

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-189-211



**Ссылки для цитирования:**

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Сухоруков С.В., Беляева Е.А., Корчагина К.В., Касимов А.Р. Новый методический подход к автоматизированному мониторингу дыхания почвы в полевых условиях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 189-211. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-189-211

**Cite this article as:**

Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A., Korchagina K.V., Kasimov A.R., A new methodical approach to automated monitoring of soil respiration in the field, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 189-211, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-189-211

**Благодарность:**

Исследование выполнено при поддержке междисциплинарного гранта РФФ № 23-64-10002 (разработка методологии, моделей, приобретение оборудования и реализация высокочастотного С-мониторинга на объекте ИЛАН РАН); литературный обзор и статистическая обработка данных проведены в МГУ в рамках темы № 121040800146-3 государственного задания Минобрнауки РФ “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”. Также авторы благодарны за оперативное и высокопрофессиональное рецензирование рукописи с ценными замечаниями для ее улучшения.

**Acknowledgments:**

This study was supported by the Russian Science Foundation's interdisciplinary grant No. 23-64-10002 (development of methodology and models, acquisition of equipment, and implementation of high-frequency C-monitoring at the ILAN RAS facility). The literature review and statistical data processing were conducted at Moscow State University as part of the project No. 121040800146-3 of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation “Physical Foundations of Ecological Functions of Soils: Monitoring, Forecasting, and Management Technologies”. The authors also thank the prompt and highly professional review of the manuscript, which included valuable comments for its improvement.

## Новый методический подход к автоматизированному мониторингу дыхания почвы в полевых условиях

© 2026 г. А. В. Смагин<sup>1,2\*</sup>, Н. Б. Садовникова<sup>1</sup>,  
С. В. Сухоруков<sup>2</sup>, Е. А. Беляева<sup>2</sup>,  
К. В. Корчагина<sup>2</sup>, А. Р. Касимов<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, 12

\*<https://orcid.org/0000-0002-3483-3372>, e-mail: [smagin@list.ru](mailto:smagin@list.ru).

<sup>2</sup>Институт лесоведения РАН, Россия,  
143030, МО, Успенское, ул. Советская, 21.

<sup>3</sup>Sultan Qaboos University,  
Al-Khod 123, PO Box 34, Sultanate of Oman,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-2543-3219>, e-mail: [anvar@squ.edu.om](mailto:anvar@squ.edu.om).

Поступила в редакцию 19.05.2025, после доработки 19.08.2025,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** Актуальность полевого мониторинга почвенного дыхания не вызывает сомнений и определяется значимостью этого процесса в оценке биологической активности почв и углеродного цикла наземных экосистем. Из-за доминирования ручных измерений плохо исследованы закономерности суточной и сезонной динамики почвенного дыхания, особенно в ночные часы и холодное время года. Работа использует новый подход, позволивший полностью автоматизировать полевой мониторинг почвенного дыхания с целью выявления закономерностей его разномасштабной динамики в годовом цикле. Ноу-хау подхода заключалось в использовании периодически продуваемых атмосферным воздухом почвенных камер со встроенными бюджетными CO<sub>2</sub>-логгерами НТ-401/5, регистрирующими динамику концентраций CO<sub>2</sub> каждую минуту. Продувка атмосферным воздухом выводила концентрацию CO<sub>2</sub> в камере на фоновый уровень, после чего компрессор выключался, и логгер записывал тренд накопления CO<sub>2</sub> вследствие почвенного дыхания, использующийся для стандартного расчета потока CO<sub>2</sub> по линейной модели для закрытой камеры. Результаты непрерывного автоматического мониторинга потоков CO<sub>2</sub> на стационарном объекте Института лесоведения РАН в Серебряноборском опытном лесничестве на окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве (loamy sand Cambisol) под посадками голубой ели (*Picea pungens*, Engelm.) в течение

2024–2025 гг. с двумя холодными сезонами показали значимость ночного почвенного дыхания в суточном цикле и дыхания в холодный период года с ноября по март в годовом цикле, а также роль температурного фактора в разномасштабной динамике почвенного дыхания, что представляет интерес для прогнозных эмпирических моделей этого процесса в условиях меняющегося климата.

**Ключевые слова:** диоксид углерода; газообмен почвы; суточная и сезонная динамика; автоматизированный газовый мониторинг; NDIR-газоанализаторы.

## A new methodical approach to automated monitoring of soil respiration in the field

© 2026 A. V. Smagin<sup>1,2\*</sup>, N. B. Sadovnikova<sup>1</sup>, S. V. Sukhorukov<sup>2</sup>,  
E. A. Belyaeva<sup>2</sup>, K. V. Korchagina<sup>2</sup>, A. R. Kacimov<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University,*

*12/1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0002-3483-3372>, e-mail: [smagin@list.ru](mailto:smagin@list.ru).*

<sup>2</sup>*Institute of Forest Sciences of the Russian Academy of Sciences,*

*12 Sovetskaya, 143030 Uspenskoe St., Moscow Region, Russian Federation.*

<sup>3</sup>*Sultan Qaboos University,*

*Al-Khod 123, PO Box 34, Sultanate of Oman,*

*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-2543-3219>, e-mail: [anvar@squ.edu.om](mailto:anvar@squ.edu.om).*

*Received 19.05.2025, Revised 19.08.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** The relevance of field monitoring of soil respiration is beyond doubt and is determined by the significance of this process in assessing the biological activity of soils and the carbon cycle of terrestrial ecosystems. Due to the dominance of manual measurements, the patterns of daily and seasonal dynamics of soil respiration, especially at night and in the cold season, are poorly understood. The work uses a new approach that allows fully automating field monitoring of soil respiration in order to identify patterns of its multi-scale dynamics in the annual cycle. The know-how of the approach consisted in using soil chambers periodically purged with atmospheric air with built-in low-cost CO<sub>2</sub> loggers HT-401/5, recording the dynamics of CO<sub>2</sub> concentrations every minute. Purging with atmospheric air brought the chamber concentration of CO<sub>2</sub> to the background level, after which the compressor was turned off, and the logger recorded the trend of CO<sub>2</sub> accumulation due to soil respiration, used for the standard calculation of the CO<sub>2</sub> flux according to the linear model for a closed chamber. The results of

continuous automatic monitoring of CO<sub>2</sub> fluxes at the stationary site of the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences in the Serebryanobor experimental forestry on cultivated sod-podzolic sandy loam soil (loamy sand Cambisol) under blue spruce (*Picea pungens*, Engelm.) during 2024–2025 with two cold seasons showed the significance of night soil respiration in the daily cycle and respiration in the cold period of the year from November to March in the annual cycle, as well as the role of the temperature factor in multi-scale dynamics of soil respiration, which is of interest for predictive empirical models of this process in a changing climate.

**Keywords:** carbon dioxide; soil gas exchange; daily and seasonal dynamics; automated gas monitoring; NDIR gas analyzers.

## ВВЕДЕНИЕ

Дыхание является неотъемлемым свойством почвы и показателем ее функционирования как динамической биокосной системы. Особую значимость количественные исследования почвенного дыхания приобрели в связи с оценками углеродного цикла природных и антропогенно-измененных экосистем, и в частности, газометрической оценкой их углеродного баланса по соотношению нетто-продуктивности и гетеротрофной составляющей почвенного дыхания (Kudeyarov, 2023; Karelin et al., 2024). Не менее важным направлением, использующим данные о почвенном дыхании, является прогноз вероятной динамики углеродного цикла и возможности секвестрирования углерода той или иной территорией в условиях меняющегося климата, основанный на эмпирических и имитационных моделях, в которых заложены экспериментально оцененные реакции почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> на контролирующие метеофакторы (Иванов и др., 2021; Goncharova et al., 2023; Karelin et al., 2024; Kurganova et al., 2003, 2023). Однако адекватность газометрической оценки углеродного баланса наземных экосистем определяется множеством не решенных полностью к настоящему моменту методических задач, среди которых выделим суточную и сезонную динамику почвенного дыхания (Карелин и др., 2019). Доминирование ручных измерений эмиссии CO<sub>2</sub> камерным методом практически исключало учет суточной динамики этого процесса, особенно в ночное время, вместо чего некоторые известные специалисты по почвенному дыханию рекомендовали замеры в утренние часы, когда, с их точки зрения, поток

CO<sub>2</sub> из почвы должен равняться среднесуточному, что следовало из одной единственной методической работы на эту тему для серых лесных почв (см., например, Kurganova et al., 2003). Для оценки сезонной динамики в столь же трудоемких ручных измерениях считалось достаточным (репрезентативным) оценивать почвенное дыхание раз в неделю (декаду) или реже (Gorbov et al., 2023; Kurganova et al., 2003, 2023), что, на наш взгляд, сомнительно с учетом сильного потенциального варьирования за такой срок температуры, осадков и иных контролирующих эмиссию CO<sub>2</sub> почвенно-климатических факторов.

Современные технические средства автоматизации эксперимента в принципе позволяют решать задачи высокочастотного непрерывного мониторинга эмиссии парниковых газов почвами, однако и здесь есть некоторые затруднения. Известная техника полностью автоматизированного сезонного мониторинга газообмена почвы и атмосферы с почасовыми замерами потоков на базе камер с раскрывающимися для вентиляции створками (см., например, Masterpanov et al., 2008) использует дорогостоящее оборудование и проблемна в холодное время года из-за механической нагрузки льда и снега на раздвижные поверхности камер. Альтернативный подход – продувка закрытых стационарных камер атмосферным воздухом (Молчанов, 2015; Молчанов и др., 2017; Smagin et al., 2025). В большинстве случаев для регистрации газовых потоков при этом используется методика динамических камер (Смагин, 2005; Молчанов, 2015). В такие камеры компрессором подается воздух с точно измеряемым расходом, и через газовые коммуникации (ПВХ или силиконовые шланги) этот воздух попадает в расположенный неподалеку газоанализатор (обычно система Li-COR), детектирующий динамику концентрации CO<sub>2</sub> в камере на фоне его содержания в атмосферном воздухе. Серьезными проблемами такого метода являются необходимость непрерывного и точного контроля расхода воздуха, продувающего камеру, а также неизбежное и плохо поддающееся точной оценке разбавление CO<sub>2</sub>, выделяемого в камере, воздухом газовых коммуникаций, соединяющих камеры со стационарным газоанализатором. Появление бюджетных NDIR-газоанализаторов CO<sub>2</sub> с функцией логгеров для мониторинга качества воздуха открыло перспективу

принципиально иного подхода, а именно: помещения такого анализатора непосредственно в закрытую камеру с периодической продувкой атмосферным воздухом для поддержания фоновых значений концентрации  $\text{CO}_2$ . Такая технология впервые была предложена нами в работе (Smagin et al., 2025) для измерений почвенного дыхания и газообмена древесных насаждений с атмосферой с целью оценки локального углеродного баланса элемента городской зеленой инфраструктуры. Данная статья детализирует исследования почвенного дыхания на основе нового методического подхода на том же объекте с целью более дробной (раз в час) оценки закономерностей суточной и сезонной динамики данного процесса под воздействием гидротермических факторов в течение 1.5-летнего цикла непрерывного автоматизированного мониторинга.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Круглогодичный непрерывный мониторинг почвенного дыхания проводился с ноября 2023 по май 2025 гг., на территории Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН (Западный административный округ Москвы; 55.77090274 N, 37.39450062 E) в декоративных приусадебных посадках голубой ели (*Picea pungens*, Engelm.) 35-летнего возраста на окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве (loamy sand Cambisol). Почвенные камеры – изоляторы полусферической формы из закаленного стекла с подводом через почву газовых и электрических коммуникаций – располагались в трехкратной повторности в мертвопокровной парцелле под кроной ели. В камеры помещались NDIR-газоанализаторы НТ-401/5 (НТi, Китай) цилиндрической формы диаметром 10 и высотой 3 см с функцией автоматической регистрации объемного содержания  $\text{CO}_2$  (диапазон измерений 0–9999 ppm с разрешающей способностью 1 ppm, относительной погрешностью 3% и временем отклика датчика менее 30 секунд) с объемом памяти 12 700 измерений, достаточным для поминутной регистрации  $\text{CO}_2$  в течение недели. Раз в неделю показания считывались на нетбук, и логгеры перезапускались на новую запись. Камеры работали в режиме периодической продувки атмосферным воздухом через подведенные ПВХ шланги от воздушного

компрессора (Sera AIR 275 Rplus, Германия). Цикл продувки атмосферным воздухом длился 45 минут, после чего таймер отключал компрессор на такой же период для регистрации трендов накопления диоксида углерода в процессе почвенной эмиссии.

Расчет эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  по приросту объемного содержания газа в камере за единицу времени ( $\Delta X$ , ppm/мин) осуществлялся с использованием следующей формулы на основе уравнения Менделеева-Клапейрона для идеального газа (Смагин, 2005):

$$F = \frac{60 \cdot \Delta X \cdot P_a \cdot M \cdot h}{R \cdot T}, \quad (1)$$

где  $F$ ,  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  – поток газа в углеродных единицах;  $P_a$ ,  $\text{kPa}$  – барометрическое атмосферное давление;  $M = 12 \text{ г/моль}$  – молярная масса углерода;  $h$ ,  $\text{м}$  – эффективная высота камеры (отношение объема к площади основания);  $R = 8.314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$  – универсальная газовая постоянная;  $T$ ,  $\text{K}$  – абсолютная температура.

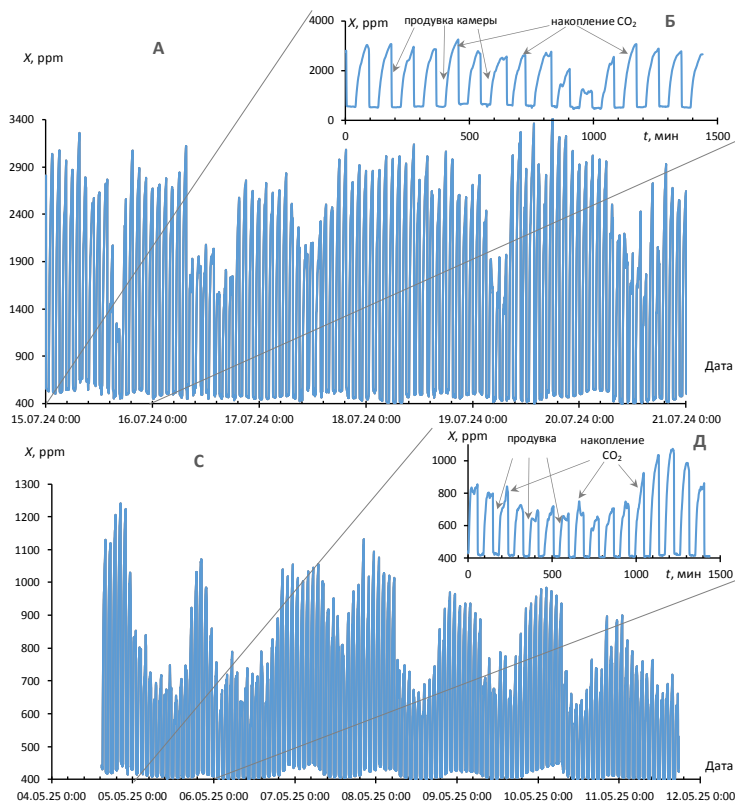
Необходимая информация о температуре и атмосферном давлении, наряду с относительной влажностью воздуха, получалась синхронно с использованием автоматических логгеров DS1923 (США) и портативной метеостанции NicetyMeter-0371 (Китай). Более подробная характеристика объекта исследования и новой методики оценки газовых потоков приведена в предшествующей публикации (Smagin et al., 2025). Математическая и статистическая обработка данных осуществлялась в программах S-Plot 11 (Германия) и R 3.5.3 (США); для численного интегрирования потоков применены макросы Excel (автор М.В. Глаголев).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены фрагменты недельных записей динамики концентраций  $\text{CO}_2$  в периодически продуваемой почвенной камере в июле 2024 и мае 2025 гг.

Форма регистрируемых кривых в виде регулярных колебаний отражает периодичность накопления  $\text{CO}_2$  в камере и его удаления при продувке атмосферным воздухом до фонового уровня порядка 400 ppm. Высота пиков, являющаяся показателем интен-

сивности аккумуляции  $\text{CO}_2$ , меняется как в течение суток, так и между днями и месяцами с наибольшей интенсивностью (до 3 000–3 500 ppm за 45 мин.) в летнее время. Максимумы и минимумы высоты, хорошо видные на графиках недельной динамики, не имели какой-либо четкой приуроченности ко времени суток и встречались как в дневные, так и в ночные часы.

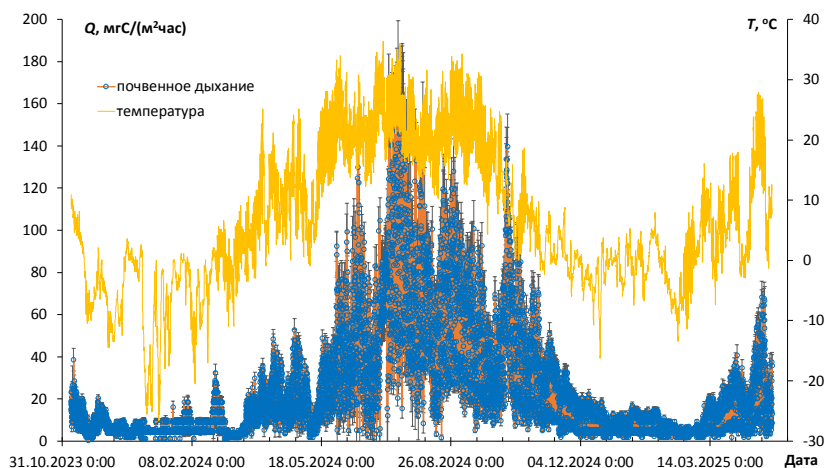


**Рис. 1.** Примеры динамики концентраций  $\text{CO}_2$  ( $X$ , ppm) в почвенной камере в июле 2024 г. (А, Б) и мае 2025 г. (С, Д); на врезках (Б, Д) показаны фрагменты суточного цикла.

**Fig. 1.** Examples of the dynamics of  $\text{CO}_2$  concentrations ( $X$ , ppm) in the soil chamber in July 2024 (А, Б) and May 2025 (С, Д); the insets (Б, Д) show fragments of the daily cycle.

Фрагменты динамики на врезках (рис. 1 Б, Д) показывают детально “зазубренную” форму пиков с постепенным снижением темпов прироста  $\text{CO}_2$  к концу 45-минутного интервала экспозиции камеры до ее продувки атмосферным воздухом. Такое снижение хорошо предсказывается кинетической теорией камерно-статического метода оценки почвенного дыхания с выводом о целесообразности расчетов эмиссионных потоков по начальным (линейным) трендам или по касательной к нелинейному тренду в начальной точке измерений при  $t = 0$  (см., например, Smagin, 2015). В этой связи алгоритмизация расчета потоков по трендам динамики концентраций в периодически продуваемой камере остается не до конца решенной методической задачей, возможно, требующей в дальнейшем привлечения AI-технологий. Ручная обработка данных с построением линейных трендов или с использованием метода касательных, обычная для спорадических исследований почвенного дыхания, очевидно, невозможна, так как за неделю только в одной камере собирается информация о 10–13 тыс. измерений. Мы использовали простейший алгоритм, описанный в предшествующей работе (Smagin et al., 2025), с расчетом по мгновенным инкрементам  $\Delta X$  за минутный (минимальный) интервал измерений с логическим выбором положительных значений  $\Delta X$  на базе стандартных функций Excel. Отрицательные значения, возникающие на этапе продувки камеры, при этом элиминировались с записью пустой ячейки так, чтобы исключить их из дальнейшей статистической обработки. Для алгоритмизации расчета потоков по наиболее правильным начальным значениям прироста концентрации в камере осреднение за час производилось с использованием не средних, а верхне-квартильных оценок (функция Excel “третий квартиль”).

Полученные по такому алгоритму почасовые потоки за весь 1.5-годовой период исследований с последующим усреднением по повторностям (общий массив данных более 39 тыс. значений) и оценкой доверительных интервалов приведены на рисунке 2. Анализ данных показывает хорошо известную в почвоведении сезонную динамику эмиссии  $\text{CO}_2$ , во многом связанную с ходом температуры воздуха.

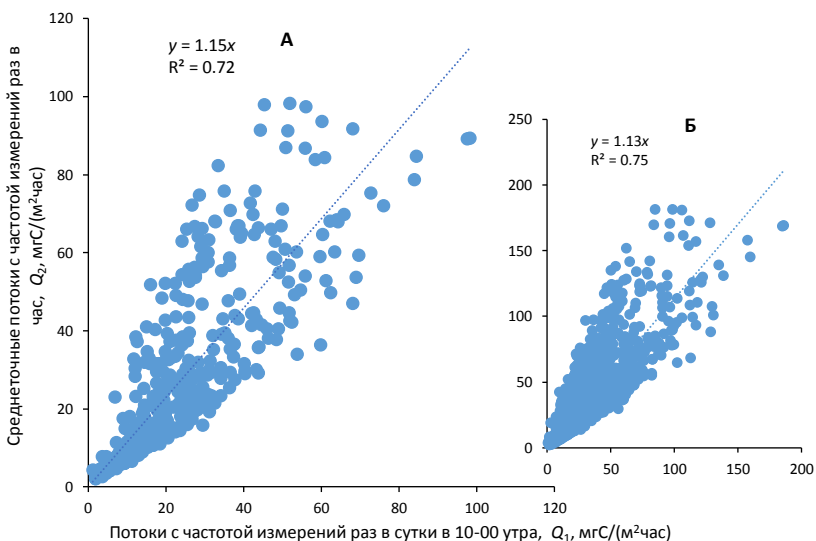


**Рис. 2.** Осредненные почасовые эмиссионные потоки  $\text{CO}_2$  за весь период измерений с ноября 2023 г. по май 2025 г. в связи с синхронной почасовой динамикой температуры воздуха (здесь и далее вертикальные планки – доверительные интервалы при  $p = 0.05$ ).

**Fig. 2.** Averaged hourly emission fluxes of  $\text{CO}_2$  for the entire measurement period from November 2023 to May 2025 in connection with the synchronous hourly dynamics of air temperature (hereafter vertical bars are confidence intervals at  $p = 0.05$ ).

Наибольшие значения почасовых потоков в интервале 100–200  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  приходятся на летнее время с центральным максимумом в июле. Почти симметрично этому максимуму расположены всплески почвенного дыхания в июле и октябре. Последнее, по-видимому, может быть объяснено спецификой 2024 г. с затяжным теплым периодом (температуры воздуха 15–20 °C и более) вплоть до ноября. Минимальные потоки в 1–20  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  отмечаются в зимний период (декабрь–февраль), причем даже при отрицательных температурах воздуха камеры регистрировали эмиссию  $\text{CO}_2$ , а в оттепели, особенно характерные для декабря–января аномально теплой зимы 2025 г., потоки в 15–20  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  были достаточно распространенным явлением.

Особый интерес представляет возможность проверки с помощью круглогодичного высокочастотного (раз в час) мониторинга некоторых закрепившихся в науке о почвах методических положений касательно репрезентативности измерений почвенного дыхания в суточном и сезонном циклах. Рисунок 3 иллюстрирует проверку гипотезы (Kurganova et al., 2003) об отражении утренними измерениями почвенного дыхания среднесуточной эмиссии  $\text{CO}_2$ .



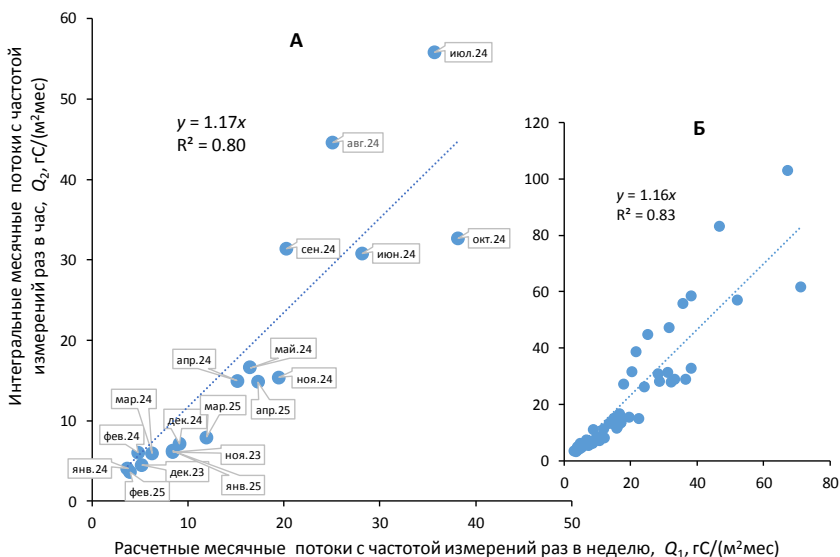
**Рис. 3.** Сравнение значений реальных среднесуточных потоков с измерениями эмиссии  $\text{CO}_2$  раз в сутки в 10 утра за весь период наблюдений (**А** – осредненные по повторностям значения, **Б** – все значения).

**Fig. 3.** Comparison of actual average daily flows with measurements of  $\text{CO}_2$  emissions once a day at 10 am for the entire observation period (**A** – values averaged over repetitions, **B** – all values).

Несмотря на достаточно высокие коэффициенты корреляции ( $R = 0.85\text{--}0.87$ ) и угловые коэффициенты линейной регрессии для сравниваемых показателей ( $a = 1.13\text{--}1.15$ ), близкие к единице, по

Графикам видно, что расхождения между сравниваемыми показателями могут быть весьма высокими и достигать 40–90% как в сторону занижения относительно реальных среднесуточных потоков, так и в сторону их завышения при распространенной оценке раз в сутки в утренние часы. Особенно сильные расхождения и соответствующие ошибки в оценке среднесуточных величин эмиссии  $\text{CO}_2$  возникают в теплый период года с относительно высокими потоками порядка  $100 \text{ мгС}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$  и более. Этот результат хорошо виден по веерообразному расположению данных на рисунке 3 с сильным расхождением по мере увеличения значений сравниваемых потоков. Осредненная по всему массиву данных оценка по линейной регрессии с коэффициентами  $a = 1.13\text{--}1.15$  указывает на систематическое занижение на 11–13% реальных потоков  $\text{CO}_2$  с использованием разовых утренних замеров почвенного дыхания.

Сходная ситуация возникает и для другого масштаба – сезонной динамики эмиссионных потоков (рис. 4). Здесь традиционно используемая в большинстве исследований почвенного дыхания экстраполяция замеров раз в неделю или декаду на весь месяц также приводит к систематическому занижению среднемесячных оценок на 14–15%, если руководствоваться полученными за весь период мониторинга линейными регрессиями сравниваемых показателей с угловыми коэффициентами  $a = 1.16\text{--}1.17$ . Однако спорадические отклонения от реальных оценок, как и в случае суточной динамики, здесь могут быть весьма высокими и достигать 40–50%. При этом в холодный период года с небольшими потоками  $\text{CO}_2$  – до  $20 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес.})$  – экстраполяция на месяц разовых оценок, как правило, приводит к переоценке почвенной эмиссии на 10–50%, а в теплый период с потоками в диапазоне  $40\text{--}80 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес.})$  нередко наблюдается недооценка реальных потоков до 10–40%. Общая тенденция занижения среднемесячных потоков при традиционной экстраполяции оценок раз в неделю на весь месяц определяется, очевидно, более высоким вкладом теплого сезона в годовую эмиссию.



**Рис. 4.** Сравнение значений реальных интегральных месячных потоков и расчетных, по данным измерений раз в неделю (А – осредненные по повторностям значения, Б – все значения).

**Fig. 4.** Comparison of actual integral monthly flows and those calculated based on weekly measurement data (А – values averaged over repetitions, Б – all values).

Полученные результаты по сопоставлению принятых оценок почвенного дыхания в масштабах его суточной и сезонной динамики с реальными данными имеют, на наш взгляд, важное методологическое значение при использовании дыхания почвы для определения углеродного баланса. Занижение в 10–15% величин почвенного дыхания наряду с еще более сильным потенциальным занижением реального grossпроизводства  $\text{CO}_2$  в почвенной толще при его оценке по эмиссии с поверхности (Смагин, 2005) может, на наш взгляд, объяснить чисто методическими артефактами маловероятный с позиций концепции углеродного цикла результат об “абсолютном стоке углерода” в экосистемах РФ, достигающем 1 ГтС, или 25% от первичной продукции (Пулы..., 2007),

а возможно, и феномен “неучтенного стока” углерода (Kudeyarov, 2023) в целом.

Результаты высокочастотного мониторинга почвенного дыхания позволили репрезентативно оценить влияние гидротермических факторов на эмиссию  $\text{CO}_2$  за весь период наблюдений в виде соответствующих эмпирических моделей. Рисунок 5 иллюстрирует влияние почасовой температуры воздуха. Оно соответствует общепринятым представлениям в данной области, а именно, экспоненциальной эмпирической связи между температурой и плотностью потока  $\text{CO}_2$ , к которой могут быть сведены известные функции “Q10”, Аррениуса и ряд других моделей (Смагин, 2005; Kurganova et al., 2003). Однако высокое варьирование данных, особенно в теплое время года с потоками от 50–100  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  и выше, дает относительно низкие коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) для экспоненциальной модели – в диапазоне 0.48–0.54 со стандартными ошибками  $s = 19\text{--}28 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$ , существенно превышающими большинство доверительных интервалов экспериментальных оценок моделируемого показателя.

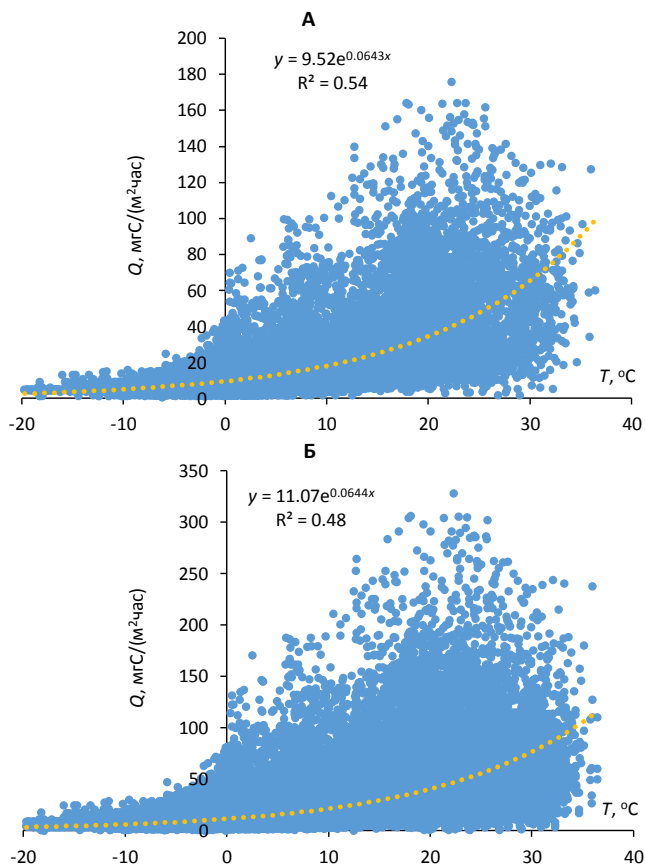
Учет еще одного контролирующего фактора – относительной влажности воздуха ( $RH$ , %) – улучшает модельный прогноз почвенного дыхания (рис. 6). С этой целью мы модифицировали стандартную модель нормального двумерного распределения Гаусса для переменных температуры и влажности воздуха, редуцировав ее с пяти- до трехпараметрической:

$$F = F_{\max} \exp \left( -0.5 \cdot \left( \left( \frac{T - T_{\max}}{T_0} \right) + \left( \frac{RH - 100}{RH_0} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где  $F$ ,  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  – моделируемый эмиссионный поток;  $F_{\max} = 183 \pm 2 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$ , его максимальное значение;  $T_0 = 20.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\max} = 48.1 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$  – эмпирические константы, определяемые по экспериментальным данным, тогда как  $RH_0$  можно положить равной 50 без ущерба для адекватности модели (2). Все три параметра модели статистически достоверны на уровне  $p < 0.0001$ .

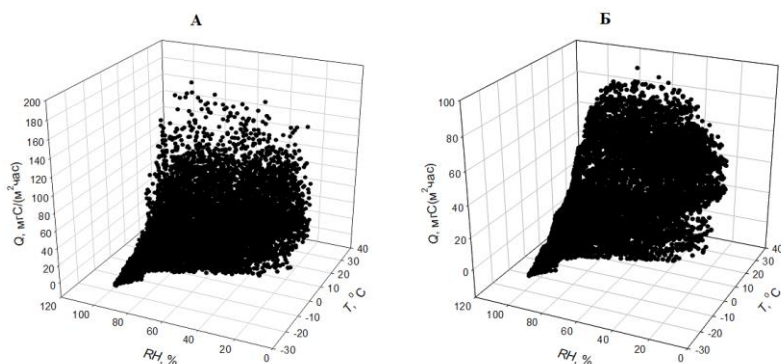
Ее использование вместо чисто температурной модели позволило снизить стандартную ошибку для всего массива данных

(13 тыс. оценок) в 1.8 раза ( $s = 16 \text{ мгС}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ ) и повысить коэффициент детерминации ( $R^2 = 0.57$ ).



**Рис. 5.** Влияние температуры воздуха на почасовые эмиссионные потоки  $\text{CO}_2$  (А – осредненные по повторностям значения, Б – все значения, 39 тыс. измерений).

**Fig. 5.** The influence of air temperature on hourly emission fluxes of  $\text{CO}_2$  (А – values averaged over repetitions, Б – all values, 39 thousand measurements).



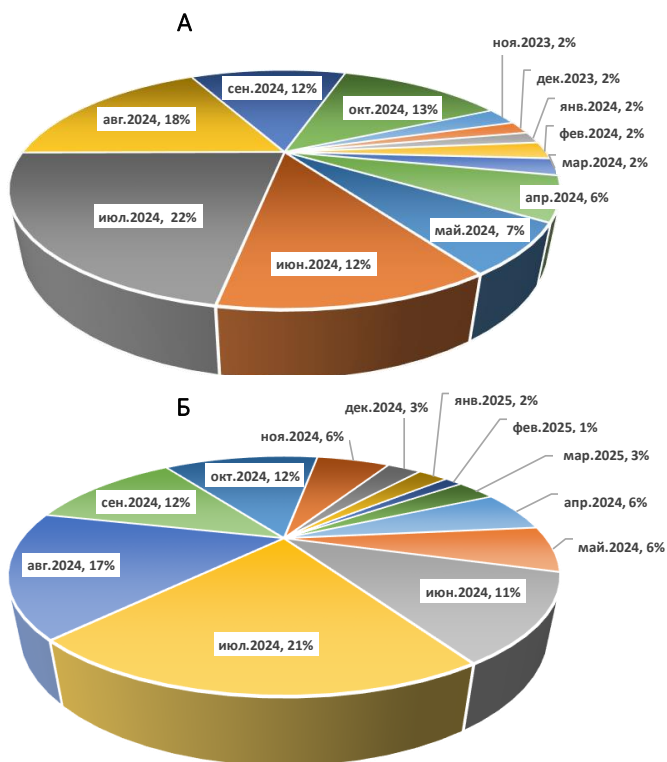
**Рис. 6.** Реальные (А) и предсказанные по эмпирической модели (Б) среднестатистические почасовые эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> за весь период наблюдений (13 тыс. измерений).

**Fig. 6.** Real (A) and predicted by the empirical model (Б) average statistical hourly emission flows of CO<sub>2</sub> for the entire observation period (13 thousand measurements).

Гидротермические факторы контролируют более 50% дисперсии полученных высокочастотным мониторингом данных эмиссии CO<sub>2</sub>, но, на наш взгляд, этого недостаточно, чтобы корректно прогнозировать отклик почвенного дыхания на климатические изменения без выявления причины оставшихся 40–50% дисперсии.

Завершающий рисунок 7 иллюстрирует распределение вкладов разных месяцев в общегодовое почвенное дыхание, оцененное численным интегрированием почасовых потоков за периоды с ноября 2023 г. по октябрь 2024 г. и с апреля 2024 г. до марта 2025 г. включительно. Как видно, 50% общегодового потока формируются в летние месяцы с доминированием вкладов июля и августа (17–22%) и меньшим вкладом июня (11–11%). Зимние месяцы (декабрь–февраль) дают вклады не более 2–3% каждый и в сумме не более 6% от годового потока. Доля эмиссии с марта по май увеличивается от 2–3% до 6–7% с суммарным вкладом весны

до 15%. Для осенних месяцев максимальна у сентября и октября (12–13%) и минимальна у ноября (2–6%), но в сумме осень дает почти вдвое больший вклад, чем весна (до 30% годовой эмиссии CO<sub>2</sub>), что может быть связано не только с текущей биологической активностью в теплые осенние месяцы, но и с выходом ранее накопленного в почвенной толще CO<sub>2</sub>.



**Рис. 7.** Вклад разных месяцев года в суммарную годовую эмиссию CO<sub>2</sub> (А – расчет с ноября 2023 г. по октябрь 2024 г., Б – расчет с апреля 2024 г. по март 2025 г.).

**Fig. 7.** Contribution of different months of the year to the total annual CO<sub>2</sub> emission (А – calculation from November 2023 to October 2024, Б – calculation from April 2024 to March 2025).

Суммарный вклад холодного сезона с ноября по апрель включительно не превышает 16–21%, что ниже, чем оценки в 30% и более из указанных источников (Пулы..., 2007; Kudеуагоv, 2023), несмотря на аномально теплый зимний сезон 2024–2025 гг. Возможно, систематическое завышение реальных оценок почвенного дыхания при традиционных спорадических измерениях раз в неделю для холодного периода (рис. 4) приводит к переоценке его роли в годовой эмиссии CO<sub>2</sub>.

При рецензировании статьи было высказано пожелание сравнить измерения новой технологии с условным “эталоном” в виде одной из широко используемых международным научным сообществом коммерческих систем для полевого исследования почвенного дыхания. На рисунке 1А в Приложении к статье мы проводим такое сравнение разовых измерений для некоторых почвенных объектов Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН от песков к хвойной подстилке, выполненных двумя нашими камерами с датчиками НТ-401/5 и рекомендованной для исследований на карбоновых полигонах коммерческой системой LiCOR с газоанализатором Li-7810 и камерой Smart Chamber, осуществленных в двукратной повторности. Для удобства сравнения показания наших камер были переведены в мкмоль/(м<sup>2</sup>·с). Как видно, при обычных потоках, до 3–4 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) (450–650 мгСО<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup>·ч)), показания практически тождественны. Однако при более высоких значениях появляются расхождения, причем, как в сторону завышения, так и занижения новой системой относительно “эталонной”. Несмотря на общее хорошее соответствие (линейная регрессия с коэффициентом детерминации 0.97 и угловым коэффициентом  $1.027 \pm 0.056$ , достоверным при  $p\text{-value} < 0.0001$ ), выявленное для конкретного объекта, пока рано говорить о каких либо статистически достоверных отличиях или их отсутствии. Это должно быть отдельное исследование на представительном материале с разными почвами и переменными факторами, контролирующими почвенное дыхание. При этом прецизионность оценки концентраций CO<sub>2</sub> дорогостоящих коммерческих систем с периодической поверкой точности по эталонным газовым смесям может оказаться излишней, поскольку в расчетах потоков важны не абсолютные значения, а их изменения (приросты) кон-

центраций. И для этого вполне достаточно встроенная в анализаторах качества воздуха помещений типа HT-401/5 опция поверки по чистому атмосферному воздуху с условным содержанием  $\text{CO}_2$  в 400 ppm. Также простая технологическая идея встраивания таких датчиков в камеры снимает необходимость контроля скорости воздушных потоков и соответствующих поправок на давление, заложенных в коммерческие системы с дорогами, а поэтому внешними по отношению к камере газоанализаторами. И в будущем камеры со встроенными датчиками  $\text{CO}_2$  и периодической продувкой могут стать бюджетной альтернативой дорогостоящим коммерческим системам, не уступающим им в качестве полевой оценки почвенного дыхания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый методический подход, заключающийся в использовании периодической продувки закрытых камер со встроенными бюджетными NDIR-логгерами  $\text{CO}_2$ , позволил полностью автоматизировать трудоемкий процесс мониторинга почвенного дыхания с высокочастотной (раз в час) оценкой эмиссии  $\text{CO}_2$  за 1.5-летний период с ноября 2023 г. по май 2025 г. на участке окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН. Анализ данных выявил закономерности суточной и сезонной динамик почвенного дыхания и вероятность нерепрезентативности оценок среднесуточных и среднемесячных величин эмиссии  $\text{CO}_2$  по распространенной методологии спорадических измерений в утренние часы раз в неделю с систематическим занижением расчетных потоков относительно реальных. Этот методологический вывод имеет значение для корректной оценки углеродного баланса экосистем во избежание искусственного завышения С-стока из-за недооценки реальных закономерностей разномасштабной динамики почвенного дыхания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых

- газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 108. С. 175–218. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>.
2. Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г., Суховеева О.Э. Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в лесах Валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>.
3. Молчанов А.Г. Газообмен сфагнома при разных уровнях поверхностных грунтовых вод // Экология. 2015. № 3. С. 182–188. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059715030063>.
4. Молчанов А.Г., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. Влияние сплошной вырубki леса на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы // Известия РАН. Сер. Биол. 2017. № 2. С. 190–196. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332916060126>.
5. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Заварзина Г.А, Кудеярова В.Н. М.: Наука, 2007. 315 с.
6. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005. 301 с.
7. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Timofeeva M.V., Chuvanov S.V., Tarkhov M.O., Isaeva A.V. Carbon Dioxide Emission from Soils of the Ecotone Zone in the North of Western Siberia // Eur. Soil Sci. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1210–1222. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601257>.
8. Gorbov S.N., Vasenev V.I., Minaeva E.N., Tagiverdiev S.S., Skripnikov P.N., Bezuglova O.S. Short-Term Dynamics of CO<sub>2</sub> Emission and Carbon Content in Urban Soil Constructions in the Steppe Zone // Eur. Soil Sci. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1270–1280. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601282>.
9. Karelin D.V., Zolotukhin A.N., Ryzhkov O.V., Lunin V.N., Zamolodchikov D.G., Sukhoveeva O.E. Use of Long-Term Soil Respiration Measurements for Calculating the Net Carbon Balance in Ecosystems of the Central Chernozemic Region // Eur. Soil Sci. 2024. Vol. 57. No. 10. P. 1638–1649. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324601318>.
10. Kudeyarov V.N. Soil Respiration and Carbon Sequestration: A Review // Eur. Soil Sci. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1191–1200. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>.
11. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Sapronov D., Myakshina T., Kudeyarov V. Annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes from Russian southern taiga soils // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2003. Vol. 2. P. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16724>.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Ableeva V.A. Temperature Sensitivity of Soil Respiration in

Grasslands in Temperate Continental Climate Zone: Analysis of 25-Year-Long Monitoring Data // *Eur. Soil Sci.* 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1232–1246. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601130>.

13. Mastepanov M., Sigsgaard Ch., Dlugokencky E.J., Houweling S., Strum E. Large tundra methane burst during onset of freezing // *Nature*. 2008. Vol. 456. No. P. 628–631. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07464>.

14. Smagin A.V. Kinetic assessment of gas exchange between the soil and the atmosphere by the static chamber method // *Eur. Soil Sci.* 2015. Vol. 48. No. 7. P. 719–725. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315070108>.

15. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A. High-frequency CO<sub>2</sub> monitoring of the soil and vegetation gas exchange with the atmosphere to assess the local carbon balance of a green infrastructure element // *Eur. Soil Sci.* 2025. Vol. 58. No. 62. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324603639>.

## REFERENCES

1. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Methodological approaches to the formation of a unified national system of monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 108, pp. 175–218, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>.

2. Karelin D.V., Azovsky A.I., Kumanyaev A.S., Zamolodchikov D.G., Sukhoveeva O.E., Znacheniyе prostranstvennogo i vremennogo masshtaba pri analize faktorov emissii CO<sub>2</sub> iz pochvy v lesakh Valdayskoy vozvysheynosti. (The importance of spatial and temporal scale in the analysis of CO<sub>2</sub> emission factors from soils in the forests of the Valdai Upland), *Lesovedenie*, 2019, No. 1, pp. 29–37, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>.

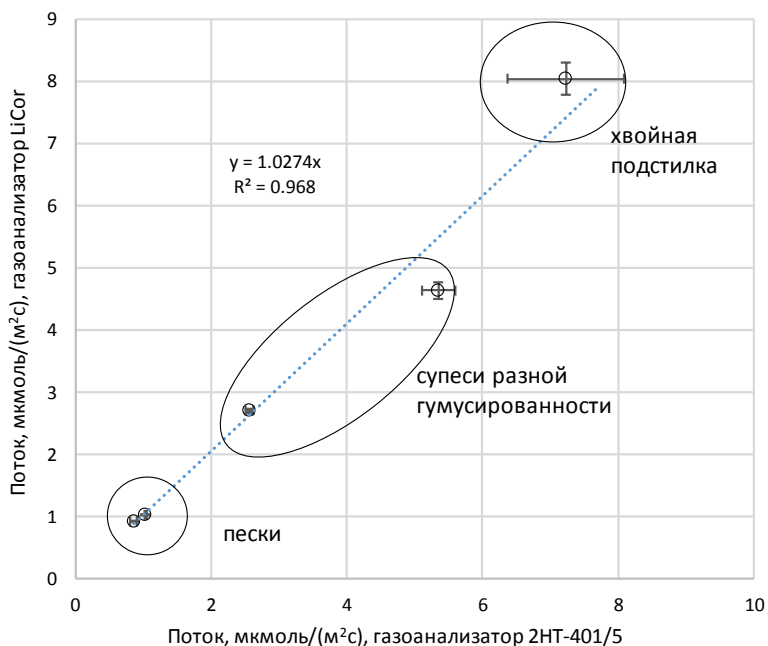
3. Molchanov A.G., Gazoobmen sfagnuma pri raznykh urovnyakh poverkhnostnykh gruntovykh vod. (Gas exchange of sphagnum at different levels of surface groundwater), *Ekologiya*, 2015, No. 3, pp. 182–188, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059715030063>.

4. Molchanov A.G., Kurbatova YU.A., Ol'chev A.V., Vliyaniye sploshnoy vyrubki lesa na emissiiyu CO<sub>2</sub> s poverkhnosti pochvy. (The influence of clear-cutting of forests on CO<sub>2</sub> emissions from the soil surface), *Izvestiya RAN. Ser. Biol.*, 2017, No. 2, pp. 190–196, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332916060126>.

5. Zavarzin G.A., Kudryarov V.N. (Eds.), *Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* (Pools and flows of carbon in terrestrial ecosystems of Russia), Moscow: Nauka, 2007, 315 p.

6. Smagin A.V., *Gazovaya faza pochv* (Gas phase of soils), Moscow: Moscow State University, 2005, 301 p.
7. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Timofeeva M.V., Chuvanov S.V., Tarkhov M.O., Isaeva A.V., Carbon Dioxide Emission from Soils of the Ecotone Zone in the North of Western Siberia, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1210–1222, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601257>.
8. Gorbov S.N., Vasenev V.I., Minaeva E.N., Tagiverdiev S.S., Skripnikov P.N., Bezuglova O.S., Short-term dynamics of CO<sub>2</sub> emission and carbon content in urban soil constructions in the steppe zone, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1270–1280, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601282>.
9. Karelin D.V., Zolotukhin A.N., Ryzhkov O.V., Lunin V.N., Zamolodchikov D.G., Sukhoveeva O.E., Use of long-term soil respiration measurements for calculating the net carbon balance in ecosystems of the Central Chernozemic Region, *Eur. Soil Sci.*, 2024, Vol. 57, No. 10, pp. 1638–1649, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324601318>.
10. Kudayarov V.N., Soil respiration and carbon sequestration: A Review, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1191–1200, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>.
11. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Saprionov D., Myakshina T., Kudayarov V., Annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes from Russian southern taiga soils, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, Vol. 2, pp. 338–344, DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16724>.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Saprionov D.V., Khoroshaev D.A., Ableeva V.A., Temperature sensitivity of soil respiration in grasslands in temperate continental climate zone: Analysis of 25-year-long monitoring data, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1232–1246, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601130>.
13. Mastepanov M., Sigsgaard Ch., Dlugokencky E.J., Houweling S., Strum E., Large tundra methane burst during onset of freezing, *Nature*, 2008, Vol. 456, No. pp. 628–631, DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07464>.
14. Smagin A.V., Kinetic assessment of gas exchange between the soil and the atmosphere by the static chamber method, *Eur. Soil Sci.*, 2015, Vol. 48, No. 7, pp. 719–725, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315070108>.
15. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A., High-frequency CO<sub>2</sub> monitoring of the soil and vegetation gas exchange with the atmosphere to assess the local carbon balance of a green infrastructure element, *Eur. Soil Sci.*, 2025, Vol. 58, No. 62, pp. 1–15, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324603639>.

### ПРИЛОЖЕНИЕ (APPENDIX)



**Рис. 1А.** Сравнение результатов полевой оценки почвенного дыхания по новой технологии с “эталонной” системой LiCOR. Вертикальные и горизонтальные планки – доверительные интервалы для системы LiCOR и новых камер с датчиками HT-401/5 при  $p$ -value = 0.05 после усреднения по двум датчикам и повторностям.

**Fig. 1A.** Comparison of the results of field assessment of soil respiration using the new technology with the “reference” LiCOR system. Vertical and horizontal bars are confidence intervals for the LiCOR system and new chambers with HT-401/5 sensors at  $p$ -value = 0.05 after averaging over two sensors and replicates.