

Оценка гибели бореальных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных об интенсивности горения

Д. В. Лозин, Е. А. Лупян, И. В. Балашов, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

Бореальными лесами обычно называют леса, расположенные на территории севернее 50-й широты. В настоящей работе представлены результаты оценки повреждений бореальных лесов пожарами в первой четверти XXI в. (в период с 2002 по 2025 г.). Оценки были получены на основе анализа интенсивности горения пожаров, определяемой приборами MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), работавшими в этот период на спутниках Terra и Aqua. Для этого использовался разработанный в Институте космических исследований РАН метод, который ранее уже применялся для оценки гибели северных лесов (лесов, расположенных севернее 60-й широты) от природных пожаров. В работе показано, что в бореальной зоне за период с 2002 по 2025 г. по данным прибора MODIS было пройдено 345 млн га территорий, покрытых лесом. При этом на 45 млн га наблюдалась гибель лесного покрова. Под погибшими лесами понимаются участки леса, на которых отмечаются повреждения, соответствующие 5-й средневзвешенной категории состояния. Также в результате анализа временной динамики площадей и повреждений лесов пожарами выявлены значимые положительные тренды площади погибших лесов и летальности пожаров (отношение площади погибших лесов к общей площади, пройденной лесными пожарами).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесные пожары, бореальные леса, мониторинг лесных пожаров, FRP, степень повреждения лесов, индекс сезонной летальности лесных пожаров

Одобрена к печати: 25.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-438-447

Введение

Бореальными лесами обычно называют леса, расположенные на территории севернее 50-й широты (см. (Стандарт..., 1998; Hayes et al., 2022)). Следует отметить, что по данным спутниковым наблюдений, в частности карт растительных экосистем, полученных по данным наблюдений приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Friedl, Sulla-Menashe, 2019), в этой зоне расположено более 1,2 млрд га лесов. Из которых 30 % лесов находится на территории Северной Америки, 10 % — на территории Европы и 59 % расположено на территории России. Объективный контроль состояния и повреждения лесов — важная научная и прикладная задача.

Одним из наиболее значимых факторов повреждений бореальных лесов считаются природные пожары. Следует отметить, что получение однородной, оперативной информации по территории, на которой расположены бореальные леса, практически невозможно без использования дистанционных методов и технологий, поскольку значительная часть данных территорий представляется труднодоступной и малопосещаемой. Поэтому в последние десятилетия активно развивались и внедрялись различные методы и технологии, позволившие получать оценки повреждений лесов пожарами на больших территориях на основе данных дистанционных, в первую очередь спутниковых наблюдений (Барталев и др., 2015; Стыщенко и др., 2013; Heward et al., 2013; Morgan et al., 2001; Ryan, 2002). Это позволило организовать постоянный мониторинг состояния лесов на больших территориях, в том числе в бореальной зоне.

В настоящей работе представлены результаты оценки повреждений бореальных лесов пожарами в первой четверти двадцать первого века (в период с 2002 по 2025 г.). Оценки были получены на основе анализа интенсивности горения пожаров, определяемой приборами MODIS, работавшими в этот период на спутниках Terra и Aqua (Giglio et al., 2016).

Для этого использовался метод, разработанный в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), подробно описанный в работах (Лупян и др., 2022, 2024). Отметим, что данный метод уже применялся для оценки гибели северных лесов (лесов, расположенных севернее 60-й широты) от природных пожаров (Лозин и др., 2023).

Метод и данные

Исходной информацией для проведения анализа стали наблюдения «горячих точек», детектированных на основе данных приборов MODIS (*англ.* Collection 6 MODIS Active Fire/Hotspot Data (MCD14DL)) (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-realtime/firms/c6-mcd14dl>) за период с 2001 по 2025 г. во всей бореальной зоне. Для каждой такой горячей точки имеется информация о радиационной мощности пожара FRP (*англ.* Fire Radiative Power) (Giglio et al., 2016; Wooster et al., 2003), дате и времени её детектирования. На основе данной информации в ИКИ РАН автоматически формируется специализированная база данных, содержащая информацию как об отдельных горячих точках, так и о пожарах (объединениях горячих точек) и типах территорий, на которых они действовали. Достаточно подробно особенности и технология формирования базы данных описаны, в частности, в работах (Галеев и др., 2005; Лупян и др., 2015, 2017).

Получаемая из базы данных информация об интенсивности горения конкретных пожаров (FRP) на основе подходов, предложенных в исследованиях (Лозин и др., 2023; Лупян и др., 2022), сопоставлялась с информацией о степени повреждения лесного покрова, полученной в результате сравнения его состояния до и после пожаров (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013; Уваров и др., 2010) на территории бореальных лесов России за период с 2006 по 2024 г. Было проведено сопоставление более 15 млн пар наблюдений, вследствие которого получены зависимости вероятности гибели основных типов лесов от FRP, нормированной на площадь элемента наблюдения (FRPS), с учётом сезона действия пожара (*рис. 1*). Информация о типе лесного покрова определялась согласно ежегодно обновляемому ряду карт MODIS Land Cover Type Product (далее MLCTP) (Friedl, Sulla-Menashe, 2019). Хотя данные зависимости были получены на основе данных по территории бореальных лесов России, в первом приближении можно считать, что они характерны для всех лесов бореальной зоны. Поэтому в настоящей работе они использовались при проведении оценок повреждений лесов пожарами на территории всей данной зоны.

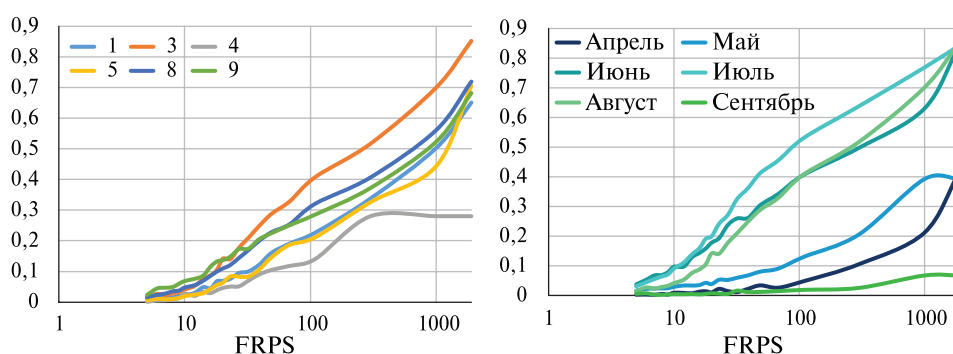


Рис. 1. Вероятность гибели леса в зависимости от интенсивности горения (FRPS) для пожаров августа, действующих на различных типах растительности* (*слева*) и для пожаров разных месяцев, действующих в хвойных листопадных лесах (*справа*)

* Используются типы растительности карты MODIS Land Cover Type Product. 1 — вечнозелёные хвойные леса (*англ.* Evergreen Needleleaf Forests), 3 — хвойные листопадные леса (*англ.* Deciduous Needleleaf Forests), 4 — широколиственные леса (*англ.* Deciduous Broadleaf Forests), 5 — смешанные леса (*англ.* Mixed Forests), 8 — частично залесённые территории (*англ.* Woody Savannas), 9 — слабо залесённые территории (*англ.* Savannas).

Обсуждение полученных результатов

Далее представлены полученные результаты оценок гибели лесов в результате действия пожаров в бореальных лесах. При этом в данной работе под погибшими лесами понимаются участки леса, на которых наблюдаются повреждения с 5-го класса средневзвешенной категории состояния (см. (Руководство..., 2007)).

На *рис. 2* представлено пространственное распределение точек возникновения лесных пожаров в анализируемой зоне в период с 2002 по 2025 г. В этот период в зоне бореальных лесов по данным наблюдений приборов MODIS было зарегистрировано более 77 тыс. пожаров, которые привели к гибели лесов. Распределение числа таких пожаров по годам приведено на *рис. 3* (см. с. 441). Следует отметить, что за анализируемый период наблюдается достаточно устойчивый тренд на снижение лесных пожаров. В то же время наблюдается устойчивый тренд на увеличение доли крупных (более 100 га) пожаров, которые привели к гибели лесов (*рис. 4*, см. с. 441). В анализируемый период менялась и пространственная структура распределения лесных пожаров. Это хорошо видно из данных, приведённых на *рис. 5* (см. с. 441). Можно обратить внимание, что, по сравнению с началом двухтысячных годов, в последние годы на территории России заметно сократилось число пожаров в южной части бореальной зоны. Более детальный анализ показывает, что сокращение в основном произошло за счёт уменьшения пожаров в лесах, расположенных на территориях, на которых также присутствует значительное число сельскохозяйственных земель. Такие пожары в основном характерны для весеннего периода и значительная часть из них имеет небольшую площадь.

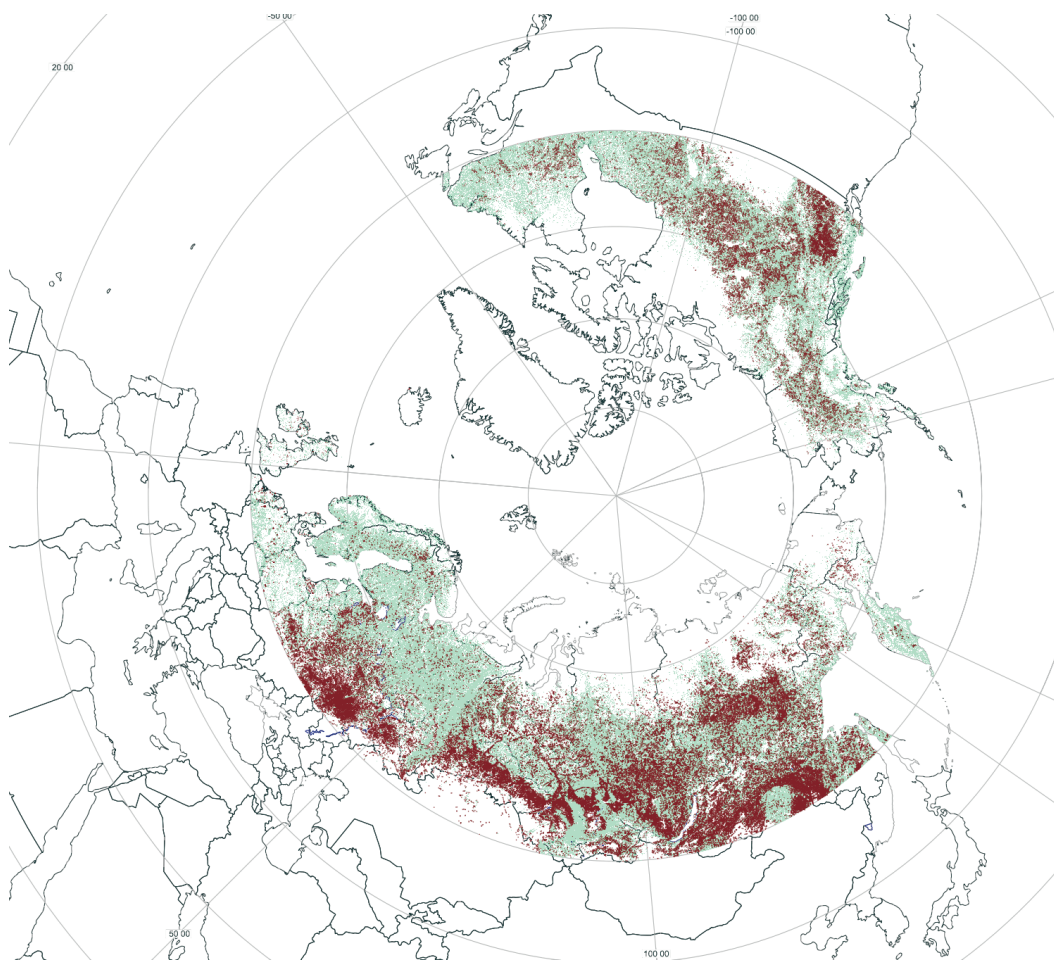


Рис. 2. Пространственное распределение точек возникновения лесных пожаров в анализируемой зоне за период с 2002 по 2025 г.

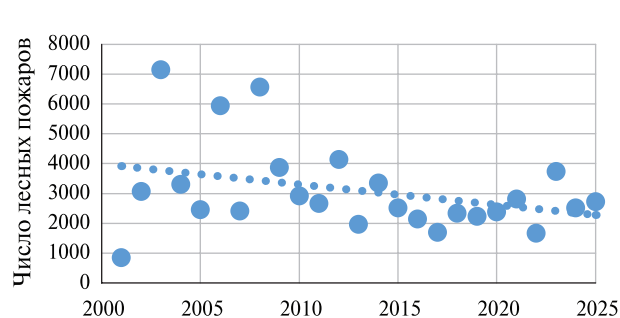


Рис. 3. Многолетняя динамика общего количества лесных пожаров по данным MODIS

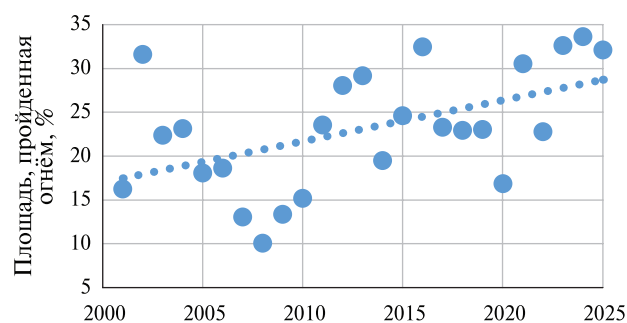


Рис. 4. Многолетняя динамика доли (в %) пожаров, с площадью леса, пройденной огнём более 100 га

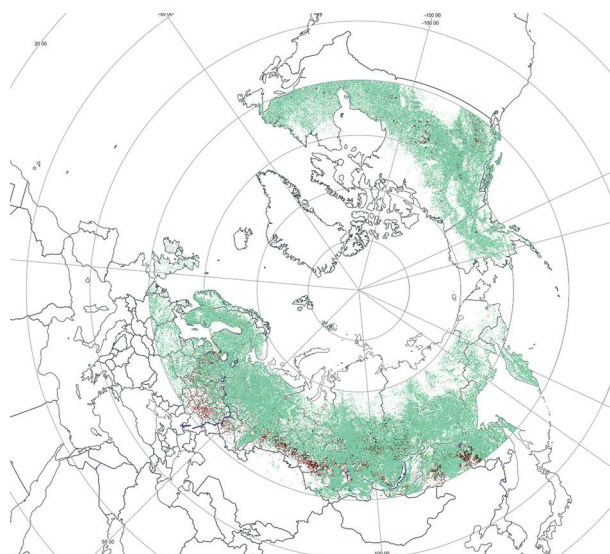
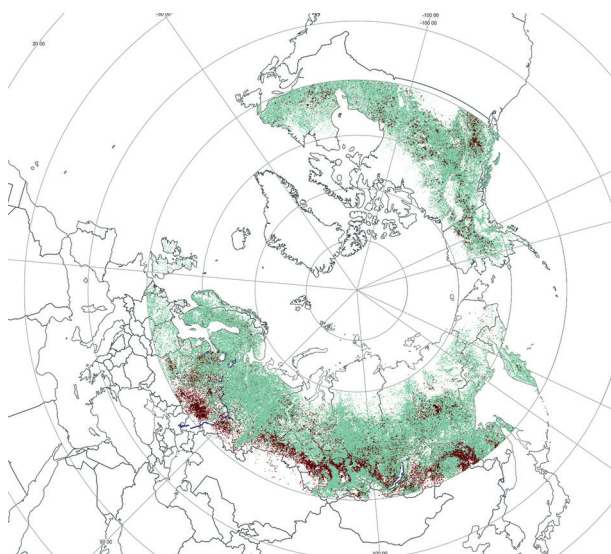


Рис. 5. Пространственное распределение точек возникновения лесных пожаров в анализируемой зоне за периоды с 2002 по 2006 г. (слева) и с 2021 по 2025 г. (справа)

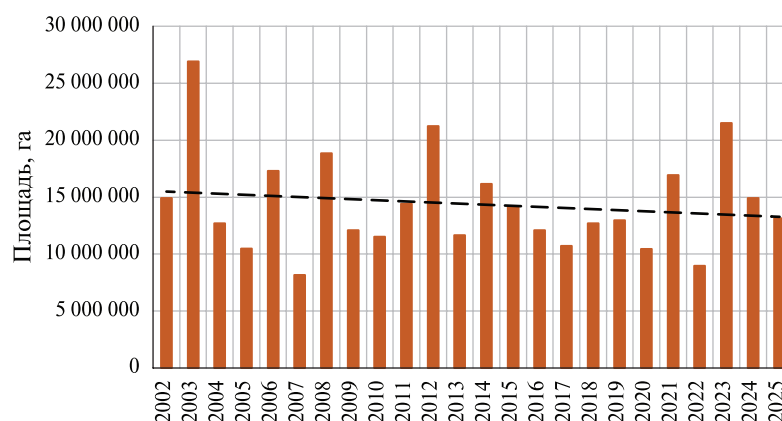


Рис. 6. Многолетняя динамика интегральной площади, пройденной огнём в бореальных лесах

Всего в бореальной зоне за период с 2002 по 2025 г. по данным прибора MODIS было пройдено более 345 млн га территорий, покрытых лесом. При этом на 45 млн га наблюдалась гибель лесного покрова. Динамика имевшихся характеристик лесных пожаров по годам приведена на рис. 6–9 (см. с. 442). Важно отметить, что при практически отсутствующем тренде в площади, пройденной пожарами, отмечается значимый положительный тренд на увеличение площади растительности, погибшей в результате действия пожаров. То есть по сути

растёт летальность пожаров (отношение площади погибшей от пожаров растительности к площади, пройденной огнём). Следует также отметить, что при детальном анализе динамики гибели лесов на территории России (Лупян и др., 2024) фактически наблюдается такая же картина.

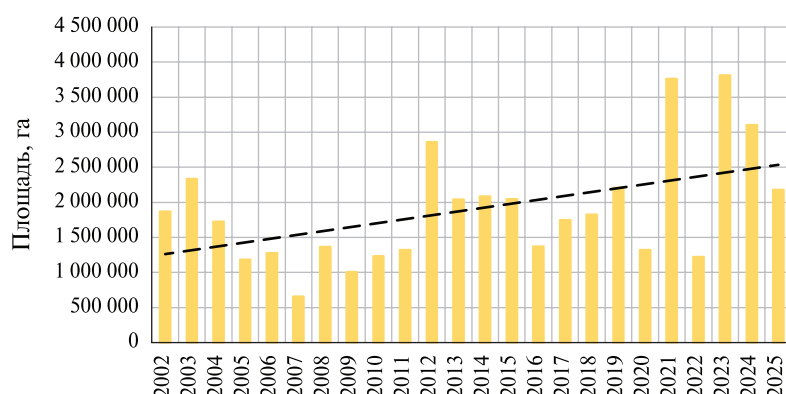


Рис. 7. Многолетняя динамика интегральной площади погибшей от пожаров растительности в бореальных лесах

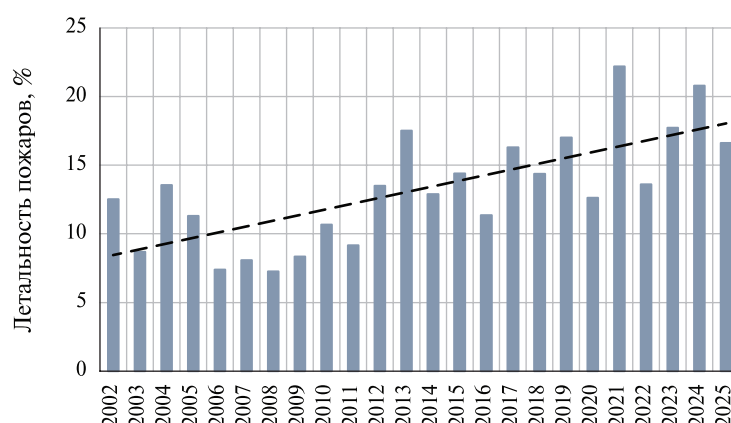


Рис. 8. Многолетняя динамика летальности пожаров (отношение площади погибшей от пожаров растительности к площади, пройденной огнём) в бореальных лесах

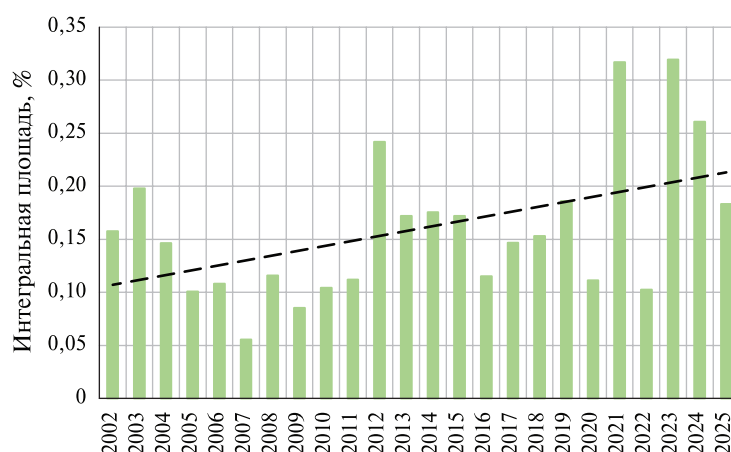


Рис. 9. Многолетняя динамика доли (в %) площади погибшей от пожаров растительности от общей площади бореальных лесов

Для первичного анализа особенностей территорий, в различной степени покрытых лесом, на основе карты MLCTP были выделены три группы территорий, представленные в таблице.

Сгруппированные по доли (в %) покрытия лесом в пикселе типы растительности карты MLCTP

Название типа лесной территории	Класс карты MLCTP
Территории, покрытые лесом (>60 %)	Evergreen Needleleaf Forests, Deciduous Needleleaf Forests, Deciduous Broadleaf Forests, Mixed Forests
Частично залесённые территории (>30—<60 %)	Woody Savannas
Слабо залесённые территории (>10—<30 %)	Savannas

Информация по данным территориям представлена на *рис. 10–12*. Можно заметить, что положительный тренд летальности пожаров наиболее выражен для покрытых лесом территорий и меньше проявлен для слабозалесённых территорий.

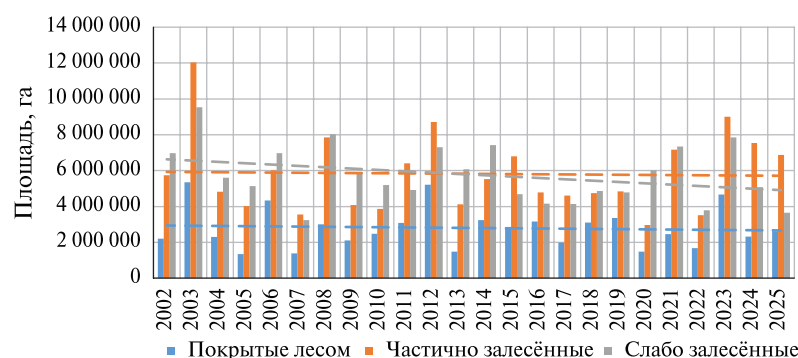


Рис. 10. Многолетняя динамика интегральной площади, пройденной огнём на территориях с различным лесным покрытием

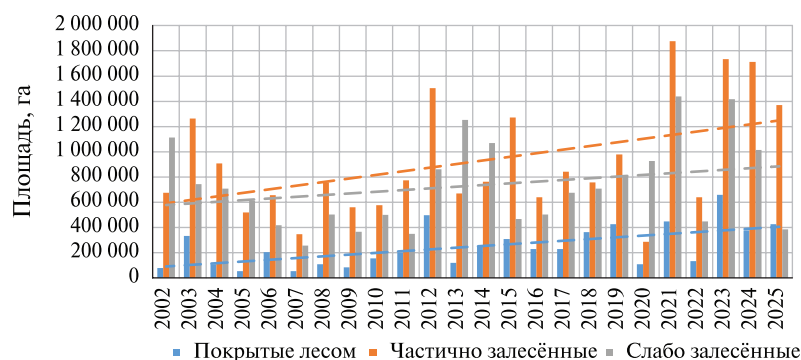


Рис. 11. Многолетняя динамика интегральной площади погибшей от пожаров растительности на территориях с различным лесным покрытием



Рис. 12. Многолетняя динамика летальности пожаров на территориях с различным лесным покрытием

Заключение

Отметим, что оценки как площадей, пройденных огнём, так и площадей погибших лесов на основе данных прибора MODIS содержат ошибки, которые связаны не только с завышением площади из-за достаточно больших размеров пикселей в инфракрасных каналах, но и с пропусками детектирования мелких пожаров. В то же время при проведении оценок для больших территорий, на которых действует значительное число пожаров, такие ошибки невелики. Например, по данным работы (Лузян и др., 2021), ошибки для интегральных оценок таких площадей на территории РФ не превышают 5 %. Поэтому можно считать, что ошибки представленных в настоящей работе оценок по всей бореальной зоне также не превышают данной величины. Таким образом, можно говорить о достоверности фактически основного результата данной работы — выявления положительных трендов в площадях погибших лесов и летальности лесных пожаров на территории бореальной зоны в период с 2002 по 2025 г.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Работа выполнялась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>).

Литература

1. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лузян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
2. Галеев А. А., Прошин А. А., Еришов Д. В., Тащилин С. А., Мазуров А. А., Лузян Е. А. Организация хранения данных спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 367–371.
3. Лозин Д. В., Лузян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.
4. Лузян Е. А., Барталев С. А., Еришов Д. В., Котельников Р. В., Балашов И. В., Буццев М. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Жарко В. О., Ковганко К. А., Колбудаев П. А., Крашенинникова Ю. С., Прошин А. А., Мазуров А. А., Уваров И. А., Стыценко Ф. В., Сычуглов И. Г., Флитман Е. В., Хвостиков С. А., Шуляк П. П. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 222–250.
5. Лузян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В. и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
6. Лузян Е. А., Стыценко Ф. В., Сенько К. С. и др. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
7. Лузян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
8. Лузян Е. А., Лозин Д. В., Барталев С. А. и др. Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 233–249. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
9. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий. Приложение 2 к Приказу Рослесхоза от 29 декабря 2007 г. № 523.
10. Стандарт отрасли ОСТ 56-108-98 «Лесоводство. Термины и определения» (утверждён и введён в действие приказом Рослесхоза № 203 от 03.12.1998).

11. *Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Луян Е. А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
12. *Уваров И. А., Барталев С. А.* Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 353–365.
13. *Friedl M., Sulla-Menashe D.* MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2019. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
14. *Giglio L., Schroeder W., Justice C. O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41.
15. *Hayes D., Butman D., Domke G. et al.* Boreal forests // Balancing greenhouse gas budgets. Accounting for natural and anthropogenic flows of CO₂ and other trace gases. Ch. 6. Cambridge, MA: Elsevier, 2022. P. 203–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814952-2.00025-3>.
16. *Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P. et al.* Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing // Intern. J. Wildland Fire. 2013. V. 22. No. 7. P. 910–918. DOI: 10.1071/WF12087.
17. *Morgan P., Hardy C. C., Swetnam T. W. et al.* Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns // Intern. J. Wildland Fire. 2001. V. 10. No. 4. P. 329–342. DOI: 10.1071/WF01032.
18. *Ryan K. C.* Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // Silva Fennica. 2002. V. 36(1). P. 13–39.
19. *Wooster M. J., Zhukov B., Oertel D.* Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 86. P. 83–107. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00070-1).

Estimation of burnt boreal forests mortality in the 21st century based on fire intensity data

D. V. Lozin, E. A. Loupian, I. V. Balashov, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

Boreal forests are typically defined as forests located north of 50° latitude. The paper presents the results of an assessment of boreal forest fire damage in the first quarter of the 21st century (2002–2025). The estimates were obtained by analyzing fire intensity as measured by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) instruments that operated on the Terra and Aqua satellites during this period. A method developed at Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences was used in this study. The method had previously been used to assess northern forests (forests located north of 60° latitude) mortality from wildfires. The paper shows that, according to MODIS observations, 345 million hectares of forested areas were burned in the boreal zone between 2002 and 2025. Forest mortality was observed on 45 million hectares of this area. Forest mortality is defined as forest areas with damage corresponding to average condition category 5. Analysis of the temporal dynamics of forest area and damage from fires also revealed significant positive trends in forest damage rate and forest fire mortality index (percentage of area damaged by wildfires to the total area affected by wildfires).

Keywords: remote sensing, wildfires, boreal forests, wildfires monitoring, FRP, forest damage rate, forest fire seasonal mortality index

Accepted: 25.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-438-447

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
2. Galeev A. A., Proshin A. A., Ershov D. V., Tashchilin S. A., Mazurov A. A., Loupian E. A., Forest fires satellite monitoring data storage management, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Iss. 2, V. 2, pp. 367–371 (in Russian).
3. Lozin D. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Estimation of northern burnt forests mortality in the XXI century based on MODIS data on fire intensity, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 292–301 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.
4. Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Kotel'nikov R. V., Balashov I. V., Bourtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kovganko K. A., Kolbudaev P. A., Krashenninnikova Yu. S., Proshin A. A., Mazurov A. A., Uvarov I. A., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Flitman E. V., Khvostikov S. A., Shulyak P. P., Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 222–250 (in Russian).
5. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V. et al., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
6. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S. et al., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
7. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
8. Loupian E. A., Lozin D. V., Bartalev S. A. et al., Assessment of damage to Russian forests by fires in the XXI century based on analysis of fire intensity using MODIS instrument, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 233–249 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
9. *Rukovodstvo po provedeniyu sanitarno-ozdorovitel'nykh meropriyatii. Prilozhenie 2 k Prikazu Rosleskhoza ot 29 dekabrya 2007 g. No. 523* (Guidelines for the implementation of sanitary and recreational activities. Appendix 2 to the Order Rosleskhoz of December 29, 2007) (in Russian).
10. *Standart otrasli OST 56-108-98 "Lesovodstvo. Terminy i opredeleniya" (utverzhden i vveden v deistvie prikazom Rosleskhoza No. 203)* (Industry standard OST 56-108-98 "Forestry. Terms and definitions" (approved and put into effect by Order Rosleskhoz No. 203)) 03.12.1998 (in Russian).
11. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 1, pp. 254–266 (in Russian).
12. Uvarov I., Bartalev S., The algorithm and software suite for land cover types recognition based on locally-adaptive supervised classification of satellite imagery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, V. 7, No. 1, pp. 353–365 (in Russian).
13. Friedl M., Sulla-Menashe D., *MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006*, NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2019, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
14. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, V. 178, pp. 31–41.
15. Hayes D., Butman D., Domke G et al., Boreal forests, In: *Balancing greenhouse gas budgets. Accounting for natural and anthropogenic flows of CO₂ and other trace gases*, Ch. 6, Cambridge, MA: Elsevier, 2022, pp. 203–236, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814952-2.00025-3>.
16. Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P. et al., Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing, *Intern. J. Wildland Fire*, 2013, V. 22, No. 7, pp. 910–918, DOI: 10.1071/WF12087.
17. Morgan P., Hardy C. C., Swetnam T. W. et al., Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns, *Intern. J. Wildland Fire*, 2001, V. 10, No. 4, pp. 329–342, DOI: 10.1071/WF01032.

18. Ryan K. C., Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems, *Silva Fennica*, 2002, V. 36, No. 1, pp. 13–39.
19. Wooster M. J., Zhukov B., Oertel D., Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2003, V. 86, pp. 83–107, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00070-1).