

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ И ЗАСЛОНОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ*

Т. А. Белькова¹, В. А. Перминов²

Аннотация: Представлено численное исследование эффективности противопожарных разрывов и заслонов для предотвращения распространения верховых лесных пожаров при помощи математического моделирования. Рассматриваются разрывы и заслоны из лиственных пород деревьев, а также их комбинация. В ходе расчетов изменялись скорость ветра, запас и влагосодержание лесных горючих материалов (ЛГМ). Результаты показали, что заслоны из лиственных деревьев более эффективны в условиях высокого влагосодержания заслона и низкой скорости ветра. Определены оптимальные размеры разрывов и заслонов на основе численного моделирования. Установлено, что для предотвращения распространения пожара рекомендовано использовать разрывы, а также их комбинацию с заслонами, в последнем случае площадь неиспользованных земель уменьшается на 30%.

Ключевые слова: лесной пожар; верховой пожар; противопожарный разрыв; противопожарный заслон; математическое моделирование; численное решение

DOI: 10.30826/CE26190104

EDN: UJMOOM

Литература

1. Lee B. S., Alexander M. E., Hawkes B. C. Assessing the effectiveness of operational fuel treatments against wildfires in Canada // *Can. J. Forest Res.*, 2006. Vol. 36. No. 11. P. 2961–2970.
2. Ascoli D., Russo L., Giannino F., Siettos C., Moreira F. Firebreak and fuelbreak // *Encyclopedia of wildfire and wildland–urban interface (WUI) fires.* — Cham: Springer, 2020. P. 444–452.
3. Finney M. A. Design of regular landscape fuel treatment patterns for modifying fire growth and behavior // *Forest Sci.*, 2001. Vol. 47. No. 2. P. 219–228.
4. Catchpole W. R., Bradstock R. A., Choate J., Fogarty L. G., Gellie N. J. H., McCarthy G. J., Wright L. J. Cooperative development of equations for heathland fire behavior // *3rd Conference (International) on Forest Fire Research Proceedings*, 1998. P. 631–645.
5. Sturtevant B. R., Cleland D. T., Crow T. R., Lietz S. M. The role of wildfire in the Great Lakes mixed deciduous-conifer forest: Modeling restoration strategies in a multi-owner landscape // *Restor. Ecol.*, 2004. Vol. 12. No. 1. P. 52–63.
6. Alexander M. E., Cruz M. G. Are the applications of crown fire behavior modeling systems getting ahead of their evaluation again? // *Environ. Modell. Softw.*, 2013. Vol. 41. P. 65–71.
7. Kobziar L. N., Godwin D. R., Taylor L., Watts A. C. Perspectives on trends, effectiveness, and impediments to prescribed burning in the southern US // *Forests*, 2015. Vol. 6. No. 3. P. 561–580.
8. Pimont F., Dupuy J. L., Linn R. R., Dupont S. Impact of fuel moisture content and wind speed on fire behavior in a shrubland ecosystem: A physics-based modeling approach // *Int. J. Wildland Fire*, 2019. Vol. 28. No. 6. P. 494–510.
9. Chuvieco E., Aguado I., Yebra M. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies // *Ecol. Model.*, 2014. Vol. 221. No. 1. P. 46–58.
10. Khan N., Moinuddin K. The role of heat flux in an idealised firebreak built in surface and crown fires // *Atmosphere — Basel*, 2021. Vol. 12. P. 1395.
11. Brou A. D. V., Soro T. D., Yanga K. K. S. Critical threshold for crossing a firebreak: Mathematical model and fire experiments // *CR Mécanique*, 2025. Vol. 353. P. 673–686.
12. Yemshanov D., Liu N., Neilson E. W., Koch F. H., Parisien M.-A. Evaluating fuelbreak strategies for compartmentalizing a fire-prone forest landscape in Alberta, Canada // *PLoS ONE*, 2025. Vol. 20. No. 5. P. e0321722.
13. Van Aardt A. C., de Jager J. C. L., van Tol J. J. Firebreaks and their effect on vegetation composition and diversity in Grasslands of Golden Gate Highlands National Park, South Africa // *Diversity*, 2024. Vol. 16. P. 373.
14. Hoffman C. M., Canfield J. M., Linn R. R., Sieg C. H., Falk D. A. Simulating fire behavior and restoration treatments using a coupled fire–atmosphere model // *Fire Ecol.*, 2018. Vol. 14. No. 1. P. 1–19.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 24-21-00069).

¹Томский политехнический университет, belkova.ta@tpu.ru

²Томский политехнический университет, perminov@tpu.ru

15. *Perminov V. A.* Numerical solution of the crown forest fires spread taking into account fire barriers and breaks // Recent developments in the field of non-destructive testing, safety and materials science / Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Stary. — Studies in systems, decision and control ser. — Springer, 2023. Vol. 433. P. 155–164.
16. *Gannon B. M., Wei Y., Belval E. J., et al.* A quantitative analysis of fuel break effectiveness drivers in Southern California national forests // *Fire*, 2023. Vol. 6. No. 3. P. 104.
17. *Ortega M., Rodriguez y Silva F., Molina J. R.* Modeling fuel break effectiveness in southern Spain wildfires // *Fire Ecol.*, 2024. Vol. 20. P. 40.
18. *Hayajneh S. M., Naser J.* Wind and slope influence on wildland fire spread: A numerical study // *Fire*, 2025. Vol. 8. No. 6. P. 217.
19. *Park J., Moon M., Green T., et al.* Impact of tree species composition on fire resistance in temperate forest stands // *Forest Ecol. Manag.*, 2024. Vol. 572. P. 122279.
20. *Harris M. P., Coop J. D., Balik J. A., et al.* Aspen impedes wildfire spread in southwestern United States landscapes // *Ecol. Appl.*, 2025. Vol. 35. No. 5. P. e70061.
21. *Kwon K., Kim S., Lee S., et al.* Analysis of crown fire transition and spread over various pine trees using wildland–urban interface fire dynamic simulator // *J. Korean Social Hazard Mitigation*, 2021. Vol. 21. No. 4. P. 31–38.
22. *Zhuang H., Liu N., Xie X., et al.* Simulating wildfire spread based on continuous time series remote sensing images and cellular automata // *Int. J. Wildland Fire*, 2025. Vol. 34. No. 1. P. 1–14.
23. *Atchley A. L., Hoffman C. M., Bonner S. R., et al.* Evaluating crown scorch predictions from a computational fluid dynamics wildland fire simulator // *Fire Ecol.*, 2024. Vol. 20. P. 71.
24. *Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г.* Математическая теория верховых лесных пожаров // *Теплофизика лесных пожаров*. — Новосибирск: Изд-во ИТФ СО РАН, 1985. С. 38–75.
25. *Гришин А. М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
26. *Перминов В.* Математическое моделирование лесных пожаров. Возникновение верховых и массовых лесных пожаров. — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 288 с.
27. *Patankar S. V.* Numerical heat transfer and fluid flow. — New York, NY, USA: Hemisphere Publishing Corp., 1980. 197 p.
28. *Guo H., Wang Z., Wang Y., et al.* Experimental analysis on the behaviors of a laboratory surface fire spreading across a firebreak // *Forests*, 2023. Vol. 14. No. 6. P. 1176.
29. *Morvan D.* Numerical study of the behaviour of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer // *Fire Safety J.*, 2015. Vol. 71. P. 34–48.
30. *Awad C., Lamorlette A., Younsi Z.* Effects of fuel moisture content and wind speed on fire spread using a multiphase formulation // *Int. J. Wildland Fire*, 2020. Vol. 29. No. 9. P. 774–788.
31. *Wilson A. A. G.* Width of firebreak that is necessary to stop grass fires: Some field experiments // *Int. J. Wildland Fire*, 1988. Vol. 1. No. 1. P. 35–50.
32. *Bajjnath-Rodino J. A., Collins B. M., Tubbesing C. L., et al.* Quantifying the effectiveness of shaded fuel breaks in the Sierra Nevada, California, USA // *Forest Ecol. Manag.*, 2023. Vol. 532. P. 120748.
33. СНиП 2.05.13–90. Нефтепродуктопроводы, прокладываемые на территории городов и других населенных пунктов. — М.: Госстрой СССР, 1990. 19 с.

Поступила в редакцию 23.06.2025

После доработки 03.10.2025

Принята к публикации 13.10.2025