

DOI:10/58168/FECC2025_61-67

УДК 630*114.442.1+631.433.53(470.324)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АВТОТРОФНОЙ И ГЕТЕРОТРОФНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭМИССИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ ПОЧВ В ВОРОНЕЖСКОЙ НАГОРНОЙ ДУБРАВЕ И УСМАНСКОМ БОРУ

Т.Л. Шешнищан, С.С. Шешнищан

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия, e-mail: tatianasheshnitsan@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного анализа эмиссии CO₂ из почв лиственного (Нагорная дубрава) и хвойного (Усманский бор) лесов Воронежской области. С использованием метода субстрат-индуцированного дыхания количественно оценены вклады автотрофного и гетеротрофного компонентов в общий поток углекислого газа. Установлено, что в дубраве преобладает корневое дыхание, а в сосняке – микробное. Различия обусловлены структурой фитомассы, влажностью и запасами углерода в почвах.

Ключевые слова. Почвенное дыхание, эмиссия CO₂, субстрат-индуцированное дыхание, микробное дыхание, корневое дыхание, углеродный баланс.

COMPARATIVE ANALYSIS OF AUTOTROPHIC AND HETEROTROPHIC COMPONENTS OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM SOILS IN THE VORONEZH UPLAND OAK FOREST AND USMANSKY PINE FOREST

T.L. Sheshnitsan, S.S. Sheshnitsan

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia, e-mail: tatianasheshnitsan@gmail.com

Abstract. The article presents the results of a comparative analysis of CO₂ emissions from the soils of deciduous (Upland Oak forest) and coniferous (Usman Pine forest) forests in the Voronezh region. Using the substrate-induced respiration method, the contributions of autotrophic and heterotrophic components to the total carbon dioxide flux were quantitatively assessed. It was found that root respiration predominates in oak forests, while microbial respiration predominates in pine forests. The differences are due to the structure of the phytomass, moisture content, and carbon reserves in the soils.

Keywords: Soil respiration, CO₂ emission, substrate-induced respiration, microbial respiration, root respiration, carbon balance.

Введение

Влияние глобального потепления на компоненты почвенного дыхания в наземных экосистемах является сложным и долгосрочным экологическим процессом [8]. Согласно шестому оценочному докладу МГЭИК, к концу XXI века прогнозируется повышение средней глобальной температуры поверхности Земли на 3,3-5,7 °C [5]. Потепление климата окажет непосредственное влияние на структуру и функционирование наземных экосистем, тем самым изменяя различные процессы углеродного цикла экосистемы, в том числе почвенное дыхание [6]. В пользу данной гипотезы говорят, многочисленные исследования, которые показали, что повышение температуры усиливает интенсивность почвенного дыхания [4].

Однако дыхание почвы является достаточно сложным и динамичным процессом, объединяющим два компонента: гетеротрофный (корневой) и автотрофный (микробный). При чем вклад автотрофного компонента оценивается от 10 до 90 % в зависимости от вида древесных растений, типа лесорастительных условий, а также метода разделения микробного и корневого дыхания [3]. Несмотря на то, что почвенное дыхание является основным потоком углерода из наземных экосистем в атмосферу, оценки его величины, а также пространственная и временная изменчивость остаются весьма неопределенными, что затрудняет сравнение между разными типами леса или стадиями развития древостоев [7].

Целью исследования являлась оценка вклада микроорганизмов и корней в общий эмиссионный поток CO₂ из почв под хвойными и лиственными фитоценозами воронежской нагорной дубравы и Усманского бора.

Дыхание почвы можно назвать индикатором экосистемного метаболизма и запасов углерода в экосистеме. Поскольку интенсивность дыхания, как и любой химической реакции, зависит от доступности субстрата, она тесно связана с растительным метаболизмом, фотосинтезом и наличием растительной подстилки.

Материалы и методы исследования

Интенсивность эмиссии углекислого газа из почв измеряли на участках лесных экосистем подекадно с третьей декады апреля по ноябрь 2024 года, в осенние месяцы – один – два раза в месяц, методом закрытых камер с использованием портативной системы измерения почвенного газообмена LI-870SC (CO₂/H₂O) на основе инфракрасного газоанализатора (LI-COR Biosciences Inc.)

Постоянная пробная площадь (ПП № 6-1) располагалась в квартале № 60 (выдел 11) Левобережного участкового лесничества на серогумусовых иллювиально-ожелезненных бескарбонатных почвах на аллювиальных песчано-супесчаных отложениях. Тип леса – сосняк травяной с дубом (С_{срт}), тип лесорастительных условий В₂ (свежая суборь) является одним из самых распространенных для Усманского бора. Возраст насаждения 110 лет. Постоянная пробная площадь (ПП № 3-1) расположена в квартале 47 (выдел 3) Правобережного участкового лесничества Пригородного лесничества Воронежской области на серогумусовых глееватых бескарбонатных маломощных супесчаных почвах. Тип леса – дубняк осоко-снытьевый (Досн), тип лесорастительных условий С₂D (судубрава свежая дубовая). Возраст насаждения 100 лет.

Размещение оснований в лесных насаждениях осуществлялось на каждой отдельной площадке наблюдений в пределах одной-двух основных биогеоценотических парцелл за неделю до начала первых мониторинговых измерений. Оценку вклада микробного и автотрофного дыхания в общий эмиссионный поток из почв проводили методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) однократно во второй половине августа, при этом использовали раствор глюкозы, а количество оснований для измерения эмиссии составляло по 6 штук для каждого варианта мониторинга (без варианта с заменой верхних 20 см почвы песком) [1, 2].

Обработку данных полевых измерений эмиссии CO_2 проводили в специализированном программном обеспечении SoilFluxPro v5.3.1 (LI-COR Biosciences Inc., 2024).

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты исследования за вегетационный период свидетельствуют о существенных различиях в эмиссии диоксида углерода в двух разных типах леса. Так, анализ динамики эмиссии углекислого газа показал, что серогумусовые глееватые почвы под листовым насаждением характеризуются более высоким уровнем эмиссии CO_2 от $1,97 \pm 0,05$ до $5,80 \pm 0,33$ мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Серогумусовые иллювиально-ожелезненные почвы под хвойным насаждением отличаются более низкой интенсивностью высвобождения углекислого газа в пределах от $0,93 \pm 0,03$ до $4,10 \pm 0,14$ мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Учитывая супесчаный гранулометрический состав верхнего серогумусового горизонта почв под исследуемыми типами леса, различия в эмиссии прежде всего обусловлены характером растительности и микроклиматическими условиями. Необходимо отметить, что эмиссия углекислого газа – это отражение величины запасов углерода в почвах лесной экосистемы. Так, содержание общего углерода в почве (0-30 см) нагорной дубравы (1,83%) в среднем два раза выше, чем в хвойном насаждении (0,95%), а его запасы выше в 3,4 раза (115 и 34 тС/га соответственно), что, несомненно, повлияло на скорость эмиссии в двух контрастных типах леса.

Среди факторов окружающей среды гидротермические условия признаны наиболее значимыми, контролирующими скорость обмена углекислого газа с поверхности почвы. Если по температурному режиму почвы двух насаждений существенно не отличаются, то влажность почв оказалась более динамичным показателем. Так, поверхностные минеральные горизонты почвы листового насаждения характеризуются признаками гидроморфизма, соответственно показатель влажности изменяется от $4,15 \pm 0,41\%$ до $46,0 \pm 1,97\%$. Таким образом, процесс оглеения говорит о достаточном переувлажнении почвенного покрова и медленному иссушению верхней части профиля почвы, влияя на продуктивность насаждения в нагорной дубраве и скорость разложения органического вещества. Напротив, в сосновом бору уровень влажности почвы в два раза ниже и составляет от $2,6 \pm 0,26$ до $21,9 \pm 0,93\%$. В данных условиях активность корней и микроорганизмов более низкая, чем в листовом насаждении, что способствует изменению интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы.

Нами была проведена оценка вкладов автотрофного (корневого) и гетеротрофного (микробного) дыхания почвы в общий эмиссионный поток CO_2 в двух разных типах лесных

экосистем методом СИД. На рисунке 1 показаны результаты измерения эмиссии CO_2 в полевом эксперименте.

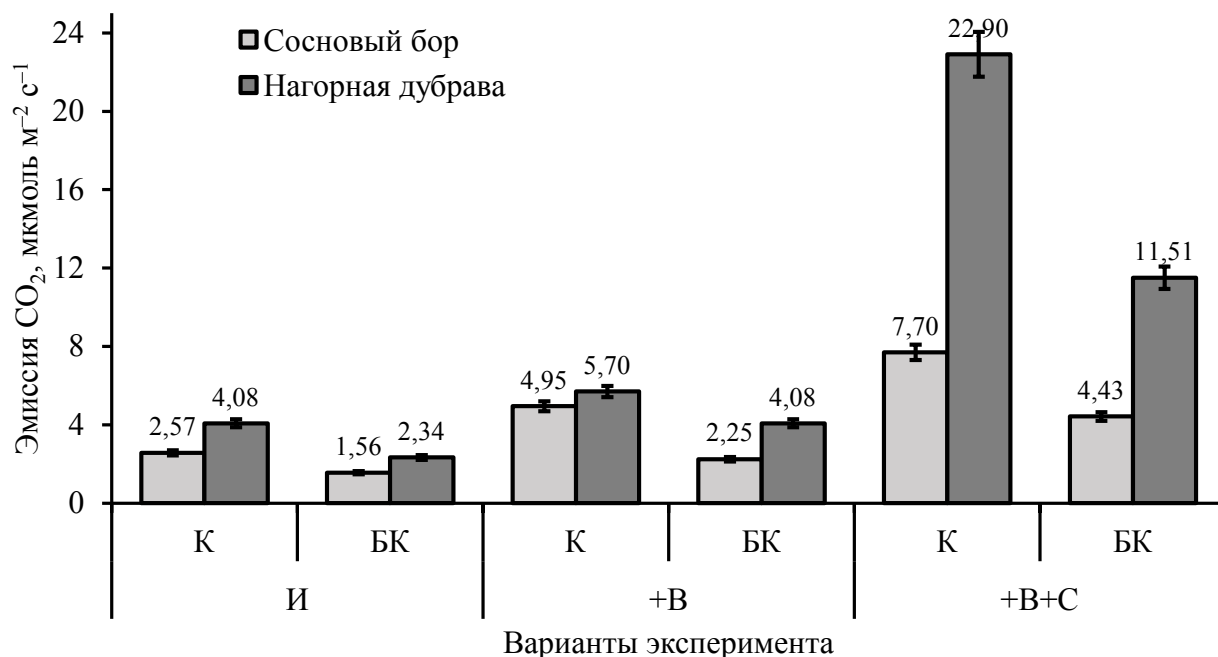


Рисунок 1 – Сравнение эмиссии диоксида углерода из лесных почв в разных вариантах эксперимента. Варианты эксперимента: К – с корнями, БК – без корней; И – исходная почва (контроль), +В – почва с добавлением дистиллированной воды, +В+С – почва с добавлением раствора глюкозы в дистиллированной воде.

Величины эмиссии CO_2 в вариантах с добавлением воды (+В) и особенно с добавлением раствора глюкозы (+В+С) существенно превышали значения, полученные в исходных (контрольных) измерениях эмиссии (рисунок). Так, в варианте с добавлением глюкозы (вариант +В+С) максимальные значения эмиссии наблюдались в нагорной дубраве и составили $22,9 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для оснований с корнями и $11,5 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для оснований без корней. Эти значения существенно выше таковых в контроле ($4,08$ и $2,34 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, соответственно).

В сосновом бору увеличение дыхания под действием глюкозы было менее выраженным: в основаниях с корнями эмиссия возросла с $2,57$ до $7,70 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в 3 раза), а в основания с удаленными корнями – с $1,56$ до $4,43 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, более высокая метаболическая активность микробного сообщества и больший пул активной биомассы в дубраве может быть одной из причин выявленных различий.

Различия в степени отклика на внесение доступного субстрата (глюкозы) могут быть обусловлены как абиотическими, так и биотическими факторами: первоначальной обеспеченностью почв органическим веществом, численностью и активностью микробных сообществ, различиями в составе ризосферных экссудатов, а также гидрофизическими свойствами субстрата (влажностью, аэрацией и др.).

Коэффициент микробного усиления, рассчитанный как отношение эмиссии CO_2 в вариантах с добавлением субстрата к эмиссии в контроле без добавок, достигал наибольших значений в нагорной дубраве, где составил 2,82. Это указывает на высокую чувствительность микробного сообщества почвы в дубраве к доступному углероду, связанной с мобилизацией микробной биомассы при поступлении легкоусвояемых субстратов.

Результаты, представленные на рисунке 2, позволяют оценить не только абсолютные значения эмиссии CO_2 с поверхности почвы, но и относительный вклад корневого и микробного дыхания в общей структуре потока углекислого газа.



Рисунок 2 – Относительный вклад (%) микробного и корневого дыхания в общий эмиссионный поток CO_2 из лесных почв

Вклад микробного дыхания в суммарную эмиссию CO_2 с поверхности почвы был ниже в нагорной дубраве (49,1%) по сравнению с сосновым бором (83,3%). Это, вероятно, обусловлено большей плотностью и дыхательной активностью корневых систем в дубраве, продуцирующей более половины общего потока CO_2 , что отражает хорошо развитую подземную фитомассу древостоя, подлеска и трав живого напочвенного покрова. В сосновом бору, напротив, меньшая плотность корней, относительно разреженный травяной покров и наличие мощной подстилки способствуют преобладанию микробного дыхания, реализуемого в основном сапротрофами, разлагающими органическое вещество подстилки.

Заключение

Результаты настоящего исследования подтвердили наличие существенных различий в интенсивности и структурной организации почвенного дыхания между хвойными и лиственными лесными экосистемами Воронежской области. Установлено, что в нагорной дубраве общая эмиссия CO_2 с поверхности почвы была выше, чем в сосновом бору, что связано с более высоким содержанием и запасами органического углерода, а также с более развитой корневой системой. Метод субстрат-индуцированного дыхания позволил количественно оценить вклад автотрофного и гетеротрофного компонентов эмиссионного потока и показать, что микробное дыхание преобладало в сосновом бору (83,3%), тогда как в дубраве вклад микробного и корневого компонента был практически равнозначным. Различия в коэффициентах микробного усиления, наиболее выраженные в дубраве, также указывают на

высокую чувствительность микробных сообществ к поступлению доступного углерода в почвах лиственных лесов. Полученные данные подчёркивают необходимость раздельного учёта компонентов почвенного дыхания при оценке углеродного баланса лесных экосистем.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)»

Список литературы

1. Евдокимов И. В., Ларионова А. А., Шмитт М. и др. Определение вклада дыхания корней растений в эмиссию CO₂ из почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. – 2010. – № 3. – С. 349–355.
2. Карелин Д. В., Замолодчиков Д. Г., Каганов В. В. и др. Микробная и корневая составляющие дыхания дерново-подзолистых почв южной тайги // Лесоведение. – 2017. – № 3. – С. 183–195.
3. Bonan G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. – 2008. – Vol. 320. – P. 1444–1449.
4. Bond-Lamberty B., Bailey V. L., Chen M., Gough C. M., Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades // Nature. – 2018. – Vol. 560. – P. 80–83.
5. IPCC. Summary for policymakers // In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. H. Lee, J. Romero. – Geneva : IPCC, 2023.
6. Lastra M., López J., Troncoso J. S., Sampedro L. Warming and wrack supply will accelerate CO₂ emission and nutrients release on Antarctic sedimentary shores: a case study on a volcanic island // Ecosystems. – 2020. – Vol. 24. – P. 855–874.
7. Niinistö S. Soil CO₂ efflux in boreal pine forests in the current climate and under CO₂ enrichment and air warming. – Dissertationes Forestales, 194. – 2015. – 69 p. – URL: <http://dx.doi.org/10.14214/df.194> (дата обращения: 10.03.2025).
8. Yu H. Y., Liu X. D., Ma Q. H., Yin Z. T., Wang Y. H., Xu Z. Z., Zhou G. S. Climatic warming enhances soil respiration resilience in an arid ecosystem // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 756. – Article 144005.

References

1. Evdokimov, I. V., Larionova, A. A., Schmitt, M. et al. Determining the contribution of root respiration to CO₂ emission from soil using the substrate-induced respiration method // Pochvovedenie (Soil Science). – 2010. – No. 3. – P. 349–355.
2. Karelin, D. V., Zamolodchikov, D. G., Kaganov, V. V. et al. Microbial and root components of respiration in sod-podzolic soils of the southern taiga // Lesovedenie (Forest Science). – 2017. – No. 3. – P. 183–195.
3. Bonan, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. – 2008. – Vol. 320. – P. 1444–1449.

4. Bond-Lamberty, B., Bailey, V. L., Chen, M., Gough, C. M., Vargas, R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades // *Nature*. – 2018. – Vol. 560. – P. 80–83.
5. IPCC. Summary for policymakers // In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. H. Lee, J. Romero. – Geneva: IPCC, 2023.
6. Lastra, M., López, J., Troncoso, J. S., Sampedro, L. Warming and wrack supply will accelerate CO₂ emission and nutrients release on Antarctic sedimentary shores: a case study on a volcanic island // *Ecosystems*. – 2020. – Vol. 24. – P. 855–874.
7. Niinistö, S. Soil CO₂ efflux in boreal pine forests in the current climate and under CO₂ enrichment and air warming. – *Dissertationes Forestales*, 194. – 2015. – 69 p. – URL: <http://dx.doi.org/10.14214/df.194> (accessed: 10.03.2025).
8. Yu, H. Y., Liu, X. D., Ma, Q. H., Yin, Z. T., Wang, Y. H., Xu, Z. Z., Zhou, G. S. Climatic warming enhances soil respiration resilience in an arid ecosystem // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 756. – Article 144005.