

## Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения

Д. В. Лозин<sup>1,2</sup>, Е. А. Лупян<sup>1</sup>, И. В. Балашов<sup>1</sup>, С. А. Барталев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Москва, 119991, Россия*

Представлены оценки гибели лесов от пожаров, происходивших на северных территориях в XXI в., на основе анализа интенсивности горения, получаемой по данным приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на спутниках Terra и Aqua. В работе дан краткий анализ распределения пожаров и гибели лесов от них как по годам, так и по различным территориям (странам). Показано, что в период с 2002 по 2021 г. в «Зоне 60» (на территории севернее 60° с. ш.) было зарегистрировано 70 659 пожаров, а в «Зоне ПК» (на территории севернее Полярного круга) — 5997 пожаров. При этом для «Зоны 60» 33 892 пожара было зарегистрировано в период с 2002 по 2011 г. и 36 767 пожаров — с 2012 по 2021 г., в «Зоне ПК» с 2001 по 2011 г. было зарегистрировано 2395 пожаров, а с 2012 по 2021 г. — 3602 пожара. В период с 2002 по 2021 г. в «Зоне 60» пожарами было пройдено 102 млн га лесной территории, а в «Зоне ПК» — 8 млн га. При этом в «Зоне 60» погибло более 22 млн га лесов, а в Зоне ПК — более 2 млн га. За периоды 2002–2011 и 2012–2021 гг. в «Зоне 60» погибло соответственно 7015 тыс. га (1,2 % от всей лесной растительности в зоне; в среднем 19,6 % от площади, пройденной огнём) и 15 372 тыс. га лесов (2,6 и 23,3 % соответственно), а в «Зоне ПК» — 641 тыс. га (2,8 и 23,7 %) и 1379 тыс. га (1,9 и 26,5 %). В работе также представлена информация о гибели лесов по территориям (странам) в анализируемых зонах. Представленные в работе данные позволили сделать следующие предварительные выводы. В последние десятилетия не наблюдалось значимых изменений в числе пожаров в «Зоне 60». Тем не менее нельзя не отметить, что в «Зоне ПК» в 2019–2020 гг. произошёл резкий рост числа пожаров на территории России. Во второе десятилетие анализируемого периода на территории России наблюдался рост гибели лесов от пожаров в анализируемых зонах. В исследуемый период не отмечается трендов на изменение процента площади погибших лесов от общей площади лесов в анализируемых странах, и средний процент погибших лесов за весь анализируемый период сопоставим в России, США и Канаде и существенно ниже в странах северной Европы; такая же картина наблюдается и для процента площади погибших лесов от площадей, пройденных огнём.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, пожар, FRP, степень повреждения лесов, Северный полярный круг, Арктическая зона

Одобрена к печати: 06.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301

### Введение

Информация о гибели лесов от пожаров на северных территориях представляет значительный интерес в связи с глобальным изменением климата и вызываемыми им значительными долгосрочными изменениями в окружающей среде (Bowman et al., 2009; Li et al., 2021; Stocks et al., 2001). По данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Land Cover Type Product (Friedl, Sulla-Menashe, 2019), на территориях, расположенных севернее 60° с. ш., находится около 582 млн га лесов, в том числе за полярным кругом — 69 млн га\*. Эти леса распределены по территории разных стран следующим образом: севернее 60° с. ш. 15 % лесов находится на территории Канады, 9 % — на территории США, 10 % — на территории европейских государств и 66 % — на территории России. За полярным кругом в этих странах соответственно находится 15, 10, 17 и 58 % площади лесов.

\* Данные цифры являются средними за период с 2002 по 2021 г.

Получение информации о происходящих изменениях в лесах на данных территориях затруднено в первую очередь из-за того, что они в основном являются труднодоступными и малонаселёнными. Поэтому основным источником информации о происходящих в северных лесах изменениях становятся данные спутникового дистанционного зондирования. Высокий темп развития спутниковых технологий в последние десятилетия позволил накопить достаточно длинные однородные ряды спутниковых наблюдений и создать новые методы и подходы автоматизированной обработки данных, обеспечивающие получение однородной (сопоставимой) информации по различным регионам. В том числе такие методы и подходы в настоящее время созданы для получения информации о состоянии лесов и повреждениях их пожарами (Барталев и др., 2015; Лупян и др., 2022; Morgan et al., 2001; Ryan, 2002). Всё это сегодня позволяет анализировать состояние лесного покрова на больших территориях и происходящие в нём изменения.

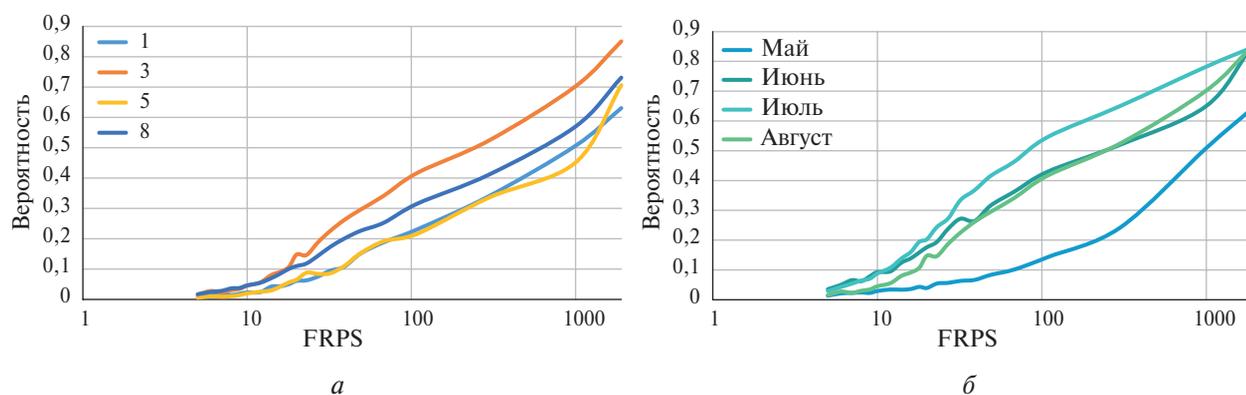
В настоящей работе представлены оценки площадей лесов, погибших от пожаров, которые происходили на северных территориях в XXI в., на основе анализа интенсивности горения, получаемой по данным приборов MODIS на спутниках Terra и Aqua. Для проведения оценки использовался метод, разработанный в исследовании (Лупян и др., 2022). В работе также представлен краткий анализ распределения пожаров и гибели лесов от них как по годам, так и по различным территориям (странам).

### Используемый подход к оценке гибели лесов от пожаров

В настоящее время существует достаточно много подходов, направленных на получение оценок масштабов повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных дистанционного зондирования (например, (Лупян и др., 2022; Стыценко и др., 2013; Heward et al., 2013)). Эти подходы основаны на анализе как особенностей горения (в первую очередь интенсивности), так и постпожарных повреждений растительного покрова. В представленной работе для проведения оценок был выбран подход, основанный на анализе интенсивности горения, оцениваемой на основе наблюдений в канале 3,7–4,0 мкм. На основе этих данных вычисляется радиационная мощность пожара FRP (*англ.* Fire Radiative Power) (Mottram et al., 2005; Wooster et al., 2003), которая, как показано разными авторами, имеет достаточно высокую корреляцию с постпожарными повреждениями лесов (например, (Пономарев и др., 2017; Boschetti, Roy, 2009; Heward et al., 2013; Kumar et al., 2011)). При проведении таких оценок основной задачей выступает построение зависимостей между FRP и характеристиками повреждения лесов. В работе (Лупян и др., 2022) был предложен подход получения такой зависимости на основе сравнения данных о FRP, нормированных на площадь элемента наблюдения (далее — FRPS), и информации о степени повреждения лесного покрова на основе сравнения его состояния до и после пожаров (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013). При этом использовались базы данных (БД) информации, сформированные по территории России за период с 2006 по 2021 г. Это позволило провести анализ значительного числа участков (более 10 млн точек), в которых имелась информация о FRPS и степени постпожарных повреждений лесов. По каждому участку (точке) также анализировалась информация о времени (сезоне), в котором действовал пожар, и преобладающем типе лесного покрова. Для получения информации о типе лесного покрова в работе (Лупян и др., 2022) использовался ежегодно обновляемый ряд карт наземных экосистем по всей территории Российской Федерации (Барталев и др., 2016). Наличие такого объёма информации для сопоставления позволило получить оценки вероятности гибели лесов в зависимости от интенсивности горения (FRPS) с учётом типа лесного покрова и времени (сезона) действия пожара.

Для получения оценок гибели лесов от пожаров в рамках настоящей работы был применён описанный выше подход. При этом для получения информации о типе лесного покрова использовался ежегодно обновляемый ряд циркумполярных карт, полученных на основе информационного продукта MODIS Land Cover Type Product. Для определения зависимостей между FRPS и характеристиками повреждения разных типов лесов был проанализирован ряд

наблюдений пожаров на территории лесов Российской Федерации в период с 2006 по 2021 г. Примеры полученных зависимостей вероятности гибели основных типов лесов от FRPS приведены на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Примеры зависимостей вероятности гибели леса от интенсивности горения (FRPS) для пожаров: *а* — происходящих в августе и действующих на разных типах растительности\*; *б* — возникающих в разных месяцах и действующих в хвойных листопадных лесах

В силу того, что северные леса обладают сходными характеристиками во всей циркумполярной зоне, можно сделать предположение, что полученные зависимости характерны для всех лесов этой зоны. Поэтому данные зависимости были использованы для получения оценок площадей погибших лесов в анализируемой зоне. Для получения этих оценок также использовалась база данных пожаров, детектированных в северных широтах по всему миру с 2002 по 2022 г., сформированная на основе архива наблюдения «горячих точек» (ГТ), детектированных на основе шестой коллекции данных MODIS (Collection 6 MODIS Active Fire/Hotspot Data (MCD14DL)) (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-realtime/firms/c6-mcd14dl>). Для каждой ГТ в БД имеется информация о FRP (Giglio et al., 2016) и вычисленной на её основе FRPS, дате её детектирования, типе территории, на которой расположена точка, и т.д. Особенности построения данной БД описаны, в частности, в работе (Галеев и др., 2005). Оценки площадей, пройденных огнём, по наблюдениям горения проводились на основе подхода, предложенного в работе (Лузян и др., 2021).

## Результаты

В данном разделе представлены первые результаты оценок гибели лесов вследствие действия северных пожаров. Будут приведены данные для пожаров, которые развивались севернее  $60^\circ$  с. ш. (далее — «Зона 60») и севернее полярного круга ( $66,562^\circ$  с. ш.) (далее — «Зона ПК»).

В период с 2002 по 2021 г. в «Зоне 60» было зарегистрировано 70 659 пожаров\*\*, а в «Зоне ПК» — 5997 пожаров. При этом для «Зоны 60» 33 892 пожара было зафиксировано в период с 2002 по 2011 г. и 36 767 пожаров — с 2012 по 2021 г. В «Зоне ПК» с 2001 по 2011 г. было зарегистрировано 2395 пожаров, а с 2012 по 2021 г. — 3602 пожара. Распределение пожаров в этих зонах по годам и территориям (странам) приведено на *рис. 2* и *3* (см. с. 295).

\* Используются типы растительности карты MODIS Land Cover Type Product (Friedl et al. 2019): 1 — Evergreen Needleleaf Forests; 3 — Deciduous Needleleaf Forests; 5 — Mixed Forests; 8 — Woody Savannas.

\*\* Здесь и далее под пожарами понимаются не отдельные ГТ, а группы ГТ, объединённых по пространству и времени (ГТ, центры которых лежат на расстоянии меньше 0,5 км и время регистрации которых различается не более чем на пять дней).

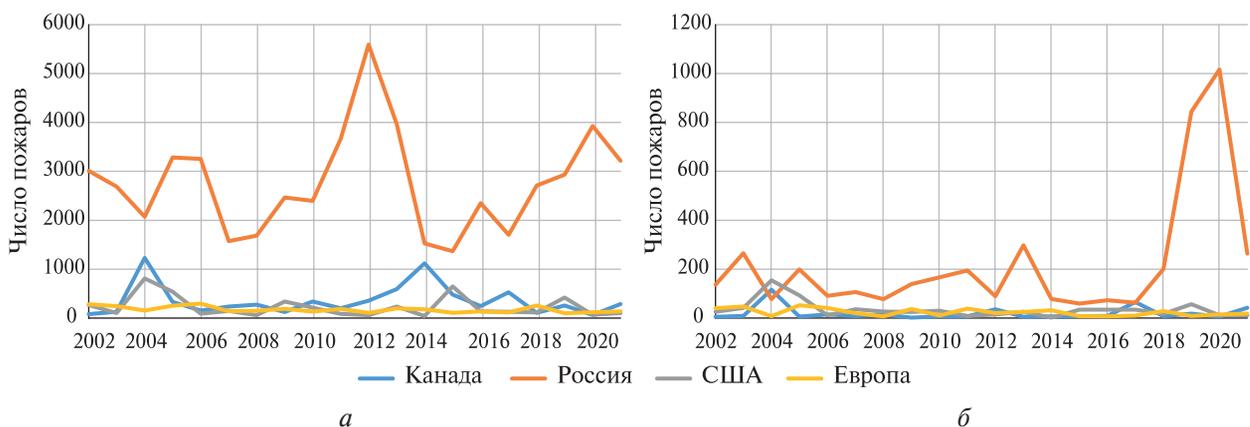


Рис. 2. Число пожаров, которые наблюдались в период с 2002 по 2021 г.:  
 а — в «Зоне 60»; б — в «Зоне ПК»

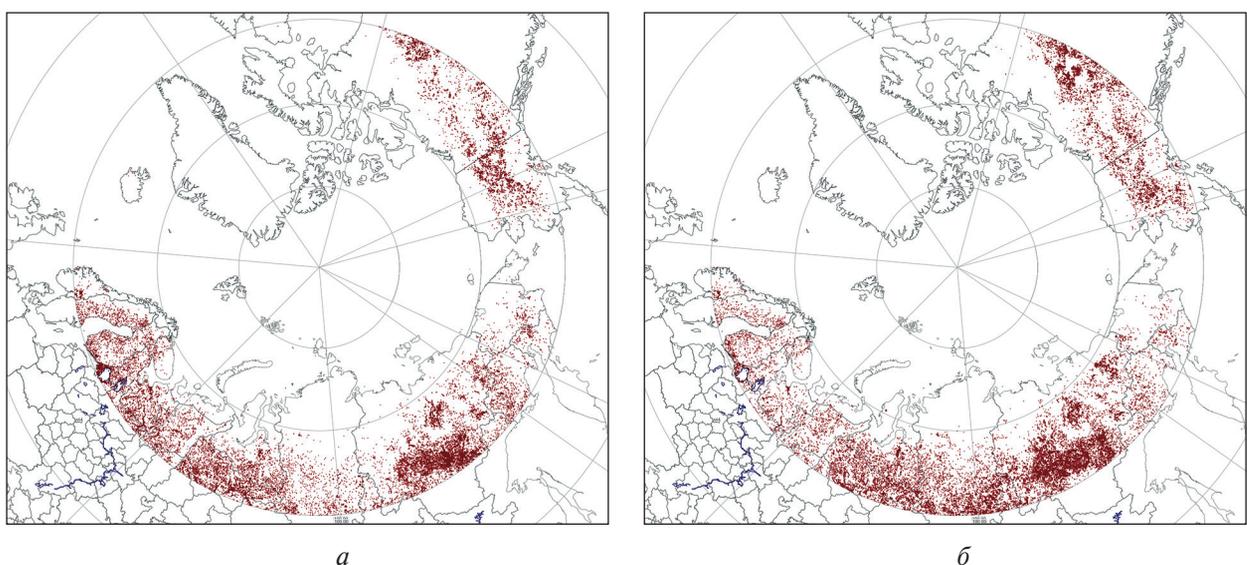


Рис. 3. Территории, на которых возникали северные пожары в периоды:  
 а — с 2002 по 2011 г.; б — с 2012 по 2021 г.

В период с 2002 по 2021 г. в «Зоне 60» пожарами было пройдено 102 млн га лесной территории, а в «Зоне ПК» — 8 млн га. При этом в «Зоне 60» погибло более 22 млн га лесов, а в «Зоне ПК» — более 2 млн га\*. Распределение площадей гибели лесов от пожаров по годам и территориям (странам) приведено на рис. 4 и 5 (см. с. 296 и 297).

Следует отметить, что за периоды 2002–2011 и 2012–2021 гг. в «Зоне 60» погибло соответственно 7015 тыс. га (1,2 % от всей площади лесов зоны; в среднем 19,6 % от площади, пройденной огнём) и 15 372 тыс. га лесов (2,6 и 23,3 % соответственно), а в «Зоне ПК» — 641 тыс. га (2,8 и 23,7 %) и 1379 тыс. га (1,9 и 26,5 %). Распределение гибели лесов по территориям (странам) и зонам приведено в таблице.

\* Под погибшими лесами в данном случае понимаются леса, в которых наблюдаются значения средневзвешенной категории состояния (СКС), превышающие 4,5 (Руководство..., 2007) в год действия пожара. При этом следует иметь в виду, что окончательная гибель лесов от пожаров может быть выше, поскольку в последующие за пожаром годы может происходить гибель лесов с меньшими значениями СКС.

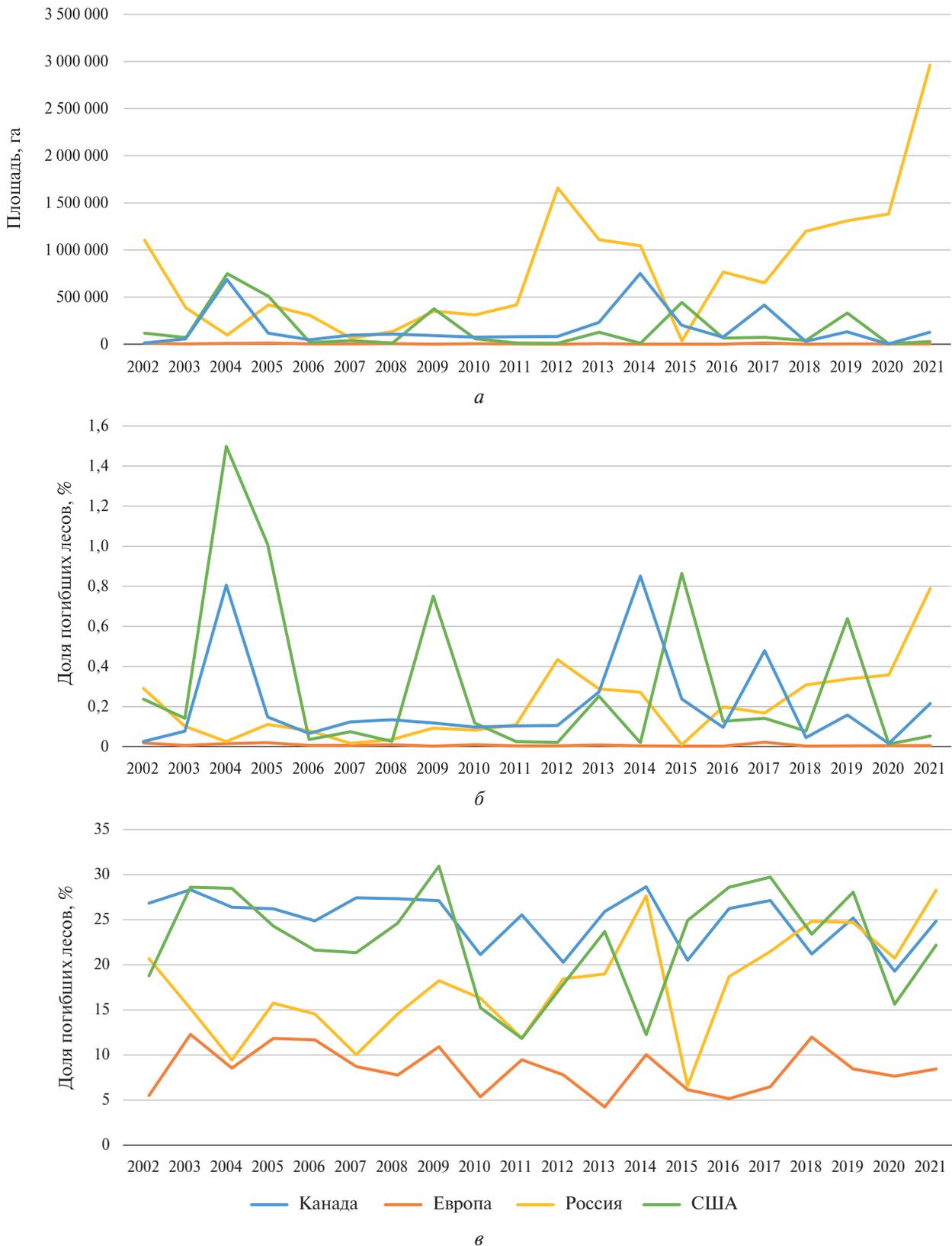


Рис. 4. Распределение гибели лесов от пожаров в «Зоне 60» в период с 2002 по 2021 г.: а — площадь (га); б — доля погибших лесов на территории различных стран от площади лесной территории соответствующих стран (в %); в — доля погибших лесов от площадей лесов, пройденных огнём на территории различных стран (в %)



Рис. 5. Распределение гибели лесов от пожаров в «Зоне ПК» в период с 2002 по 2021 г.: а — площадь (га); б — доля погибших лесов на территории различных стран от площади лесной территории соответствующих стран (в %); в — доля погибших лесов от площадей лесов, пройденных огнём на территории различных стран (в %)

Средние значения в анализируемых зонах за периоды 2002–2011, 2012–2021 и 2002–2021 гг.: площади погибших лесов (тыс. га)/доля площади погибших лесов (в процентах от площади лесов страны в соответствующей зоне)/доля площади погибших лесов (в процентах от площадей лесов, пройденных огнём)

Зоны/период, годы	Канада	Европа	Россия	США
«Зона 60»/2002–2011	140/0,16/26,4	6/0,01/9,8	359/0,01/16,1	196/0,39/26
«Зона 60»/2012–2021	208/0,24/26,0	4/0,01/8,7	1211/0,32/22,8	114/0,22/25,7
«Зона 60»/2002–2021	174/0,20/26,2	5/0,01/9,3	785/0,2/20,8	155/0,31/25,9
«Зона ПК»/2002–2011	12/0,12/26,4	2/0,02/13,4	12/0,03/14,9	38/0,56/29,9
«Зона ПК»/2012–2021	14/0,13/28,5	1/0,01/12,1	101/0,24/25,8	22/0,3/31
«Зона ПК»/2002–2021	13/0,13/27,5	2/0,01/12,9	56/0,13/24	30/0,43/30,3

## Заключение

Представленная в данном кратком сообщении информация, безусловно, требует более детального анализа и уточнения, в том числе зависимостей вероятности гибели от интенсивности горения с учетом региональных особенностей. В то же время уже полученные в настоящий момент данные позволяют сделать следующие предварительные выводы:

- В последние десятилетия не наблюдается значимых изменений в числе пожаров в «Зоне 60». Тем не менее нельзя не отметить, что в «Зоне ПК» в 2019–2020 гг. произошёл резкий рост числа пожаров на территории России.
- Во второе десятилетие анализируемого периода на территории России наблюдается рост гибели лесов от пожаров в анализируемых зонах. Этот рост обусловлен аномальными пожарами 2020 и 2021 гг.
- В исследуемый период на территории США, Канады и Европы не наблюдается значимых трендов на изменение процента площади погибших от пожаров лесов от общей площади лесов в анализируемых странах.
- Такая же картина, как и в предыдущем пункте, наблюдается и для процента площади погибших от пожаров лесов от площадей, пройденных огнём.
- Средний процент гибели лесов за весь анализируемый период сопоставим в России, США и Канаде и существенно ниже в странах северной Европы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Исследование выполнялось с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) (<http://ckp.geosmis.ru/>).

## Литература

1. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Галеев А. А., Прошин А. А., Ершов Д. В., Тащилин С. А., Мазуров А. А., Лупян Е. А. Организация хранения данных спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 367–371.
4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

5. *Лупян Е. А., Стыцenco Ф. В., Сенько К. С., Балашов И. В., Мазуров А. А.* 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.
6. *Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыцenco Ф. В.* 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.
7. *Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О.* Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.
8. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, утвержденные приказом Рослесхоза № 523 от 29.12.07. 2007. 32 с.
9. *Стыцenco Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян 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.
10. *Boschetti L., Roy D. P.* Strategies for the fusion of satellite fire radiative power with burned area data for fire radiative energy derivation // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. Art. No. D20302. DOI: 10.1029/2008JD011645.
11. *Bowman D. M. J. S., Balch J. K., Artaxo P., Bond W. J., Carlson J. M., Cochrane M. A., D'Antonio C. M., DeFries R. S., Doyle J. C., Harrison S. P., Johnston F. H., Keeley J. E., Krawchuk M. A., Kull C. A., Marston J. B., Moritz M. A., Prentice I. C., Roos C. I., Scott A. C., Swetnam T. W., van der Werf G. R., Pyne S. J.* Fire in the Earth System // *Science*. 2009. V. 324. P. 481–484.
12. *Friedl M., Sulla-Menashe D.* MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 / NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2019. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
13. *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.
14. *Heward H., Alistair M. S., Smith D., Roy P., Wade T., Tinkham C., Hoffman M., Morgan P., Lannom K. O.* Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing // *Intern. J. Wildland Fire*. 2013. V. 22(7). P. 910–918. DOI: 10.1071/WF12087.
15. *Kumar S. S., Roy D. P., Boschetti L., Kremens R.* Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. Art. No. D19303. DOI: 10.1029/2011JD015676.
16. *Li X.-Y., Jin H.-J., Wang H.-W., Marchenko S. S., Shan W., Luo D.-L., He R.-X., Spektor V., Huang Ya-D., Li X.-Yu, Jia N.* Influences of forest fires on the permafrost environment: A review // *Advances in Climate Change Research*. 2021. V. 12. Iss. 1. P. 48–65.
17. *Morgan P., Hardy C. C., Swetnam T. W., Rollins M. G., Long D. G.* Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale fire patterns // *Intern. J. Wildland Fire*. 2001. V. 10(4). P. 329–342. DOI: 10.1071/WF01032.
18. *Mottram G. N., Wooster M. J., Balster H., George C., Gerrard F., Beisley J.* The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires // *Proc. 31<sup>st</sup> Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*. Saint Petersburg, 2005. 4 p.
19. *Ryan K. C.* Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // *Silva Fennica*. 2002. V. 36(1). P. 13–39.
20. *Stocks B. J., Wotton B. M., Flannigan M. D., Fosberg M. A., Cahoon D. R., Goldammer J. G.* Boreal Forest Fire Regimes And Climate Change // *Remote Sensing and Climate Modeling: Synergies and Limitations*. 2001. P. 233–246. DOI: 10.1007/0-306-48149-9\_10.
21. *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.

## Estimation of northern burnt forests mortality in the XXI century based on MODIS data on fire intensity

D. V. Lozin<sup>1,2</sup>, E. A. Loupian<sup>1</sup>, I. V. Balashov<sup>1</sup>, S. A. Bartalev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

This paper presents estimates of forest mortality from fires that occurred in the northern territories in the 21<sup>st</sup> century, based on the analysis of fire burning intensity obtained from MODIS instruments installed on satellites Terra and Aqua. A brief analysis of fire distribution and forest mortality resulting therefrom is also presented in the paper both by year and by different territories (countries). The analysis shows that from 2002 to 2021, 70 659 fires were registered in Zone 60 (the area north of 60° N) and 5997 fires were registered in Zone AC (the area north of the Arctic Circle). Moreover, 33 892 fires in Zone 60 were registered from 2002 to 2011 and 36 767 fires from 2012 to 2021; 2395 fires were registered in Zone AC from 2001 to 2011 and 3602 fires from 2012 to 2021. Between 2002 and 2021, 102 million hectares of forest land were covered by fires in Zone 60 and 8 million hectares in Zone AC. At the same time, more than 22 million hectares of forests died in Zone 60 (they got the 5<sup>th</sup> grade of the average weighted category state in the final fire year), and over 2 million hectares died in Zone AC. Over 2002–2011, 7,015 thousand hectares of forests died in Zone 60 (1.2 % of all forest vegetation in the zone; an average of 19.6 % of the area affected by fire) and 15,372 thousand hectares of forests over 2012–2021 (2.6 and 23.3 % respectively); over 2002–2011, 641 thousand hectares of forests died in Zone AC (2.8 and 23.7 % respectively) and 1,379 thousand hectares of forests over 2012–2021 (1.9 and 26.5 % respectively). The paper also presents information on forest death by territories (countries) in the analyzed zones. The presented data made it possible to draw the following preliminary conclusions: over recent decades, there have been no significant changes in the number of fires in Zone 60. Nevertheless, it is worth noting that in 2019–2020, the number of fires in Zone AC increased drastically in Russia; in the second decade of the analyzed period an increase in forest death from fires in the analyzed zones in Russia was observed; over the study period, no trends were observed in the ratio of dead forests area and total forest area in the analyzed countries; the average percentage of dead forests for the entire study period is comparable in Russia, the United States and Canada, though it is significantly lower in Northern European countries; the same picture is observed in the ratio of dead forest area and fire affected area.

**Keywords:** remote sensing, wildfire, FRP, forest damage by fires, satellite monitoring, Arctic circle, Arctic zone

Accepted: 06.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301

### 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. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Galeev A. A., Proshin A. A., Ershov D. V., Tashchilin S. A., Mazurov A. A., Forest fires satellite monitoring data storage management, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Issue 2, Vol. 2, pp. 367–371 (in Russian).
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the “IKI-Monitoring” center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S., Balashov I. V., Mazurov A. A., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 2, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.

6. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Stytsenko F. V., 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, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Usataya Yu. O., Registration of Wildfire Energy Characteristics in Siberian Forests Using Remote Sensing, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 3–11 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961417040017.
8. *Rukovodstvo po provedeniyu sanitarno-ozdorovitel'nykh meropriyatii, utverzhennyye prikazom Rosleskhoza* (Guidelines for the implementation of sanitary and recreational activities, Annex 2 to the order of Rosleskhoz), No. 523, Dec. 29, 2007, 32 p.
9. 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, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266 (in Russian).
10. Boschetti L., Roy D. P., Strategies for the fusion of satellite fire radiative power with burned area data for fire radiative energy derivation, *J. Geophysical Research*, 2009. Vol. 114, Art. No. D20302, DOI: 10.1029/2008JD011645.
11. Bowman D. M. J. S., Balch J. K., Artaxo P., Bond W. J., Carlson J. M., Cochrane M. A., D'Antonio C. M., DeFries R. S., Doyle J. C., Harrison S. P., Johnston F. H., Keeley J. E., Krawchuk M. A., Kull C. A., Marston J. B., Moritz M. A., Prentice I. C., Roos C. I., Scott A. C., Swetnam T. W., van der Werf G. R., Pyne S. J., Fire in the Earth System, *Science*, 2009, Vol. 324, pp. 481–484.
12. Friedl M., Sulla-Menashe D., *MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2019, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
13. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, pp. 31–41.
14. Heward H., Alistair M. S., Smith D., Roy P., Wade T., Tinkham C., Hoffman M., Morgan P., Lannom K. O., Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing, *Intern. J. Wildland Fire*, 2013, Vol. 22(7), pp. 910–918, DOI: 10.1071/WF12087.
15. Kumar S. S., Roy D. P., Boschetti L., Kremensand R., Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, Art. No. D19303, DOI: 10.1029/2011JD015676.
16. Li X.-Y., Jin H.-J., Wang H.-W., Marchenko S. S., Shan W., Luo D.-L., He R.-X., Spektor V., Huang Ya-D., Li X.-Yu, Jia N., Influences of forest fires on the permafrost environment: A review, *Advances in Climate Change Research*, 2021, Vol. 12, Issue 1, pp. 48–65.
17. Morgan P., Hardy C. C., Swetnam T. W., Rollins M. G., Long D. G., Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale fire patterns, *Intern. J. Wildland Fire*, 2001, Vol. 10(4), pp. 329–342, DOI: 10.1071/WF01032.
18. Mottram G. N., Wooster M. J., Balster H., George C., Gerrard F., Beisley J., The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires, *Proc. 31<sup>st</sup> Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*, Saint Petersburg, 2005, 4 p.
19. Ryan K. C., Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems, *Silva Fennica*, 2002, Vol. 36(1), pp. 13–39.
20. Stocks B. J., Wotton B. M., Flannigan M. D., Fosberg M. A., Cahoon D. R., Goldammer J. G., Boreal Forest Fire Regimes And Climate Change, *Remote Sensing and Climate Modeling: Synergies and Limitations*, 2001, pp. 233–246, DOI: 10.1007/0-306-48149-9\_10.
21. 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, 2003, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86, pp. 83–107.