

Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS

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

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

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

Настоящая работа посвящена анализу особенностей повреждений лесов пожарами на территории России в XXI в. Кратко описаны методы оценки повреждений лесов пожарами и оценки площадей, пройденных лесными пожарами, на основе информации об интенсивности горения. Рассмотрены основные характеристики базы данных о лесных пожарах и постпожарных повреждениях, сформированной по наблюдениям прибором MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за период с 2001 по 2024 г. Представлены и проанализированы основные особенности динамики постпожарных повреждений лесов, наблюдавшихся в XXI в. на территории РФ. При этом показано, что в анализируемый период наблюдался значимый рост летальности пожаров (более чем в два раза). Данный рост в основном обусловлен пожарами, действующими в хвойно-листопадных лесах. Также отмечается, что с начала XXI в. существенно увеличилась доля сильно повреждённых пожарами лесов (5-й класс СКС (средневзвешенная категория состояния)). Всё это позволяет сделать вывод о значимом наблюдаемом тренде увеличения ущерба от лесных пожаров на территории РФ в XXI в., несмотря на отсутствие такого тренда для площадей, пройденных пожарами. Также в работе представлена и проанализирована сезонная динамика повреждений лесного покрова пожарами. В частности, показано, что на летние месяцы приходится более 80 % площадей сильных повреждений лесов, связанных с пожарами, при этом около 50 % таких площадей приходится на июль.

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

Одобрена к печати: 25.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249

Введение

Лесные пожары оказывают достаточно большое влияние на состояние окружающей среды, в том числе за счёт выбросов различных загрязнений и климатически активных газов в атмосферу. При этом масштабы пожаров, а соответственно и влияние на окружающую среду могут быть достаточно велики. Так, например, в годы сильного горения на территории России площади лесов, пройденные огнём, могут превышать 10 млн га (Лупян и др., 2017). При этом лесные пожары возникают на обширных и, во многих случаях, малонаселённых и труднодоступных территориях. Поэтому мониторинг и объективный, однородный контроль данного явления возможен только с использованием спутниковых наблюдений. Спутниковому мониторингу и получаемым в ходе него данным о природных, в том числе лесных пожарах посвящено достаточно много работ (Hua, Shao, 2017; Roy et al., 2008; Zheng et al., 2023). Такие исследования в последние десятилетия активно ведутся и в нашей стране (Абушенко и др., 1998; Барталев и др., 2008; Пономарев и др., 2017а). Это позволило накопить долговременные однородные ряды данных наблюдений пожаров и их последствий на всей территории страны (Лупян и др., 2017; Швиденко, Щепашенко, 2013). Наличие таких рядов позволяет не только проводить анализ пространственных особенностей пожаров и их последствий, но и изучать многолетнюю динамику лесопожарной обстановки, в том числе связанную с различными крупномасштабными изменениями, происходящими на территории России. Анализу такой динамики как на уровне всей страны, так и в отдельных её регионах также посвящено значительное число работ (Буряк и др., 2011; Лупян и др., 2017; Пономарев, Харук, 2016; Пономарев, Швецов, 2015).

Следует отметить, что одно из основных направлений изучения долговременной динамики лесопожарной обстановки связано с анализом повреждений и гибели лесного покрова в результате пожаров. Это вызвано тем, что именно от размеров повреждений, в первую очередь гибели лесов, зависит уровень влияния пожаров на окружающую среду, в том числе выбросы различных загрязнений и климатически активных газов в атмосферу (Barnaba et al., 2011; Ichoku, Kaufman, 2005; Kaufman et al., 1998; Li et al., 2022; Mota, Wooster, 2018; Riggan et al., 2004; Sofiev et al., 2009). Поэтому вопросам оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе данных спутниковых наблюдений, их пространственному и временному анализу уделяется в последние годы особое внимание (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013; Heward et al., 2013; Morgan et al., 2001; Ryan, 2002).

Методы оценки повреждений лесного покрова с использованием дистанционных данных, в первую очередь спутниковых наблюдений, условно можно разделить на два основных направления: 1) оценки повреждений лесов на основе сравнения наблюдений до и после действия пожара; 2) оценки интенсивности горения во время действия пожара.

Первое направление позволяет получить достаточно точные оценки на участках, на которых произошли значимые изменения лесного покрова (см., например, (Стыценко и др., 2013)). На основе таких методов в настоящее время по данным наблюдений, получаемых приборами MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Giglio et al., 2003), сформированы архивы данных о повреждениях лесов пожарами за период с 2006 по 2024 г. (Барталев, Стыценко, 2021). Для оценивания повреждений используются безоблачные спутниковые наблюдения зоны действия конкретного пожара, сделанные после его окончания. Во многих случаях между сроками окончания пожаров и получения таких наблюдений может проходить значительное время (иногда более месяца). За это время участки, на которых лесной покров был слабо поврежден, могут зарости луговой растительностью, что во многих случаях не позволяет детектировать изменения растительного покрова данными методами. Это может приводить к значительному занижению площадей, пройденных огнем. Такая ситуация достаточно часто наблюдается для весенних пожаров и пожаров в начале лета.

Второе направление позволяет получить оперативные оценки повреждений сразу после завершения действия конкретного пожара и даже в период его действия. Разработка таких методов также имеет достаточно большую историю, и данному вопросу также посвящено значительное число работ (см., например, (Пономарев и др., 2017б; Balzter et al., 2004; Heward et al., 2013)). Важнейшей задачей при разработке методов данного направления является построение зависимостей между дистанционно определяемыми характеристиками интенсивности пожаров (обычно радиационной мощности FRP (*англ.* Fire Radiative Power) (Mottram et al., 2005; Wooster et al., 2003) и повреждениями лесов (Пономарев и др., 2017б; Boschetti, Roy, 2009; Kumar et al., 2011; Mottram et al., 2005).

Ниже мы кратко остановимся на описании подхода, который был разработан для выявления зависимостей степени повреждения лесного покрова от интенсивности горения. Достаточно подробно вопросы установления таких зависимостей для лесов на территории РФ на основе данных, получаемых прибором MODIS, описаны в работе (Лупян и др., 2022). При этом использовались следующие архивы данных, накопленных за период с 2006 по 2021 г.:

- база данных (БД), сформированная на основе информации о детектировании активного горения по данным приборов MODIS (коллекция MC6) (Галеев и др., 2005; Giglio et al., 2016);
- БД степени повреждения лесов пожарами, тоже созданная на основе данных приборов MODIS с применением подходов, предложенных в работах (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013);
- ежегодно обновляемый ряд карт по всей территории РФ, содержащий информацию об основных типах лесного покрова (Барталев и др., 2016), получаемых на основе подхода, подробно описанного в публикации (Барталев и др., 2011).

Особо следует отметить, что перечисленные архивы данных обеспечили очень представительную статистику для построения искомой зависимости (более 11 млн пар сопоставлений

информации о повреждениях и наблюдавшейся интенсивности горения). Это, в том числе, позволило не только получить «среднюю» зависимость по всем лесным территориям, но и детальные зависимости вероятности повреждения от интенсивности горения для различных типов лесного покрова и периодов действия пожаров в сезоне. В работе также достаточно подробно описан метод оценки степени повреждений лесного покрова на основе выявленных зависимостей.

Одной из важных характеристик лесных пожаров является их летальность (далее летальность или летальность пожаров) — отношение площади погибшего леса к общей площади, пройденной пожарами на исследуемой территории. Понятие летальности пожаров впервые было введено в работе (Барталев, Стыценко, 2021). Летальность позволяет характеризовать степень деструктивного воздействия пожаров на леса. Анализ временной, в том числе долговременной, динамики летальности позволяет, в частности, изучить динамику особенностей повреждений лесов и оценивать «опасность» пожаров, действующих в лесах различного типа и в разные моменты времени. Следует отметить, что необходимая для оценки летальности пожаров информация о площади, пройденной огнём в конкретных пикселях, также может быть определена на основе сведений об интенсивности горения, получаемых по данным спутникового мониторинга. Ниже мы ещё остановимся на данном вопросе более подробно.

Таким образом мы видим, что в настоящий момент имеются методы и подходы, которые позволяют на основе данных прибора MODIS сформировать долговременные ряды данных о повреждениях лесов пожарами на территории РФ за период с 2001 по 2024 г. (здесь и далее данные 2024 г. брались по 30 сентября) (т. е. за период, прошедший с начала XXI в.). В этой работе будут описаны основные характеристики созданной БД, представлены и проанализированы основные особенности динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI в. до настоящего времени, в том числе для различных типов лесов и в разные периоды пожароопасного сезона.

Метод оценки повреждений лесов пожарами на основе информации об интенсивности горения

Для оценки площадей погибшей и усыхающей лесной растительности использовался метод, основанный на зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности пожаров с учётом сезонных особенностей и типов лесов, в которых действовал пожар. Метод достаточно подробно описан в работе (Лупян и др., 2022), в ней представлена технология получения зависимости вероятности гибели лесов при прохождении их пожарами различной интенсивности. При этом как мера интенсивности пожара используется нормированное на площадь пикселя значение FRP, восстанавливаемое на основе спутниковых наблюдений излучения на длине волны 4 мкм (Mottram et al., 2005; Wooster et al., 2003, 2012). Далее в работе данную характеристику мы будем обозначать FRPS. Технология основывается на сравнении информации о наблюдаемой интенсивности действующих пожаров и постпожарных оценках повреждений. Для установления интенсивности пожара используется значение максимального FRPS (maxFRPS) наблюдавшееся в каждой точке пожара за всё время его действия. Оценки постпожарных повреждений получены по данным спутниковых наблюдений (Стыценко и др., 2013) и представлены в терминах СКС (средневзвешенная категория состояния) (см. (Руководство..., 2007)). Традиционно устанавливаются следующие верхние границы интервалов значений СКС для отнесения насаждения к категориям состояния: 1,5 — здоровое насаждение (1-й класс); 2,5 — ослабленное (2-й класс); 3,5 — сильно ослабленное (3-й класс); 4,5 — усыхающее (4-й класс), выше 4,5 относятся к погибшим (5-й класс).

По окончании конкретного пожара по зоне его действия строится карта, в каждом пикселе которой, где был детектирован пожар, регистрируется значение maxFRPS (далее карта maxFRPS). По окончании пожароопасного сезона фактически получается единая карта maxFRPS по всей территории РФ. Для выявления зависимости вероятности гибели лесного покрова от значения maxFRPS проводится сравнение этой карты с соответствующей

по сезону картой повреждений лесного покрова в рассматриваемом сезоне, построенной на основе технологии (Стыщенко и др., 2013).

Для повышения статистической обеспеченности использовалась информация за период с 2006 по 2021 г. На основе проводимого сравнения были построены не только средняя (по всем типам территорий и за весь период наблюдений) зависимость вероятности повреждений от значения $\max FRPS$, но и такие зависимости для различных типов лесов и разных периодов в пожароопасном сезоне, в которых наблюдается пожар.

Метод оценки площадей повреждений, вызванных пожарами, основан на том, что для каждого пикселя, с учётом времени действия пожара и типа леса, по построенным зависимостям вычисляется доля погибшего и/или усыхающего леса от общей площади леса в анализируемом пикселе. Информация о площади леса в конкретном пикселе получается с использованием ежегодно обновляемых карт основных типов лесного покрова, формируемых по всей территории РФ (Барталев и др., 2016), и маски покрытых лесом территорий, построенной на основе данных спутников Landsat (Hansen et al., 2013). Информация о площади погибших и/или усыхающих лесов в каждом пикселе карт $\max FRPS$ интегрируется. На её основе получается статистика о повреждениях разнообразных типов лесов, на различных территориях и в разные периоды времени.

Метод оценки общей площади, проходимой лесными пожарами, и их летальности

Для анализа летальности кроме площади повреждённых лесов необходимо также иметь оценку общей площади, пройденной лесными пожарами. Используемые в настоящее время методы оценки таких площадей по данным приборов MODIS в основном строятся на оценке общей интегральной площади отдельных пожаров (Лупян и др., 2021; Стыщенко и др., 2016). Для того чтобы иметь возможность оценки летальности на отдельных участках (пикселях), в которых действовал пожар, необходимо было разработать специальный алгоритм. Описание такого алгоритма кратко представлено в настоящем разделе.

Алгоритм строится на предположении, что площадь, пройденная огнём в конкретной области (пикселе результирующей карты $\max FRPS$), зависит от значения $\max FRPS$ и числа наблюдений горения в данном регионе за всё время действия пожара (N). Поэтому можно установить зависимость наиболее вероятной доли площади, пройденной пожаром в анализируемой области (конкретном пикселе), от $\max FRPS$ и N . Данная зависимость может быть построена на основе сравнения информации о наблюдениях горения пожара и площадях, пройденных огнём, полученных по постпожарным наблюдениям гарей (видимым повреждениям растительного покрова) на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения.

Для решения поставленной задачи использовались:

- границы пройденных огнём площадей (контура), построенных на основе данных высокого разрешения (Landsat TM (англ. Thematic Mapper)/ETM (англ. Enhanced Thematic Mapper)/OLI (англ. Operational Land Imager) 30 м и Sentinel-2 MSI (англ. Multispectral Imager) 10 м). Всего было использовано 5465 контуров гарей на всей территории РФ в период с 2009 по 2019 г.;
- информация о количестве детектирований за время действия пожара и карты $\max FRPS$, которые были построены для всех анализируемых пожаров по данным наблюдений прибора MODIS (коллекция MC6).

Для каждой ячейки (пикселя) используемых карт $\max FRPS$ на основе границ площадей гарей, полученных по данным высокого разрешения, посчитана площадь, которая в данном пикселе была пройдена пожаром. После этого построены зависимости средней доли площади, проходимой пожаром в пикселе, от значений $\max FRPS$ $f(FRPS)$ и числа наблюдений $f(N)$. Полученные зависимости представлены на *рис. 1* и *2* (см. с. 237). Для оценки площади, пройденной огнём в конкретном пикселе, предлагается использовать следующую схему:

$$S_{pix_fire} = \max(f(FRPS), f(N))S_{pix},$$

где S_{pix_fire} — площадь, пройденная огнём в пикселе; S_{pix} — площадь пикселя. Выбор данной схемы основан на сопоставлении различных вариантов оценок с использованием $f(FRPS)$ и $f(N)$ с оценками, получаемыми на базе традиционного метода расчёта площадей по данным наблюдения активного горения (далее стандартная коррекция) (Лупян и др. 2021).

Оценки площадей для отдельных пожаров, устанавливаемые с помощью предложенной схемы, показали высокий уровень корреляции с оценками, вычисленными на основе стандартной коррекции (см. рис. 1, 2). Интегральные оценки площади, пройденной лесными пожарами в различные сезоны с 2001 по 2024 г. на территории РФ, полученные двумя методами (рис. 3), также хорошо согласуются друг с другом.

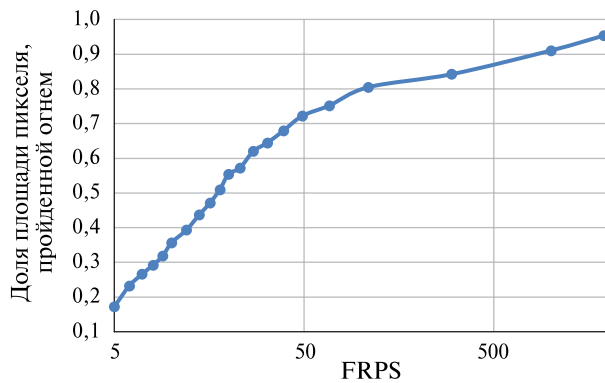


Рис. 1. Средняя доля гари внутри пикселя при различных значениях FRPS

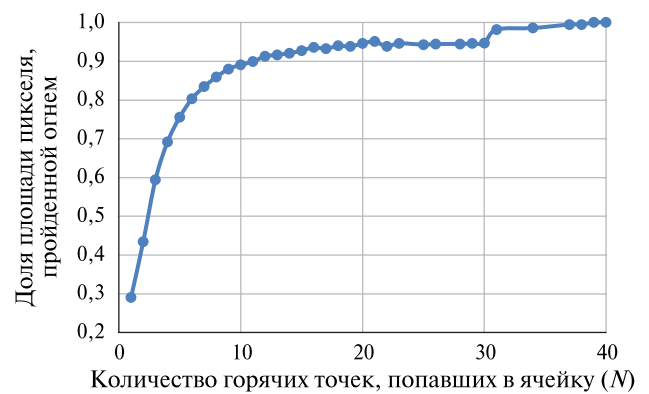


Рис. 2. Средняя доля гари внутри пикселя при разном количестве детектированных в нём действующих пожаров

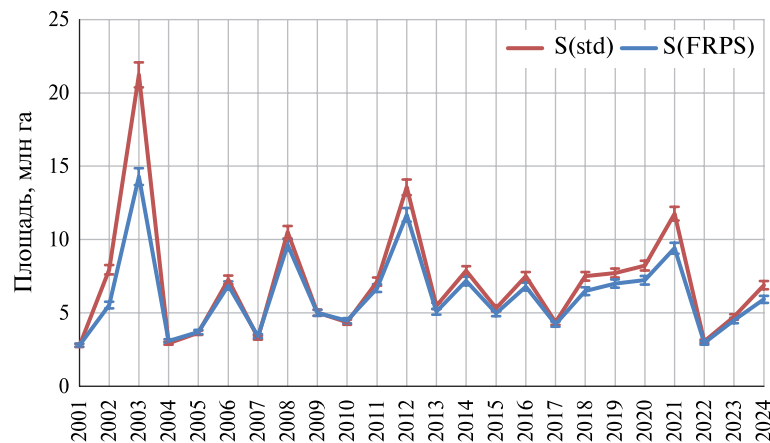


Рис. 3. Динамика интегральной площади, пройденной огнём на территории РФ по годам (2001–2024). S(std) — стандартная коррекция, S(FRPS) — коррекция по FRPS

Вопрос точности оценок площади, проходимой лесными пожарами, получаемых с использованием стандартной коррекции, рассматривался в работе (Лупян и др., 2021). В ней было показано, что точность оценки интегральных площадей, ежегодно проходимых пожарами на территории России, на основе предложенного подхода составляет около 4 %. В то же время анализ поведения распределения ошибок оценок площадей, пройденных отдельными пожарами, полученных с помощью стандартной методики и предлагаемого подхода с использованием FRPS для тестового набора пожаров (более 5 тыс.), показал, что эти распределения в большей степени совпадают.

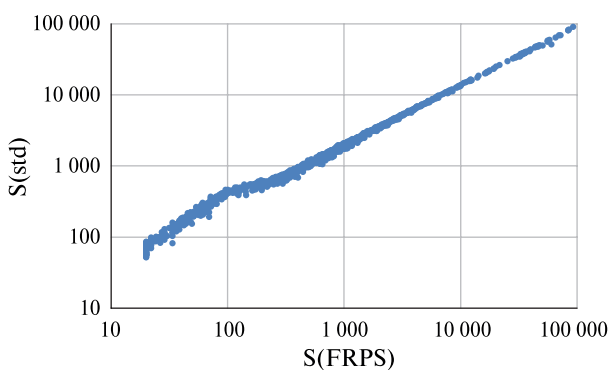


Рис. 4. Соотношение оценок площадей 5465 пожаров, полученных на основе FRPS ($S(FRPS)$) и стандартной коррекции ($S(std)$)

емой с помощью предлагаемого метода с использованием FRPS, будет того же порядка, как и для оценки на основе стандартной методики.

При этом оценки площадей на основе данных методов для тестового набора пожаров также достаточно хорошо коррелируют между собой (рис. 4). Всё это позволяет сделать предположение, что точность оценки интегральных площадей, проходимых лесными пожарами на территории РФ, получа-



Рис. 5. Оценки летальности лесных пожаров на территории РФ, полученные с использованием оценок площадей, пройденных огнём, на основе стандартной коррекции ($S(std)$) и FRPS ($S(FRPS)$). Здесь и далее пунктирные линии — тренды

Также следует отметить, что оценки летальности лесных пожаров, установленные на основе информации о FRPS, хорошо совпадают с оценками, получаемыми с применением стандартной коррекции. Это хорошо видно из данных, представленных на рис. 5, на котором приведены оценки летальности пожаров на территории РФ для различных лет в период с 2001 по 2024 г. с использованием оценок площадей, пройденных лесными пожарами, на основе стандартной коррекции ($S(std)$) и FRPS ($S(FRPS)$).

База данных о повреждениях лесов пожарами и пройденных огнём площадях на территории России в XXI в., получаемая на основе анализа интенсивности горения

Для проведения анализа повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения с использованием предложенных подходов за период с 2001 по 2024 г. была создана серия растровых карт. В пикселях карт содержатся значения площадей повреждений (площади повреждений лесов, соответствующие 4-му и 5-му классу СКС), общая площадь, пройденная пожарами в пикселе, и тип леса (преобладающая группа древесных пород в пикселе). Для создания карт использовалась равновеликая коническая проекция Альберса (разрешение в 230 м). Для анализа различных особенностей повреждений лесов пожарами на территории РФ на основе данной серии карт и БД пожаров была сформирована БД, содержащая следующую информацию по всем пикселям растровых карт, в которых за анализируемый период хотя бы один раз было детектировано горение:

- год регистрации пожара;
- номер дня в году действия пожара;

- FRPS;
- количество горячих точек, попавших в пиксель за срок действия пожара;
- тип растительности, на котором происходил пожар;
- оценка площади усыхающей растительности (4-й класс СКС);
- оценка площади погибшей растительности (5-й класс СКС);
- оценка общей площади, пройденной огнём внутри пикселя (S(FRPS)).

Данная БД (далее БД FRPSD) использовалась для расчёта различной статистики о повреждениях, вызванных лесными пожарами, которая будет представлена в следующем разделе настоящей работы.

Анализ повреждений пожарами лесов России в XXI в.

В данном разделе представлена информация, полученная на основе описанных выше методов оценки повреждений лесов, вызванных лесными пожарами в период с 2001 по 2024 г. Будет рассмотрена как многолетняя (по годам), так и сезонная (по месяцам в течение пожароопасного сезона) динамика повреждений. При этом обсуждается как динамика площадей, на которых наблюдались повреждения 4-го и 5-го класса СКС, так и динамика летальности, для которой под погибшей растительностью подразумевался только 4-й класс СКС, 5-й класс СКС и 4-й и 5-й класс СКС вместе.

Для общего понимания представленных ниже тенденций динамики рассматриваемых характеристик лесных пожаров, на наш взгляд, можно условно считать, что 5-й класс СКС соответствует лесам, погибшим в год пожара, а 4-й класс СКС — сильно повреждённым лесам, которые с большой вероятностью погибнут в последующие за пожарами годы.

Временная динамика повреждений лесов пожарами в период с 2001 по 2024 г.

На *рис. 6* (см. с. 240) представлена информация о динамике площадей, пройденных лесными пожарами, соответствующими 4-му и 5-му классу СКС. Из приведённых данных достаточно хорошо видно, что если площади, соответствующие 4-му классу СКС, практически остаются стабильными в обсуждаемый период, то у площадей, соответствующих 5-му классу СКС, наблюдается значимый положительный тренд. Временные изменения пропорции площадей, занятых лесами с повреждениями 4-го и 5-го классов от общей площади лесов, в которых наблюдаются сильные повреждения (4-го или 5-го класса), представлены на *рис. 7* (см. с. 240). Хорошо видно, что за анализируемый период достаточно существенно возросла доля лесов с повреждениями 5-го класса, т. е. тех, которые с большой вероятностью погибнут в год действия пожаров.

Следует отметить, что каких-либо значимых трендов в общей динамике площади, проходимой лесными пожарами в период с 2001 по 2024 г., не наблюдалось. Это видно, например, из информации, представленной на *рис. 3*. Данный факт также отмечался в работе (Лупян и др., 2017). Поэтому наблюдаемый рост площадей лесов со значительными повреждениями за рассматриваемый период должен приводить к заметному увеличению летальности. Это хорошо видно на *рис. 8* (см. с. 240). Суммарная летальность 4-го и 5-го класса СКС (т. е. летальность, связанная как с гибелью лесов в год пожара, так и последующей гибелью повреждённых лесов) в исследуемый период возросла более чем в два раза (с 15 до 35 %). При этом наиболее резкий рост наблюдается для летальности, соответствующей 5-му классу СКС. Следует также отметить, что практически нет зависимости летальности лесов от площадей, проходимых пожарами в конкретные годы (*рис. 9*, см. с. 242). В частности, увеличение летальности не наблюдается в годы сильного или даже катастрофического горения лесов на территории РФ.

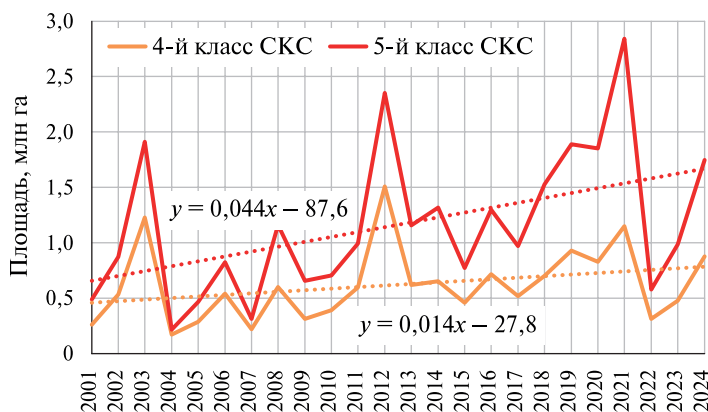


Рис. 6. Динамика площади усыхающих (4-й класс СКС) и погибших (5-й класс СКС) от пожаров лесов на территории РФ с 2001 по 2024 г.

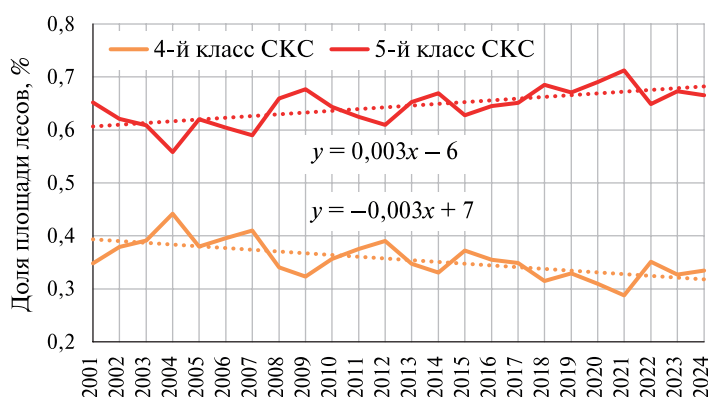


Рис. 7. Многолетняя динамика доли площадей, на которых наблюдаются повреждения лесов, от общей площади сильно повреждённых лесов (суммы площадей, занятых лесами с повреждениями 4-го и 5-го классов СКС)

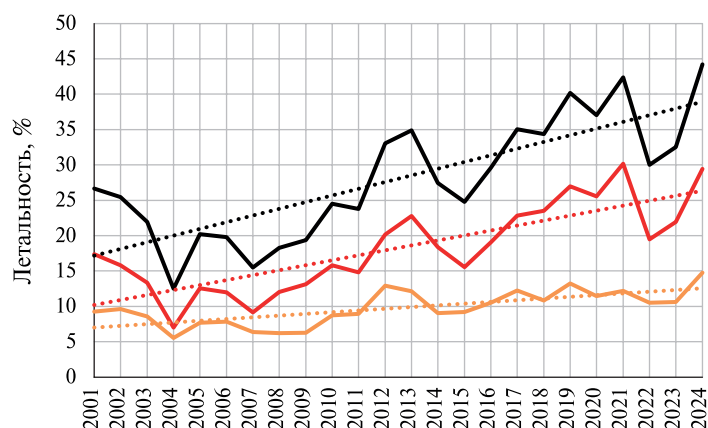


Рис. 8. Динамика летальности лесов на территории РФ с 2001 по 2024 г., где погибшими лесами считаются только насаждения 4-го класса СКС (оранжевый цвет), 5-го класса СКС (красный), 4-го и 5-го классов СКС вместе (чёрный)

Интерес также представляют особенности повреждений, которые можно найти в лесах с различной преобладающей породой. Информация об этом представлена на рис. 10 (см. с. 241). На нём, например, хорошо видно, что рост как площадей повреждений лесов, так и летальности пожаров в период с 2001 по 2024 г. в основном связан с их ростом в хвойных листопадных лесах.

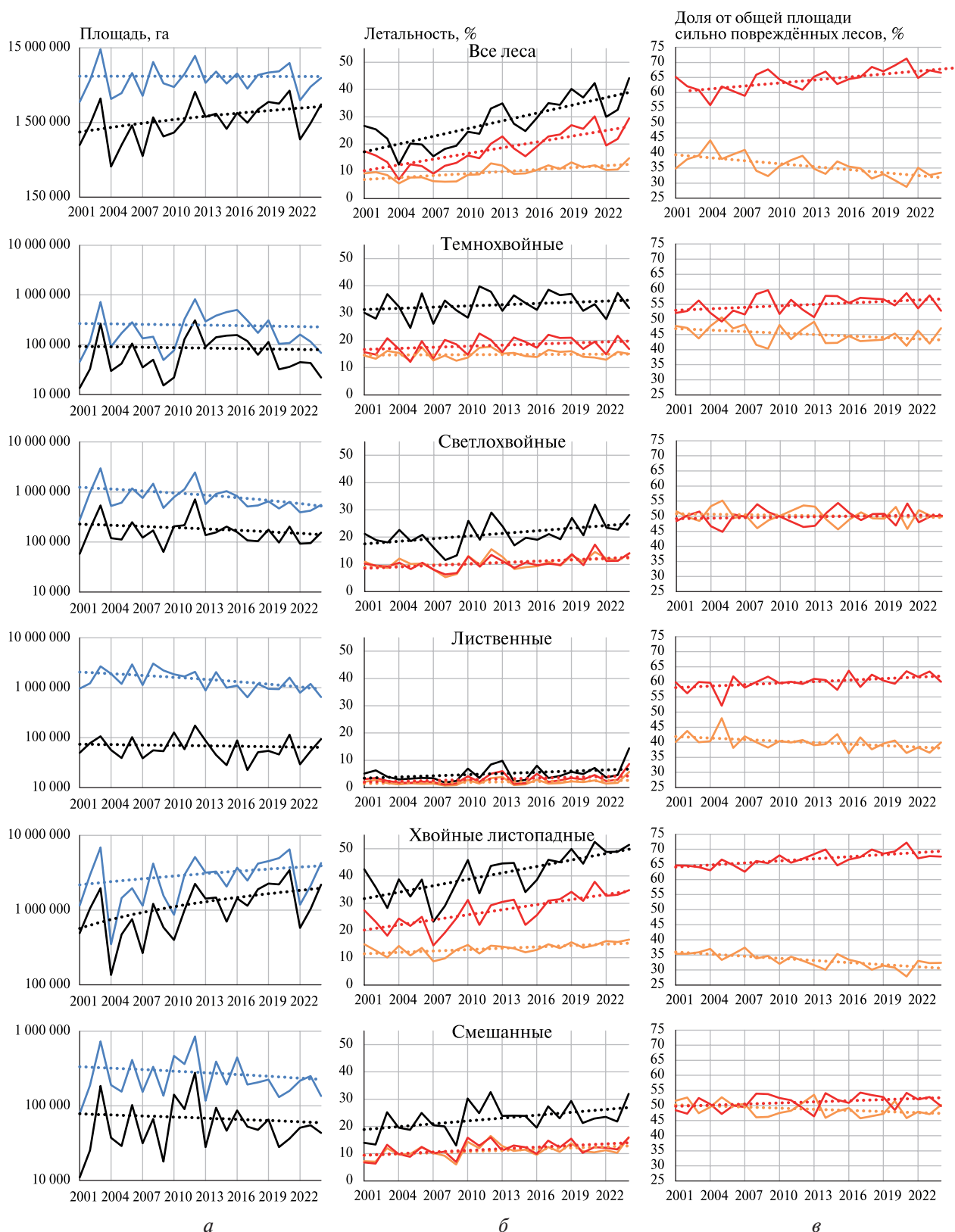


Рис. 10. Изменения площадей погибших лесов и летальности пожаров в лесах с различными типами групп пород за период с 2001 по 2024 г.: а — площадь, пройденная огнём (синий цвет), и площадь усыхающей и погибшей растительности (чёрный); б — динамика летальности (под погибшей растительностью понимаются только насаждения 4-го класса СКС (оранжевый цвет), только 5-го класса СКС (красный), 4-го и 5-го классов СКС вместе (чёрный)); в — динамика доли площадей, на которых наблюдаются повреждения лесов 4-го и 5-го классов СКС, от общей площади сильно повреждённых лесов (отношение для 4-го класса СКС (оранжевый), для 5-го класса СКС (красный))

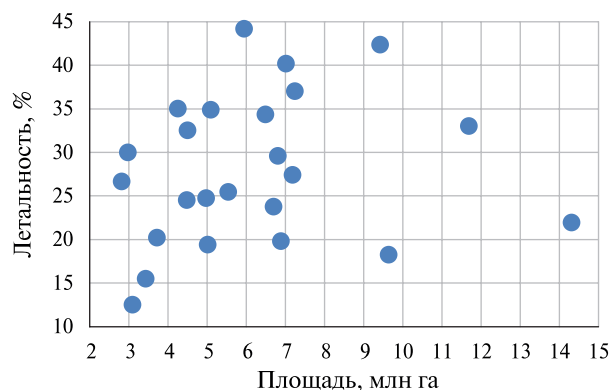


Рис. 9. Зависимость летальности лесных пожаров (погибшие — 4-й и 5-й класс СКС) от площади, пройденной огнём в соответствующем году

Анализ сезонной динамики гибели лесов

Особенности сезонной динамики площадей пожаров на территории РФ достаточно хорошо известны и изучены (см., в частности, (Коровин, Андреев, 1988; Лупян и др., 2017)). В среднем в сезоне наблюдается два пика горения, соответствующих весенним и летним пожарам. Это хорошо видно на рис. 11, где приведено среднее за период с 2001 по 2024 г. распределение площадей, пройденных лесными пожарами, по месяцам. На представленном распределении хорошо выделяются максимумы в мае и июне.

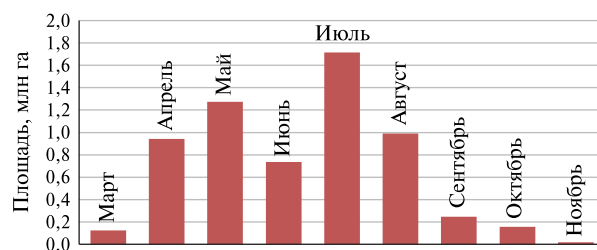


Рис. 11. Усреднённое за период с 2001 по 2024 г. распределение по месяцам площадей, пройденных лесными пожарами на территории РФ. Оценки площадей получены на основе предложенного в настоящей работе подхода на основе интенсивности горения

В отличие от анализа сезонного распределения площадей, проходимых лесными пожарами, вопросу изучения повреждений лесов от пожаров, действующих в различное время пожароопасного сезона, посвящено существенно меньшее число работ. Комплексно данный вопрос был впервые поднят в публикации (Барталев, Стыценко, 2021), в которой, как уже отмечалось, было впервые введено определение летальности лесного пожара. Поэтому дополнительная информация по данному вопросу, на наш взгляд, безусловно важна.

На основе имеющихся наблюдений пожаров за период с 2001 по 2024 г. с использованием предложенных в настоящей работе походов была получена следующая информация о распределении наблюдаемых в лесах сильных постпожарных повреждений (4-й и 5-й классы СКС) на территории РФ:

- Зависимость летальности лесных пожаров от времени действия пожара в сезоне. На рис. 12 (см. с. 243) представлена средняя зависимость за анализируемый период. На нём приводится сезонный ход летальности для лесов с различными преобладающими породами и интегральное распределение для всех типов лесов. Хорошо видно, что летальность пожаров в летние месяцы существенно (до шести раз) выше, чем у весенних пожаров. Максимум летальности для всех типов лесов наблюдается в июле. Исключение составляют темнохвойные леса, для которых максимум летальности отмечается в июне.

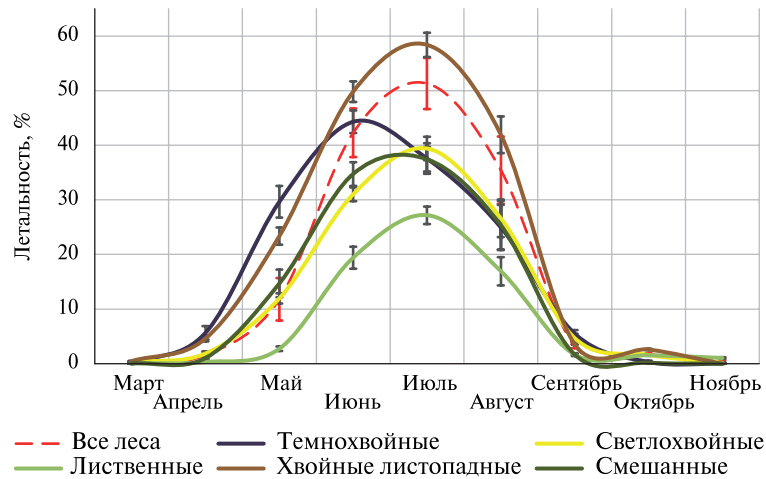


Рис. 12. Сезонная динамика средней летальности по месяцам для лесов с различными группами преобладающих пород

- Зависимость площадей сильных повреждений лесного покрова от времени действия пожара в сезоне. На рис. 13 представлена средняя зависимость за анализируемый период. На нём приводится распределение для лесов с различной преобладающей группой пород и интегральное распределение для всех типов лесов. Хорошо видно, что в отличие от сезонного распределения общей площади, проходимой лесными пожарами, распределения, представленные на рис. 13, не имеют двух максимумов в сезоне. Это связано с тем, что летальность пожаров в летние месяцы существенно выше, чем у весенних пожаров (см. рис. 12) и даже некоторое понижение общей площади проходимых лесными пожарами в начале лета (см. рис. 11) не приводит к уменьшению площадей сильно повреждённых лесов.

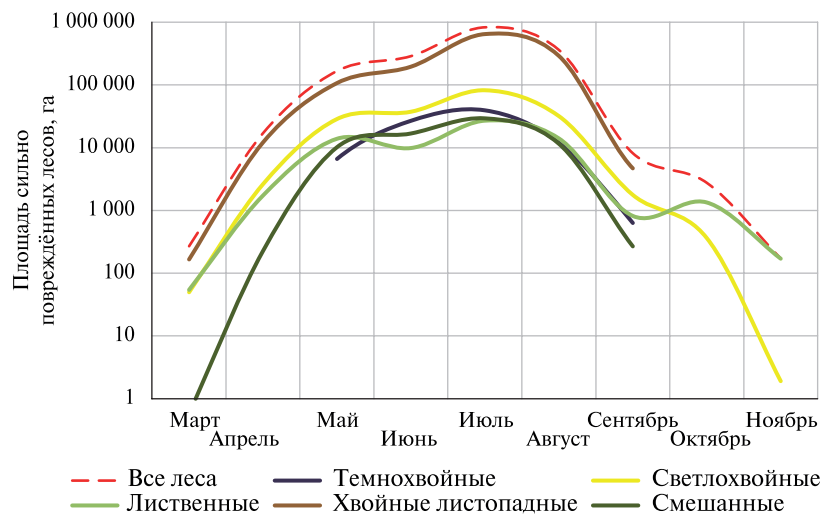


Рис. 13. Сезонная динамика средней интегральной площади сильно повреждённых лесов различных групп преобладающих пород

- Сезонная зависимость доли средней площади сильно повреждённых лесов от общей площади повреждений рассматриваемого типа леса за весь сезон представлена на рис. 14 (см. с. 244). На нём приводятся зависимости для лесов с различными группами преобладающих пород и интегральное распределение для всех типов лесов. Видно, что основная доля повреждений для лесов различного типа приходится на июль. При

этом для всех типов лесов, кроме лиственных, в сезоне наблюдается только один пик. У лиственных лесов в распределении кроме летнего пика наблюдается ещё и весенний. Следует также обратить внимание, что на три летних месяца приходится более 80 % сильно повреждённых пожарами площадей в сезоне, при этом на июль приходится около 50 % таких площадей.

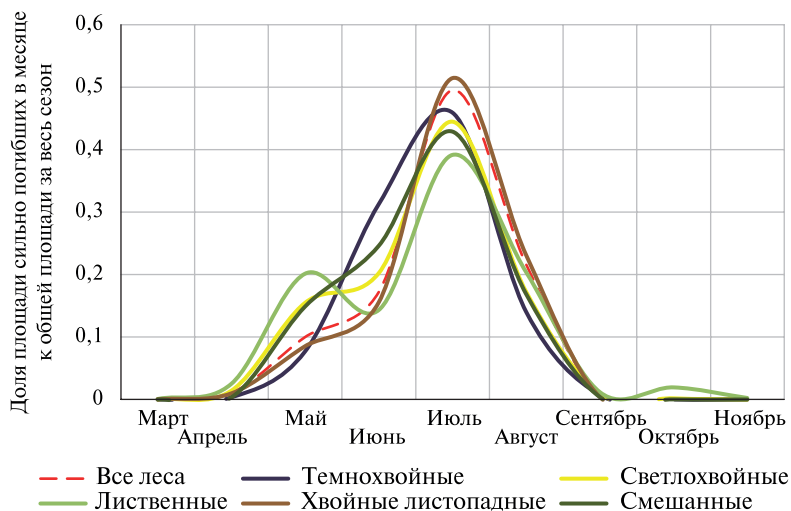


Рис. 14. Сезонная динамика доли средней площади сильно повреждённых лесов от общей площади повреждений рассматриваемого типа леса за весь сезон

Заключение

Таким образом, представленные в работе методы оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе данных об интенсивности горения позволили провести анализ особенностей динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI в. на территории РФ. При этом показано, что в анализируемый период наблюдался значимый рост летальности пожаров (более чем в два раза). Данный рост в основном обусловлен увеличением летальности пожаров, действующих в хвойно-листопадных лесах. Также можно отметить, что с начала XXI в. существенно возросла доля сильно повреждённых пожаров (5-й класс СКС). Всё это позволяет сделать вывод о значимом наблюдаемом тренде увеличения ущерба от лесных пожаров на территории РФ в XXI в. несмотря на то, что значимого тренда в площадях, пройденных пожарами, в то же время не наблюдается.

Также на основе предложенных методов проведён анализ сезонной динамики повреждений лесного покрова пожарами. Приведены данные для лесов с различными видами преобладающих пород и для пожаров, действующих в разные месяцы. Показано, что летальность весенних и летних пожаров может различаться почти в шесть раз. Это, в частности, приводит к тому, что на летние месяцы приходится более 80 % площадей сильных повреждений, связанных с лесными пожарами, при этом около 50 % таких площадей приходится на июль.

Следует отметить, что сформированная в рамках настоящей работы база данных с информацией о повреждениях лесов пожарами на территории РФ в XXI в. (БД FRPSD) в текущий момент интегрирована в Центр коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019). В настоящее время на основе VI-технологий (англ. Business Intelligence) (Кобец и др., 2015) ведётся разработка веб-интерфейсов, которые обеспечат проведение анализа, подобного представленному в данной статье о повреждениях лесов в XXI в. на территории любого региона РФ.

Работа выполняется при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Абушенко Н. А., Барталев С. А., Беляев А. И., Ершов Д. В., Захаров М. Ю., Лупян Е. А., Коровин Г. Н., Кошелев В. В., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Минько Н. П., Назиров Р. Р., Семенов С. М., Тащилин С. А., Флитман Е. В., Щетинский В. Е. Опыт и перспективы организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 89–95.
2. 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.
3. Барталев С. А., Ершов Д. В., Коровин Г. Н., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Щетинский В. Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 419–429.
4. Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
5. 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.
6. 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.
7. Буряк Л. В., Сухинин А. И., Каленская О. П., Пономарев Е. И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сибирский эколог. журн. 2011. № 3. С. 331–339.
8. 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. Вып. 2. Т. 2. № 2. С. 367–371.
9. Кобец Д. А., Балашов И. В., Данилов И. Д., Лупян Е. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А. Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
10. Коровин Г. Н., Андреев Н. А. Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
11. Лупян 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.
12. Лупян 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.
13. Лупян 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.
14. Лупян 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.
15. Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский эколог. журн. 2016. № 1. С. 38–46. DOI: 10.15372/SEJ20160104.
16. Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.
17. Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д. (2017а) Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS2017050.
18. Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О. (2017б) Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.

19. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, утверждённое приказом Рослесхоза № 523 от 29.12.07.2007.
20. *Стыценко 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.
21. *Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Иванова А. А. и др.* Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 6. С. 289–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
22. *Швиденко А. З., Шепаченко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение*. 2013. № 5. С. 50–61.
23. *Balzter H., George C. T., Rowland C. S., Gerard F., McCallum I., Shvidenko A., Schmullius C.* Forest fires in Central Siberia and their impact on emissions of greenhouse gasses // *Proc. Remote Sensing and Photogrammetric Soc.* 2004.
24. *Barnaba F., Angelini F., Curci G., Gobbi G. P.* An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. V. 11. Iss. 20. P. 10487–10501. DOI: 10.5194/acp-11-10487-2011.
25. *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: Atmospheres*. 2009. V. 114. Article D20302. DOI: 10.1029/2008JD011645.
26. *Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 87. P. 273–282. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
27. *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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>.
28. *Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
29. *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.
30. *Hua L., Shao G.* The progress of operational forest fire monitoring with infrared remote sensing // *J. Forestry Research*. 2017. V. 28. No. 2. P. 215–229. DOI: 10.1007/s11676-016-0361-8.
31. *Ichoku C., Kaufman Y. J.* A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V. 43. No. 11. P. 2636–2649. DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
32. *Kaufman Y. J., Justice C., Flynn L. et al.* Monitoring global fires from EOS-MODIS // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 1998. V. 103. P. 32215–32239. DOI: 10.1029/98JD01644.
33. *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: Atmospheres*. 2011. V. 116. Article D19303. DOI: 10.1029/2011JD015676.
34. *Li F., Zhang X., Kondragunta S. et al.* Hourly biomass burning emissions product from blended geostationary and polar-orbiting satellites for air quality forecasting applications // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 281. Article 113237. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113237.
35. *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.
36. *Mota B., Wooster M. J.* A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP) // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 206. P. 45–62. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
37. *Mottram G. N., Wooster M., Balzter H., George C., Gerrard F., Beisley J.* The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires // *Proc. 31st Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*. 2005. 4 p.
38. *Riggan P. J., Tissell R. G., Lockwood R. N. et al.* Remote measurement of energy and carbon flux from wildfires in Brazil // *Ecological Applications*. 2004. V. 14. Iss. 3. P. 855–872. DOI: 10.1890/02-5162.
39. *Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J.* The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. P. 3690–3707. DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.
40. *Ryan K. C.* Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // *Silva Fennica*. 2002. V. 36. No. 1. P. 13–39. DOI: 10.14214/sf.548.

41. Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M. et al. An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 9. Iss. 18. P. 6833–6847. DOI: 10.5194/acp-9-6833-2009.
42. 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. Vol. 86. P. 83–107. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.
43. Wooster M., Xu W., Nightingale T. Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 236–254. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.033.
44. Zheng Y., Zhang G., Tan S., Feng L. Research on progress of forest fire monitoring with satellite remote sensing // *Agricultural and Rural Studies*. 2023. V. 1. No. 2. Article 0008. <https://doi.org/10.59978/ar01020008>.

Assessment of damage to Russian forests by fires in the XXI century based on analysis of fire intensity using MODIS instrument

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

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

The paper analyzes the specifics of forest fire damages in Russia in the XXI century. The methods of forest damage and forest fires affected areas assessment based on combustion intensity information are briefly described. The main features of the forest fire and post-fire damage database generated based on MODIS observations for the period from 2001 to 2024 are discussed. Key specifics of post-fire forest damage dynamics observed in the XXI century in the Russian Federation are presented and analyzed. It is shown, that there has been a significant increase in fire mortality (more than twofold) during the period of study. This increase is mostly explained by action of fires in coniferous-deciduous forests. It is also noted, that the percentage of forests severely damaged by fires (average condition category 5) has increased significantly since the beginning of the XXI century. All this allows us to conclude that there is a significant increasing trend in damage from forest fires in the territory of the Russian Federation in the XXI century, despite the absence of such a trend in areas affected by fires. The work also presents and analyzes seasonal dynamics of damage to forest cover by fires. In particular, it is shown that summer months account for more than 80 % of areas of severe forest damage associated with fires, with about 50 % of such areas occurring in July.

Keywords: remote sensing, forest fires, forest fire monitoring, FRP, forest damage rate, forest fire seasonal mortality index

Accepted: 25.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249

References

1. Abushenko N. A., Bartalev S. A., Belaev A. I., Ershov D. V., Zakharov M. Yu., Loupian E. A., Korovin G. N., Koshelev V. V., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Min'ko N. P., Nazirov R. R., Semenov S. M., Tashchilin S. A., Flitman E. V., Shchetinskii V. E., Experience and prospects for organizing operational satellite monitoring of Russian territory for the purposes of forest fire protection services, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 3, pp. 89–95 (in Russian).
2. 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.
3. Bartalev S. A., Ershov D. V., Korovin G. N., Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Shchetinskii V. E., Forest Fire Satellite Monitoring Information System of Russian Federal Forestry Agency (status and development

- prospects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Iss. 5, Vol. 2, pp. 419–429 (in Russian).
4. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302 (in Russian).
 5. 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).
 6. 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).
 7. Buryak L.V., Sukhinin A.I., Kalenskaya O.P., Ponomarev E.I., Consequences of fires events in the ribbon-like pineries of the South Siberia, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2011, No. 3, pp. 331–339 (in Russian).
 8. 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, Vol. 2, pp. 367–371 (in Russian).
 9. Kobets D.A., Balashov I.V., Danilov I.D., Loupian E.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., The BI technologies to create analysis tools for satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 17–27 (in Russian).
 10. Korovin G.N., Andreev N.A., *Aviatsionnaya okhrana lesov* (Aerial safeguarding of forest), Moscow: Agropromizdat, 1988, 223 p. (in Russian).
 11. 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, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
 12. 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, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 13. 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, Vol. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
 14. 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, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
 15. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Wildfire occurrence in forests of the Altai-Sayan region under current climate changes, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2016, No. 1, pp. 38–46 (in Russian), DOI: 10.15372/SEJ20160104.
 16. Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Satellite detection of forest fires and geoinformation methods for calibrating of the result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415010054.
 17. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Yakimov N.D. (2017a), Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS2017050.
 18. Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Usataya Yu. O. (2017b), 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.
 19. *Rukovodstvo po provedeniyu sanitarno-ozdorovitel'nykh meropriyatii, utverzhdennoe prikazom Rosleskhoza No. 523 ot 29.12.07* (Guidelines for the implementation of sanitary and recreational activities, approved by order of Rosleskhoz No. 523 dated 12.29.07), 2007.
 20. 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).
 21. Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Ivanova A.A., Forest burnt area assessment possibilities in regions of Russia based on active fires detection by satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 289–298 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
 22. Shvidenko A.Z., Shechepashchenko D.G., Climate change and forest fires in Russia, *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 50–61 (in Russian).
 23. Balzter H., George C.T., Rowland C.S., Gerard F., McCallum I., Shvidenko A., Schmillius C., Forest fires in Central Siberia and their impact on emissions of greenhouse gasses, *Proc. Remote Sensing and Photogrammetric Soc.*, 2004.

24. Barnaba F., Angelini F., Curci G., Gobbi G.P., An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, Iss. 20, pp. 10487–10501, DOI: 10.5194/acp-11-10487-2011.
25. 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: Atmospheres*, 2009, Vol. 114, Article D20302, DOI: 10.1029/2008JD011645.
26. Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J., An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 87, pp. 273–282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
27. Giglio L., Schroeder W., Justice C.O., The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, 2016, *Remote Sensing of Environment*, V. 178, pp. 31–41, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>.
28. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change, *Science*, 2013, Vol. 342, Iss. 6160, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
29. 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, Vol. 22, No. 7, pp. 910–918, DOI: 10.1071/WF12087.
30. Hua L., Shao G., The progress of operational forest fire monitoring with infrared remote sensing, *J. Forestry Research*, 2017, Vol. 28, No. 2, pp. 215–229, DOI: 10.1007/s11676-016-0361-8.
31. Ichoku C., Kaufman Y.J., A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 11, pp. 2636–2649, DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
32. Kaufman Y.J., Justice C., Flynn L. et al., Monitoring global fires from EOS-MODIS, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, Vol. 103, pp. 32215–32239, DOI: 10.1029/98JD01644.
33. 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: Atmospheres*, 2011, Vol. 116, Article D19303, DOI: 10.1029/2011JD015676.
34. Li F., Zhang X., Kondragunta S. et al., Hourly biomass burning emissions product from blended geostationary and polar-orbiting satellites for air quality forecasting applications, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 281, Article 113237, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113237.
35. 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, Vol. 10, No. 4, pp. 329–342, DOI: 10.1071/WF01032.
36. Mota B., Wooster M.J., A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP), *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 206, pp. 45–62, DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
37. Mottram G.N., Wooster M., Balzter H., George C., Gerrard F., Beisley J., The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires, *Proc. 31st Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*, 2005, 4 p.
38. Riggan P.J., Tissell R.G., Lockwood R.N. et al., Remote measurement of energy and carbon flux from wildfires in Brazil, *Ecological Applications*, 2004, Vol. 14, Iss. 3, pp. 855–872, DOI: 10.1890/02-5162.
39. Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O., Ju J., The Collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 3690–3707, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.
40. Ryan K.C., Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems, *Silva Fennica*, 2002, Vol. 36, No. 1, pp. 13–39, DOI: 10.14214/sf.548.
41. Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M. et al., An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, Vol. 9, Iss. 18, pp. 6833–6847, DOI: 10.5194/acp-9-6833-2009.
42. 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, No. 86, pp. 83–107, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.
43. Wooster M., Xu W., Nightingale T., Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets, *Remote Sensing of Environment*, 2012, No. 120, pp. 236–254, DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.033.
44. Zheng Y., Zhang G., Tan S., Feng L., Research on progress of forest fire monitoring with satellite remote sensing, *Agricultural and Rural Studies*, 2023, Vol. 1, No. 2, Article 0008, <https://doi.org/10.59978/ar01020008>.