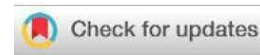


УДК 631.433.3+631.42

<https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.353>

## Трансплантация почвенных монолитов как метод изучения динамики эмиссии углекислого газа из почв труднодоступных экосистем

© 2026 А. Е. Зеленцова <sup>1</sup>, Е. А. Дюкарев <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: [nastya\\_zel@mail.ru](mailto:nastya_zel@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБУ ВО «Югорский государственный университет», ул. Чехова, 16, г. Ханты-Мансийск, 628012, Россия. E-mail: [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru)

**Цель исследования.** Провести анализ динамики эмиссии углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) из почв после трансплантации почвенных монолитов, изучить вклад различных факторов (тип экосистемы, влажность и температура поверхности почвы) и оценить применимость метода для мониторинга почвенного дыхания.

**Место и время проведения.** Исследования проводили на территории геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в 2024-2025 гг.

**Методы.** В почве определяли содержание общего и водорастворимого углерода и азота, а также актуальную кислотность. Измерение эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв проводили камерным методом.

**Основные результаты.** Интенсивность эмиссии углекислого газа из почвенных монолитов изменялась в зависимости от места их отбора. Наибольшая эмиссия углекислого газа ( $2,94 \pm 1,00 \text{ г CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ) наблюдалась в почвенном монолите пробной площадки (ПП) Коломино (ненарушенная экосистема). В монолитах, отобранных из инвазионно-нарушенного кедровника, потоки были почти в 2 раза ниже: ПП Ипатово  $1,77 \pm 0,66 \text{ г CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ , ПП Лучаново 2025  $1,45 \pm 0,52 \text{ г CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ . Почвенное дыхание ПП Вырубки составило  $0,73 \pm 0,31 \text{ г CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ . Корреляционный анализ показал сильную положительную связь эмиссии  $\text{CO}_2$  с температурой почвы ( $r = 0,78-0,97$ ) и вариабельную реакцию на влажность в зависимости от типа нарушения.

**Заключение.** Метод трансплантации почвенных монолитов позволяет сравнивать почвы разной степени нарушенности при идентичных климатических параметрах, что исключает влияние внешних факторов на результаты. Синхронность измерений обеспечивает возможность исследования пробных площадок в течение одного дня, минимизируя временные вариации метеорологических условий. Однако метод трансплантации почвенных образцов целесообразно использовать исключительно для сравнительного анализа интенсивности почвенного дыхания в различных экосистемах при стандартизированных климатических условиях с целью идентификации лимитирующих факторов; его применение для количественной оценки реальных потоков  $\text{CO}_2$  требует дополнительной валидации.

**Ключевые слова:** эмиссия углекислого газа; почвы; экосистемы; почвенный углерод; C/N.

**Цитирование:** Зеленцова А.Е., Дюкарев Е.А. Трансплантация почвенных монолитов как метод изучения динамики эмиссии углекислого газа из почв труднодоступных экосистем // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 2. e353. DOI: [10.31251/pos.v9i2.353](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.353)

### ВВЕДЕНИЕ

Почва является важнейшим компонентом экосистем и играет ключевую роль в поддержании экологического баланса (Добровольский, Никитин, 2012). Растения, в свою очередь, служат связующим звеном между почвой и атмосферой, активно участвуя в ключевых биогеохимических процессах: фотосинтезе, круговороте воды и углеродном обмене (Silva, Lambers, 2021). Наземные растения оказывают комплексное влияние на функционирование почвы. Например, воздействие на почвенное дыхание осуществляется через несколько взаимосвязанных механизмов: с одной стороны, через корневую систему – посредством корневого дыхания и выделения корневых экссудатов, служащих субстратом для почвенных микроорганизмов, а с другой – через надземную часть растительного покрова, как фактора образования подстилки из растительного опада и источника питательных элементов (Xu, Shang, 2016). Таким образом, растения создают единую систему взаимодействия, обеспечивающую обмен веществ между почвой и атмосферой. Атмосфера имеет ключевое значение в регулировании климатических условий, которые влияют на системы почвы и растений. Климатические факторы определяют скорость биохимических процессов в почве, интенсивность разложения органических веществ, миграцию почвенных элементов и рост растительности. Температура, влажность, количество осадков, режим промерзания и солнечное

излучение напрямую воздействуют на активность почвенных микроорганизмов, скорость корневого дыхания и процессы фотосинтеза (Семенов и др., 2022; Farquhar et al., 1980). Следовательно, взаимосвязи между почвой, растительностью и атмосферой сложны и крайне восприимчивы к погодным колебаниям и долгосрочным изменениям климатических условий. Любое изменение климата может привести к нарушению этого хрупкого баланса, что, в свою очередь, повлияет на все компоненты экосистемы и может вызвать цепную реакцию изменений в природной среде (Zhu et al., 2024).

Эмиссия углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) из почвы (почвенное дыхание) представляет собой совокупность автотрофных и гетеротрофных процессов, являясь одной из основных составляющих глобального цикла углерода (Курганова и др., 2022; Гончарова и др., 2019). Дыхание почвы характеризуется высокой неоднородностью и вносит значительный вклад в круговорот углерода (Курганова и др., 2020). В лесных экосистемах на его долю может приходиться от 40 до 80% суммарного количества высвобожденного  $\text{CO}_2$  (Yuste et al., 2005; Joo et al., 2012).

Почвенный покров Российской Федерации играет ключевую роль в глобальном углеродном цикле, что обусловлено значительной площадью территории (11,7% мировой суши) и высокими запасами почвенного органического углерода (Кудеяров, 2018). Однако современные оценки основных составляющих углеродного цикла остаются неполными как для отдельных регионов, так и для страны в целом (Курганова и др., 2006; Махныкина и др., 2016). Эта проблема особенно актуальна в контексте выполнения международных климатических обязательств и разработки стратегии углеродного регулирования.

По данным (Nilsson et al., 2000), величина углеродного баланса на территории Российской Федерации характеризуется значительной (не менее 50%) степенью неопределенности вследствие недооценки от 5 до 40% основных потоков углерода. Помимо этого, наблюдается пространственно-временная изменчивость суммарного почвенного дыхания, как на месячном уровне (25–56%), так и на годовом (20–22%) (Курганова и др., 2022).

Существенным фактором, обуславливающим неопределённость оценок углеродного баланса лесных экосистем России, в частности, в определении динамики углеродных потоков, выступает дефицит эмпирических данных, отражающих трансформационные процессы в углеродном цикле после антропогенных и природных нарушений, которые затрагивают обширные территории (Осипов, 2022; Schaphoff et al., 2016). Гибель леса из-за нашествия стволовых вредителей влечет за собой изменение состава полога и подстилки, прекращение транспирации, усиление испарения за счет увеличения инсоляции, повышая уязвимость экосистемы перед пожарами (Adams et al., 2012). С отмерших крон опадает мелкий горючий материал и попадает на лесную подстилку, создавая благоприятные условия для возникновения и распространения низовых пожаров (Allen, 2007; Bentz et al., 2009). Деревья высыхают, становятся легковоспламеняемыми, падают, создавая дополнительный валеж, который может способствовать распространению огня (Hicke et al., 2012). Эффективной мерой борьбы с последствиями нашествия стволовых вредителей и предотвращения возникновения пожаров являются санитарные рубки (Берриман, 1990; Hicke et al., 2012). По данным метаанализа исследований почвенного дыхания в лесах умеренного пояса (Subke et al., 2006), живые корни и связанная с ними микориза могут обеспечивать от 20 до 59% общей эмиссии углекислого газа из почв. После вырубki автотрофное дыхание прекращается, вследствие чего выбросы  $\text{CO}_2$  из почв должны существенно снизиться.

Согласно данным 25-летнего мониторинга потоков углекислого газа из почв лесных экосистем Московской области (Курганова и др., 2023), были получены показатели эмиссии  $\text{CO}_2$  для различных типов почв: для дерново-подбура среднегодовая эмиссия составила  $579 \pm 46$  г  $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  (что соответствует среднему потоку  $0,24 \pm 0,02$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ), а для серой лесной почвы этот показатель достиг  $621 \pm 56$  г  $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  (что соответствует среднему потоку  $0,26 \pm 0,03$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ). На территории южного Подмосковья в результате многолетних натурных наблюдений, проведенных на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, было выявлено, что доля холодного периода года (ноябрь–апрель) в общем годовом потоке углекислого газа из почв в отдельные годы достигает существенных значений – 38–39% (Кудеяров, 2023; Кудеяров и др., 1995). Исследования вклада летних потоков  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах Сибири и Дальнего Востока демонстрируют значительную вариабельность: в Красноярском крае летние потоки в сосняке лишайниковом изменялись от 1,1 до 8,7 мкмоль  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  ( $0,17$ – $1,38$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ); в сосняке зеленомошном – от 1,7 до 17,1 мкмоль  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  ( $0,27$ – $2,71$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ) (Махныкина и др., 2023). В кедровнике Приморского края средняя за три лета эмиссия углекислого газа из почв составила  $5,64 \pm 1,23$  мкмоль  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  ( $0,89 \pm 0,20$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ) (Иванов и др., 2018).

В процессе исследования почвенных процессов и их климатической обусловленности особое значение приобретает выбор исследовательских методов. Натурные исследования, несмотря на свою информативность, сопряжены с рядом существенных ограничений. Во-первых, это высокая трудоёмкость полевых работ, требующих регулярного мониторинга, а во-вторых, высокие затраты на организацию экспедиций, включая логистику. Кроме того, дополнительную сложность представляет пространственно-временная вариабельность данных, которая затрудняет выявление устойчивых закономерностей и тенденций. В качестве альтернативного подхода, позволяющего частично нивелировать указанные ограничения, существует метод трансплантации почвенных монолитов.

Трансплантация почв – это метод переноса образцов почв ненарушенного сложения между различными биомами (Матышак и др., 2021). Решение об использовании почвенных монолитов было основано на применении этого метода при оценки температурной чувствительности некоторыми исследователями (Тархов, 2019; Матышак и др., 2021; Nyvarinen et al., 2011). А.М. Хоппл с соавторами (Hopple et al., 2022), изучая влияние повышения солености и затопления на почвенное дыхание, установили, что поток  $\text{CO}_2$  в нетронутой (контрольной) почве и трех пересаженных почвенных монолитах не имел статистически значимых различий в течение двух лет наблюдений. Эти результаты могут указывать на устойчивость пересаженной почвы к местным условиям и работоспособность метода трансплантации. В нашем случае, применение этого метода было вызвано труднодоступностью некоторых исследуемых экосистем. При этом, метод монолитов не только облегчил сбор данных, но и снизил антропогенную нагрузку на изучаемые территории.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения роли почв труднодоступных регионов в глобальном углеродном цикле и разработки новых способов исследования почвенного дыхания удалённых экосистем.

Цель исследования – провести анализ динамики эмиссии углекислого газа из почв после трансплантации почвенных монолитов, изучить вклад различных факторов (тип экосистемы, влажность и температура поверхности почв) и оценить применимость метода трансплантации почвенных монолитов для мониторинга почвенного дыхания.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования почвенного дыхания проведены на территории Томской области в нарушенных и естественных кедровых лесах, где в 2024 и 2025 гг. были отобраны монолиты почвы, трансплантированные в участок соснового леса на геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН (Gordov et al., 2019).

Леса Томской области занимают более 60% ее территории, на долю кедровых лесов приходится 19,2% лесопокрытой площади (Кривец и др., 2023; Лесной план ..., 2019). В 2016–2017 гг. на территории Лучаново-Ипатовского припоселкового кедровника (**пробная площадка (ПП)** Лучаново, ПП Ипатово) был зафиксирован первый и наиболее интенсивный очаг союзного короёда. В 2018 году площадь заселения короёдами составила 191 га. С 2019 до 2021 гг. площадь очага увеличилась в 7 раз за счет расселения короёда и отсутствия лесозащитных мер. В настоящее время древостой является погибшим, на пробной площадке отмечено всего 2 жизнеспособных дерева (Керчев и др., 2021).

В 2023 г. в окрестностях деревни Ипатово была произведена санитарная вырубка 4,7 гектара кедров, зараженных союзным короёдом (ПП Вырубка), что вызвало существенные изменения в функционировании экосистемы.

Объектами исследования стали 6 почвенных монолитов, отобранных в лесных участках разного типа нарушенности (рис. 1):

- Ненарушенный (монолиты ПП Коломино и ПП Коломино 2025: 56°34'11" с.ш., 84°44'34" в.д.) – из эталонного Коломинского кедровника;
- Инвазионно-нарушенный (монолиты ПП Ипатово: 56°19'57" с.ш., 85°2'42" в.д. и ПП Лучаново 2025: 56°20'49" с.ш., 85°2'16" в.д.) – из Лучаново-Ипатовского кедровника, нарушенного стволовыми вредителями;
- Антропогенно-нарушенный (монолит ПП Вырубка: 56°19'55" с.ш., 85°02'48" в.д.) – из Лучаново-Ипатовского кедровника, с участка годичной вырубки;
- Фоновый (контроль) – участок на территории геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН в сосновом лесу с травянистым наземным покровом;
- Локальный – (Монолит ПП Локальный) там же, где и ПП Фоновый, но монолит был извлечён и повторно закопан.

Монолиты ненарушенного (ПП Коломино, ПП Коломино 2025) и инвазионно-нарушенного участков (ПП Ипатово, ПП Лучаново 2025) были отобраны дважды, в 2024 и 2025 годах.



Ненарушенный  
(ПП Коломино)

Инвазионно-нарушенный  
(ПП Ипатово)

Антропогенно-нарушенный  
(ПП Вырубка)

**Рисунок 1.** Виды монолитов по типу нарушения.

Для изучения эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвенных монолитов применили комплексный подход. Сначала на исследуемых территориях выбирали наиболее репрезентативный участок в межкромовом пространстве, на поверхности почвы намечали границы монолита ( $40 \times 40$  см), окапывали его по 30 см с каждой стороны, сохраняя естественную структуру почвы и корневые системы растений. Затем, для минимизации потери влаги и механических повреждений, монолит оборачивали плотной пленкой, отрезали на глубине 30 см, еще раз оборачивали пленкой и оперативно транспортировали на экспериментальную площадку института, где повторно закапывали.

После трансплантации выдерживали 7-дневный адаптационный период для стабилизации физико-биохимических процессов. По истечении этого времени в центральную часть каждого монолита устанавливали измерительное кольцо диаметром 20 см, обеспечивающее герметичность камеры при измерениях. Серию измерений эмиссии  $\text{CO}_2$  проводили на 8-й день, что позволило исключить ошибки, связанные с механическим воздействием при установке колец.

Измерение потоков углекислого газа с поверхности почвы проводили в течение года в бесснежный период, начиная с октября 2024 г., с использованием автоматизированной системы измерения почвенного дыхания Li-8100a (Li-Cor, США), с инфракрасным газоанализатором Li-8100 и автоматической долговременной прозрачной камерой Li-104C. Зеленые части растений срезали на уровне поверхности почвы. Измерения начинались в 10:00, продолжительность измерения составляла 2 минуты, интервал между измерениями – 6 минут, повторность измерений на каждом монолите – трехкратная. После измерений на одном монолите, прибор перемещался на следующий, и серия измерений повторялась. За период наблюдений в 2024 и 2025 гг. было выполнено: 28 серий измерений для монолитов 2024 года; 8 (ПП Коломино 2025) и 17 (ПП Лучаново 2025) измерений для монолитов 2025 года. В процессе каждого измерения фиксировали показатели температуры и влажности почвы на глубине 5 см. Температуру почвы измеряли датчиками, подключенными к дополнительному интерфейсу газоанализатора, влажность определяли весовым методом (почвенный образец отбирали из монолита).

Для расчета скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  использовали интервал времени с 30 по 90 секунду после закрытия камеры. Такой подход позволил исключить погрешности, обусловленные нарушением газового режима при закрытии камеры, и одновременно минимизировать продолжительность измерения, обеспечив получение наиболее точных и репрезентативных данных о почвенном дыхании. Расчет эмиссии углекислого газа почвой проводили по стандартной методике (Головацкая, Дюкарев, 2012) в программном обеспечении Licor File Viewer 4.0 (Li-Cor, США); потоки  $\text{CO}_2$  ( $\text{мкмоль/м}^2 \cdot \text{с}$ ) пересчитывали в удельные массовые потоки, выражаемые в  $\text{г CO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

В рамках лабораторных исследований выполнили комплексный анализ ключевых физико-химических показателей образцов. Программа исследований включала определение уровня кислотности среды, измерение концентраций общего углерода и азота, а также оценку содержания их водорастворимых форм в верхнем полуметровом почвенном слое и подстилке.

Почвенные образцы отбирали с передней стенки почвенного разреза каждые 5 см, за исключением ПП Вырубка, где отбор проводился из скважины, заложённой почвенным буром. После отбора образцы почвы доставляли в лабораторию, высушивали до воздушно-сухого состояния и, разместив на листе бумаги, удаляли крупные корни и включения. Затем методом квартования отбиралась средняя проба, которую использовали для последующего определения кислотности почвы. Перед анализом почву растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с размером ячеек 1 мм. Отдельную пробу почвы массой 10 г брали для подготовки к количественному определению содержания углерода и азота. В подготовленных 10 г почвы методом квадрата отбирали 3 г, из которых сначала тщательно (при помощи лупы и пинцета) отбирали корешки, затем перетирали в агатовой ступке до состояния пудры и просеивали через сито 0,25 мм (Аринушкина, 1970).

Измерение актуальной кислотности проводили потенциометрическим методом (соотношение дистиллированная вода : почва составило 2,5 : 1) с применением рН-метра БЗШ-01 (Томьяналит, Россия). Количественное определение общего содержания углерода и азота выполняли на элементном анализаторе CHNS-O EMA 502 (VELP Scientifica, Италия). Параллельно определяли содержание водорастворимых форм углерода и азота с помощью анализатора элементного состава ТОПАЗ-НС (Информаналитика, Россия). Процесс экстракции проводили с использованием дистиллированной воды, не содержащей CO<sub>2</sub> в соотношении 1 : 5 (образец : вода) (Аринушкина, 1970).

Полученные данные позволили провести расчёт запасов углерода с учётом трёх ключевых параметров: среднего содержания углерода в образцах, плотности почвенного слоя и его мощности (Васенев и др., 2013; Спирина, Соловьева, 2014).

$$ЗУ = C \times H \times d,$$

где ЗУ – запасы углерода почвы, т С га<sup>-1</sup>; C – содержание углерода, %; H – мощность горизонта, см; d – плотность почвы, г/см<sup>3</sup>.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2021.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании массива данных основных метеорологических параметров на станциях России (Бульгина и др., 2014) за период с 1980 по 2023 год, средняя многолетняя температура воздуха на территории исследования равняется 1,2°C. Минимальное значение температуры зафиксировано в январе и составляет -17,4°C, максимальное наблюдается в июле и достигает +18,7°C. Средняя температура вегетационного периода, охватывающего месяцы с мая по сентябрь, составляет 14,2°C. Годовая сумма атмосферных осадков – 566 миллиметров, основная часть выпадает с апреля по октябрь. Среднее количество дней с осадками за год – 181 (Никифоров и др., 2026).

По результатам наблюдений на Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН был проведен расчет **сумм активных температур выше 10°C (САТ) и гидротермических коэффициентов Селянинова (ГТК)** за 2 года наблюдений: в 2024 г. САТ составила 2136°C, в 2025 г. – 2352°C; ГТК 2024 г. – 1,86, 2025 г. – 1,32. Таким образом, погодные условия 2024 г. являлись более влажными и холодными, по сравнению с 2025 г.

На территории Лучаново-Ипатовского и Коломинского кедровников распространены темно-серые лесные почвы, развившиеся на покровных и лессовидных суглинках, нередко содержащих карбонаты (Дюкарев, Пологова, 2013). Реакция среды минеральных горизонтов – слабокислая (рН 5,1–6,0), за исключением переходного горизонта в Коломино (рН 6,8), где повышение значения обусловлено карбонатными соединениями в нижней части профиля.

В составе древостоя ненарушенного леса (ПП Коломино, ПП Коломино 2025) доминирует кедр (*Pinus sibirica* Du Tour) – его доля составляет 80,9%, на ель и сосну приходится 11,6%, березу и осину – 7,5% (Бисирова, 2011). Подлесок довольно редкий, представлен жимолостью (*Lonicera xylosteum* L.), малиной (*Rubus idaeus* L.), рябиной (*Sorbus sibirica* (Hedl.) Krylov), черемухой (*Padus avium* Mill.) и др. В травяном ярусе с характерным для южно-таежных лесов составом доминируют кислица (*Oxalis acetosella* L.) и осока большехвостая (*Carex macroura* Meinhsh.) при участии других мелкотравных видов (*Viola mirabilis* L., *Viola uniflora* L., *Orthilia secunda* L., *Fragaria vesca* L., *Maianthemum bifolium* L.). Доминантом древесного яруса в нарушенном лесу (ПП Ипатово, ПП Лучаново 2025) так же выступает

сосна сибирская. Среди подлеска наиболее распространены заросли малины, реже встречаются рябина и черёмуха. В травянистом ярусе преобладающим видом является крапива двудомная, которая занимает более 95% площади (Klimova et al., 2025). Травяной покров на территории вырубке (ПП Вырубка) характеризуется богатым видовым составом и представлен следующими доминирующими видами: крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.). В составе травянистого яруса также широко представлены хвощ луговой (*Equisetum pratense* Ehrh.), бор развесистый (*Milium effusum* L.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), осока большехвостая (*Carex macroura* Meinh.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), подорожник средний (*Plantago media* L.), кипрей узколистный (*Epilobium angustifolium* L.), черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris* L.). Подлесок характеризуется крайней разреженностью и представлен единично встречающейся малиной обыкновенной (*Rubus idaeus* L.).

Суммарные запасы валового и водорастворимого углерода в верхнем 50-сантиметровом слое почв, включающем подстилку и минеральные горизонты, отражены в таблице 1.

Таблица 1

Запасы углерода\* в почвах объектов исследования, т С га<sup>-1</sup>

Слой, см	ПП Коломино	ПП Ипатово	ПП Лучаново 2025	ПП Вырубка
0-1	5,71 (0,17)	3,87 (0,10)	4,58 (0,06)	7,80 (0,07)
1-10	60,79 (1,30)	30,49 (0,67)	43,22 (0,35)	44,55 (0,66)
10-20	61,97 (0,91)	48,57 (0,37)	33,10 (0,43)	46,40 (0,86)
20-30	51,60 (0,78)	51,60 (0,37)	29,16 (0,45)	31,40 (0,71)
30-40	53,28 (0,78)	32,83 (0,21)	17,53 (0,49)	12,03 (0,78)
40-50	35,83 (0,78)	27,72 (0,16)	11,75 (0,37)	12,02 (0,34)

Примечание.

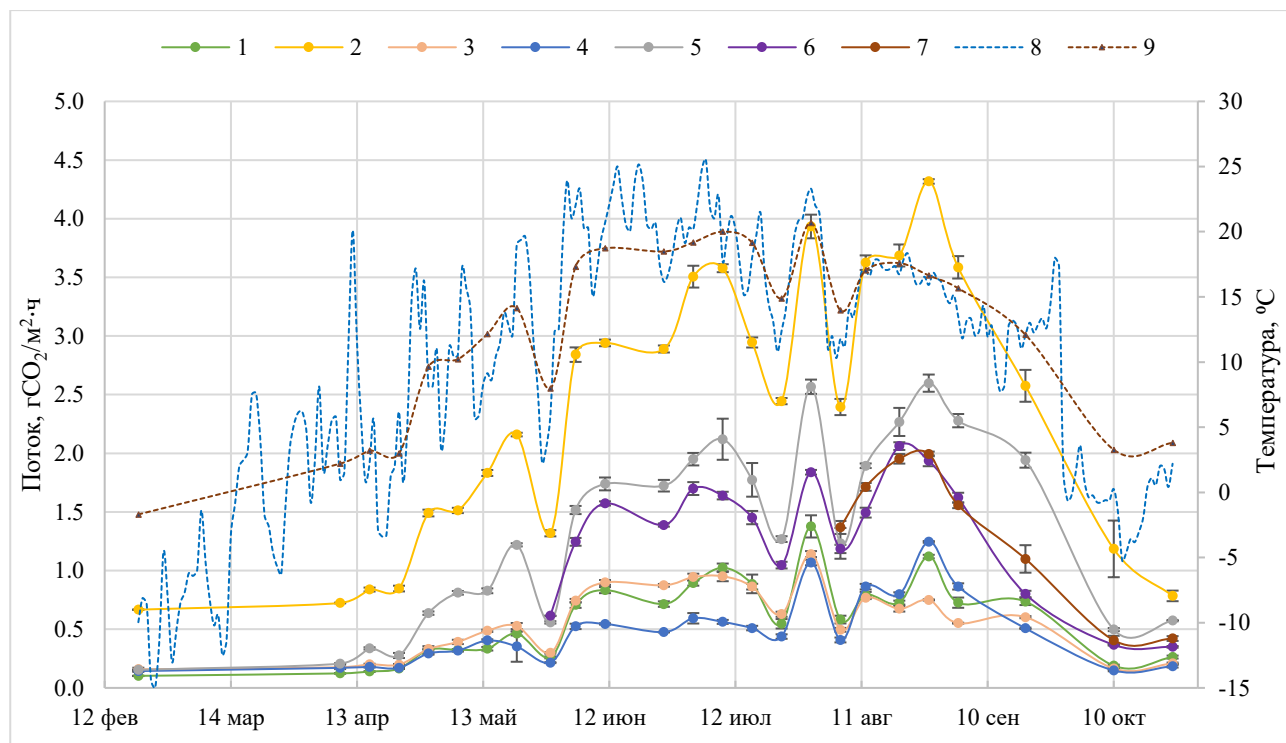
\* запасы водорастворимого углерода указаны в скобках.

Одним из важных показателей функционирования экосистемы является соотношение C/N, отражающее состояние ее биогеохимических циклов. Чем меньше отношение C/N в подстилке, тем выше скорость ее разложения (Дюшофур, 1970). В данной работе мы рассмотрели соотношение углерода и азота в подстилке представленных монолитов. Медленнее всего минерализация азота происходит на годичной вырубке, где C/N = 44,99, что обусловлено снижением количества поступающего опада, возникающего из-за удаления деревьев, а также уменьшением скорости минерализации в результате антропогенного нарушения экосистемы (Аккумуляция углерода ..., 2018). В подстилках зоогенно нарушенных кедровников этот показатель имеет схожие значения (Лучаново – 30,86, Ипатово – 29,07). Наибольшей скоростью разложения характеризуется подстилка ненарушенного участка в Коломино, где C/N составило 20,83.

На рисунке 2 приведена временная динамика почвенного дыхания в исследуемых монолитах. Диапазон изменений почвенного дыхания каждого монолита изменялся в различных пределах: ПП Вырубка – 0,10–1,38, ПП Коломино – 0,67–4,32, ПП Коломино 2025 – 0,41–1,99, ПП Ипатово – 0,15–2,60, ПП Лучаново 2025 – 0,35–2,06, ПП Фоновый – 0,16–1,14, ПП Локальный – 0,14–1,24 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч.

Так как на монолиты воздействуют одни и те же факторы, обеспечивающие синхронность изменений почвенной эмиссии, детальное описание изменчивости потока за измеренный период приведем для одного монолита. В начальный период наблюдений (осень 2024 г.) потоки СО<sub>2</sub> из почвенного монолита ПП Вырубке демонстрировали тенденцию к снижению: начавшись с относительно невысокого значения 0,19 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, они постепенно уменьшились до 0,14 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч к концу года. Переходный зимне-весенний период (20.02.2025–09.04.2025) также характеризовался низкими показателями эмиссии СО<sub>2</sub> с минимумом в феврале (0,10 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч). С началом потепления в апреле наблюдался постепенный рост потоков СО<sub>2</sub> – с 0,12 до 0,32 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч. В мае, начав с уровня 0,32 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, потоки достигли пика в 0,46 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч к 21 мая 2025 г., но к концу месяца снова снизились до 0,26 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч. Самый теплый период (04.06.2025–27.08.2025) отличался высокой изменчивостью потоков СО<sub>2</sub>. В этот период были зафиксированы как высокие значения – 1,38 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч при температуре поверхности почвы 20,2°C, воздуха – 23,3°C (30 июля), так и относительно низкие показатели – 0,55 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, при температуре поверхности почвы 15,1°C, воздуха – 12,4°C (23

июля). Завершающий, осенний этап наблюдений продемонстрировал устойчивую тенденцию к снижению потоков  $\text{CO}_2$  – от 0,73 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  в начале сентября до 0,26 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  к концу октября, когда температура поверхности почвы снизилась до 3,8°C, воздуха до 2,2°C. Данная динамика обусловлена естественным снижением температуры воздуха и уменьшением влажности почвы, что привело к постепенному затуханию биологической активности и замедлению процессов разложения почвенной органики в преддверии зимы.



**Рисунок 2.** Динамика эмиссии углекислого газа из почвенных монолитов (1 – ПП Вырубка, 2 – ПП Коломино, 3 – ПП Фоновый, 4 – ПП Локальный, 5 – ПП Ипатово, 6 – ПП Лучаново 2025, 7 – ПП Коломино 2025), средняя суточная температура воздуха (8) и поверхности почвы (9) в 2025 г. Планки погрешности на графике отображают стандартное отклонение для серии из трех измерений.

Измерения для монолитов, отобранных в 2025 г., начались только в августе, что привело к более короткому временному ряду для сравнительного анализа. Для сравнения средней эмиссии на площадках был выбран период с конца мая по конец октября, когда измерения имеются на большинстве объектов (табл. 2). За этот период наибольшая эмиссия углекислого газа из почв наблюдалась в почвенном монолите ПП Коломино ненарушенной экосистемы. В монолитах, отобранных из инвазионно-нарушенного кедровника потоки почти в 2 раза ниже. Потоки Фоновой и Локальной площадок имеют близкие значения, но все же немного отличаются, что может быть обусловлено разной почвенной влажностью. При сочетании высоких температур, влажность почвы на фоновом участке превышала влажность почвы локального монолита на 15–20%. Температурные условия при этом были схожими, однако различная влажность приводила к разной реакции на температурный фактор. В периоды, когда показатели влажности почвы в обоих монолитах были схожими, разница в эмиссии углекислого газа из почв становилась минимальной. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что различия в водном режиме способны значительно влиять на показатели почвенного дыхания, что необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований и интерпретации полученных данных.

Согласно результатам современных исследований (Осипов и др., 2024), рубка древостоя оказывает негативное влияние на газообмен подзолистых почв, которое проявляется в снижении интенсивности почвенного дыхания: в первый год наблюдений зафиксировано уменьшение показателя в 1,4–1,7 раза, а во второй год – в 1,9–3,1 раза относительно фоновых значений. Влияние зоогенной трансформации лесных экосистем и, в частности, воздействие стволовых вредителей на эмиссию углекислого газа из почв изучено недостаточно. Результаты исследований (Brouillard et al., 2017; Woodall et al., 2015) свидетельствуют о снижении показателей почвенного дыхания в лесных

экосистемах после воздействия вредителей. Данный эффект обусловлен деградацией симбиотических микробных сообществ (Brouillard et al., 2017), ассоциированных с корневой системой, вследствие массовой гибели деревьев. Полученные этими авторами результаты согласуются с данными нашего исследования, что подтверждает общность выявленных закономерностей и свидетельствует о существенном влиянии как антропогенных, так и биотических факторов на газообмен лесных почв.

Таблица 2

Средняя скорость ( $\text{г CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ) и стандартное отклонение эмиссии углекислого газа из почв и почвенных монолитов за период 29.05.2025–24.10.2025

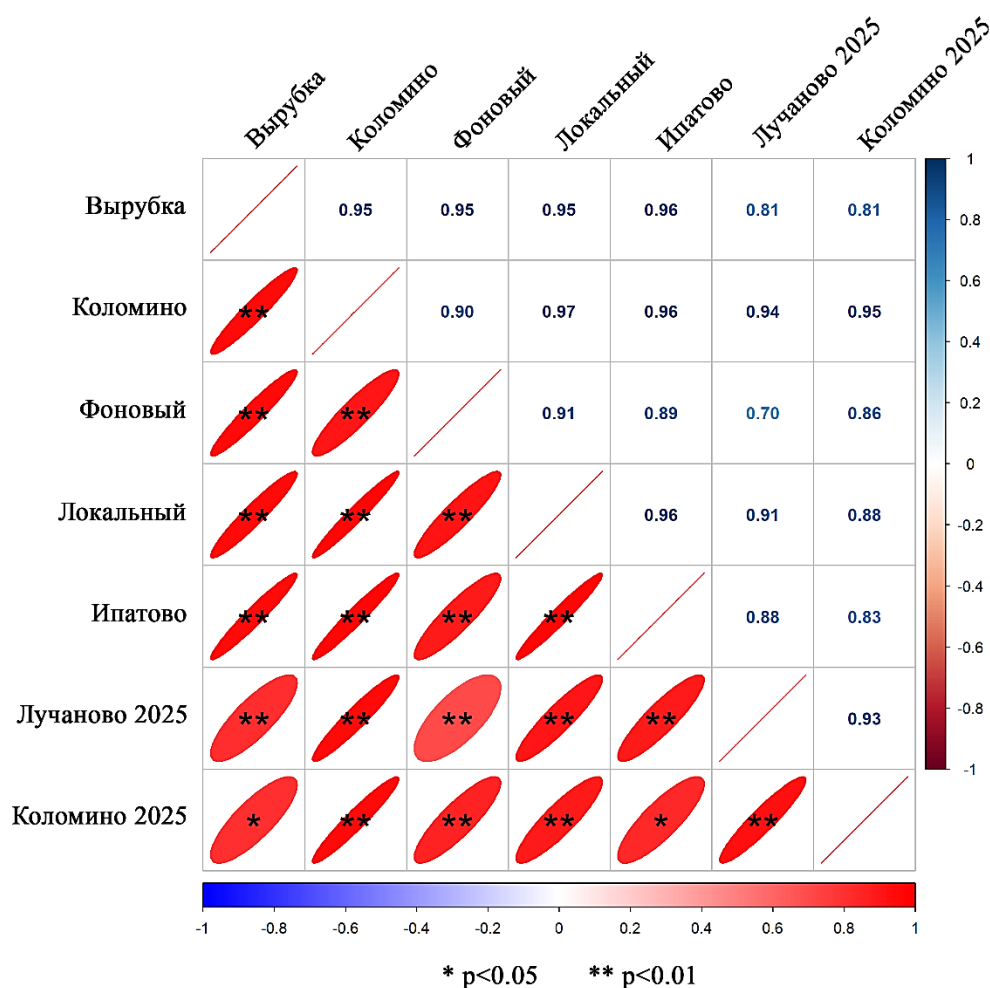
Пробная площадка	Число измерений	Скорость эмиссии, $\text{г CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$
ПП Коломино	17	$2,94 \pm 1,00$
ПП Коломино 2025*	8	$1,31 \pm 0,63$
ПП Ипатово	17	$1,77 \pm 0,66$
ПП Лучаново 2025	17	$1,45 \pm 0,52$
ПП Вырубка	17	$0,73 \pm 0,31$
ПП Локальный	17	$0,52 \pm 0,30$
ПП Фоновый	17	$0,74 \pm 0,27$

Примечание.

\*Период измерений для ПП Коломино 2025 – 06.08.2025–24.10.2025.

Так как монолит в ПП Коломино 2025 был отобран значительно позже остальных, сравнивать его будем только с ПП Коломино 2024 и Лучаново 2025 за тот же короткий период (06.08.2025–24.10.2025). Среднее почвенное дыхание для ПП Коломино 2025 составило  $1,46 \pm 0,6$ , а для ПП Лучаново 2025 несколько ниже –  $1,34 \pm 0,7$   $\text{г CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ . Разница обусловлена инвазионной нарушенностью кедровника в Лучаново, что привело к снижению гетеротрофного дыхания и трансформации растительного покрова с уменьшением биомассы корней, сократив тем самым вклад автотрофного компонента в суммарное почвенное дыхание. У ненарушенного монолита ПП Коломино 2024 года скорость выделения  $\text{CO}_2$  ( $3,08 \pm 1,3$   $\text{г CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ) почти в 2 раза выше, чем у монолита той же ПП отобранного в 2025 году. На наш взгляд, данное явление обусловлено особенностями корневой системы кедров, которая характеризуется мощным развитием и преимущественно горизонтальным типом распределения в верхнем почвенном слое (Крылов и др., 1983). При осуществлении отбора монолита происходит механическое повреждение корневой системы и запускаются процессы ее разложения. Это, в свою очередь, становится катализатором увеличения интенсивности выделения углекислого газа из почвы, что особенно заметно к завершению второго года наблюдений. В погибших, инвазионно-нарушенных монолитах разница в потоках не так сильна, что так же, по-видимому, связано с наличием уже мертвых, но все еще доступных к разложению корней. Таким образом, на основании статистического анализа (см. табл. 2) и интерпретации полученных результатов, можно сделать вывод, что исследуемые участки различаются.

Результаты корреляционного анализа (коэффициент корреляции Спирмена) потоков  $\text{CO}_2$  между исследованными монолитами (рис. 3) демонстрируют очень сильную связь. При этом менее тесная, но все еще высокая корреляция наблюдается между образцами 2024 и 2025 гг., что объясняется меньшим количеством проведенных измерений в 2025 году. При анализе данных за период с 6 августа по 24 октября 2025 г. (период, для которого имеются полные данные по всем пробным площадкам) было выявлено существенное усиление корреляционных связей (до  $0,84$ – $0,98$ ) между показателями эмиссии углекислого газа из монолитов, отобранных в различные годы. Проведенный анализ позволил определить территории, характеризующиеся схожим характером изменения интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  из почвы за весь период измерений.

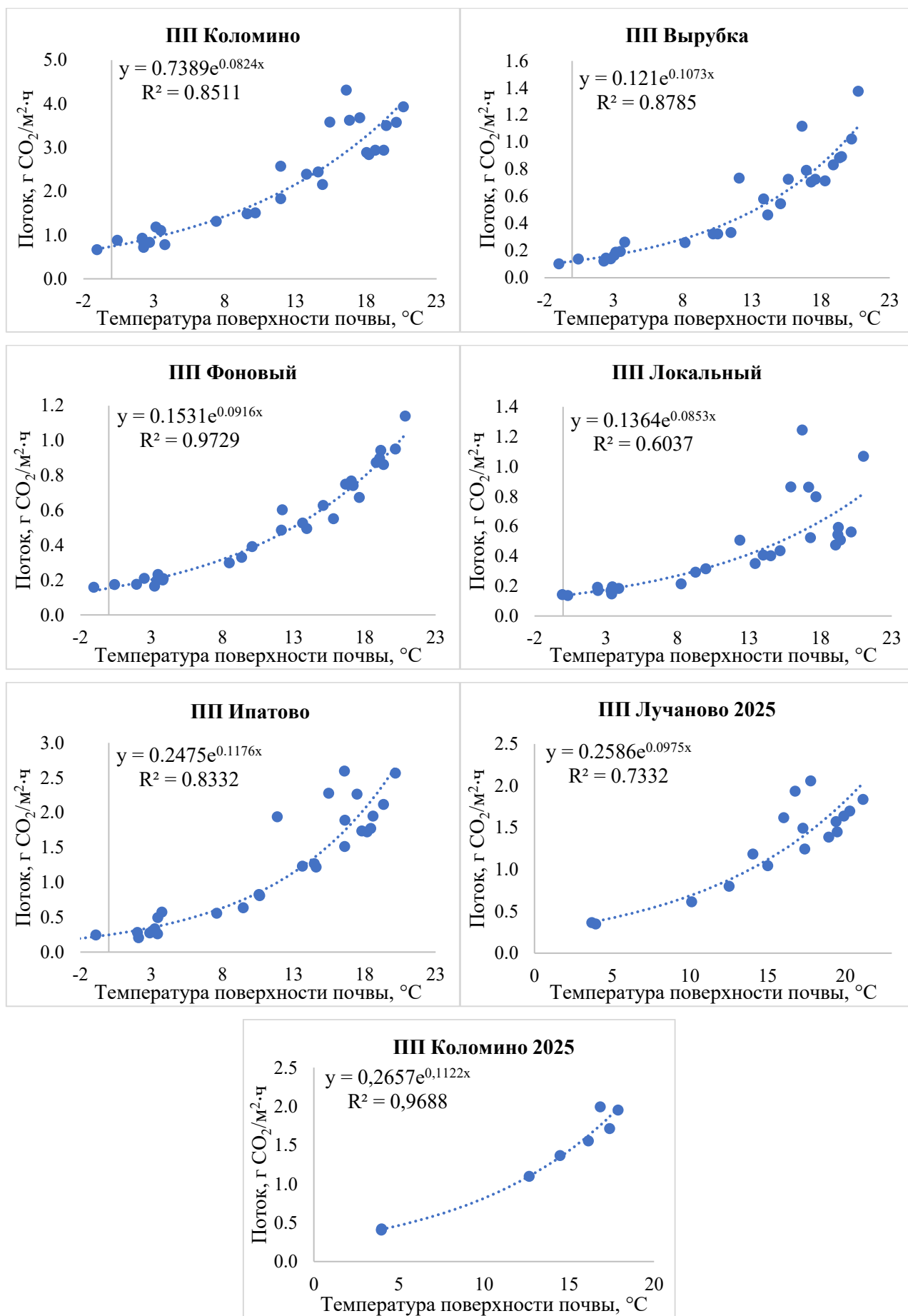


**Рисунок 3.** Корреляционная матрица (коэффициенты корреляции Спирмена) потоков  $\text{CO}_2$  из почвы для разных монолитов и фонового участка.

Во всех исследуемых почвенных монолитах обнаружены статистически значимые корреляционные связи ( $r = 0,78\text{--}0,97$ ) между эмиссией  $\text{CO}_2$  и температурой поверхности почвы (рис. 4). Наибольшее влияние температуры поверхности почвы зафиксировано для образцов из Коломинского кедровника, где температурный фактор объясняет 84,6–92,2% вариабельности потоков ( $r = 0,93$  и  $0,97$ ). Примечательно, что связь потоков и температуры в ненарушенном монолите Коломино 2025 имеет схожие тенденции с потоками из почв в нативных условиях того же года. Влажность почвы ПП Коломино и ПП Коломино 2025 демонстрирует отрицательные умеренные ( $r = -0,39$ ) и высокие ( $r = -0,73$ ) связи с эмиссией.

На ПП Вырубка выявлена слабая отрицательная корреляция почвенного дыхания с влажностью ( $r = -0,16$ ) и сильная положительная связь с температурой ( $r = 0,91$ ). Это указывает на доминирующую роль температурного фактора и незначительное влияние влажности на интенсивность почвенного дыхания на данном участке.

На инвазионно-нарушенных пробных площадках Ипатово и Лучаново зафиксированы разнонаправленные корреляционные связи почвенного дыхания с влажностью и температурой: в ПП Ипатово выявлена выраженная отрицательная корреляция с влажностью ( $r = -0,31$ ) при сохранении высокой положительной связи с температурой ( $r = 0,90$ ), тогда как в ПП Лучаново отмечена слабая положительная корреляция с влажностью ( $r = 0,24$ ) и несколько сниженная (но по-прежнему высокая) положительная связь с температурой ( $r = 0,88$ ). Эти различия указывают на вариабельность механизмов регуляции почвенного дыхания в нарушенных экосистемах: в Ипатово влажность оказывает заметное угнетающее влияние, уступая по значимости температуре, тогда как в Лучаново влажность может вносить умеренный вклад в усиление дыхания, сохраняя доминирующую роль температурного фактора.



**Рисунок 4.** Экспоненциальная модель зависимости почвенного дыхания от температуры для разных площадок за весь период наблюдений (31.10.2024–24.10.2025).

В локальном монолите выявлена статистически значимая корреляция между эмиссией CO<sub>2</sub> и температурой почвы ( $r = 0,78$ ), что соответствует объяснению 59,3% вариабельности потоков. Влияние влажности оказалось незначимым ( $r = 0,02$ ). Для фонового образца характерна более тесная связь с почвенной температурой ( $r = 0,96$ ) и влажностью ( $r = -0,24$ ). Вероятно, это также связано с большей увлажненностью фонового участка, которая снижает диффузию газов через почвенные поры и ограничивает доступность кислорода микроорганизмам (Widanagamage et al., 2025).

Для определения базового дыхания ( $R_0$ ) и коэффициента чувствительности к изменению температуры ( $kT$ ) была применена экспоненциальная модель зависимости эмиссии CO<sub>2</sub> от температуры поверхности почвы (Dyukarev, Kurakov, 2023; Bond-Lamberty et al., 2018). Данная модель позволяет количественно оценить влияние температурного фактора на интенсивность почвенного дыхания и охарактеризовать температурную реакцию экосистемы:

$$SR = R_0 \times \exp(kT \times T),$$

где SR – почвенное дыхание (г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч),  $R_0$  – дыхание почвы при 0°C,  $kT$  – коэффициент температурной чувствительности (1/°C),  $T$  – температура поверхности почвы (°C).

В монолитах 2024 г. базовое дыхание ( $R_0$ ) изменяется в пределах 0,12–0,15 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, исключением являются ПП Коломино (0,74 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч) и ПП Ипатово (0,25 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч), что, по-видимому, в первом случае связано с наличием большого количества корней, поврежденных и начавших свое разложение с момента отбора образца, а во втором – с продолжением деструкции корневой мортмассы. В монолитах, отобранных в 2025 г. базовое дыхание ненарушенного кедровника, незначительно превышает показатели нарушенного: 0,27 и 0,26 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч. Все монолиты демонстрируют близкую чувствительность почвенного дыхания к температуре – 0,09–0,11 1/°C, немного ниже (0,08 1/°C) у монолита ПП Коломино.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что интенсивность почвенного дыхания существенно варьирует в зависимости от типа нарушения экосистемы. Диапазон эмиссии CO<sub>2</sub> углекислого газа из почв изменялся от 0,10–1,38 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч на ПП Вырубка до 0,67–4,32 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч в ненарушенном кедровнике (ПП Коломино). Сезонная динамика эмиссии (на примере ПП Вырубка) демонстрирует четкую зависимость от температурного режима с минимальными значениями в зимний период (0,10 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч в феврале) и максимальным – в летний (до 1,38 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч при температуре почвы 20,2°C). Анализ средних показателей за теплый период (май-октябрь) выявил снижение эмиссии в нарушенных экосистемах: в ненарушенном кедровнике (ПП Коломино) зафиксировано  $2,94 \pm 1,0$  г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, в инвазионно-нарушенном кедровнике ПП Ипатово –  $1,77 \pm 0,7$  г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, ПП Лучаново 2025 –  $1,45 \pm 0,5$  г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч, на вырубке –  $0,73 \pm 0,3$  г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч.

Корреляционный анализ показал сильную положительную связь эмиссии CO<sub>2</sub> с температурой почвы ( $r = 0,78–0,97$ ) и вариабельную реакцию на влажность в зависимости от типа нарушения. Корреляционный анализ потоков CO<sub>2</sub> между исследованными монолитами выявил очень сильную связь, варьирующуюся от 0,70 до 0,98. Параметры базового дыхания ( $R_0$ ) варьировали: в монолитах 2024 г. – 0,12–0,15 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч (исключая ПП Коломино – 0,74 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч), в монолитах 2025 г. – 0,26–0,27 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>·ч. Коэффициент чувствительности к температуре во всех монолитах находился в пределах 0,08–0,11 1/°C.

Таким образом, антропогенные и биотические нарушения существенно снижают интенсивность почвенного дыхания. Температура почвы выступает доминирующим фактором регуляции почвенного дыхания, тогда как влияние влажности носит дифференцированный характер в зависимости от типа нарушения.

Предлагаемая методика обладает рядом существенных преимуществ для изучения почвенного дыхания. Ключевым достоинством является возможность организации длительного мониторинга (включая суточные циклы дыхания) без необходимости постоянного присутствия на территории исследования, что также снижает антропогенную нагрузку на экосистемы за счёт сокращения числа полевых выездов. Синхронность измерений обеспечивает возможность исследования пробных площадок в течение одного дня, минимизируя временные вариации метеорологических условий. Метод позволяет сравнивать почвы разной степени нарушенности (например, зоогенно трансформированные и ненарушенные экосистемы) при идентичных климатических параметрах, что исключает влияние внешних факторов на результаты. При этом, прогревание почвенных монолитов

происходит в условиях, максимально приближенных к природным, без искусственного температурного или гидрологического воздействия.

Дополнительным преимуществом является проведение прямых измерений эмиссии CO<sub>2</sub> в образцах с ненарушенным сложением, с сохранением естественной структуры почвы, порового пространства и микробиологических взаимодействий. Для получения максимально репрезентативных результатов рекомендуется отбирать монолиты в начале вегетационного сезона, пока все биологические процессы находятся на начальной стадии активации, чтобы минимизировать стрессовую нагрузку на почвенную экосистему.

На основании полученных данных можно полагать, что метод трансплантации почвенных образцов целесообразно использовать исключительно для сравнительного анализа интенсивности почвенного дыхания в различных экосистемах при стандартизированных климатических условиях с целью идентификации лимитирующих факторов; его применение для количественной оценки реальных потоков CO<sub>2</sub> требует дополнительной валидации. Перспективным направлением является разработка корректирующих коэффициентов, позволяющих экстраполировать экспериментальные данные на натурные условия. Это может расширить возможности метода для изучения вклада почв труднодоступных регионов в глобальный углеродный цикл и создания новых протоколов мониторинга эмиссии CO<sub>2</sub> в удалённых биомах.

Настоящий эксперимент имеет пилотный характер, а полученные данные являются предварительными, требующими дальнейшей верификации. Авторы стремились продемонстрировать потенциал метода и вдохновить исследователей на его развитие и апробацию в будущих работах, надеясь, что данный опыт может стать стимулом для дальнейших исследований в этом направлении.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны сотрудникам лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН: Н.В. Климовой за помощь в определении основных видов растений на объектах исследований, Н.А. Смирнову и А.Н. Никифорову за содействие в отборе и размещении монолитов на территории исследования, Д.А. Калашниковой за помощь в статистической обработке результатов, а также сотрудникам Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН за предоставление данных срочных метеорологических наблюдений.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной темы «Потоки и баланс углерода в лесных и болотных экосистемах юга таежной зоны Западной Сибири: комплексный мониторинг, анализ и прогноз» (FWRG-2025-0002, регистрационный номер 1024100800092-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Под редакцией чл.-корр. РАН В.Н. Лукиной. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.

Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.

Берриман А. Защита леса от насекомых-вредителей / Пер. с англ. В.Г. Долгополова. Москва: Агропромиздат, 1990. 288 с.

Бисирова Э.М. Лесоводственная характеристика припоселковых кедровников Томской области // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. № 2.

Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 от 10.04.2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения 11.02.2025).

Васенев В.И., Прокофьева Т.В., Макаров О.А. Разработка подхода к оценке запасов почвенного органического углерода мегаполиса и малого населенного пункта // Почвоведение. 2013. № 6. С. 725–736. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13060117>

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Влияние факторов среды на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. 2012. № 6. С. 658–667.

- Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р., Бобрик А.А., Тархов М.О. Автотрофное и гетеротрофное дыхание почв криолитозоны: оценка вкладов и методические подходы (на примере почв севера Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2019. Том 26. № 6. С. 654–667. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190603>
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв: учебник / Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 412 с.
- Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Почвы припоселковых кедровников // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 2(22). С. 7–22.
- Дюшофур Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв. Москва: Изд-во Прогресс, 1970. 617 с.
- Иванов А.В., Браун М., Татауров В.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO<sub>2</sub> из почв кедровых лесов южного Сихотэ-Алиня // Почвоведение. 2018. № 3. С. 297–303. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030048>
- Керчев И.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М., Смирнов Н.А. Распространение союзного короеда ipsamitus (Eichhoff, 1872) в Западной Сибири // Российский журнал биологических инвазий. 2021. Том 14. № 4. С. 77–84. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-4-77-84>
- Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Мельник М.А., Смирнов Н.А., Пац Е.Н. Вспышка массового размножения и оценка риска распространения союзного короеда в кедровых лесах Томской области // Лесоведение. 2023. № 2. С. 116–131. <https://doi.org/10.31857/S0024114823020031>
- Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. Москва: Лесная промышленность, 1983. 216 с.
- Кудяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18060011>
- Кудяров В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1011–1022. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>
- Кудяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А., Кузнецова Т.В., Тимченко А.В. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33–42.
- Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Сапронов Д.В., Келлер Т., Ланге Ш., Розанова Л.Н., Личко В.И., Мякшина Т.Н., Кузяков Я.В., Романенков В.А. Потоки и пулы углерода в залежных землях Подмосковья // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. Кудяров В.Н. (ред.). Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука". 2006. С. 271–284.
- Курганова И.Н., Гереню В.О.Л.Д., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмури В.А., Кудяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1220–1236. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100111>
- Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А., Жмури В.А. Анализ временной изменчивости дыхания дерново-слабоподзолистой почвы в лесном и луговом ценозах южно-таежной зоны // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 2. С. 28–37.
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н., Хорошаев Д.А., Митрохина Е.С. Эмиссия CO<sub>2</sub> из почв различных экосистем южного Подмосковья: четверть века непрерывных наблюдений // XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием (Томск, 17–20 октября 2023 г.) / Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН. Томск: Б. и. 2023. С. 386–389.
- Лесной план Томской области на 2019–2028 годы, утвержденный распоряжением губернатора Томской области от 18 февраля 2019 г. № 40 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/467951304> (дата обращения 10.11.2025).
- Матышак Г.В., Тархов М.О., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Сефилян А.Р., Чуванов С.В., Петров Д.Г. Оценка температурной чувствительности эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности торфяных почв севера Западной Сибири методом трансплантации почвенных монолитов // Почвоведение. 2021. № 7. С. 815–826. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21070108>
- Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Ваганов Е. А., Верховец С. В., Рубцов А. В. Динамика потоков CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2016. Том 9. № 3. С. 338–357. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357>
- Махныкина А.В., Полосухина Д.А., Трусов Д.В., Прокушкин А.С. Эмиссионные и обменные потоки CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосновых насаждениях Центральной Сибири // XV Сибирское совещание и школа молодых

ученых по климато-экологическому мониторингу : материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием (Томск, 17–20 октября 2023 г.) / Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН. Томск: Б. и., 2023. С. 398–401.

Никифоров А.Н., Никонова Л.Г., Зеленцова А.Е., Зубарева Ю.В., Маноле А.А. Оценка запасов углерода в подстилках и почвах ненарушенных и зоогенно трансформированных кедровников (*Pinus sibirica* Du Tour) юга таежной зоны Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 1. с347. <https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.347>

Осипов А.Ф. Влияние сплошной рубки на дыхание почвы среднетаежного сосняка черничного Республики Коми // Лесоведение. 2022. № 4. С. 395–406. <https://doi.org/10.31857/S0024114822030111>

Осипов А.Ф., Старцев В.В., Дымов А.А. Влияние сплошной рубки на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности подзолистой почвы среднетаежного хвойно-лиственного насаждения (Республика Коми) // Почвоведение. 2024. № 5. С. 728–737. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24050066>

Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Хромычкина Д.П., Соколов Д.А., Лопес де Гереню В.О., Кравченко И.К., Ли Х., Семенов М.В. Зависимость разложения органического вещества почвы и растительных остатков от температуры и влажности в длительных инкубационных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 860–875. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070085>

Спирина В.З., Соловьева Т.П. Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 336 с.

Тархов М.О. Температурная чувствительность минерализации органического вещества торфяных почв криолитозоны. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Москва, 2019. 25 с.

Adams H.D., Luce C.H., Breshears D.D., Allen C.D., Weiler M., Hale V.C., Smith A.M.S., Huxman T.E. (2012), Ecohydrological consequences of drought- and infestation- triggered tree die-off: insights and hypotheses // Ecohydrology. 2012. Vol. 5. No. 2. P. 145–159. <https://doi.org/10.1002/eco.233>

Allen C.D. Interactions Across Spatial Scales among Forest Dieback, Fire, and Erosion in Northern New Mexico Landscapes // Ecosystems. 2007. No. 10. P. 797–808. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9057-4>

Bentz B., Logan J., MacMahon J., Allen C.D., Ayres M., Berg E., Carroll A., Hansen M., Hicke J., Joyce L., Macfarlane W., Munson S., Negron J., Paine T., Powell J., Raffa K., Regniere J., Reid M., Romme B., Seybold S.J., Six D., Tomback D., Vandygriff J., Veblen T., White M., Witcosky J., Wood D. Bark beetle outbreaks in western North America: Causes and consequences // Bark Beetle Symposium (Snowbird, Utah; November, 2005). Salt Lake City, UT: University of Utah Press, 2009. 42 p.

Bond-Lamberty B., Bailey V.L., Chen M., Gough C.M., Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades // Nature. 2018. 560. P. 80–83. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0358-x>

Brouillard B.M., Mikkelsen K.M., Bokman C.M., Berryman E.M., Sharp J.O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest // Soil Biology and Biochemistry. 2017. Vol. 114. P. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.016>

Dyukarev E.A., Kurakov S.A. Response of Bare Soil Respiration to Air and Soil Temperature Variations According to Different Models: A Case Study of an Urban Grassland // Land. 2023. Vol. 12. No. 5. P. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>

Farquhar G.D., Caemmerer S., Berry J.A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species // Planta. 1980. Vol. 149. No. 1. P. 78–90. <https://doi.org/10.1007/BF00386231>

Gordov E.P., Bogomolov V.Yu., Dyukarev E.A., Okladnikov I.G., Smirnov S.V. IMCES Geophysical Observatory for studies of surface-atmosphere interactions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 386. P. 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012050>

Hicke J.A., Johnson M.C., Hayes J.L., Preisler H.K. Effects of bark beetle-caused tree mortality on wildfire // Forest Ecology and Management. 2012. Vol. 271. P. 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.005>

Hopple A.M., Pennington S.C., Megonigal J.P., Bailey V., Bond-Lamberty B. Disturbance legacies regulate coastal forest soil stability to changing salinity and inundation: A soil transplant experiment // Soil Biology and Biochemistry. 2022. Vol. 169. P. 108675. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108675>

Hyvarinen H., Vanhala P., Karhu K., Tuomi M.P., Bjorklof K., Fritze H., Liski J. Transplantation of organic surface horizons of boreal soils into warmer regions alters microbiology but not the temperature sensitivity of decomposition // Global Change Biology. 2011. Vol. 17. No. 1. P. 538–550. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02154.x>

- Joo S.J., Park S.U., Park M.S., Lee C.S. Estimation of soil respiration using automated chamber systems in an oak (*Quercus mongolica*) forest at the Nam-San site in Seoul, Korea // *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 416. P. 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.025>
- Klimova, N.V., Nikiforov, A.N., Zelentsova A.N. Carbon stock in grass cover of forests with different severity of stem pest-related stand weakening in the southern taiga zone of Western Siberia // *Acta Biologica Sibirica*. 2025. Vol. 11. P. 889–899. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16784204>
- Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia // IASA Interim Report IR-00-021. 2000. 191 p.
- Schaphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A. Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // *Forest Ecology and Management*. 2016. Vol. 361. P. 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.043>
- Silva L., Lambers H. Soil-plant-atmosphere interactions: structure, function, and predictive scaling for climate change mitigation // *Plant and Soil*. 2021. Vol. 461. P. 5–27. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04427-1>
- Subke J.A., Inghima I., Cotrufo M.F.: Trends and methodological impacts in soil CO<sub>2</sub> efflux partitioning: A metaanalytical review // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. No. 6. P. 921–943. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01117.x>
- Widanagamage N., Santos E., Rice C.W., Patrignani A. Study of soil heterotrophic respiration as a function of soil moisture under different land covers // *Soil Biology and Biochemistry*. 2025. Vol. 200. P. 109593. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109593>
- Woodall C.W., Russell M.B., Walters B.F., D'Amato A.W., Fraver S., Domke G.M. Net carbon flux of dead wood in forests of the Eastern US // *Oecologia*. 2015. Vol. 177. P. 861–874. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3171-8>
- Xu M., Shang H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation // *Journal of Plant Physiology*. 2016. Vol. 203. P. 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>
- Yuste J.C., Nagy M., Janssens I.A., Carrara A., Ceulemans R. Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration // *Tree Physiology*. 2005. Vol. 25. No. 5. P. 609–619. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.5.609>
- Zhu X., Chang L., Hu Y., He Z., Wang W., Wu D. Warming reduces soil CO<sub>2</sub> emissions but enhances soil N<sub>2</sub>O emissions: A long-term soil transplantation experiment // *European Journal of Soil Biology*. 2024. Vol. 121. P. 103614. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103614>

Поступила в редакцию 21.01.2026

Принята 20.03.2026

Опубликована 31.03.2026

#### Сведения об авторах:

**Зеленцова Анастасия Евгеньевна** – младший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [nastya\\_zel@mail.ru](mailto:nastya_zel@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0009-5992-9635>

**Дюкарев Егор Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики климатических систем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); ФГБУ ВО «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск, Россия); [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7019-4459>

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## Transplantation of soil monoliths as a method of studying the dynamics of carbon dioxide soil emissions from inaccessible ecosystems

© 2026 A. E. Zelentsova <sup>1</sup>, E. A. Dyukarev <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskij prospect, 10/3, Tomsk, Russia. E-mail: [nastya\\_zel@mail.ru](mailto:nastya_zel@mail.ru)*

<sup>2</sup>Yugra State University, str. Chekhova, 16, Khanty-Mansiysk, Russia. E-mail: [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru)

**The aim of the study** was to analyze the dynamics of CO<sub>2</sub> emissions from soils after transplantation, evaluate the contribution of various factors (ecosystem type, soil moisture and surface temperature) and discuss the suitability of the method for monitoring soil respiration. This experiment is a pilot study, and the data obtained are preliminary and require further verification. Our goal is to demonstrate the potential of this method and inspire researchers to develop and test it in future studies.

**Location and time of the study.** The research was carried out on the territory of the geophysical observatory of the Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in 2024-2025.

**Methods.** Soil total and water soluble carbon and nitrogen content were measured, as well as soil actual acidity. Carbon dioxide emission from soils was measured using the c

**Results.** The intensity of carbon dioxide emissions from the soil monolith varied depending on the site of its extraction. Thus, the greatest emission of carbon dioxide from soils ( $2,94 \pm 1,0$  g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·h) was observed in the monolith of the Kolomino settlement (undisturbed ecosystem). In the monoliths from the invasion-disturbed cedar forest, the fluxes were almost two times lower:  $1,77 \pm 0,7$  g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·h for the Ipatovo monolith,  $2,05 \pm 0,5$  g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·h for the Luchanovo monolith. The soil respiration from Logging was  $0,73 \pm 0,3$  g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·h. Correlation analysis showed a strong positive relationship between CO<sub>2</sub> emissions and soil temperature ( $r = 0.78-0.97$ ) and a variable response to humidity depending on the type of disturbance.

**Conclusions.** The method of soil monoliths transplantation allows comparing soils of different disturbance degrees under identical climatic parameters, thus eliminating the influence of external factors. The synchronicity of measurements makes it possible to study test areas within one day, minimizing temporal variations in meteorological conditions. Based on the data obtained, the soil transplantation method can be recommended exclusively for the comparative analysis of soil respiration rates in various ecosystems under standardized climatic conditions in order to identify limiting factors. However, the application of the methodology to quantify actual CO<sub>2</sub> fluxes requires further investigation.

**Keywords:** carbon dioxide emissions; soils; ecosystems; soil carbon; C/N.

**How to cite:** Zelentsova A.E., Dyukarev E.A. Transplantation of soil monoliths as a method of studying the dynamics of carbon dioxide soil emissions from inaccessible ecosystems. *The Journal of Soils and Environment*. 2026. 9(2). e353. DOI: [10.31251/pos.v9i2.353](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.353) (in Russian with English abstract).

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to the staff of the Laboratory for Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring of the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems (IMKES) SB RAS: N.V. Klimova for assistance in identifying the main plant species at the research sites, N.A. Smirnov and A.N. Nikiforov for assistance in selecting and placing monoliths at the study site, D.A. Kalashnikova for assistance in statistical processing of the results. Also to the staff of the IMKES Geophysical Observatory of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for providing meteorological data.

#### FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the scientific topic "Carbon fluxes and balance in forest and swamp ecosystems of the southern taiga zone of Western Siberia: integrated monitoring, analysis and forecast" (FWRG-2025-0002, registration number 1024100800092-1).

#### REFERENCES

- Carbon accumulation in forest soils and the successional status of forests. Edited by Corresponding member. RAS V.N. Lukina. Moscow: Association of Scientific Publications of the KMC, 2018. 232 p. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Guide to Soil Chemical Analysis. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1970. 487 p. (in Russian).
- Berryman A. Forest Insects: Principles and Practice of Population Management. New York: Plenum Press, 1986. 279 p.
- Bisirova E.M. Forestry characteristics of near-village cedar forests of the Tomsk region. Interexpo Geo-Siberia. 2011. No. 2. (in Russian).
- Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations. Certificate of state registration of the database No. 2014620549 from 10.04.2014. [Electronic resource]. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (accessed on 11.02.2025). (in Russian).

- Vasenev V.I., Prokofeva T.V., Makarov O.A. The development of approaches to assess the soil organic carbon pools in megapolises and small settlements. *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 6. P. 685–696. <https://doi.org/10.1134/S1064229313060100>
- Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. The influence of environmental factors on the CO<sub>2</sub> emission from the surface of oligotrophic peat soils in West Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2012. Vol. 45. No. 6. P. 588–597. <https://doi.org/10.1134/S106422931206004X>
- Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Timofeeva M.V., Sefilian A.R., Bobrik A.A., Tarkhov M.O. Autotrophic and Heterotrophic Soil Respiration in Cryolithozone: Quantifying the Contributions and Methodological Approaches (The Case of Soils of the North of Western Siberia). *Contemporary Problems of Ecology*. 2019. Vol. 12. No. 6. P. 534–543. <https://doi.org/10.1134/S1995425519060040>
- Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ecology of soils. The doctrine of the ecological functions of soils: textbook* / Moscow: Publishing House of Moscow University, 2012. 412 p. (in Russian).
- Dyukarev A.G., Pologova N.N. Soils of *Pinus sibirica* forests near settlements. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2013. No. 2(22). P. 7–22. (in Russian).
- Duchofour F. *Fundamentals of soil science. Evolution of soils*. Moscow: Progress, 1970. 617 p. (in Russian).
- Ivanov A.V., Tataurov V.A., Braun M. Seasonal and daily dynamics of the CO<sub>2</sub> emission from soils of *Pinus koraiensis* forests in the south of the Sikhote-Alin range. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 3. P. 290–295. <https://doi.org/10.1134/S1064229318030043>
- Kerchev I.A., Krivets S.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A. Distribution of the Small Spruce Bark Beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2022. Vol. 13. P. 58–63. <https://doi.org/10.1134/S2075111722010076>
- Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Melnik M.A., Smirnov N.A., Pats E.N. A Mass Reproduction Outbreak and Estimation of the Spreading Risks for the Small Spruce Bark Beetle in Cedar Pine Forests of the Tomsk Region. *Forest Science*. 2023. No. 2. P. 116–131. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0024114823020031>
- Krylov G.V., Talantsev N.K., Kozakova N.F. *Cedar*. Moscow: Forest Industry, 1983. 216 p. (in Russian).
- Kudeyarov V.N. Soil Respiration and Biogenic Carbon Dioxide Sink in the Territory of Russia: An Analytical Review. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 6. P. 599–612. <https://doi.org/10.1134/S1064229318060091>
- Kudeyarov V.N. Soil Respiration and Carbon Sequestration: A Review. *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1191–1200. <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>
- Kudeyarov V.N., Khakimov F.I., Deeva N.F., Ilina A.A., Kuznetsova T.V., Timchenko A.V. Assessment of Russian soils respiration. *Pochvovedenie*. 1995. No. 1. P. 33–42. (in Russian).
- Kurganova I.N., Yermolaev A.M., Lopez de Guereñu V.O., Larionova A.A., Sapronov D.V., Keller T., Lange S., Rozanova L.N., Lichko V.I., Myakshina T.N., Kuzyakov Ya.V., Romanenkov V.A. Carbon fluxes and pools in fallow lands of the Moscow region. In book: *Soil processes and spatial and temporal organization of soils*. Kudeyarov V.N. (ed.). Moscow: Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Nauka Publishing House". 2006. P. 271–284. (in Russian).
- Kurganova I.N., Lopes de Guereñu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 10. P. 1421–1436. <https://doi.org/10.1134/S1064229320100117>
- Kurganova I.N., Lopez De Guereñu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Zhmurin V.A. The Temporal Variability of Respiration of a Soddy-Podzolic Soil in Forest and Meadow Coenoses of the South-Taiga Zone. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2022. Vol. 77. P. 74–82. <https://doi.org/10.3103/S0147687422020041>
- Kurganova I.N., Lopez de Guereñu V.O., Sapronov D.V., Myakshina T.N., Khoroshaev D.A., Mitrokhina E.S. CO<sub>2</sub> emissions from soils of various ecosystems of the southern Moscow region: a quarter century of continuous observations. In book: *XV Siberian Meeting and school of young scientists on climate and environmental monitoring. Proceedings of the reports of the All-Russian conference with international participation (Tomsk, 17–20 October, 2023)*. Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Tomsk: B. i., 2023. P. 386–389. (in Russian).
- The Tomsk Region Forest Plan for 2019–2028, approved by the decree of the Governor of the Tomsk Region dated February 18, 2019. No. 40 [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/467951304> (accessed on 10.11.2025). (in Russian).

- Matyshak G.V., Tarkhov M.O., Ryzhova I.M., Goncharova O.Yu., Sefilyan A.R., Chuvanov S.V., Petrov D.G. Temperature Sensitivity of CO<sub>2</sub> Efflux from the Surface of Palsa Peatlands in Northwestern Siberia as Assessed by Transplantation Method. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 1028–1037. <https://doi.org/10.1134/S1064229321070103>
- Makhnykina A.V., Prokushkin A. S., Vaganov E. A., Verkhovets S. V., Rubtsov A.V. Dynamics of the CO<sub>2</sub> Fluxes from the Soil Surface in Pine Forests in Central Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2016. No. 3. P. 338–357. (in Russian). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357>
- Makhnykina A.V., Polosukhina D.A., Trusov D.V., Prokushkin A.S. Emission and exchange fluxes of CO<sub>2</sub> from the soil surface in pine plantations in Central Siberia. In book: XV Siberian Meeting and school of young scientists on climate and Environmental monitoring. Proceedings of the All-Russian conference with international participation (Tomsk, 17–20 October, 2023). Institute monitoring of climatic and ecological systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Tomsk: B. i., 2023. P. 398–401. (in Russian).
- Nikiforov A.N., Nikonova L.G., Zelentsova A.E., Zubareva Yu.V., Manole A.A. Assessment of carbon stocks in litter and soils of undisturbed and zoogenically damaged Siberian pine forests (*Pinus sibirica* Du Tour) in the southern taiga zone of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2026. Vol. 9. No. 1. e347. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.347>
- Osipov A.F. Clear cuttings affecting the soil respiration of the middle taiga blueberry pine forest in the Komi Republic. *Forest Science*. 2022. No. 4. P. 395–406. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0024114822030111>
- Osipov A.F., Startsev V.V., Dymov A.A. 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*. 2024. Vol. 57. No. 5. P. 806–813. <https://doi.org/10.1134/S1064229323603700>
- Semenov V.M., Lebedeva T.N., Zinyakova N.B., Khromyckina D.P., Sokolov D.A., Lopes de Gerenyu V.O., Kravchenko I.K., Li H., Semenov M.V. Dependence of Soil Organic Matter and Plant Residues Decomposition on Temperature and Moisture in the Long-Term Incubation Experiments. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 7. P. 926–939. <https://doi.org/10.1134/S1064229322070080>
- Spirina V.Z., Solovyova T.P. Agrochemical methods of soil, plant and fertilizer research: textbook. stipend. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2014. 336 p. (in Russian).
- Tarkhov M.O. Temperature sensitivity of mineralization of organic matter of peat soils of the cryolithozone. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Moscow, 2019. 25 p. (in Russian).
- Adams H.D., Luce C.H., Breshears D.D., Allen C.D., Weiler M., Hale V.C., Smith A.M.S., Huxman T.E. (2012), Ecohydrological consequences of drought- and infestation- triggered tree die-off: insights and hypotheses. *Ecohydrology*. 2012. Vol. 5. No. 2. P. 145–159. <https://doi.org/10.1002/eco.233>
- Allen C.D. Interactions Across Spatial Scales among Forest Dieback, Fire, and Erosion in Northern New Mexico Landscapes. *Ecosystems*. 2007. No. 10. P. 797–808. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9057-4>
- Bentz B., Logan J., MacMahon J., Allen C.D., Ayres M., Berg E., Carroll A., Hansen M., Hicke J., Joyce L., Macfarlane W., Munson S., Negron J., Paine T., Powell J., Raffa K., Regniere J., Reid M., Romme B., Seybold S.J., Six D., Tomback D., Vandygriff J., Veblen T., White M., Witosky J., Wood D. Bark beetle outbreaks in western North America: Causes and consequences. *Bark Beetle Symposium (Snowbird, Utah; November, 2005)*. Salt Lake City, UT: University of Utah Press, 2009. 42 p.
- Bond-Lamberty B., Bailey V.L., Chen M., Gough C.M., Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature*. 2018. 560. P. 80–83. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0358-x>
- Brouillard B.M., Mikkelsen K.M., Bokman C.M., Berryman E.M., Sharp J.O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest. *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. Vol. 114. P. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.016>
- Dyukarev E.A., Kurakov S.A. Response of Bare Soil Respiration to Air and Soil Temperature Variations According to Different Models: A Case Study of an Urban Grassland. *Land*. 2023. Vol. 12. No. 5. P. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>
- Farquhar G.D., Caemmerer S., Berry J.A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*. 1980. Vol. 149. No. 1. P. 78–90. <https://doi.org/10.1007/BF00386231>
- Gordov E.P., Bogomolov V.Yu., Dyukarev E.A., Okladnikov I.G., Smirnov S.V. IMCES Geophysical Observatory for studies of surface-atmosphere interactions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 386. P. 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012050>

- Hicke J.A., Johnson M.C., Hayes J.L., Preisler H.K. Effects of bark beetle-caused tree mortality on wildfire. *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 271. P. 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.005>
- Hopple A.M., Pennington S.C., Megonigal J.P., Bailey V., Bond-Lamberty B. Disturbance legacies regulate coastal forest soil stability to changing salinity and inundation: A soil transplant experiment. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 169. P. 108675. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108675>
- Hyvarinen H., Vanhala P., Karhu K., Tuomi M.P., Bjorklof K., Fritze H., Liski J. Transplantation of organic surface horizons of boreal soils into warmer regions alters microbiology but not the temperature sensitivity of decomposition. *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. No. 1. P. 538–550. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02154.x>
- Joo S.J., Park S.U., Park M.S., Lee C.S. Estimation of soil respiration using automated chamber systems in an oak (*Quercus mongolica*) forest at the Nam-San site in Seoul, Korea. *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 416. P. 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.025>
- Klimova, N.V., Nikiforov, A.N., Zelentsova A.N. Carbon stock in grass cover of forests with different severity of stem pest-related stand weakening in the southern taiga zone of Western Siberia. *Acta Biologica Sibirica*. 2025. Vol. 11. P. 889–899. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16784204>
- Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia. IASA Interim Report IR-00-021. 2000. 191 p.
- Schaphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A. Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance. *Forest Ecology and Management*. 2016. Vol. 361. P. 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.043>
- Silva L., Lambers H. Soil-plant-atmosphere interactions: structure, function, and predictive scaling for climate change mitigation. *Plant and Soil*. 2021. Vol. 461. P. 5–27. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04427-1>
- Subke J.A., Inglima I., Cotrufo M.F.: Trends and methodological impacts in soil CO<sub>2</sub> efflux partitioning: A metaanalytical review. *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. No. 6. P. 921–943. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01117.x>
- Widanagamage N., Santos E., Rice C.W., Patrignani A. Study of soil heterotrophic respiration as a function of soil moisture under different land covers. *Soil Biology and Biochemistry*. 2025. Vol. 200. P. 109593. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109593>
- Woodall C.W., Russell M.B., Walters B.F., D'Amato A.W., Fraver S., Domke G.M. Net carbon flux of dead wood in forests of the Eastern US. *Oecologia*. 2015. Vol. 177. P. 861–874. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3171-8>
- Xu M., Shang H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation. *Journal of Plant Physiology*. 2016. Vol. 203. P. 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>
- Yuste J.C., Nagy M., Janssens I.A., Carrara A., Ceulemans R. Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration. *Tree Physiology*. 2005. Vol. 25. No. 5. P. 609–619. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.5.609>
- Zhu X., Chang L., Hu Y., He Z., Wang W., Wu D. Warming reduces soil CO<sub>2</sub> emissions but enhances soil N<sub>2</sub>O emissions: A long-term soil transplantation experiment. *European Journal of Soil Biology*. 2024. Vol. 121. P. 103614. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103614>

*Received 21 January 2026*

*Accepted 20 March 2026*

*Published 31 March 2026*

#### **About the authors:**

**Anastasia E. Zelentsova** – Junior Researcher at the Laboratory of Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [nastya\\_zel@mail.ru](mailto:nastya_zel@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0009-5992-9635>

**Egor A. Dyukarev** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); Yugra State University (Khanty-Mansiysk, Russia); [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7019-4459>

*The authors read and approved the final manuscript*



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)