

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583.16+630\*161.32+631.433.3

### ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ $\text{CO}_2$ В ХОДЕ РАСПАДА ЕЛОВОГО ДРЕВОСТОЯ НА ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ “ЛОГ ТАЕЖНЫЙ” В НОВГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2025 г. А. В. Шилкин<sup>1,2,3</sup>, Д. В. Карелин<sup>4,\*</sup>, Д. Г. Замолотчиков<sup>2,3</sup>, А. С. Куманяев<sup>2,3</sup>,  
С. В. Бубенчиков<sup>5</sup>, А. С. Марунич<sup>5</sup>, К. Н. Вишератин<sup>1</sup>, Д. А. Никитин<sup>6</sup>, В. Н. Коротков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>НПО “Тайфун”, Обнинск, Россия

<sup>2</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Валдайский филиал Государственного гидрологического института, Валдай, Россия

<sup>6</sup>ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

\*e-mail: dkarelin7@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.2025 г.

После доработки 21.07.2025 г.

Принята к публикации 26.08.2025 г.

Представлены результаты многолетнего мониторинга чистого экосистемного обмена, а также эмиссии диоксида углерода из почвы и мертвой древесины в лесной экосистеме, находящейся на стадии усыхания и распада елового древостоя в зоне охвата эколого-климатической станции “Лог Таежный” (национальный парк “Валдайский”, Новгородская область). Гибель и распад древостоя перестойных одновозрастных еловых насаждений, вызванные периодическими засухами, воздействием короеда-типографа и дереворазрушающих грибов, а также ветроломов, приводит к сокращению первичной продукции и усилению деструкционной составляющей баланса  $\text{CO}_2$  и его долговременному сдвигу в область выраженного источника диоксида углерода для атмосферы, тогда как прямое воздействие повышения температуры не приводит к такому эффекту.

**Ключевые слова:** дыхание почвы, мониторинг, диоксид углерода, чистый экосистемный обмен, ельник, распад древостоя, наиболее теплый период, эколого-климатическая станция

DOI: 10.7868/S2658697525050059

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мониторинг динамики потоков парниковых газов и запасов углерода наземных экосистем является востребованной практической областью реализации международных и российских климатических решений в условиях продолжающегося современного глобального потепления (Парижское ..., 2015; Романовская, 2024; Романовская и др., 2023; IPCC ..., 2022).

Начиная с конца XX в. проводятся интенсивные исследования углеродного баланса природных экосистем разных типов, развиваются глобальная (FluxNet) и региональные сети микрометеорологических станций, которые используют методы вихревой ковариации для измерения потоков  $\text{CO}_2$  и водяного пара меж-

ду биосферой и атмосферой, а существующие наборы данных охватывают уже более двух десятилетий (Pastorello et al., 2020; Virkkala et al., 2022). В России формируется национальная сеть RuFlux, хотя часть станций уже входит в международную сеть FluxNet (Куричева и др., 2023). Результаты наблюдений с помощью математических моделей помогут понять, как изменится баланс парниковых газов экосистем при климатических изменениях и в результате различных нарушений природного и антропогенного характера (Baldocchi, 2020). Большое внимание уделяется также измерениям почвенного дыхания — важной функциональной характеристики экосистем, влияющей на баланс углерода в конкретных условиях (Кудеяров, 2023; Курганова и др., 2024; Huang et al., 2020; Jian et al., 2021).

Несмотря на значительный массив подобных наблюдений (Virkkala et al., 2022), стационаров, где проводятся многолетние комплексные исследования потоков парниковых газов (ПГ) и резервуаров углерода на обширной территории России, по-прежнему, крайне мало. После старта в 2022 г. важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ”, утвержденного Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 3240-р, ситуация существенно улучшилась. В настоящее время на территории РФ зарегистрированы 22 эколого-климатические станции интенсивного уровня в рамках проекта ВИПГЗ (Куричева и др., 2023), но только некоторые из них, в том числе “Лог Таежный”, имеют многолетние ряды наблюдений, включающие периоды аномальных климатических явлений. Кроме того, в рамках того же проекта сформирована сеть измерений дыхания почвы, насчитывавшая летом 2023 г. 75 исследовательских точек (Kurganova et al., 2024).

Эколого-климатическая станция “Лог Таежный” Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ВФ ГГИ) Росгидромета хорошо известна не только в России (Куричева и др., 2023), но и за ее пределами (Jian et al., 2021). Помимо исследований водного баланса таежных экосистем (Федоров, 1977), вот уже более 16 лет (с 2009 г. по настоящее время) здесь проводятся ежегодные наблюдения за пулами и потоками углерода. В частности оценивается чистый экосистемный обмен (NEE) CO<sub>2</sub> и суммарное испарение (ET) методом турбулентных пульсаций (Алферов и др., 2017; Замолодчиков и др., 2017; Karelin et al., 2020, 2021), детально исследуются сезонная и суточная изменчивость дыхания почвы (Карелин и др., 2017, 2019; Karelin et al., 2014), эмиссия CO<sub>2</sub> в ходе разложения валежника и сухостоя (Гитарский и др., 2020; Сафонов и др., 2012; Gitsarskiy et al., 2017; Mukhin et al., 2021), эмиссия CO<sub>2</sub> из дополнительных точечных и спорадических таежных источников (Карелин и др., 2017, 2022; Karelin et al., 2017b), углекислотный обмен хвои ели (Юзбеков и др., 2014, 2017), вклады корневого и микробного дыхания в почве (Karelin et al., 2017a), изменения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в ходе восстановительной сукцессии на супесчаных подзолистых почвах южной тайги (Люри и др., 2013), применяется математическое моделирование на основе полевых измерений и метеоданных (Суховеева, Карелин, 2022; Karelin et al., 2014; Smagin and Karelin, 2021). Полученные результаты, включая данные по запасам углерода в основных пулах, были обобщены в коллективной монографии (Алферов и др., 2017).

Многолетний ряд наблюдений и разнообразие полученных данных позволяют проводить сравнение ежегодно получаемой новой информации с полученной здесь ранее.

В 2024 г. по данным ВМО был впервые в инструментальной метеорологической истории превзойден обозначенный в международных документах порог 1.5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем температуры приземного слоя атмосферы<sup>1</sup>. Для территории России этот год оказался на втором месте после 2020 г. по значениям средней годовой температуре воздуха (Доклад ..., 2025), что наблюдалось и на Валдайской возвышенности, судя по данным метеостанции ВФ ГГИ за весь период наблюдений (+6.5°C в 2024; +6.8°C в 2020 г.). Цель настоящего исследования — выявить влияние усыхания и распада елового древостоя в наиболее выраженный период современного потепления на обмен CO<sub>2</sub>, фиксируемый в зоне охвата эколого-климатической станции “Лог Таежный”.

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Эколого-климатическая станция “Лог Таежный” расположена на юго-востоке Валдайской возвышенности (Валдайский район Новгородской области, координаты 57°57.8' с.ш., 33°20.3' в.д.) в пределах конечно-моренного ландшафта последней (Осташковской) стадии Валдайского оледенения. Территория относится к району хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части России (Об утверждении ..., 2014). По геоботаническому районированию территория относится к Валдайскому геоботаническому району, для которого характерно преобладание осиновых, березовых и еловых дубравно-травяных лесов с примесью широколиственных пород (Жекулин, Челпанова, 1975). Преобладание в недавнем прошлом еловых лесов связано с историей природопользования и особенностями ведения лесного хозяйства, нацеленного на получение хозяйственно ценной древесины хвойных пород. В то же время в лесном массиве сохранились широколиственные виды деревьев (*Quercus robur* L., *Fraxinus excelsior* L., *Acer platanoides* L., *Tilia cordata* Mill.), однако их участие в составе древостоев единичное. Отличительной особенностью древостоев в зоне охвата эколого-климатической станции является преобладание одновозрастных перестойных насаждений (по данным лесоустройства — 110–120 лет

<sup>1</sup> <https://wmo.int/ru/news/media-centre/vmo-podtverzhdaet-cto-2024-god-stanet-samym-teplym-godom-v-istorii-nablyudenyi-primerno-na-155-degc>

по состоянию на 2009 г.), что свидетельствует о вторичном происхождении лесов, сформировавшихся после нарушений (рубки, пожары, частичная распашка) (Алферов и др., 2017).

Климат района — умеренно континентальный, умеренно холодный, гумидный. По климатической классификации (Алисов, 1956) район исследования относится к атлантико-континентальной лесной области умеренного пояса. По данным метеостанции “Валдай” за предыдущий период климатической нормы (1961–1990 гг.) среднегодовая температура воздуха составляла  $+3.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$ , средняя температура июля  $+16.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$ , января  $-10.0 \pm 0.9^\circ\text{C}$ , среднегодовое количество осадков  $719 \pm 20$  мм с отчетливо выраженным летним максимумом. В последующий период (1990–2024 гг.) увеличилась среднегодовая температура ( $+5.1 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ), средняя температура июля ( $+18.0 \pm 0.4^\circ\text{C}$ ) и средняя температура января ( $-6.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Увеличилось и среднемноголетнее количество осадков до  $799 \pm 20$  мм. Среднегодовая температура показывает устойчивый рост за весь период имеющихся наблюдений на метеостанции Валдайского филиала ГГИ (рис. 1). Сумма осадков за год имеет слабый положительный тренд в сочетании с большой межгодовой изменчивостью, однако существенное влияние на ельники оказывают периодические засухи в летний период, которые могут случаться даже в годы с высокими значениями годовых сумм осадков.

Объектом исследования были старовозрастные мелкотравно-зеленомошные ельники с доминированием ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и небольшим участием сосны (*Pinus*

*sylvestris* L.) и березы (*Betula pendula* Roth.) (Алферов и др., 2017; Заугольнова, Морозова, 2006). Возраст древостоев в 2019 г. составлял 120 лет. Рельеф — конечно-моренный, почвы — дерново-подзолистые, имеющие следы распашки в прошлом (Алферов и др., 2017). После засух 2010 и 2021 гг. произошло усыхание и распад еловых древостоев. В 2024 г. живых деревьев в первом ярусе практически не осталось.

## МЕТОДЫ

Оценка состояния древостоев выполнялась на постоянных пробных площадях размером 0.1 га, заложенных в 2009 г. на пологих вершинах холмов. На пробных площадях периодически проводилась таксация древостоя с определением породы, диаметра ствола на высоте 1.3 м, высоты и состояния деревьев, учитывался подрост и подлесок. Запасы фитомассы древостоя, подроста и подлеска рассчитывали на основе аллометрических уравнений (Уткин и др., 1996). При пересчете древесной фитомассы в органический углерод использован коэффициент 0.5. Запасы надземной фитомассы живого напочвенного покрова определялись методом укусов на площадках  $0.25 \text{ м}^2$  в 5-кратной повторности, далее пробы высушивали до абсолютно сухого состояния и взвешивали, при пересчете в углерод использовали коэффициент 0.45.

Измерения эмиссии диоксида углерода из почвы (дыхание почвы) осуществляли закрытым камерным методом по изменению концентрации  $\text{CO}_2$  за 3 мин в непрозрачных цилиндрических камерах из поливинилхлорида объемом от 1.2 до 1.5 л и площадью основания

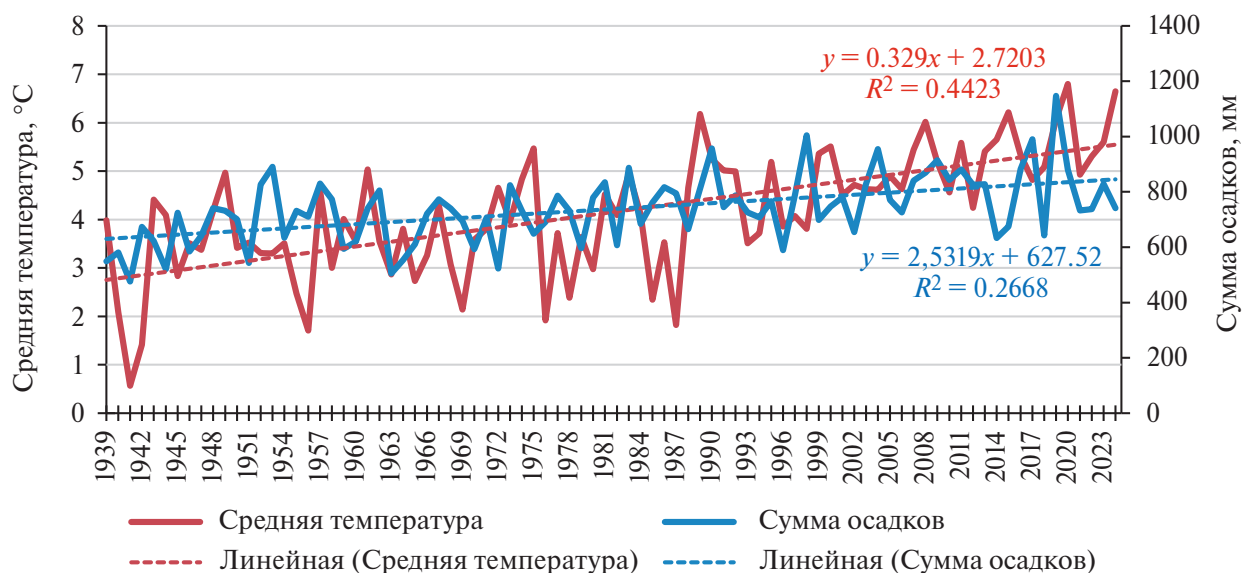


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры и суммы осадков за год по данным метеостанции Валдайского филиала Государственного гидрологического института.



90 см<sup>2</sup>, вкопанных в почву на глубину 3–4 см в постоянных точках. Растения в камерах удаляли. Основания камер вне измерений были постоянно открыты. Оценки потоков проводили приборами, выполненными на основе портативного инфракрасного CO<sub>2</sub>-газоанализатора AZ 7752 (AZ Instrument Corp., Тайвань). Эти приборы периодически тестировали калибровочными газовыми смесями с концентрациями CO<sub>2</sub> 400 и 600 ppm. Измерения дыхания почвы выполнялись на постоянной трансекте длиной 500 м, проходящей через всю зону охвата (футпринт<sup>2</sup>) и включающей 50 оснований для камер, установленных через каждые 10 м в 2017 г.

Кроме того, аналогичные измерения проводились на постоянных площадках, заложенных в различных биотопах (ельник, окна распада елового древостоя). На каждой площадке было установлено 10–20 камер. Дополнительно с мая 2021 г. измерениями были охвачены поверхности пней, образовавшихся в результате ветроломов елей (10 пней елей разной высоты, диаметра и различной степени разложения), где камеры устанавливаются только во время измерений. В последнем случае герметичность камер по отношению к поверхности древесины обеспечивалась специальным гигроскопическим материалом, насыщаемым перед измерениями водой; в период с отрицательными температурами, вместо воды использовали жидкость-антифриз (Курганова и др., 2024). В 2024 г. впервые удалось провести полный годовой цикл измерений почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> с частотой дважды в месяц, что повышает значимость полученных оценок. С января по декабрь 2024 г. на всех вышеперечисленных площадках и трансектах было проведено 24 сезонных цикла по 100 единичных замеров в каждом. По общему количеству измерений и внутригодовому охвату 2024 г. является наиболее подробно исследованным годом в отношении наземной эмиссии CO<sub>2</sub> за весь многолетний период наблюдений на станции.

Оценка чистого экосистемного обмена диоксида углерода в исследуемой экосистеме проводится методом турбулентных пульсаций (МТП) на основе измерения его концентрации и вертикальной компоненты скорости ветра с применением установки Close Path Eddy Covariance system (CPEC200, Campbell Sci. Inc., США), установленного на 42 м мачте. Приме-

няемый метод дает возможность определить количество CO<sub>2</sub>, которое было перенесено за единицу времени с единицы площади экосистемы в атмосферу или же из атмосферы в экосистему. В настоящее время МТП является одним из наиболее точных и теоретически обоснованных методов исследования масштабного газообмена между экосистемами и атмосферой (Бурба и др., 2016; Куричева и др., 2023). В состав пульсационной установки CPEC200 входят: осадкомер TE525 (Texas Electronics, США; на высоте 46 м над поверхностью почвы (ПП)); газоанализатор закрытого типа EC155 (Campbell Sci. Inc., США; 44.5 м над ПП); трехосевой акустический анемометр CSAT3A (Campbell Sci. Inc., США; 44.5 м над ПП); сенсор теплового баланса в приземном слое атмосферы NET-радиометр NR-LITE (Kipp & Zonen B.V., Нидерланды; 44.5 м над ПП); квантовый сенсор входящей фотоактивной радиации LI190SB (Li-Cor Inc., США; 44.5 м над ПП); сенсор температуры и влажности воздуха HMP45C (Vaisala Inc., Финляндия; 44.5 м над ПП); семь сенсоров температуры воздуха T107C (Campbell Sci. Inc., США; 40; 35.5; 26.5; 17.5; 8.5; 2 и 0.25 м над ПП); два сенсора температуры почвы TCAV (Campbell Sci. Inc., США; 2–6 см под ПП); два сенсора влажности почвы CS616 (Campbell Sci. Inc., США; 4 см под ПП); три сенсора теплового баланса в почве HFP01 (Hukseflux Thermal Sensors, Нидерланды; 8 см под ПП). Для калибровки газоанализатора EC155 использовались поверочные газовые смеси первого разряда ООО «МОНИТОРИНГ» (Санкт-Петербург) и азот высокой частоты марки 6.0 ООО «НИИ КМ» (Москва). Все калибровочные образцы проходили дополнительную поверку в ФГБУ ГГО им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург) в соответствии с вторичными газовыми стандартами центральной калибровочной лаборатории (CCL WMO). Концентрация CO<sub>2</sub> в образцах варьировала от 400 до 450 ppm. Для управления измерениями и регистрации данных служит логгер CR3000 (Campbell Sci. Inc., США), к которому подключены все сенсоры. Логгер опрашивает сенсоры с частотой 10 Гц, синхронизирует измерения и сохраняет данные в виде таблиц. В CR3000 загружена программа работы установки, автоматической первичной обработки и усреднения данных, написанная на языке CRBasic (Campbell Sci. Inc., США), на котором работают все логгеры производителя. Используемая программа CRBasic написана специалистами Campbell Sci. Inc и защищена авторскими правами. На большинстве эколого-климатических станций, оснащенных комплексами Li-Cor или Campbell Sci., данные получают в первичном виде 10 или 20 Гц и обрабатывают их в программе EddyPro или

<sup>2</sup> Футпринт — общепринятый в настоящее время термин из области прямой инструментальной оценки малых газовых потоков в приземном слое атмосферы с помощью микрометеорологических методов. Он обозначает *зону охвата*, то есть площадь изучаемой экосистемы, которую «видят» приборы, и представляет собой участок с наветренной стороны, с которого к приборам, расположенным на вышке, переносится газовый поток (Бурба и др., 2016).



EasyFlux соответственно. Используемая нами CRBasic программа включает все необходимые алгоритмы обработки данных идентичные тем, что содержатся в вышеупомянутой программе. В том числе сюда входит отбраковка первичных данных потока  $\text{CO}_2$  по флагам качества, когда фиксируется слабый сигнал сенсора, например, из-за осадков, и по динамической скорости ветра  $U^*$  (формула 1), когда отсутствует турбулентность. Нижний порог  $U^*$  для исследуемой системы выбран  $0.33 \text{ м с}^{-1}$ ; значения потока  $\text{CO}_2$  соответствующие меньшим значениям  $U^*$  удаляются из первичных данных 10 Гц. После автоматической фильтрации данные усредняются за интервал 30 мин и сохраняются логгером. Первичные неотфильтрованные данные также остаются доступными.

$$U^* = \sqrt[4]{\text{cov}(U_x U_z)^2 + \text{cov}(U_y U_z)^2}, \quad (1)$$

где  $U_x$ ,  $U_y$  и  $U_z$  — три компоненты скорости ветра.

Далее проводилась дополнительная фильтрация данных по значениям плотности потока фотоактивной радиации PAR в ночное время. Для этого удалялись отрицательные стоксовые значения потока  $\text{CO}_2$  при значениях PAR меньших  $10 \text{ мкмоль с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ .

Последним этапом фильтрации является удаление статистически незначимых выбросов. Функции распределения большинства измеряемых параметров не являются симметричными, для их описания больше подходит логнормальная аппроксимация, а не часто используемая нормальная. Для фильтрации данных ряд складывался в двумерную матрицу “А” размерностью  $m \times (48 \cdot 31)$ , где “m” — количество строк матрицы равное количеству месяцев за исследуемый период, 48 — количество 30-мин измерений за сутки, 31 — максимальное количество дней в месяце. В пределах каждой строки и каждого столбца полученной матрицы “А” выборка приближается к нормальному распределению, поэтому к ней уже можно применять стандарт-

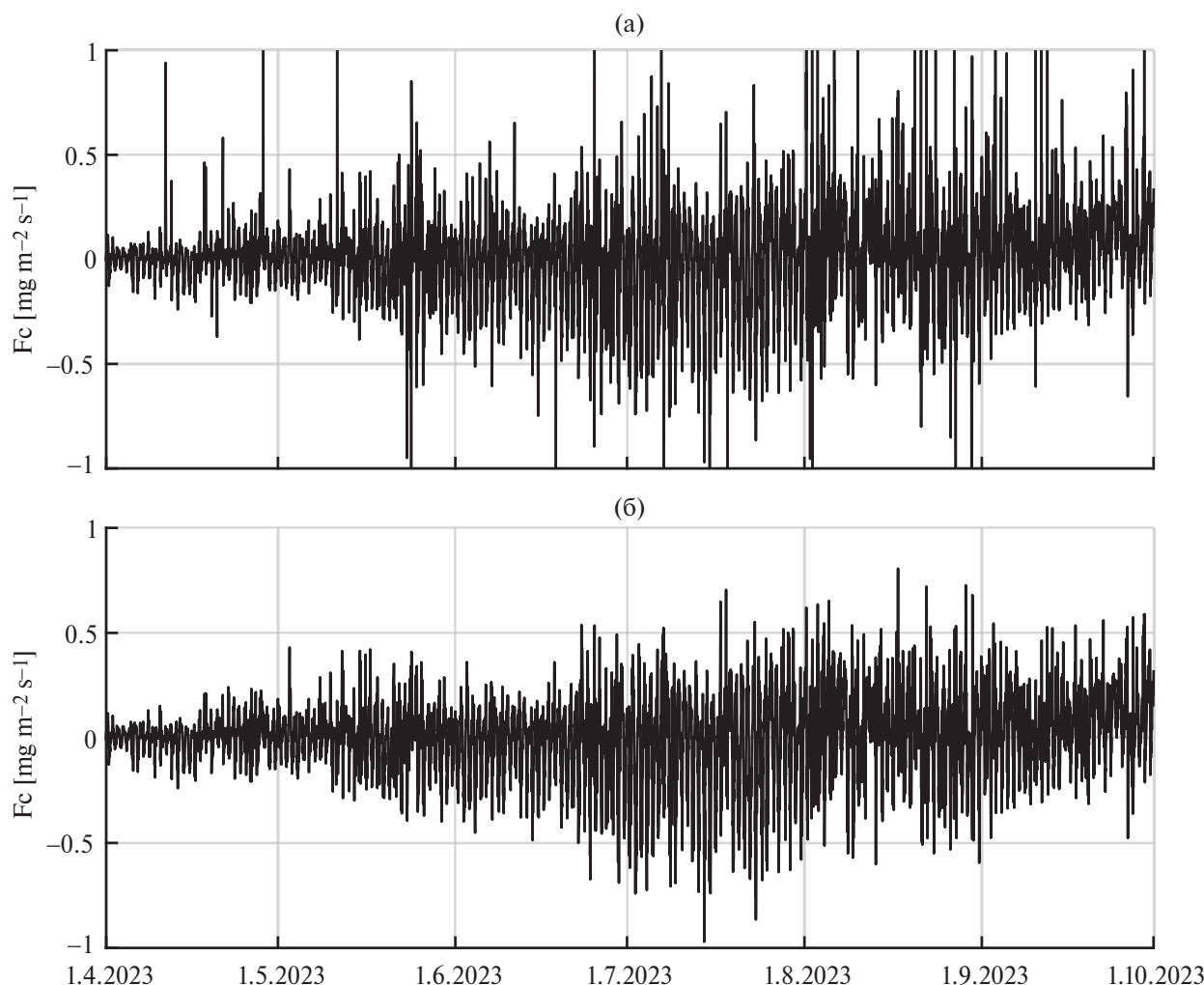


Рис. 2. Фильтрация на примере данных потока диоксида углерода (фрагмент): (а) исходные данные, (б) отфильтрованные данные.

ные статистические операторы. Далее запускался цикл по строкам матрицы “А”, и из каждой строки убирался линейный тренд, после чего в ней рассчитывалось стандартное отклонение (STD). Из полученной выборки удалялись значения, выходявшие за пределы четырех STD. После завершения цикла по строкам матрицы “А”, запускался цикл по ее столбцам, и в них выполнялись те же операции. Чередование циклов по столбцам и строкам матрицы “А” проводилось до тех пор, пока количество пропусков в ней не становилось постоянным, т.е. пока не удалялись все выбросы. После фильтрации матрица “А” обратно раскладывалась в отфильтрованный ряд. В качестве примера на рис. 2 показаны данные измерений потока  $\text{CO}_2$  (Fc) до и после процедуры фильтрации.

Восстановление пропусков также проходило в двумерной матрице с последовательным изменением ее формата:  $[d \times 48]$ ;  $[m \times (48 \cdot 31)]$ ;  $[y \times (48 \cdot 366)]$ , где  $d$  — количество дней измерений,  $m$  — количество месяцев измерений,  $y$  — количество лет измерений. Пропуски заполнялись трехмерной кубической интерполяцией внутри полученной матрицы с изменением формата для решения краевой задачи. После восстановления пробелов матрица обратно раскладывалась в ряд данных (рис. 3).

Расчет зоны охвата пульсационных вышек реализован в некоторых стандартных программах обработки пульсационных данных

(EddyPro, FReDdyPro), кроме того, существует проект Kljun footprint model (Kljun et al., 2004), позволяющий осуществить оценку зоны охвата в интернет-приложении. Именно этот вариант был использован в настоящей работе. Был подготовлен файл Excel, строки которого представлены получасовыми значениями параметров, часть которых непосредственно продуцирует пульсационная установка, а часть характеризует установку и объект исследования (высота размещения сенсоров и высота древостоя). Кроме того, в состав параметров входит масштаб Монина-Обухова “L” (имеет размерность длины), который может быть рассчитан на основе ряда параметров пульсационной установки. Процедура расчета “L” была реализована в пакете Excel. Исходными данными послужили результаты пульсационного мониторинга, проведенного в период с мая 2010 по август 2011 г. Для каждой валидной получасовой записи был проведен расчет “L”. Далее был сформирован текстовый массив стандартного формата и загружен на портал Kljun footprint model. Затем с портала был получен ряд файлов, представляющих зону охвата в виде растровых изображений и векторных файлов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Усыхание ели спровоцировала летняя засуха 2010 г. По данным метеостанции среднемесячная

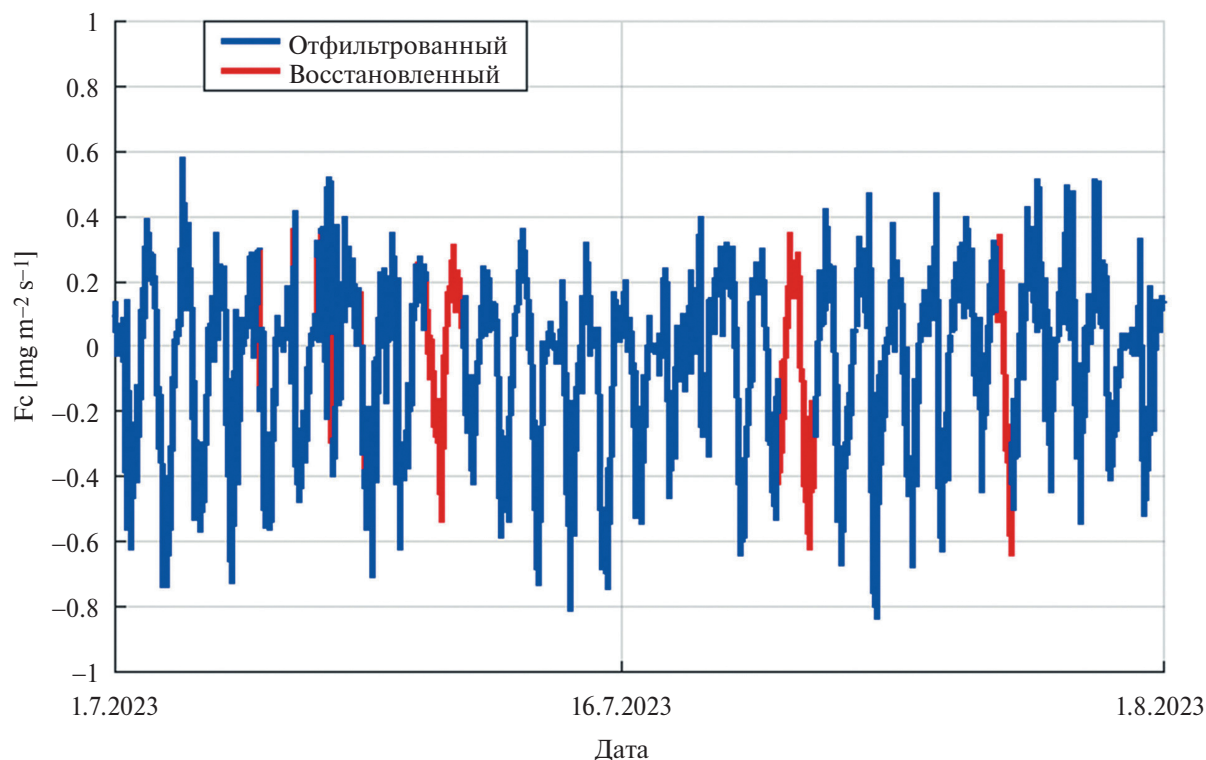


Рис. 3. Восстановление пропусков на примере данных потока диоксида углерода (фрагмент).



температура июля в 2010 г. составила  $+24.1^{\circ}\text{C}$  при сумме осадков всего лишь 6.1 мм. Интенсивная гибель ели произошла в 2011 г. в результате атаки на ослабленные старые деревья короеда-типографа (*Ips typographus* L.) (Алферов и др., 2017; Karelin et al., 2020). В дальнейшем

мертвые ели стали выпадать из яруса древостоя в результате ветроломов и ветровалов. После засухи 2021 г. массовое усыхание продолжилось в 2022 г. и привело к полной гибели старых елей в 2023 г. (рис. 4а). В 2024 г. сухостой ели подвергся массовым ветроломам в связи с поражением



**Рис. 4.** Массовая гибель елового древостоя в зоне охвата эколого-климатической станции “Лог Таежный” (Валдайский район, Новгородская область): (а) август 2023 г.; (б) ноябрь 2024 г.; (в) участок массового ветролома (ноябрь 2024 г.); (г) основание ствола ели после ветролома с плодовыми телами *Fomitopsis pinicola* (ноябрь 2024 г.).



основания стволов дереворазрушающими грибами-сапрофитами (преимущественно *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst.) (рис. 4б, в, г).

В 2024 г. живых елей в составе древостоя практически не осталось, большая часть деревьев представляла собой валежник, а меньшая часть — сухостой. В результате ветроломов остаются пни высотой 1–5 м, так как в ходе падения стволы погибших елей чаще ломаются (см. рис. 4г, д), чем вырываются из почвы с корнями (Karelin et al., 2017b, 2020). Последнее важно для общего углеродного баланса рассматриваемой экосистемы, поскольку известно, что остатки сухостоя (пни) и почва в их основаниях служат достаточно мощными дополнительными источниками CO<sub>2</sub> (Карелин и др., 2022; Karelin et al., 2021). Такая ситуация наблюдалась в 2024 г. практически по всей площади зоны охвата (футпринта) пульсационного оборудования СРЕС200, в радиусе 400–500 м от основания мачты. При этом на участках с полным распадом древостоя ели активно развивается подрост лиственных деревьев (*Sorbus aucuparia* L., *Salix caprea* L., *Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh., *Populus tremula* L.) с примесью ели, а также травяной покров с доминированием вейника лесного (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth), орляка (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), причем орляк часто блокирует естественное лесовосстановление. Ель успешно возобновляется под пологом лиственных деревьев на перегнивающих стволах ели.

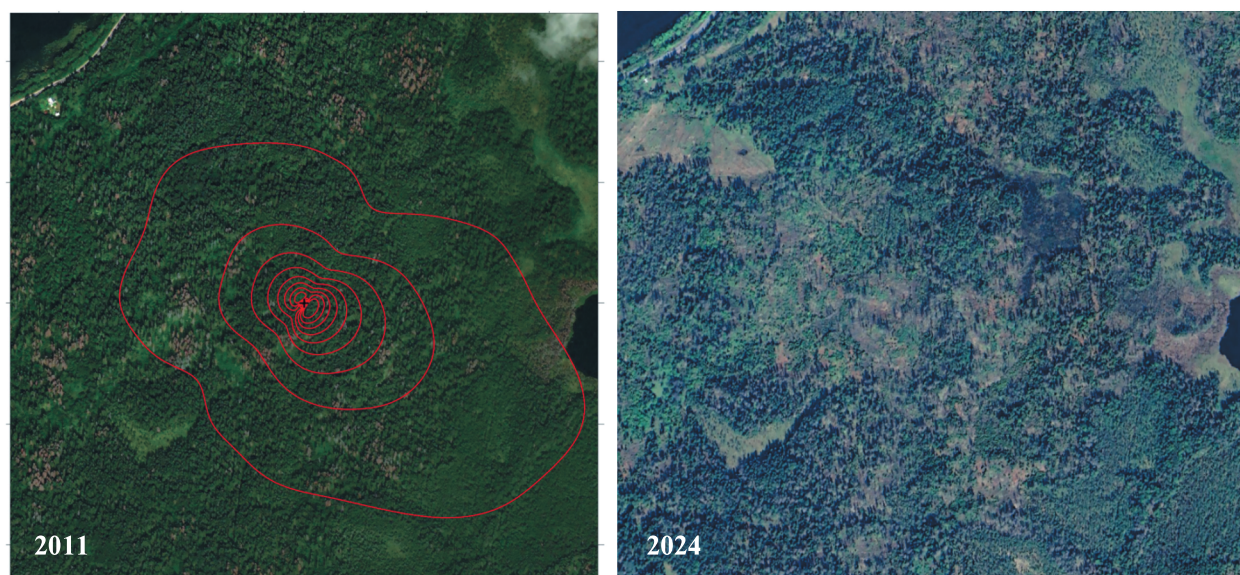
По данным дистанционного зондирования участка наблюдений по космическим снимкам (общая площадь 0.785 км<sup>2</sup>), в 2009 г. ослаблен-

ными, усыхающими и погибшими елями было занято всего 8% площади, тогда как в 2015 г. они составляли уже почти 30%. С 2015 г. смертность деревьев замедлилась, а погибшие деревья начали выпадать из древостоя. В 2022 г. произошло массовое усыхание оставшегося елового древостоя (около 20% площади). В 2024 г. большая часть сухих деревьев ели выпала в результате ветроломов (рис. 5).

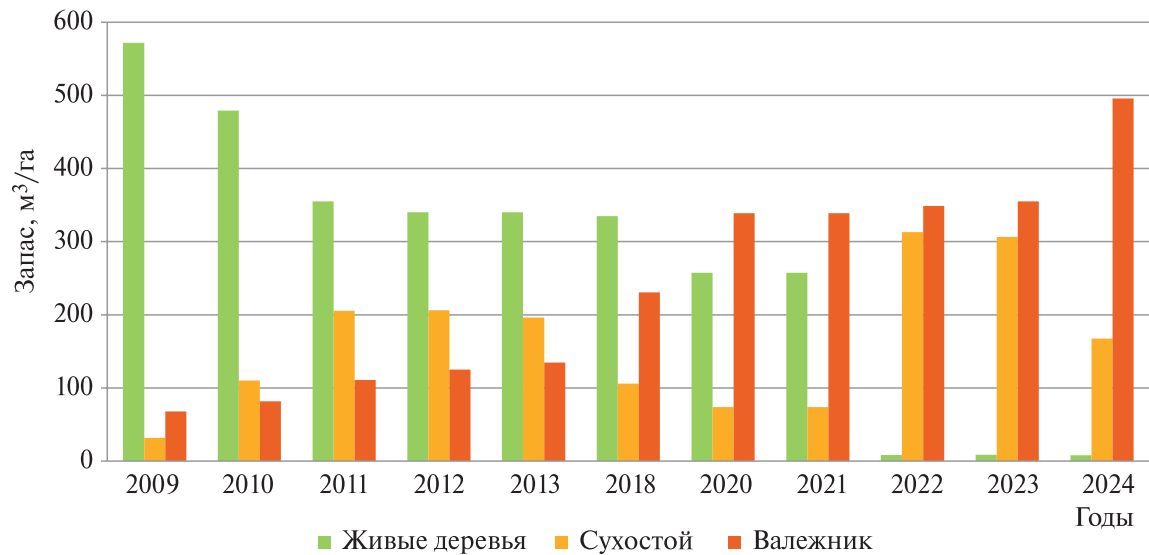
В связи с этим за период 2009–2024 гг. запасы крупного древесного дебриса увеличились в 6.6 раз, при этом большая часть перешла в валежник. За тот же период запас живых деревьев на пробных участках сократился с 572 до 8 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup> (рис. 6).

Оценки запасов углерода в пулах биомассы и мортмассы показали, что участки с распадающимся еловым древостоем характеризуются потерями углерода, которые в основном связаны с разложением значительного объема мертвой древесины (табл. 1). За период 2009–2024 гг. запасы углерода сократились на 59.6 тС га<sup>-1</sup>. За рассматриваемый период запасы углерода сократились в биомассе древостоя и увеличились в мертвой древесине (сухостой и валежник). В 2024 г. наблюдалось увеличение накопления углерода в биомассе подроста в 7.8 раз, в биомассе живого напочвенного покрова — в 3.8 раза по сравнению с 2009 г.

**Эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы.** Рассмотрим показатели 2024 г. по данным наземных наблюдений почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>. Прежде всего, следует отметить, что внешних различий между изначально выбранными для мониторинга участками елового леса с распадом древостоя и участками



**Рис. 5.** Спутниковые снимки исследуемого ландшафта 2011 г. и 2024 г. Красные изолинии отражают футпринт по состоянию на 2011 г. (с шагом 10% от площади зоны), внешний контур ограничивает 90% площади футпринта (длинная ось внешнего контура составляет около 1200 м, короткая — 800 м).



**Рис. 6.** Многолетняя динамика запасов живых деревьев, сухостоя и валежника в старовозрастном еловом лесу с выраженным распадом древостоя.

**Таблица 1.** Запасы углерода в старовозрастном еловом лесу до и после распада древостоя

Резервуар углерода	Запасы углерода, т С га <sup>-1</sup>	
	2009 г.	2024 г.
Биомасса древостоя (живые деревья)	170.9 ± 15.4	2.9 ± 0.3
Мертвая древесина (сухостой и валежник)	40.3 ± 6.7	142.1 ± 21.3
Биомасса подроста	0.8 ± 0.1	6.2 ± 0.8
Биомасса трав и кустарничков	0.4 ± 0.1	1.5 ± 0.2
Биомасса мхов	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1
Итого	212.6 ± 16.8	153.0 ± 21.3

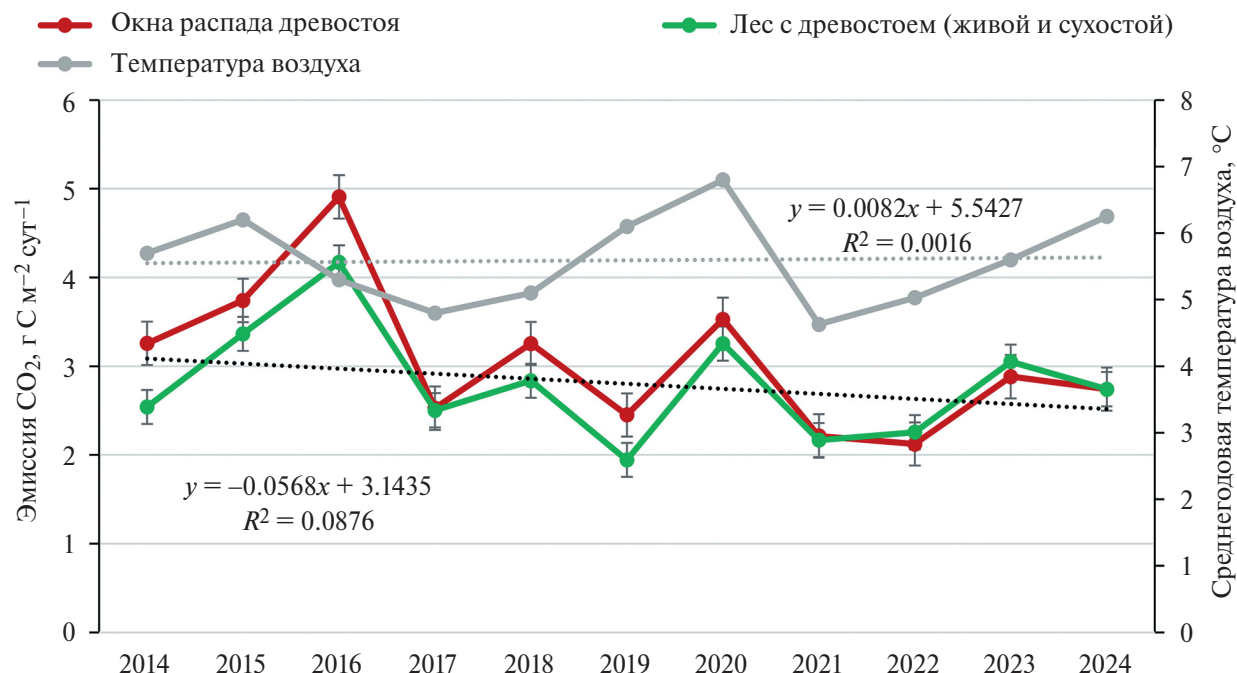
*Примечание:* приведены средние величины и их стандартные ошибки.

с сохранившимися деревьями, в рассматриваемый период больше не наблюдается, поэтому эти данные в 2024 г. были объединены. Заметим, что постоянные измерения на трансекте 500 м, которые были положены в основу этого сравнения, проводятся в точках, расположенных на удалении 1 м и более от сухих стволов или пней елей, поэтому в данном случае отсутствует влияние дополнительных источников эмиссии от оснований или с поверхности сухостоя и рассматривается эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности почвы между стволами деревьев.

Для корректной оценки общего тренда динамики почвенной эмиссии за многолетний период необходимо использовать только сравнимые данные (апрель–октябрь), то есть в нашем

случае за вегетационные сезоны, поскольку в первые годы мониторинга не проводились измерения в зимний период. Как показал анализ метеоданных (рис. 7), если рассматривать весь период наблюдений (2009–2024), отмечается увеличение среднегодовой температуры воздуха, в основном, за счет зимнего периода. Однако за последний период (2014–2024) несмотря на то, что в 2021–2024 гг. наблюдается монотонный рост температуры воздуха, ее тренд почти не выражен. На этом фоне средний уровень эмиссии за бесснежный сезон (см. рис. 7) демонстрирует за последний 10-летний период небольшую (незначимую) положительную связь со среднегодовой температурой ( $r_p = +0.3$ ,  $p > 0.05$ ) и слабо выраженный отрицательный тренд (около 2% в год). На том же рисунке хорошо заметен процесс постепенного сближения кривых изменения эмиссии в окнах распада древостоя и на участках леса с еще сохранившимся древостоем по мере его полного распада в 2023–2024 гг. Вероятно, небольшое снижение эмиссии в этот период определяется не погодными факторами (какого-либо тренда по количеству осадков также не наблюдается), а процессом гибели древостоя, хотя в целом 2024 г. оказался аномально теплым и несколько более сухим (температуры воздуха: +6.5°C, сумма осадков: 583 мм; для сравнения многолетняя климатическая норма за 1991–2020 гг. составляет +5.0°C и 692 мм соответственно). Заметим, что в данном случае не учтен дополнительный вклад эмиссии CO<sub>2</sub> из приствольных зон сухостоя и с поверхности пней, а также от валежа ели.

Применение модели Райха-Хашимото, ранее параметризованной нами по полевым наблюдениям эмиссии CO<sub>2</sub> за 2014–2021 гг. (Карелин,



**Рис. 7.** Многолетняя динамика эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в окнах распада древостоя и на участках леса с древостоем, включая живые деревья и сухостой за бесснежный период года (апрель–октябрь; стационар “Лог Таежный”). Приведены средние величины и их стандартные ошибки. Серая линия — изменения среднегодовой температуры воздуха по метеостанции Валдайского филиала Государственного гидрологического института.

Сухошеева, 2022), приводит к существенному улучшению ее качества по сравнению с натурными наблюдениями за 2024 г. (рис. 8). Так, если раньше *показатель несоответствия Тейла* (меняется от 0 до 1: чем он меньше, тем соответствие модели натурным данным лучше) для участков с нарушенным древостоем был равен 0.234, для леса с незатронутым распадом древостоя 0.231, то в 2024 г. он оказался 0.166 и 0.182 соответственно. Коэффициенты корреляции по тем же массивам данных также существенно улучшились (с  $r_p = +0.67$  до  $r_p = +0.90$ ).

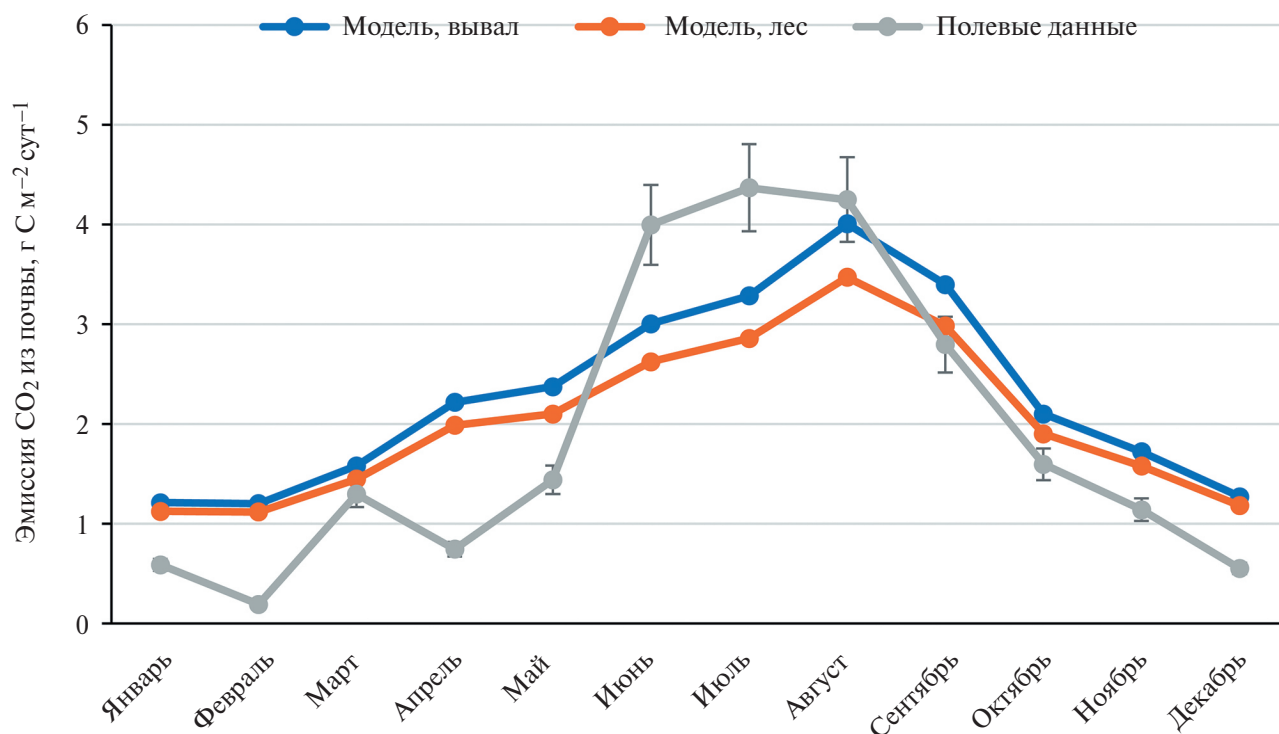
Если оценивать по тем же полевым данным (см. рис. 8) значение суммарной эмиссии CO<sub>2</sub> за год по формуле трапеций по всем наблюдениям за 2024 г., то получим  $746 \pm 41$  г С·м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>. При этом модель Райха-Хашимото в ее наилучшем приближении, приводит к очень близкому значению: 744 г С·м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>. Последняя, почти совпадающая с полевой, оценка годовой эмиссии была получена с помощью модели, параметризованной для участков леса, которые подверглись распаду древостоя за последние годы, тогда как аналогичная оценка с помощью той же модели, параметризованной по участкам, где древостой распался на 7–11 лет раньше, дала завышенный результат (см. рис. 8 “вывал”: 835 г С·м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>). Это свидетельствует об очень динамичном изменении дыхания почвы в экосистеме елового леса, связанном с гибелью древостоя под воздействием засух и атак ксилофа-

гов. За рассматриваемый период дыхание почвы несколько снизилось, что вероятно связано, как с уменьшением вклада дыхания корней, так и с подавлением микробной (прежде всего, ризосферной) активности в почве.

Полученные оценки дыхания почвы сопоставимы с ранее опубликованными результатами, характерными для лесных экосистем умеренного пояса. Например, в обзорной работе И.Н. Кургановой с соавторами (2024) средние значения дыхания почв варьировали от 3.75 до 4.39 г С·м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> для хвойных, смешанных и лиственных лесов России с разным типом почв и влажностью, что близко к полученным нами диапазонам. По данным многолетних наблюдений в лесах умеренной зоны северо-востока США в среднем значение дыхания почвы варьировало от 695 до 768 г С·м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> (Giasson et al., 2013).

Полученные значения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в 2024 г. ( $746 \pm 41$  г С·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>) превышают средние показатели для ненарушенных экосистем. Например, в южно-таежных ельниках Республики Коми (Россия) почвенное дыхание варьирует в пределах 161–407 г С·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> (Osipov et al., 2018), тогда как в лесных экосистемах Валдая после гибели древостоя аналогичные величины достигают 700–800 г С·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> (Karelin et al., 2021). Глобальные обзоры (Hamdi et al., 2013; Jian et al., 2021) показывают, что повышенные значения почвенного дыхания связаны с до-





**Рис. 8.** Сравнение внутригодовой эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы на эколого-климатической станции «Лог Таежный» по натурным наблюдениям 2024 г. и по параметризованной на полевых данных модели Райха-Хашимото для участков леса с различной историей: «вывал» — участки, где древостой распался на 7–11 лет раньше, «лес» — участки, которые подверглись распаду древостоя за последние годы (2020–2024 гг.). Для полевых данных приведены средние и их стандартные ошибки.

ступностью органического субстрата и активностью гетеротрофных микроорганизмов, что согласуется с нашими данными для нарушенных лесов с обилием мертвой древесины. Однако в отличие от работ В.А. Мухина с соавторами (Mukhin et al., 2021), где эмиссия от валежника доминирует даже в интактных лесах, в нашем исследовании ее вклад (54.5%) стал критичным только после массового распада вторичных еловых древостоев.

*Эмиссия  $\text{CO}_2$ , связанная с формированием сухостоя.* Оценив современный уровень годового дыхания почвы на участках, удаленных от сухостоя, определим вклад эмиссии  $\text{CO}_2$  от сухостоя. С 2014 г. на площадке с полностью погибшим древостоем елей, где сухостой сейчас сохранился в виде пней различной высоты, продолжают наблюдения за эмиссией  $\text{CO}_2$  из почвы в основаниях сухих стволов елей (10 точек), где ранее нами были обнаружены дополнительные источники углекислого газа. В 2023–2024 гг. сухостой на участке наблюдений полностью выпал в результате ветроломов, после которых сохранились пни, по высоте не превышающие 5 м. С 2014 по 2024 г. соотношение эмиссии в основаниях сухостойных стволов елей и из почвы между ними удерживалось в пределах 2–3.5 раза (выше под сухостоем, в среднем, в 3 раза), почти не меняясь. В 2024 г. этот показатель был близок

к среднему значению за несколько лет. В целом эффект усиления эмиссии в основаниях сухих стволов и пней елей остается столь же выраженным, как и в 2014 г., в самом начале наблюдений. За 10-летний период корреляция величин эмиссии между этими микробиотопами остается сильной и положительной ( $r_p = +0.86$ ,  $p < 0.001$ ). Судя по длительности наблюдаемого эффекта, представляется более вероятным, что в настоящее время это связано не только с активностью биоты, разлагающей древесину, корни и хвойный опад, но и с облегчением транспорта  $\text{CO}_2$  из почвы в пристволовых зонах. Заметим, что по данным на этой площадке наблюдений, так же, как и на 500 м трансекте, наблюдается тренд к снижению уровня дыхания за 10 лет мониторинга, хотя за последние три года отмечается прирост эмиссии из почвы под сухостоем.

Второй вид так называемых «горячих точек»<sup>3</sup> — это значительная эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности обломков сухостоя. Начиная с мая 2021 г. на поверхности пней различной высоты, диаметра и степени разложения были проведены измерения эмиссии  $\text{CO}_2$  на десяти постоянных

<sup>3</sup> «Горячие точки» (hot spots) — обычно небольшие по площади участки почвы, которые служат временными или длительными значительно более мощными источниками  $\text{CO}_2$ , по сравнению с фоновым значением почвенной эмиссии.

точках. Как уже отмечалось, чаще встречается вариант, когда ель не вываливается с корнем, а обламывается на небольшой высоте, формируя пеня или остолоп. Нами была обнаружена положительная корреляционная связь ( $r_p = +0.71$ ,  $p < 0.05$ ) между высотой сухостоя (пня) и скоростью эмиссии  $\text{CO}_2$  с его обломочной поверхности, что свидетельствует о том, что этот эффект может быть связан, как с освоением грибами-ксилотрофами больших запасов мортмассы стволовой древесины, так и с усилением транспорта газа через вертикальные трещины в мертвой древесине (так называемый эффект “каминной трубы”).

Связи между степенью разложения древесины пней и эмиссией с их поверхности установить не удалось. По наиболее подробным за весь период наблюдений данным за 2024 г. (рис. 9), величина этого дополнительного локального источника в среднем в 7 раз превышает средний уровень дыхания почвы (в январе в 0.6 раз, в мае — в 13.3 раза), причем этот источник фиксируется и в снежный период, с ноября по апрель, лишь в январе значимо не отличаясь от фона почвенного дыхания. Корреляции между всеми потоками на рис. 9 являются высокими и положительными ( $r_p = +0.9$ ,  $p < 0.001$ ). Корреляция с температурой воздуха в момент измерений за год также была высокой и положительной и наблюдалась для всех оцениваемых здесь видов эмиссионных потоков (средний  $r_p = +0.86$ ,  $p < 0.001$ ).

Если рассчитать относительную площадь подобных зон повышенной эмиссии  $\text{CO}_2$

в основаниях сухостоя елей в зоне футпринта, то эта величина составляет, по нашим оценкам, от 7 до 10% пробных площадей ( $n = 10$ ). Площадь стволов на высоте обломочной поверхности, по тем же оценкам, составляет от 3 до 4% ( $n = 10$ ). В этом случае суммарный годовой вклад эмиссии со стороны сухостоя (включая зоны вокруг его оснований) можно оценить как 305–376 г  $\text{C} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ .

*Потери  $\text{CO}_2$  при разложении древесного валежа.* Наиболее простым косвенным способом оценки вклада дополнительной эмиссии диоксида углерода со стороны валежа является оценка по потере массы крупных древесных остатков. Для этого надо оценить удельные запасы углерода на пробных площадях и применить к ним известную константу разложения для данной породы (Harmon et al., 2000). Для ели европейской в зоне распространения российской тайги такие коэффициенты достаточно хорошо известны и могут быть оценены, в среднем, как 0.070  $\text{год}^{-1}$  (Khanina et al., 2023). Запасы валежника в 2024 г. были определены нами на постоянной пробной площади в исследуемом ельнике, как 642  $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$ . Если воспользоваться нашими данными по запасам мертвой древесины ели по 0–5 стадиям разложения на той же площади, а также по плотности древесины и содержанию углерода на различных стадиях разложения мертвой древесины ели в том же исследовании (Khanina et al., 2023), можно оценить текущий запас углерода валежника как 96.2 т  $\text{C} \text{га}^{-1}$ , что с учетом средней константы разложения древесины ели соответствует скорости потери углерода с раз-

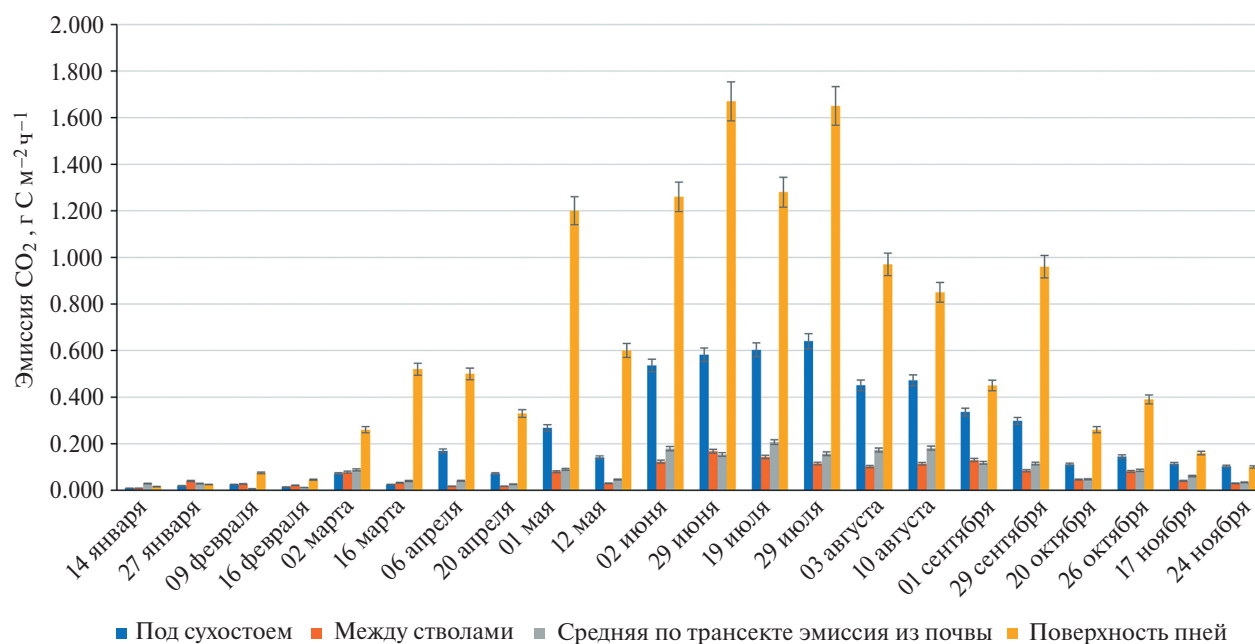


Рис. 9. Динамика эмиссии  $\text{CO}_2$  в микробиотопах лесной экосистемы с полностью погибшим древостоем в 2024 г. Приведены средние и их стандартные ошибки.

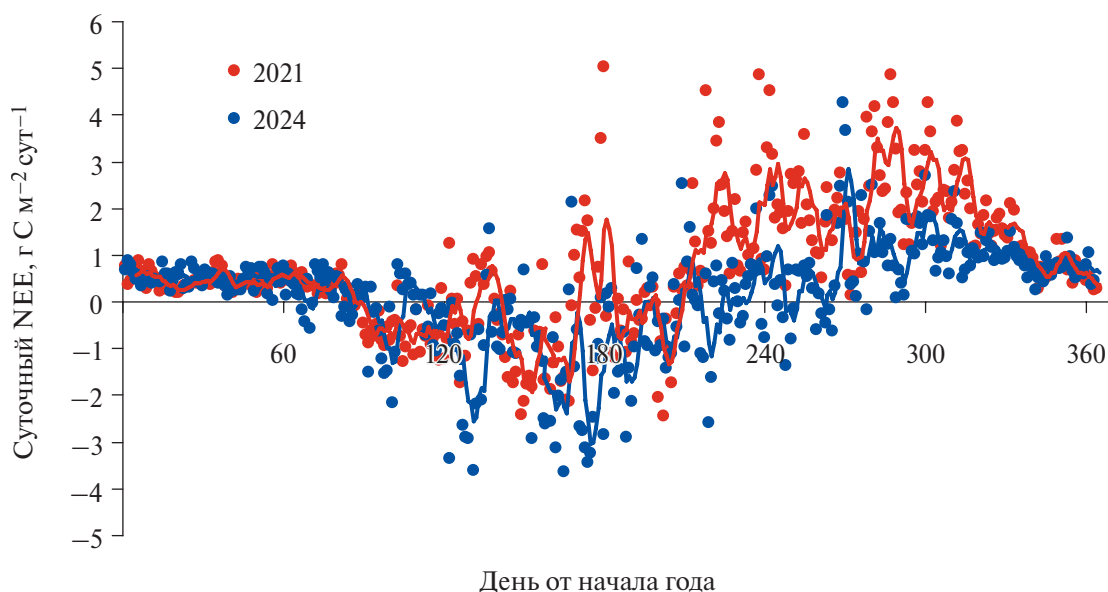
ложением валежа  $673 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Это очень значительная величина.

**Экосистемный обмен диоксида углерода.** Годовой чистый экосистемный обмен (NEE — net ecosystem exchange)  $\text{CO}_2$  в 2024 г. оценивался, как и в предшествующие годы, с применением метода турбулентных пульсаций. В первые месяцы 2021 и 2024 гг. (январь—март) исследуемая экосистема имела положительный NEE (являлась источником  $\text{CO}_2$  для атмосферы) со средней величиной потока  $+0.51 \pm 0.25 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  и небольшими межсуточными вариациями (рис. 10). С начала апреля межсуточные вариации существенно увеличиваются, появляются отрицательные значения (сток  $\text{CO}_2$  из атмосферы). Эти изменения связаны с началом теплого периода и активной вегетации. В мае—августе преобладают отрицательные среднесуточные величины NEE, что связано с более высоким уровнем фотосинтеза по сравнению с суммарным дыханием экосистемы. Однако уже с начала сентября наблюдаются преимущественно положительные суточные NEE при сохранении высоких межсуточных вариаций. Такая ситуация продолжается до конца ноября, когда экосистема входит в режим холодного периода с NEE, аналогичным стартовому периоду календарного года.

Следует обратить внимание, что в 2024 г. значения NEE за май—октябрь были в большей степени смещены в область отрицательных значений, соответствующую поглощению  $\text{CO}_2$  из атмосферы, по сравнению с 2021 г. Это изменение следует считать результатом восстановления растительного покрова, сопровождающегося увеличением запасов углерода в биомассе

подроста, подлеска и живого напочвенного покрова (см. табл. 1) после критического усыхания древостоя в 2021 г. Межгодовые различия углеродного баланса исследуемой экосистемы ярче проявляются в динамике кумулятивного NEE, то есть сумме суточных значений, отсчитываемой с начала года (рис. 11).

В периоды устойчивого возрастания кумулятивного NEE экосистема является источником  $\text{CO}_2$  для атмосферы, в периоды убывания — стоком. Чем больше угол наклона кумулятивного NEE, тем больше величины добавляемых суточных значений. В периоды с 1 января по 1 апреля в рассматриваемые годы наблюдений (2018, 2021, 2024) экосистема станции “Лог Таежный” являлась нетто-источником  $\text{CO}_2$ . Причем к началу апреля в разные годы были накоплены близкие суммы NEE ( $38\text{--}44 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ ), что обусловлено как небольшими величинами потоков в холодный период, так и тем, что различия еще не успевают накопиться. В конце марта—начале апреля экосистема становится нетто-стоком  $\text{CO}_2$  в результате активизации фотосинтеза, что выражается в снижении кумулятивного NEE. При этом до конца мая траектории кумулятивного NEE располагаются достаточно близко, то есть отличия углеродного баланса в разные годы малы. Однако расхождение межгодовых траекторий начинает существенно возрастать с начала июня. В 2018 г., когда запас живых деревьев был равным суммарному объему сухостоя и валежника (см. рис. 6), в период с 1 июня по конец сентября был отмечен сток  $\text{CO}_2$ , причем активнее всего углерод накапливался в июне и первой декаде июля 2018 г. до начала



**Рис. 10.** Суточный чистый экосистемный обмен  $\text{CO}_2$ . Приведены суточные значения и пятидневное скользящее среднее. Положительные значения соответствуют источнику  $\text{CO}_2$  в атмосферу, отрицательные — поглощению  $\text{CO}_2$  экосистемой.



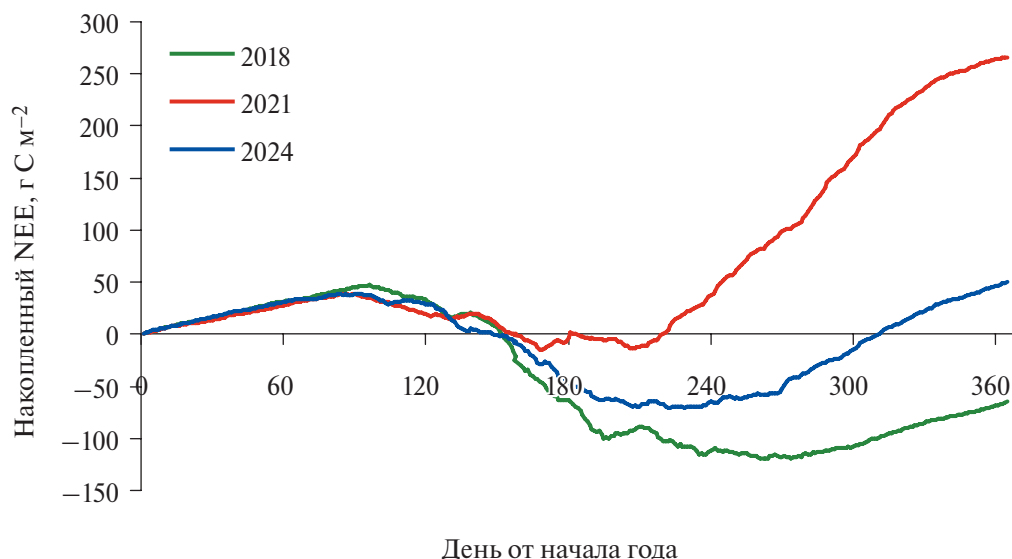


Рис. 11. Кумулятивный (накопленный) чистый экосистемный обмен  $\text{CO}_2$  (NEE) в экосистеме елового леса.

засушливого периода, который обычно наступает в третьем квартале.

В 2021 г. объем валежника был равен суммарному объему живой древесины и сухостоя (см. рис. 6). В засушливый период с 8 июня по 8 августа кумулятивный поток практически постоянен, то есть баланс  $\text{CO}_2$  был близок к нулевому. После сильной июльской засухи экосистема до конца этого года перешла в режим источника  $\text{CO}_2$ .

В 2024 г. основной объем древесины был представлен валежником, а молодой подрост и живой напочвенный покров обеспечивали сток  $\text{CO}_2$  до начала сухого периода в первых числах августа. В этом году сток  $\text{CO}_2$  отмечался в период с начала апреля по конец июля, что на два месяца меньше, чем в 2018 г.

Согласно полученным оценкам величина нетто-баланса в 2024 г. составила источник величиной  $+51 \pm 122 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , что меньше чем в 2021 г., когда лесные экосистемы впервые стали нетто-источником ( $+267 \pm 113 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ). Сокращение нетто-эмиссии в 2024 г. в основном связано с активным ростом подраста и подлеска после резкого осветления верхнего яруса древостоя.

Таким образом, исследуемая экосистема в 2024 г. представляла собой выраженный нетто-источник  $\text{CO}_2$  для атмосферы. Это соответствует тому, что в этом году вся зона охвата представляла собой полностью погибший древостой или с преобладанием запасов валежника над сухостоем. Если провести сравнение с ситуацией, которая была описана на той же территории в 2010–2011 гг. (Karelin et al., 2021), когда еще повсеместно преобладал живой древостой, то в этот период участок функционировал как значительный нетто-сток  $\text{CO}_2$  ( $-300 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ),

который в последующие годы демонстрировал тенденцию к снижению по мере отмирания елей (2018:  $-65 \pm 177 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ). При этом уровень дыхания почвы составлял тогда заметно меньшую величину ( $+625$ ), как и общий вклад эмиссии от сухостоя и валежника ( $+190$ ) (Karelin et al., 2021).

Оценки чистого экосистемного обмена, полученные на эколого-климатической станции “Лог Таежный”, согласуются с опубликованными исследованиями лесных экосистем России (Куричева и др., 2023) и других регионов мира (Rebane et al., 2019; Virkkala et al., 2022). Большинство исследований NEE лесных экосистем после нарушений, основанных на методе вихревой ковариации, посвящены оценке последствий лесных пожаров и сплошных рубок (Ольчев и др., 2017; Mamkin et al., 2016; Rebane et al., 2019), а оценке воздействия усыхания и распада древостоев на NEE уделяется меньше внимания. После нарушений лесные экосистемы становятся нетто-источником  $\text{CO}_2$  в течение нескольких лет после нарушения. Например, в ельниках Швеции, пораженных короедом-типографом, NEE составлял  $+80...+150 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  (Virkkala et al., 2022). В Канаде после пожаров экосистемы остаются нетто-источником  $\text{CO}_2$  до 20 лет (Bond-Lamberty et al., 2020). Спустя годы лес восстанавливает свою поглощающую способность. Время, необходимое для восстановления, зависит от интенсивности нарушений и внешних условий. Так после пожарных нарушений значение NEE лесной экосистемы может достигать отрицательных значений в течение 50 лет, после сплошных рубок — 20 лет, после вспышек численности насекомых-фитофагов и гибели древостоя — 5 лет (Rebane et al., 2019). Ожидается, что лесные экосистемы “Лога Таежного”

восстановятся до состояния нетто-поглотителя  $\text{CO}_2$  в ближайшие десятилетия в связи с хорошей сохранностью подроста и подлеска после распада древостоев.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2024 г. погодные условия отличались от последней климатической нормы, год был существенно теплее и несколько суше, что в целом продолжило тенденцию последних 4-х лет. При этом, хотя дыхание почвы по сравнению с 2023 г. несколько снизилось, тем не менее, тенденция последних четырех лет на его повышение сохранилась. Показатели эмиссии  $\text{CO}_2$ , связанные с сухостоем, также несколько возросли или мало изменились за последние 4 года. За весь наиболее обеспеченный наблюдениями период (2014–2024), тем не менее, сохраняется тренд в сторону небольшого снижения скорости эмиссии. В 2024 г. на территории “Лога Таежного” отсутствовали живые ели в составе древостоя (что было зафиксировано еще в 2023 г.), а также прошли массовые ветроломы, в результате которых остались пни высотой не более 5 м. В текущем состоянии экосистема представляет собой сильно выраженный годовой источник  $\text{CO}_2$  для атмосферы, который почти целиком определяется максимальными запасами валежника и остатков сухостоя, а также дыханием почвы.

Как показывают наши оценки в пересчете на единицу площади, с использованием накопленных данных по эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы, от сухостоя и валежника, в настоящий период (2024 г.) поток экосистемного дыхания из всех перечисленных резервуаров с учетом дополнительных источников на 95.5%, т.е. почти вдвое, превышает аналогичный показатель начала наблюдений на эколого-климатической станции в 2009 г. ( $900 < 1760 \text{ г } \text{C} \cdot \text{м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), при этом основную часть прироста составляет в настоящее время эмиссия от валежника (54.5%), на втором месте эмиссия от сухостоя и связанных с ним дополнительных источников (32.9%), и лишь на последнем месте прирост от усиления дыхания почвы (12.6%). При этом, в 2024 г. на основании данных по экосистемному дыханию и нетто-балансу углерода можно с достаточно высокой степенью доверия оценить вклад продукции яруса подроста и подлеска ( $-1535 \text{ г } \text{C} \cdot \text{м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), поскольку живых деревьев первого яруса древостоя на участке не осталось.

Наблюдаемое в настоящее время состояние изучаемой лесной экосистемы, ставшей устойчивым источником  $\text{CO}_2$  для атмосферы, является прямым следствием полной гибели древостоя, произошедшей в результате усиливающегося за последние 15–16 лет потепления,

сопровождающегося периодическими засухами, и связанных с ними вторичных деструктивных факторов (вспышки численности насекомых-фитофагов и ксилотрофных грибов, гибель деревьев, массовые ветроломы). При этом повышение температуры, вероятнее всего, не оказало существенного влияния на этот процесс в качестве прямого фактора. Это можно констатировать, как в отношении аномально теплого 2024 г., так и всего наиболее теплого периода наших наблюдений (2020–2024 гг.).

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы 3.3 научно-исследовательских, технологических работ НИУ Росгидромета “Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически-активных веществ”, а также по программе Важнейшего инновационного проекта государственного значения “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). Д.В. Карелин выполнял аналитическую работу в рамках темы Государственного задания института географии РАН (FMWS-2024-0010). Д.Г. Замолотчиков проводил анализ данных в рамках темы ЦЭПЛ РАН (124013000750-1).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим редакторов и анонимных рецензентов за содержательные комментарии к этой статье, которые помогли ее значительно улучшить.

### FUNDING

The study was carried out within the framework of the topic 3.3 of the research and technological works of the National Research University Roshydromet “Development of methods and technologies for computational monitoring of anthropogenic emissions and removals by sinks of greenhouse gases and short-lived climatically active substances,” as well as under the program of the Most Important Innovative Project of National Importance “Development of a system for ground and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the Russian Federation, ensuring creating a system for recording data on the fluxes of climatically active

substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecosystems” (reg. no 123030300031-6). D.V. Karelin carried out analytical work within the framework of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (FMWS-2024-0010). D.G. Zamolodchikov analyzed the data within the framework of the CEPF RAS State Assignment (124013000750-1).

## ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the editors and anonymous reviewers for their insightful comments on this article, which helped to improve it significantly.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Изд-во МГУ, 1956. 127 с.
- Алферов А.М. и др. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
- Бурба Г.Г. и др. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практич. руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.
- Гитарский М.Л. и др. Сезонная изменчивость эмиссии диоксида углерода при разложении елового валежа южной тайги Валдая // Лесоведение. 2020. № 3. С. 239–249.  
<https://doi.org/10.31857/S0024114820030055>
- Докл. об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 135 с.
- Замолодчиков Д.Г. и др. Мониторинг циклов диоксида углерода и водяного пара на полигоне “Лог Таежный” (Валдайский национальный парк) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 1. С. 54–68.  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-1-54-68>
- Заугольнова Л.Б., Морозова О.В. Типология и классификация лесов Европейской России: методические подходы и возможности их реализации // Лесоведение. 2006. № 1. С. 34–48.
- Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г. Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в лесах Валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37.  
<https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>
- Карелин Д.В., Куманяев А.С., Шилкин А.В., Коротков В.Н., Замолодчиков Д.Г. В чем смысл оценки точечных источников и стоков парниковых газов в лесных экосистемах? / Научные основы устойчивого управления лесами: матер. Всерос. научн. конф. с междунар. уч., посвящ. 30-летию ЦЭПЛ РАН (25–29 апреля 2022 г., Москва). М.: ЦЭПЛ РАН, 2022. С. 228–230.
- Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г. Эффект усиления эмиссии CO<sub>2</sub> в окнах распада лесов Валдая // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 2. С. 60–68.
- Кудеяров В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1011–1022.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>
- Курганова И.Н., Горчарова О.Ю., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Кузнецов М.А., Лопес де Гереню В.О., Мошкина Е.В., Суховеева О.Э., Хорошаев Д.А. Определение эмиссии CO<sub>2</sub> из почв камерным методом в различных типах экосистем. М.: Перо, 2024. 28 с.
- Курганова И.Н. и др. Пилотная национальная сеть мониторинга дыхания почвы на территории России: первые результаты и перспективы развития // Докл. РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 519. № 1. С. 550–559.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739724110197>
- Куричева О.А. и др. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть Ruflux // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 4. С. 512–535.
- Люри Д.И., Карелин Д.В., Кудиков А.В., Горячкин С.В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060–1072.
- Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации. Приказ Минприроды России от 18.08.2014 № 367 (ред. от 02.08.2023). (Зарегистрировано в Минюсте России 29.09.2014 № 34186). [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_169590/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590/) (дата обращения 21.03.2025).
- Ольчев А.В., Мамкин В.В., Авилов В.К., Байбар А.С., Иванов Д.Г., Курбатова Ю.А. Сезонная динамика потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла на свежей сплошной вырубке в южно-таежной зоне европейской части России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28. № 4. С. 5–23.  
<https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-4-5-23>
- Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций, 2015. [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf) (дата обращения 21.03.2025).
- Романовская А.А. Климатический мониторинг: методы, результаты, перспективы развития в России: в кн. Глобальное потепление: картография российских климатических наук. СПб.: Изд-во Европейского ун-та в Санкт-Петербурге, 2024. С. 255–289.



- Романовская А.А., Гинзбург В.А., Гладильщикова А.А. Возможности усовершенствования системы расчетного мониторинга антропогенных выбросов парниковых газов и черного углерода на территории Российской Федерации // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6 (201). С. 37–52.  
<https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-37-52>
- Сафонов С.С., Карелин Д.В., Грабар В.А., Латышев Б.А., Грабовский В.И., Уварова Н.Е., Замолодчиков Д.Г., Коротков В.Н., Гитарский М.Л. Эмиссия диоксида углерода от разложения валежа в южнотаёжном ельнике // Лесоведение. 2012. № 5. С. 44–49.
- Суховеева О.Э., Карелин Д.В. Оценка дыхания почв с помощью модели Райха-Хашимото: параметризация и прогноз // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 4. С. 519–527.
- Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы, и осины в Европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36–46.
- Федоров С.Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. 264 с.
- Юзбеков А.К., Замолодчиков Д.Г., Иващенко А.И. Фотосинтез у ели европейской в лесных экосистемах экспериментального полигона “Лог Таежный” // Вестн. МГУ. Серия 16. Биология. 2014. № 4. С. 32–35.
- Юзбеков А.К., Иващенко А.И., Куманяев А.С. Оценка углекислотного газообмена ели европейской в лесных сообществах Валдая // Успехи современного естествознания. 2017. № 6. С. 118–122.
- Baldocchi D.D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology // Global Change Biology. Vol. 26. P. 242–260.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.14807>
- GitarSKIY M.L., Zamolodchikov D.G., Mukhin V.A., Grabar V.A., Diyarova D.K., Ivashchenko A.I. Carbon Fluxes from Coarse Woody Debris in Southern Taiga Forests of the Valdai Upland // Rus. J. Ecol. 2017. Vol. 48. № 6. P. 539–544.  
<https://doi.org/10.1134/S1067413617060030>
- Giasson M.-A., et al. Soil respiration in a northeastern US temperate forest: a 22-year synthesis // Ecosphere. 2013. Vol. 4. № 11. Art. 140.  
<http://dx.doi.org/10.1890/ES13.00183.1>
- Hamdi S., Moyano F., Sall S., Bernoux M., Chevallier T. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions // Soil Biol. and Biochem. 2013. Vol. 58. P. 115–126.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.012>
- Hibbard K.A., Law B.E., Reichstein M., Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems // Biogeochemistry. 2005. Vol. 73. P. 29–70.  
<https://doi.org/10.1007/s10533-004-2946-0>
- Huang N., Wang L., Song X.-P., Black T.A., Jassal R.S., Myneni R.B., Wu C., Wang L., Song W., Ji D., Yu S., Niu Z. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover // Sci. Advances. 2020. Vol. 6. Art. 8508.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8508>
- IPCC: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Eds.). Cambridge, UK and NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2022.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K.J., Stell E., Herrmann V., Horn M., Kholod N., Manzon J., Marchesi R., Paredes D., Bond-Lamberty B.P. A Global Database of Soil Respiration Data. Ver. 5.0. Oak Ridge: ORNL DAAC, 2021.  
<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1827>
- Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., GitarSKIY M.L. Factors of Spatiotemporal Variability of CO<sub>2</sub> Fluxes from Soils of Southern Taiga Spruce Forests of Valdai // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7 (7). P. 743–752.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S. Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests // Dokl. Biol. Sci. 2017b. Vol. 475. P. 165–168.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Pochikalov A.V., GitarSKIY M.L. Microbial and root components of respiration of Sod-Podzolic soils in boreal forest // Contemporary Problems of Ecology. 2017a. Vol. 10 (7). P. 717–727.  
<https://doi.org/10.1134/S199542551707006X>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Kumanyaev A.S., Popov S.Yu., Tel'nova N.O., GitarSKIY M.L. The Long-Term Effect of Ongoing Spruce Decay on Carbon Exchange in Taiga Forests // Dokl. Earth Sci. 2020. Vol. 493 (1). P. 558–561.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., GitarSKIY M.L. The effect of tree mortality on CO<sub>2</sub> fluxes in an old-growth spruce forest // European J. Forest Res. 2021. Vol. 140 (2). P. 287–305.
- Khanina L., Bobrovsky M., Smirnov V., Romanov M. Wood decomposition, carbon, nitrogen, and pH values in logs of 8 tree species 14 and 15 years after a catastrophic windthrow in a mesic broad-leaved forest in the East European plain // Forest Ecology and Management. 2023. Vol. 545. Art. 121275. P. 1–17.

- Kljun N., Rotach M.W., Calanca P.* A simple parameterisation for flux footprint predictions // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2004. Vol. 112. P. 503–523.
- Kurganova I.N., et al.* A Pilot National Network for Monitoring Soil Respiration In Russia: First Results and Prospects of Development // *Dokl. Earth Sci.* 2024. Vol. 519. P. 1947–1954.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24603377>
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova I., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A.* Changes in net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub>, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: Results from an experimental and modeling analysis // *Env. Res. Let.* 2016. Vol. 11. Art. 125012.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5189>
- Mukhin V.A., Diyarova D.K., Gitarskiy M.L., Zamolodchikov D.G.* Carbon and Oxygen Gas Exchange in Woody Debris: The Process and Climate-Related Drivers // *Forests.* 2021. Vol. 12. Art. 1156.  
<https://doi.org/10.3390/f12091156>
- Osipov A.F.* Effect of interannual difference in weather conditions of the growing season on the CO<sub>2</sub> emission from the soil surface in the middle-taiga cowberry–lichen pine forest (Komi Republic) // *Eurasian Soil Sci.* 2018. Vol. 51. P. 1419–1426.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229318120086>
- Pastorello G., et al.* The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data // *Sci. Data.* 2020. Vol. 7. Art. 225.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>
- Rebane S., Jõgiste K., Põldveer E., Stanturf J.A., Metslaid M.* Direct measurements of carbon exchange at forest disturbance sites: a review of results with the eddy covariance method // *Scandinavian J. of Forest Res.* 2019. Vol. 34 (7). P. 585–597.  
<https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1659849>
- Smagin A.V., Karelin D.V.* Effect of Wind on Soil-Atmosphere Gas Exchange // *Eurasian Soil Sci.* Vol. 54 (3). P. 372–380.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229321030133>
- Virkkala A.-M., et al.* The ABCflux database: Arctic–boreal CO<sub>2</sub> flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems // *Earth Syst. Sci. Data.* 2022. Vol. 14. P. 179–208.  
<https://doi.org/10.5194/essd-14-179-2022>

## Variability of CO<sub>2</sub> Fluxes During Spruce Forest Dieback at “Log Tayozhny” Eco-Climatic Station in Novgorod Oblast, Russia

A. V. Shilkin<sup>a, b, c</sup>, D. V. Karelin<sup>d, \*</sup>, D. G. Zamolodchikov<sup>b, c</sup>,  
A. S. Kumanyaev<sup>b, c</sup>, S. V. Bubenchikov<sup>e</sup>, A. S. Marunich<sup>e</sup>, K. N. Visheratin<sup>a</sup>,  
D. A. Nikitin<sup>f</sup>, and V. N. Korotkov<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup>Federal State Budgetary Institution “RPA “Typhoon”, Obninsk, Russia

<sup>b</sup>Center for Forest Ecology and Productivity Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>c</sup>Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>d</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>e</sup>Valdai Branch of the State Hydrological Institute, Valdai, Russia

<sup>f</sup>V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

\*e-mail: dkarelin7@gmail.com

The article presents the results of long-term monitoring of net ecosystem exchange and carbon dioxide emissions from soil and dead wood in a forest ecosystem undergoing drying and spruce stand dieback at the footprint of the “Log Tayozhny” eco-climatic field station (Valdai National Park, Novgorod oblast, Russia). The death and decay of overmature even-aged spruce stands caused by periodic droughts, the impact of bark beetle and wood-destroying fungi, and windfalls result in reduction of primary production and increase of the respiration component of the CO<sub>2</sub> balance and its long-term shift to the region of a pronounced carbon source for the atmosphere, whereas the direct impact of rising temperatures does not lead to such an effect.

**Keywords:** soil respiration, monitoring, carbon dioxide, net ecosystem exchange, spruce forest, forest dieback, warmest period, eco-climatic station

## REFERENCES

- Alisov B.P. *Klimat SSSR* [Climate of the USSR]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1956. 127 p.
- Alferov A.M., Blinov V.G., Gitarskii M.L., Grabar V.A., Zamolodchikov D.G., Zinchenko A.V., Ivanova N.P., Ivakhov V.M., Karaban' R.T., Karelin D.V., Kalyuzhnyi I.L., Kashin F.V., Konyushkov D.E., Korotkov V.N., Krovotyntsev V.A., Marunich A.S., Paramonova N.N., Romanovskaya A.A., Trunov A.A., Shilkin A.V., Yuzbekov A.K. *Monitoring potokov parnikovyykh gazov v prirodnykh ekosistemakh* [Monitoring of Greenhouse Gas Flows in Natural Ecosystems]. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Gitarskii M.L., Blinov V.G., Eds. Saratov: Amirit Publ., 2017. 279 p.
- Baldocchi D.D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Glob. Change Biol.*, vol. 26, pp. 242–260. <https://doi.org/10.1111/gcb.14807>
- Burba G.G., Kurbatova Yu.A., Kuricheva O.A., Avilov V.K., Mamkin V.V. *Metod turbulentnykh pul'satsii. Kratkoe prakticheskoe rukovodstvo* [Method of Turbulent Pulsations. Brief Practical Guide]. Moscow: IPEE im. A.N. Severtsova RAN, 2016. 223 p.
- Giasson M.-A., Ellison A.M., Bowden R.D., Crill P.M., Davidson E.A., Drake J.E., Frey S.D., Hadley J.L., Lavine M., Melillo J.M., Munger J.W., Nadelhoffer K.J., Nicoll L., Ollinger S.V., Savage K.E., Steudler P.A., Tang J., Varner R.K., Wofsy S.C., Foster D.R., Finzi A.C. Soil respiration in a northeastern US temperate forest: A 22-year synthesis. *Ecosphere*, 2013, vol. 4, no. 11, art. 140.
- Gitarskiy M.L., Zamolodchikov D.G., Mukhin V.A., Grabar V.A., Diyarova D.K., Ivashchenko A.I. Carbon fluxes from coarse woody debris in southern taiga forests of the Valdai Upland. *Russ. J. Ecol.*, 2017, vol. 48, no. 6, pp. 539–544. <https://doi.org/10.1134/S1067413617060030>
- Gitarskii M.L., Zamolodchikov D.G., Mukhin V.A., Diyarova D.K., Grabar V.A., Karelin D.V., Ivashchenko A.I., Marunich A.S. Seasonal variability of carbon dioxide emissions during the decomposition of spruce deadwood in the southern taiga of Valdai. *Lesoved.*, 2020, no. 3, pp. 239–249. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114820030055> <https://doi.org/10.1890/ES13.00183.1>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2024 god* [Report on the Climate Features in the Territory of the Russian Federation for 2024]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2025. 135 p.
- Fedorov S.F. *Issledovanie elementov vodnogo balansa v lesnoi zone Evropeiskoi territorii SSSR* [Study of Water Balance Elements in the Forest Zone of the European Territory of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 264 p.
- Hibbard K.A., Law B.E., Reichstein M., Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 2005, vol. 73, pp. 29–70. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-2946-0>
- Huang N., Wang L., Song X.-P., Black T.A., Jassal R.S., Myneni R.B., Wu C., Wang L., Song W., Ji D., Yu S., Niu Z. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Sci. Adv.*, 2020, vol. 6, art. 8508. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8508>
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Shukla P.R., Skea J., Slade R., et al., Eds. Cambridge, New York: CUP, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K.J., Stell E., Herrmann V., Horn M., Kholod N., Manzon J., Marchesi R., Paredes D., Bond-Lamberty B.P. *A Global Database of Soil Respiration Data. Ver. 5.0*. Oak Ridge: ORNL DAAC, 2021. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1827>
- Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitarskii M.L. Factors of spatiotemporal variability of CO<sub>2</sub> fluxes from soils of southern taiga spruce forests of Valdai. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2014, vol. 7, no. 7, pp. 743–752.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Pochikalov A.V., Gitarskii M.L. Microbial and root components of respiration of Sod-Podzolic soils in boreal forest. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2017a, vol. 10, no. 7, pp. 717–727. <https://doi.org/10.1134/S199542551707006X>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S. Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests. *Dokl. Biol. Sci.*, 2017b, vol. 475, pp. 165–168.
- Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G. The effect of increasing CO<sub>2</sub> emissions in the forest dieback gaps in Valdai. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017c, no. 2, pp. 60–68. (In Russ.).
- Karelin D.V., Azovskii A.I., Kumanyaev A.S., Zamolodchikov D.G. The importance of spatial and temporal scale in the analysis of CO<sub>2</sub> emission factors from soils in the forests of the Valdai Upland. *Lesoved.*, 2019, no. 1, pp. 29–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Kumanyaev A.S., Popov S.Yu., Tel'nova N.O., Gitarskiy M.L. The long-term effect of ongoing spruce decay on carbon exchange in taiga forests. *Dokl. Earth Sci.*, 2020, vol. 493, no. 1, pp. 558–561.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitarskiy M.L. The



- effect of tree mortality on CO<sub>2</sub> fluxes in an old-growth spruce forest. *Eur. J. For. Res.*, 2021, vol. 140, no. 2, pp. 287–305.
- Karelin D.V., Kumanyaev A.S., Shilkin A.V., Korotkov V.N., Zamolodchikov D.G. What is the meaning of assessing point sources and sinks of greenhouse gases in forest ecosystems? In *Nauchnye osnovy ustoychivogo upravleniya lesami. Materialy vseross. nauch. konf. s mezhdun. uchastiem, posvyashchennoi 30-letiyu CEPL RAN. Moskva, 25–29 aprelya 2022 g.* [Scientific Foundations of Sustainable Forest Management. Proceedings of the All-Russian Sci. Conf. with Int. Participation, Dedicated to the 30<sup>th</sup> Anniversary of the CEPL RAS. Moscow, April 25–29, 2022]. Moscow, 2022, pp. 228–230. (In Russ.).
- Khanina L., Bobrovsky M., Smirnov V., Romanov M. Wood decomposition, carbon, nitrogen, and pH values in logs of 8 tree species 14 and 15 years after a catastrophic windthrow in a mesic broad-leaved forest in the East European plain. *For. Ecol. Manage.*, 2023, vol. 545, art. 121275.
- Kljun N., Rotach M.W., Calanca P. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 2004, vol. 112, pp. 503–523.
- Kudeyarov V.N. Soil respiration and carbon sequestration: A review. *Eurasian Soil Sci.*, 2023, vol. 56, pp. 1191–1200.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>
- Kurganova I.N., Gorcharova O.Yu., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Kuznetsov M.A., Lopes de Gerenyu V.O., Moshkina E.V., Sukhoveeva O.E., Khoroshaev D.A. *Opredelenie emissii CO<sub>2</sub> iz pochv kamernym metodom v razlichnykh tipakh ekosistem* [Determination of CO<sub>2</sub> Emissions from Soils by the Chamber Method in Various Types of Ecosystems]. Moscow: Pero Publ., 2024a. 28 p.
- Kurganova I.N., Karelin D.V., Kotlyakov V.M., Prokushkin A.S., Zamolodchikov D.G., Ivanov A.V., Ilyasov D.V., Khoroshaev D.A., Lopez de Gerenyu V.O., Bobrik A.A., Bryanin S.V., Goncharova O.Yu., Ershov V.V., Ivanov D.G., Zorina S.Yu., Kaganov V.V., Kapitsa E.A., Koptsik G.N., Kuznetsov M.A., Kumanyaev A.S., Kuprin A.V., Mamai A.V., Matvienko A.I., Makhnykina A.V., Mostovaya A.S., Moshkina E.V., Mochenov S.Yu., Ryabov N.S., Sapronov D.V., Sidenko N.V., Sokolova L.G., Sorokin A.S., Suvorov G.G., Sukhoveeva O.E., Chumbaev A.S., Shmakova N.Yu. A pilot national network for monitoring soil respiration in Russia: First results and prospects of development. *Dokl. Earth Sci.*, 2024b, vol. 519, pp. 1947–1954.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24603377>
- Kuricheva O.A., Avilov V.K., Varlagin A.V., Gitarskii M.L., Dmitrichenko A.A., Dyukarev E.A., Zagirova S.V., Zamolodchikov D.G., Zyryanov V.I., Karelin D.V., Karsanaev S.V., Kurganova I.N., Lapshina E.D., Maksimov A.P., Maksimov T.Kh., Mamkin V.V., Marunich A.S., Miglovets M.N., Mikhailov O.A., Panov A.V., Prokushkin A.S., Sidenko N.V., Shilkin A.V., Kurbatova Yu.A. Monitoring of ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia: The Ruflux network. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 512–535. (In Russ.).
- Lyuri D.I., Karelin D.V., Kudikov A.V., Goryachkin S.V. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, pp. 935–947.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229313070041>
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova I., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A. Changes in net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub>, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: Results from an experimental and modeling analysis. *Environ. Res. Lett.*, 2016, vol. 11, art. 125012.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5189>
- Mukhin V.A., Diyarova D.K., Gitarskiy M.L., Zamolodchikov D.G. Carbon and oxygen gas exchange in woody debris: The process and climate-related drivers. *Forests*, 2021, vol. 12, art. 1156.  
<https://doi.org/10.3390/f12091156>
- Olchev A.V., Mamkin V.V., Avilov V.K., Baibar A.S., Ivanov D.G., Kurbatova Yu.A. Seasonal dynamics of carbon dioxide, sensible and latent heat fluxes in a fresh clear-cut forest in the southern taiga zone of the European part of Russia. *Probl. Ekol. Monitor. Modelir. Ekosist.*, 2017, vol. 28, no. 4, pp. 5–23. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-4-5-23>
- On approval of the List of forest vegetation zones of the Russian Federation and the List of forest areas of the Russian Federation, Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 367, August 18, 2014. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_169590](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590) (accessed: 21.03.2025). (In Russ.).
- Osipov A.F. Effect of interannual difference in weather conditions of the growing season on the CO<sub>2</sub> emission from the soil surface in the middle-taiga cowberry-lichen pine forest (Komi Republic). *Eurasian Soil Sci.*, 2018, vol. 51, pp. 1419–1426.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229318120086>
- Paris Agreement (2015). UN, 2015. Available at: [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf) (accessed: 21.03.2025).
- Pastorello G., Trotta C., Canfora E., et al. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Sci. Data*, 2020, vol. 7, art. 225.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>
- Rebane S., Jõgiste K., Põldveer E., Stanturf J.A., Metslaid M. Direct measurements of carbon exchange at forest disturbance sites: a review of results with the eddy

- covariance method. *Scand. J. For. Res.*, 2019, vol. 34, no. 7, pp. 585–597.  
<https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1659849>
- Romanovskaya A.A. Climate monitoring: methods, results, development prospects In Russia. In *Global'noe poteplenie: kartografiya rossiiskikh klimaticheskikh nauk* [Global Warming: Cartography of Russian Climate Sciences]. St. Petersburg: Izd-vo Evrop. Univ., 2024, pp. 255–289. (In Russ.).
- Romanovskaya A.A. Ginzburg V.A., Gladil'shchikova A.A. Possibilities of improving the system of calculation monitoring of anthropogenic emissions of greenhouse gases and black carbon in the Russian Federation. *Probl. Prognoz.*, 2023, no. 6, pp. 37–52. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-37-52>
- Safonov S.S., Karelin D.V., Grabar V.A., Latyshev B.A., Grabovskii V.I., Uvarova N.E., Zamolodchikov D.G., Korotkov V.N., Gitarskii M.L. Carbon dioxide emission from deadwood decomposition in a southern taiga spruce forest. *Lesoved.*, 2012, no. 5, pp. 44–49. (In Russ.).
- Smagin A.V., Karelin D.V. Effect of wind on soil-atmosphere gas exchange. *Eurasian Soil Sci.*, 2021, vol. 54, no. 3, pp. 372–380.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229321030133>
- Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Soil respiration assessment using the Reich-Hashimoto model: parameterization and forecast. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2022, vol. 86, no. 4, pp. 519–527. (In Russ.).
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I. Allometric equations for phytomass based on data from pine, spruce, birch, and aspen trees in the European part of Russia. *Lesoved.*, 1996, no. 6, pp. 36–46. (In Russ.).
- Virkkala A.-M., Natali S.M., Rogers B.M., Watts J.D., Savage K., Connon S.J., Mauritz M., Schuur E.A.G., Peter D., Minions C., Nojeim J., Commene R., Emmerton C.A., Goeckede M., Helbig M., Holl D., Iwata H., Kobayashi H., Kolari P., López-Blanco E., Marushchak M.E., Mastepanov M., Merbold L., Parmentier F.-J.W., Peichl M., Sachs T., Sonnentag O., Ueyama M., Voigt C., Aurela M., Boike J., Celis G., Chae N., Christensen T.R., Bret-Harte M.S., Dengel S., Dolman H., Edgar C.W., Elberling B., Euskirchen E., Grelle A., Hatakka J., Humphreys E., Järveoja J., Kotani A., Kutzbach L., Laurila T., Lohila A., Mammarella I., Matsuura Y., Meyer G., Nilsson M.B., Oberbauer S.F., Park S. J., Petrov R., Prokushkin A.S., Schulze C., St. Louis V.L., Tuittila E.-S., Tuovinen J.-P., Quinton W., Varlagin A., Zona D., Zyryanov V.I. The ABCflux database: Arctic–boreal CO<sub>2</sub> flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems. *Earth Syst. Sci. Data*, 2022, vol. 14, pp. 179–208.  
<https://doi.org/10.5194/essd-14-179-2022>
- Yuzbekov A.K., Zamolodchikov D.G., Ivashchenko A.I. Photosynthesis in Norway spruce in forest ecosystems of the Log Tayezhny experimental site. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 16: Biol.*, 2014, no. 4, pp. 32–35. (In Russ.).
- Yuzbekov A.K., Ivashchenko A.I., Kumanyaev A.S. Assessment of carbon dioxide exchange in Norway spruce in Valdai Forest communities. *Uspekhi Sovrem. Estestvozn.*, 2017, no. 6, pp. 118–122. (In Russ.).
- Zamolodchikov D.G., Gitarskii M.L., Shilkin A.V., Marunich A.S., Karelin D.V., Blinov V.G., Ivashchenko A.I. Monitoring carbon dioxide and water vapor cycles at the Log Tayezhny test site (Valdai National Park). *Fund. Priklad. Klimatol.*, 2017, no. 1, pp. 54–68. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-1-54-68>
- Zaugol'nova L.B., Morozova O.V. Typology and classification of forests of European Russia: methodological approaches and possibilities of their implementation. *Lesoved.*, 2006, no. 1, pp. 34–48. (In Russ.).