



Применение ансамбля T&P-моделей для оценки дыхания лесных почв в зоне умеренно-континентального климата

© 2024 С. Н. Кивалов , И. Н. Курганова , В. О. Лопес де Гереню , Т. Н. Мякшина , Д. В. Сапронов , Д. А. Хорошаев 

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, д. 2, корпус 2, г. Пушкино, Московская обл., 142290, Россия.

E-mail: snk2105@gmail.com

Цель исследования. Используя ансамбль T&P-моделей (эмпирических моделей дыхания почвы, связывающих его с температурой, осадками и другими метео- и почвенными параметрами, показать зависимость выбора оптимальных эмпирических моделей дыхания почвы от типов почв лесных экосистем – дернового подбур и серой лесной, а также от вариантов параметризации моделей с помощью температур почвы или воздуха, осадков и запаса органического углерода в почве.

Место и время проведения. Зона умеренно-континентального климата Средней полосы России: хвойно-широколиственный лес северного берега р. Оки и широколиственный лес южного берега р. Оки; сбор и обработка данных за 1998–2022 годы.

Методы. Использовали ансамбль эмпирических моделей дыхания почвы, связывающий дыхание почвы с месячными средними температур почв или воздуха и осадков, а также запасами органического углерода в почве. При этом предложен метод определения дыхания почвы при нуле градусов по результатам сравнительного анализа моделируемых данных с измерениями.

Основные результаты. Для дернового подбур – почвы с хорошим дренажем – лучшими показали себя модели, связывающие дыхание почвы с ее температурой, осадками и запасом органического углерода, в то время как для серой лесной – почвы с хорошей водоудерживающей способностью – лучшей моделью оказалась модель типа Райха-Хаитмото с квадратичной зависимостью от температуры в экспоненте.

Заключение. При выборе оптимальных эмпирических моделей дыхания почвы продемонстрирована важность учета таких почвенных параметров как запас органического углерода и способность удерживать влагу.

Ключевые слова: моделирование дыхания почв; дерновый подбур (*Entic Podzol*); серая лесная почва (*Haplic Luvisol*); лесные экосистемы; ансамбль эмпирических моделей.

Цитирование: Кивалов С.Н., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А. Применение ансамбля T&P-моделей для оценки дыхания лесных почв в зоне умеренно-континентального климата // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e252. DOI: [10.31251/pos.v7i2.252](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.252).

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное дыхание (SR – soil respiration) – это основной путь, по которому углерод покидает наземные экосистемы (Ryan, Law, 2005; Peltoniemi et al., 2007; Le Quéré et al., 2015), изменяя запасы органического углерода (SOC – soil organic carbon) почвы и его распределение в ней (Valentini et al., 2000). Именно поэтому мониторинг почвенного дыхания нужно проводить для оценки способности экосистемы противостоять стрессам, вызванным неблагоприятными изменениями окружающей среды и климата (Peltoniemi et al., 2007; Le Quéré et al., 2015), и представления ежегодной инвентаризации парниковых газов (UNFCCC 2006).

Ряд исследований, посвященных как измерениям почвенного дыхания, так и применению эмпирических моделей, подчеркивает зависимость дыхания почвы от: (1) температуры (Howard P., Howard D., 1979; O'Connell, 1990; Raich, Potter, 1995; Lopes De Gerenyu et al., 2005; Juhász et al., 2022); (2) влажности (Orchard, Cook, 1983; Raich, Potter, 1995; Jarvis et al., 2007; Maier et al., 2010; Chamindu Deeragoda et al., 2015); (3) осадков как замещения влажности (Выгодская и др., 2009; Карелин и др., 2017; Суховеева, Карелин, 2022; Raich, Potter, 1995; Yuste et al., 2003; Kurganova et al., 2017; 2020); (4) изменения уровня воды в почве (Махныкина и др., 2021; Kayranli et al., 2010; Pavelka et al., 2016); (5) распределения надземной биомассы (Reichstein et al., 2003; Macdonald et al., 2021) и запасов

органического углерода, хранящихся в почвах экосистем (Ильясов и др., 2020; Del Grosso et al., 2005; Lal, 2005; Ryan, Law, 2005; Chen et al., 2010; Soil carbon ..., 2018; Kivalov et al., 2023).

Ансамбли эмпирических моделей позволяют провести непосредственное сравнение этих моделей при сохранении общей параметризации, чтобы исследовать их применимость в различных условиях и к различным экосистемам (Dyukarev, Kurakov, 2023; Kivalov et al., 2023).

Исходя из непосредственной зависимости активности микробной биомассы от температуры почвы (Raich, Potter, 1995; Monson et al., 2006), использование температуры почвы (T_{soil}) может значительно улучшить результаты моделирования дыхания почвы по сравнению с использованием температур воздуха (T_{air}). С другой стороны, пористость почвы влияет на доступность атмосферного кислорода в ней, что вместе с различным количеством запасов органического углерода может влиять на величину дыхания для разных почв (Марчик, Ефремов, 2006; Maier et al., 2010; Neira et al., 2015).

Настоящее исследование направлено на рассмотрение этих гипотез путем выявления лучших версий эмпирических моделей дыхания почвы в ансамблях моделей, параметризованных среднемесячными значениями (1) температуры почвы или воздуха (T), (2) количества осадков (P) и (3) запасов органического углерода (C) в применении к песчаному дерновому подбурю и суглинистой серой лесной почве лесных экосистем в зоне умеренно-континентального климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные измерения дыхания почвы получены с двух площадок в зоне умеренно-континентального климата (табл. 1). Первая площадка с дерновым подбуром ($54^{\circ}50'$ с.ш., $37^{\circ}35'$ в.д.) расположена в зоне хвойно-широколиственных лесов в Приокско-Террасном природном биосферном заповеднике на северном берегу р. Оки; ландшафт представляет собой песчаные террасы, расположенные над поймой. Вторая площадка с серой лесной почвой ($54^{\circ}20'$ с.ш., $37^{\circ}37'$ в.д.) расположена в зоне широколиственных лесов на южном берегу р. Оки; ландшафт холмистый, возвышается на 100–150 м над рекой. Река Ока служит границей между лесными зонами. Расстояние между участками составляет около 8,6 км в направлении север-юг. Подробное описание участков измерений приведено в работе С.Н. Кивалова с соавторами (Kivalov et al., 2023). Обе площадки находятся в одной климатической зоне со среднегодовой температурой воздуха $4,8^{\circ}\text{C}$, летом $+17,6^{\circ}\text{C}$ (макс. $38-39^{\circ}\text{C}$), зимой $-8,3^{\circ}\text{C}$ (мин. -43°C в 1978); среднее количество осадков – 671 мм (максимум 91 мм в июле) (<https://pt-zapovednik.org>, комплексная измерительная станция рядом с посёлком Данки).

Таблица 1

Свойства леса и свойств почвы на площадках измерений (данные для дернового подбура обновлены по результатам измерительной компании 2023 года)

		Дерновый подбур*	Серая лесная*
Лес	Лесная зона	Хвойно-широколиственная	Широколиственная
	Тип леса	Зрелый хвойно-широколиственный лес: сосна, липа, осина, береза и дуб; средним возрастом до 90-120 лет ¹⁾	Вторичный широколиственный лес: осина, липа, береза и клен; средним возрастом до 50-70 лет ¹⁾
Почва (0–20 см)	Текстура	песочно-суглинистая ¹⁾	суглинистая ¹⁾
	Гранулометрия (песок: ил: глина)	85 : 13 : 2	40 : 40 : 20 ²⁾
	pH KCl	4,55	5,56 ¹⁾
	C/N [kg(C) kg(N) ⁻¹]	14,4	12,8 ¹⁾
	Запасы органического углерода (кг C/м ²)	2,91	5,02 ³⁾
Водоудерживающая способность (%)	40,5 ¹⁾	57,5 ¹⁾	

Примечание.

* – название почв приведено согласно: Классификация и диагностика почв СССР (1977). Дерновый подбур по классификации IUSS Working Group WRB (2014) соответствует Entic Podzol, серая лесная почва – Naplic Luvisol. ¹⁾ Kurganova et al. (2017); ²⁾ Brown (2007); ³⁾ Kurganova et al. (2022).

Следует отметить, что исследуемые почвы существенно отличаются как по гранулометрическому составу – значительное содержание илистой и глинистой фракций в серой

лесной почве, так и по их способности удерживать влагу – слабая у дернового подбуря и достаточно хорошая у серой лесной почвы, что оказывает непосредственное влияние на водный баланс экосистем.

В исследовании использованы 25-летние измерения дыхания почвы, проводимые на этих площадках с помощью закрытых камер (Kurganova et al., 2020). Одновременно с дыханием почвы измеряются температура почвы на глубине 5 см (T_{soil}) и температура воздуха на высоте 1 м. Месячные средние температур воздуха (T_{air}) и количества осадков (P) взяты из архива комплексной измерительной станции, расположенной около поселка Данки.

Рассматриваются следующие эмпирические модели дыхания почвы, связывающие SR с T (Kurganova et al., 2020):

$$SR_T = R_0 e^{QT} \quad (1)$$

связывающие SR с T и P (Суховеева, Карелин, 2022; Raich, Potter, 1995; Lopes De Gerenu et al., 2005):

$$SR_{TP} = R_0 e^{QT} \left(\frac{P}{K + P} \right) \quad (2)$$

$$SR_{TPP} = R_0 e^{QT} \left(\frac{\alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}}{K + \alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}} \right) \quad (3)$$

$$SR_{TPPrh} = R_0 e^{(QT - Q_2 T^2)} \left(\frac{\alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}}{K + \alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}} \right) \quad (4)$$

связывающие SR с T , P и SOC (Kivalov et al., 2023):

$$SR_{TPPC} = R_0 e^{QT} \left(\frac{\alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}}{K + \alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}} \right) \left(\frac{SOC}{\psi + SOC} \right) \quad (5)$$

где R_0 – дыхание почвы при $T_{soil} = 0^\circ C$ и отсутствии оледенения поверхностного слоя почвы, препятствующего газообмену (нормальные условия). После определения R_0 , остальные параметры моделей последовательно вычисляются с помощью нелинейной регрессии (nlm): Q и Q_2 – температурные коэффициенты; K – константа полунасыщения между SR и P ; α – коэффициент перераспределения осадков между текущим (P) и предыдущим (P_{m-1}) месяцами; ψ – константа полунасыщения между SR и SOC .

Параметры температурной модели дыхания почвы T (выражение 1) являются ключевыми во всех приведённых моделях (выражения 1–5). Параметр R_0 непосредственно связан с измеренным дыханием почвы и определяет точку отсчета моделей при дальнейшем изменении их параметров. Поэтому он не является свободным параметром модели, его необходимо определять и фиксировать перед (при) применением регрессионного анализа. Параметр Q определяет наиболее существенную зависимость изменения дыхания почвы, связанную с изменением T_{soil} или T_{air} .

Для определения R_0 мы используем линейную модель сравнения между измеренными и смоделированными данными, где R_0 соответствует данным, измеренным в холодный период (синяя выделенная зона, рис. 1). Как правило, из-за недостатков нелинейной регрессии, основанной на минимизации среднеквадратичного отклонения, происходит переоценка нижних значений, в результате которой коэффициент пересечения с осью ординат оказывается положительным, что приводит к некорректному размещению R_0 (рис. 1).

Предлагаемый нами подход оптимизации (рис. 1) – последовательно проводить нелинейную регрессию на моделях (выражения 1–5) с фиксацией общих параметров R_0 и Q и контролем над параметром R_0 , чтобы привести коэффициент пересечения с осью ординат линейной модели к нулевому значению. Таким образом, удаётся корректно разместить R_0 , а также выделить влияние других описанных выше параметров приведённых моделей и определить какие из них будут работать лучше в конкретных условиях.

Качество моделей оценивается по величине наклона линейной модели сравнения (slope), коэффициенту детерминации (R^2), а также по среднеквадратичному отклонению смоделированных и измеренных данных (RMSE – root mean square error).

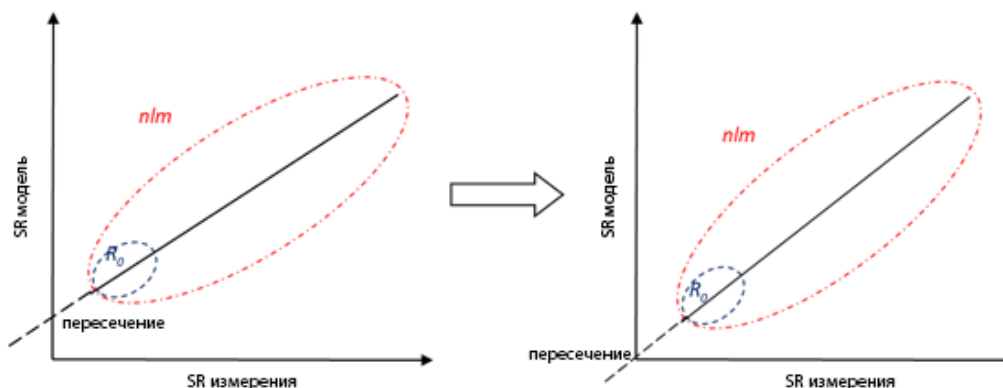


Рисунок 1. Иллюстрация метода определения почвенного дыхания при 0°C и нормальных условиях (R_0) исходя из оптимизации по пересечению с осью ординат линейной модели сравнения между измеренными и смоделированными данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стандартный подход к оценке R_0 предусматривает определение дыхания почвы, измеренного в промежутке температур между 0 и +1 °C, с последующим усреднением. При этом возникает проблема возможной переоценки R_0 из-за экспоненциальной температурной зависимости SR (выражение 1) и несимметричного по температуре выбора значений SR: R_0 должно соответствовать $T_{soil} = 0$ °C, что не выдерживается при стандартном выборе SR: $0 < T_{soil} < +1$ °C. Результат предложенной нами оптимизации параметра R_0 (рис. 2.) показывает, что этой переоценки удастся избежать и оцененная R_0 оказывается в пределах нижней четверти от измеренных при $0 < T_{soil} < +1$ °C значений дыхания почвы.

Большой разброс в измеренных значениях дыхания почвы ассоциируется с различным режимом осадков в разные годы. Для дернового подбур наименьшие значения SR были измерены при недостатке осадков, тогда как для серой лесной почвы недостаток осадков ассоциируется с наибольшим измеренным SR. Эта аномалия может быть объяснена из различия способности почв удерживать влагу – дерновый подбур легко пересыхает, в то время как серая лесная почва легко переувлажняется, что может непосредственно влиять на активность микробной биомассы.

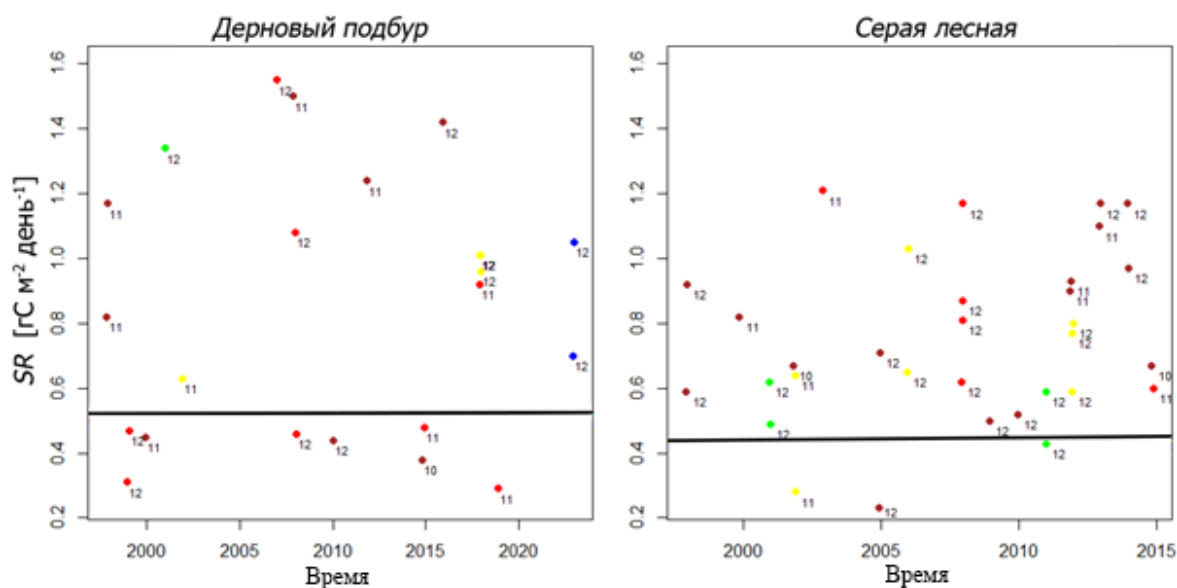


Рисунок 2. Результаты выбора R_0 (черные линии) по проведённой оптимизации линейного сравнения между измеренными и смоделированными значениями почвенного дыхания. Точки – измерения почвенного дыхания, отмеченные соответствующими месяцами; цветовая схема точек – наличие среднемесячных осадков: красный ($11 < P < 34$ мм), коричневый ($34 < P < 57$ мм), жёлтый ($57 < P < 80$ мм), зелёный ($80 < P < 103$ мм) и голубой ($103 < P < 126$ мм).

Сравнение между использованными в ансамбле моделями (выражения 1–5) показывает (рис. 3.), что для песчаного дернового подбур с хорошим дренажем и низким содержанием органического углерода подходят модели, учитывающие запасы органического углерода (TPPC) и типа Райха-Хашимото с квадратичной температурной зависимостью (TPPrh), в то время как для суглинистой серой лесной почвы, имеющей хорошую водоудерживающую способность, лучше применять модели типа Райха-Хашимото с квадратичной температурной зависимостью (TPPrh), которая может быть связана с реакцией микробной биомассы на изменения температуры в летнее время. Результаты моделирования этими моделями показывают наиболее близкие к измеренным средние значения (синие стойки, рис. 3.) и оказываются в пределах границ неопределенности, определяемых стандартными отклонениями (вертикальные планки, рис. 3.).

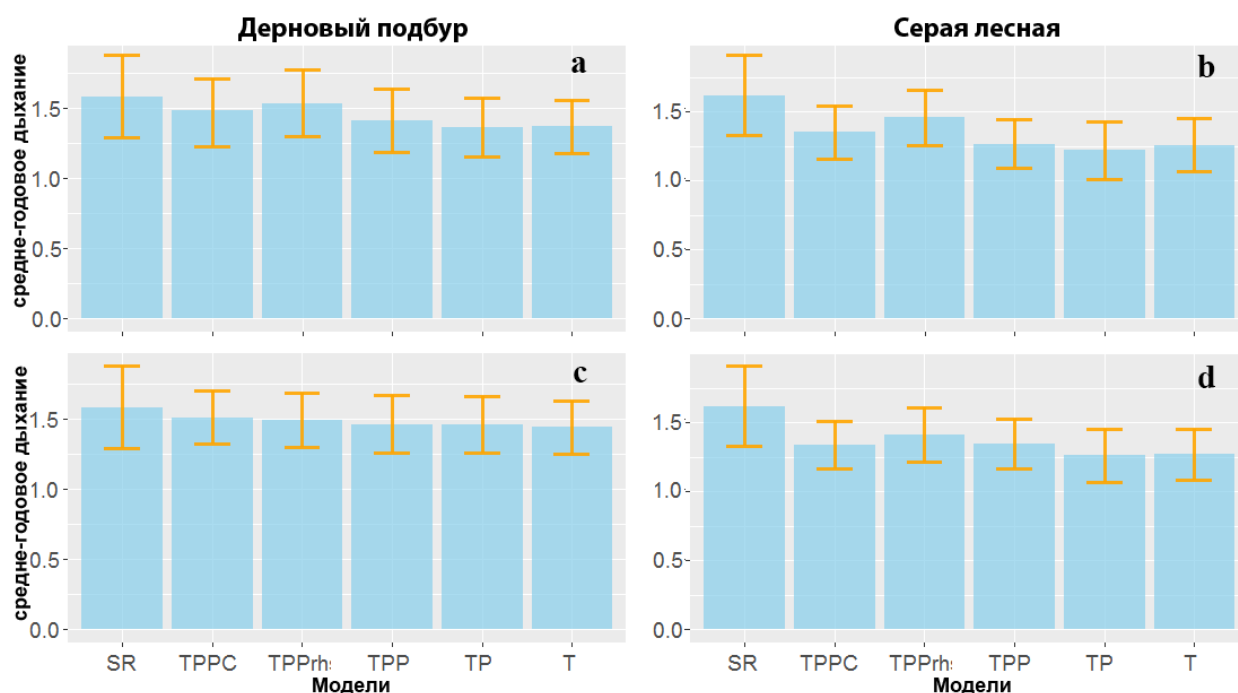


Рисунок 3. Средние в течение года дневные значения 25-летних измерений почвенного дыхания (SR, г С м⁻² день⁻¹) и моделирования (голубой цвет, модели – TPPrh, TPPC, TPP, TP, T). Вертикальные планки – стандартное отклонение годовых значений SR. (a, b) – Tsoil (локальные данные), (c, d) – Tair (измерительная станция Данки).

Таблица 2

Результаты сравнения по slope, R² и RMSE моделей дыхания почвы (T, TP, TPP, TPPC, TPPrh) с измерениями при параметризации моделей температурой почвы (s) или воздуха (a)

model	Дерновый подбур			Серая лесная		
	R ²	slope	RMSE	R ²	slope	RMSE
Ts	0,63	0,74	0,65	0,53	0,71	0,83
TPs	0,65	0,73	0,65	0,53	0,71	0,83
TPPs	0,65	0,73	0,64	0,53	0,72	0,81
TPPCs	0,70	0,87	0,59	0,58	0,84	0,78
TPPrhs	0,71	0,84	0,55	0,61	0,76	0,68
Ta	0,60	0,71	0,64	0,51	0,67	0,81
TPa	0,62	0,70	0,64	0,51	0,67	0,81
TPPa	0,62	0,70	0,64	0,50	0,68	0,81
TPPCa	0,70	0,88	0,59	0,60	0,85	0,75
TPPrha	0,66	0,83	0,61	0,58	0,75	0,73

Примечание.

Жирным выделены цифры, обозначающие наибольшие R² и slope и наименьшие RMSE.

Эти же модели оказываются лучшими из рассмотренных моделей по величине наклона линейной модели сравнения (slope), коэффициенту детерминации (R^2), а также по среднеквадратичному отклонению моделированных и измеренных данных (RMSE) (табл. 2). Для обеих почв, при параметризации температурой почвы, TRPrh показывает несколько лучшие результаты по R^2 и RMSE, при этом отставая от TRPC по значению slope. При параметризации температурой воздуха, TRPC показывает несколько лучшие результаты по всем параметрам для дернового подбуря и лучше, чем TRPrh по slope, R^2 для серой лесной почвы. Однако, несмотря на хорошие результаты моделирования для серой лесной почвы, TRPC оказывается вне зоны неопределенности по сравнению с измеренными данными (рис. 3d), из-за чего не должна быть использована в текущей параметризации.

ВЫВОДЫ

1. Продемонстрированы важность учёта запасов органического углерода и водоудерживающей способности почв для выбора правильных моделей дыхания почвы.
2. Для песчаного дернового подбуря лучше использовать модели с зависимостью от запасов органического углерода и модели типа Райха-Хашимото.
3. Для суглинистой серой лесной лучше применять модели типа Райха-Хашимото.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование демонстрирует важность учёта запасов органического углерода и водоудерживающей способности почв для выбора лучших версий эмпирических моделей дыхания почвы. Для песчаного дернового подбуря с грубой структурой и хорошим дренажем лучше использовать модели, учитывающие запасы органического углерода (TRPC) и модели типа Райха-Хашимото (TRPrh), в то время как для суглинистой серой лесной, имеющего более тонкую структуру и хорошую водоудерживающую способность, лучше применять модели типа Райха-Хашимото (TRPrh) с квадратичной температурной зависимостью, которая может быть связана реакцией микробной биомассы на изменения температуры в летнее время.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Сбор и подготовка данных осуществлялись в рамках и при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечивающей создание систем учета данных о потоках климатически активных веществ и углеродном балансе в лесах и других наземных экологических системах» (регистрационный № 123030300031-6); работы по анализу и моделированию данных выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 122111000095-8).

ЛИТЕРАТУРА

- Ильясов Д.В., Молчанов А.Г., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Сирин А.А. Моделирование нетто-экосистемного обмена диоксида углерода сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев использования // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Том 12. № 6. С. 1427–1449. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449>
- Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Исаев А.С. Малоизвестные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таёжных лесах // Доклады академии наук. 2017. Том 475. № 4. <https://doi.org/10.7868/S0869565217220248>
- Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. Москва: Колос, 1977. 224 с.
- Марчик Т.П., Ефремов А.Л. Почвоведение с основами растениеводства: учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2006. 249 с. https://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm
- Махныкина А.В., Полосухина Д.А., Колосов Р.А., Прокушкин А.С. Сезонная динамика эмиссии CO_2 с поверхности верхового болота Центральной Сибири // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 85–93. <https://doi.org/10.17223/25421379/21/7>
- Суховеева О.Э., Карелин Д.В. Оценка дыхания почв с помощью модели Райха–Хашимото: параметризация и прогноз // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Том 86. № 4. С. 519–527. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030153>

- Выгодская Н.Н., Варлагин А.В., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В., Панферов О.И., Татарин Ф.А., Шалухина Н.В. Реакция таежных экосистем на экстремальные погодные условия климатические аномалии // Доклады академии наук. 2009. Том 429. № 6. С. 842–845.
- Brown R.B. Soil Texture. Agronomy Fact Sheet Series SL-29. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, 2007. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet29.pdf>
- Chamindu Deepagoda T.K.K., Elberling B. Characterization of diffusivity-based oxygen transport in Arctic organic soil // European Journal of Soil Science. 2015. Vol. 66. Iss. 6. P. 983–991. <https://doi.org/10.1111/ejss.12293>
- Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties // Agricultural and Forest Meteorology. 2010. Vol. 150. Iss. 4. P. 590–605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Holland E.A., Pendall E., Schimel D.S., Ojima D.S. Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems // Biogeochemistry. 2005. Vol. 73. P. 71–91. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0898-z>
- 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. Iss. 5. P. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>
- Howard P.J.A., Howard D.M. Respiration of decomposing litter in relation to temperature and moisture // Oikos. 1979. Vol. 33. P. 457–465.
- Jarvis P., Rey A., Petsikos C., Wingate L., Rayment M., Pereira J., Banza J., David J., Miglietta F., Borghetti M., Manca G., Valentini R. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The "Birch effect" // Tree Physiology. 2007. Vol. 27. Iss. 7. P. 929–940. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>
- Juhász C., Huzsvai L., Kovács E., Kovács G., Tuba G., Sinka L., Zsembeli J. Carbon Dioxide Efflux of Bare Soil as a Function of Soil Temperature and Moisture Content under Weather Conditions of Warm, Temperate, Dry Climate Zone // Agronomy. 2022. Vol. 12. Iss. 12. P. 3050. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123050>
- Kayranli B., Scholz M., Mustafa A., Hedmark Å. Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: A Critical Review // Wetlands. 2010. Vol. 30. P. 111–124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>
- Kivalov S.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T., Sapronov D., Ivashchenko K.V., Kurganova I.N. Soil Temperature, Organic-Carbon Storage, and Water-Holding Ability Should Be Accounted for the Empirical Soil Respiration Model Selection in Two Forest Ecosystems // Forests. 2023. Vol. 14. Iss. 8. P. 1568. <https://doi.org/10.3390/f14081568>
- Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V. Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate // Contemporary Problems of Ecology. 2017. Vol. 10. P. 748–760. <https://doi.org/10.1134/S1995425517070071>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Romashkin I.V., Zhmurin V.A., Kudayarov V.N. Experimental and model estimates of Respiration of forest sod-podzolic soil in Prioksko-Terrasny Nature Reserve // Contemporary Problems of Ecology. 2020. Vol. 13. P. 813–824. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070057>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Zhmurin V. Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Two Temperate Forest Ecosystems: The Synthesis of a 24-Year Continuous Observation // Forests. 2022. Vol. 13. Iss. 9. P. 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>
- Lal R. Forest soils and carbon sequestration // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 220. Iss. 1–3. P. 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M. et al. Global carbon budget 2014 // Earth System Science Data. 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
- Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudayarov V.N. Effect of temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment // Plant, Soil and Environment. Czech Academy of Agricultural Sciences. 2005. Vol. 51. Iss. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.17221/3576-PSE>
- Macdonald C.A., Anderson I.C., Khachane A., Singh B.P., Barton C.V.M., Duursma R.A., Ellsworth D.S., Singh B.K. Plant productivity is a key driver of soil respiration response to climate change in a nutrient-limited soil // Basic and Applied Ecology. 2021. Vol. 50. P. 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.12.005>
- Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., Holst J. Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil // European Journal of Soil Science. 2010. Vol. 61. Iss. 6. P. 877–887. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01287.x>

Monson R.K., Lipson D.L., Burns S.P., Turnipseed A.A., Delany A.C., Williams M.W., Schmidt S.K. Winter Forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition // *Nature*. 2006. Vol. 439. P. 711–714.

Neira J., Ortiz M., Morales L., Acevedo E. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling // *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2015. Vol. 75 (1). P. 35–44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392015000300005>

O'Connell A.M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of South-Western Australia: An empirical model based on laboratory incubations // *Soil Biology and Biochemistry*. 1990. Vol. 22. Iss. 2. P. 153–160. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90080-J](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90080-J)

Orchard V.A., Cook F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture // *Soil Biology and Biochemistry*. 1983. Vol. 15. Iss. 4. P. 447–453. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(83)90010-X)

Pavelka M., Darenova E., Dusek J. Modeling of soil CO₂ efflux during water table fluctuation based on in situ measured data from a sedge-grass marsh // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2016. Vol. 14. No. 3. P. 423–437.

Peltoniemi M., Thüring E., Ogle S., Palosuo T., Schrupf M., Wutzler T., Butterbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gårdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P., Mäkipää R. Models in country scale carbon accounting of forest soils // *Silva Fennica*. 2007. Vol. 41. Iss. 3. P. 575–602.

Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. Vol. 9. Iss. 1. P. 23–36. <https://doi.org/10.1029/94GB02723>

Ryan M., Law B. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration // *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 3–27.

Reichstein M., Rey A., Freibauer A. et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. Iss. 4. P. 1104. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003GB002035>

Soil carbon storage: modulators, mechanisms and modeling / B.K. Singh (ed.). London: Academic Press, 2018. 311 p.

UNFCCC 2006. National Inventory Submissions. URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3734.php (accessed on 10.01.2024).

Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests // *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 861–865.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Yuste J.C., Janssens I.A., Carrara A., Meiresonne L., Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest // *Tree Physiology*. 2003. Vol. 23. Iss. 18. P. 1263–1270. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.18.1263>

Поступила в редакцию 28.02.2024

Принята 08.07.2024

Опубликована 22.07.2024

Сведения об авторах:

Кивалов Сергей Николаевич – PhD (физика атмосферы), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории карбомониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); snk2105@gmail.com

Курганова Ирина Николаевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); ikurg@mail.ru

Лопес Де Гереню Валентин Овидиович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный

исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); vlopes@mail.ru

Мякшина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); mtn59@mail.ru

Сапронов Дмитрий Васильевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); sadmvas@gmail.com







Хорошаев Дмитрий Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории карбонмониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); dkhoroshaev@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Application of the ensemble of T&P models for estimating the respiration of forest soils in the zone of temperate continental climate

© 2024 S. N. Kivalov , I. N. Kurganova , V. O. Lopez de Guerenу , T. N. Myakshina , D. V. Sapronov , D. A. Khoroshaev 

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya Street, 2, Pushchino, Moscow region, Russia. E-mail: snk2105@gmail.com

The aim of the study was by using an ensemble of T&P models, i.e. empirical models of soil respiration dependent on temperature, precipitation and other meteorological and soil parameters, to show the dependence of the choice of optimal empirical models of soil respiration on the soil types in forest ecosystems, in this case Entic Podzol and Haplic Luvisol, as well as on options for parameterizing models using soil or air temperatures, precipitation and soil organic carbon stock.

Location and time of the study. Temperate continental climate zone of the Central Russia: mixed forest in the north shore of Oka River and deciduous forest on the south shore of Oka River. The data were collected in 1998–2022.

Methods. An ensemble of empirical models of soil respiration was used, linking soil respiration to monthly mean soil or air temperatures and precipitation and soil organic carbon stock. At the same time, a method for determining soil respiration at zero degrees was proposed based on the results of a comparative analysis of simulated data with field measurements.

Results. For the forest Entic Podzol, i.e. the well-drained soil poor in organic carbon, the model that relates soil respiration to soil temperature, precipitation and organic carbon storage was the best, whereas for Haplic Luvisol, i.e. the soil with good water retention capacity, the Reich-Hashtmoto model with a quadratic dependence on temperature at an exponent point was the best model.

Conclusions. When choosing optimal empirical models of soil respiration, it is important to take into account such soil parameters as organic carbon stock and the ability to retain water.

Keywords: modeling of soil respiration; Entic Podzol; Haplic Luvisol; forest ecosystems; ensemble of empirical models.

How to cite: Kivalov S.N., Kurganova I.N., Lopez de Guerenу V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A. Application of T&P Models for Estimating Respiration of Forest Soils in the Temperate Continental Climate Zone. The Journal of Soils and Environment. 2024. 7(2). e252. DOI: [10.31251/pos.v7i2.252](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.252). (in Russian with English abstract).

FUNDING

The data collection and preparation were carried out as part of the most important innovative project of national importance, “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration No. 123030300031-6); the data analysis and modeling works were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 122111000095-8).

REFERENCES

- Ilyasov D.V., Molchanov A.G., Glagolev M.V., Suvorov G.G., Sirin A.A. Modelling of carbon dioxide net ecosystem exchange of hayfield on drained peat soil: land use scenario analysis. *Computer Research and Modeling*. 2020. Vol. 12. No. 6. P. 1427–1449. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S. Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests. *Doklady Biological Sciences*. 2017. Vol. 475. No. 1. P. 165–168. <https://doi.org/10.1134/S0012496617040093>
- Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Marchik T.P., Efremov A.L. Soil science with the basics of plant growing. Grodno: GrSU, 2006. 249 p. (in Russian). https://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm
- Makhnykina A.V., Polosukhina D.A., Kolosov R.A., Prokushkin A.S. Seasonal dynamics of CO₂ emission from the surface of the raised bog in Central Siberia. *Geosphere Research*. 2021. Vol. 4. P. 85–93. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/25421379/21/7>
- Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Assessment of Soil Respiration with the Raich–Hashimoto Model: Parameterisation and Prediction. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2022. Vol. 86. No. 4. P. 519–527. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587556622030153>
- Vygodskaya N.N., Varlagin A.V., Kurbatova Y.A., Ol’chev A.V., Panferov O.I., Tatarinov F.A., Shalukhina N.V. Response of taiga ecosystems to extreme weather conditions and climate anomalies. *Doklady Biological Sciences*. 2009. Vol. 429. No. 6. P. 571–574. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012496609060258>
- Brown R.B. Soil Texture. *Agronomy Fact Sheet Series SL-29*. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, 2007. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet29.pdf>
- Chamindu Deepagoda T.K.K., Elberling B. Characterization of diffusivity-based oxygen transport in Arctic organic soil. *European Journal of Soil Science*. 2015. Vol. 66. Iss. 6. P. 983–991. <https://doi.org/10.1111/ejss.12293>
- Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010. Vol. 150. Iss. 4. P. 590–605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Holland E.A., Pendall E., Schimel D.S., Ojima D.S. Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems. *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 71–91. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0898-z>
- 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. Iss. 5. P. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>
- Howard P.J.A., Howard D.M. Respiration of decomposing litter in relation to temperature and moisture. *Oikos*. 1979. Vol. 33. P. 457–465.
- Jarvis P., Rey A., Petsikos C., Wingate L., Rayment M., Pereira J., Banza J., David J., Miglietta F., Borghetti M., Manca G., Valentini R. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The “Birch effect”. *Tree Physiology*. 2007. Vol. 27. Iss. 7. P. 929–940. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>
- Juhász C., Huzsvai L., Kovács E., Kovács G., Tuba G., Sinka L., Zsembeli J. Carbon Dioxide Efflux of Bare Soil as a Function of Soil Temperature and Moisture Content under Weather Conditions of Warm, Temperate, Dry Climate Zone. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Iss. 12. P. 3050. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123050>
- Kayranli B., Scholz M., Mustafa A., Hedmark Å. Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: A Critical Review. *Wetlands*. 2010. Vol. 30. P. 111–124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>

- Kivalov S.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T., Sapronov D., Ivashchenko K.V., Kurganova I.N. Soil Temperature, Organic-Carbon Storage, and Water-Holding Ability Should Be Accounted for the Empirical Soil Respiration Model Selection in Two Forest Ecosystems. *Forests*. 2023. Vol. 14. Iss. 8. P. 1568. <https://doi.org/10.3390/f14081568>
- Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V. Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate. *Contemporary Problems of Ecology*. 2017. Vol. 10. P. 748–760. <https://doi.org/10.1134/S1995425517070071>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Romashkin I.V., Zhmurin V.A., Kuderyarov V.N. Experimental and model estimates of Respiration of forest sod-podzolic soil in Prioksko-Terrasny Nature Reserve. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. Vol. 13. P. 813–824. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070057>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Zhmurin V. Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Two Temperate Forest Ecosystems: The Synthesis of a 24-Year Continuous Observation. *Forests*. 2022. Vol. 13. Iss. 9. P. 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>
- Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 220. Iss. 1–3. P. 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M. et al. Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*. 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
- Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kuderyarov V.N. Effect of temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment*. Czech Academy of Agricultural Sciences. 2005. Vol. 51. Iss. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.17221/3576-PSE>
- Macdonald C.A., Anderson I.C., Khachane A., Singh B.P., Barton C.V.M., Duursma R.A., Ellsworth D.S., Singh B.K. Plant productivity is a key driver of soil respiration response to climate change in a nutrient-limited soil. *Basic and Applied Ecology*. 2021. Vol. 50. P. 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.12.005>
- Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., Holst J. Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil. *European Journal of Soil Science*. 2010. Vol. 61. Iss. 6. P. 877–887. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01287.x>
- Monson R.K., Lipson D.L., Burns S.P., Turnipseed A.A., Delany A.C., Williams M.W., Schmidt S.K. Winter Forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*. 2006. Vol. 439. P. 711–714.
- Neira J., Ortiz M., Morales L., Acevedo E. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. *Chilean Journal of Agricultural Research* 2015. Vol. 75 (1). P. 35–44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392015000300005>
- O'Connell A.M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of South-Western Australia: An empirical model based on laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry*. 1990. Vol. 22. Iss. 2. P. 153–160. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90080-J](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90080-J)
- Orchard V.A., Cook F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*. 1983. Vol. 15. Iss. 4. P. 447–453. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(83)90010-X)
- Pavelka M., Darenova E., Dusek J. Modeling of soil CO₂ efflux during water table fluctuation based on in situ measured data from a sedge-grass marsh. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2016. Vol. 14. No. 3. P. 423–437.
- Peltoniemi M., Thürig E., Ogle S., Palosuo T., Schrumph M., Wutzler T., Butterbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gärdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P., Mäkipää R. Models in country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica*. 2007. Vol. 41. Iss. 3. P. 575–602.
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. Vol. 9. Iss. 1. P. 23–36. <https://doi.org/10.1029/94GB02723>
- Ryan M., Law B. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 3–27.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A. et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. Iss. 4. P. 1104. <https://doi.org/10.1029/2003GB002035>
- Soil carbon storage: modulators, mechanisms and modeling / B.K. Singh (ed.). London: Academic Press, 2018. 311 p.
- UNFCCC 2006. National Inventory Submissions. URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3734.php (accessed on 10.01.2024).

Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 861–865.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Yuste J.C., Janssens I.A., Carrara A., Meiresonne L., Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*. 2003. Vol. 23. Iss. 18. P. 1263–1270. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.18.1263>

Received 22 February 2024

Accepted 08 July 2024

Published 22 July 2024

About the authors:

Sergey N. Kivalov – PhD (Atmospheric Sciences), Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Carbomonitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); snk2105@gmail.com

Irina N. Kurganova – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ikurg@mail.ru

Valentin O. Lopes De Gerenyu – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); vlopes@mail.ru

Tatyana N. Myakshina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); mtn59@mail.ru

Dmitriy V. Sapronov – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); sadmvas@gmail.com

Dmitriy A. Khoroshaev – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Carbomonitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); dkhoroshaev@gmail.com

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/)