

Сравнительный анализ фактической и потенциальной площади пожаров в лесах России на основе данных спутникового мониторинга и моделирования динамики очагов горения

С. А. Хвостиков, С. А. Барталев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru*

Большие площади лесных пожаров на территории Российской Федерации и возрастающий уровень их разрушительного воздействия обуславливает важность эффективной реализации мер по борьбе с огнём. Оценка эффективности таких мер требует не только данных о фактически пройденных огнём территориях, которые в масштабах страны можно получить на основе современных методов спутникового мониторинга, но и информации о потенциальных площадях лесных пожаров в условиях отсутствия лесопожарной охраны. В статье предложен подход к оценке потенциальной площади пройденных огнём лесов России на основе моделирования распространения пожара при известных метеорологических условиях, характеристиках растительного покрова и рельефа местности. На основе данных о местах возникновения пожаров по данным спутникового мониторинга было смоделировано потенциально возможное развитие всех пожаров в масштабах страны в предположении отсутствия противопожарной охраны лесов. Сравнение модельных оценок потенциальной площади лесных пожаров с данными спутниковых наблюдений позволяет оценить влияние мер по охране лесов на пройденную огнём площадь в масштабах страны и на уровне отдельных её регионов. Анализ полученных оценок показал достаточно высокий уровень согласованности фактической и прогнозной площади пройденных огнём лесов за разные годы, а также продемонстрировал ожидаемое пространственное распределение регионов по эффективности противопожарных мер. Также в работе показано, как предложенный подход может использоваться для модельной оценки потенциальной пройденной огнём площади при различных режимах охраны лесов, задаваемых максимально допустимым временем с момента обнаружения очагов возгорания до полной ликвидации пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, спутниковый мониторинг, моделирование, противопожарные меры

Одобрена к печати: 15.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-293-301

Введение

По данным спутниковых наблюдений пожары ежегодно повреждают миллионы гектаров лесов на территории России (Лупян и др., 2024). Наносимые пожарами повреждения лесным экосистемам, в том числе приводящие к их гибели, в последние годы демонстрируют выраженные тренды к нарастанию (Барталев, Стыценко, 2021; Лозин и др., 2025; Лупян и др., 2024). Всё это обуславливает необходимость реализации эффективных мер по охране лесов от пожаров. Но количественная оценка эффективности таких мер требует не только информации о фактически пройденной огнём площади, но и модельного определения потенциальной (в условиях отсутствия противопожарных мер) площади пожаров, установленной с учётом имевших место метеорологической обстановки во время горения и природной пожарной опасности.

В масштабах страны информация о фактически пройденной огнём площади может быть получена только на основе спутниковых данных дистанционного зондирования Земли. Так, в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) разрабатываются подходы, направленные на оценку пройденной огнём площади и степени повреждения лесов по данным спутниковых наблюдений (Барталев, Стыценко, 2021; Барталев и др., 2015; Лозин и др., 2025; Лупян и др., 2024; Матвеев и др., 2025; Стыценко и др., 2013). В Институте леса

имени В. Н. Сукачева СО РАН также разрабатываются методы по оценке интенсивности горения и степени повреждения лесов на основе регистрируемой мощности теплового излучения (Пономарев и др., 2017; Ponomarev et al., 2021).

Для оценки потенциальной горимости, в качестве которой примем величину пройденной огнём площади лесов при отсутствии мер охраны их от пожаров, можно использовать модельный подход. В последние десятилетия модели динамики природных пожаров всё чаще применяются для оценки и прогнозирования потенциально возможного развития пожаров. В частности, они используются в задачах планирования контролируемых выжиганий с целью оценки потенциальных повреждений от действующих пожаров и принятия оперативных решений о противопожарных мерах. Подробнее вопрос применения различных пожарных моделей рассматривался ранее (Хвостиков, Барталев, 2021).

В настоящей работе предложен подход по оценке потенциальной горимости лесов страны и проведено сравнение полученных на его основе результатов с данными спутникового мониторинга развития пожаров. Предполагается, что применение модели ко всем пожарам на территории страны вплоть до момента их естественного прекращения в связи с выпадением достаточного количества осадков или отсутствием природных горючих материалов позволяет оценить потенциальную пройденную огнём площадь в условиях неуправляемого горения. Сравнение величин потенциальной и фактической пройденной огнём площади позволяет оценить влияние принимаемых мер по тушению, в том числе при различных режимах охраны лесов от пожаров.

Данные и методы

Для проведения исследования были получены оценки фактической и потенциальной площади лесных пожаров. Фактическая пройденная лесными пожарами площадь лесов определялась по данным спутникового мониторинга, полученным в ИКИ РАН (Лупян и др., 2021). Оценки основаны на информации о детектировании активного горения по данным прибора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с применением подхода, описанного в работах (Лупян и др., 2017, 2021). При этом для расчёта площадей пройденных пожарами лесов использовались ежегодно обновляемые карты растительного покрова (Барталев и др., 2016). Данные подходы и технологии позволяют получать ежегодные оценки площадей лесов, пройденных огнём, на всей территории России.

Потенциальная площадь пройденных лесными пожарами территорий оценивалась с помощью канадской системы распространения огня CFFBPS (*англ.* Canadian Forest Fire Behavior Prediction System), основанной на наборе эмпирических уравнений, определяющих зависимость скорости развития фронта горения от типов природных горючих материалов, метеорологических условий и характеристик рельефа (Development..., 1992). Система оценивает фронтную, боковую и тыловую скорость распространения пожара и на их основе строит эллипс, характеризующий пройденную огнём площадь от точечного источника. Моделирование выполнялось на регулярной сетке с шагом 30 м, центр каждой клетки в состоянии активного горения считается точечным источником, для которого моделируется распространение огня. Клетки территории возможного горения, центры которых затронуты пожаром, переходят в состояние активного горения и учитываются при дальнейшем моделировании. Параметры модели были адаптированы для оценки распространения огня в различных растительных экосистемах страны (Хвостиков и др., 2012). Нами было показано, что модель способна адекватно воспроизводить динамику лесных пожаров на территории страны (Барталев и др., 2017; Хвостиков, Барталев, 2022; Хвостиков и др., 2012).

Для моделирования в качестве источника данных о горючих материалах использовались карты типов растительного покрова, содержащие информацию о принадлежности каждого пикселя к одному из 27 тематических классов (Барталев и др., 2016). Указанные карты имеют пространственное разрешение 230 м и содержат ежегодные оценки классов растительного покрова для всей территории России. Метеорологическая информация основана на наборе данных ds093-094 Национального центра атмосферных исследований США NCAR (*англ.*

National Center for Atmospheric Research) (Saha et al., 2011) с пространственным разрешением 1° и временным разрешением 6 ч. Кроме того, для моделирования использовалась информация о рельефе местности из архива данных ASTER GDEM (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) на всю территорию России с пространственным разрешением 30 м (Tachikawa et al., 2011).

Место и время возникновения пожара (стартовая точка моделирования) устанавливались на основе результатов выявления температурных аномалий земной поверхности по данным спутникового спектрорадиометра MODIS (Лупян и др., 2017, 2021). Анализ и агрегация данных разновременных наблюдений позволяют оценить динамику развития пожара с момента обнаружения до его завершения. В настоящей работе считалось, что пожар возник в момент наблюдения первой температурной аномалии по данным MODIS, в качестве точки его начала принимался минимальный элемент моделирования — клетка 30×30 м в центре очага активного горения. Все спутниковые данные были получены с использованием ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Таким образом, используемые данные позволили применить модель для каждого пожара на территории России, воспроизводя потенциальную динамику пожара до момента его естественного прекращения в связи с отсутствием горючих материалов или выпадением 0,3 см осадков за сутки.

Для оценки потенциальной площади лесов, пройденных пожарами, результаты моделирования пересекались с картами покрытых лесом земель, полученными на основе описанных выше ежегодно обновляемых карт типов растительного покрова.

Результаты

Полученные фактические и потенциальные (модельные) оценки ежегодной площади лесных пожаров в 2007–2025 гг. представлены на *рис. 1*. Все оценки учитывают только пройденные огнём территории, занятые лесами по данным карты типов растительного покрова (Барталев и др., 2016) в год, предшествующий пожару. Из представленного *рис. 1* видно, что фактическая площадь пройденных огнём лесов во все годы ниже, чем её потенциальная оценка, полученная в предположении неконтролируемого горения. На этом рисунке заметен хороший уровень согласованности ежегодной динамики площадей, пиков и спадов. В среднем ежегодная оценка потенциальной площади пройденных огнём лесов в два раза выше, чем фактическая в этот период. Можно отметить максимум превышения модельной оценки над фактической в 2010 г., что скорее всего указывает на значительно больший потенциал повреждений лесов пожарами в условиях экстремальной горимости в европейской части страны при условии отсутствия мер по их тушению.

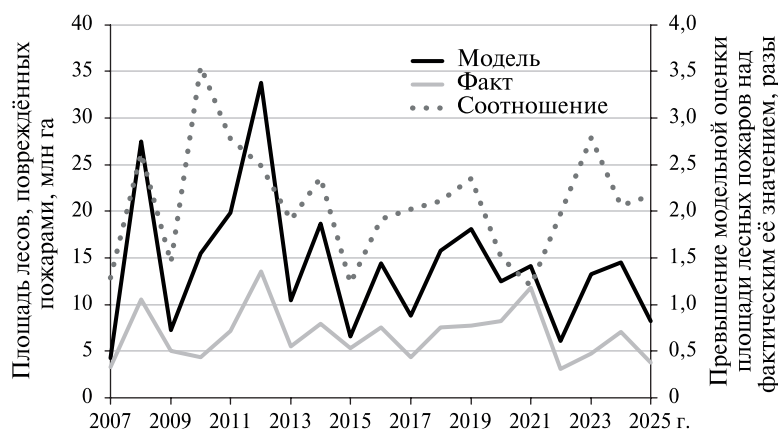


Рис. 1. Ежегодная динамика потенциальной и фактической площади лесных пожаров России по результатам моделирования и дистанционного мониторинга

Близость модельных и фактических оценок пройденной огнём территории в 2021 г. предположительно объясняется большой долей пожаров на Дальнем Востоке в зоне, где борьба с ними практически не велась.

На *рис. 2* представлено пространственное распределение соотношения модельной и фактической площади лесов, пройденных огнём. Для построения указанной карты данные о пройденных огнём площадях агрегировались на регулярной сетке с размером клетки 200×200 км. Большое превышение потенциальной оценки площади пожаров над фактом говорит о высокой эффективности противопожарных мер (зелёный цвет на рисунке), а близость этих показателей свидетельствует о том, что распространение огня осуществлялось в режиме, близком к свободному горению (красный цвет). Видно, что зона наибольшей эффективности противопожарных мер находится в густонаселённых областях европейской части страны и частично в центральной Сибири, а на малонаселённых территориях Сибири и Дальнего Востока уровень влияния охраны лесов от пожаров существенно ниже. На *рис. 2* исключены статистически нерепрезентативные области, в которых пожары за весь период наблюдений фактически прошли меньше 10 000 га занятой лесом площади.

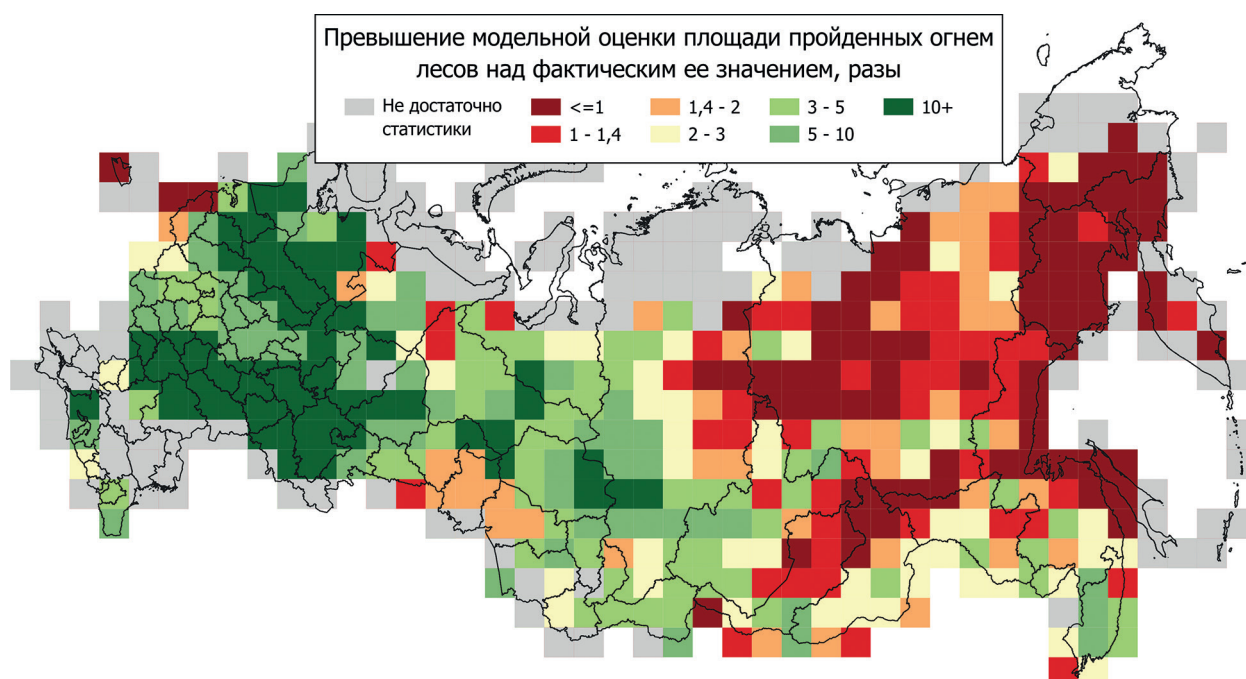


Рис. 2. Соотношение модельной и фактической оценки площади лесных пожаров на уровне клеток регулярной сетки

На *рис. 3* представлена разность между оценками потенциальной и фактической пройденной огнём площади лесов, которую можно интерпретировать как площадь предотвращённых пожаров. Значение 0,01 га/га в год означает, что предпринятые противопожарные меры в среднем ежегодно приводили к предотвращению горения на площади в 1 га на каждые 100 га леса. Такой анализ показывает, что наибольшая эффективность противопожарных мер достигалась в европейской части страны, на юге Красноярского края, в Иркутской области, Республике Бурятия, Амурской области и Приморском крае. Также можно предположить, что из-за высокой эффективности тушения многие пожары в европейской части не достигают по своим размерам минимального порога детектируемости очагов горения инструментом MODIS, что может приводить к занижению потенциальных оценок горимости.

Модель даёт не только итоговую оценку пройденной огнём площади, но и динамику этой метрики во времени, что позволяет прогнозировать эффективность различных противопожарных мер. Например, на *рис. 4* показана эффективность противопожарных мер, при

которых все пожары тушатся через 24 ч после их возникновения. Видно, что достижение такого уровня охраны лесов даёт наибольшее улучшение для отдельных участков Республики Саха, Красноярского края, Иркутской области и Республики Бурятия. Стоит отметить, что *рис. 4* не учитывает фактический режим охраны лесов. Если сравнить его с *рис. 3*, то видно, что предложенный режим охраны лесов даёт значительное улучшение для указанных выше регионов, приводит к сравнимым потенциальным и фактическим оценкам площади лесных пожаров для регионов юга Дальнего Востока и вызовет увеличение площади пожаров на европейской части страны.

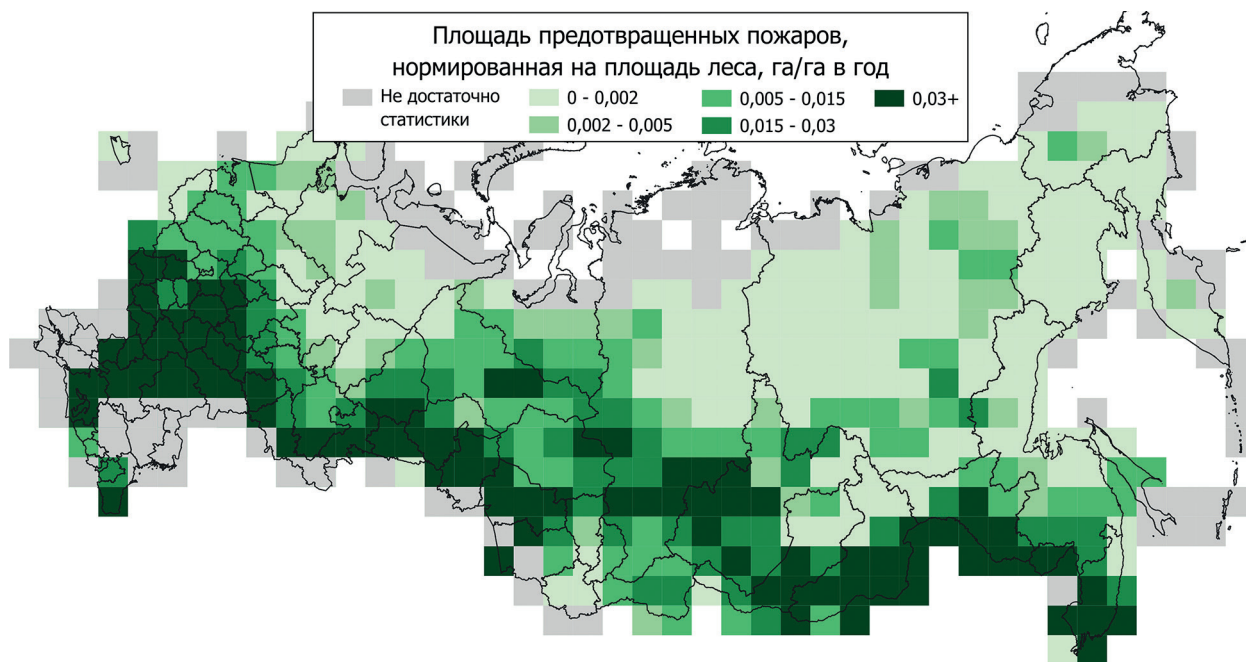


Рис. 3. Площадь предотвращённых лесных пожаров на уровне клеток регулярной сетки

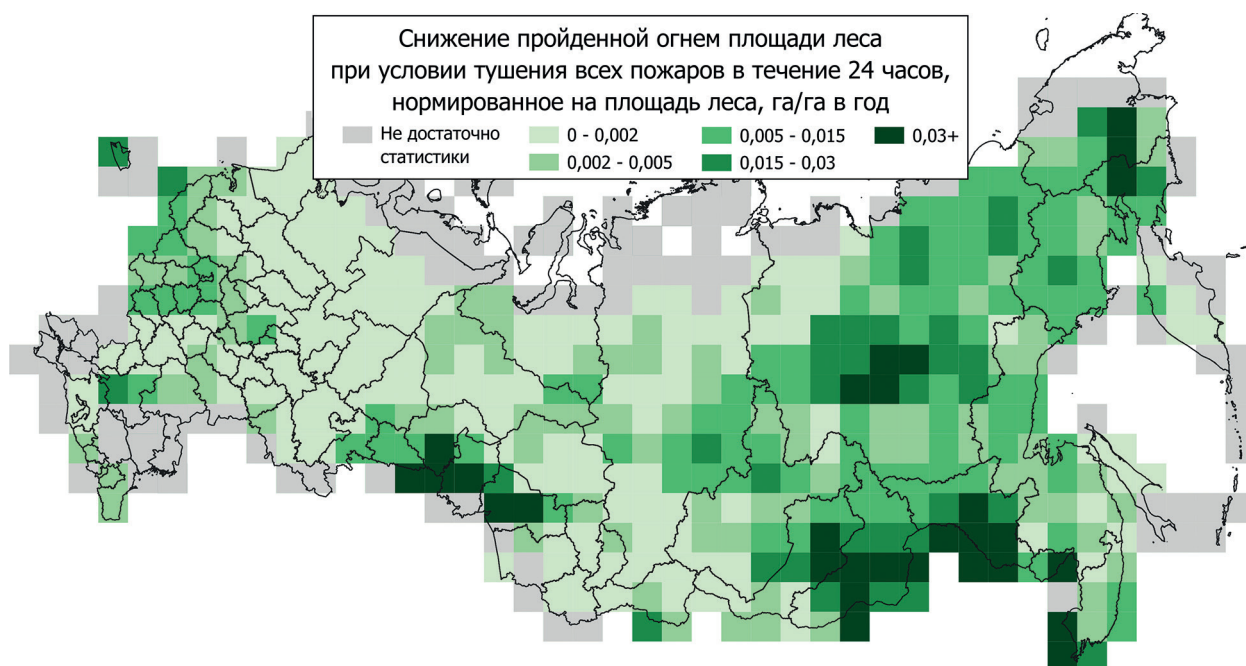


Рис. 4. Прогноз площади предотвращённых лесных пожаров при тушении всех пожаров через 24 ч после их начала

Естественно, возможность тушения в заданный срок сильно зависит от имеющихся ресурсов и возможности их оперативной релокации в зону пожара. Предложенный метод может быть использован и для анализа других более сложных сценариев тушения, предполагающих ликвидацию разных пожаров в различные сроки. Также описанный подход предполагает, что огонь одномоментно прекращает распространение в момент тушения, в то время как реальный эффект тушения растянут во времени и может быть неоднороден по фронту пожара. Полный учёт мер по тушению может потребовать других методов моделирования, например, аналогичных разработкам Г. А. Доррера (Доррер и др., 2011).

Заключение

В статье описывается выполненное сравнение фактической и потенциальной площади пожаров в лесах России на основе данных спутникового мониторинга и результатов моделирования динамики очагов горения. Подход, основанный на моделировании, позволил оценить потенциальное развитие всех пожаров на территории страны с момента возникновения до их естественного прекращения в предположении неконтролируемого горения, т.е. в условиях отсутствия противопожарной охраны лесов. Сравнение модельных и фактических величин пройденной огнём площади позволяет оценить влияние противопожарных мер на территории страны и её отдельных регионов.

Показано, что результаты применения данного подхода демонстрируют ожидаемое пространственное и временное распределение оценок потенциальных площадей пожаров и эффективности противопожарных мер. В частности, для анализируемого периода потенциальная оценка площади пожаров значительно превышает её фактическое значение. Наибольшее превышение, предположительно говорящее о высокой эффективности противопожарных мер, наблюдается в густонаселённых областях европейской части страны и частично в центральной Сибири, а наименьший эффект от охраны лесов от пожаров — на малонаселённых территориях Сибири и Дальнего Востока.

Также в статье показано, что предложенный метод может использоваться для оценки эффективности различных режимов охраны лесов, задаваемых максимально допустимым временем с момента обнаружения очагов возгорания до полной ликвидации пожаров. В том числе демонстрируется, что тушение всех пожаров в первые 24 ч с момента возникновения приведёт к значительному увеличению эффективности противопожарных мер в регионах Сибири и Дальнего Востока.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 126031818938-6) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. 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.
3. 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.
4. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Хвостиков С. А., Лупян Е. А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Доррер Г. А., Коморовский В. С., Якимов С. П. Методика оценки и прогнозирования параметров крупных лесных пожаров на основе спутниковой информации // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28. № 1–2. С. 18–26.

6. Лозин Д. В., Луян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А. Оценка гибели бореальных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных об интенсивности горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 438–447. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-438-447.
7. Луян 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.
8. Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. 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.
9. Луян 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.
10. Луян 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.
11. Матвеев А. М., Барталев С. А., Егоров В. А. и др. Валидация на территории России национальных и глобальных продуктов картографирования повреждённых пожарами ландшафтов по данным ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 9–30. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30.
12. Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д. Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS20170503.
13. 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.
14. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27.
15. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в модель распространения огня // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 9–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18.
16. Хвостиков С. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Луян Е. А. Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 91–98.
17. Development and structure of Canadian Forest Fire Behavior Prediction System / Forestry Canada Fire Danger Group. Ottawa: Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate, 1992, 63 p.
18. Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T. et al. Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia // Atmosphere. 2021. V. 12. No. 5. Article 559. DOI: 10.3390/atmos12050559.
19. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. 2011. NSF National Center for Atmospheric Research. DOI: 10.5065/D61C1TXF.
20. Tachikawa T., Hato M., Kaku M., Iwasaki A. Characteristics of ASTER GDEM version 2 // 2011 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2011. P. 3657–3660. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6050017.

Comparative analysis of actual and potential forest fire areas in Russia using remote sensing data and modeling

S. A. Khvostikov, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

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

Large area of forest fires in Russia and their increasing damage demand effective fire-fighting measures. Estimation of their effectiveness requires information not only on actual wildfire area (that can be obtained using remote sensing due to the size of the country) but also on potential burnt area assuming zero fire-fighting efforts. We propose and analyze a method to estimate potential area burnt by wildfires in Russia using forest fire modeling based on meteorological data, land cover type and digital elevation map. Remote sensing data on fire origin locations was used to model potential fire spread for all fires assuming no human intervention. Comparison of model predictions with actual remote sensing information allowed us to estimate the influence of fire-fighting measures for the whole country and its regions. Analysis showed good agreement between actual information and model prediction at the annual level, and expected regional distribution of fire-fighting effectiveness. Also, we presented an example on how to use the proposed method to estimate potential area burnt by fires depending on different types of fire-fighting measures, as defined by the maximum time allowed between fire detection and its suppression.

Keywords: forest fires, remote sensing, modeling, firefighting

Accepted: 15.07.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-293-301

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., An assessment of the forest stands destruction by fires based on the remote sensing data on a seasonal distribution of burnt areas, *Lesovedenie*, 2021, No. 2, pp. 115–122 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Russia's forest fire damage estimation, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
4. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Dorrer G. A., Komorovsky V. S., Yakimov S. P., Method of estimation and prognosis of large forest fires using remote sensing data, *Conifers of the Boreal Area*, 2011, V. 28, No. 1–2, pp. 18–26 (in Russian).
6. Lozin D. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Estimation of burnt boreal forests mortality in the 21st century based on fire intensity data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 6, pp. 438–447 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-438-447.
7. 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.
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
9. 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.
10. 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*

- distantсионного зондирования Земли из космоса*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 233–249 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
11. Matveev A. M., Bartalev S. A., Egorov V. A. et al., Validation of national and global satellite-derived burned area products in Russia, *Sovremennye problemy distantсионного зондирования Земли из космоса*, 2025, V. 22, No. 3, pp. 9–30 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30.
 12. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D., Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia, *Sibirskii Lesnoi Zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170503.
 13. 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 distantсионного зондирования Земли из космоса*, 2013, V. 10, No. 1, pp. 254–266 (in Russian).
 14. Khvostikov S. A., Bartalev S. A., Use of remote sensing data in wildfire modelling, *Sovremennye problemy distantсионного зондирования Земли из космоса*, 2021, V. 18, No. 5, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27.
 15. Khvostikov S. A., Bartalev S. A., Using remote sensing data assimilation into wildfire model to evaluate fire front position, *Sovremennye problemy distantсионного зондирования Земли из космоса*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 9–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18.
 16. Khvostikov S. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Regional scale optimization of wildfire model parameters and modelling of wildfire dynamic using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantсионного зондирования Земли из космоса*, 2012, V. 9, No. 3, pp. 91–98 (in Russian).
 17. *Development and structure of Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*, Forestry Canada Fire Danger Group, Ottawa: Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate, 1992, 63 p.
 18. Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T. et al., Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia, *Atmosphere*, 2021, V. 12, No. 5, Article 559, DOI: 10.3390/atmos12050559.
 19. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al., *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products*, 2011, NSF National Center for Atmospheric Research, DOI: 10.5065/D61C1TXF.
 20. Tachikawa T., Hato M., Kaku M., Iwasaki A., Characteristics of ASTER GDEM version 2, *2011 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2011, pp. 3657–3660, DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6050017.