



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544.3

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12568

Сравнительная оценка методов определения эмиссии CO₂ из почвы

**Алина Ринатовна Камалова¹✉, Полина Александровна Курынцева¹,
Александр Сергеевич Гордеев¹, Наталья Викторовна Данилова¹,
Владимир Игоревич Платонов², Светлана Юрьевна Селивановская¹**

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, akhtjamovaalina07@gmail.com✉

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация. Точная количественная оценка выбросов углекислого газа из почвы имеет решающее значение для понимания глобального углеродного цикла и прогнозирования последствий изменения климата. Целью настоящей работы является сравнение трех методов оценки эмиссии CO₂ из почвы (методом закрытой камеры с использованием ИК-анализатора, с помощью мобильного газового хроматографа «ПИА», а также стационарным газовым хроматографом, предполагающим отбор проб почвы и их инкубирование в лабораторных условиях), позволяющие оценивать нетто-выбросы в различных экосистемах. В работе анализируются сходимость и воспроизводимость результатов измерений, а также обсуждаются особенности применения приборов. Сличительные испытания проводились методом стандарта, при использовании в качестве стандарта почвы, экспонированной в оранжерейных условиях при постоянных температуре, влажности и освещении. При измерении газоанализатором Wohler CDL 210 использовалась заводская калибровка. Описаны процессы подготовки к проведению анализа, время измерений, необходимое дополнительное оборудование, определены такие статистические показатели как дисперсия (σ^2), среднее квадратическое отклонение (σ) и коэффициент вариации (CV). На основе полученных данных установлено, что наибольшие средние значения респираторной активности почвы (0.1653 г C/m²·ч) были зафиксированы для лабораторного газового хроматографа (ГХ), что может быть связано с дополнительной аэрацией и нарушением почвенной структуры при отборе проб. В случае с портативным ГХ, полученные средние значения были минимальными (0.0077 г C/m²·ч) с более высокой точностью, но меньшей воспроизводимостью в отдельных точках измерения. ИК-анализатор продемонстрировал средние значения, сопоставимые с лабораторным ГХ (0.0224 г C/m²·ч), но показал меньшую точность и более высокие значения CV, что указывает на меньшую сходимость результатов. Наибольшие статистически значимые различия были выявлены между лабораторным и портативным ГХ, тогда как различия между портативным ГХ и ИК-анализатором не были статистически значимы ($p > 0.05$). Этот факт подтверждает, что методы с использованием закрытых камер дают сопоставимые результаты и позволяют получить более предметную фактическую информацию.

Ключевые слова: парниковые газы, эмиссия CO₂, углерод, камера, газовая хроматография, инфракрасный газоанализатор, портативный газовый хроматограф.

Благодарности: исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 23-26-00275.

Для цитирования: Камалова А.Р., Курынцева П.А., Гордеев А.С., Данилова Н.В., Платонов В.И., Селивановская С.Ю. Сравнительная оценка методов определения эмиссии CO₂ из почвы // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 6. С. 911-923. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12568>

Original article

Comparative assessment of methods for determining CO₂ emissions from soil

**Alina R. Kamalova¹✉, Polina A. Kuryntseva¹, Alexandr S. Gordeev¹,
Natalya V. Danilova¹, Vladimir I. Platonov², Svetlana Yu. Selivanovskaya¹**

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation, akhtjamovaalina07@gmail.com✉

²Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russian Federation

Abstract. Accurate quantification of carbon dioxide emissions from the soil is crucial for understanding the global carbon cycle and predicting the effects of climate change. The purpose of this work is to compare three methods for estimating CO₂ emissions from the soil (using an indoor camera method using an IR analyzer, using a mobile gas chromatograph "PIA", as well as a stationary gas chromatograph, involving soil sampling and incubation in laboratory conditions), which make it possible to estimate net emissions in various ecosystems. The paper analyzes the convergence and reproducibility of measurement results, as well as discusses the application features of the devices. Comparative tests were carried out using the standard method, using soil exposed in greenhouse conditions at constant temperature, humidity and lighting as a standard. When measuring with the Wohler CDL 210 gas analyzer, the factory calibration was used. The processes of preparation for the analysis, the measurement time, the necessary additional equipment are described, such statistical indicators as variance (σ^2), mean square deviation (σ) and coefficient of variation (CV) are determined. Based on the data obtained, it was found that the highest average values of soil respiratory activity (0.1653 g/m²·h) were recorded for the laboratory gas chromatograph (GC), which may be due to additional aeration and disruption of the soil structure during sampling. In the case of portable GC, the average values obtained were minimal (0.0077 g/m²·h) with higher accuracy, but less reproducibility at individual measurement points. The IR analyzer demonstrated average values comparable to laboratory GC (0.0224 g/m²·h), but showed lower accuracy and higher CV values, indicating less convergence of the results. The greatest statistically significant differences were found between laboratory and portable GC, while the differences between portable GC and IR analyzer were not statistically significant ($p > 0.05$). This fact confirms that methods using closed chambers provide comparable results and allow for more substantive factual information

Keywords: greenhouse gases, CO₂ emissions, carbon, chamber, gas chromatography, infrared gas analyzer, portable gas chromatograph.

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-26-00275.

For citation: Kamalova A.R., Kuryntseva P.A., Gordeev A.S., Danilova N.V., Platonov V.I., Selivanovskaya S.Yu. Comparative assessment of methods for determining CO₂ emissions from soil. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(6): 911-923. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12568>

Введение

Изменения запасов углерода в почве, вызванные такими факторами, как изменение землепользования и глобальное потепление, могут существенно повлиять на концентрацию CO₂ в атмосфере и баланс парниковых газов [1,2]. В связи с этим, актуальной задачей является верификация углеродных единиц, накопленных компонентами агроэкосистем, путем применения надежных методов расчета углекислого газа [3,4]. Кроме того, увеличиваются и требования к большей стабильности и точности измерений с помощью аналитического оборудования и вспомогательных устройств [5].

Исследования показывают, что выбросы CO₂ зависят от множества факторов, влияющих на точность измерений [4,6]. На данный момент не существует обширной классификации методов анализа газового состава почв, все они основаны на разных физических принципах [7]. Однако имеется несколько основных подходов к измерению эмиссии CO₂ из почвы, которые можно разделить на полевые [8-11] и лаборатор-

ные методы [12,13]. Исследователи выделяют оптические методы, такие как Рамановская спектроскопия [14], инфракрасная спектроскопия [15], масс-спектрометрия [16], газовая хроматография [17] и др. для измерения потоков газа. При этом данных о полевом применении портативных ГХ-устройств для анализа почвенного дыхания практически отсутствуют.

Для количественной оценки CO₂, используется традиционный метод, такой как титрование с NaOH [18,19]. Однако этот метод не подходит для долгосрочных измерений (месяцы, недели) и требует много времени. Поэтому инструментальные методы являются наиболее эффективными.

Одним из широко используемых полевых методов является метод закрытой камеры, при котором камера размещается на поверхности почвы и скорость накопления CO₂ внутри камеры измеряется с течением времени с помощью инфракрасных газоанализаторов [10,20-24] или на газовом хроматографе [25]. Однако многочисленные исследования показывают, что биологический фактор оказывает существенное влияние на качество формируемого потока



в камере, его концентрацию и динамику изменения во времени. Причем эти изменения могут быть обусловлены не только фактором наличия биологического компонента в исследуемой зоне, но и конструктивными особенностями самой проточной камеры [26]. В частности, чистота измерений выбросов CO₂ зависит от глубины установки трубы, как указано в Bekin и др. [27]. В работе Görges и др. [26] отмечается, что активность корневой системы растений в месте примыкания камер разных производителей может отличаться, что неизбежно приводит к искажениям измерений эмиссии.

Еще одним важным аспектом анализа CO₂ из почвы являются методы пробоподготовки [21]. Существующие подходы могут не полностью отражать всю сложность динамики CO₂ в почве, что приводит к потенциальным погрешностям и неточностям в результатах [6]. Кроме того, проблемой является и неоднородность свойств почвы, которые могут значительно различаться даже в пределах небольшой площади [28]. Для ее решения исследователями была подчеркнута необходимость более комплексных методов отбора проб, которые могут учитывать вертикальное распределение органического углерода в почве и его стабильность в различных типах почв и экосистемах [29].

Измерение респираторной активности (РА) почвы на газовом хроматографе осуществляется по стандартизированной методике (ISO 16072:2002), что позволяет обеспечить определенный уровень надежности и сопоставимости данных. Пробоподготовка может дополняться в лаборатории с дальнейшей валидацией. В случае измерения эмиссии CO₂ методом закрытых камер (с помощью портативного газового хроматографа или инфракрасного газоанализатора) отсутствуют единообразные метрологические характеристики и нормативные документы – только научные публикации [8,30]. Порядок измерения и воспроизводимость результатов анализа здесь зависит от специфики задач эксперимента, дизайна камер, используемых для анализа, а также от других факторов, таких как температура и влажность почвы.

Таким образом, рассмотренные методы имеют свои ограничения в применении, и понимание их специфики, а также учет точности и сходимости результатов важны для выбора подходящего подхода в каждом конкретном исследовании или для организации системы мониторинга [10, 11].

Целью данной работы являлось сравнение трех методов измерений дыхательной активности почвы, включая анализ сходимости и воспроизводимости результатов, а также особенности использования приборной базы.

Экспериментальная часть

Так как эмиссия CO₂ из почвы имеет высокую пространственную неоднородность, для эксперимента в теплице были подготовлены контейнеры 30x40x20 см с почвой массой 40 кг, которая была предварительно гомогенизирована, освобождена от корней и других крупных включений. В исследовании использовали черноземную почву (пылеватоглинистый суглинок по классификации Ферре) (таблица 1). До начала измерений почва была предварительно увлажнена и проинкубирована при 20°C в течение 7 суток. Содержание CO₂ в атмосфере составляло 420 ppm, относительная влажность воздуха 55%, влажность почвы 60% (от полной влагоемкости) поддерживались на одном уровне, чтобы избежать влияния климатических факторов на измерения. Отбор почвенных образцов осуществляли единоразово в день проведения измерений в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 [33].

Для сравнительной оценки методов измерения эмиссии CO₂ из почвы использовали параллельно три измерительных прибора: инфракрасный CO₂ газоанализатор Wohler CDL 210 (Wöhler, Германия), газовый хроматограф Nexis GC-2030 (Shimadzu, Япония) и мобильный газовый микрохроматограф для замеров парниковых газов «ПИА» (ООО «НПФ МЭМС», Россия).

Газоанализатор и портативный хроматограф могут быть использованы для определения РА почвы в стационарных условиях, так и в составе передвижных лабораторий (полевые исследования), при котором ис

пользуется метод закрытой камеры. Стационарный газовый хроматограф используется в лабораторном определении РА, в этом случае образцы отбираются с полевых участков и доставляются в лабораторию (рис. 1 а, б, с).

Первый метод измерения почвенного дыхания с помощью газоанализатора Wohler CDL 210 представлял собой метод закрытой камеры, оценивающий потоки диоксида углерода по изменению концентрации CO₂ в непрозрачных цилиндрических ПВХ-камерах объемом 1.2-1.5 дм³ и диаметром 110 мм, вкопанных в почву на глубину 3-4 см [34]. Во время проведения измерений камеры герметично накрывали крышкой, объединенной с газоанализатором Wohler CDL 210 с разрешением 1 ppm и

встроенным вентилятором для перемешивания воздуха в камере. Общее время экспозиции для каждой камеры составляло 4 мин., первая из которых требовалась для обеспечения равномерности изменения концентрации CO₂, а 3 мин – на регистрацию прироста концентрации. Параллельно измерялась температура приземного слоя воздуха и почвы на глубине 5 и 10 см, с помощью прибора Checktemp-1 (Hanna, Германия) с точностью до 0.1°C.

Следующие методы измерения осуществлялись с помощью газового хроматографа Nexis GC-2030 (далее ГХ) и мобильного газового хроматографа «ПИА» (далее ГХП). Принцип действия приборов основан на разделении компонентов пробы при

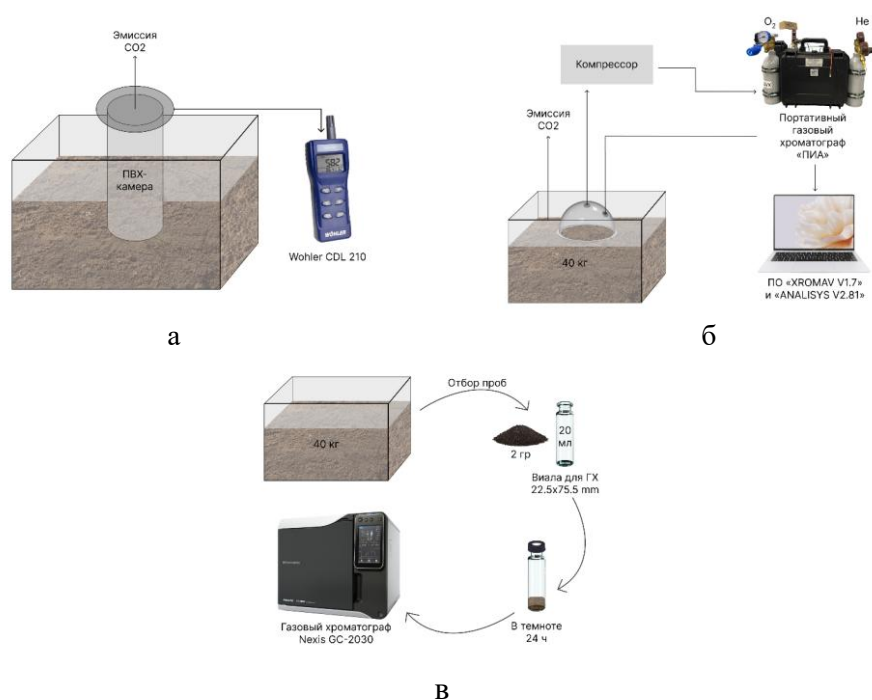


Рис. 1. Схемы отбора проб и методов измерения эмиссии CO₂ из почвы для каждого прибора: а – с использованием газоанализатора Wohler CDL 210; б – с использованием портативного газового хроматографа «ПИА»; в – с использованием газового хроматографа Nexis GC-2030 в лабораторных условиях

Fig. 1. Sampling schemes and methods for measuring CO₂ emissions from the soil for each instrument: a – using a Wohler CDL 210 gas analyzer; b – using a portable PIA gas chromatograph; c – using a Nexis GC-2030 gas chromatograph in laboratory conditions

Таблица 1. Характеристики почвы, использованной в эксперименте
 Table 1. Characteristics of the soil used in the experiment

pH	ЕС, мкСм/см	C _{общ} , %	N _{общ} , %	K _{раст} , мг/дм ³	P _{раст} , мг/дм ³	Песок, %	Пыль, %	Глина, %
7.16	49.7±13.9	2.82±0.5	0.23±0.1	16±2.31	6.6±0.16	-	75.43	30.52



ее прохождении в потоке газа-носителя через хроматографическую колонку и регистрации сигнала от компонента с помощью детектора: пламенно-ионизационный (ПИД) в ГХ и термохимический (ДТХ) в ГХП.

Для измерения скорости почвенного CO_2 -газообмена использовали ГХП (240x160x90мм), планарной хроматографической колонкой, термостатируемой системой пробоотбора и селективного улавливания мешающих компонентов, управляемого электрическими микроклапанами, автоматической системой дозирования с регулируемой продувкой от 0.1 до 5 сек и автономным программным обеспечением XROMAV V1.7 и ANALISYS V2.81, который управляет работой прибора, определяет хроматографические характеристики газовых смесей, строит калибровочные зависимости, а также обрабатывает и хранит результаты измерений. Экспозиционная камера (пластиковая полусфера объемом 22.3 см³) на время измерения устанавливалась на исследуемый участок открытым нижним основанием. Герметизация системы достигалась за счет закапывания основания камеры, а также закрепления на ней силиконовой трубки длиной до 50 см. Поток CO_2 из почвы определялся по скорости изменения концентрации этого газа внутри камеры после выхода хроматографа на рабочий режим. Ввод газовой пробы осуществлялся через штуцер при помощи автоматического крана дозатора с помощью компрессора через равные промежутки времени. Время экспозиции составляло 10 минут с интервалом 3 сек. Далее с помощью программного обеспечения прибора на дисплее воспроизводилась хроматограмма, где по площади пика контрольного вещества (CO_2), выраженную в соответствующих для ДТХ детектора единицах (мВ·с), рассчитывалась концентрация CO_2 в газовой смеси (ppm). Градуировка CO_2 осуществлялась по поверочной газовой смеси производства ООО «ПГС-Сервис», с содержанием CO_2 0.0519%. Калибровку хроматографов проводили методом абсолютной градуировки с использованием поверочной газовой смеси (ГСО 10605-2015),

содержащей 0.0519% CO_2 и др. газы. Среднеквадратичные отклонения площадей хроматографических пиков (%RSD) при анализе поверочной газовой смеси для серии из пяти анализов, не превышали 0.99% от измеряемой величины для углекислого газа.

Эмиссию CO_2 с использованием ГХ анализировали согласно ISO 16072:2002 и программного обеспечения Lab Solution (Shimadzu, Япония) [30]. Навеску почвы массой 1 г помещали в хроматографическую виалу и инкубировали в течение 24 ч при температуре 20°C. Калибровку хроматографов проводили методом абсолютной градуировки с использованием поверочной газовой смеси (ГСО 10605-2015), среднеквадратичные отклонения площадей (%RSD) хроматографических пиков при анализе поверочной газовой смеси для серии из трех анализов, не превышали 6.98% от измеряемой величины для углекислого газа. Увеличение концентрации CO_2 (ppm) детектировали на капиллярной колонке Rt-Q-BOND (Restek, USA) (30 м с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя фазы из 100% дивинилбензола 20 мкм). Скорость потока подвижной фазы (гелий) составляла 10 см³/мин, температура инжектора 25°C, температура колонки 40°C, температура детектора 200°C, Т метанатора 400°C, объём впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 мин на образец.

Для расчета изменения массы углерода в камере за время экспозиции (в виале в случае ГХ) использовали выражение, основанное на уравнении Менделеева-Клапейрона [34], в котором для каждого устройства учитывались объём камеры, время экспозиции и масса почвы (в случае ГХ).

Статистический анализ. Все измерения проводились не менее чем в трехкратной повторности. Определяли среднее арифметическое (\bar{x}), а также наиболее важные статистические показатели вариабельности признаков – дисперсию (σ^2), среднее квадратическое отклонение (σ), коэффициент вариации (CV). Нормальность распределения экспериментальных данных проверялась по критерию Шапиро-Уилка. Для оценки данных с признаками нормального

Таблица 2. Сравнительные характеристики использованных методов оценки эмиссии CO₂ из почвы

Table 2. Comparative characteristics of the methods used to estimate CO₂ emissions from the soil

Метод	Газовый хроматограф Nexis GC-2030	Мобильный газовый хроматограф «ПИА»	Wohler CDL 210
Частота калибровки	1 раз в квартал проводить по стандартам	1 раз в год	2 раза в год
Время одного цикла анализа, мин	4	2.5	4
Наличие доп. оборудования	Да	Да	Да
Программное обеспечение	Lab Solution (Shimadzu, Япония)	XROMAV V1.7 и ANALISYS V2.81	Нет
Время выхода на режим	~ 1 час 25 мин	Не более 20 мин	30 сек
Возможность работы в полевых условиях	Нет	Да	Да
Метрология	Для ПИД: $1.2 \cdot 10^{-12}$ г(С)/с по гексадекану Для ДТП: $1.9 \cdot 10^{-9}$ г/см ³ по гексадекану Определение CO ₂ : > 50 ppm по метану	за цикл измерений (48 часов) в зависимости от типа детектора (по пропану): 0.00375 ppm ±10% для ДТП и 0.0027 ppm ±10% для ДТХ	0-5000 ppm, ±30 ppm
Масса и габариты	Масса и габаритные размеры в зависимости от комплектации	не более 2 кг (без ПЭМВ и внешнего аккумулятора) 240x160x90 мм (без ПЭМВ). Совокупный вес со всеми дополнительными устройствами составляет около 8 кг	Диаметр 118 мм, глубина 70 мм; 208 г (~500 г с крышкой и элементами питания)

распределения использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим межгрупповым сравнением с использованием апостериорного теста Тьюки [35,36]. Различия были определены при уровне значимости критерия $p < 0.05$. Статистический анализ был проведен с использованием языка R (ver. 4.4.1) [37].

Обсуждение результатов

В данной статье провели сравнительный анализ трех устройств, обычно используемых для измерения дыхательной активности почвы: газового хроматографа Nexis GC-2030, мобильного газового хроматографа «ПИА» и газоанализатора Wohler CDL 210. Ниже рассмотрены эксплуатационные характеристики и практические соображения

каждого метода с целью предоставления исследователям всестороннего понимания сильных сторон и ограничений этих методов (табл.2).

ГХ является широко используемым аналитическим прибором для разделения и количественного определения газообразных соединений, включая диоксид углерода [12,38]. Этот лабораторный метод включает в себя введение анализируемой газовой смеси (из образца почвы) в поток инертного газа-носителя, который затем пропускается через колонку, заполненную неподвижной фазой. Различные компоненты образца разделяются на основе их взаимодействия с неподвижной фазой и их



относительной летучести, а затем обнаруживаются чувствительным датчиком, таким как пламенно-ионизационный детектор.

ГХ часто используется на практике для оценки вертикального распределения парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) [8,39]. Так, в работе Гарькуши и др. [40] для определения содержания метана по почвенному профилю закладываются шурфы, в стенках которых из различных горизонтов почв устройством-мерником отбирают образцы и вносят в стандартный стеклянный флакон, заполненный до риски дистиллированной водой с консервантом (фиксированный воздушный объем 5 см^3). Хранение и транспортировку флаконов с пробами осуществляют в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 [33], затем выполняют газохроматографическое определение CH_4 или CO_2 . Наличие в комплектации прибора Nexis GC-2030 автоматического парофазного дозатора HS-20 (Shimadzu, Япония) обеспечивает лучшее извлечение компонентов пробы, что гарантирует чрезвычайно низкий уровень перекрестного загрязнения (0.0001%). Прибор оснащен удобным программным обеспечением, что позволяет автоматизировать процесс съемки и сократить его до 4 минут (одна проба).

Одним из основных недостатков газовой хроматографии в анализе почвенного газа является его сложная конструкция, необходимость частой калибровки и требование поддержания стабильности работы колонки. При сравнении с другими методами требуется предварительный отбор проб (при котором происходит нарушение структуры почвы и дополнительная аэрация при отборе) и дальнейший анализ после 24-часовой инкубации. Кроме того, так как газовый хроматограф представляет собой комплексное аналитическое оборудование, требуется дополнительное приборное оснащение (генератор водорода, метанатор, трансформатор, воздушный компрессор), а также гелий высокой чистоты марки «6.0» 99.9999%). Для работы с образцами необходимо большое количество расходных материалов (хроматографиче-

ские колонки, виа-лы, крышки, септы, кримпер/декримпер для крышек), что значительно удорожает исследование.

Для измерения потоков CO_2 в полевых условиях исследователями широко применяется метод с закрытыми камерами [41,42]. Этот метод является наиболее распространенным методом количественной оценки прямых эмиссий парниковых газов из почв (включая микробное и корневое дыхание) и позволяет исследователям самостоятельно регулировать местоположение камер и время экспозиции. При этом дыхание надземной растительности не учитывается, и в случае с инфракрасным CO_2 газоанализатором Wohler CDL 210 она предварительно удаляется.

Прибор оснащен вспомогательными датчиками для регистрации основных параметров окружающей среды (температуры и относительной влажности), влияющих на эмиссию почвы. Непрозрачный материал камер не защищает от повышения температуры внутри камеры, что может привести к изменениям давления и повлиять на эмиссию из почвы. Для репрезентативного охвата измерений площадок камерные системы возможно легко и быстро перемещать (масса прибора $\sim 500 \text{ г}$ с крышкой и элементами питания). По сравнению с газовым хроматографом, оценивает дыхательную активность ненарушенных почв. Проведение измерений на Wohler CDL 210 не требует специальной подготовки, работает без дополнительного оборудования или расходных материалов. К недостаткам метода можно отнести быстрое перегревание корпуса при условиях повышенных температур воздуха (низкая погодоустойчивость), невозможность оценивать вклад фотосинтеза при оценке суммарной эмиссии CO_2 .

Количественная оценка не только почвенного дыхания, но и надземной растительности может быть зафиксирована с помощью портативной системы ГХП. Основным преимуществом является возможность использования двух видов камер: полусфера объемом 22.3 см^3 и прозрачных кубов объемом 1 м^3 . Камеры-полусферы уста

навливают на поверхность почвенного покрова, а кубы – на участки с растительностью. Таким образом, по кривой изменения концентрации парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в камере можно рассчитать величину потока CO₂ и сравнить с интенсивностью фотосинтеза. Аналогично Wohler CDL 210 позволяет оценивать РА ненарушенной почвы, а главное, за короткий промежуток времени (2.5 мин). При этом, для эффективной работы устройства необходимо учиты-

вать следующие условия: наличие внешнего аккумулятора, баллон с гелием 5 дм³ высокой чистоты марки «5.0» согласно EN ISO 7866-2021, баллон 5 дм³ со сжатым воздухом согласно ГОСТ 17433-80 класса 0, предварительное прогревание термостатов в течение 20 мин (колонки прибора включаются только при подачи газа-носителя и достижения необходимых температур в термостате), компрессор и силиконовые шланги 0.3 мм.

Таблица 3. Результаты измерений выбросов CO₂ из почвы, измеренные с помощью газового хроматографа Nexis GC-2030, мобильного газового хроматографа «ПИА» и газоанализатора Wohler CDL 210

Table 3. Measurement results of CO₂ emissions from the soil, measured using the Nexis GC-2030 gas chromatograph, the PIA mobile gas chromatograph and the Wohler CDL 210 gas analyzer

Прибор	№	РА, г С/м ² ·час		Среднее арифметическое (\bar{x})	Дисперсия (σ^2)	СКО (σ)	CV (%)
		мин	макс				
Газовый хроматограф Nexis GC-2030	1	0.1813	0.2210	0.2019	0.0002628	0.0162	8.03
	2	0.1099	0.1430	0.1209	0.0002439	0.0156	12.92
	3	0.0946	0.1791	0.1464	0.0013762	0.0371	25.34
	4	0.1834	0.1981	0.1919	0.0000387	0.0062	3.24
	Итог			0.1653			
ГХ-портативный «ПИА»	1	0.0099	0.0105	0.0103	0.0000001	0.0003	2.44
	2	0.0047	0.0089	0.0062	0.0000037	0.0019	30.91
	3	0.0041	0.0077	0.0057	0.0000023	0.0015	26.35
	4	0.0039	0.0126	0.0086	0.0000129	0.0036	41.77
	Итог			0.0077			
Wohler CDL 210	1	0.0151	0.0503	0.0285	0.0002419	0.0156	54.58
	2	0.0121	0.0209	0.0169	0.0000132	0.0036	21.52
	3	0.0150	0.0230	0.0181	0.0000126	0.0036	19.64
	4	0.0230	0.0307	0.0262	0.0000106	0.0033	12.44
	Итог			0.0224			

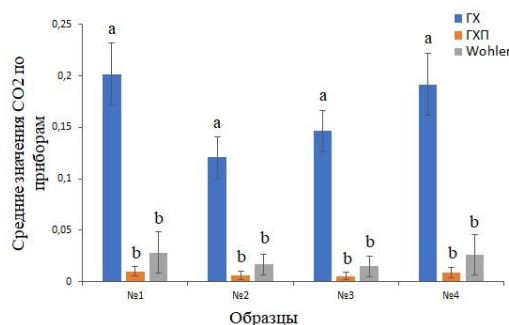


Рис. 2. Средние значения эмиссии CO₂ для 4 точек измерения РА. Анализ значимости различий был проведен с использованием теста Шапиро-Уилка. Различные строчные буквы (a, b) указывают на значимые различия между средними значениями CO₂ (p 0.05)

Fig. 2. Average values of CO₂ emissions for 4 measuring points of RA. The significance of the differences was analyzed using the Shapiro-Wilk test. Different lowercase letters (a, b) indicate significant differences between the average CO₂ values (p<0.05)

Таблица 4. Объем CO₂, выделенного почвой и учтенного разными методами
 Table 4. The amount of CO₂ released by the soil and accounted for by various methods

Значение из статьи в ед. измерения	Метод оценки	Показатель после пересчета в г С/м ² ·час	Ссылки
0.02-0.05 г CO ₂ ·м ² /час	Инфракрасный газоанализатор Li-1200 (Li-COR, США)	0.02-0.05	[43-45]
1.82 – 10.01 μmol CO ₂ ·м ² /сек	Инфракрасный газоанализатор LI-COR 8100 (Li-Cor Inc., USA)	0.021 - 0.115	[46]
От 0.11 до 0.18 г С/ м ² ·час	AZ 7752 (Тайвань)	0.11-0.18	[24]
68.35 см ³ CO ₂ ·кг/час	Титрование 0.1 М HCl	0.135	[47]
181±36 мг CO ₂ /м ² ·час	Многофункциональный анализатор Testo-435 (Germany)	0.181 ± 0.036	[48]
3.48 г (CO ₂ –С)/м ² /день	Газовый хроматограф «Хроматек Кристалл 5000.2»	0.145	[49]

Таким образом, ГХ является эффективным методом для анализа газообразных соединений, обеспечивая высокую точность, воспроизводимость и низкий предел обнаружения/детектирования для CO₂. Однако его использование требует предварительного отбора проб, дополнительного оборудования и значительных затрат на расходные материалы, что усложняет исследование. Метод с закрытыми камерами, например с Wohler CDL 210, также эффективен для оценки эмиссии CO₂, но его низкая погодоустойчивость и склонность к перегреванию ограничивает применение. В отличие от Wohler CDL 210, ГХП позволяет оценивать как почвенное дыхание, так и фотосинтетическую активность растительности, используя различные типы камер для измерения концентрации CO₂. Это делает систему перспективным инструментом для экологических исследований, организаций систем мониторинга, но требует внимательного подхода к организации процесса.

Результаты измерений выбросов CO₂ из почвы, полученные тремя различными методами представлены в таблице 3. Данные показывают максимальные и минимальные значения РА почвы (г С/м²·час) для каждого устройства, а также ключевые статистические параметры, такие как среднее арифметическое (\bar{x}), дисперсия (σ^2), стандартное отклонение (σ) и коэффициент вариации

(CV), которые позволяют оценить точность и воспроизводимость результатов.

Средние значения эмиссии CO₂ по итогам 4 точек измерений показали разницу в измерениях (рис. 2). Так для ГХ это значение было 0.1653 г С/м²·час, для ГХП – 0.0077 г С/м²·час, а для Wohler CDL 210 – 0.0224 г С/м²·час. Таким образом, ГХ демонстрирует наивысшие средние значения по всем точкам с меньшей сходимостью. ГХП имеет самые низкие средние значения с минимальной дисперсией, что может свидетельствовать о большей точности, но CV для точек 2 и 3 указывает на низкую сходимость в этих измерениях. Wohler CDL 210 имел более высокие CV по сравнению с ГХ и ГХП, особенно в точке №1, что указывает на меньшую сходимость результатов.

Сходимость результатов между ГХП и Wohler CDL 210 присутствует частично: ГХП показывает наименьшие значения CO₂, тогда как ГХ и Wohler CDL 210 демонстрируют более высокие и сопоставимые значения в некоторых точках. Наибольшую сходимость (по CV) демонстрируют образцы 1 и 3 для всех приборов, что может быть связано с разной чувствительностью этих устройств. Достоверные различия в содержании CO₂ были зафиксированы между результатами хотя бы двух групп приборов (ГХ, ГХП, Wohler CDL 210) ($p < 0.05$).

Было установлено, что нарушение почвенного покрова и дополнительная аэрация

при отборе проб, способствовали увеличению РА в 21.5 раза больше по сравнению с ГХП и в 7.4 раза по сравнению с Wohler CDL 210. Средние значения между группами ГХ и ГХП, а также ГХ и Wohler CDL 210 имеют значимые различия ($p < 0.05$), в то время как различия между ГХП и Wohler CDL 210 не являются статистически значимыми ($p > 0.05$). Таким образом, можно сделать вывод, что измерения методом газовой хроматографии отличаются от значений, полученных методом закрытой камеры, поскольку в отличие от ГХ, позволяют получить более предметную фактическую информацию.

При обсуждении выбросов CO_2 из почв важно учитывать, как различные методы измерения могут давать разные результаты, как это продемонстрировано в нескольких исследованиях (таблица 4). В таблице видно, что данные, полученные методом закрытой камеры (Li-Cor, США), согласуются с нашими результатами, полученными аналогичным способом. Однако в исследовании Карелина и др. [24], эмиссию CO_2 из почвы оценивали с помощью портативного газоанализатора AZ 7752 и были получены значения, в 5 раз превышающие

данные, полученные с помощью Wohler CDL 210. В целом, результаты других авторов по оценке потоков CO_2 из почвы были сопоставимы с данными, полученными с помощью газовой хроматографии в этой статье.

Заключение

Таким образом, при сравнении трех методов количественной оценки эмиссии CO_2 из почвы были выявлены значительные различия в показаниях между ГХ и ГХП «ПИА», а также между ГХ и Wohler CDL 210 ($p < 0.05$), тогда как между ГХП «ПИА» и Wohler CDL 210 они оказались незначительными ($p > 0.05$). Кроме того, оба прибора позволяют получить данные о дыхательной активности почвы в её естественной среде, что делает их наиболее предпочтительными для оценки эмиссии CO_2 из почвы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Bhavna J., Arideep M., Bhanu P., Madhoolika A. Emission of greenhouse gases from soil: an assessment of agricultural management practices. *Plant Resp. to Soil Pollut.*, 2020; 221-248. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4964-9_14
2. Camarda M., De Gregorio S., Capasso G., Di Martino R.M.R., Gurrieri S., Prano V. The monitoring of natural soil CO_2 emissions: Issues and perspectives. *Earth-Science Rev.*, 2019; 198: 102928. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102928>
3. Yoshida H., ten Hoeve M., Christensen T.H., Bruun S., Jensen L.S., Scheutz C. Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application // *J. Clean. Prod.*, 2018; 174: 538-547. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.175>
4. Friedlingstein P., Jones Matthew W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker, Dorothee C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.S. Research collection: Global carbon

- budget 2019. *Optim. Param. Tuning Feed. Control. with Appl. to Biomol. Antithetic Integr. Control.*, 2019; 10(3): 12-19. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
5. MacAgga R., Asante M., Sossa G., Antonijević D., Dubbert M., Hoffmann M. Validation and field application of a low-cost device to measure CO_2 and evapotranspiration (ET) fluxes. *Atmos. Meas. Tech.*, 2024; 17(4): 1317-1332. <https://doi.org/10.5194/amt-17-1317-2024>
6. Trumbore S.E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 1997; 94(16): 8284-8291. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8284>
7. Merl T., Hu Y., Pedersen J., Zieger S.E., Bornø M.L., Tariq A., Sommer S.G., Koren K. Optical chemical sensors for soil analysis: possibilities and challenges of visualising NH_3 concentrations as well as pH and O_2 microscale heterogeneity. *Environ. Sci. Adv.*, 2023; 2(9): 1210-1219. <https://doi.org/10.1039/d3va00127j>
8. Zaman M., Kleinedam K., Bakken L., Berendt J., Bracken C., Butterbach-Bahl K., Cai Z.,



- Chang S.X., Clough T., Dawar K., Ding W.X., Dörsch P., dos Reis Martins M., Eckhardt C., Fiedler S., Frosch T., Goopy J., Görres C.M., Gupta A., Henjes S., Hofmann M.E.G., Horn M.A., Jahangir M.M.R., Jansen-Willems A., Lenhart K., Heng L., Lewicka-Szczebak D., Lucic G., Merbold L., Mohn J., Molstad L., Moser G., Murphy P., Sanz-Cobena A., Šimek M., Urquiaga S., Well R., Wrage-Mönnig N., Zaman S., Zhang J., Müller C. Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using Nuclear and Related Techniques. Applications of Nuclear Techniques for GHGs, 2021. 375 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55396-8_1
9. Bhowmik A., Fortuna A.M., Cihacek L.J., Rahman S., Borhan M.S., Carr P.M. Use of laboratory incubation techniques to estimate greenhouse gas footprints from conventional and no-tillage organic agroecosystems. *Soil Biol. Biochem.*, 2017; 112: 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.015>
10. Kulikova M.A., Soromotin A.V. Otsenka potokov uglekislogo gaza postpirogennykh geosistem na severe Zapadnoi Sibiri. «Arktika: sovremennyye podkhody k proizvodstvennoi i ekologicheskoi bezopasnosti v neftegazovom sektore», Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 28 Noyabrya 2022 g. Tyumen', 2022: 86-89. (In Russ.)
11. Wang L., Cheng Y., Naidu R., Chadalavada S., Bekele D., Gell P., Donaghey M., Bowman M. Application of portable gas chromatography–mass spectrometer for rapid field based determination of TCE in soil vapour and groundwater. *Environ. Technol. Innov.*, 2021; 21: 101274. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101274>
12. McGowen E.B., Sharma S., Deng S., Zhang H., Warren J.G. An Automated Laboratory Method for Measuring CO₂ Emissions from Soils. *Agric. Environ. Lett.*, 2018; 3(1): 1-5. <https://doi.org/10.2134/ael2018.02.0008>
13. Dulov L.E., Udaltsov S.N., Stepanov A.L. Potoki dioksida ugleroda, metana i zakisi azota v pochvakh kateny pravoberezh'ya r. Oka (Moskovskaya Oblast'). *Pochvovedenie*, 2010; 5: 582-590. (In Russ.)
14. Maiwald M., Sowoidnich K., Sumpf B. Portable shifted excitation Raman difference spectroscopy for on-site soil analysis. *J. Raman Spectrosc.*, 2022; 53: 1560-1570. <https://doi.org/10.1002/jrs.6400>
15. Materazzi S., Gentili A., Curini R. Applications of evolved gas analysis: Part 1: EGA by infrared spectroscopy. *Talanta*, 2006; 68(3): 489-496. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.04.055>
16. Duff D., Lennard C., Li Y., Doyle C., Edge K.J., Holland I., Lothridge K., Johnstone P., Beylerian P., Spikmans V. Portable gas chromatography–mass spectrometry method for the in-field screening of organic pollutants in soil and water at pollution incidents. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023; 30(40): 93088-93102. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28648-w>
17. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E., Larin N., Pillot D., Farrell K.M. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA). *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2015; 2: 31. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>
18. Zainitdinova L. Vliyanie izmenenii okruzhayushchei sredy na mikrobnoe raznoobrazie. *Universum khimiya i biologiya*, 2023; 7(109): 18-22. (In Russ.)
19. Leshkenov A.M. Agroecological efficiency of soil bioactivation in the mineral nutrition system of winter wheat against the background of green manure aftereffect. *News Kabard. Sci. Cent. RAS.*, 2023; 2(112): 39-49. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-2-112-39-49>
20. O'Riordan R., Davies J., Stevens C., Quinton J.N., Boyko C. The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*, 2021; 395: 115076. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>
21. Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Brümmer C., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemedtsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvennoinen H., Skiba U., Vestin P., Weslien P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *Int. Agrophysics*, 2018; 32(4): 569-587. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0045>
22. Kochiieru M., Feiza V., Feizienė D., Volungevičius J., Deveikytė I., Seibutis V., Pranaitienė S. The effect of environmental factors and root system on CO₂ efflux in different types of soil and land uses. *Zemdirbyste*, 2021; 108(10): 3-10. <https://doi.org/10.13080/z-a.2021.108.001>



23. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R. Otsenka vkladа kornevogo i mikrobnogo dykhaniya v obshchii potok so 2 iz torfyanykh pochv i podzolov severa Zapadnoi Sibiri metodom integratsii komponentov. *Pochvovedenie*, 2019; 2: 234-245. <https://doi.org/10.1134/s0032180x19020059> (In Russ.)
24. Karelin D. V., Lyuri D.I., Goryachkin S. V., Lunin V.N., Kudikov A. V. Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the Chernozems forest-steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2015; 48(11): 1229-1241. <https://doi.org/10.1134/S1064229315110095>
25. Karelin D.V., Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Lunin V.N., Kudikov A.V. Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the Chernozems forest-steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2015; 48(11): 1229-1241. <https://doi.org/10.1134/S1064229315110095>
26. Görres C.M., Kammann C., Ceulemans R. Automation of soil flux chamber measurements: Potentials and pitfall. *Biogeosciences*, 2016; 13(6): 1949-1966. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1949-2016>
27. Bekin N., Agam N. Rethinking the deployment of static chambers for CO₂ flux measurement in dry desert soils. *Biogeosciences*, 2023; 20(18): 3791-3802. <https://doi.org/10.5194/bg-20-3791-2023>
28. Sharma M., Kaushal R., Kaushik P., Ramakrishna S. Carbon farming: Prospects and challenges. *Sustain.*, 2021; 13(19): 1-15. <https://doi.org/10.3390/su131911122>
29. Gross C.D., Harrison R.B. The case for digging deeper: Soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Syst.*, 2019; 3(2): 1-24. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
30. ISO 16072:2002 Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration. USA, American National Standards Institute (ANSI), 2002, 26 p.
31. Mayer A., Hausfather Z., Jones A.D., Silver W.L. The potential of agricultural land management to contribute to lower global surface temperatures. *Sci. Adv.*, 2018; 4(8). <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.aag0932>
32. Berger B.W., Davis K.J., Yi C., Bakwin P.S., Zhao C.L. Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a northern forest: Flux measurement methodology. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2001; 18(4): 529-542. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0529:LTCDFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0529:LTCDFD>2.0.CO;2)
33. GOST R 58595-2019. Pochvy. Otkor prob. M., Standartinform, 2019, 9 p. (In Russ.)
34. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Kraev G.N. Metodicheskoe rukovodstvo po analizu emisii ugleroda iz pochv poselenii v tundra. Moskva: TsEPL RAN, 2015. 64 p. (In Russ.)
35. Bure V.M. Metodologiya statisticheskogo analiza opytnykh dannykh, 2007. 138 p. (In Russ.)
36. Bure V.M., Parilina E.M. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika, 2022. 416 p. (In Russ.)
37. Zadorozhnyi S.S. Statisticheskaya obrabotka dannykh na yazyke R, 2023. 104 p. (In Russ.)
38. Wielopolski L., Hendrey G., Johnsen K.H., Mitra S., Prior S.A., Rogers H.H., Torbert H.A. Nondestructive System for Analyzing Carbon in the Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2008; 72(5): 1269-1277. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0177>
39. Mondini C., Sinicco T., Cayuela M.L., Sanchez-Monedero M.A. A simple automated system for measuring soil respiration by gas chromatography. *Talanta*, 2010; 81(3): 849-855. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.01.026>
40. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Tambieva N.S., Emissiya metana iz pochv Rostovskoi oblasti. *Arid ecosystems*, 2011; 17.4(49): 44-52. (In Russ.)
41. Zamolodchikov D. G., Grabovskii V. I., Kraev G.N. Dinamika byudzheta ugleroda lesov rossii za dva poslednikh desyatiletiiya. *Lesovedenie*, 2011; 6: 16-28 (In Russ.)
42. Karelin D. V., Zolotukhin A. N., Ryzhkov O. V., Lunin V. N. Use of long-term soil respiration measurements for calculating the net carbon balance in ecosystems of the central chernozemic region. *Soil Biol.*, 2024, 57(10): 1638-1649. <https://doi.org/10.1134/S1064229324601318>
43. Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Sotnikova Yu.L., Tembo A., Vasenev I.I., Valentini R. Kratkosrochnaya dinamika i prostranstvennaya neodnorodnost' emisii CO₂ pochvami estestvennykh i gorodskikh ekosistem tsentral'no-chernozemnogo regiona. *Soil Science*, 2015; 4: 469-478. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15040097> (In Russ.)
44. Burba G. Eddy covariance method-for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications. Lincoln, Nebraska, LI-COR. *Biosciences*, 2013, 345 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4247.8561>



45. Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Analiticheskii obzor: emissiya i pogloshchenie parnikovykh gazov pochvami. Ekologicheskie problemy. *Anthropog. Transform. Of Nat.*, 2021; 7(1): 6-34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>

46. Mühlbachová G., Růžek P., Kusá H., Vavera R. CO₂ emissions from soils under different tillage practices and weather conditions. *Agronomy*, 2023; 13(12):1-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123084>

47. Matei S., Matei G. M., Dumitru S., Mocanu V. Soil respiration as microbial response to the endogen input of bio-synthesized organic matter

and its implication in carbon sequestration. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.*, 2023; 18(1): 51-64. <https://doi.org/10.26471/cjees/2023/018/240>

48. Naumov A.V. Dykhanie i evapotranspiratsiya ekosistem stepnoi kateny (Zapadnaya Sibir). *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2014; 7. <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2014-7-1> (In Russ.)

49. Kon'kova V.M., Burlo A.V. Narkevich I.P. Emissiya parnikovykh gazov s torfyanykh pochv v usloviyakh brestskoi i minskoi oblasti. *Ekologicheskii vestnik*, 2016; 4(38): 33-42. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

А.Р. Камалова – младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, Казань, Россия

П.А. Курынцева – к.б.н., старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «GreenAgro» Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, Казань, Россия

А.С. Гордеев – младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, Казань, Россия

Н.В. Данилова – к.б.н., старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, Казань, Россия

В.И. Платонов – к.х.н., доцент кафедры химии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

С.Ю. Селивановская – д.б.н., ведущий научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, Казань, Россия

A.R. Kamalova – researcher at the educational and scientific laboratory of the Center for Agricultural and Ecobiotechnologies of the Institute of Ecology, biotechnology and Environmental Management KFU, Kazan, Russian Federation, 80000-0002-7857-8756, e-mail: akh-tjamovaalina07@gmail.com

P.A. Kuryntseva – PhD in biology, associate prof., senior researcher at the research laboratory "GreenAgro" of the Institute of Ecology, biotechnology and Environmental Management KFU, Kazan, Russian Federation, [0000-0002-9274-7077](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2014-7-1), e-mail: polinazwerewa@yandex.ru

A.S. Gordeev – researcher at the educational and scientific laboratory of the Center for Agricultural and Ecobiotechnologies of the Institute of Ecology, biotechnology and Environmental Management KFU, Kazan, Russian Federation, 0000-0002-1918-305X, e-mail: drgor@mail.ru

N.V. Danilova – PhD in biology, senior researcher at the educational and scientific laboratory of the Center for Agricultural and Ecobiotechnologies of the Institute of Ecology, biotechnology and Environmental Management KFU, Kazan, Russian Federation, 0000-0001-8750-0929, e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

V.I. Platonov – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of Chemistry, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, 0000-0003-1467-0761, e-mail: rovvv@yandex.ru

S.Yu. Selivanovskaya – doctor of biological sciences, professor, leading researcher of the educational and scientific laboratory of the Center for Agricultural and Ecobiotechnologies of the Institute of Ecology, biotechnology and Environmental Management KFU, Kazan, Russian Federation, 0000-0001-6379-7166, e-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 26.11.2024; принята к публикации 04.12.2024.

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 26.11.2024; accepted for publication 04.12.2024.