

УДК 631.46:574.4:630*43
DOI: 10.7868/S25000640260107

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНОВОГО ЦИКЛА КСЕРОФИТНЫХ ЛЕСОВ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА ПОСЛЕ ПОЖАРА

© 2026 г. В.В. Вилкова¹, К.Ш. Казеев¹, М.С. Нижельский¹, С.И. Колесников¹

Аннотация. Ежегодно в результате лесных пожаров на планете в атмосферу выбрасывается большое количество CO₂. После верхового пожара 2020 г., который охватил более 125 га территории государственного природного заповедника «Утриш», в атмосферу было выделено более 10,4 × 10⁹ г CO₂. Ежегодная послепожарная эмиссия углекислого газа постпирогенной сукцессии составляет 76,3 × 10⁶ г CO₂. Были изучены почвы постпирогенных участков заповедника со слабой, средней и сильной степенью повреждения огнем. Исследованы некоторые параметры карбонового цикла (эмиссия углекислого газа из почв, выполненная при помощи газоанализатора), оценено содержание органического углерода и активность фермента углеродного цикла (β-фруктофуранозидазы) постпирогенных почв. Установлено повышение эмиссии углекислого газа почвами с сильной, средней и слабой степенью повреждения в 2,3, 2,8 и 1,6 раза соответственно в сравнении с контрольными значениями. Содержание органического углерода достоверно снижено на 34 % в почвах участка со слабым повреждением. При изучении активности β-фруктофуранозидазы отмечено ее снижение в среднем на 69 % в почвах участков со средней и сильной степенью повреждения огнем по сравнению с контрольными значениями, для почв участков со слабым повреждением установлено повышение активности на 24 %. Для оценки изменений содержания органического углерода в почвах ксерофитных лесов после пожаров необходим мониторинг.

Ключевые слова: углерод, эмиссия углекислого газа, пирогенный фактор, биоиндикация, дыхание почв, β-фруктофуранозидаза.

CHANGES IN THE CARBON CYCLE PARAMETERS OF XEROPHYTIC FORESTS OF THE BLACK SEA COAST OF THE CAUCASUS AFTER THE FIRE

V.V. Vilkova¹, K.Sh. Kazeev¹, M.S. Nizhelskiy¹, S.I. Kolesnikov¹

Abstract. Large amounts of CO₂ are released into the atmosphere as a result of forest fires on all continents every year. For example, a major fire in 2020, which covered more than 125 hectares, released over 10.4 × 10⁹ grams of CO₂ into the atmosphere within the Utrish State Nature Reserve. It was also found that the annual post-fire carbon dioxide emission from post-pyrogenic succession is 76.3 × 10⁶ grams of CO₂. In this study, soils from post-pyrogenic areas of the reserve with mild, moderate, and severe fire damage were examined. Parameters of the carbon cycle were studied, including CO₂ emissions from soils measured using an EGM-5 gas analyzer (PP Systems, USA), the organic carbon content, and the activity of the carbon cycle enzyme β-fructofuranosidase in the post-pyrogenic soils. An increase in soil CO₂ emissions was observed: by 2.3, 2.8, and 1.6 times for soils with severe, moderate, and mild damage, respectively, compared to control values. The organic carbon content significantly decreased in soils with mild damage by 34%. When studying the activity of β-fructofuranosidase, an average decrease of 69% was noted in soils with moderate and severe fire damage compared to control values. Conversely, a 24% increase in enzyme activity was observed in soils from areas with mild damage. Monitoring key parameters of the carbon cycle is essential for assessing long-term changes in the organic carbon balance in xerophytic forests after fires.

Keywords: carbon, carbon dioxide emission, pyrogenic factor, bioindication, soil respiration, β-fructofuranosidase.

¹ Академия биологии и медицины им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета (D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Medicine of Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, e-mail: lera.vilkova.00@mail.ru, kamil_kazeev@mail.ru, nizhelskiy@sfedu.ru, kolesnikov@sfedu.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmi S. 2016. Greenhouse gas emissions from soils – a review. *Geochemistry*. 76(3): 327–352. doi: 10.1016/j.chemer.2016.04.002
2. Mansoor S., Farooq I., Kachroo M.M., Mahmoud A.E.D., Fawzy M., Popescu S.M., Alyemeni M.N., Sonne C., Rinklebe J., Ahmad P. 2022. Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental management*. 301: 113769. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113769
3. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. 2013. Запасы органического углерода в почвах России. *Почвоведение*. 2: 123–132. doi: 10.7868/S0032180X13020123
4. Walker X.J., Baltzer J.L., Cumming S.G., Day N.J., Ebert C., Goetz S., Johnstone J.F., Potter S., Rogers B.M., Schuur E.A.G., Turetsky M.R., Mack M.C. 2019. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature*. 572(7770): 520–523. doi: 10.1038/s41586-019-1474-y
5. Ma W., Li G., Wu J., Xu G., Wu J. 2020. Response of soil labile organic carbon fractions and carbon-cycle enzyme activities to vegetation degradation in a wet meadow on the Qinghai–Tibet Plateau. *Geoderma*. 377: 114565. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114565
6. Harrison-Kirk T., Beare M.H., Meenken E.D., Condron L.M. 2013. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions. *Soil Biology and Biochemistry*. 57: 43–55. doi:10.1016/j.soilbio.2012.10.008
7. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. 2013. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*. 58: 216–234. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.11.009
8. Raiesi F., Salek-Gilani S. 2018. The potential activity of soil extracellular enzymes as an indicator for ecological restoration of rangeland soils after agricultural abandonment. *Applied Soil Ecology*. 126: 140–147. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.02.022
9. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. 2016. *Методы биодиагностики наземных экосистем*. Ростов н/Д, изд-во Южного федерального университета: 356 с.

10. Казеев К.Ш., Черникова М.П., Колесников С.И., Быхалова О.Н. 2015. *Почвенный покров заповедника «Утриш»*. Ростов н/Д, изд-во Южного федерального университета: 104 с.
11. *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015*. 2015. Rome, FAO: 192 p.
12. Петрушина М.Н., Сулова Е.Г. 2022. Постпирогенная динамика субсредиземноморских ландшафтов полуострова Абрау. В кн.: *Природа и общество: интеграционные процессы: материалы международной научно-практической конференции «Пятые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г.Е. Гришанкову», Севастополь, 12–16 сентября 2022 г.* Симферополь, Ариал: 233–238.
13. Parson A., Robichaud P.R., Lewis S.A., Napper C., Clark J.T. 2010. *Field guide for mapping post-fire soil burn severity. General Technical Report RMRS-GTR-243*. Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 49 p. doi: 10.2737/RMRS-GTR-243
14. Vilkova V.V., Kazeev K.S., Shkhatpatsev A.K., Kolesnikov S.I. 2022. Reaction of the enzymatic activity of soils of xerophytic forests on the Black Sea coast in the Caucasus to the pyrogenic impact. *Arid Ecosystems*. 12(1): 93–98. doi: 10.1134/s2079096122010139
15. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 N 20-р (ред. от 20.01.2021) «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов». *Законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации*. URL: <https://legalacts.ru/doc/gasporjzhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r-obutverzhenii/?ysclid=m6gfmn8vhw787663228> (дата обращения: 25.11.2023).
16. Приказ Минприроды РФ от 27.05.2022 N 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 29.07.2022 N 69451). *Министерство юстиции Российской Федерации*. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/31947?ysclid=ml51sl0sob672000794> (дата обращения: 25.11.2023).
17. Барталев С.А., Стыщенко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. 2015. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров. *Лесоведение*. 2: 83–94.
18. Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 N 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». *Консультант-Плюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162/ (дата обращения: 25.11.2023).
19. Grau-Andrés R., Gray A., Davies G.M., Scott E.M., Waldron S. 2019. Burning increases post-fire carbon emissions in a heathland and a raised bog, but experimental manipulation of fire severity has no effect. *Journal of Environmental Management*. 233: 321–328. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.036
20. Pellegrini A.F.A., Ahlström A., Hobbie S.E., Reich P.B., Nieradzik L.P., Staver A.C., Scharenbroch B.C., Jumpponen A., Anderegg W.R.L., Randerson J.T., Jackson R.B. 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*. 553(7687): 194–198. doi: 10.1038/nature24668
21. Маслов М.Н., Маслова О.А., Копейна Е.И. 2020. Динамика общего и лабильного пулов органического углерода почв при постпирогенной сукцессии экосистем горной тундры Хибин. *Почвоведение*. 3: 330–339. doi: 10.31857/S0032180X20030041
22. Вилкова В.В., Казеев К.Ш., Привизенцева Д.А., Нижельский М.С., Колесников С.И. 2023. Изменение активности ферментов постпирогенных почв заповедника «Утриш» (Россия) на ранних стадиях сукцессии. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. 8(3): 10–23. doi: 10.24189/ncr.2023.019
23. Шахматова Е.Ю. 2015. Пирогенность – ответная реакция почв сухих сосновых лесов на воздействие пожаров. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 5(2): 260–264.
24. Quintero-Gradilla S.D., García-Oliva F., Cuevas-Guzmán R., Jardel-Peláez E.J., Martínez-Yrizar A. 2015. Soil carbon and nutrient recovery after high-severity wildfire in Mexico. *Fire Ecology*. 11: 45–61. doi: 10.4996/fireecology.1103045
25. Kashian D.M., Romme W.H., Tinker D.B., Turner M.G., Ryan M.G. 2013. Postfire changes in forest carbon storage over a 300-year chronosequence of *Pinus contorta*-dominated forests. *Ecological Monographs*. 83(1): 49–66. doi: 10.1890/11-1454.1

REFERENCES

1. Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmí S. 2016. Greenhouse gas emissions from soils – a review. *Geochemistry*. 76(3): 327–352. doi: 10.1016/j.chemer.2016.04.002
2. Mansoor S., Farooq I., Kachroo M.M., Mahmoud A.E.D., Fawzy M., Popescu S.M., Alyemeni M.N., Sonne C., Rinklebe J., Ahmad P. 2022. Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*. 301: 113769. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113769
3. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. 2013. The pool of organic carbon in the soils of Russia. *Eurasian Soil Science*. 46(2): 107–116. doi: 10.1134/S1064229313020129
4. Walker X.J., Baltzer J.L., Cumming S.G., Day N.J., Ebert C., Goetz S., Johnstone J.F., Potter S., Rogers B.M., Schuur E.A.G., Turetsky M.R., Mack M.C. 2019. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature*. 572(7770): 520–523. doi: 10.1038/s41586-019-1474-y
5. Ma W., Li G., Wu J., Xu G., Wu J. 2020. Response of soil labile organic carbon fractions and carbon-cycle enzyme activities to vegetation degradation in a wet meadow on the Qinghai–Tibet Plateau. *Geoderma*. 377: 114565. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114565
6. Harrison-Kirk T., Beare M.H., Meenken E.D., Condron L.M. 2013. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions. *Soil Biology and Biochemistry*. 57: 43–55. doi:10.1016/j.soilbio.2012.10.008
7. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. 2013. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*. 58: 216–234. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.11.009

8. Raiesi F., Salek-Gilani S. 2018. The potential activity of soil extracellular enzymes as an indicator for ecological restoration of rangeland soils after agricultural abandonment. *Applied Soil Ecology*. 126: 140–147. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.02.022
9. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. 2016. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem*. [Methods of biodiagnosis of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 356 p. (In Russian).
10. Kazeev K.Sh., Chernikova M.P., Kolesnikov S.I., Bykhalova O.N. 2015. *Pochvennyy pokrov zapovednika "Utrish"*. [Soil cover of the Utrish Reserve]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 104 p. (In Russian).
11. *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015*. 2015. Rome, FAO: 192 p.
12. Petrushina M., Suslova E. 2022. [Pyrogenic dynamics of sub-mediterranean landscapes of the Abrau Peninsula]. In: *Priroda i obshchestvo: integratsionnye protsessy: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Pyatye landshaftno-ekologicheskie chteniya, posvyashchennye G.E. Grishankovu"*. [Nature and society: integration processes: Materials of the international scientific and practical conference "The fifth landscape-ecological readings dedicated to G.E. Grishankov" (Simferopol, Russia, 12–16 September 2022)]. Simferopol, Arial: 233–238. (In Russian).
13. Parson A., Robichaud P.R., Lewis S.A., Napper C., Clark J.T. 2010. *Field guide for mapping post-fire soil burn severity. General Technical Report RMRS-GTR-243*. Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 49 p. doi: 10.2737/RMRS-GTR-243
14. Vilkova V.V., Kazeev K.S., Shkhatpatsev A.K., Kolesnikov S.I. 2022. Reaction of the enzymatic activity of soils of xerophytic forests on the Black Sea coast in the Caucasus to the pyrogenic impact. *Arid Ecosystems*. 12(1): 93–98. doi: 10.1134/s2079096122010139
15. [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 30 June 2017 N 20-p (as amended on 20 January 2021) "On approval of methodological guidelines for the quantitative determination of the volume of greenhouse gas absorption"]. *Zakony, kodeksy i normativno-pravovye akty Rossiyskoy Federatsii*. Available at: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r-ob-utverzhdenii/?ysclid=m6gfmn8vhw787663228> (accessed 25 November 2023). (In Russian).
16. [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 27 May 2022 N 371 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas absorption" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 29 July 2022 N 69451)]. *Ministerstvo yustitsii Rossiyskoy Federatsii*. Available at: <https://minjust.consultant.ru/documents/31947?ysclid=ml51sl0sob672000794> (accessed 25 November 2023). (In Russian).
17. Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. 2015. [Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality]. *Lesovedenie*. 2: 83–94. (In Russian).
18. [Order of the Government of the Russian Federation of 11 February 2021 N 312-r "On approval of the Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030"]. *Konsul'tantPlyus*. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162/ (accessed 25 November 2023). (In Russian).
19. Grau-Andrés R., Gray A., Davies G.M., Scott E.M., Waldron S. 2019. Burning increases post-fire carbon emissions in a heathland and a raised bog, but experimental manipulation of fire severity has no effect. *Journal of Environmental Management*. 233: 321–328. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.036
20. Pellegrini A.F.A., Ahlström A., Hobbie S.E., Reich P.B., Nieradzik L.P., Staver A.C., Scharenbroch B.C., Jumpponen A., Anderegg W.R.L., Randerson J.T., Jackson R.B. 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*. 553(7687): 194–198. doi: 10.1038/nature24668
21. Maslov M.N., Maslova O.A., Kopeina E.I. 2020. Changes in the pools of total and labile soil organic carbon during post-fire succession in the Khibiny mountain tundra ecosystems. *Eurasian Soil Science*. 53(3): 330–338. doi: 10.1134/s1064229320030047
22. Vilkova V.V., Kazeev K.Sh., Privizentseva D.A., Nizhelsky M.S., Kolesnikov S.I. [Activity in post-pyrogenic soils in the Utrish State Nature Reserve (Russia) in the early succession stages]. *Nature Conservation Research*. 8(3): 10–23. (In Russian). doi: 10.24189/ncr.2023.019
23. Shakhmatova E.Y. 2015. [Pyrogenicity – response of pine forests soils on pyrogenic factor impact]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 5(2): 260–264. (In Russian).
24. Quintero-Gradilla S.D., García-Oliva F., Cuevas-Guzmán R., Jardel-Peláez E.J., Martínez-Yrizar A. 2015. Soil carbon and nutrient recovery after high-severity wildfire in Mexico. *Fire Ecology*. 11: 45–61. doi: 10.4996/fireecology.1103045
25. Kashian D.M., Romme W.H., Tinker D.B., Turner M.G., Ryan M.G. 2013. Postfire changes in forest carbon storage over a 300-year chronosequence of *Pinus contorta*-dominated forests. *Ecological Monographs*. 83(1): 49–66. doi: 10.1890/11-1454.1

Поступила 06.11.2025

Принята 25.11.2025