Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

УДК 630*1

Сравнение пульсационного и камерного методов измерения дыхания почвы: предварительные результаты

Касицкий В.А., Кивалов С.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В., Волкова Т.Ю., Курганова И.Н.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Аннотация

Оценка дыхания почвы - одного из основных источников углекислого газа в атмосферу – необходима для корректного определения углеродного баланса в наземных экосистемах. Сравнение пульсационного и камерного методов измерения дыхания почвы, проведенные в березняке постагрогенном в регионе южного Подмосковья, показывает хорошую сопоставимость этих методов с коэффициентом детерминации R^2=0.75 (p-value=7.546e-12). С учетом высокой пространственной и временной неоднородности почвенного дыхания, полученные результаты демонстрируют возможность комплексного использования пульсационного и камерного методов оценки углеродного баланса экосистем.

Ключевые слова: ДЫХАНИЕ ПОЧВЫ, ПУЛЬСАЦИОННЫЙ МЕТОД, КАМЕРНЫЙ МЕТОД, ЧИСТЫЙ ЭКОСИСТЕМНЫЙ ОБМЕН, ВАЛОВАЯ ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ, БАЛАНС УГЛЕРОДА, НАЗЕМНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Введение

Комплексная оценка экосистемных потоков и баланса углерода на лесозарастающих сельскохозяйственных землях представляет собой важную задачу в контексте понимая фундаментальных природных процессов, изменений климата, а также устойчивого развития антропогенно-нарушенных территорий. Лесозарастающие земли играют важную роль в поддержании биологического разнообразия, улучшении качества почв, регулирования водного и углеродного баланса [1].

Для измерения экосистемных потоков и баланса углерода используют комплекс различных методов, включающих метод турбулентных пульсаций для определения чистого экосистемного обмена и валовой первичной продукции, а также метод закрытых камер для

измерения дыхания почвы [2-3]. Эти методы позволяют проводить прямые измерения основных параметров углеродного баланса в экосистемах, но они существенно различаются по зонам охвата как в пространстве, так и во времени. Метод турбулентных пульсаций применяют для осуществления непрерывного мониторинга чистого экосистемного обмена (NEE), или чистой экосистемной продукции (NEP=-NEE) [4-5], с футпринтом измерений (зоной охвата сбора данных), составляющей, как правило, несколько гектаров [6-7], что дает возможность исследовать сравнительно неоднородные экосистемы со степенями неоднородности меньшими площади футприта [8]. Камерный метод, предназначенный для оценки дыхания почвы (SR), характеризуется точечностью проводимых измерений: как правило, это несколько раз в неделю/месяц и на ограниченных участках площади, что не дает возможности напрямую оценить суммарные сезонные или годовые эмиссионые потоки CO_2 в экосистеме [9]. При этом значения SR, полученные в утренние часы соответствуют среднесуточным величинам SR [10].

В ночное время преобладающим процессом в экосистеме, состоящей из С3 и С4 растений, является ее дыхание (выделение CO_2). В отсутствие фотосинтеза устьица листьев растений плотно закрыты, и газообмен между надземными частями растений и атмосферой (автотрофный компонент дыхания экосистемы) практически прерван [11]. Но при этом дыхание микроорганизмов и подземных частей растений продолжается, так как ночью корни активно растут и восполняют запасы влаги [12]. Поэтому, можно допустить, что ночью соблюдается примерное равенство между дыханием почвы и чистым экосистемным обменом $SR \approx NEE$, что дает возможность непосредственного сравнения между данными, полученными пульсационным и камерным методами как непосредственно в ночное время так и экстраполяцией ночных измерений моделированием [13-14] на уровень суточных усредненных значений. Основная цель представляемого исследования состояла в сравнительной оценке этих методов, чтобы понять, насколько они различаются и как могут дополнять друг друга при проведении непрерывного мониторинга.

Материалы и методы

Объект исследований

В исследовании использованы данные измерений потоков CO_2, полученные пульсационным и камерным методами с июля 2024 по июль 2025 года (годовой цикл), в

экосистеме березняка постагрогенного возрастом 20 лет на эколого-климатической станции «Пущино» (ЭКС), организованной вблизи г. Пущино (54°49'N, 37°34'E) на правом берегу реки Оки в зоне широколиственных лесов [1514]. Молодой березовый лес отличается неоднородной структурой, где лесные участки перемежаются с луговой растительностью, представленной в основном золотарником канадским. Регион исследований относится к зоне умеренно-континентального климата. Согласно данным многолетних метеонаблюдений, проводимых на Станции комплексного фонового мониторинга, расположенной на территории Приокско-Террасного биосферного заповедника (Данки, Серпуховской район, Московская область), среднегодовая температура воздуха в 1973–2018 гг. в районе исследований составила 5.2 ± 0.3 ºC, а среднегодовое количество осадков – 667 ± 34 мм. Гидротермический коэффициент Селянинова (hydrothermal coefficient, HTC) за летний период (июнь–август) варьировал от 0.70 до 2.40, при среднем многолетнем 1.49 ± 0.14 [16].

Пульсационные измерения потоков парниковых газов в атмосфере

ЭКС «Пущино» оснащена вышкой высотой 34 метра с установленной на ней пульсационной системой измерения потоков парниковых газов CPEC310 (Campbell Scientific) с 3D анемометром и газоанализатором закрытого типа, которые измеряют три компонента скорости ветра $U = (u, v, w)$ [м c^{-1}] и молярные концентрации CO_2 и H_2O [ppm] с частотой 20 Hz (рис. 1 слева.). На станции также установлен радиометр-балансомер NR01 (Hukseflux), измеряющий четыре компоненты солнечного излучения – приходящие и исходящие, коротковолновые и длинноволновые с частотой 1 Hz, а также система измерения вертикального профиля производства Обнинского НПО «Тайфун», измеряющая температуру, влажность и концентрации CO_2 и H_2O в воздухе.

Вертикальные потоки вещества и энергии между экосистемой и атмосферой (H – чувствительного «явного» тепла; LE – латентного «скрытого» тепла; F_{co2} – углекислого газа; ET – эвапотранспирации) вычисляются как корреляции между временем пульсаций вертикальной составляющей скорости ветра (w') и пульсациями температуры (T') и молярных концентраций газов (c', q') в соответствии с формулами 1−4 [6-8].

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'} \quad (1)$$

$$LE = \rho_a L \overline{w'q'} \quad (2)$$

$$F_{co2} = \rho_a \overline{w'c'} \quad (3)$$

$$ET = \rho_a \overline{w'q'} \quad (4),$$

где ρ_a – плотность воздуха, C_p – теплоемкость воздуха, L – теплота испарения воды.

Рис. 1. Размещение оборудования на вышке ЭКС «Пущино» (слева) и при измерении дыхания почвы (справа)

Метод турбулентных пульсаций работает при достаточном уровне перемешивания воздуха, поэтому для фильтрации «корректных» данных использован порог динамической скорости ($u^* = \sqrt{\left|\overline{u'w'}\right|}$), где достаточный уровень турбулентности оценивают по равномерности перемешивания в поверхностном слое атмосферы и отсутствию «фотосинтеза» в ночное время через $u^* > 0.2$ [м $с^{-1}$] [17−18]. При этом в условиях достаточного перемешивания воздуха не происходит накопления углекислого газа в пространстве между уровнем, на котором осуществляются измерения и подлежащей поверхностью ($S \approx 0$), что позволяет оценить, согласно уравнению: $NEE = F_{co2} + S \approx F_{co2}$ [17−18].

При вычислении потоков парниковых газов проводили стандартную обработку данных [19] с помощью пакета EasyFlux (https://www.campbellsci.com/easyflux-pc). При этом, использовали «сухие» молярные отношения концентраций, непосредственно

получаемые системой CPEC310, что позволило непосредственно оценить потоки без привлечения коррекций по водяному пару и температуре [20].

Постобработку потоков с заполнением пропусков осуществляли R-пакетом REddyProc [21]. Дыхание почвы ($SR_{LTnight}$) оценивали в REddyProc по ночным значениям NEE через уравнение Ллойда-Тейлора (формула 5) [13-14].

$$SR_{LTnight} = V_{ref} e^{\frac{E_0}{T_{ref}-T_0} * \frac{T-T_{ref}}{T-T_0}} \quad (5)$$

где E_0 - энергия активации, V_{ref} – референсное значение дыхания почвы, получаемое при T_{ref} – референсной температуре инициализации модели ($T_{ref} = 273$ К), T_0 - базовая температура отсутствия дыхания почвы ($T_0 = 223$ К).

Камерные измерения дыхания почвы

Интенсивность дыхания почвы измеряли камерным статическим методом, основанным на определении увеличения концентрации диоксида углерода в закрытой камере за определенные промежутки времени [9]. В качестве камер использовали небольшие стальные цилиндрические сосуды-изоляторы, высотой около 15 см и диаметром 10 см. Камеры устанавливали непосредственно перед определением интенсивности дыхания почв (глубина врезания камер − 4 см). Отбор проб воздуха проводили шприцами объемом 20 мл с промежутками в 10 мин в первые 30 мин после установки камер. Газовые пробы анализировали в тот же день на газоанализаторе Licor-820 методом инфракрасной спектроскопии для определения концентраций углекислого газа. Серая лесная почва на площадках измерений обладает глинистой структурой [22], что обеспечивает плотный контакт с камерой, исключающий воздухообмен с атмосферой.

Измерения проводили в утренние часы (как правило, с 10 до 11 часов) под лесной и луговой растительностью в пяти повторностях: камеры по возможности размещали между растениями на расстоянии 1 – 2 м друг от друга на обоих участках (рис. 1 справа). Измеряемый поток CO_2 из почвы характеризует общее дыхание с ее поверхности, за исключением дыхания зеленых частей растений [23]. Интенсивность дыхания почвы (SR_{meas}) вычисляется по следующей формуле (6):

$$SR_{meas} = h * \frac{C_2 - C_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

где, (C_2-C_1) - изменение концентрации углекислого газа [ppm] за время (t_2-t_1) [мин] и h - высота камеры [см] над поверхностью почвы. Полученная величина SR_{meas} пересчитывается в среднесуточное дыхание почвы [гС $м^{-2}$ $сут^{-1}$] [10].

Результаты исследований

Динамика валовой первичной продукции ($GPP = -NEE + SR$) или наличия фотосинтеза за годовой цикл измерений даёт возможность оценить длительность вегетационного периода и периода, когда отсутствует поглощение углекислого газа растениями (рис. 2, красная линия). Согласно нашим исследованиям, период вегетации начинался в середине апреля и длился до начала октября.

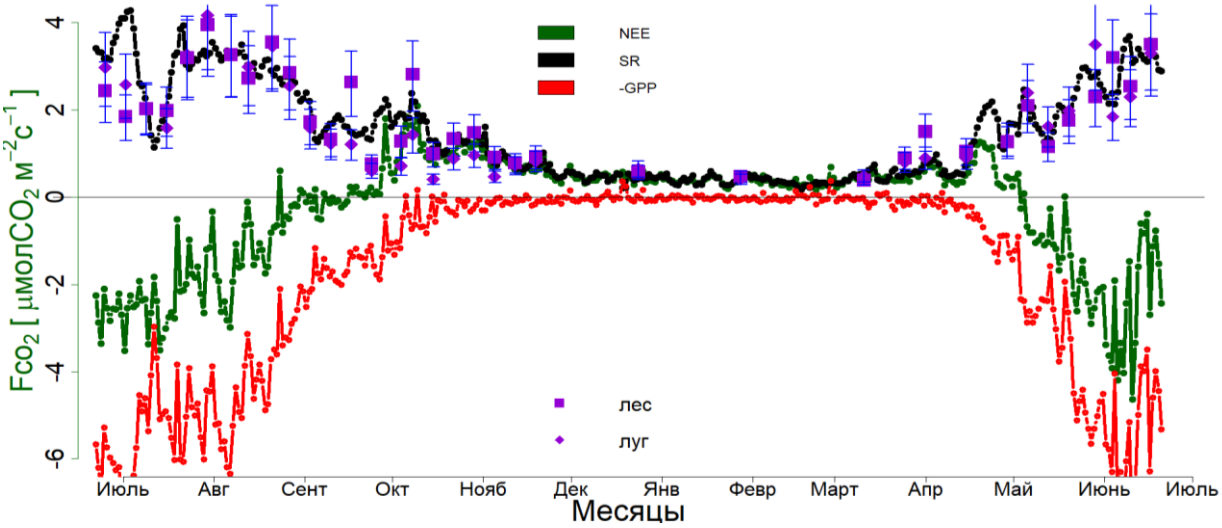

Рис. 2. Годовая динамика чистого экосистемного обмена (NEE, пульсационный метод) Фиолетовые точки – измеренное методом почвенных камер дыхание почвы на лесном участке (квадраты) и на луговом (ромбы)

В осенне-зимний период наблюдалось синхронное снижение величин измеренного чистого экосистемного обмена (NEE – зеленая линия) и смоделированного по Ллойду-Тейлору дыхания почвы (SR – черная линия), что связано с замедлением процессов фотосинтеза и уменьшением активности почвенной микробиоты при низких температурах. Зимний период характеризовался отсутствием фотосинтеза ($GPP = 0$) и минимальными показателями дыхания почвы. Следовательно, в зимний период величина NEE совпадает с интенсивностью SR: $NEE = SR$. С начала вегетационного периода значения GPP, NEE и SR синхронно увеличиваются, что обусловлено увеличением интенсивности и длительности поступающего солнечного излучения и повышением температуры воздуха и почвы, и как следствие приводит к интенсификации процессов фотосинтеза и дыхания почвы и экосистемы.

Интенсивность дыхания почвы, измеренного камерным методом (рис. 2, фиолетовые

точки), хорошо соответствует динамике величины SR, оцененной по уравнению Ллойда-Тейлора, в основном оставаясь в пределах пространственной неопределенности камерного метода (вертикальные усы).

Сравнение между величинами среднесуточного дыхания почвы, полученными пульсационным методом по уравнению Ллойда-Тейлора ($SR_{LTnight}$) и непосредственно измеренными камерным методом (SR_{meas}) показывает достаточно хорошее соответствие между результатами с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.75$ и среднеквадратичным отклонением $RMSE = 0.69$ [гС м$^{-2}$ сут$^{-1}$] (рис. 3). При этом среднее отклонение между измерениями и модельными значениями составляет всего $MBE = 0.013$ [гС м$^{-2}$ сут$^{-1}$], что указывает на сопоставимость оценок, полученных разными методами на протяжении всего периода наблюдений.

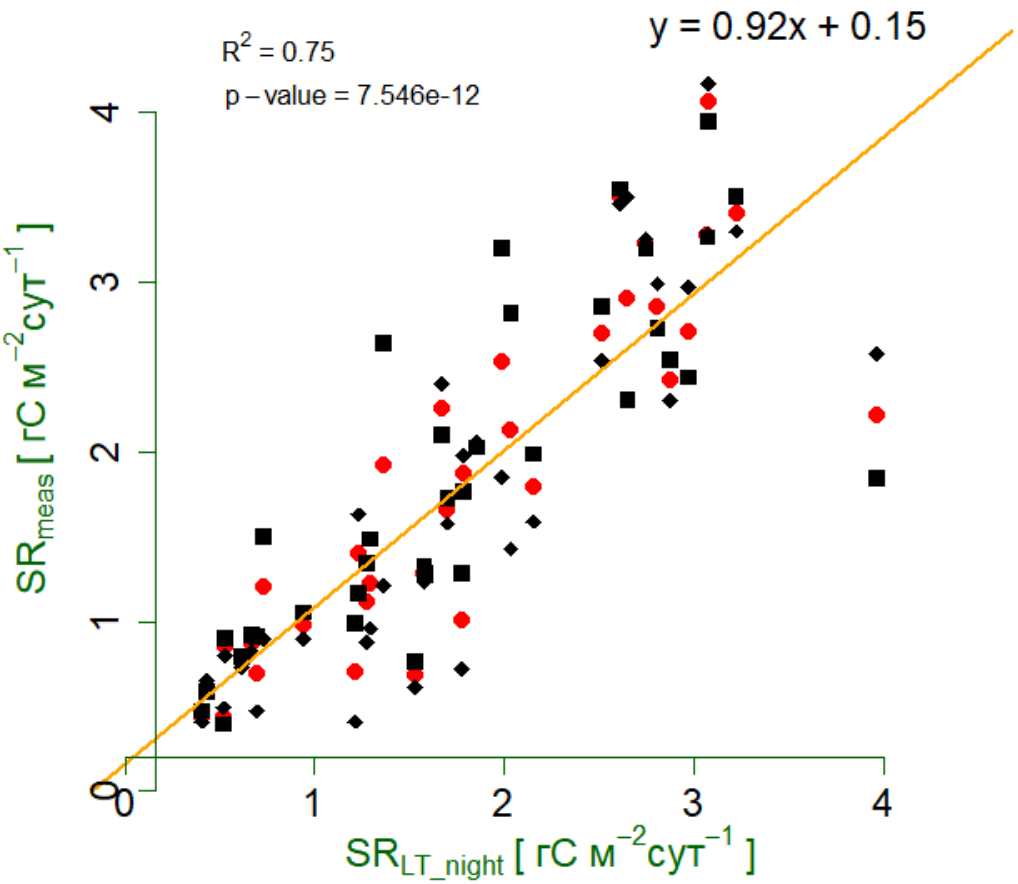

Рис. 3. Взаимосвязь между величинами среднесуточного дыхания почвы, полученными с использованием уравнения Ллойда-Тейлора (SR_{LT_night}) и данных пульсационных измерений, и значениями SR, определенными с применением камерного метода (SR_{meas}): робмы – луговая растительность, квадраты – лесные участки, красные круги – средние значения

Заключение

Сравнение величин среднесуточного дыхания почвы, полученных с использованием уравнения Ллойда-Тейлора ($SR_{LTnight}$) и данных пульсационных измерений, и значений SR, определенных с применением камерного метода, выявило их статистическое сходство и показало возможность хорошо дополнять друг друга. При этом полученные оценки среднесуточных значений SR_{meas} по измеренным $SR_{LTnight}$ оказались практически несмещенными ($MBE = 0.013$), что согласуется с выводами, полученными Reichstein et al (2005) [13] при использовании уравнения Ллойда-Тейлора для пульсационных измерений.

Наибольшие отклонения между измеренными (SR_{meas}) и смоделированными ($SR_{LTnight}$) данными наблюдаются во время вегетационного периода и могут быть связаны с пространственной вариабельностью потоков CO_2, измеренных пульсационным методом с различных направлений, обусловленных направлением ветрового потока. Также возможными причинами обнаруженных несоответствий может быть неоднородность растительности (соотношение лесных и луговых участков в футпринте) и возможное несовпадение между аппроксимацией по единичным измерениям дыхания почвы камерным методом и модельной оценкой среднесуточных значений дыхания почвы. Дальнейшая работа будет сфокусирована на выявлении причин указанных несоответствий.

Таким образом, проведенные исследования показали, что два исследуемых метода – пульсационный и камерный, дают согласующиеся между собой среднесуточные значения дыхания почвы для экосистемы березняка постагрогенного. При этом, камерный метод обеспечивает детальную информацию о потоках CO_2 на почвенном уровне, а пульсационный метод предоставляет интегральную оценку потоков CO_2 для всей экосистемы. Следовательно, интеграция данных, полученных с использованием камерного и пульсационного методов, является многообещающим подходом, поскольку позволяет преодолеть ограничения каждого из методов и получить более полную и надежную информацию об углеродном цикле в экосистемах.

Финансирование:

Сбор и предварительная подготовка данных были выполнены в рамках реализации ВИПГЗ "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания

системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах" (рег. № 123030300031-6), постобработка данных и дата анализ был выполнен в рамках государственного задания ФИЦ ПНЦБИ РАН (рег. № 122040500037-6).

Список использованных источников:

1. Романовская А.А. Баланс потоков парниковых газов на территории Российской Федерации. В монографии «Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации» (Под ред. член-корр. РАН Романовской А.А.) Москва ИГКЭ, ООО «Принт» 2023 г. 346 с.

2. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах // Албар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабань Р.Т., Карелин Д.В., Калюжный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Маруних А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А. (ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, Л.Гитарскоro, В.Г. Блинова) - Саратов: Амирит, 2017. - 279 с.

3. M.C. Myklebust, L.E. Hipps, R.J. Ryel, Comparison of eddy covariance, chamber, and gradient methods of measuring soil CO2 efflux in an annual semi-arid grass, Bromus tectorum. // Agricultural and Forest Meteorology 2008, 148(11): 1894-1907

4. Wofsy SC, Goulden ML, Munger JW et al. Net exchange of CO_2 in a midlatitude forest. // Science 1993, 260: 1314–1317.

5. Chapin FS III, Woodwell GM, Randerson JT et al. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. // Ecosystems 2006, 9: 1041–1050.

6. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications: a field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR // Biosciences 2013, Lincoln, Nebraska

7. Baldocchi, D.D. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—The state and future of the eddy covariance method. // Glob. Chang. Biol. 2014, 20: 3600–3609.

8. Кивалов С.Н. Особенности измерения потоков парниковых газов методом турбулентных пульсаций на морских и озерных участках. В монографии "Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии." (Под ред. С.К. Гулева и А.В. Ольчева) с.43-57 – Москва: Научный мир, 2025.

9. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолодчиков Д.Г. Кудеяров В. Н. Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв. В монографии «Методы исследования органического вещества почв» (Под ред. Еськова А.И., Черникова В.А., Лукина С.М. и Русаковой И.В.) с. 408 – 425 – М.: Россельхозакадемия – ГНУ

ВНИПТИОУ, 2005 г., 521 с.

10. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N. Annual emission of carbon dioxide from soils of the Southern Taiga soils of Russia // Eurasian Soil Science. 2001, 34: 931–944.

11. Jones HG Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology. // Cambridge University Press 1992, Cambridge

12. Nair, R., Strube, M., Schrumpf, M., Migliavacca, M. Day-night root dynamics change through the growing season, // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-6348.

13. Reichstein, M.; Falge, E.; Baldocchi, D.; Papale, D.; Aubient, M.; Berbiger, P.; Bernhofer, C.; Buchmann, N.; Gilmanov, T.; Garnier, A.; et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. // Glob. Chang. Biol. **2005**, 11: 1424–1439.

14. Lloyd J, Taylor JA (1994) On the temperature dependence of soil respiration. Functional Ecology, 8, 315–323.

15. Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Артамонов А.Ю., Баширова Л.Д., Белан Л.Н., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А., Загирова С.В., Замолодчиков Д.Г., Зырянов В.И., Иванов Д.Г., Карелин Д.В., Карсанаев С.В., Керимов И.А., Кивалов С.Н., Кожевникова М.В., Кошелев А.В., Кузенко А.Н., Кулачкова С.А., Курганова И.Н., Лапшина Е.Д., Максимов А.П., Максимов Т.Х., Мамадиев Н.А., Мамкин В.В., Маруних А.С., Махмудова Л.Ш., Мигловец М.Н., Михайлов О.А., Напреенко М.Г., Ольчев А.В., Панов А.В., Петров Р.Е., Прокушкин А.С., Прохоров В.Е., Репина И.А., Сиденко Н.В., Сидорова О.Р., Суховеева О.Э., Тубалов А.А., Шилкин А.В., Широких П.С. (2025) Каталог эколого-климатических станций России. Версия 05.2025. (Под редакцией Курбатовой Ю.А., Куричевой О.А.) Москва, 39 с.

16. Kurganova, I.N.; Lopes de Gerenyu V.O.; Khoroshaev, D.A.; Myakshina, T.N.; Sapronov, D.V.; Zhmurin, V.A.; Kudeyarov, V.N. Analysis of the Long-Term Soil Respiration Dynamics in the Forest and Meadow Cenoses of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in the Perspective of Current Climate Trends. // Eurasian Soil Sci. **2020**, 53: 1421–1436.

17. Hutyra L.R., Munger J.W., Saleska S.R., Gottlieb E., Daube B.C., Dunn A.L., Amaral D.F., de Camargo P.B., Wofsy S.C. Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. // J Geophys Res Biogeosci 2007, 112(G3): G03008.

18. Kivalov S., Dušek J., Czerný R., Jocher G., Pavelka M., Fitzjarrald D., Dařenová E., Šigut L., Kowalska N. Addressing effects of environment on eddy-covariance flux estimates at a temperate sedge-grass marsh. // Boundary-Layer Meteorology 2023, 186: 217–250.

19. Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. // Biogeosciences 2006, 3: 571–583.

20. Webb E.K., Pearman G.I., Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. // Quart J R Meteorol Soc 1980, 106: 85–100

21. Wutzler, T., Lucas-Moffat, A., Migliavacca, M., Knauer, J., Sickel, K., Šigut, L., Menzer, O., and Reichstein, M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc, // Biogeosciences 2018, 15: 5015–5030.

22. 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. // Contemp. Probl. Ecol. **2017**, 10: 748–760.

23. Курганова И.Н., Гончарова О.Ю., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Хорошаев Д.А. Определение эмиссии CO_2 из почвы камерным методом в различных типах экосистем (краткая инструкция). Пущино, 2023 (https://carbomonitoring.ru/wp-content/uploads/ Краткая-Инструкция-2023.pdf)

Цитирование: Касицкий В.А., Кивалов С.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В., Волкова Т.Ю., Курганова И.Н. Сравнение пульсационного и камерного методов измерения дыхания почвы: предварительные результаты [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/5/st_517.pdf
DOI: https://doi.org/10.51419/202155517.