных остатков, которые залегают на глубину 10 см.

**Ключевые слова:** бореальные леса, лесные сообщества, цикл углерода

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6) и при финансовой поддержке бюджетной темы ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 125021902454-1 «Почвы и почвенные

ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов».

**ORCID:**

П.А. Арзубов, <https://orcid.org/0009-0006-4941-3799>

Н.М. Горбач, <https://orcid.org/0000-0002-5099-6868>

А.Ф. Осипов, <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

А.А. Дымов, <https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>

**Для цитирования:** Арзубов, П.А. и др., 2026. Дыхание почв вторичных сообществ на начальных стадиях восстановительной сукцессии (Южный Тиман, Республика Коми). *Трансформация экосистем* 9 (1), 13–29. <https://doi.org/10.23859/estr-241119>

Поступила в редакцию: 19.11.2024

Принята к печати: 07.02.2025

Опубликована онлайн: 13.02.2026

---

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241119>

EDN: <https://elibrary.ru/oetvnf>

UDC 631.433.3

## Article

# Carbon dioxide emission from the soil surface of secondary deciduous phytocenoses (South Timan, Komi Republic)

P.A. Arzubov<sup>1, 2\*</sup> , N.M. Gorbach<sup>2</sup> , A.F. Osipov<sup>2</sup> ,

A.A. Dymov<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Oktaybrskiy Prospect St. 55., Syktyvkar, 167001 Russia

<sup>2</sup> Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya St. 28, Syktyvkar, 167982 Russian Federation

\*[arzubov-2000@mail.ru](mailto:arzubov-2000@mail.ru)

---

**Abstract.** To understand the impact of clear-cutting on carbon dioxide emissions from the soil surface, it is necessary to obtain empirical data in various areas. This paper provides data on the evaluation of soil respiration dynamics from June to October 2024 on three plots: the background blueberry-green moss spruce forest, an 8-year-old clear-cut area, and an 18-year-old clear-cut area, all located in the middle taiga of the Komi Republic. The studied communities grow on typical podzolic soils, on developing dusty cover loams. A 1.4-fold increase in the rate of CO<sub>2</sub> flux from the soil surface of the 8-year-old clear-cut area was found compared to the stand, while no differences were found with the 18-year-old post-cut community. From the soil surface of skid roads (paths for logging equipment movement), CO<sub>2</sub> emissions are 2.3 times higher than in the blueberry spruce forest, and 1.1–1.4 times higher than in felling areas with a relatively undisturbed soil cover. A reliable positive relationship was established between soil temperature and carbon dioxide emission from the soil surface, at a depth of 5 cm ( $R^2 = 0.39–0.62$ ) and 10

cm ( $R^2 = 0.20\text{--}0.56$ ). The soil of the blueberry spruce forest emits 635–698 gC m<sup>-2</sup> during the snowless period, felling areas 651–728 and 630–645 gC m<sup>-2</sup>, for B8 and B18-year old felling, respectively, the same age 1089–1240; 1180–1341 gC m<sup>-2</sup>. Large amplitudes of values – are observed on skid roads, which is most likely due to the presence of post-logging residues that lie at a depth of 10 cm.

**Keywords:** boreal forests, forest communities, the carbon cycle, soil respiration

**Funding.** The work was carried out within the frames of the most critical innovative project of national importance “Development of the terrestrial and remote sensing monitoring system of carbon pools and greenhouse gas flows on the territory of the Russian Federation, creation of the data recording system about the flows of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6) and the project No. 125021902454-1 “Soils and soil resources of the European North-East of Russia in the context of modern climate change, anthropogenic pressure and socio- economic challenges”.

**ORCID:**

P.A. Arzubov, <https://orcid.org/0009-0006-4941-3799>

N.M. Gorbach, <https://orcid.org/0000-0002-5099-6868>

A.F. Osipov, <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

A.A. Dymov, <https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>

**To cite this article:** Arzubov, P.A. et al., 2026. Carbon dioxide emission from the soil surface of secondary deciduous phytocenoses (South Timan, Komi Republic). *Ecosystem Transformation* 9 (1), 13–29. <https://doi.org/10.23859/estr-241119>

Received: 19.11.2024

Accepted: 07.02.2025

Published online: 13.02.2026

---

## Введение

На территории Российской Федерации сосредоточено около 20% от мировой площади лесов (FAO, 2010), большая часть которых относится к бореальным. Отмечено, что в этих экосистемах сконцентрированы значительные запасы углерода, из которых 30–60% содержится в почвах, что свидетельствует о важной роли последних в глобальном цикле углерода (Курганова и Кудеяров, 2012; Osipov et al., 2021). Интенсивность выделения углекислого газа с поверхности почвы является одним из важнейших показателей углеродного баланса в экосистемах (Schlesinger and Andrews, 2000). Дыхание почвы формируется за счет гетеротрофного (разложение органического вещества растительного опада (надземного и подземного), опада прошлых лет, накопленного в виде лесной подстилки, органического вещества почвы), а также автотрофного дыхания корней деревьев и кустарников (Кудеяров и др., 2007; Bond-Lamberty et al., 2024). Роль каждого из этих компонентов зависит от биотических и абиотических факторов (Курганова и др., 2012; Bond-Lamberty and Thomson, 2010). Накопление банка зональных моделей многолетней динамики почвенной эмиссии и изучение факторов ее пространственной дисперсии является стратегической задачей (Курганова и др., 2024). Это позволит выявить не только роль лесной экосистемы как стока или источника углерода атмосферы, но и более точно охарактеризовать цикл углерода на территории России (Кудеяров и др., 2007).

Существенное влияние на цикл углерода оказывает хозяйственная деятельность человека (Дымов, 2020), в частности, сплошные рубки леса, которые нарушают углеродный баланс (Замолдчиков и др., 2013). Сплошные рубки – широко распространенное лесохозяйственное мероприятие, когда на некоторой площади в один прием вырубается более 75% (72% углерода) от наличного запаса древесины древостоя (Кутявин и др., 2024; Дымов et al., 2024). Вырубка представляет собой гетерогенный ландшафт, образованный сочетанием слабонарушенных пасечных участков, на ко-

торых проводилась рубка, и волоков – путей движения лесозаготовительной техники, на которые с целью укрепления поверхности уложены порубочные остатки; площадь волоков достигает 15–25% от размера лесосеки (Дымов, 2020; Осипов, 2022). Исследования влияния сплошных рубок на потоки парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой чрезвычайно важны с точки зрения их влияния на биологический круговорот веществ и воздействия на локальные и региональные климатические условия (Молчанов и др., 2017; Korkiakoski et al., 2019; Pridacha et al., 2021).

По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации<sup>1</sup>, за последнее десятилетие объемы лесозаготовок изменялись от 193.26 до 194.59 млн. м<sup>3</sup>. В Республике Коми<sup>2</sup> за этот же временной период объем вырубленной древесины варьировал от 8.5 до 9.1 млн. м<sup>3</sup>. Анализируемые данные указывают на значительное воздействие промышленных рубок на динамику углеродного баланса, что требует проведения исследований, в том числе в процессе восстановительной сукцессии и с учетом пространственной неоднородности послерубочных сообществ.

Динамика дыхания почвы (SR) послерубочных сообществ на разных стадиях сукцессионного восстановления в сравнении с ненарушенными сообществами исследована явно недостаточно (Молчанов и др., 2017; Осипов, 2016, 2022, 2023; Придача и Семин, 2024; Korkiakoski et al., 2019). А.Ф. Осипов (2022, 2023) в своих работах на вырубках сосняков черничных показывает, что пиковые данные сезонного дыхания почв приходится на июль или август в зависимости от погодных условий в годы проведения исследования, однако интенсивность потоков различается в послерубочных сообществах и ненарушенных насаждениях. А.Г. Молчанов с соавторами (2017) отмечают, что на свежей вырубке южнотаежного ельника эмиссия углекислого газа с поверхности почв значительно выше, чем на точно таком же ненарушенном участке. М. Korkiakoski et al. (2019) проводили свою работу на осушенных торфянистых почвах в Финляндии и выявили снижение дыхания почвы спустя 1–3 года сплошной рубки. В.Б. Придача и Д.Е. Семин (2024) установили уменьшение вклада почвенной эмиссии в атмосферный поток CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке 10-летней давности по сравнению с ненарушенным древостоем сосняка черничного.

Оценка влияния сплошных рубок на потоки CO<sub>2</sub> между лесными экосистемами и атмосферой является важнейшей задачей для улучшения качества прогноза климата и разработки стратегий рационального землепользования (Aguilos et al., 2014; Pongratz et al., 2009). В связи с широким распространением сплошных рубок в последние десятилетия, насаждения, развивающиеся после них, занимают значительные площади и находятся на разных этапах восстановительной сукцессии. Поэтому оценка дыхания их почв позволит определить долговременный эффект сплошных рубок на углеродный цикл и снизить неопределенности при характеристике роли хозяйственной деятельности в этом процессе (Осипов, 2023).

Цель данной работы заключалась в определении влияния сплошных рубок на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности подзолистых почв в послерубочных сообществах чернично-зеленомошного типа на начальных этапах восстановительной сукцессии.

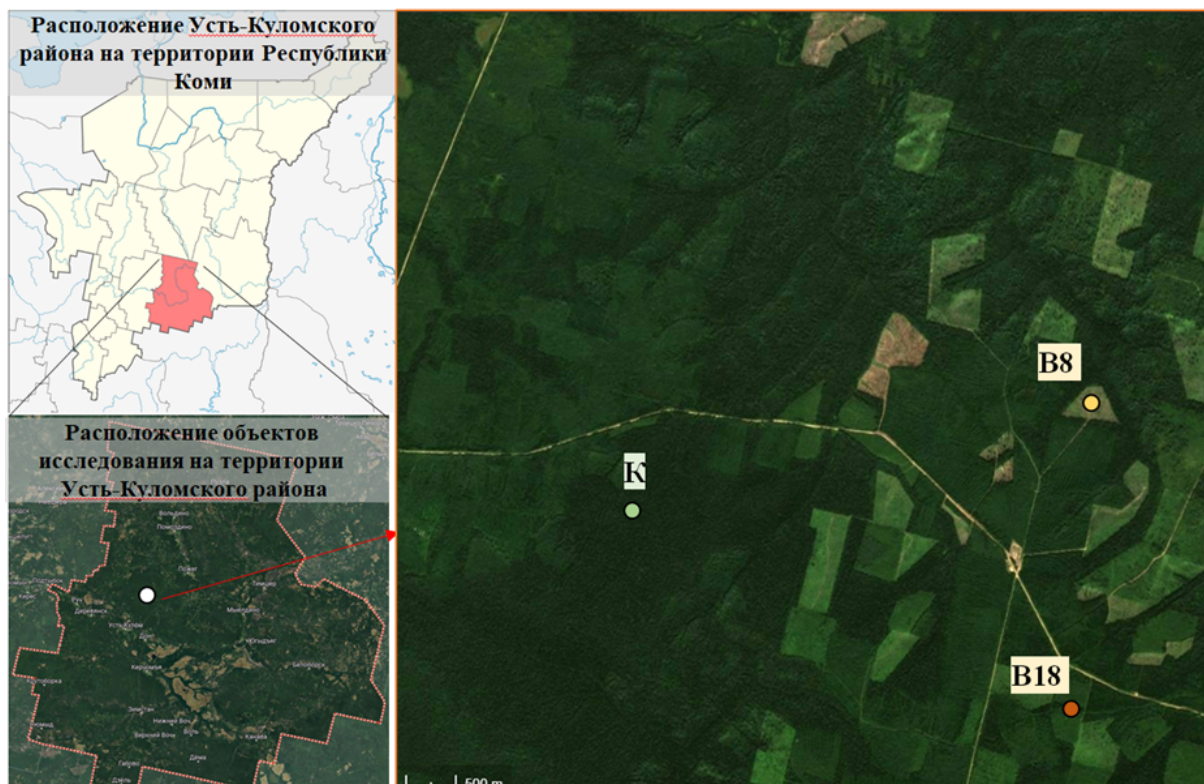
## Материалы и методы

Исследование выполнено в Усть-Куломском районе Республики Коми (Рис. 1), который характеризуется умеренно-континентальным умеренно-холодным климатом с коротким и прохладным летом, длинной и холодной зимой с устойчивым снежным покровом (Атлас Республики Коми..., 1997). Согласно данным за период с 1990 по 2019 г. средняя температура января составила –14.9 °С, июля +17.1 °С, годовая +0.9 °С; количество поступающих осадков достигало 615 мм, 60% которых поступало в теплый период с мая по октябрь. По данным метеостанции Усть-Кулом<sup>3</sup>, среднесуточная температура воздуха за период исследования (июнь–октябрь) достигала +12.7 °С, а количество осадков – 292 мм. При сравнении со среднесезонными данными для периода проведения работ выявлены более теплые погодные условия с сопоставимым поступлением осадков.

<sup>1</sup> Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 г., 2023. Минприроды России, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 687 с.

<sup>2</sup> Государственный доклад о состоянии окружающей среды в Республике Коми в 2023 г., 2024. Минприроды Республики Коми, Сыктывкар, Россия, 162 с.

<sup>3</sup> Погода в Усть-Куломе. Интернет-ресурст. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/23803.htm> (дата обращения: 20.12.2024).



**Рис. 1.** Расположение объектов исследования. К – контрольный участок, В8 – 8-ми летняя вырубка, В18 – 18-ти летняя вырубка. Схема подготовлена с использованием публичной кадастровой карты <https://egrp365.ru/map/>

Исследуемый район расположен в подзоне средней тайги на южной окраине Тиманской гряды. Южная часть Тиманской гряды состоит из серии так называемых парм – рассеченных высоких гряд и холмов, покрытых еловыми лесами, с абсолютными высотами 250–350 м.

Согласно почвенно-географическому районированию центральной и восточной частей европейской части СССР (Руднева и др., 1981), исследуемая территория расположена в Южно-Тиманском округе Вычегодской провинции среднетаежной подзоны типичных подзолистых почв. В условиях холмистого рельефа преобладающими почвами являются типичные подзолистые.

Оценку влияния сплошной рубки на дыхание почвы проводили в двух послерубочных сообществах, которые находятся на разных стадиях восстановительной сукцессии после сплошной рубки ельников черничных на типичных подзолистых почвах. На одном участке площадью 11 га заготовка древесины проводилась в 2016 г. (В8 – березняк чернично-папоротничково-зеленомошный), на другом площадью 17 га – в 2006 г. (В18 – березняк папоротничковый). В настоящее время здесь развиваются березовые молодняки I и II класса возраста. В качестве контрольного участка выбрано перестойное насаждение ельника черничного, формирующегося на типичной подзолистой почве (по международной классификации WRB<sup>4</sup> – Stagnic Albic Dystric Retisol Alomic Cutanic Loamic).

В древесном ярусе ельника черничного доминируют ель и пихта с небольшой примесью березы (*Betula pubescens*) и рябины (*Sorbus aucuparia*). Естественное лесовозобновление на вырубках происходит лиственными породами с преобладанием березы. В травяно-кустарничковом ярусе рассмотренных участков преобладали черника (*Vaccinium myrtillus*), щитовник картузианский (*Dryopteris carthusiana*) и голокучник обыкновенный (*Gymnocarpium dryopteris*), а в мохово-лишайниковом покрове доминировал гилокомий блестящий (*Hylocomium splendens*) и кукушкин лен (*Polytrichum commune*).

<sup>4</sup> World Reference Base. Интернет-ресурс. URL: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/> (дата обращения: 06.10.2025).

На каждом из трех участков заложено по 10 оснований из непрозрачных ПВХ труб диаметром 110 мм (Курганова и др., 2024). В послерубочных сообществах они установлены с учетом технологических элементов: по 5 оснований на пасеке и волоке на расстоянии 5–10 м друг от друга. Технологические элементы вырубке это пасечные участки с относительно слабо нарушенным почвенным покровом и волока, по которым передвигалась техника. Основания заглублялись на глубину 4 см, а их объем изменялся от 1.7 до 2.7 л (с учетом длины трубок). Измерения проводили в межкромовом пространстве, с удалением напочвенного покрова. Дыхание почвы (SR) измеряли один раз в две недели с июня по октябрь 2024 г., используя портативный регистратор концентрации CO<sub>2</sub>, CO, температуры и влажности воздуха VENTpro II (Россия). Установлено, что пасечные участки занимают 80% территории вырубке. Время экспозиции составило 7 минут, на основании выполнялось одно измерение. Всего было выполнено 300 определений скорости потока CO<sub>2</sub> (по 100 на каждом участке). Одновременно определяли температуру почвы (Ts) на глубинах 5 и 10 см с помощью электронного термометра CHECKTEMP 1 HANNA instruments (США).

Для оценки взаимосвязи между SR и температурой почвы использовали линейное уравнение

$$\ln SR = \alpha X + \beta,$$

где  $\ln SR$  – логарифмированные данные по дыханию почвы,  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты уравнения,  $X$  – температура почвы на глубине 5 или 10 см.

Логарифмирование исходных данных SR перед регрессионным анализом выполнено с целью достижения нормальности распределения остатков линейной модели и однородности дисперсий ошибок линейной модели (Осипов, 2022). В связи с тем, что в литературе приводятся корреляции SR с температурой на глубине 5 или 10 см (Бобкова и Загирова, 2014; Курганова и др., 2012; Осипов, 2022 и др.), нами выведены уравнения для взаимосвязи Ts и SR для обеих глубин с целью проверки величины выноса C–CO<sub>2</sub> на основе данных по динамике почвы для разных глубин.

Коэффициент  $\alpha$  из предыдущего уравнения использовали для расчета температурного коэффициента  $Q_{10}$ , показывающего изменение скорости SR при изменении температуры на 10 °C, по следующему уравнению (Davidson et al., 2006):

$$Q_{10} = e^{\alpha \times 10}$$

Расчет выноса углерода с эмиссией CO<sub>2</sub> с поверхности почвы (C–CO<sub>2</sub>) проводили по среднесуточным значениям температуры почвы, измеренным автономными регистраторами, при помощи уравнения

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

где  $SR_{period}$  – вынос C–CO<sub>2</sub> за временной интервал, гC·м<sup>-2</sup>,  $SR_{10}$  – величина SR при температуре 10 °C,  $Q_{10}$  – температурный коэффициент,  $T$  – среднесуточная температура почвы на глубине 5 или 10 см.

Была выполнена описательная статистика с расчетом средних значений, ошибок среднего и коэффициента вариации, а для парных сравнений использовался t-критерий Стьюдента в связи с небольшим количеством анализируемых пар. Оценку влияния сплошной рубки проводили по данным сравнения дыхания почвы ельника черничного и пасечных участков послерубочных сообществ. Также отдельно выполняли сравнение между технологическими элементами вырубке (пасечными участками и волоками). Регрессионный анализ применяли для характеристики взаимосвязи дыхания почвы от ее температуры. Все расчеты проводились с применением Microsoft Excel 2010 и среды программирования R при 95% уровне значимости.

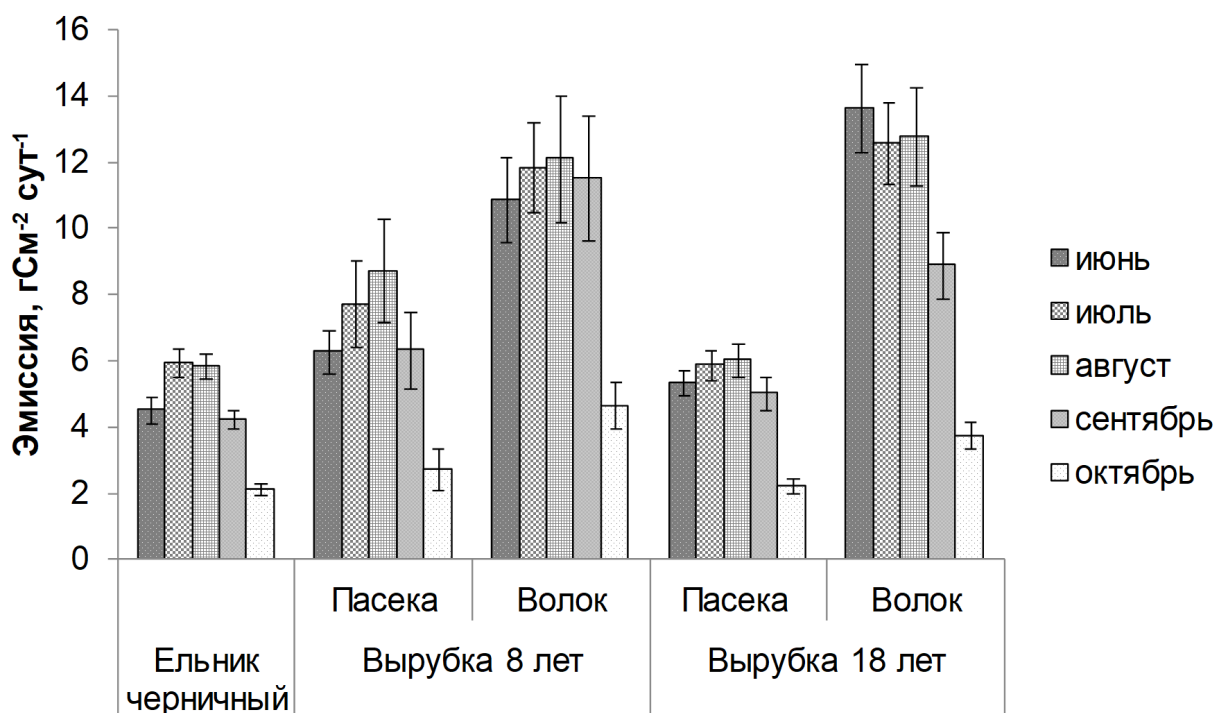


Рис. 2. Динамика дыхания почвы ельника черничного и технологических элементов вырубок в июне–октябре 2024 г. Планки погрешностей – ошибка среднего.

## Результаты и обсуждение

### Сезонная динамика дыхания почвы

Как показано на Рис. 2, максимальные показатели дыхания подзолистой почвы ельника черничного наблюдаются в июле и августе, а минимальные – в октябре, что соответствует имеющимся в литературе данным по кривой хода SR темновойных лесов в бореальном поясе (Машика, 2006; Ivanov et al., 2020; Kukumägi et al., 2017; Osipov et al., 2024).

На пасечных участках послерубочных сообществ достоверных различий среднемесячного дыхания почв в течение летних месяцев не отмечено ( $p_t > 0.05$ ), несмотря на более высокие значения в августе. В березовых молодняках наблюдается достаточно широкий размах полученных данных (коэффициенты вариации 22–74%), связанный с неоднородностью пространственного размещения подроста березы, а также пней спиленных деревьев.

Следует отметить, что достоверного влияния сплошной рубки на SR не установлено во все месяцы ( $p_t > 0.05$ ), за исключением июня, когда интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  была в 1.4 раза выше ( $p_t = 0.036$ ) на пасечных участках 8-летней вырубки. Однако при анализе средней скорости SR за весь период наблюдений в целом выявлена более высокая (в 1.3–1.5 раза,  $p_t < 0.05$ ) интенсивность почвенного дыхания в сообществе спустя 8 лет после сплошной рубки, что, вероятно, связано с активным разложением подземных органов растений, отмерших в результате рубки, и дыханием корней возобновляющихся растений березы. Средняя скорость потока  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы ненарушенного ельника и 18-летней вырубки с июня по октябрь была сопоставима ( $p_t = 0.190$ ).

При анализе выделения  $\text{CO}_2$  с поверхности технологических элементов вырубок установлена более высокая (в 1.4–2.1 раза,  $p_t < 0.05$ ) SR на волоках по сравнению с пасечными участками, при этом скорость потока также характеризуется достаточно высокой (31–52%) вариацией. Более интенсивная эмиссия на путях движения лесозаготовительной техники связана не только с активным возобновлением мелколиственной древесной растительности, деструкцией опада и дыханием корней, которые участвуют в формировании  $\text{CO}_2$ , но и наличием разлагающихся порубочных остатков, сложенных на волоках для укрепления почвы.

В течение периода наблюдений на волоках 8-летней вырубке сезонная динамика менее выражена, что проявляется в сопоставимых величинах среднемесячной эмиссии с июня по сентябрь ( $p_t > 0.05$ ), тогда как на 18-летней вырубке после максимальных значений в течение лета происходит снижение в сентябре.

Полученные закономерности SR с июня по октябрь совпадают с опубликованными результатами. Так, по данным А.Ф. Осипов с соавт. (2024), высокие значения потока  $\text{CO}_2$  в бесснежный период наблюдались также в июле–августе 2022 г. и достигли  $3.90\text{--}5.62 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в сут. и  $2.3\text{--}2.5 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в сут. на контрольном и вырубленном участках соответственно, что соответствует полученной нами сезонной динамике. В работе А.Г. Молчанова с соавт. (2017) наблюдается точно такая же закономерность: максимальная эмиссия  $\text{CO}_2$  происходит в июле–августе, снижается в октябре от  $4.67$  до  $1.81 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в сут. на фоновом участке ельника и от  $8.29$  до  $1.76 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в сут. на пасечных участках вырубки ельника разнотравного, а на волоках скорость потока выше на 30%, чем на пасеках. В работе В.В. Мамкина с соавт. (2019) показаны эмиссия  $\text{CO}_2$  в разные годы наблюдения с поверхности почвы после сплошной рубки в южной тайге; показатель изменялся от 4 до  $16 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в сут. Среднесуточная динамика потока  $\text{CO}_2$  июля–августа в сосняке черничном в Карелии составила  $6.12 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в сут, что в 1.3 раза выше, чем на его вырубке (Придача и Семин, 2024). Авторы отмечают, что температура почвы и воздуха, освещенность оказывают существенное влияние на дыхание почвы.

### **Взаимосвязь дыхания и температуры почвы**

Температура почвы является одним из главных абиотических факторов, влияющих на эмиссию углекислого газа (Bond-Lamberty and Thomson, 2010). Регрессионный анализ показал значимую ( $p < 0.001$ ) положительную зависимость дыхания почвы от ее температуры как с поверхности почвы ельника черничного, так и отдельных технологических элементов вырубки ельника во все периоды исследований на обеих глубинах (Табл. 1). Однако степень корреляции в исследуемых сообществах различается. Так, в ельнике черничном более высокая связь отмечена для глубины 5 см ( $R^2 = 0.54$  vs

**Табл. 1.** Характеристика уравнений ( $\ln SR = \alpha X + \beta$ ) зависимости эмиссии  $\text{CO}_2$  от температуры почвы ( $T_s$ ).  $Ts5$  – взаимосвязь с температурой почвы на глубине 5 см;  $Ts10$  – взаимосвязь с температурой почвы на глубине 10 см; в скобках указаны ошибки коэффициентов.

Сообщество	Фактор	Коэффициент		$R^2$	p-value	$Q_{10}$	$SR_{10^1}$ , $\text{г}\cdot\text{С}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$	
		$\alpha$	$\beta$					
Ельник черничный	$Ts5$	0.143(0.013)	-0.097(0.142)	0.54	< 0.001	4.18	3.79	
	$Ts10$	0.162(0.018)	-0.187(0.180)	0.45	< 0.001	5.03	4.17	
Вырубка 8 лет	Пасека	$Ts5$	0.148(0.026)	-0.111(0.322)	0.39	< 0.001	4.37	3.91
		$Ts10$	0.133(0.039)	0.255(0.409)	0.20	< 0.001	3.80	4.90
	Волок	$Ts5$	0.112(0.020)	0.701(0.267)	0.40	< 0.001	3.06	6.18
		$Ts10$	0.161(0.028)	0.324(0.331)	0.40	< 0.001	4.99	6.90
Вырубка 18 лет	Пасека	$Ts5$	0.122(0.014)	0.132(0.161)	0.62	< 0.001	3.39	3.86
		$Ts10$	0.146(0.019)	-0.024(0.208)	0.54	< 0.001	4.31	4.20
	Волок	$Ts5$	0.125(0.014)	0.693(0.180)	0.61	< 0.001	3.49	6.98
		$Ts10$	0.177(0.022)	0.292(0.250)	0.56	< 0.001	5.84	7.82

$R^2 = 0.45$ ), при сопоставимых значениях коэффициентов уравнений зависимости. На пасеках 8-летней вырубке отмечено снижение коэффициента детерминации для взаимосвязи SR и  $Ts_{10}$  от 0.39 до 0.20 на разных глубинах. Взаимосвязи дыхания волоков сходны на анализируемых глубинах, однако большие значения коэффициентов регрессионного уравнения наблюдались для глубины 10 см.

Реакция дыхания пасечных участков и волоков 18-летней вырубке аналогична ненарушенному ельнику, что выражается в примерно равных параметрах уравнений, но со средней зависимостью на глубине 5 см и низкой с  $Ts$  на глубине 10 см ( $R^2 = 0.37$  vs  $R^2 = 0.22$  для пасек и  $R^2 = 0.41$  vs  $R^2 = 0.28$  для волоков). Средние корреляции с глубиной 5 см, вероятно, обусловлены тем, что в этом слое происходит разложение листового опада, являющегося основной его фракцией в послерубочных сообществах, где в древесном ярусе доминируют мелколиственные породы.

При сравнении взаимосвязи SR с  $Ts$  на разных глубинах установлено, что для глубины 10 см температурный коэффициент выше (в 1.2–1.7 раза) в большинстве случаев, за исключением пасечных участков В8 (Табл. 1). Вероятно, это связано с вертикальным распределением корней древесных растений, большая часть которых распространена в нижних слоях лесной подстилки и верхних минеральных горизонтах почвенного профиля. Известно, что гетеротрофное дыхание менее чувствительно к изменению температуры почвы по сравнению с автотрофным (Yang et al., 2022), вследствие чего мы наблюдаем более высокие значения  $Q_{10}$ , рассчитанные для глубины 10 см. В целом в результате сплошной рубки отмечается снижение температурного отклика SR, что связано со снижением массы и интенсивности дыхания корней по сравнению с ненарушенным ельником.

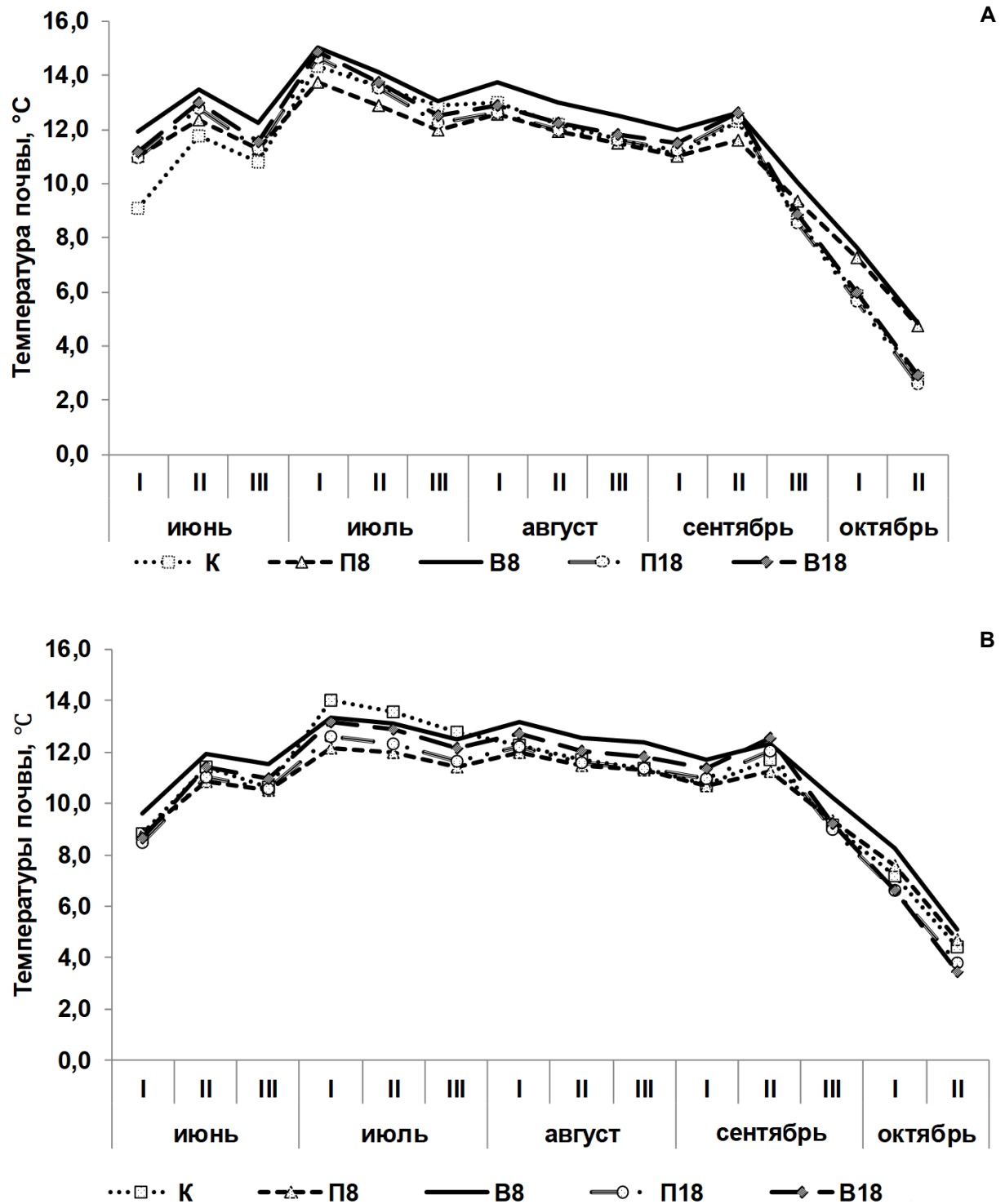
В работе А.Ф. Осипова (2022) приведены близкие к рассчитанным нами значения  $Q_{10}$ , которые варьировали в зависимости от условий увлажнения в течение теплого периода. Так, на ненарушенном участке сосняка черничного в средней тайге Республики Коми в разные годы наблюдений  $Q_{10}$  достигал 7.95–5.62, на пасечных участках 3–5-летней вырубке сосняка черничного 4.28–3.29, на волоках – 5.70–2.33. Коэффициент  $Q_{10}$  в разные годы наблюдений составлял 1.78–4.88 в среднетаежном хвойно-лиственном насаждении и 1.50–1.98 – на его вырубке (Осипов и др., 2024), в ельнике черничном от 2 до 6.9 (Машика, 2006). Низкие значения температурного коэффициента (1.60–2.12) в разные годы показаны и в работе В.В. Мамкина с соавт. (2019). Для 10-летней вырубке сосняка черничного  $Q_{10}$  был равен 2.68–3.73 на пасечных участках и 2.04–3.87 на волоках в зависимости от погодных условий в годы исследования (Осипов, 2023). Влияние температуры воздуха и режима выпадения осадков в течение теплого периода на значение температурного отклика дыхания почвы на основе многолетних наблюдений выявили I. Kurganova с соавт. (2022). Меньшие величины  $Q_{10}$  в насаждениях, произрастающих в подзоне южной тайги и смешанных лесов, во многом связаны с большей температурной чувствительностью дыхания почв экосистем высоких широт в условиях недостатка тепла (Kudeyarov and Kurganova, 2005).

### **Динамика температуры почвы**

Анализ полученных результатов по динамике температуры почвы с июня по октябрь показал, что на ненарушенном пасечном участке температура почвы в начале лета и сентябре была сходна, при этом в октябре наблюдалось ее снижение. Максимальная температура отмечена в I декаде июля. Также выявлены локальные пики во II декаде июня, I декаде августа и II декаде сентября, связанные с погодными условиями. В ельнике черничном в начале наблюдений (глубина 5 см) почва была прогрета до 9.1 °С, максимальные температуры пришлось на первую декаду июля и составили 14.4 °С, к концу октября они снизились до 2.8 °С. На пасечных участках В8 почва прогревалась от 11 °С в июне до 13.7 °С в конце I декады июля со снижением до 4.8 °С в середине октября. На волоках показатели тех же периодов были сходны с пасечными участками и составили 11.9, 15 и 4.8 °С соответственно. В I декаде июня  $Ts$  на пасечных участках В18 была равна 10.9 °С с последующим нагревом до 14.6 °С в начале июля и понижением до 2.6 °С в октябре; на волоке  $Ts$  в эти временные периоды достигала 11.2, 14.8 и 3 °С соответственно (Рис. 3). Таким образом, на вырубках наблюдался более благоприятный температурный режим по сравнению с ненарушенным ельником черничным.

Сходные данные о влиянии сплошных рубок на температурный режим почв приведены для насаждений, формирующихся после сплошной рубки ельников, сосняков и хвойно-лиственных насаждений в Республике Коми (Дымов и Старцев, 2016; Осипов, 2022; Osipov et al., 2024), а также южнотаежного ельника (Мамкин и др., 2019) и сосняка (Зенкова и Штабровская, 2022).

Динамика температуры почвы на глубине 5 см отличалась большей амплитудой показателей, чем на глубине 10 см. Наиболее высокие значения выявлены в первой декаде июля и достигали



**Рис. 3.** Динамика изменения температуры почвы ельника черничного и вырубков ельников черничных разных лет в июне–октябре 2024 г. на глубине 5 см (**A**) и 10 см (**B**). К – ельник черничный; П8 – 8-ми летняя пасека; В8 – 8-ми летний волок; П18 – 18-ти летняя пасека; В18 – 18-ти летний волок; I, II, III – декады.

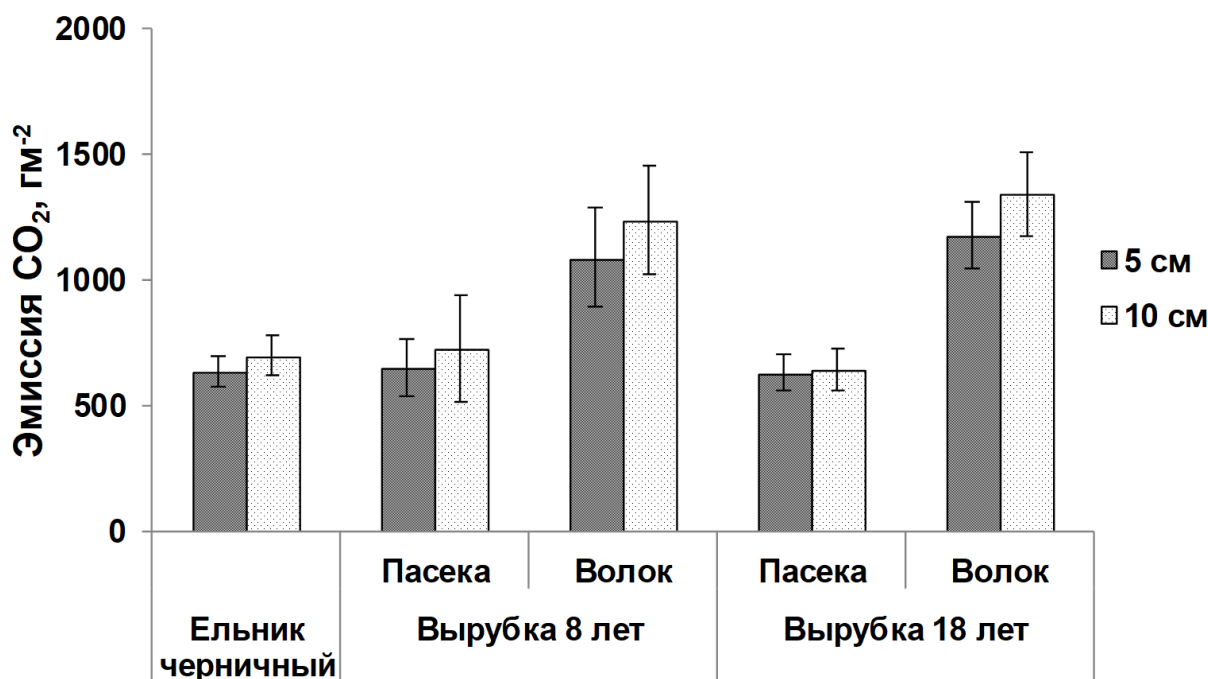


Рис. 4. Вынос углерода С–СО<sub>2</sub> за период наблюдения в ельнике черничном и на вырубках ельников черничных на разных глубинах почвы в июне–октябре 2024 г. Планки погрешностей – ошибка среднего.

13.7–15 °С. Отметим, что на вырубках 8-летней давности на волоках температура почвы всегда выше, чем на остальных участках почв: это связано с тем, что почва прогревается быстрее из-за более разреженного древесного полога (Осипов, 2022). Также можно заметить, что в течение лета, а также теплого сентября на глубине 5 см почвы теплее, чем на глубине 10 см. В октябре наблюдается обратная тенденция: на глубине 10 см температура в среднем на 1 °С выше.

### Вынос углерода с дыханием почвы

В течение июня–октября 2024 г. с поверхности почвы контрольного ельника черничного выделяется 635–698 гС·м<sup>-2</sup> С–СО<sub>2</sub> в зависимости от глубины (Рис. 4). На отметке 10 м наблюдается более высокое значение, однако достоверных различий обнаружено не было. Большая величина для более глубокого слоя обусловлена высоким значением  $Q_{10}$ , (показывающего изменение скорости SR при изменении температуры на 10 °С).

Сплошная рубка не влияет на поступление СО<sub>2</sub> с поверхности пасечных участков вырубок: с участков В8 эмитируется 651–728 гС·м<sup>-2</sup>, В18 – 630–645 гС·м<sup>-2</sup>. Однако волока отличаются более активным выносом С–СО<sub>2</sub>. Так, волока В8 в течение июня–октября 2024 г. выделили в атмосферу 1089–1240 гС·м<sup>-2</sup>, В18 – 1190–1341 гС·м<sup>-2</sup>, что в 1.67–2.08 раз больше, чем пасечные участки. Более интенсивное поступление углерода с дыханием почвы волока обусловлено наличием порубочных остатков, сложенных для укрепления почвы. Их разложение в сочетании с дыханием корней активно растущих мелколиственных пород и наличием легкоразлагаемого листового опада влияет на увеличение эмиссии С–СО<sub>2</sub>.

С помощью данных по дыханию почвы отдельных технологических элементов была оценена эмиссия С–СО<sub>2</sub> с поверхности всей лесосеки. Из почвы 8-ми летней вырубki (S = 11 га) с июня по октябрь в атмосферу поступило 336 т СО<sub>2</sub>/га (8.3 тС/га), вклад волоков составил 30%, а с 18-ти летней (S = 17 га) – 495.9 т СО<sub>2</sub>/га (7.8 тС/га), из которых 34% пришлось на волока. С ельника черничного вынос углерода составил 6.4–7.0 тС/га, что в 1.2 раза меньше 8-ми летней и в 1.1 раза меньше 18-летней рубки.

Полученные величины выноса С–СО<sub>2</sub> с поверхности ельников имели более высокие значения по сравнению с результатами, представленными А.В. Машикой (2006) для ельника черничного и М.А. Кузнецовым (2014) для ельника чернично-сфагнового. Близкие сведения отмечены в ряде работ. Так, из почв заболоченных южнотаежных ельников в летние месяцы в атмосферу поступа-

ет 373–681 гС·м<sup>-2</sup> (Ivanov et al., 2020), спелого ельника Эстонии – 522–804 гС·м<sup>-2</sup> (Kukumagi et al., 2017). С поверхности почвы хвойно-лиственного насаждения в течение бесснежного периода в разные годы выделяется 400–746 гС·м<sup>-2</sup>, а его вырубки – 337–442 гС·м<sup>-2</sup> (Osipov et al., 2024). Годовой поток С–СО<sub>2</sub> из заболоченной, глеевой, органо-минеральной почвы вырубки ельника в Англии варьировал в пределах 243–322 гС·м<sup>-2</sup> (Yamulki et al., 2021). Из почв вырубок сосняков черничных, находящихся на разных стадиях развития, с мая по октябрь эмитирует 210–379 гС·м<sup>-2</sup>, их волоков – 296–573 гС·м<sup>-2</sup> (Осипов, 2022, 2023), вырубки сосняка в Финляндии – 267–286 гС·м<sup>-2</sup> (Korkiakoski et al., 2019). Таким образом, анализ литературы позволяет сделать вывод, что дыхание ненарушенных насаждений и их вырубок варьирует в широких пределах и во многом зависит от условий произрастания, стадии развития после нарушения, погодных условий в годы исследований.

## Заключение

Дыхание почв сообществ, формирующихся после сплошной рубки ельника черничного и находящихся на разных этапах восстановительной сукцессии, сопоставимо с данными, полученными в ненарушенном ельнике на типичной подзолистой почве, что свидетельствует об отсутствии достоверного влияния сплошной рубки спустя 8 и 18 лет, тогда как на начальной стадии отмечено возрастание в 1.4 раза скорости потока СО<sub>2</sub> с поверхности почвы. Сочетание разложения порубочных остатков, текущего листового опада и дыхания корней активно возобновляющихся древесных растений послужило причиной интенсивного дыхания почв волоков, которое было выше в 1.4–2.1 раза по сравнению с ненарушенными участками вырубок. В течение периода наблюдений на волоках 8-летней вырубки сезонная динамика не отмечена, что выражается в сопоставимых величинах среднемесячной эмиссии с июня по сентябрь. Наибольшая эмиссия СО<sub>2</sub> происходит в июле–августе и уменьшается к минимуму в октябре на всех исследуемых сообществах. Установлена положительная взаимосвязь SR с температурой почвы. При анализе корреляции для глубин 5 и 10 см отмечена более высокая связь с большей глубиной, где также выявлен более высокий температурный отклик (коэффициент Q<sub>10</sub>) эмиссии СО<sub>2</sub>. С июня по октябрь из почвы ельника черничного выделилось 635–698 гС·м<sup>-2</sup>, пасечных участков 8-летней вырубки – 651–728 гС·м<sup>-2</sup>, пасечных участков 18-летней вырубки – 630–645 гС·м<sup>-2</sup>. Волока характеризуются более интенсивным (1.7–2.1 раза) потоком углерода по сравнению с пасечными участками. Рассчитано, что с поверхности всей лесосеки В8 (11 га) и В18 (17 га) в атмосферу поступает 336–495.9 т СО<sub>2</sub> с долей волоков 30–34%.

## Список литературы

- Атлас Республики Коми по климату и гидрологии, 1997. Таскаев, А.И. (ред). Наука, Москва, Россия, 116 с.
- Бобкова, К.С., Загирова, С.В., 2014. Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми. ИБ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, 202 с.
- Дымов, А.А., 2020. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. Издательство ГЕОС, Москва, Россия, 336 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>
- Дымов, А.А., Старцев, В.В., 2016. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошных рубок. *Почвоведение* 5, 599–608. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050038>
- Замолодчиков, Д.Г., Грабовский, В.И., Шуляк, П.П., Честных, О.В., 2013. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России *Лесоведение* 5, 36–49.
- Зенкова, И.В., Штабровская, И.М., 2022. Влияние гидротермических условий на подстилочных беспозвоночных вырубок и гарей Хибин. *Лесоведение* 4, 364–380. <https://doi.org/10.31857/S0024114822030123>

- Кудеяров, В.Н., Заварзин, Г.А., Благодатский, С.А., Борисов, А.В., Воронин, П.Ю. и др., 2007. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. Наука, Москва, Россия, 315 с.
- Курганова, И.Н., Кудеяров, В.Н., 2012. Экосистемы России и глобальный бюджет углерода. *Наука в России* 5, 25–32.
- Курганова, И.Н., Лопес де Гереню, В.О., Галлардо Ланчо, Х.Ф., Ем, К.Т., 2012. Оценка скорости минерализации органического вещества почв в лесных экосистемах внутриматерикового умеренного, средиземноморского и тропического муссонного климата. *Почвоведение* 1, 82–94.
- Курганова, И.Н., Гончарова, О.Ю., Замолотчиков, Д.Г., Карелин, Д.В., Кузнецов, М.А. и др., 2024. Определение эмиссии CO<sub>2</sub> из почв камерным методом в различных типах экосистем. ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия, 28 с.
- Кутявин, И.Н., Манов, А.В., Старцев, В.В., Дымов, А.А., 2024. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 123–132. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-123-132>
- Мамкин, В.В., Авилов, В.К., Иванов, Д.Г., Ольчев, А.В., Курбатова, Ю.А., 2019. Потоки CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке в южной тайге европейской территории России. *Сибирский экологический журнал* 5, 598–611. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190509>
- Машика, А.В., 2006. Эмиссия диоксида углерода с поверхности подзолистой почвы. *Почвоведение* 12, 1457–1463.
- Молчанов, А.Г., Курбатова, Ю.А., Ольчев, А.В., 2017. Влияние сплошной рубки леса на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы. *Известия РАН. Серия биологическая* 2, 190–196. <https://doi.org/10.7868/S0002332916060126>
- Осипов, А.Ф., 2016. Выделение углерода с поверхности почвы спелого сосняка черничного средней тайги Республики Коми. *Почвоведение* 8, 982–990. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080098>
- Осипов, А.Ф., 2022. Влияние сплошной рубки на дыхание почвы среднетаежного сосняка черничного Республики Коми. *Лесоведение* 4, 395–406. <https://doi.org/10.31857/S0024114822030111>
- Осипов, А.Ф., 2023. Эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности почвы на 10-летней вырубке среднетаежного сосняка черничного на Европейском севере-востоке России. *Почвоведение* 9, 1049–1058. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600087>
- Придача, В.Б., Семин, Д.Е., 2024. Влияние сплошной рубки на составляющие углеродного баланса сосняка черничного Южной Карелии. *Трансформация экосистем* 7 (3), 64–83. <https://doi.org/10.23859/estr-230505>
- Руднева, Е.Н., Забоева, И.В., Урусевская, И.С., 1981. Почвенно-географическое районирование центральной и восточной частей европейской территории СССР. Подзолистые почвы центральной и восточной частей европейской территории СССР. Наука, Ленинград, СССР, 200 с.
- Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N., Ueyama, M., Fukuzawa, K. et al., 2014. Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 197, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.002>
- Bond-Lamberty, B., Thomson, A.M., 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 464, 579–582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>

- Bond-Lamberty, B., Ballantyne, A., Berryman, E., Fluet-Chouinard, E., Jian, J. et al., 2024. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **129** (2), e2023JG007637. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
- Davidson, E.A., Janssens, I.A., Luo, Y., 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond  $Q_{10}$ . *Global Change Biology* **12**, 154–164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>
- Dymov, A.A., Osipov, A.F., Startsev, V.V., Gorbach, N.M., Severgina, D.A. et al., 2024. Carbon pools and fluxes in mixed coniferous–small-leaved forests and clearcut areas. *Eurasian Soil Science* **57** (11), 1867–1878. <https://doi.org/10.1134/S1064229324601847>
- FAO, 2010. Global forest resources assessment. FAO, Rome, 122 p.
- Ivanov, D., Tatarinov, F., Kurbatova, J., 2020. Soil respiration in paludified forests of European Russia. *Journal of Forest Research* **31**, 1939–1948. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00963-4>
- Korkiakoski, M., Tuovinen, J-P., Penttilä, T., Sarkkola, S., Ojanen, P. et al., 2019. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting. *Biogeosciences* **16**, 3703–3723. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
- Kudeyarov, V.N., Kurganova, I.N., 2005. Respiration of russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates. *Eurasian Soil Science* **38**, 983–992.
- Kukumägi, M., Ostonen, I., Uri, V., Helmisaari, H.-S., Kanal, A., Kull, O., Lõhmus, K., 2017. Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce stands of different ages. *Plant and Soil* **414**, 265–280. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3133-5>
- Kurganova, I., Lopes de Gerenyu, V., Khoroshaev, D., Myakshina, T., Sapronov, D., Zhmurin, V., 2022. Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: the synthesis of a 24-year continuous observation. *Forest* **13**, 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>
- Osipov, A.F., Bobkova, K.S., Dymov, A.A., 2021. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional* **27**, e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>
- Osipov, A.F., Startsev, V.V., Dymov, A.A., 2024. Influence of clear felling on CO<sub>2</sub> emission from surface of podzolic soil of coniferous–deciduous forest (middle taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science* **57** (5), 806–813. <https://doi.org/10.1134/S1064229323603700>
- Pongratz, J., Reick, C.H., Raddatz, T., Claussen, M., 2009. Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles* **23** (4), GB4001. <https://doi.org/10.1029/2009GB003488>
- Pridacha, V.B., Sazonova, T.A., Novichonok, E.V., Semin, D.E., Tkachenko, Y.N. et al., 2021. Clear-cutting impacts nutrient, carbon and water exchange parameters in woody plants in an east Fennoscandia pine forest. *Plant and Soil* **476**, 317–336. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05058-w>
- Schlesinger, W.H., Andrews, J.A., 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* **48**, 7–20. <https://doi.org/10.1023/A:1006247623877>
- Yang, L., Qin, J., Geng, Y., Zhang, C., Pan, J., Niu, S., Wang, J., 2022. Long-term effects of forest thinning on soil respiration and its components in a pine plantation. *Forest Ecology and Management* **513**, 120189. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120189>

Yamulki, S., Forster, J., Xenakis, G., Ash, A., Brunt, J., Perks, M., Morison, J.I.L., 2021. Effects of clear-fell harvesting on soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O fluxes in an upland Sitka spruce stand in England. *Biogeochemistry* **18**, 4227–4241. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4227-2021>

## References

Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N., Ueyama, M., Fukuzawa, K. et al., 2014. Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **197**, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.002>

Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii [Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology], 1997. Taskaev, A.I. (ed.). Nauka, Moscow, Russia, 116 p. (In Russian).

Bobkova, K.S., Zagirova, S.V., 2014. Uglerod v lesnykh i bolotnykh ekosistemakh osobo okhranyayemykh prirodnnykh territoriy Respubliki Komi [Carbon in forest and wetland ecosystems of specially protected natural areas of the Komi Republic]. IB FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia, 202 p. (In Russian).

Bond-Lamberty, B., Thomson, A.M., 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* **464**, 579–582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>

Bond-Lamberty, B., Ballantyne, A., Berryman, E., Fluet-Chouinard, E., Jian, J. et al., 2024. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **129** (2), e2023JG007637. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>

Davidson, E.A., Janssens, I.A., Luo, Y., 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub>. *Global Change Biology* **12**, 154–164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>

Dymov, A.A., 2020. Suktsessii pochv v boreal'nykh lesakh Respubliki Komi [Soil successions at boreal forests of the Komi Republic]. GEOS, Moscow, Russia, 336 p. (In Russian). <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>

Dymov, A.A., Startsev, V.V., 2016. Changes in the temperature regime of podzolic soils in the course of natural forest restoration after clearcutting. *Eurasian Soil Science* **49** (5), 551–559. <https://doi.org/10.1134/S1064229316050021>

Dymov, A.A., Osipov, A.F., Startsev, V.V., Gorbach, N.M., Severgina, D.A. et al., 2024. Carbon pools and fluxes in mixed coniferous–small-leaved forests and clearcut areas. *Eurasian Soil Science* **57** (11), 1867–1878. <https://doi.org/10.1134/S1064229324601847>

FAO, 2010. Global forest resources assessment. FAO, Rome, 122 p.

Ivanov, D., Tatarinov, F., Kurbatova, J., 2020. Soil respiration in paludified forests of European Russia. *Journal of Forest Research* **31**, 1939–1948. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00963-4>

Korkiakoski, M., Tuovinen, J-P., Penttilä, T., Sarkkola, S., Ojanen, P. et al., 2019. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting. *Biogeosciences* **16**, 3703–3723. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>

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

Kudeyarov, V.N., Zavarzin, G.A., Blagodatskiy, S.A., Borisov, A.V., Voronin, P.Yu., et al., 2007. Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii [Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems of Russia]. Nauka, Moscow, Russia, 315 p. (In Russian).

- Kukumägi, M., Ostonen, I., Uri, V., Helmisaari, H.-S., Kanal, A., Kull, O., Lõhmus, K., 2017. Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce stands of different ages. *Plant and Soil* **414**, 265–280. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3133-5>
- Kurganova, I.N., Kudeayrov, V.N., 2012. Ekosistemy Rossii i global'nyy byudzhnet ugleroda [Russian ecosystems and the global carbon budget]. *Nauka v Rossii [Science in Russia]* **5**, 25–32. (In Russian).
- Kurganova, I.N., Lopez de Guereñu, V.O.L., Gallardo Lancho, J.F.G., Em, K.T., 2012. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates. *Eurasian Soil Science* **45** (1), 68–79.
- Kurganova, I., Lopes de Gerenyu, V., Khoroshaev, D., Myakshina, T., Sapronov, D., Zhmurin, V., 2022. Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: the synthesis of a 24-year continuous observation. *Forest* **13**, 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>
- Kurganova, I.N., Goncharova, O.Yu., Zamolodchikov, D.G., Karelin, D.V., Kuznetsov, M.A. et al., 2024. Opredeleniye ehmissii CO<sub>2</sub> iz pochv kamernym metodom v razlichnykh tipakh ekosistem [Determination of CO<sub>2</sub> emissions from soils using the chamber method in different types of ecosystems]. Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow, Russia, 28 p. (In Russian).
- Kutyavin, I.N., Manov, A.V., Startsev, V.V., Dymov, A.A., 2024. Vliyaniye lesozagotovitel'noy tekhniki na dinamiku yestestvennogo vozobnovleniya lesa posle rubki khvoyno-listvennogo nasazhdeniya sredney taygi [The influence of logging equipment on the dynamics of natural forest regeneration after felling of coniferous-deciduous stands of the middle taiga]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **3**, 123–132. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-123-132>
- Mamkin, V.V., Avilov, V.K., Ivanov, D.G., Olchev, A.V., Kurbatova, Yu.A., 2019. Potoki CO<sub>2</sub> na sploshnoy vyрубke v yuzhnoy tayge yevropeyskoy territorii Rossii [CO<sub>2</sub> fluxes at the clear-cut in the southern taiga of European Russia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]* **5**, 598–611. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/SEJ20190509>
- Mashika, A.V., 2006. Carbon dioxide emission from the surface of podzolic soils. *Eurasian Soil Science* **39** (12), 1312–1317.
- Molchanov, A.G., Kurbatova, Yu.A., Olchev, A.V., 2017. Vliyanie sploshnoy rubki lesa na emissiiu SO<sub>2</sub> s poverkhnosti pochvy [Effect of clear-cutting on soil CO<sub>2</sub> emission]. *Biology Bulletin* **44** (2), 218–223. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0002332916060126>
- Osipov, A.F., 2016. Carbon emission from the soil surface in a mature blueberry pine forest of the middle taiga (Republic of Komi). *Eurasian Soil Science* **49** (8), 926–933. <https://doi.org/10.1134/S1064229316080093>
- Osipov, A.F., 2022. Vliyaniye sploshnoy rubki na dykhanie pochvy srednetayezhnogo sosnyaka chernichnogo Respubliki Komi [Clear cuttings affecting the soil respiration of the middle taiga blueberry pine forest in the Komi Republic]. *Lesovedeniye [Russian Journal of Forest Science]* **4**, 395–406. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0024114822030111>
- Osipov, A.F., 2023. Carbon dioxide emission from the soil surface of the 10-year felled area of the pine forest in the European North-East of Russia. *Eurasian Soil Science* **56** (9), 1223–1231. <https://doi.org/10.1134/s106422932360118x>
- Osipov, A.F., Bobkova, K.S., Dymov, A.A., 2021. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional* **27**, e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>

- Osipov, A.F., Startsev, V.V., Dymov, A.A., 2024. Influence of clear felling on CO<sub>2</sub> emission from surface of podzolic soil of coniferous–deciduous forest (middle taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science* **57** (5), 806–813. <https://doi.org/10.1134/S1064229323603700>
- Pongratz, J., Reick, C.H., Raddatz, T., Claussen, M., 2009. Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles* **23** (4), GB4001. <https://doi.org/10.1029/2009GB003488>
- Pridacha, V.B., Sazonova, T.A., Novichonok, E.V., Semin, D.E., Tkachenko, Y.N. et al., 2021. Clear-cutting impacts nutrient, carbon and water exchange parameters in woody plants in an east Fennoscandia pine forest. *Plant and Soil* **476**, 317–336. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05058-w>
- Pridacha, V.B., Semin, D.E., 2024. Clear-cutting effects on components of the carbon balance in a bilberry-type pine forest in southern Karelia. *Ecosystem Transformation* **7** (3), 64–83. <https://doi.org/10.23859/estr-230505>
- Rudneva, E.N., Zaboieva, I.V., Urusevskaya, I.S., 1981. Pochvenno-geograficheskoye rayonirovaniye tsentral'noy i vostochnoy chastey yevropeyskoy territorii SSSR. Podzolistyye pochvy tsentral'noy i vostochnoy chastey yevropeyskoy territorii SSSR [Soil-geographical zoning of the central and eastern parts of the European territory of the USSR. Podzolic soils of the central and eastern parts of the European territory of the USSR] Nauka, Leningrad, USSR, 200 p. (In Russian).
- Schlesinger, W.H., Andrews, J.A., 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* **48**, 7–20. <https://doi.org/10.1023/A:1006247623877>
- Yang, L., Qin, J., Geng, Y., Zhang, C., Pan, J., Niu, S., Wang, J., 2022. Long-term effects of forest thinning on soil respiration and its components in a pine plantation. *Forest Ecology and Management* **513**, 120189. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120189>
- Yamulki, S., Forster, J., Xenakis, G., Ash, A., Brunt, J., Perks, M., Morison, J.I.L., 2021. Effects of clear-fell harvesting on soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O fluxes in an upland Sitka spruce stand in England. *Biogeochemistry* **18**, 4227–4241. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4227-2021>
- Zamolodchikov, D.G., Chestnykh, O.V., Grabovsky, V.I., Shulyak, P.P., 2013. The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests'. *Contemporary Problems of Ecology* **6** (7), 714–726.
- Zenkova, I.V., Shtabrovskaya, I.M., 2022. Vliyaniye gidrotermicheskikh usloviy na podstilochnyykh bespozvonochnykh vyrubok i garey Khibin [Hydrothermal conditions affecting the forest litter invertebrates in the cuttings and burnt areas of Khibiny mountains]. *Lesovedeniye [Russian Journal of Forest Science]* **4**, 364–380. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0024114822030123>