

Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга

Е. А. Лупян^{1,2}, Д. В. Лозин^{1,2}, И. В. Балашов¹,
С. А. Барталев^{1,3}, Ф. В. Стыщенко¹

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

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

³ *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997, Россия*

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости степени повреждения лесов пожарами от характеристик интенсивности их горения по данным спутникового мониторинга системой MODIS. В качестве меры интенсивности пожара в работе используется радиационная мощность излучения огня FRP (*англ.* Fire Radiative Power), нормированная на площадь элемента наблюдения (FRPS). В работе предложен подход, позволяющий строить зависимости степени повреждений лесов от значений FRPS. Подход разработан на основе сравнения информации о FRPS, получаемой с помощью данных прибора MODIS, и информации послепожарной оценки степени повреждения лесов. Проведён анализ накопленных в Институте космических исследований РАН данных по всей территории России за период с 2006 по 2021 г. Это позволило выполнить анализ значительного числа участков (более 10 млн пикселей), в которых имеется информация о FRPS и степени повреждения лесов. При этом по каждому участку также анализировались данные о времени (сезоне), в которое действовал пожар, и преобладающем типе лесного покрова. Наличие этой информации и представительной статистики позволило получить оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения с учётом типа лесного покрова и времени действия пожара. В работе представлены полученные зависимости и краткий анализ их особенностей. На основе использования полученных зависимостей предложена новая методика оперативной оценки площади пирогенной гибели лесов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пожар, FRP, степень повреждения лесов, спутниковый мониторинг

Одобрена к печати: 06.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232

Введение

Получение объективной оценки степени повреждения лесов пожарами представляется важной задачей, актуальность решения которой сильно возросла в последние годы. Это произошло в том числе в связи с проблемами, связанными с мониторингом выбросов углерода в атмосферу, происходящих в результате действия природных и в первую очередь лесных пожаров (Ichoku et al., 2005; Kaiser et al., 2012; Wooster et al., 2005). Следует отметить, что для учёта данных выбросов углерода необходимо получать информацию по огромным территориям, на которых действуют природные пожары. Решение этой задачи фактически невозможно без использования методов и средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса.

При создании таких методов и средств следует учитывать, что современные возможности ДЗЗ не обеспечивают достаточной частоты и точности наблюдений для проведения оценок выбросов путём прямого измерения концентраций парниковых газов. Поэтому в настоящее время подобные оценки выполняются на основе контроля состояния растительного покрова, анализа его динамики и повреждений. Особое значение при этом имеет оценка повреждений

лесного покрова, вызванных пожарами, поскольку во многом именно они определяют значительную часть выбросов углерода. Построению методов оценки таких повреждений в последние годы посвящено достаточно много работ (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013; Heward et al., 2013; Morgan et al., 2001; Ryan, 2002). Их можно условно разделить на два основных направления: 1) оценки повреждений на основе анализа наблюдений до и после действия пожаров; 2) оценки интенсивности горения. Первое направление позволяет получить довольно точные оценки повреждений (см., например, публикацию (Стыценко и др., 2013)), однако эта информация может быть получена только через некоторый период после завершения пожаров (иногда через несколько месяцев). Работы, ведущиеся в России в данном направлении, позволили в том числе получить информацию о повреждениях лесов пожарами за период с 2006 г. по настоящее время. Второе направление потенциально может давать оперативные оценки повреждений сразу после завершения периода действия конкретного пожара. Кроме того, однородные базы данных высококачественных наблюдений активного горения на основе данных прибора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Giglio et al., 2016) в целом покрывают период с 2001 г. по настоящее время (см., например, исследования (Лупян и др., 2017; Justice et al., 2011)). Этому направлению также посвящено значительное число работ (например, (Пономарев и др., 2017; Heward et al., 2013)). Пожалуй, основная задача данного направления заключается в построении зависимостей между дистанционно определяемыми характеристиками интенсивности пожаров (обычно радиационной мощности FRP (*англ.* Fire Radiative Power)) (Mottram et al., 2005; Wooster et al., 2003), повреждениями лесов и/или выбросами углерода. Так, например, в работах (Boschetti, Roy, 2009; Kumar et al., 2011) была выявлена высокая корреляция фиксируемого теплоизлучения с количественными характеристиками сгорающей во время пожаров биомассы. Например, в работе (Mottram et al., 2005) было проведено сравнение данных FRP с картами гарей, оставленных пожарами, а в статье (Пономарев и др., 2017) выполнено сопоставление значений мощности теплоизлучения пожаров со степенью повреждения растительного покрова по данным Landsat-8/OLI (*англ.* Operational Land Imager). В то же время в этих работах, как и в большинстве подобных исследований, до настоящего времени использовались достаточно ограниченные ряды данных наблюдений, для которых имелась информация как об интенсивности горения, так и о повреждениях лесов и/или измерениях выбросов углерода. Также работы обычно сосредотачивались на анализе данных по довольно ограниченным территориям. Это в конечном итоге затрудняет получение таких зависимостей для различных типов пожаров, действующих в разных условиях. Поэтому до сих пор остаётся актуальным развитие методов построения обсуждаемых связей, которые основывались бы на анализе больших наборов данных для построения статистически обоснованных зависимостей степени повреждения лесного покрова от интенсивности горения (FRP) для различных территорий, пожарных сезонов и типов лесного покрова.

Настоящая работа посвящена исследованию связи интенсивности горения и степени повреждений лесов, вызванных действием пожаров. При этом как мера интенсивности пожара используется FRP, нормированная на площадь элемента наблюдения (далее — FRPS). Предложен подход, позволяющий строить зависимости повреждения лесного покрова от FRPS. В подходе используется информация о FRPS, получаемая на основе баз данных, сформированных в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) с помощью данных прибора MODIS о наблюдении горения на территории России (см. например, работы (Галеев и др., 2005; Лупян и др., 2021)) и информации о степени повреждения лесного покрова на основе сравнения его состояния до и после пожаров, описанного в публикации (Стыценко и др., 2013). Используются данные, полученные по всей территории России за период с 2006 по 2021 г. Это позволило провести анализ значительного числа участков (более 10 млн точек), в которых имеется информация о FRPS наблюдавшегося горения, и данных о степени повреждения лесного покрова. При этом по каждому анализируемому участку (точке) также анализировалась информация о времени (сезоне), в которое действовал пожар, и преобладающем типе лесного покрова. Наличие данной информации и представительной статистики позволило получить вероятности гибели лесов от интенсивности пожара с учётом

типа лесного покрова и времени (сезона) действия пожара. В работе представлены полученные зависимости и краткий анализ их особенностей.

Также в работе предложена методика оперативной оценки площадей погибшего лесного покрова на основе использования полученных зависимостей. С помощью предложенной схемы проведена оценка площадей погибших в различные годы лесов на территории РФ и проведено сравнение данной информации с оценками, полученными на основе сравнения наблюдений до и после пожаров.

Используемые данные

Для выполнения данной работы использовалась информация об интенсивности горения, повреждениях лесов пожарами и типах лесного покрова, накопленная в архивах Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). При этом использовались данные по всей территории России за период с 2006 по 2021 г. Особенности этих данных кратко описаны в настоящем разделе.

Данные об интенсивности горения

Как уже отмечалось, в качестве меры интенсивности пожаров в работе использовалось значение FRP. Эта характеристика была впервые введена в исследовании (Kaufman, Justice, 1998) для оценки мощности теплового излучения от горения (пожара), наблюдающегося в конкретной точке (пикселе) спутникового изображения. В данной работе была предложена формула оценки FRP, основанная на анализе измерений в тепловом канале (4 мкм) с учётом фоновых значений, наблюдающихся в точках, в которых горение отсутствует. Позже формула оценки была доработана (Mottram et al., 2005; Wooster et al., 2003, 2012) для обеспечения учёта того факта, что горение может охватывать не весь пиксель, а его часть. При этом FRP является суммарным тепловым потоком от всей зоны горения, входящей в конкретный пиксель, т.е. потоком излучения, связанным с горением от всей площади пикселя.

Для выполнения настоящей работы использовалась база данных (БД) с информацией о природных пожарах, которые были детектированы на территории России в период с 2001 по 2021 г., сформированной на основе архива наблюдения «горячих точек» (ГТ), детектированных на основе шестой коллекции данных приборов MODIS (Collection 6 MODIS Active Fire/Hotspot Data (MCD14DL)) (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl>). Особенности построения данной БД достаточно подробно описаны, в частности в работе (Галеев и др., 2005). БД содержит в том числе информацию о всех ГТ на территории России за обсуждаемый период. Для каждой ГТ в БД имеется информация о FRP, наблюдавшейся в данной точке, которая рассчитывалась на основе метода, описанного в публикации (Wooster et al., 2003, 2012), по формуле:

$$FRP = \frac{A_{pix} \sigma}{a} (L_4 - \bar{L}_4),$$

где A_{pix} — площадь пикселя MODIS (которая варьируется как функция угла сканирования); $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — постоянная Стефана–Больцмана; L_4 — энергетическая яркость термически активного пикселя (цели) в канале 21 радиометра MODIS $\lambda \approx 4 \text{ мкм}$; $\bar{L}_4$ — энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне; $a = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$ — эмпирическая постоянная.

Как уже отмечалось во введении, FRP характеризует поток энергии, приходящей со всей площади отдельной ГТ (пикселя). Поэтому изменение площади пикселя для «однородно горящей» территории должно приводить к росту FRP по сравнению с наблюдающейся для пикселей более малых размеров. Для того чтобы можно было сопоставлять в анализе информацию, приходящую от пикселей разного размера, необходимо использовать не значение FRP,

а это значение, поделённое на площадь пикселя (FRPS), т.е. не суммарный поток энергии от пикселя, а удельный поток с единицы площади для наблюдаемой ГТ. Этот факт отмечался в различных работах, например в исследовании (Пономарев и др., 2017).

Данные о степени повреждения лесов пожарами

В работе использовалась также информация о степени повреждения лесов пожарами, полученная на основе подходов, предложенных в публикациях (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013). Эти подходы основаны на том, что под воздействием огня происходит снижение содержания хлорофилла и влажности древесных растений, что приводит к изменению их отражательной способности в видимой, ближней инфракрасной (ИК) и средней ИК областях спектра (White et al., 1996). Исследования показали, что для оценки степени повреждения лесов на основе спутниковых данных может достаточно эффективно использоваться нормализованный разновременной коротковолновый вегетационный индекс RdSWVI (*англ.* Relative difference Short Wave Vegetation Index) (Miller, Thode, 2007), который вычисляется следующим образом:

$$\text{RdSWVI} = \frac{\text{SWVI}_{pre} - \text{SWVI}_{post}}{\sqrt{\text{SWVI}_{pre} + 1}},$$

$$\text{SWVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{SWIR}}}{R_{\text{nir}} + R_{\text{swir}}},$$

где R_{NIR} и R_{SWIR} — значения коэффициента отражения поверхности в ближнем и среднем ИК-диапазонах длин волн соответственно; SWVI_{pre} — значение индекса, полученное по изображению на заданную дату в год, предшествующий пожару; SWVI_{post} — значение индекса после воздействия огня.

Результаты работ показали, что между RdSWVI и степенью повреждения лесов (характеризуется величиной средневзвешенной категории состояния — СКС) (Руководство..., 2007) наблюдается связь, которая может быть выражена линейной зависимостью (Барталев и др., 2010):

$$\text{СКС} = a \cdot \text{RdSWVI} + b,$$

где коэффициенты a и b определяются экспериментально на основе совместного анализа данных спутниковых наблюдений и наземных лесопатологических обследований. Наличие этой связи позволило реализовать метод оценки степени повреждений лесов пожарами на основе данных прибора MODIS и сформировать БД таких повреждений на территории России за период с 2006 по 2021 г.

Традиционно устанавливаются следующие верхние границы интервалов значений СКС для отнесения насаждения к категориям состояния: 1,5 — здоровое насаждение (класс 1); 2,5 — ослабленное (класс 2); 3,5 — сильно ослабленное (класс 3); 4,5 — усыхающее (класс 4). Насаждения со средневзвешенной категорией состояния выше 4,5 относятся к погибшим (класс 5).

Информация о лесном покрове

Для анализа повреждений пожарами лесов различных типов использовалась информация о преобладающем типе лесного покрова, получаемая по данным прибора MODIS на основе подходов, подробно описанных в публикациях (Барталев и др., 2011; Уваров, Барталев, 2010). В настоящей работе использовался ежегодно обновляемый ряд карт по всей территории Российской Федерации, содержащий информацию об основных типах лесного покрова (Барталев и др., 2016).

Методика сопоставления данных

При сопоставлении информации о FRPS и постпожарных повреждениях лесов следует учитывать, что эти данные имеют различную логику наблюдений и разное пространственное разрешение. Поэтому оба вида информации необходимо привести к представлению, позволяющему проводить их сопоставление.

Проблема различной логики наблюдений связана с тем, что горение может наблюдаться в одной и той же точке некоторое время. При этом для таких точек будет иметься не одно измерение FRPS, а несколько. В то же время информация о постпожарном повреждении лесов формируется как одно значение для заданной точки. Таким образом, фактически требуется сопоставить временной ряд FRPS с «одномоментными» данными о повреждениях лесного покрова. Для выполнения такого сопоставления было предложено проводить сопоставление максимального значения FRPS в ряду наблюдений для конкретного пожара со значением постпожарного повреждения лесного покрова. Логика такого сопоставления основывается на том, что в момент максимальной интенсивности горения происходит «максимальное» повреждение леса на анализируемом участке. Именно этот уровень повреждения и будет оценён по завершению пожара по спутниковым данным.

Для реализации такого сопоставления было предложено для каждого пожара после его завершения осуществлять построение постпожарных карт FRPS. Каждой точке такой карты приписывается максимальное значение FRPS, зарегистрированное за время действия пожара или за пожароопасный сезон (с учётом того, что фактически информация постпожарных повреждений, которая использовалась для проведения сопоставления, также фактически является интегрированной информацией за весь сезон).

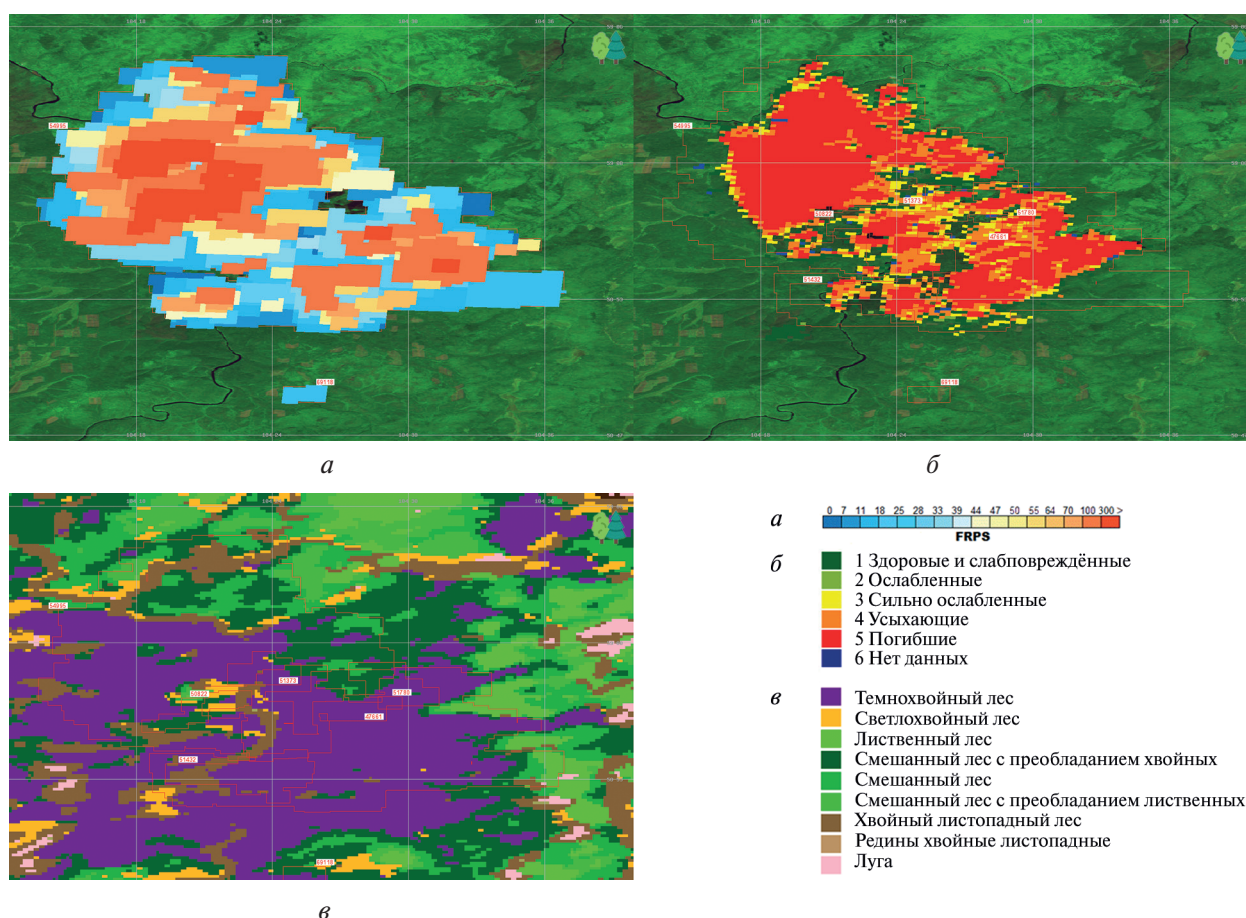


Рис. 1. Пример сопоставляемых растровых карт для области пожара, действовавшего на территории Тунгусско-Чунского р-на Красноярского края в период с 5 по 13 августа 2018 г.: а — постпожарная карта FRPS; б — карта СКС; в — карта типов лесного покрова

Отметим, что описанная выше информация о лесном покрове и его повреждениях получается на основе данных прибора MODIS и хранится в растровом виде в равновеликой координатной проекции Альберса с размером одного пикселя 230 м. Для максимально точного сопоставления разных данных постпожарные карты FRPS строились в той же проекции и с тем же разрешением, хотя изначально разрешение данных в каналах, которые используются для детектирования горения, не лучше $1,1 \times 1,1$ км. Таким образом, в области каждого пожара имеется ряд различных данных (растровых карт) для сопоставления. Пример таких карт для конкретного пожара представлен на *рис. 1* (см. с. 221).

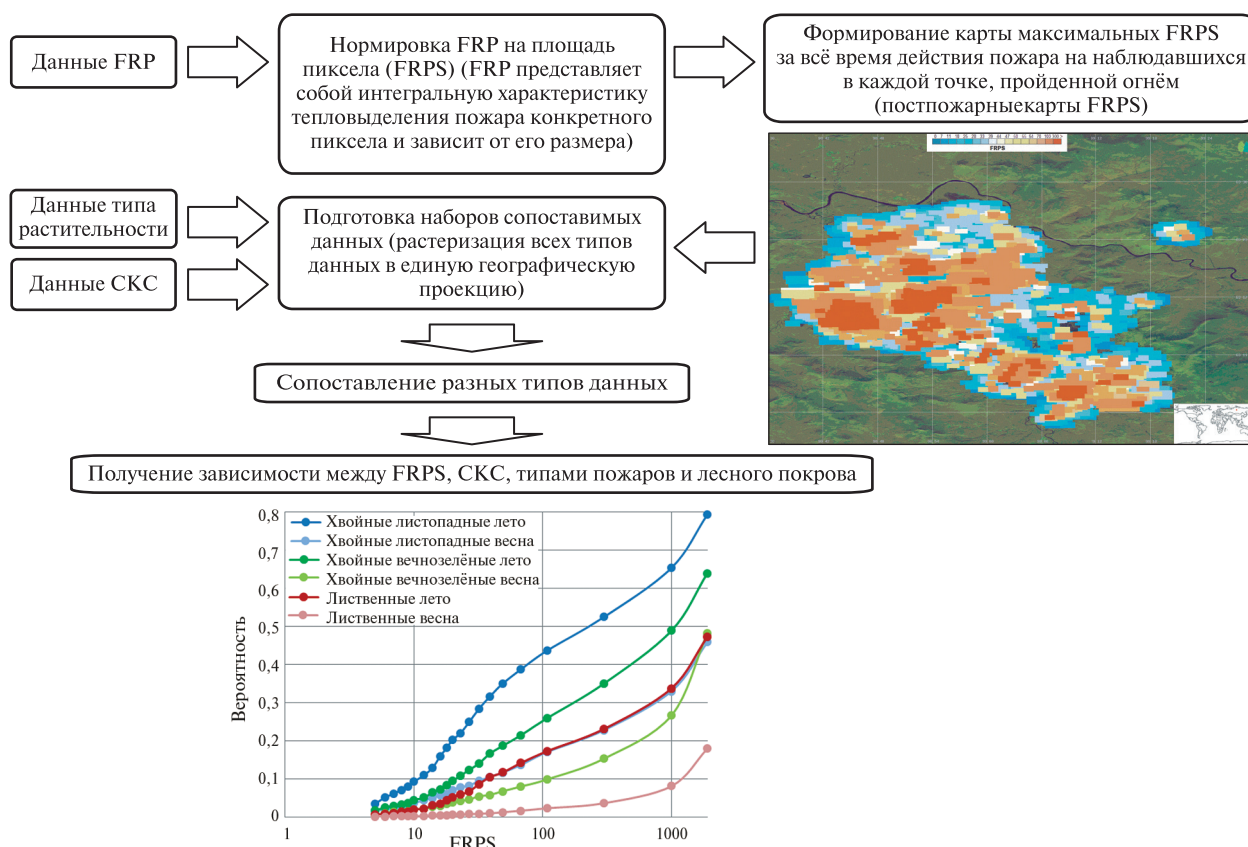


Рис. 2. Общая схема процесса сопоставления данных

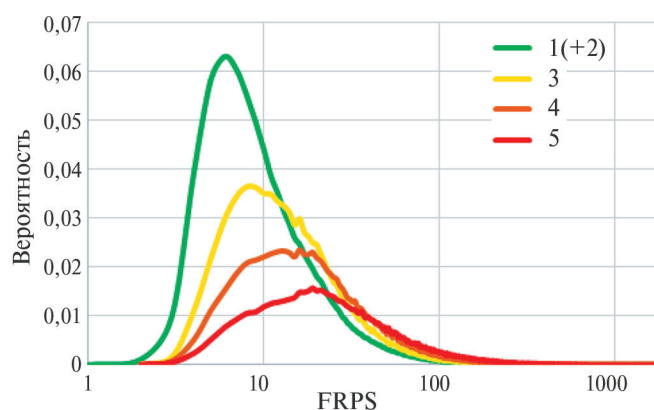
После приведения всех данных в один вид появилась возможность попиксельного сравнения полученных слоёв для каждого года. Это позволило проводить простое сопоставление между FRPS, СКС и типом лесного покрова. Общая схема процесса сопоставления данных представлена на *рис. 2*.

Анализ связи степени повреждения лесов и FRPS

Описанная в предыдущем разделе схема позволила провести массовое сопоставление информации о FRPS, наблюдавшихся во время действия пожаров, со степенью повреждения лесов на участках горения. Такое сопоставление было проведено для наблюдений по территории РФ за период с 2006 по 2021 г. Всего было проанализировано около 36 млн точек построенных постпожарных карт, в которых имеется информация о FRPS. Для этих точек был определён класс повреждений и тип лесного покрова. Следует отметить, что точки, в которых был зафиксирован FRPS, но отсутствовало значение СКС, относились к классу неповреждённых лесов («здоровое насаждение»). Различные зависимости, которые были получены в результате данного сопоставления, представлены в настоящем разделе.

Распределения FRPS для разных классов повреждений лесов пожарами

Анализ распределений наблюдаемых FRPS для точек, относящихся к различным классам категорий состояния лесного покрова, приведён на *рис. 3*. Здесь и далее 1-й и 2-й классы будут объединены. Это связано с тем, что в используемых наборах данных об СКС эти классы достаточно слабо разделяются. Хорошо видно, что распределения для разных классов довольно сильно различаются. Для классов, соответствующих сильным повреждениям, распределения смещаются в сторону более высоких значений FRPS (включая положения пиков). Также наблюдается устойчивый рост средних значений FRPS по мере увеличения класса повреждений (*таблица*). Особенно сильно сдвинуто в область больших FRPS распределение для 5-го класса, соответствующего погибшим в год пожара лесам. Также среднее значение FRPS для 5-го класса повреждений лесов значительно выше, чем для других классов. В целом всё это подтверждает вывод, сделанный многими исследователями, о существовании устойчивой связи между интенсивностью горения и степенью повреждения лесов. В то же время следует отметить, что представленные распределения показывают, что не существует какого-то однозначного порога FRPS, после которого лесной покров следует считать погибшим, а до которого только повреждённым. Хорошо видно, что даже при достаточно малых значениях FRPS (<50) может наблюдаться гибель лесного покрова, и она может быть существенной. В то же время даже при достаточно больших значениях FRPS (около 100) на части территорий может не наблюдаться «полной гибели» лесного покрова (присутствовать не только 5-й, но и другие классы). Эти эффекты, видимо, отчасти могут объясняться тем, что в пикселе прибора MODIS, по которому производится оценка FRPS, может происходить горение только части территории. В целом данные эффекты, на наш взгляд, нельзя не учитывать. Поэтому целесообразно для проведения оценок повреждения лесов на основе анализа наблюдаемой интенсивности горения не пытаться найти пороговые значения FRPS, соответствующие разным классам, а оценивать вероятность наблюдения разных классов для конкретной наблюдаемой интенсивности горения (FRPS).



Среднее значение FRPS для различных классов категории состояния

Класс СКС	Среднее FRPS
1(+2)	31,4
3	37,8
4	56,4
5	117,0

Рис. 3. Распределение FRPS горячих точек с 2006 по 2021 г. на территории РФ различных классов категорий состояния лесного покрова. Распределения нормированы на общее число точек в соответствующем классе

Поскольку наибольшее значение в задачах оценки последствий лесных пожаров представляет оценка гибели лесного покрова от пожаров, в данной работе мы далее сосредоточимся на анализе именно этой проблемы. На основе имеющихся результатов сопоставления FRPS и классов СКС лесов была построена зависимость вероятности гибели (наблюдения 5-го класса) леса в зависимости от интенсивности наблюдавшегося горения. Для этого были выбраны интервалы FRPS, внутри которых за все годы было зарегистрировано примерно одинаковое количество горячих точек с соответствующим значением FRPS (под горячей точкой понимается пиксель постпожарной карты FRPS). Далее, внутри каждого из этих

интервалов рассчитывалась доля содержания горячих точек, в которых наблюдалась гибель леса (5-й класс). Значения долей приписывались верхним границам созданных диапазонов. Полученная информация позволяет построить зависимость вероятности гибели леса (наблюдения 5-го класса) от значения FRPS. Эта зависимость представлена на *рис. 4*. На полученной зависимости хорошо видно увеличение вероятности гибели леса с увеличением интенсивности горения пожара (максимального значения FRPS в анализируемой точке пожара за всё время его действия).

В то же время достаточно хорошо известно, что уровень гибели лесов от пожаров может зависеть от различных факторов, например от периода в пожароопасном сезоне, в который действовал пожар (см., например, работу (Барталев, Сыченко, 2021)), и породной структуры лесов, в которых действуют пожары (Барталев и др., 2017). Поэтому нами был проведён анализ зависимости вероятности гибели лесов с учётом данных факторов.

На *рис. 5* (см. с. 225) представлены зависимости, полученные для весенних (действовавших в период до 15 июня) и летних (действовавших в период после 15 июня) пожаров. На графиках хорошо видно, что вероятность гибели леса при тех же значениях FRPS в весенний период ниже, чем в летний. Это может быть связано в том числе с тем, что в весенний период значительный вклад в наблюдаемый тепловой поток дают быстро распространяющиеся низовые пожары, а в летний период высокие FRPS в основном, видимо, соответствуют верховым пожарам, которые приводят к значительной гибели леса. Это в целом согласуется с объяснением особенностей распределения по FRPS точек, в которых наблюдается гибель растительного покрова (5-й класс СКС) для весенних и летних пожаров, представленного на *рис. 6* (см. с. 225). На нём хорошо видно, что доля погибших лесов для весенних пожаров смещена в область достаточно малых FRPS, что, очевидно, связано с относительно низкой гибелью лесов в весенний период и большим числом пожаров с малыми FRPS. При этом следует учитывать, что, как показал анализ имеющихся данных (информация наблюдений с 2001 по 2021 г.), для весенних пожаров только около 3 % точек, в которых наблюдалось горение (есть измерения FRPS), соответствовали 5-му классу СКС. Для летних пожаров это значение возрастает до ~20 %.

На *рис. 7* (см. с. 225) представлены зависимости вероятности гибели лесов от пожаров для основных групп древесных пород, встречающихся на территории России. На представленных графиках также хорошо видно, что на зависимость вероятности гибели лесов от интенсивности пожара достаточно сильное влияние оказывает породная структура повреждённого огнём насаждения. Отметим, что при оценке устойчивости той или иной породы к воздействию пожаров следует учитывать не только вероятность гибели леса в зависимости от FRPS, но и вероятность наблюдения высоких FRPS в лесах конкретного типа. Именно два этих фактора в совокупности в конечном итоге определяют процент повреждения лесов конкретного типа.

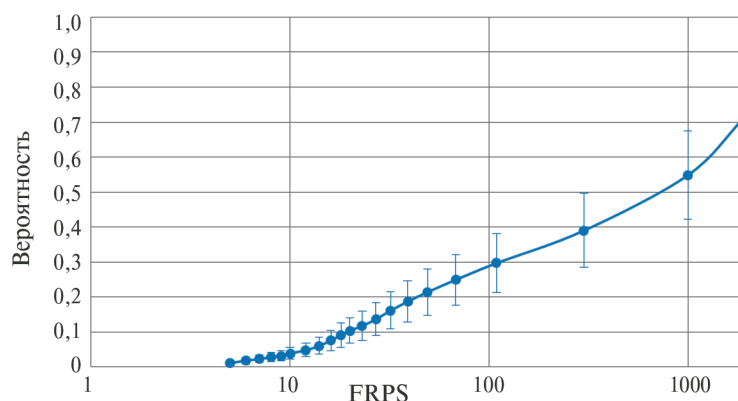


Рис. 4. Вероятность гибели леса (5-го класса состояния) в зависимости от интенсивности горения (FRPS). На графике отображено стандартное отклонение значений, полученных в различные годы, от среднего значения вероятности гибели за весь анализируемый период (2006–2021)

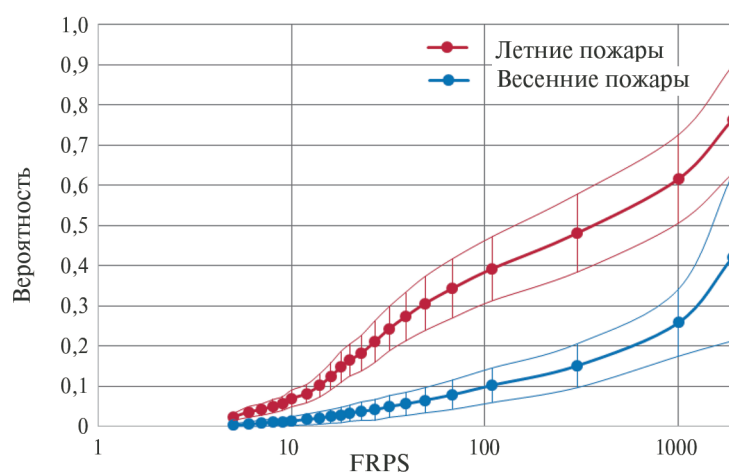


Рис. 5. Вероятность гибели лесов при различных значениях FRPS в зависимости от сезона

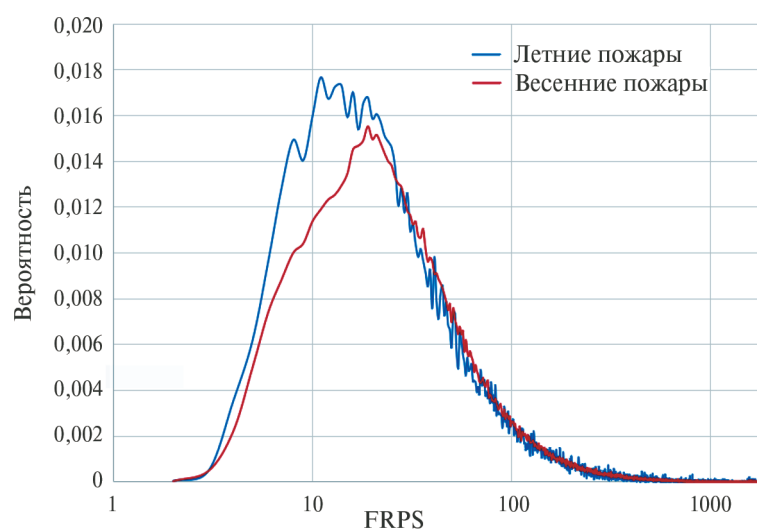


Рис. 6. Распределение по FRPS точек, в которых наблюдается гибель лесов (5-й класс СК), для весенних и летних пожаров

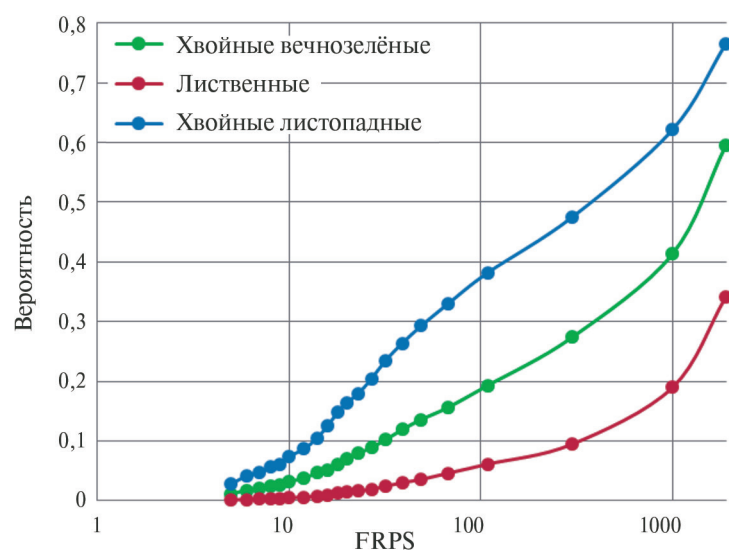


Рис. 7. Вероятность гибели лесов разных групп древесных пород в зависимости от интенсивности пожаров (FRPS)

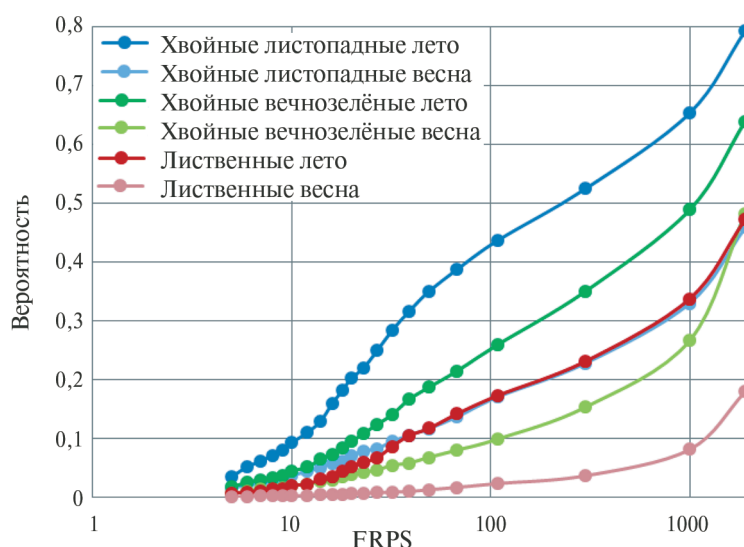


Рис. 8. Вероятность гибели леса в зависимости от интенсивности горения (FRPS) с учётом сезона и групп древесных пород на территории действия пожара

На рис. 8 представлены зависимости, полученные при одновременном учёте как периода, в который действует пожар, так и преобладающей породы на территории действия пожара. На наш взгляд, именно эти зависимости и следует использовать при построении оперативных оценок гибели лесов от пожаров на основе наблюдения интенсивности горения.

Оценки повреждений лесов на основе информации об интенсивности горения

С использованием полученных зависимостей вероятности гибели лесов от FRPS с учётом времени действия пожара и группы древесных пород повреждённых огнём насаждений может быть предложена следующая схема оценки площадей погибших лесов. На основе постпожарных карт FRPS подсчёт площади погибших лесов (лесов, в которых наблюдается 5-й класс СКС) производится суммированием площади всех точек (пикселей), в которых наблюдался FRPS, умноженных на вероятность гибели леса в конкретном пикселе. Такой подход основан на предположении, что в конкретном пикселе происходит гибель не всего лесного покрова, а только его части, в зависимости от значения FRPS, которое наблюдалось в пикселе. При получении оценок площади погибших лесов на основе постпожарных карт FRPS следует также учитывать, что не вся территория пикселя, полученная по данным прибора MODIS, может быть покрыта лесом. Поэтому для каждого пикселя следует учитывать лишь покрытую лесом площадь, находящуюся в нём. Для этого использовалась карта лесного покрова, полученная на основе данных спутников Landsat (Hansen et al., 2013).

Следует отметить, что использование при таком расчёте зависимостей вероятности гибели лесов от значения FRPS, учитывающих сезон действия лесных пожаров и тип (преобладающую породу) для конкретного пикселя, может приводить к существенно отличающимся оценкам площадей гибели лесов. Это хорошо видно на рис. 9 (см. с. 227). При этом максимальные расхождения наблюдаются в годы значительных изменений пропорций весенних и летних пожаров (рис. 10, см. с. 227), которые также приводят к изменению пропорций пожаров, проходящих на территориях, покрытых различными древесными породами. Совместный анализ данных, представленных на рис. 9 и 10, наглядно показывает, что отсутствие учёта различий вероятности гибели лесов при разных FRPS, связанных с сезонностью и различными породами, в годы, когда преобладают весенние пожары, приводит к завышению оценок площадей погибшего леса, а в годы преобладания летних пожаров, наоборот, к занижению таких оценок.

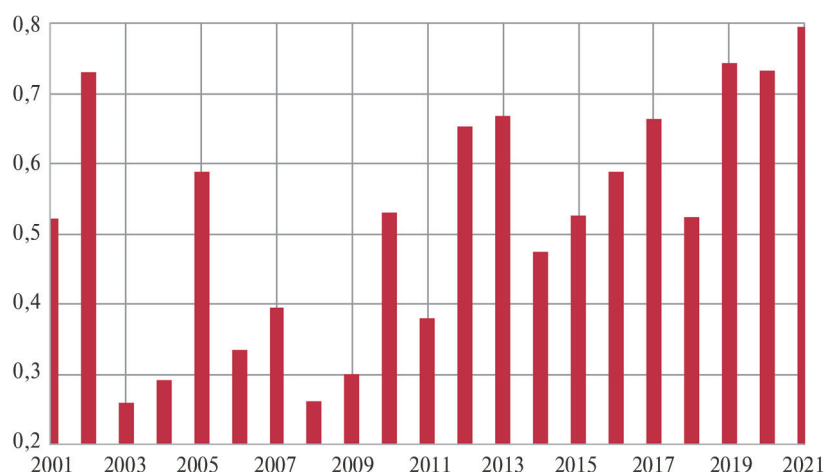


Рис. 9. Доля горячих точек, относящихся к летним пожарам

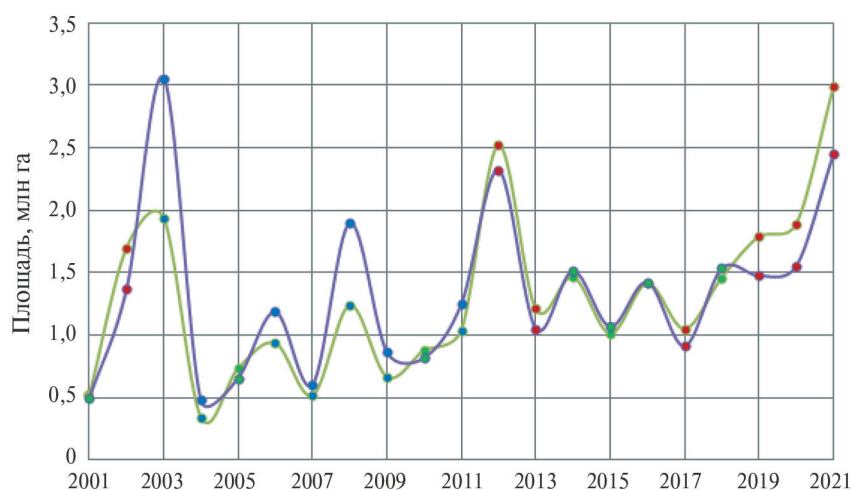


Рис. 10. Оценка площади погибших лесов на территории РФ с 2001 по 2021 г. Фиолетовый график — без учёта зависимости гибели от сезона действия пожара и типа леса, в котором действовал пожар; зелёный график — с учётом зависимости от сезона и типа леса. Цвет точек на графике отображает величину доли горячих точек, относящихся к летним пожарам: синий цвет — доля меньше 40 %, зелёный — от 40 до 60 %, красный — больше 60 %

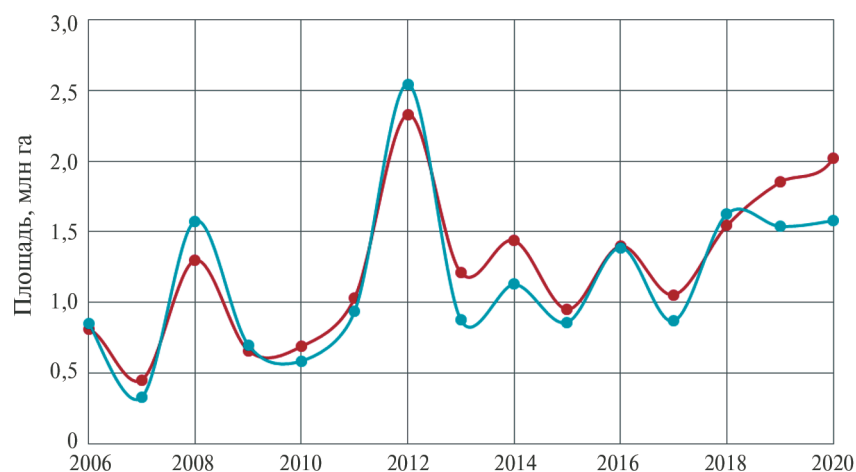


Рис. 11. Оценки площади погибших лесов на территории РФ с 2006 по 2020 г., полученные на основе анализа FRPS (красный цвет) и метода, основанного на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров, предложенного в работе (Стыценко и др., 2013) (голубой цвет)

Следует также отметить, что оценки площади погибших лесов (территорий, на которых наблюдается 5-й класс СКС), получаемые на основе предложенного метода, достаточно хорошо согласуются с оценками площадей на основе выделения постпожарных повреждений по результатам анализа изменений лесного покрова после пожаров. Это хорошо видно из данных, представленных на *рис. 11* (см. с. 227). Полученная скорректированная оценка площади погибших от пожаров лесов по данным MODIS (230 м) учитывала влияние следующих двух видов погрешностей:

- погрешностей определения значения СКС лесов в пикселе MODIS;
- погрешностей, связанных с пространственным разрешением данных MODIS, поскольку на соответствующей пикселю территории могут находиться участки леса различных категорий состояния.

Коррекция погрешностей определения СКС лесов в пикселе MODIS была выполнена на основе их сравнения с результатами наземного обследования повреждённых насаждений СКС и анализа спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (10–30 м) для фильтрации спектрально неоднородных участков. Оценка погрешностей, связанных с пространственным разрешением данных MODIS, была выполнена на основе анализа распределения значений СКС, полученных по данным высокого пространственного разрешения для различных классов повреждения по данным MODIS.

Выводы

Таким образом, выполненная работа позволила установить следующее:

- вероятность гибели лесов (5-й класс СКС) имеется даже для пожаров с достаточно низкой интенсивностью горения ($FRPS \approx 10$), поэтому при оценках гибели лесов от пожаров с использованием анализа их интенсивности нельзя пользоваться пороговыми методами, в которых утверждается, что до какого-то значения интенсивности практически не происходит гибели лесов, а после достижения данного значения происходит практически полная гибель лесного покрова;
- при повышении интенсивности горения вероятность гибели лесов устойчиво растёт, что хорошо согласуется с результатами значительного числа работ (Пономарев, 2017; Morgan et al., 2001; Ryan, 2002), в которых показано, что гибель лесного покрова связана с интенсивностью лесных пожаров;
- вероятность гибели лесов от $FRPS$ существенно зависит от сезона, в который действует пожар, и типа лесного покрова (преобладающей породы) территории, на которой действует пожар.

Все перечисленные выше факторы следует учитывать при проведении оценок повреждений лесного покрова и выбросов углерода в атмосферу, связанных с лесными пожарами, на основе данных об интенсивности пожара ($FRPS$). Без учёта данных факторов могут возникать значительные (в разы) ошибки в оценках.

В работе на основе анализа наблюдений лесных пожаров на всей территории России за период с 2006 по 2021 г. получены зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности пожаров с учётом как сезонных особенностей, так и типов лесов, в которых действовал пожар. На основе данных зависимостей предложен метод оценки площадей погибших лесов. Одним из преимуществ предложенного метода выступает возможность делать оперативные оценки гибели лесов не только в момент завершения пожара, но и по мере его развития. При этом проведённое сравнение результатов, получаемых на основе предлагаемого метода, достаточно хорошо согласуется с результатами оценок, получаемых на основе анализа состояния лесного покрова до и после лесного пожара.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием

ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019, <http://skr.geosmis.ru/>). Подготовка информации о степени повреждения лесов на основе данных послепожарной спутниковой съёмки выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 19-77-30015).

Литература

1. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденных огнем площадей // *Лесоведение*. 2021. № 2. С. 115–122.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г.* 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.
9. *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.
10. *Лупян Е.А., Стыценко 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.
11. *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.
12. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий. Приложение 2 к приказу Рослесхоза от 29.12.2007 № 523. 32 с.
13. *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.
14. *Уваров И.А., Барталев С.А.* Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 1. С. 353–365.
15. *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. D20302. DOI: 10.1029/2008JD011645.
16. *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.
17. *Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G.* High-

- Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
18. Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P., Tinkham W. T., Hoffman Ch. 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.
 19. 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.
 20. Justice C. O., Giglio L., Roy D., Boschetti L., Csiszar I., Davies D., Korontzi S., Schroeder W., O'Neal K., Morisette J. MODIS-Derived Global Fire Products // *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. 2011. No. 29. P. 661–679.
 21. Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., van der Werf G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosciences Discussions*. 2012. No. 9. P. 527–554.
 22. Kaufman Y. J., Justice C. O. MODIS ATBD: Fire Products. 1998. EOS ID No. 2741. 77 p.
 23. 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. D19303. DOI: 10.1029/2011JD015676.
 24. Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // *Remote Sensing of Environment*. 2007. No. 109. P. 66–80.
 25. 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.
 26. Mottram G. N., Wooster M., Balster H., George Ch., Gerrard F., Beisley J. The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires. 2005. 4 p.
 27. Ryan K. C. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // *Silva Fennica*. 2002. V. 36(1). P. 13–39.
 28. White J. D., Ryan K. C., Key C. C., Running S. W. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery // *Intern. J. Wildland Fire*. 1996. No. 6. P. 125–136.
 29. 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. P. 83–107.
 30. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. D24311. DOI: 10.1029/2005JD006318.
 31. 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. P. 236–254.

Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data

E. A. Loupian^{1,2}, D. V. Lozin^{1,2}, I. V. Balashov¹,
S. A. Bartalev^{1,3}, F. V. Stytsenko¹

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

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

³ *Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia*

The present work looks into the dependence of the degree of forest fire damage on burning intensity characteristics derived from MODIS satellite monitoring data. Here, Fire Radiative Power normalized to the area of the observation element (FRPS) is used as fire intensity measure. An approach has been proposed that allows building the dependence of forest damage degree on FRPS. The approach is developed by comparing the FRPS information from the MODIS data with post-fire forest damage assessment information. Data accumulated at the Space Research Institute of the Russian Academy of

Sciences from 2006 to 2021 throughout Russia were examined to allow analysis of a significant number of sites (over 10 million pixels) with information on FRPS and forest damage degree. Information of the time (season) when the fire was active and of the predominant type of forest cover was also analyzed for each site. Availability of such information and representative statistics made it possible to obtain probability estimates of forest death from intensity of burning taking into account the type of forest cover and duration of fire. The paper presents the obtained dependences and a brief analysis of their peculiarities. A new method is proposed for operational assessment of forest pyrogenic destruction area on the basis of the obtained dependences.

Keywords: remote sensing, wildfire, FRP, forest damage by fires, satellite monitoring

Accepted: 06.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232

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).
2. Bartalev S., Egorov V., Krylov A., Stytsenko F., Khovratovich T., The evaluation of possibilities to assess forest burnt severity using multi-spectral satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 215–225 (in Russian).
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
7. Galeev A. A., Proshin A. A., Ershov D. V., Tashchilin S. A., Mazurov A. A., Forest fires satellite monitoring data storage management, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Issue 2, Vol. 2, pp. 367–371 (in Russian).
8. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., 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.
9. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskiy 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, *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.
10. 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, *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.
11. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Usataya Yu. O., Registration of Wildfire Energy Characteristics in Siberian Forests Using Remote Sensing, *Isledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 3–11 (in Russian).
12. *Guidelines for the implementation of sanitary and recreational activities*, Annex 2 to the order of Rosleskhoz No. 523 dated December 29, 2007, 32 p.
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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266 (in Russian).
14. Uvarov I. A., Bartalev S. A., The Algorithm and Software Suite for Land Cover Types Recognition Based on Locally-adaptive Supervised Classification of Satellite Imagery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 353–365 (in Russian).

15. 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, D20302, DOI: 10.1029/2008JD011645.
16. 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.
17. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, Issue 6160, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
18. Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P., Tinkham W. T., Hoffman Ch. 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.
19. 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.
20. Justice C. O., Giglio L., Roy D., Boschetti L., Csizar I., Davies D., Korontzi S., Schroeder W., O’Neal K., Morisette J., MODIS-Derived Global Fire Products, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, 2011, Vol. 29, pp. 661–679.
21. Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., van der Werf G. R., Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences Discussions*, 2012, Vol. 9, pp. 527–554.
22. Kaufman Y. J., Justice C. O., *MODIS ATBD: Fire Products*, 1998, EOS ID No. 2741, 77 p.
23. 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, Vol. 116, D19303, DOI: 10.1029/2011JD015676.
24. Miller J. D., Thode A. E., Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR), *Remote Sensing of Environment*, 2007, No. 109, pp. 66–80.
25. 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.
26. Mottram G. N., Wooster M., Balzter H., George Ch., Gerrard F., Beisley J., *The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires*, 2005, 4 p.
27. Ryan K. C., Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems, *Silva Fennica*, 2002, Vol. 36(1), pp. 13–39.
28. White J. D., Ryan K. C., Key C. C., Running S. W., Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery, *Intern. J. Wildland Fire*, 1996, No. 6, pp. 125–136.
29. 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.
30. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, D24311, DOI: 10.1029/2005JD006318.
31. 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.