

УДК 631.425

<https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.340>

## Постпирогенная эмиссия диоксида углерода из дерново-подзолистой почвы в экотоне опушки в зависимости от интенсивности воздействия огня

© 2026 Е. Л. Ростовцева, С. В. Малицкий, О. В. Честных 

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Ленинские горы, д. 1, стр. 12, г. Москва, 119234, Россия. E-mail: [wsnb7@yandex.ru](mailto:wsnb7@yandex.ru)

**Цель исследования.** Дать количественную оценку постпирогенной эмиссии диоксида углерода на участках дерново-подзолистой почвы, в разной степени подверженных воздействию огня, для установления момента начала нормализации функционирования экосистемы.

**Место и время проведения.** Эксперимент проводили на экспериментальной площадке, расположенной в Александровском районе Владимирской области (56,613045 с.ш., 38,362325 в.д.) с начала мая по октябрь 2022 года.

**Методы.** Исследования включали подготовку экспериментальных площадок, подвергшихся возгораниям разной степени интенсивности, определение почвенных потоков диоксида углерода камерным методом и измерения основных показателей окружающей среды (температуры воздуха и почвы, влажности почвы).

**Основные результаты.** Установлено заметное различие в постпирогенной эмиссии диоксида углерода с участков разной степени выгорания. Максимальные значения  $8,19 \pm 5,40 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  наблюдались на площадке свежей гари, а минимальные значения  $1,22 \pm 0,520 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  – на площадке, которая подверглась самому интенсивному воздействию огня. Для скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  за период наблюдений выявлены внутрисезонные вариации, которые связаны с температурой и влажностью почвы.

**Заключение.** Эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы в период восстановления после длительного пирогенного воздействия значимо меньше по сравнению с контрольными участками и участками, затронутыми кратковременным воздействием огня. Восстановление последних связано со значительным повышением эмиссии и требует дальнейших исследований, которые позволят определить вклад микробиоты в почвенное дыхание при кратковременных пирогенных воздействиях, приближенных к естественным пожарам антропогенного происхождения.

**Ключевые слова:** лесные пожары; постпирогенная эмиссия  $\text{CO}_2$ ; гидротермические параметры; сезонная динамика; дерново-подзолистая почва.

**Цитирование:** Ростовцева Е.Л., Малицкий С.В., Честных О.В. Постпирогенная эмиссия диоксида углерода из дерново-подзолистой почвы в экотоне опушки в зависимости от интенсивности воздействия огня // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 1. е340. DOI: [10.31251/pos.v9i1.340](https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.340)

### ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары являются одним из наиболее частых явлений, сопровождающихся большим выбросом в атмосферу окиси и двуокиси углерода, а также целого спектра углеродсодержащих соединений. Часто пожары связаны с началом горения сухой травянистой растительности весной и происходят по вине человека – палы выходят из-под контроля и распространяются на очень большие расстояния. Чистая эмиссия углерода от лесных пожаров может достигать до 41% объёма ископаемых энергоносителей, использованных за один год (Тулохонов, Пунцукова, 2016; Cochrane, 2003). Воздействие лесных пожаров на углеродный баланс определяется двумя процессами: физико-химическим, заключающимся в быстротечном выделении диоксида углерода при сгорании горючих лесных материалов (пожарная эмиссия) и довольно длительным высвобождением  $\text{CO}_2$  в результате биологической деструкции растительных остатков, затронутых горением (послепожарная эмиссия).

Об интенсивности естественных пожаров можно судить по косвенным показателям; последствия таких пожаров трудно сопоставимы с параметрами огневого воздействия и классифицируются также по косвенным показателям (Иванова и др., 2018). Масштабы послепожарной лесной эмиссии диоксида углерода оцениваются через массу ежегодно отмирающей от воздействия огня древесной растительности, с учётом продолжительности распада древесины (Замолотчиков, 2009; Иванов и др., 2020). Основная масса исследований посвящена особенностям постпирогенных изменений свойств почвы (Зайдельман, Шваров, 2002; Дымов и др., 2014; Максимова, Абакумов, 2013; Гынинова и др., 2019; Ставрова и др., 2019; Маслова и др., 2021; Verma, Jayakumar, 2012) и сукцессиям растительного покрова (Михайлова, Миронычева-Токарева, 2019; Утюк, Иванисова, 2023). Работ по оценке постпирогенной динамики эмиссии диоксида углерода при восстановлении систем, в разной степени

затронутых воздействием пожара с известными характеристиками его интенсивности, недостаточно, в связи с чем необходимы экспериментальные данные для получения количественных оценок этого процесса.

Цель исследования – дать количественную оценку постпирогенной эмиссии диоксида углерода на участках дерново-подзолистой почвы, в разной степени подверженных воздействию огня, для установления момента начала нормализации функционирования экосистемы. Исследования проводили в экотоне лесной опушки, который был выбран местом эксперимента, поскольку довольно часто именно она является местом начала лесного пожара, связанного с человеческим фактором; почвенную эмиссию  $\text{CO}_2$  определяли через короткие интервалы времени на специально подготовленных участках с различной пирогенной нагрузкой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Организация эксперимента.** Эксперимент по влиянию возгораний разной интенсивности на эмиссию  $\text{CO}_2$  из почв проводили в Александровском районе Владимирской области (56,613045 с.ш., 38,362325 в.д.). С начала мая по октябрь 2022 года были проведены измерения почвенного дыхания на площадках экотона опушки, затронутых воздействием пожаров разной интенсивности. Площадка 1 – специально подготовленная, максимально подвергшаяся воздействию огня среди всех площадок. На ней без удаления растительности проводили регулярные палы (раз в 2 недели) в течение лета и осени 2021 года. Для этого разводили костёр, горение которого поддерживали около 12 часов. За 2 дня перед началом измерения эмиссии  $\text{CO}_2$  воздействие повторили. Площадка 2 – свежая гарь, которая подвергалась пирогенному воздействию 12 часов за 2 дня перед началом измерения дыхания почвы, объем использованных дров был близок к одноразовому палу площадки 1. Площадка 3 – контрольная, пирогенному воздействию не подвергалась, на ней регулярно удаляли зеленые части растений: таким образом измеряли суммарное дыхание почвенной микрофлоры и корней растительности без учёта дыхания надземного яруса фитомассы. На каждом варианте устанавливали 4 ПВХ камеры для измерения почвенной эмиссии в пределах площади  $1 \times 1 \text{ м}^2$  – центральная часть гари. Измерения проводили ежедневно (кроме дождливых дней) в промежутке 9–10 часов утра, когда скорость эмиссии наиболее близка к среднесуточной (Ларионова, Розанова, 1993).

**Методы исследования.** Определение почвенных потоков диоксида углерода выполняли камерным методом, используя непрозрачные цилиндрические ПВХ камеры объёмом 1,2–1,5 л и диаметром 110 мм. Они были стационарно установлены на поверхность почвы, на глубину 3–4 см. Между измерениями камеры были постоянно открыты. Во время проведения измерений их герметично накрывали крышкой, соединённой трубками с инфракрасным  $\text{CO}_2$ -газоанализатором AZ 7752 (AZ Instrument Corp., Тайвань). Крышка прибора оснащена вентилятором для перемешивания воздуха в камере. Общее время экспозиции составляло 4 минуты. В течение 1-й минуты обеспечивали равномерность концентрации  $\text{CO}_2$  по всему объёму системы, а в течение 3-х последующих минут регистрировали прирост концентрации в камере. Далее по уравнению Менделеева-Клапейрона, рассчитывали эмиссию газа с единицы площади почвы, используя базовую формулу (Карелин, 2015):

$$F = ((a \cdot 60 \cdot V \cdot M[\text{C}] \cdot 10000) / (S \cdot t \cdot 100)) \cdot (P / (R \cdot (T + T_k)))$$

где:  $a$  (%/мин) или (ppm/мин) – изменение концентрации в камере за время экспозиции;  $V$  (мл) – объём камеры; 60 – коэффициент перевода  $a$  из (%/мин) в (%/час);  $M[\text{C}]$  (мг/ммоль) = 12 – молярная масса углерода; 10000 – коэффициент перевода площади основания камеры из ( $\text{см}^2$ ) в ( $\text{м}^2$ );  $S$  ( $\text{см}^2$ ) – площадь основания камеры;  $t$  (час) = 1 – время, для которого рассчитывается поток  $\text{CO}_2$ ; 100 – коэффициент перевода %  $\text{CO}_2$  в безразмерные доли;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) – температура;  $T_k$  ( $^\circ\text{C}$ ) = 273,15 – коэффициент перевода в градусы Кельвина;  $P$  (кПа) – давление.

Объём камеры складывается из объёма воздуха в изоляторе между крышкой и поверхностью почвы, объёма измерительной системы, включая шланги, микропомпу и камеру с сенсором.

Одновременно с за мерами потоков  $\text{CO}_2$  в непосредственной близости от оснований камер определяли температуру приземного слоя воздуха и почвы на глубинах 5 и 10 см с помощью портативного электронного термометра Checktemp-1 (точность  $0,1^\circ\text{C}$ ; Hanna Instruments). Параллельно оценивали влажность почвы по ее диэлектрической проницаемости, используя электронный измеритель объёмной влажности почвы HH2 Moisture Meter, с датчиком ThetaProbe ML2x.

Статистическую обработку данных проводили в Microsoft Excel. В тексте приведены средние значения и их стандартные отклонения. Значимость корреляционных связей оценивали при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных выявил заметное различие в постпирогенной эмиссии диоксида углерода на участках, в разной степени подверженных воздействию огня.

Суммарная величина почвенной эмиссии диоксида углерода на контрольной площадке за период измерений с мая по сентябрь не превышала  $378 \text{ г С м}^{-2}$ , что соответствует имеющимся литературным данным для дерново-подзолистых почв (Курганова и др., 2020). В мае средние температуры в слое почвы 5 см не превышали  $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; влажность в среднем составляла  $16,5 \pm 4,1\%$ . В мае мы не выявили существенного влияния влажности почвы на скорость эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв (табл. 1). Скорее всего, это связано, с одной стороны, с достаточно высокими значениями влажности, при которых не лимитируется деятельность микробного сообщества почвы, с другой стороны, они не являются достаточно высокими, чтобы ее ингибировать. Температура почвы оказывала значимое влияние на эмиссию в этом весеннем месяце по сравнению с влажностью. Причём, максимальное влияние отмечено на контрольной площадке, а минимальное – на площадке с длительным пирогенным воздействием. В самые тёплые месяцы (июнь – август) температура в 5 см слое почвы колебалась от  $9,3$  до  $21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , составляя в среднем  $16,2 \pm 3,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зависимость эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв от этого параметра в июле и августе была незначимой (табл. 1). Ведущими факторами для почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  на контрольной площадке, более значимыми, чем температура, стали влажность и осадки. После сильных дождей эмиссия возрастала до максимальных величин:  $6,34 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  в июле и  $8,1 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  в августе. Сходные закономерности изменения интенсивности почвенного дыхания от температуры и влажности в жаркие месяцы были отмечены и другими авторами (Карелин и др., 2013).

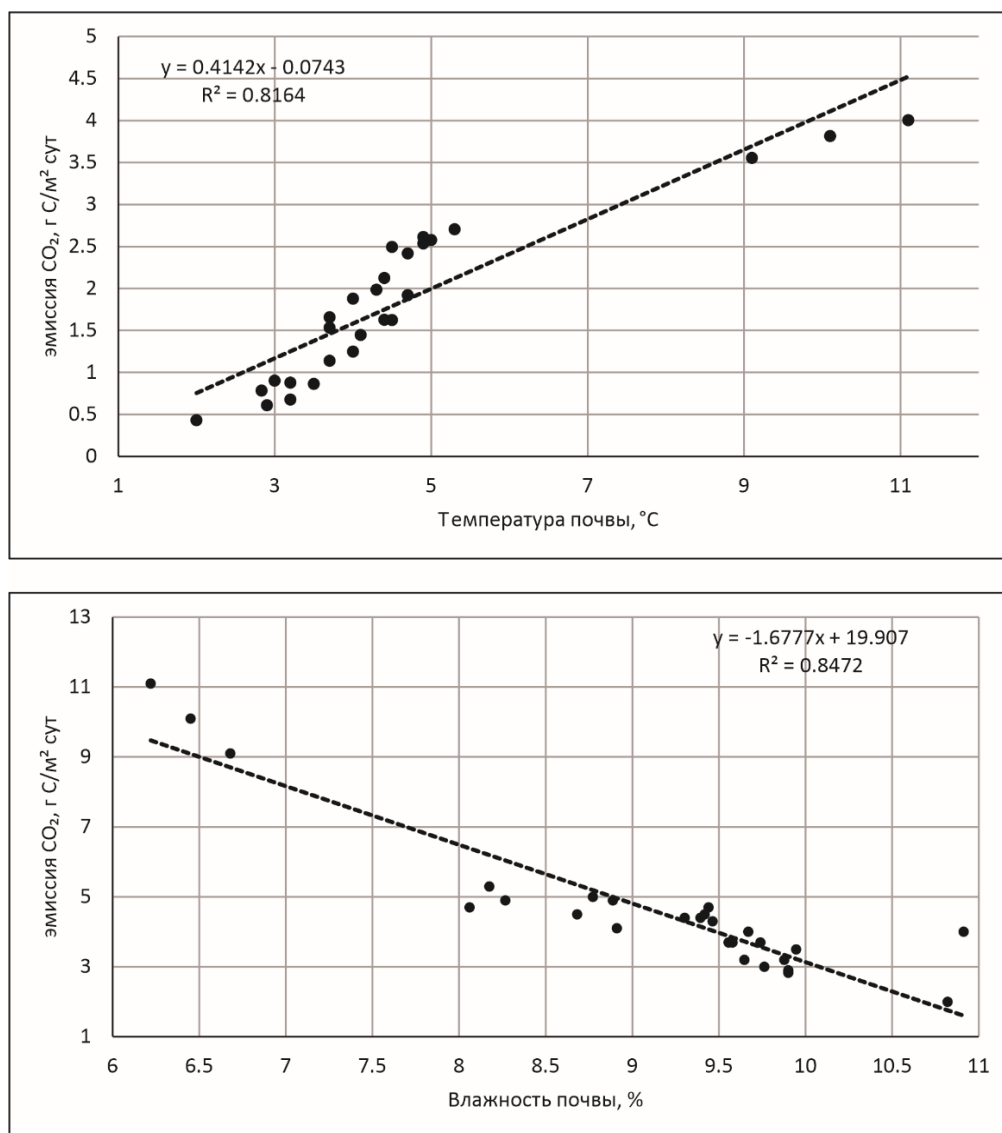
Таблица 1

Значения коэффициента корреляции эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв с влажностью (А) и температурой почвы (Б) в отдельные месяцы (жирным шрифтом показаны значимые корреляции,  $p < 0,05$ )

Площадка	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
А (влажность/ $\text{CO}_2$ )						
1 (максимальное воздействие огня)	0,11	<b>0,74</b>	0,12	0,035	0,34	<b>0,98</b>
2 (умеренное воздействие огня)	0,07	0,36	0,68	0,41	0,34	<b>0,98</b>
3 (контроль)	0,60	<b>0,87</b>	<b>0,82</b>	<b>0,84</b>	<b>0,91</b>	0,08
Б (температура/ $\text{CO}_2$ )						
1 (максимальное воздействие огня)	0,42	0,38	0,01	0,28	<b>0,78</b>	<b>0,80</b>
2 (умеренное воздействие огня)	0,61	0,19	<b>0,81</b>	0,33	<b>0,72</b>	<b>0,82</b>
3 (контроль)	<b>0,86</b>	0,63	0,38	0,16	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>

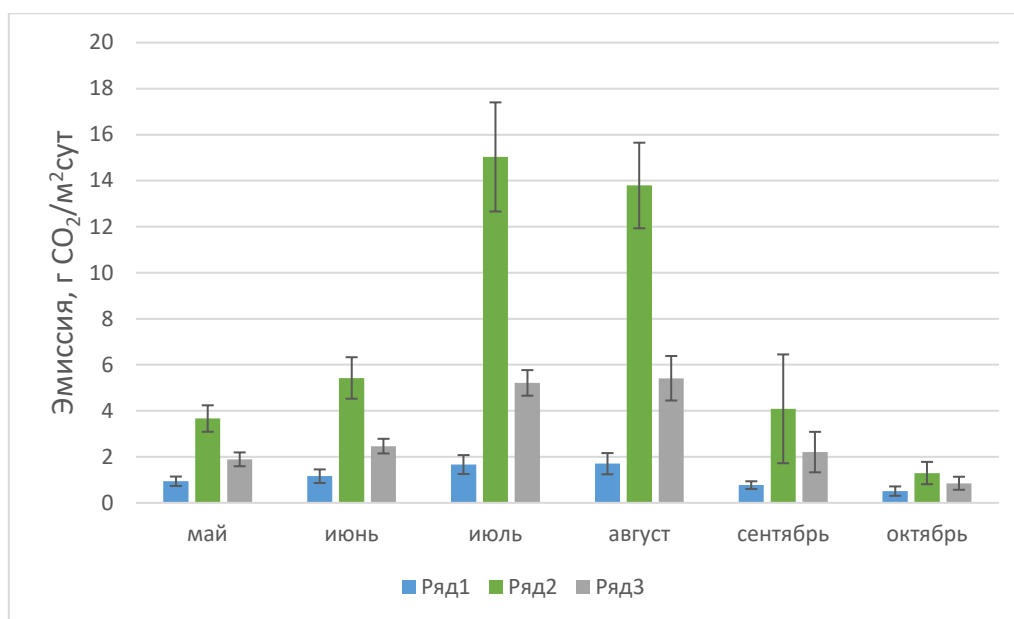
В сентябре–октябре объёмная влажность колебалась от  $6,2$  до  $10,9\%$  и составляла в среднем  $9,02 \pm 1,6\%$ . Эти значения почти в два раза меньше весенних. Уменьшение влажности совместно с сезонным понижением температуры привело к понижению эмиссии  $\text{CO}_2$  (рис. 1).

На площадке максимального пирогенного воздействия почвенная эмиссия за весь период была минимальной ( $1,22 \pm 0,52 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) по сравнению с другими участками. Самые высокие значения эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв на этом участке ( $2,37 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) наблюдались 17 августа, после сильного дождя и высоких дневных температур в предшествующие две недели. В целом, динамика суточной эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв и в холодные, и в теплые периоды показывала высокую вариабельность значений (см. табл. 1) и слабо коррелировала как с изменением влажности, так и температуры почвы. Подобная картина, скорее всего, связана с пирогенным изменением гидрологических свойств поверхностных горизонтов почв (Шеин и др., 2012) и деградацией микробного сообщества. Только в октябре выявлена высокая зависимость скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  как от влажности, так и от температуры почвы, что, возможно, связано с некоторым восстановлением микробиома этого участка.



**Рисунок 1.** Зависимость почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> от температуры и влажности почвы в 5 см слое почвы для контрольного участка в сентябре–октябре.

Неожиданно высокие значения эмиссии получены на площадке с умеренным воздействием огня. Среднее значение эмиссии CO<sub>2</sub> за полный сезон измерений здесь составило  $8,19 \pm 5,4$  г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>, а максимальные были зарегистрированы в июле и августе – 18,2 и 17,6 г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>. В отличие от площадки регулярной гари, эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы на площадке с кратковременным воздействием огня показала зависимость от температуры почвы на протяжении всего периода наблюдений (см. табл. 1). Как видно из диаграммы (рис. 2), средние значения эмиссии CO<sub>2</sub> на площадке 2 в самые тёплые месяцы (июль и август) превышают значения эмиссии с контрольного участка в 2,5–3,4 раза. Возможно, это связано с активизацией процессов микогенной и микробной деструкции, что требует дополнительного исследования в дальнейшем. На площадке максимального пирогенного воздействия средние значения эмиссии CO<sub>2</sub> из почв минимальны (см. рис. 2), но также выявляется значимая зависимость и от температуры, и от влажности почвы в октябре (см. табл. 1), и в сравнении с остальными площадками.



**Рисунок 2.** Среднемесячные значения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы за период исследования. Вертикальные линии соответствуют среднеквадратичным отклонениям. Ряд 1 – площадка регулярной многолетней гари, ряд 2 – площадка умеренного воздействия огня, ряд 3 – контрольная площадка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показали, что степень пирогенного воздействия оказывала существенное влияние на интенсивность постпирогенной эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы. В период восстановления после длительного пирогенного воздействия эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы значимо меньше по сравнению с контрольными участками и участками, затронутыми кратковременным воздействием огня. Восстановление последних связано с значительным повышением эмиссии в июле и августе, что требует дальнейших исследований, которые позволят определить вклад микробиоты в почвенное дыхание при кратковременных пирогенных воздействиях антропогенного происхождения, приближенных к естественным пожарам. Для контрольного участка выявлены тесные положительные корреляционные связи с влажностью почвы с июня по сентябрь, в то время как на участках, подверженных пирогенному воздействию, аналогичная связь наблюдалась только в октябре. Корреляция величины эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы с температурой почвы на глубине 5 см во всех вариантах опыта была самой тесной в сентябре и октябре, а также выявлялась в мае на контрольной площадке и в июле на участке с умеренным пирогенным воздействием.

В будущем необходима работа с привлечением данных по новым экспериментальным площадкам, что позволит уточнить количественную оценку процесса послепожарной эмиссии, особенно при кратковременном воздействии огня, для уточнения выявленной постпирогенной динамики эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы.

### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № 121032500089-1 14-1-21 «Механизмы структурно-функциональной организации растительного покрова и рациональное природопользование».

### ЛИТЕРАТУРА

- Гынинова А.Б., Дыржинов Ж.Д., Куликов А.И. Послепожарная эволюция песчаных почв под сосновыми лесами в Прибайкалье // Почвоведение. 2019. № 4. С. 451–463. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040087>
- Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н. Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14020051>
- Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П. Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. Москва: Издательство Московского государственного университета, 2002. 168 с.



Замолотчиков Д.Г. Пул углерода крупных древесных остатков в лесах России: учет влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.

Иванов А.В., Замолотчиков Д.Г., Лошаков С.Ю., Комин А.Э., Косинов Д.Е., Браун М., Грабовский В.И. Вклад крупных древесных остатков в биогенный цикл углерода хвойно-широколиственных лесов юга Дальнего Востока России // Лесоведение. 2020. № 4. С. 357–366. <https://doi.org/10.31857/S0024114820040051>

Иванова Г.А., Жила С.В., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Кукавская Е.А. Постпирогенная трансформация основных компонентов сосняков средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2018. № 3. С. 30–41. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180304>

Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В., Почикалов А.В., Краев Г.Н. Межгодовые изменения ФАР и влажности почвы в теплый сезон могут быть важнее для направления годового углеродного баланса в тундрах, чем колебания температуры // Журнал общей биологии. 2013. Том 74. № 1. С. 3–22.

Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Краев Г.Н. Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре. Москва: Издательство Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2015. 64 с.

Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Хорошаев Д. А., Мякшина Т. Н., Сапронов Д. В., Жмурич В. А., Кудеяров 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>

Ларионова А.А., Розанова Л.Н. Влияние температуры и влажности почвы на эмиссию CO<sub>2</sub> // Дыхание почвы: Сборник научных трудов / Пущинский научный центр. Пущино: Отдел научно-технической информации Пущинского научного центра РАН, 1993. С. 68–75.

Максимова Е.Ю., Абакумов Е.В. Воздействие лесных пожаров на почвенный покров на примере постпирогенных территорий Самарской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Том 15. № 3–7. С. 2088–2091.

Маслова М.Н., Маслова О.А., Копейкина Е.И. Биохимическая устойчивость водорастворимого органического вещества почв горной тундры Хибин при постпирогенной сукцессии // Почвоведение. 2021. № 2. С. 261–270. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020106>

Михайлова Е.В., Миронычева Н.П. Послепожарная сукцессия в лесоболотных комплексах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Том 4. № 2. С. 98–105. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-2-98-105>

Ставрова Н.И., Калимова И.Б., Горшков В.В., Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Баккал И.Ю. Долговременные послепожарные изменения характеристик почв в темнохвойных лесах европейского Севера // Почвоведение. 2019. № 2. С. 246–256. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020138>

Тулохонов А.К., Пунцукова С.Д. Лесные пожары в Республике Бурятия в условиях изменения климата // Общество: политика, экономика, право. 2016. № 3. С. 72–78.

Шейн Е.В., Русанов А.М., Данилова Л.В., Достова Т.М. Изменение водного режима чернозема типичного при формировании на его поверхности пирогенного слоя // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 10. С. 112–116.

Утюк В.О., Иванисова Н.В. Естественное возобновление древостоя после низовых пожаров в Ростовской области // Тимирязевский биологический журнал. 2023. № 1. С. 68–72. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-1-68-72>

Cochrane Marc A. Fire science for rainforest // Nature (Gr. Brit.). 2003. No. 6926. P. 213–219.

Verma S., Jayakumar S. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: a review // Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 168–176.

*Поступила в редакцию 21.10.2025*

*Принята 13.11.2025*

*Опубликована 12.01.2026*

#### **Сведения об авторах:**

**Ростовцева Елена Леонидовна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», биологический факультет (г. Москва, Россия); [wsnb7@yandex.ru](mailto:wsnb7@yandex.ru)

**Малицкий Сергей Валентинович** – младший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», биологический факультет (г. Москва, Россия); [wsnb@yandex.ru](mailto:wsnb@yandex.ru)

**Честных Ольга Владиславовна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», биологический факультет (г. Москва, Россия); [ochestn@mail.ru](mailto:ochestn@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7238-6411>

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



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

## Post-pyrogenic carbon dioxide emissions from the edge ecotone depending on the intensity of fire exposure

© 2026 E. L. Rostovtseva, S. V. Malitsky, O. V. Chestnykh 

*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, p. 12, Moscow, Russia. E-mail: [wsnb7@yandex.ru](mailto:wsnb7@yandex.ru)*

**The aim of the study.** To assess carbon dioxide emissions during the restoration ecosystems affected to varying degree by fire for further use in determining the dynamic pattern of carbon fluxes.

**Location and time of the study.** The experiment was conducted at the experimental site located in the Alexandrovsky district of the Vladimir region (56.613045 N, 38.362325 E) from the beginning of May till October 2022.

**Methods.** The research included the preparation of experimental sites exposed to fires of varying degrees of intensity, the determination of soil carbon dioxide fluxes by the chamber method, and measurements of key environmental indicators (air and soil temperature, soil moisture).

**Results.** There was a noticeable difference in post-pyrogenic carbon dioxide emissions from sites of varying degrees of burnout. The maximal values of  $8.19 \pm 5.40 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  were observed at the site of fresh burning, and the minimal values of  $1.22 \pm 0.520 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  were observed at the site that was exposed to the most intense fire. For the rate of  $\text{CO}_2$  emission from soils during the observation period, intra-seasonal variations were identified, which were related to soil temperature and moisture.

**Conclusions.** The data we obtained on  $\text{CO}_2$  emissions at the control site of an undisturbed ecotope correspond to estimates previously obtained by other authors for sod-podzolic soils.  $\text{CO}_2$  emissions from the soil during the recovery period after prolonged pyrogenic exposure were significantly lower compared with the control sites and sites affected by the short-term exposure to fire. The restoration of the latter, associated with a significant increase in emission, requires further research to determine the contribution of microbiota to soil respiration during short-term pyrogenic effects similar to those of accidental fires of anthropogenic origin.

**Keywords:** forest fires; post-pyrogenic  $\text{CO}_2$  emissions; hydrothermal parameters; seasonal dynamics; sod-podzolic soil.

**How to cite:** Rostovtseva E.L., Malitsky S.V., Chestnykh O.V. Post-pyrogenic carbon dioxide emission from the edge ecotone depending on the intensity of fire exposure. *The Journal of Soils and Environment*. 2026. 9(1). e340. DOI: [10.31251/pos.v9i1.340](https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.340) (in Russian with English abstract).

### FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121032500094-5 14-3-21).

### REFERENCES

- Gyninova A.B., Kulikov A.I., Gonchikov B.N., Dyrzhinov Z.D., Gyninova B.D. Post-pyrogenic evolution of sandy soils under pine forests in the Baikal region. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 4. P. 414–425. <https://doi.org/10.1134/S1064229319040082>
- Dymov A.A., Dubrovsky Y.A., Gabov D.N. Pyrogenic changes in iron-illuvial podzols in the middle taiga of the Komi republic. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. No. 2. P. 47–56. <https://doi.org/10.1134/S1064229314020045>
- Zaidelman F.R., Shvarov A.P. Pyrogenic and hydrothermic degradation of peat soils, agroecology, sand cultures, remediation. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2002. 168 p. (in Russian).
- Zamolodchikov D.G. Carbon pool of large wood residues in Russian forests: accounting for the impact of fires and logging. *Lesovedenie*. 2009. No. 4. P. 3–15. (in Russian).
- Ivanov A.V., Zamolodchikov D.G., Loshakov S.Yu., Komin A.E., Kosinov D.E., Braun M., Grabovskiy V.I. Large wooden debris' contribution into a biogenic carbon cycle in coniferous-deciduous forests of the southern regions of Russian far east. *Lesovedenie*. 2020. No. 4. P. 357–366. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0024114820040051>

- Ivanova G.A., Zhila S.V., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Kukavskaya E.A. Post-fire transformation of basic components of pine forests in central Siberia. *Siberian Journal Forestry Science*. 2018. No. 3. P. 30–41. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20180304>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Zukert N.V., Chestnykh O.V., Pochikalov A.V., Krayev G.N. Interannual changes in par and soil moisture during the warm season may be more important for directing of annual carbon balance in tundra than temperature FL uctuations. *Journal of General Biology*. 2013. Vol. 74. No. 1. P. 3–22. (in Russian).
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Krayev G.N. Methodological guide to the analysis of carbon emissions from the soils of settlements in the tundra. Moscow: Publishing House of the Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests of the Russian Academy of Sciences, 2015. 64 p. (in Russian).
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudayarov 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>
- Larionova A.A., Rozanova L.N. The influence of soil temperature and humidity on CO<sub>2</sub> emissions. In book: *Soil respiration. Collection of scientific papers / Pushchino Scientific Center. Pushchino: Department of Scientific and Technical Information of the Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 1993. P. 68–75. (in Russian).
- Maksimova E., Abakumov E. Influence of wildfires on soils by the example of postpyrogenic territories of the Samara region. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. Vol. 15. No. 3–7. P. 2088–2091. (in Russian).
- Maslov M.N., Maslova O.A., Kopeina E.I. Biochemical stability of water-soluble organic matter in tundra soils of the Khibiny mountains during postfire succession. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 2. P. 316–324. <https://doi.org/10.1134/S1064229321020101>
- Mikhailova E.V., Mironycheva-Tokareva N.P. Post-fire succession in a forest-bog complexes. *Interexpo Geo-Siberia*. 2019. Vol. 4. No. 2. P. 98–105. (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-2-98-105>
- Stavrova N.I., Kalimova I.B., Gorshkov V.V., Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Bakkal I.Y. Long-term postfire changes of soil characteristics in dark coniferous forests of the European North. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 2. P. 218–227. <https://doi.org/10.1134/S1064229319020133>
- Tulokhonov A.K., Puntsukova S.D. Forest fires in the republic of Buryatia in the context of climate change. *Society: Politics, Economics, Law*. 2016. No. 3. P. 72–78. (in Russian).
- Shein E.V., Rusanov A.M., Anilova L.V., Dostova T.M. Water regime change typical chernozem the formation of surface layer pyrogens of different power. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2012. No. 10. P. 112–116. (in Russian).
- Utyuk V.O., Ivanisova N.V. Natural Regeneration of Forest Stands after Ground Fires in the Rostov Region. *Timiryazev Biological Journal*. 2023. No. 1. P. 68–72. (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-1-68-72>
- Cochrane Marc A. Fire science for rainforest. *Nature (Gr. Brit.)*. 2003. No. 6926. P. 213–219.
- Verma S., Jayakumar S. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: a review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 168–176.

*Received 21 October 2025*

*Accepted 13 November 2025*

*Published 12 January 2026*

#### About the authors:

**Elena L. Rostovtseva** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology (Moscow, Russia); [wsnb7@yandex.ru](mailto:wsnb7@yandex.ru)

**Sergey V. Malitsky** – Junior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology (Moscow, Russia); [wsnb@yandex.ru](mailto:wsnb@yandex.ru)

**Olga V. Chestnykh** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology (Moscow, Russia); [ochestn@mail.ru](mailto:ochestn@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7238-6411>

*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/)