

## Почвоведение №9, 2023

Спецвыпуск ПОЧВЕННОЕ ДЫХАНИЕ: ФАКТОРЫ, МЕХАНИЗМЫ, МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

Редакторы: В.Н. Кудеяров, И.Н. Курганова

В. Н. Кудеяров Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1011-1022. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>

Прирост концентрации углекислоты в атмосфере является триггером для активации всех процессов углеродного цикла, включая и дыхание почвы (RS), поскольку вызывает не только рост парникового эффекта атмосферы, но и ее фертилизацию. Следствием фертилизации является тенденция увеличения мировой чистой первичной продукции фотосинтеза (NPP) и гетеротрофного дыхания почв (RH). Повышение глобального наземного стока углерода сопровождалось увеличением CO<sub>2</sub> в атмосфере. Мировое увеличение RH находится в связи с мировыми потерями органического углерода почв и подтверждается моделями, в соответствии с которыми среднее время пребывания (MRT – mean residence time) органического углерода в почвенном пуле за прошлое столетие уменьшилось на 4.4 года. Для оценки уровня секвестрации C в почвах необходимо определение баланса между RH почвы и величиной нового почвенного C-стока в форме чистой биомной продукции (NBP) – устойчивой к минерализации. Сток углерода в экосистемную продукцию (NEP) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода.

Ключевые слова: общее дыхание почв, гетеротрофное дыхание почв, корневое дыхание почв, эмиссия CO<sub>2</sub>, сток углерода, чистая первичная, экосистемная и биомная продукция фотосинтеза

### ДЫХАНИЕ ПОЧВ В ПРИРОДНЫХ ЦЕНОЗАХ

А.В. Иванов, Д.Г. Замолодчиков, М.А. Сало, А.В. Кондратова, О.А. Пилецкая, С.В. Брянин Дыхание почв лесных экосистем юга Дальнего Востока // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1023-1033.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600397>

Дальний Восток – наименее изученная в отношении потоков углерода часть России. Проведен обзор результатов натурных измерений эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности лесных почв, полученных на 26 участках в южной части Дальнего Востока на территории 4 субъектов России. Измерения выполнены в разных лесных формациях (лиственничники, кедровники, дубняки, ясенево-ильмовые леса), включая леса в зоне многолетней мерзлоты. Представлены сведения о сезонной и суточной динамике эмиссии. По 14 участкам представлены параметры уравнений для оценки эмиссии по данным о температуре воздуха на ближайшей метеостанции. Годичные потоки варьируют по пунктам измерения в пределах 5.5–10.1 т С/га, с максимальным значением в старовозрастном кедрово-пихтовом лесу южного Приморья. Вклад летнего сезона в годовой поток составляет 46–65%. В Республике Бурятия эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности почв сильно зависит от температуры и влажности почв.

В переувлажненных почвах на эмиссию значимо влияет уровень грунтовых вод ( $R^2 = 0.42$ ).

Ключевые слова: эмиссия CO<sub>2</sub>, органический углерод почвы, температура почвы, температура воздуха, лесные формации

О. Ю. Гончарова, Г. В. Матышак, М. В. Тимофеева, С.В. Чуванов, М.О. Тархов, А.В. Исаев Эмиссия CO<sub>2</sub> почвами экотонной зоны севера Западной Сибири: закономерности и определяющие факторы // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1034-1048. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600336>

Район исследования почвенного дыхания, север Западной Сибири, расположен на южном пределе распространения близко залегающих многолетнемерзлых пород, в экотонной зоне на границе типичных таежных ландшафтов и южной тундры. Участок характеризуется наличием

контрастных ландшафтов: сосняков с торфяно-подбурами и подзолами (Albic Podzols); мерзлых торфяников (Cryic Histosols) с торфяно-криоземами (Histic Oxyaquic Turbic Cryosols) и болотных экосистем с торфяными олиготрофными почвами (Fibric Histosols). В задачи исследования входила оценка величин эмиссии CO<sub>2</sub> почвами ключевых ландшафтов в вегетационные сезоны 2019–2022 гг. и анализ факторов пространственной вариабельности данного показателя и его межгодовой изменчивости. Исследование включало анализ базы данных (метод статичных закрытых камер) и гидротермических параметров почв, фиксированных в августе в течение 4 лет. При отсутствии тренда к изменению климатических параметров за последние 10 лет, наблюдалось постепенное увеличение температуры почв всех ландшафтов и увеличение глубины протаивания на торфяниках. Данные изменения не сопровождалось существенными изменениями величины. Она составила в лесных экосистемах в среднем от 485 до 540 мг CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч), на торфяно-болотном комплексе от 150 до 255 мг CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч) с высокими коэффициентами пространственной вариабельности. Высокие величины в лесных экосистемах определяются благоприятными гидротермическим режимом, водно-физическими свойствами, высокими запасами корневой биомассы. Часть CO<sub>2</sub>, продуцируемого почвами торфяников, переносится надмерзлотными водами и выделяется с поверхности болотных почв. Температура почв, регулируемая сезонным протаиванием, явилась значимым предиктором пространственной вариабельности на почвах торфяно-болотного комплекса.

Ключевые слова: дыхание почвы, гидротермические параметры, мерзлые торфяники, болотные экосистемы, лесные экосистемы, цикл углерода

А. Ф. Осипов Эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности почвы на 10-летней вырубке среднетаежного сосняка черничного на европейском северо-востоке России // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1049-1058.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600087>

Для оценки роли промышленных рубок на цикл углерода в лесных экосистемах необходимо получение экспериментальных данных по дыханию почвы нарушенных территорий. Исследования проводили в Республике Коми в течение бесснежных периодов 2019–2021 гг. на вырубке среднетаежного сосняка черничного спустя 10 лет после сплошной рубки. Почва – Gleyic Follic Albic Podzol (Arenic). Эмиссию CO<sub>2</sub> измеряли камерным методом при помощи LI COR 8100. На период наблюдений дана характеристика погодных условий и динамики температуры почвы на глубине 10 см. Выявлено, что погодные условия оказывают существенное влияние на интенсивность дыхания почвы. Теплое сухое лето ведет к более интенсивному потоку CO<sub>2</sub> с ее поверхности. Показано, что пасечные участки по сравнению с волоками характеризуются меньшей в 1.3–1.9 раза среднемесячной эмиссией CO<sub>2</sub>. Установлена достоверная положительная взаимосвязь ( $R^2 =$  от 0.12 до 0.86) между температурой почвы и выделением CO<sub>2</sub> с ее поверхности. В год с обильным выпадением осадков на волоках отмечается достоверная взаимосвязь между потоком CO<sub>2</sub> и влажностью верхнего органогенного горизонта почвы, тогда как в более сухой год она отсутствует в отличие от пасечных участков, где наблюдаются обратные зависимости. Пасечные участки в течение бесснежного периода с дыханием почвы эмитируют в атмосферу 303–379 г C/м<sup>2</sup>, волока 419–573 г C/м<sup>2</sup>, что в пересчете на площадь всей лесосеки (5 га) составляет 60–75 т CO<sub>2</sub>. Большая (86–90%) часть выноса углерода происходит с мая по сентябрь, а вклад летних месяцев составляет 56–65%. Полученные данные послужат для определения роли заготовки древесины в углеродном цикле таежных лесов. Ключевые слова: дыхание почвы, сплошная рубка, Gleyic Follic Albic Podzol (Arenic), лесные экосистемы

И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню, Т.Н. Мякшина, Д.В. Сапронов, Д.А. Хорошаев, В.А. Аблеева Температурная чувствительность дыхания почв луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1059-1076.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600476>

Натурные наблюдения за дыханием почв (SR) в разных типах наземных экосистем представляются весьма актуальными, поскольку интенсивность SR характеризуется высокой временной и пространственной вариабельностью. Внутригодовая динамика SR обусловлена в значительной степени изменением гидротермических условий в течение года и часто описывается с помощью коэффициента температурной чувствительности (Q10), который во многих используемых моделях обычно имеет фиксированное значение. Целью настоящего исследования была оценка сезонной и межгодовой динамики температурной чувствительности SR в двух луговых экосистемах южного Подмосквья (умеренно-континентальный климат) на основе непрерывных 25-летних круглогодичных измерений эмиссии CO<sub>2</sub> из почв. Луговые ценозы были сформированы на разных типах почв: дерново-подбуре (Entic Podzol (Arenic)) и серой почве (Haplic Luvisol (Loamic)). Скорость SR измеряли непрерывно с декабря 1997 г. по ноябрь 2022 г. с интервалом 7–10 дней методом закрытых статических камер. Температурная чувствительность SR, оцененная по всей совокупности данных, имела более высокие значения на серых суглинистых почвах по сравнению с супесчаными дерново-подбурами (3.47 vs 2.59). Значения Q10 для SR в обоих типах почв в засушливые годы были в 1.2–1.4 раза ниже, чем в годы с нормальным уровнем влажности. Межгодовая изменчивость (коэффициент вариации) значений Q10 в луговых экосистемах составила 21–36% в зависимости от интервала температур, который принимался в расчет. В обоих луговых ценозах была обнаружена достоверная положительная корреляция между значениями Q10 в интервале температур  $\geq 1^\circ\text{C}$  и индексами влажности. Для получения более точных прогнозов баланса C в экосистемах следует применять дифференцированный подход, интегрируя в модели разные значения температурных коэффициентов для SR.

Ключевые слова: эмиссия CO<sub>2</sub> из почв, Q10, температура почвы, индексы влажности, абиотические и биотические факторы, почвенное органическое вещество, Entic Podzol (Arenic), Haplic Luvisol (Loamic)

О.Э. Суховеева, Д.В. Карелин, А.Н. Золотухин, А.В. Почикалов Дыхание почвы в аграрных и природных экосистемах европейской территории России // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1077-1088.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600488>

занской и Курской областях. Аграрные и природные экосистемы разделены на семь групп: пашни, пастбища, сенокосы, залежи, леса, места содержания животных и открытые компостные хранилища. Измерения эмиссии CO<sub>2</sub> проводили в 2020–2022 гг. камерным методом. Экосистемы оказались ранжированы по возрастанию скорости эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в следующем порядке: пашни (0.03–0.24 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)) < пастбища (0.07–0.33 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)) ≤ сенокосы (0.06–0.35 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)) ≤ леса (0.07–0.28 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)) ≤ залежи (0.08–0.37 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)) загоны (0.21–8.61 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)) компостные хранилища (1.15–13.85 г C–CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)); причем оценки эмиссии CO<sub>2</sub> из почв пастбищ, сенокосов, лесов и залежей в большинстве случаев статистически не различались. Проанализирована зависимость скорости дыхания почвы от гидротермических (температура и влажность верхнего слоя почвы, температура воздуха) и агрохимических (содержание общего углерода и общего азота в верхнем слое почвы, его pH) показателей по географическим регионам и по типам экосистем. Важнейшим среди оцениваемых факторов как на уровне экосистемы, так и на уровне региона является температура почвы на глубине 10 см ( $r_p = 0.41–0.88$ ,  $p < 0.05$ ). Условия увлажнения не играют значимой роли в формировании потока CO<sub>2</sub>. В региональном масштабе имеет значение содержание углерода и азота ( $r_p = 0.33–0.92$ ,  $p < 0.05$ ), которое больше зависит от географического положения объектов, чем от характера хозяйственной деятельности. Рассмотренные показатели на 17–78% определяют дисперсию эмиссии CO<sub>2</sub> из почв исследованных экосистем.

Ключевые слова: почвенная эмиссия CO<sub>2</sub>, пашни, пастбища, сенокосы, залежи, леса, Luvic Phaeozems, Luvic Chernozems, Naplic Chernozems

## ДЫХАНИЕ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

В.И. Васенев, М.И. Варенцов, Д.А. Саржанов, К.И. Махиня, Д.Д. Госсе, Д.Г. Петров, А.В. Долгих  
Влияние мезо- и микроклиматических условий на эмиссию CO<sub>2</sub> почв объектов городской зеленой инфраструктуры Московского мегаполиса // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1089-1102.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600385>

Анализ климатических условий и пространственно-временной неоднородности почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в условиях мегаполиса необходим для понимания роли городской зеленой инфраструктуры в формировании баланса углерода и достижении углеродной нейтральности. Исследования динамики эмиссии CO<sub>2</sub> с параллельным наблюдением температуры и влажности почвы проводили на трех объектах зеленой инфраструктуры Московского мегаполиса, отличающихся по мезоклиматическим условиям, в 2019–2022 гг. Для каждого объекта сопоставляли участки с различными типами растительности, что позволило оценить внутреннюю неоднородность почвенных и микроклиматических условий. Температура почвы определяет до 70% общей дисперсии эмиссии CO<sub>2</sub>. При этом среднегодовая температура почв на участке в центре города была почти на 3–6°C выше, а влажность – на 10–15% ниже по сравнению с периферийными участками (10–12 км от центра). Почва под газонами и кустарниками была в среднем на 1–2°C теплее и на 10–15% влажнее, чем под деревьями. Эмиссия CO<sub>2</sub> почвы под газонами была в среднем за год на 20–30% выше таковой по сравнению с почвой под древесными насаждениями на том же участке. При этом различия между участками с одинаковой растительностью в центре и на периферии достигали 50%, что отражает высокую уязвимость запасов углерода городских почв к мезоклиматическим аномалиям и высокие риски дальнейшего увеличения эмиссии CO<sub>2</sub> городскими почвами на фоне климатических изменений.

Ключевые слова: урбанизация, городские почвы, остров тепла, запасы углерода, почвенное дыхание, устойчивое развитие городской среды

С.Н. Горбов, В.И. Васенев, Е.Н. Минаева, С.С. Тагивердиев, П.Н. Скрипников, О.С. Безуглова  
Краткосрочная динамика эмиссии CO<sub>2</sub> и содержания углерода в городских почвенных конструкциях в условиях степного региона // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1103-1115.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600282>

Почвенные конструкции – важный компонент городской зеленой инфраструктуры, роль которого в балансе углерода городских экосистем остается недостаточно изученной. Динамика запасов углерода и эмиссии CO<sub>2</sub> почвенных конструкций зависит как от биоклиматических условий, так и от параметров конструирования – используемых субстратов, состава и мощности слоев. Исследования динамики запасов углерода и эмиссии CO<sub>2</sub> проводили на конструктоземах различного строения, созданных на базе “Экспериментального стационара по изучению почвенных конструкций” в Ботаническом саду Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону). Стационар включает 15 автономных площадок, на которых представлены 5 различных вариантов почвенных конструкций, созданных на основе субстратов, традиционно используемых для задач озеленения и благоустройства в городах степной зоны. В качестве фоновой почвы изучали чернозем миграционно-сегрегационный (Naplic Chernozem), расположенный на плакорном участке в непосредственной близости от экспериментального стационара. Мониторинговые исследования в течение года (с сентября 2020 г. по ноябрь 2021 г.) позволили сопоставить сезонную динамику содержания органического и неорганического углерода и эмиссии CO<sub>2</sub> для различных вариантов почвенных конструкций по сравнению с фоном. Во всех конструкциях, созданных на основе гумусово-аккумулятивных горизонтов

черноземов, отмечена высокая и заметная зависимость эмиссии CO<sub>2</sub> от температуры воздуха (при  $p < 0.05$  для конструкции 2 –  $r = 0.76$ , конструкции 3 –  $r = 0.82$ , конструкции 4 –  $r = 0.76$ , конструкции 5 –  $r = 0.49$ ) и почвы (при  $p < 0.05$  для конструкции 2 –  $r = 0.58$ , конструкции 3 –  $r = 0.74$ , конструкции 4 –  $r = 0.75$ , конструкции 5 –  $r = 0.68$ ). Определены запасы биомассы газонных трав, произрастающих на конструкциях, отмечена положительная корреляция эмиссии CO<sub>2</sub> и прироста наземной биомассы (для конструкции 2 умеренная корреляция ( $r = 0.48$ ,  $p < 0.05$ ), для конструкций 3 и 4 – заметная ( $r = 0.5$ ,  $p < 0.05$ ;  $r = 0.68$ ,  $p < 0.05$ ), а для конструкции 5 – высокая ( $r = 0.75$ ,  $p < 0.05$ )). Изучена динамика запаса различных форм углерода в первый год функционирования конструкций. На основании сопоставления потоков и запасов углерода показано, что в условиях умеренно-континентального климата г. Ростова-на-Дону газонные экосистемы на ранних стадиях существования конструктоземов не могут считаться участками нетто-стока углерода.

Ключевые слова: городские почвы, конструктоземы, черноземы (Haplic Chernozems), эмиссия углекислого газа

И.А. Сморгалов, Е.Л. Воробейчик Влияние промышленного загрязнения на пространственную неоднородность дыхания почвы лесных экосистем // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1116-1127.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600403>

Впервые исследовано влияние отдельных деревьев на дыхание почвы и лесной подстилки в лесах, загрязненных тяжелыми металлами от выбросов медеплавильного завода. Тестировали гипотезу об уменьшении связанного с положением относительно ствола дерева компонента пространственной дисперсии дыхания на загрязненных участках по сравнению с фоновой территорией. Исследованы елово-пихтовые и березовые леса южной тайги, подверженные многолетнему загрязнению выбросами Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда, Свердловская область). Точки измерения располагали возле модельных деревьев ели и березы на разном удалении от ствола дерева (приствольный участок, середина проекции кроны, окно в пологе древостоя). В каждой точке измеряли общую эмиссию CO<sub>2</sub>, дыхание подстилки, ее вклад в дыхание почвы, удельную дыхательную активность подстилки и ее запас. На фоновой территории дыхание почвы снижается от ствола дерева к окну. Тестируемая гипотеза подтверждена лишь частично: в еловых лесах доля дисперсии дыхания почвы, объясняемая положением относительно ствола дерева, снижалась при увеличении загрязнения, но в березовых не менялась. Снижение роли положения относительно ствола дерева в еловых лесах связано с уменьшением удельной дыхательной активности подстилки, хотя запас подстилки был существенно больше возле ствола по сравнению с окном. Чтобы уменьшить возможное смещение оценок дыхания почвы предложено располагать точки измерения в подкروновых участках, т.е. на достаточном удалении от стволов деревьев и вне окон в пологе древостоя. Ключевые слова: лесная подстилка, пространственная структура, медеплавильный завод, тяжелые металлы, Stagnic Retisols

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЫХАНИЯ ПОЧВ

И. В. Припутина, П. В. Фролов, В. Н. Шанин, С. С. Быховец, И. Н. Курганова, В. О. Лопес де Гереню, Д. В. Сапронов, Е. В. Зубкова, Т. Н. Мякшина, Д. А. Хорошаев Имитационное моделирование дыхания лесных почв на примере дерново-5 подбура хвойно-широколиственного леса в Южном Подмосковье // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1128-1142. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600439>

Рассмотрены результаты расчетов гетеротрофного (HR) и общего дыхания дерново-подбура (Entic Carbic Podzol) под хвойно-широколиственным лесом в южном Подмосковье (54.89° N, 37.56° E), выполненные на основе почвенной модели Romul\_Hum и новой версии системы

моделей EFIMOD3. Результаты моделирования хорошо коррелируют с данными полевых измерений почвенного дыхания. Модель Romul\_Hum лучше воспроизводит интенсивность HR исследуемой почвы во влажные годы, чем в засушливые, когда оценки HR завышаются. Пространственно-детализированное моделирование гетеротрофного и корневого дыхания с использованием EFIMOD3 учитывало вариабельность запасов и потоков углерода, связанную с неоднородностью распределения опада и гидротермических условий под пологом леса. Полученные данные показывают, что интенсивность HR в начале и середине вегетационного сезона различается примерно вдвое, а величины HR между разными участками имитационной площадки в один и тот же срок – более чем в 3.5 раза. Пространственная и временная изменчивость гетеротрофного дыхания почв влияет на точность оценок баланса углерода в лесных экосистемах. Используемые модели являются эффективным инструментом анализа изменений почвенных запасов углерода, дыхания почв и оценки стока углерода в лесных экосистемах, в том числе в задачах управления лесами.

Ключевые слова: гетеротрофное дыхание почв, пространственная и временная вариабельность, Entic Carbic Podzol, структура растительных сообществ, пространственно-детализированное моделирование, EFIMOD3, Romul\_Hum

Güzel Yılmaz, and Ali Volkan Bilgili "Modeling of CO<sub>2</sub> Emissions of Soils under Newly Established, Non-Irrigated and Irrigated Urban Turfgrass Management in SE of Turkey," Eurasian Soil Science, 56 (9), - (2023). <https://doi.org/10.1134/S1064229323600100>

The areas under turf grass increase with the increase in rapid urbanization rate. Therefore, accounting for their contribution to greenhouse gas emission to atmosphere is needed. Information in this area is rather limited. This study aimed to quantify and model two years long term (2016-2017) temporal variations in soil CO<sub>2</sub> emissions from newly established turf grass area under semiarid conditions and to assess the influence of irrigation on the soil CO<sub>2</sub> respiration. The measurements were obtained from irrigated and non-irrigated plots with respect to meteorological variables (air temperature, soil temperatures at different depths, rainfall and relative humidity) and the field soil moisture data using classical and Stepwise MLR models. Potential use of available auxiliary meteorological and field soil moisture data for the estimation of future CO<sub>2</sub> emissions were also investigated using Artificial Neural Network (ANN) models whose accuracy was tested using independent data sets. Two years of continuous measurements revealed that CO<sub>2</sub> emissions highly varied seasonally from 318 to 2621 kg ha<sup>-1</sup> week<sup>-1</sup> for irrigated and from 390 to 1711 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> week<sup>-1</sup> for non-irrigated plots, respectively, with 31% more emissions from irrigated plots compared to non-irrigated ones. Overall the models constructed using measured soil CO<sub>2</sub> emissions from irrigated and non-irrigated managements. Inclusion of the soil field moisture data did not significantly impact the results. ANN models were able to moderately successfully estimate CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** Turf grass, soil, irrigation, CO<sub>2</sub> emissions, modeling, MLR, ANN, Turkey

## ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И МИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ

И.М. Рыжова, М.А. Подвезенная, В.М. Телеснина, Л.Г. Богатырев, О.В. Семенюк Оценка запасов углерода и потенциала продуцирования CO<sub>2</sub> почвами хвойно-широколиственных лесов // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1143-1154. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600713>

Проведена оценка запасов углерода в почвах хвойных и лиственных лесных экосистем, агроценозов, залежей и пойменных лугов территории агробиостанции МГУ “Чашниково”. Определены типологическая принадлежность, запасы, содержание детрита и соотношение мощностей (запасов) подгоризонтов лесных подстилок, как индикаторов интенсивности разложения органического вещества. Получены оценки запасов общего органического углерода в слоях 0–30 и 0–100 см минерального профиля и запасов углерода биологически активного органического вещества в слое 0–20 см расчетным путем по данным о содержании общего

углерода. Выявлено максимальное накопление органического углерода в лесных подстилках и умеренное – в минеральной части профиля дерново-подзолистых почв хвойных лесов. Запасы углерода лесной подстилки ельников отличаются почти в 10 раз в зависимости от местоположения в тессере. Минимальным накоплением углерода характеризуются подстилки почв луговых биогеоценозов, как суходольных, так и пойменных. Аллювиальные серогумусовые почвы пойменных лугов характеризуются максимальными запасами общего углерода и углерода биологически активного органического вещества. Потенциал продуцирования почвой углекислого газа, определенный по данным о структурных и функциональных характеристиках подстилки и запасах углерода биологически активного органического вещества в верхнем (0–20 см) слое почв, зависит от сочетания нескольких факторов: типа растительности, степени гидроморфизма и характера сельскохозяйственного использования в прошлом или настоящем. В почвах хвойных лесов по сравнению с лиственными ниже скорость разложения подстилки из-за особенностей биохимического состава опада, поэтому они имеют более низкий потенциал продуцирования CO<sub>2</sub>. Почвы естественных травяных биогеоценозов, особенно пойменных лугов, являются максимальными потенциальными продуцентами углекислого газа за счет интенсивного разложения растительного опада и повышенных запасов углерода биологически активного органического вещества.

Ключевые слова: углерод почв, запасы почвенного органического вещества, лесные подстилки, климатически активные газы, Retisol, Fluvisols

В. М. Семенов, Т. Н. Лебедева, Д. А. Соколов, Н. Б. Зинякова, В. О. Лопес де Гереню, М. В. Семенов  
Измерение почвенных пулов органического углерода, выделенных био-физико-химическими способами фракционирования // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1155-1172. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427>  
Исследования проводили с образцами разных горизонтов дерново-подзолистой почвы (Albic Retisol) и типичного чернозема (Haplic Chernozem), отобранными под естественными угодьями и пашней. Определяли содержание углерода в структурных (твердые органические частицы размером 2–0.05 мм, СПОМ и минерально-ассоциированное органическое вещество размером <0.05 мм, СМАОМ) и процессных (потенциально-минерализуемое органическое вещество, С0 и микробная биомасса, Смик) пулах. В гумусовом горизонте целинной и пахотной дерново-подзолистой почвы в пулах СПОМ, СМАОМ, С0 и Смик содержалось соответственно 38 и 24, 56 и 72, 5.9 и 5.6, 1.2 и 1.3% от Сорг. Размеры этих пулов в целинном и пахотном черноземе составляли соответственно 42 и 30, 53 и 68, 3.6 и 2.8, 0.5 и 0.5% от Сорг. Несмотря на небольшую массу фракции твердых органических частиц, эмиссионный потенциал СПОМ пула был соизмерим СМАОМ пулу с большей по массе фракцией минерально-ассоциированного органического вещества. Предложена методика количественного разделения почвенного органического вещества (ПОВ) на активный, промежуточный (медленный) и пассивный пулы. Размеры активного пула ПОВ устанавливаются по содержанию Смик и С0, размеры пассивного пула – по содержанию химически неокисляемого органического вещества в СПОМ и СМАОМ фракциях, а промежуточного пула рассчитываются по разнице между валовым органическим углеродом и суммой активного и пассивного пулов. В активном, промежуточном и пассивном пулах исследуемых почв содержалось соответственно 1–7, 51–81 и 13–48% от Сорг без особых различий между разными землепользованиями.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, секвестрация, депонирование, органическое вещество твердых частиц, минерально-связанное органическое вещество, потенциально-минерализуемое органическое вещество, микробная биомасса

И. Д. Гродницкая, В. А. Сенашова, Г. И. Антонов, Г. Г. Полякова, О. Э. Пашкеева, Н. В. Пашенова  
Биоиндикация состояния темно-серой почвы в сосняках Красноярской лесостепи при антропогенном

Биологическую активность темно-серой почвы исследовали в 100-летнем сосняке разнотравно-зеленомошном Погорельского бора Красноярской лесостепи. В 2017 г. в сосняке были проведены выборочные рубки, а в мае 2022 г. произошел сильный пожар. Для улучшения лесовосстановления и повышения биологической продуктивности почвы на вырубленные и горевшие участки вносили биоудобрение на основе опилочно-почвенного субстрата с микопродуктом и мочевиной (ОПСМ + М). На экспериментальных участках (пасека, волок, фон) проводили ежегодный учет самосева сосны. Биоиндикацию состояния почвы оценивали на основании общей численности и соотношения долей эколого-трофических групп микроорганизмов, активности ферментов, содержания микробной биомассы, интенсивности базального дыхания и удельного дыхания микробной биомассы. Внесение биоудобрения на вырубленные участки способствовало подщелачиванию почвы на 0.2–0.4 ед., сохранению влажности, увеличению содержания азота (на 5–14%) и микробной биомассы (в 1.2–1.6 раза) по сравнению с контрольными вариантами. Воздействие биоудобрений на всхожесть и рост самосева сосны отмечено на второй год после внесения: на опытных участках самосева было в 4–6 раз больше, чем на контрольных. Поступление в почву обгоревших растительных остатков, углей и золы в первую неделю после пожара привело к активизации микроорганизмов-карботрофов, которые увеличивали общую численность микроорганизмов, микробную биомассу, активность уреазы и инвертазы. Однако к концу вегетационного периода отмечали снижение микробиологической активности, что указывало на постпирогенную депрессию микробоценозов. Внесение биоудобрения на сгоревшую поверхность участков нивелировало влияние пирогенного воздействия и стимулировало образование всходов сосны обыкновенной, количество которых было достоверно больше, чем на контрольных участках. Установлено, что универсальными биоиндикаторами, адекватно отражающими состояние почвы после всех антропогенных воздействий, были микробная биомасса, удельное микробное дыхание, ферментативная активность и общая численность микроорганизмов. Специфической биоиндикацией состояния почвы после пожара являлось увеличение доли бактерий *Serratia plymuthica*, *Bacillus mycoides* и грибов родов *Trichoderma*, *Penicillium* и *Mortierella*.  
Ключевые слова: темно-серая почва (*Harlic Greyzems*), рубки, пожар, биоудобрение, дыхательная и ферментативная активность, микроорганизмы-карботрофы, биоиндикаторы состояния почвы

Е. В. Смирнова, К. Г. Гиниятуллин, Р. В. Окунев, А. А. Валеева, С. С. Рязанов Оценка направленности и механизмов влияния внесения биоугля на почвенное дыхание в лабораторном инкубационном эксперименте // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1190-1202. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600312>

В лабораторном эксперименте изучали влияние биоугля (БУ) на субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почв. В опыте использовали 10 образцов БУ, полученных из древесных и травянистых материалов в двух режимах пиролиза. Интенсивность СИД определяли через 3 сут, 3 и 6 мес. инкубации. При кратковременной инкубации не наблюдалось влияния БУ на СИД. Исключением был вариант с внесением БУ на основе кукурузы, в котором наблюдалось увеличение СИД на 34.6%. При инкубации в течение 3 мес. обнаруживалось значимое увеличение СИД (от 30.4 до 54.8%) при внесении пяти БУ. При инкубации в течение 6 мес. значимое увеличение СИД (от 30.4 до 65.9%) наблюдалось при внесении восьми БУ. Для оценки свойств БУ, оказывающих влияние на СИД, использовали Лассо регрессию и 23 показателя свойств БУ в качестве потенциальных предикторов. Обнаружено, что при трехдневной инкубации положительное влияние на СИД оказывают следующие свойства БУ: содержание окисляемого органического вещества, обменного кальция и рН водной суспензии, а слабое

отрицательное – содержание обменного натрия. При инкубации в течение 3 мес. наблюдается положительное влияние окисляемого органического вещества, а через 6 мес. – содержания золы. Поскольку в опытах наблюдалось только положительное статистически значимое влияние БУ на СИД, сделаю вывод, что для объективной оценки эффективности их использования для секвестрации CO<sub>2</sub> в почвах необходимы балансовые расчеты, в которых наряду с количеством внесенного в почвы с БУ устойчивого углерода, должно учитываться потенциальное увеличение эмиссии CO<sub>2</sub> из почв за счет активации почвенной сапрофитной микробиоты.

Ключевые слова: секвестрация атмосферного углерода, биоуголь, субстрат-индуцированное дыхание почв, регрессионный анализ

