

Оптимизация схем оценки площадей, проходимых лесными пожарами, по результатам наблюдения их горения по данным систем MODIS и VIIRS

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

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

Данные о детектировании активного горения широко используются для мониторинга и оценки площадей, пройденных лесными пожарами. Спутниковые системы, позволяющие получать данные о детектировании «горячих точек», имеют свои ограничения по частоте наблюдений (обычно несколько раз в сутки) и пространственному разрешению, что диктует необходимость построения методов и технологий получения оценок площадей, проходимых пожарами, с учётом особенностей используемых приборов. В работе предложены схемы проведения оценок площадей пожаров на основе выбора оптимальных параметров объединения отдельных горячих точек в одно наблюданное событие по пространству и времени с последующей коррекцией геометрических площадей пожаров на основе опорных данных, включающих как уточнение площадей постпожарных повреждений отдельных пожаров, оценённых с использованием данных высокого разрешения, так и данные об активном горении, полученные по другими «опорным» спутниковым системам. Проведённые исследования позволили улучшить схему оценки площадей, пройденных огнём, по данным прибора MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) как при оценке площадей, пройденных отдельными пожарами, так и при оценке площадей, пройденных пожарами на различных территориях, в том числе на всей территории РФ, а также использовать действующую схему оценки площадей, проходимых лесными пожарами, для работы с данными приборов VIIRS (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), обеспечив продолжение получения сопоставимых во времени рядов данных.

Ключевые слова: спутниковые данные, площади пожаров, детектирование пожаров, активное горение, горячие точки, MODIS, VIIRS

Одобрена к печати: 02.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-214-228

Введение

Задача оценки площадей, проходимых лесными пожарами, на основе наблюдения их горения с использованием данных спутникового зондирования Земли является достаточно традиционной и актуальной. Важность её заключается, в частности, в том, что такие оценки обеспечивают возможность получения оперативной информации, необходимой для принятия решений по организации тушения и мониторинга лесных пожаров. Для Российской Федерации решение данной задачи имеет особое значение, так как в нашей стране необходимо обеспечивать оперативное получение однородной информации о действующих пожарах на больших и часто труднодоступных территориях. Разработке методов обработки результатов детектирования горения по спутниковым данным для оценки площадей, проходимых пожарами, посвящено значительное число работ, например: (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2017, 2021б, 2024; Пономарев, Иванов, 2012; Bartalev et al., 2013; Loboda, Csiszar, 2005; Loupian et al., 2006; Tansey et al., 2008).

Следует отметить, что методы оценки площадей, проходимых пожарами, на основе анализа данных об их горении в основном ориентированы на использование данных низкоорбитальных метеорологических спутниковых систем. Особенности данных систем следующие:

- наличие каналов в диапазоне 3,7–4 и 10–12 мкм, которые используются для детектирования горения и оценки его интенсивности;
- достаточно низкое пространственное разрешение (375–1000 м);

- достаточно низкая частота наблюдения одного и того же участка поверхности конкретной системой.

Сегодня существует значительное число подобных приборов наблюдения и группировок аппаратов, на которых они установлены. Для мониторинга пожаров используются данные радиометров MODIS (*англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), установленных на спутники Terra и Aqua (Giglio et al., 2020), SLSTR (*англ. Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) со спутников Sentinel-3 (Xu, Wooster, 2023), VIIRS (*англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), размещённых на спутниках Suomi-NPP и NOAA-20/-21 (Schroeder et al., 2014), инструмента МСУ-МР (Многозональное сканирующее устройство малого разрешения), установленного на спутник «Метеор-М» (Лозин и др., 2024), и др. В то же время для того, чтобы использовать такие приборы и группировки при построении систем учёта площадей, пройденных пожарами, они должны быть достаточно стабильны (получаемые с них характеристики фактически не должны меняться во времени), иметь полностью автоматическую систему географической привязки данных (обеспечивающую фактически субпиксельную точность) и для них должны быть реализованы высококачественные алгоритмы детектирования подозрений на зоны горения («горячие точки»). Использование всех этих систем наблюдения одновременно могло бы заметно повысить частоту наблюдения зон мониторинга, что, как будет показано ниже, имеет большое значение для проведения качественных оценок площадей, пройденных пожарами. В то же время не все из упомянутых систем сегодня соответствуют вышеперечисленным требованиям. Поэтому в настоящее время при построении систем оценок площадей, пройденных огнём, на основе данных детектирования активного горения в основном используются данные приборов MODIS (спутники Terra и Aqua) и VIIRS (спутники NPP, NOAA-20, NOAA-21). Кроме того, следует учитывать, что перечисленные системы вводились в эксплуатацию и функционируют в различные периоды времени. Наиболее длинный период работы имеют приборы MODIS (данные имеются с 2001 г.). К сожалению, в 2025 и 2026 гг. эти приборы выводятся из эксплуатации (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/alerts-outages/transition-from-modis-viirs>). В целом следует отметить, что в последние десятилетия, как и в настоящее время, при решении описанной задачи приходится ориентироваться на спутниковые системы наблюдения, достаточно ограниченные по частоте наблюдения (несколько раз в сутки), что в целом затрудняет постоянное отслеживание процессов распространения природных пожаров, включая оценку проходимых ими площадей.

Настоящая работа посвящена обсуждению вопросов разработки методов и технологий оценки площадей, проходимых пожарами, связанных с особенностями различных спутниковых систем, в первую очередь с пространственным разрешением и частотой наблюдений. В работе предложены схемы проведения оценок площадей, проходимых пожарами, на основе наблюдения их горения, которые могут позволить минимизировать различные ошибки в оценках (например, завышение площадей за счёт низкого пространственного разрешения используемой информации и/или пропуски наблюдения горения по причине низкой частоты наблюдения).

Особенности и схема оценки площадей, пройденных огнём, на основе детектирования горения по данным метеорологических спутниковых систем

Как уже отмечалось, основные особенности метеорологических систем, которые в настоящее время используются для оперативного детектирования пожаров, следующие:

- достаточно низкое пространственное разрешение получаемых данных (фактор-1);
- достаточно низкая частота наблюдения (фактор-2).

Фактор-1 приводит к тому, что «горячим» считается весь детектированный пиксель, хотя на соответствующей ему территории обычно горит лишь некоторая часть площади. Это

может приводить к существенному завышению площади пожаров, рассчитываемой на основе геометрической площади детектированных горячих точек. Для нивелирования такого завышения был предложен подход, основанный на рассмотрении не отдельных горячих точек, наблюдаемых как на одном пролёте спутника, так и на разных пролётах спутников, а их объединения в группы «пожары». Процедура такого объединения подробно описана в работах (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2017). При этом в различных исследованиях (Барталев и др., 2012, 2014; Лупян и др., 2021б; Пономарев, Швецов, 2015) показано, что уровень завышения площади различается для пожаров разной площади. В этих работах на основе сравнения геометрических площадей «пожаров» с информацией о площадях постпожарных повреждений, оценённых с использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения, также показано, что может быть получена достаточно устойчивая зависимость доли (в %) превышения геометрической площади пожара, детектированной по данным спутниковых наблюдений (далее ДС-пожар), над реальной площадью, пройденной им. После построения такой зависимости может быть проведена оценка площади, пройденной огнём, путём умножения геометрической площади ДС-пожара на коэффициент коррекции. Такая процедура позволяет получить достаточно точные оценки площадей, пройденных огнём, особенно когда речь идёт об интегральной информации о пожарах на значительных территориях (например, на уровне регионов или стран, см. (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2021б)). Поэтому такой подход оценки площадей, проходимых природными пожарами (в первую очередь лесными), в течение последних десятилетий достаточно эффективно используется в различных информационных системах дистанционного мониторинга пожаров (например, ИСДМ-Рослесхоз (Информационной системы дистанционного мониторинга) (Котельников и др., 2019; Лупян и др., 2015), «Вега» (Лупян и др., 2011, 2021а), «Вега-Лес» (Балашов и др., 2020)).

Фактор-2 приводит к обратному эффекту, т.е. к занижению оценок площадей, пройденных огнём, на основе детектирования горения. Это происходит из-за того, что между наблюдениями пожар может пройти значительные территории, на которых спутниковые системы не будут фиксировать горение. Таким образом, будет пропущена часть площадей, пройденных огнём. Следует отметить, что описанная выше схема оценки площадей пожаров на основе проведения коррекции геометрических площадей ДС-пожаров, сформированных на основе наблюдаемых горячих точек, также может перестать работать. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что каждое отдельное наблюдение пожара фактически представляет собой изображение фронта горения, покрытого пикселями прибора, с помощью которого осуществляется наблюдение. При этом если фронт пожара за время между последовательными наблюдениями проходит расстояние больше размера пикселя, то горячие точки, детектированные по разным наблюдениям, уже не граничат между собой и фактически пройденная между наблюдениями площадь не покрывается горячими точками, полученными на соседних сеансах. Это хорошо видно на примерах, представленных на *рис. 1* (см. с. 217). При наблюдении с достаточно высоким пространственным разрешением, но с низкой частотой наблюдения значительная часть площадей, пройденных огнём, просто пропускается, а единый ДС-пожар распадается на несколько более мелких. В такой ситуации обсуждаемый выше подход оценки площадей, пройденных огнём, фактически перестаёт работать.

Следует отметить, что при использовании данных приборов MODIS, для которых разрешение составляет 1000 м в центре скана и в несколько раз больше на краях и максимальный перерыв между наблюдениями не более 8 ч (при работе двух спутников, *рис. 2*, см. с. 217), для относительно небыстро распространяющихся лесных пожаров практически не наблюдается пропусков площадей, пройденных огнём, и распада ДС-пожаров. Поэтому обсуждаемая схема оценки площадей, пройденных лесными пожарами, при использовании данных MODIS работает достаточно хорошо. В то же время для быстрых степных пожаров при применении тех же данных уже присутствуют случаи значительного пропуска площадей, пройденных огнём. При использовании данных приборов VIIRS, для которых разрешение составляет 375 м в центре скана и максимальный перерыв между наблюдениями равен 12 ч (в том числе при работе трёх спутников, см. *рис. 2*), даже для лесных пожаров наблюдается значительное число пропущенных площадей и происходит распад ДС-пожаров.

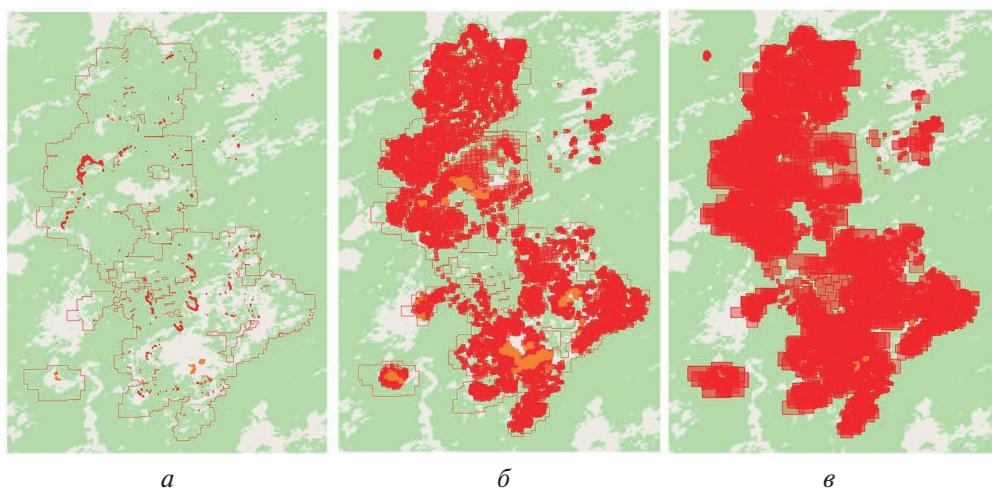


Рис. 1. Пример формирования ДС-пожара на основе спутниковых данных с различным пространственным разрешением и частотой наблюдения: *а* — приборы OLI (англ. Operational Land Imager) (спутники серии Landsat, пространственное разрешение 30 м, частота наблюдения 3–4 дня); *б* — радиометры VIIRS (спутники NPP, NOAA-20, NOAA-21; пространственное разрешение 375 м; частота наблюдения 12 ч); *в* — инструменты MODIS (спутники Terra, Aqua; пространственное разрешение 1000 м; частота наблюдения 8 ч)

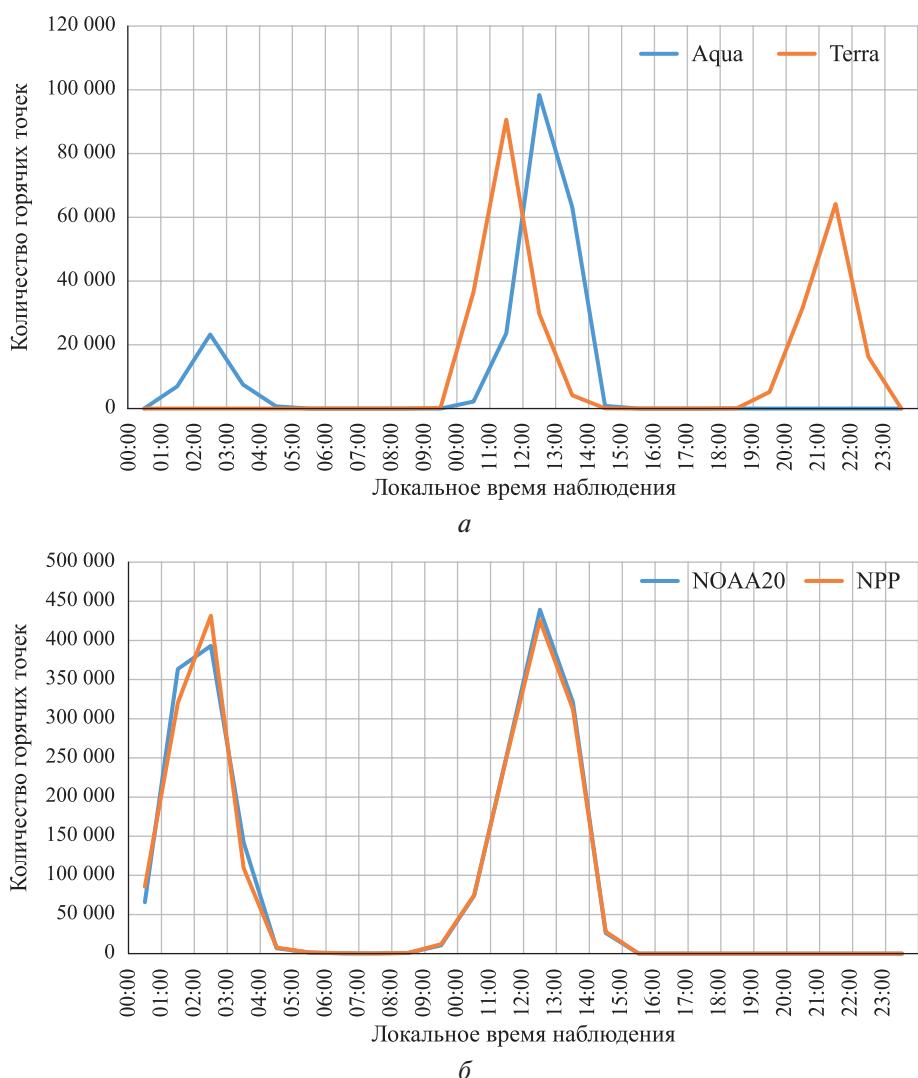


Рис. 2. Распределение наблюдений пожаров по времени в сутках по данным разных спутниковых систем: *а* — приборы MODIS (спутники Terra, Aqua); *б* — приборы VIIRS (спутники NPP, NOAA-20)

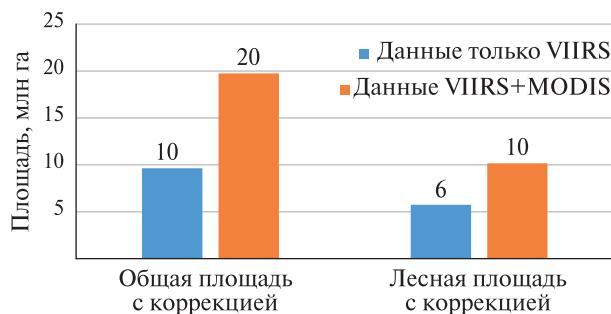


Рис. 3. Оценки площадей пожаров, действовавших на территории РФ в 2020 г., полученные с использованием разных наборов данных детектирования горения

не происходит и схема оценки площадей, пройденных огнём, работает корректно.

На *рис. 3* представлены оценки площадей, пройденных огнём, установленные на основе анализа данных наблюдения горения только с помощью прибора VIIRS, а также при использовании данных совместных наблюдений MODIS и VIIRS. Применение только данных прибора VIIRS приводит к получению существенно более низких оценок площадей, пройденных огнём.

Как уже отмечалось, в 2025–2026 гг. приборы MODIS заканчивают функционировать и, если в дальнейшем ориентироваться на использование только данных приборов VIIRS, необходимо либо разработать новую систему учёта площадей, пройденных огнём, либо модифицировать применяемый подход. При этом одним, на наш взгляд, наиболее просто реализуемым вариантом может стать использование в системе оценки площадей не реального разрешения прибора, а некоторого «модельного» (увеличенного), дающего возможность для имеющейся схемы наблюдения покрыть всю потенциальную область, которую мог бы пройти пожар между наблюдениями. Это бы позволило заведомо покрыть ДС-пожаром всю территорию, пройденную огнём. В то же время чрезмерное увеличение размера «модельного» пикселя будет приводить к существенным завышениям оценок площади, особенно на небольших пожарах. Поэтому необходимо для выбранной схемы наблюдения (характеризующейся максимальными перерывами в наблюдениях) выбрать оптимальный модельный размер пикселя, который обеспечит минимизацию как пропусков пройденных огнём площадей, так и ошибок, связанных с завышением оценок площадей. Именно этому вопросу и посвящён следующий раздел настоящей работы.

Выбор оптимального пространственного разрешения при различной частоте наблюдения разных спутниковых систем

Для выбора оптимального размера модельного пикселя наблюдения с использованием наблюдений горячих точек, полученных по данным VIIRS по территории РФ за пожароопасный сезон 2021 г., были проведены оценки интегральных площадей, пройденных пожарами на анализируемой территории для разных размеров модельного пикселя. Результаты найденных оценок площадей, проходимых лесными пожарами, сравнивались с оценками, устанавливаемыми на основе наблюдений, полученных при использовании совместных наблюдений приборов MODIS и VIIRS. Результаты данного сравнения представлены на *рис. 4* (см. с. 219).

Приведённые на *рис. 4* данные позволили сделать вывод, что «оптимальный» размер модельного пикселя для проведения оценок площадей, пройденных огнём, на основе использования схемы наблюдения прибора VIIRS лежит в диапазоне от 0,9 до 1,1 км/пиксель. Видимо, именно при таких значениях в данной схеме число пропусков площадей, проходимых лесными пожарами, не превышает число пропусков, которые возникают при наблюдениях, получаемых при совместном использовании данных MODIS и VIIRS. При этих значениях размера модельного пикселя также не должно происходить излишнего завышения значений площадей, пройденных огнём. Эти выводы подтверждают результаты оценок площадей, пройденных пожарами, на территории РФ в 2020 г., полученных по разным наборам данных, которые представлены на *рис. 5* (см. с. 219).

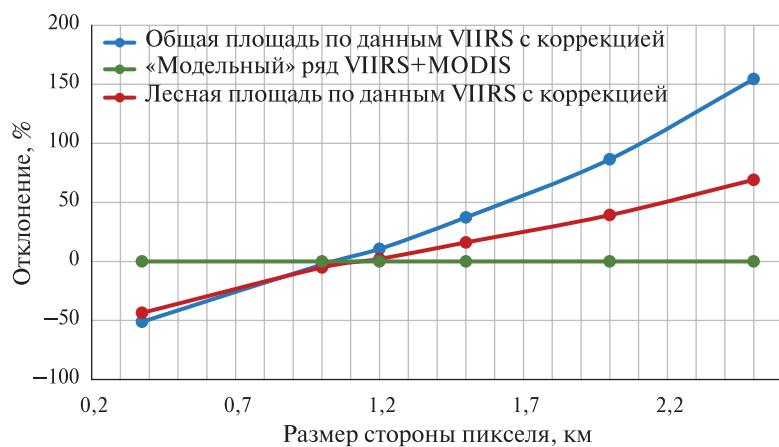
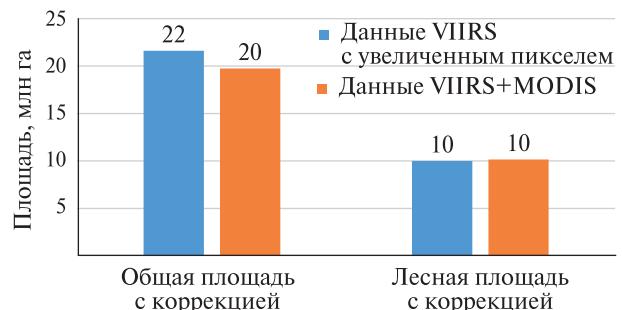


Рис. 4. Изменение оценок интегральных площадей пожаров на территории РФ в 2021 г. при изменении модельного размера. Приведена разница между оценкой площади, полученной по набору данных VIIRS+MODIS при исходном разрешении пикселей, и оценкой площади, установленной по набору данных VIIRS при различном модельном разрешении пикселей, отнесённая к оценке площади, найденной по набору данных VIIRS+MODIS при исходном разрешении пикселей

Рис. 5. Оценка площадей пожаров на территории РФ в 2020 г., полученная на основе использования совместных наблюдений приборов MODIS и VIIRS и данных наблюдений VIIRS с модельным пикселям, размер которого составлял 1×1 км



Также следует отметить, что при переходе к использованию модельных размеров пикселей при реализации схемы объединения отдельных наблюдений в ДС-пожары важным становится вопрос о выборе расстояния, при котором отдельные пиксели будут считаться принадлежащими одному ДС-пожару. Для выбора такого расстояния проведены отдельные эксперименты, в которых оценивалось нарушение «связности» ДС-пожаров. Пример результатов такого эксперимента для данных прибора VIIRS с оптимальным размером модельного пикселя приведён в табл. 1. Для рассматриваемого случая выбора оптимальных параметров размера модельного пикселя при работе с данными VIIRS было показано, что оптимальным расстоянием объединения является 1,5 км, для которого доля ДС-пожаров с характерным нарушением пространственной связности для более чем 10 % площади не превышает 1 %.

Таблица 1. Пример результатов анализа объединения пикселей в ДС-пожары в зависимости от их модельного размера и дистанции объединения (расстояния между ближайшими пикселями, при котором они относятся к одному пожару)

	Размер пикселя			
	1,0 км		1,2 км	
Дистанция объединения, км	1,0	1,5	1,0	1,5
Доля не распавшихся ДС-пожаров, %	68,47	81,08	77,48	85,59
Доля ДС-пожаров с «отковавшейся» площадью <1 %, %	17,12	10,81	12,61	6,31
Доля ДС-пожаров с отковавшейся площадью <10 %, %	10,81	7,21	8,11	7,21
Доля ДС-пожаров с отковавшейся площадью >10 %, %	3,60	0,90	1,80	0,90

Отметим, что описанная схема выбора оптимального модельного размера пикселя и порогового расстояния для объединения пикселей в ДС-пожары является достаточно общей и может использоваться при организации работы с данными при различных схемах наблюдений. Также данная схема может применяться и при оценке минимальной частоты наблюдений для заданного пространственного разрешения системами, детектирующими горение, которая будет обеспечивать непрерывность наблюдения природных пожаров без пропусков площадей, проходимых огнём.

Особо следует отметить, что применение подхода, связанного с использованием модельного пространственного разрешения отдельных пикселей и дистанции объединения отдельных полигонов в ДС-пожары, может влиять и на точность определения площадей отдельных пожаров. Это может происходить, например, когда для оценки площадей пожаров используется модельный размер пикселя меньше наблюдаемого. Это может, в частности, происходить в случаях, когда имеется набор данных наблюдений, в котором отдельные пиксели имеют разное пространственное разрешение (например, когда отдельные наблюдения были сделаны в надир, а другие под значительным углом). Пример такой ситуации представлен на *рис. 6*, где приведены оценки точности площадей отдельных пожаров, определённых при применении исходного набора данных прибора MODIS, в котором присутствуют и пиксели с разрешением 1×1 км, полученные при съёмках в надир, и пиксели существенно более низкого разрешения, полученные при различных углах сканирования, а также оценки точности, установленные для тех же наборов пикселей, размер которых заменён на модельный (1×1 км). По приведённым данным хорошо видно, что для пожаров небольшой площади случайная ошибка при использовании модельных размеров пикселей заметно ниже, чем при использовании данных в оригинальном разрешении.

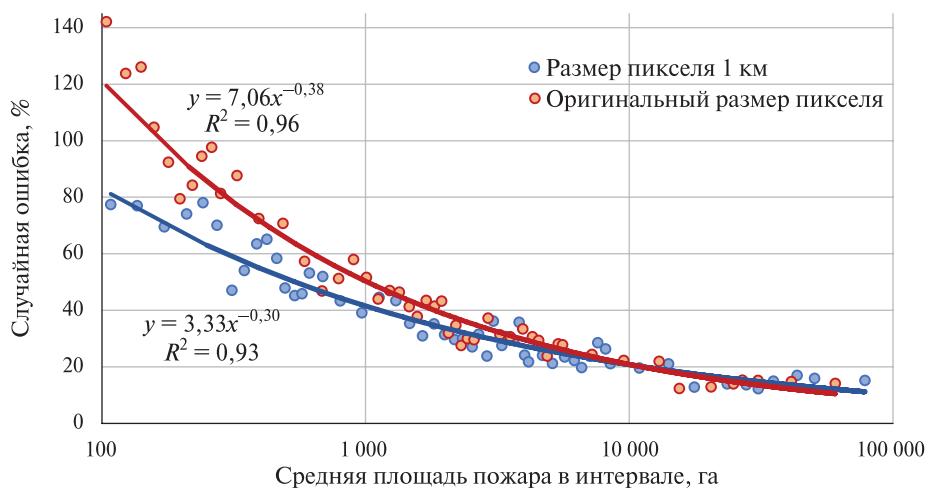


Рис. 6. Среднеквадратическое отклонение определения площади пожара от его размера на основе данных MODIS для наборов данных с разным разрешением пикселя. R^2 — коэффициент детерминации

Возможные подходы к построению функций коррекций геометрических площадей ДС-пожаров для оценки площадей, пройденных огнём

Следует отметить, что для каждой выбранной схемы расчёта ДС-пожаров необходимо формировать свою схему коррекции площадей. Это связано с тем, что различные схемы и используемые наборы данных (в том числе результатов детектирования, полученных на основе информации различных спутниковых систем наблюдения) могут приводить к разным ошибкам в оценке площадей, которые требуют коррекции.

Возможны две принципиальные схемы получения функций коррекции площадей для построения наборов данных такого рода:

- Построение функции коррекции на основе сравнения с выборочным набором ДС-пожаров, для которого имеются данные о площадях, пройденных огнём, полученные на основе анализа постпожарных наблюдений с использованием данных дистанционных наблюдений с высоким пространственным разрешением.
- Построение коррекции на основе сравнения нового анализируемого набора ДС-пожаров с базовым набором ДС-пожаров, для которого уже была определена функция коррекции. В данном случае геометрические площади ДС-пожаров из калибруемого набора данных сравниваются с геометрическими площадями базового набора и формируется функция пересчёта площадей калибруемого набора в площади базового набора. Полученная функция пересчёта площадей калибруемого набора в площади базового набора умножается на уже известную функцию коррекции базового набора, что позволяет установить искомую функцию коррекции для оценки реальных площадей, пройденных огнём.

Первый подход кажется методически более предпочтительным, поскольку позволяет избежать ошибок, которые неизбежно возникают при дополнительных кросс-калибровках. В то же время для его реализации требуется наличие достаточно большого набора опорных данных о пожарах, полученных с использованием наблюдений высокого пространственного разрешения. Получение такого опорного набора данных является на сегодняшний момент достаточно трудоёмкой задачей. Второй подход не требует формирования выборки по данным высокого разрешения и позволяет максимально автоматизировать процесс сравнения калибруемого набора данных с базовым. Поэтому трудозатраты и время построения функций коррекции для него значительно ниже, чем при первом подходе.

Построение процедур коррекции площадей для различных наборов данных, сформированных на основе информации о детектировании горения

В настоящем разделе приведены примеры схем коррекции для различных наборов данных наблюдения природных пожаров на основе рассмотренных выше подходов.

Построение процедуры схемы коррекции для набора данных MODIS с модельным размером пикселя 1×1 км. Для построения данной процедуры был сформирован набор данных на основе информации о тепловых аномалиях, полученных прибором MODIS за период 2001–2024 гг. с модифицированным размером пикселя 1 км и расстоянием для объединения отдельных полигонов в пожары 1,5 км. Ниже представлены результаты, полученные на основе использования обоих предложенных выше подходов, и приведено их сравнение.

Функция коррекции, полученная на основе использования первого подхода со сравнением геометрических площадей ДС-пожаров с площадями, полученными на основе анализа постпожарных повреждений по спутниковым данным высокого разрешения (10–30 м), приведена на *рис. 7* (см. с. 222). Для построения данной функции использовался набор опорных данных, включающий 3341 пожар, уточнённый по данным высокого пространственного разрешения общей площадью 8,43 млн га. Соответствующая им сумма площадей по данным MODIS после применения полученной функции коррекции составила 8,57 млн га. При этом для использованного набора данных расхождение интегральной откорректированной площади всех ДС-пожаров в используемой выборке от их интегральной площади, полученной на основе данных высокого разрешения, составило 1,7 %.

Для построения коррекции обсуждаемого набора данных также был применён второй подход по приведению площадей к данным с оригинальным размером пикселя. Для получения функции пересчёта геометрических площадей было использовано 2555 летних лесных пожаров, детектированных в 2024 г., для которых одному контуру по данным оригинального разрешения соответствовал один контур по данным с разрешением 1 км. Общая геометрическая площадь пожаров в опорном наборе данных составила 5,32 и 3,87 млн га по данным

с оригинальным разрешением и разрешением 1 км соответственно. Пожары были разбиты на пересекающиеся интервалы, для каждого из которых была рассчитана средняя площадь, а также коэффициент приведения площади с разрешением 1 км к площади с оригинальным разрешением. Аппроксимация данных, полученных в разных интервалах, позволила получить функцию, которая может быть применена для приведения площадей отдельных пожаров (рис. 8). После применения функции приведения геометрических площадей с разрешением 1 км к оригинальному разрешению общая площадь на указанном наборе составила 5,34 млн га.

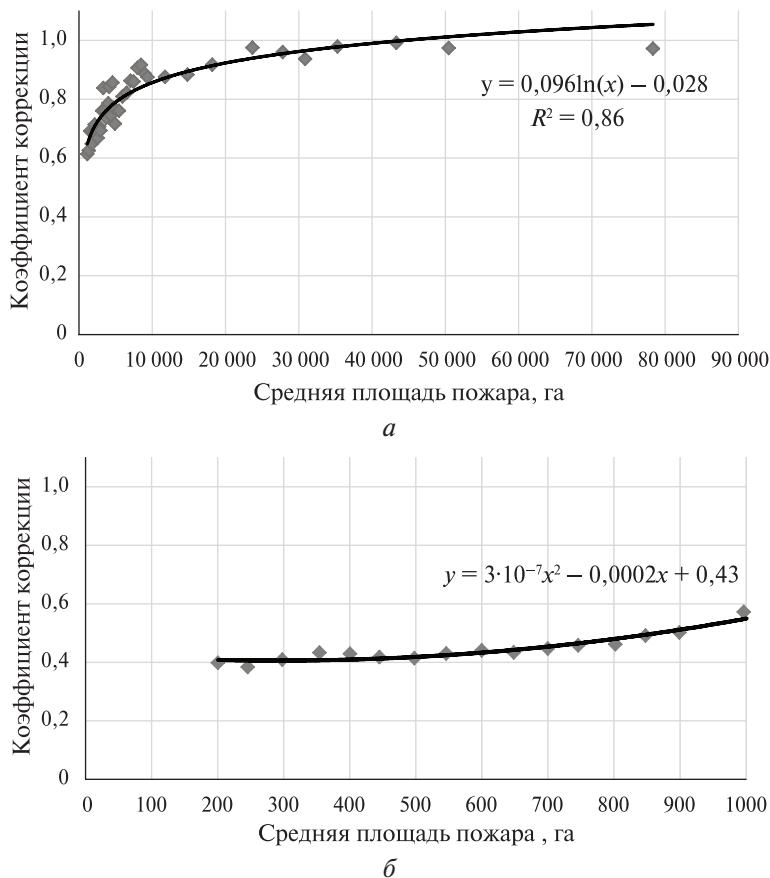


Рис. 7. Функция коррекции геометрических площадей ДС-пожаров по данным MODIS с размером пикселя 1 км и расстоянием объединения 1,5 км в зависимости от их размера на интервале: *а* — более 1000 га; *б* — менее 1000 га

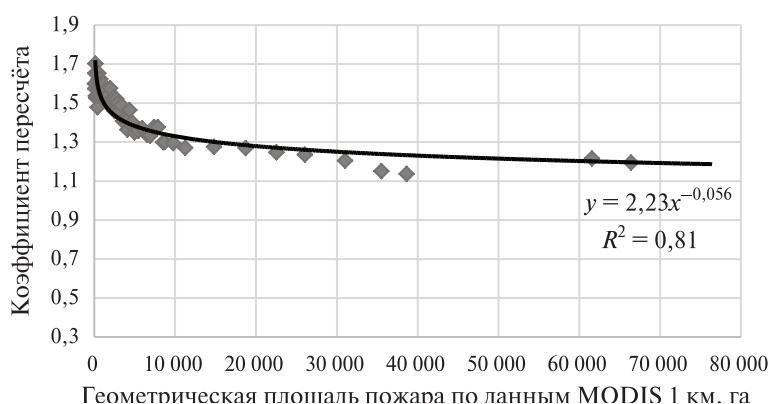


Рис. 8. Функция приведения геометрических площадей пожаров, оценённых по данным MODIS с разрешением 1 км, к данным с оригинальным разрешением

Для нахождения окончательных оценок к получаемым приведённым площадям в дальнейшем применяется функция коррекции данных с оригинальным разрешением, установленная ранее на основе данных высокого пространственного разрешения. Определённая таким образом двойная функция коррекции была применена к упомянутым раньше опорным данным, для которых имелись оценки по данным высокого разрешения. Общая площадь оценённых таким способом пожаров составила 8,51 млн га, отклонение от данных, скорректированных напрямую, оказалось равно 0,7 %, а от опорных наземных данных — 1,0 %. Таким образом, можно сделать вывод, что подход, основанный на калибровке по набору, для которого функция коррекции уже определена, не приводит к значительным изменениям точности оценок площадей пожаров. В то же время нужно отметить, что в данном эксперименте использовались наборы данных, для которых набор пикселей был идентичным и изменялся только их размер и параметры объединения. Для наборов данных, основанных на разных приборах, вероятно отклонения будут выше, поскольку частота и время наблюдения горения, чувствительность приборов и методы их обработки могут внести свой вклад в структуру детектированных пожаров.

Также были проведены эксперименты по анализу влияния пропусков детектирования горения на оценку площадей, проходимых огнём. Для этого выбирались пожары, геометрическая площадь которых была меньше, чем площадь, оценённая по данным высокого пространственного разрешения. Их оценка площади с учётом коррекции вычиталась из оценки по данным высокого разрешения, что позволило получить оценку пропущенной площади пожара. Сумма пропущенной площади таких пожаров в выборке относилась к интегральной площади всех пожаров, позволяя таким образом оценить долю пропущенной площади. Для различных наборов данных этот показатель варьируется от 4,8 до 7,2 % (см. табл. 2).

Таблица 2. Оценка вклада пропусков детектирования в оценку площадей, проходимых огнём, на основе сравнения с данными высокого пространственного разрешения

Параметры набора данных MODIS (размер пикселя, дистанция объединения)	Площадь, тыс. га, по данным			Недооценка площади по данным активного горения, тыс. га	Доля недооценённой площади от общей, %
	высокого разрешения		активного горения		
	всех пожаров в выборке	недооценённых пожаров	недооценённых пожаров		
1×1 км, 1 км	6981,5	2210,7	1705,3	505,4	7,2
1×1 км, 1,5 км	8448,9	2770,4	2197,8	572,6	6,8
1,2×1,2 км, 1 км	7801,5	990,9	626,8	364,0	4,7
1,2×1,2 км, 1,5 км	9002,1	1298,0	865,3	432,7	4,8
Оригинальный размер пикселя — 0,5 км	4050,9	246,0	50,7	195,3	4,8

Построение процедуры схемы коррекции для набора данных VIIRS с модельным размером пикселя 1×1 км. Для данной задачи был также использован второй подход с применением двойной коррекции. В качестве опорного использовался набор, получаемый на основе результаов детектирования горения по данным приборов VIIRS и MODIS, для последнего была построена схема коррекции на основе применения спутниковой информации высокого пространственного разрешения. Для построения функции коррекции набора, содержащего совместные данные приборов VIIRS и MODIS, была использована база данных о 1547 летних лесных пожарах, уточнённых по данным высокого разрешения. Общая площадь пожаров в выборке по данным высокого разрешения составила 1,20 млн га. Соответствующая им сумма площадей после построения и применения функции коррекции (рис. 9, см. с. 224) оказалась равна 1,21 млн га с отклонением от опорных данных высокого разрешения в 0,28 %.

Для получения функции пересчёта геометрических площадей, полученных по данным VIIRS, было использовано 4137 летних лесных пожаров, детектированных в 2024 г., для

которых одному контуру по данным VIIRS соответствовал один контур по данным VIIRS и MODIS. Общая геометрическая площадь пожаров в опорном наборе данных составила 7,03 и 7,40 млн га по данным с VIIRS и MODIS и данным VIIRS соответственно. Сопоставление этих данных позволило получить функцию, которая может быть применена для приведения площадей отдельных пожаров (*рис. 10*). После применения функции приведения геометрических площадей по данным VIIRS к совместным данным VIIRS и MODIS общая геометрическая площадь на исследуемом наборе составила 7,40 млн га.

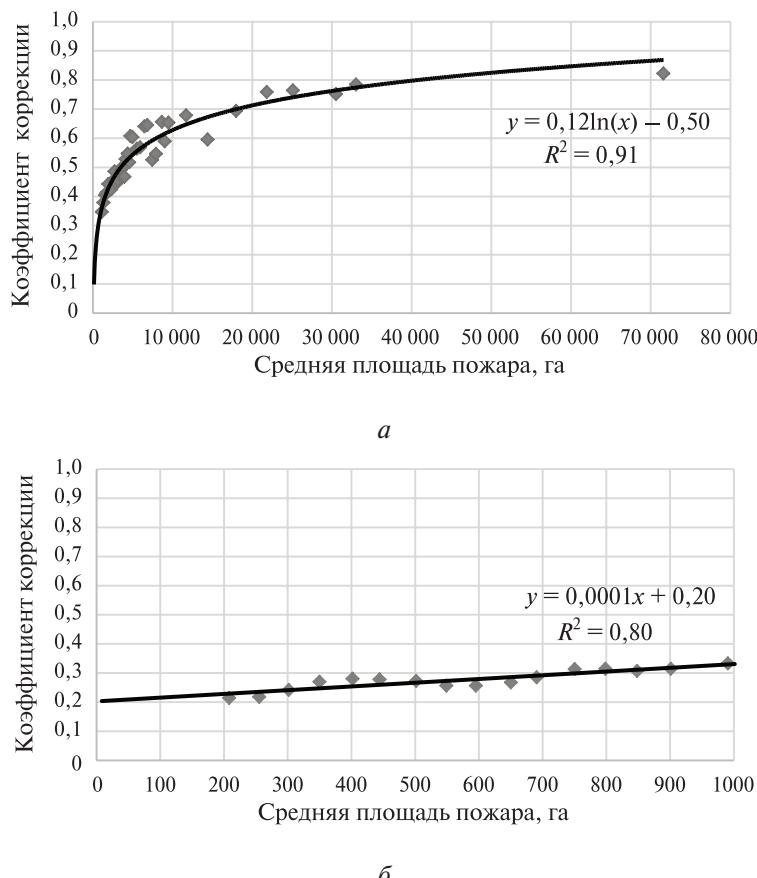


Рис. 9. Функция коррекции геометрических площадей ДС-пожаров по совместным данным MODIS и VIIRS с размером пикселя 1 км и расстоянием объединения 1,5 км в зависимости от их размера на интервале: *a* — более 1000 га; *b* — менее 1000 га

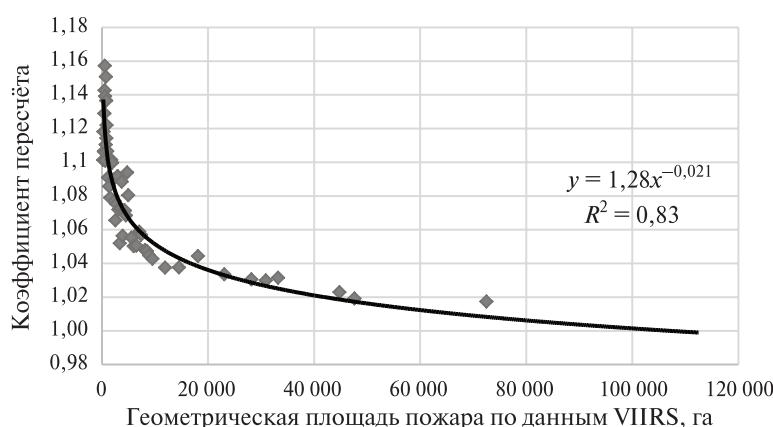
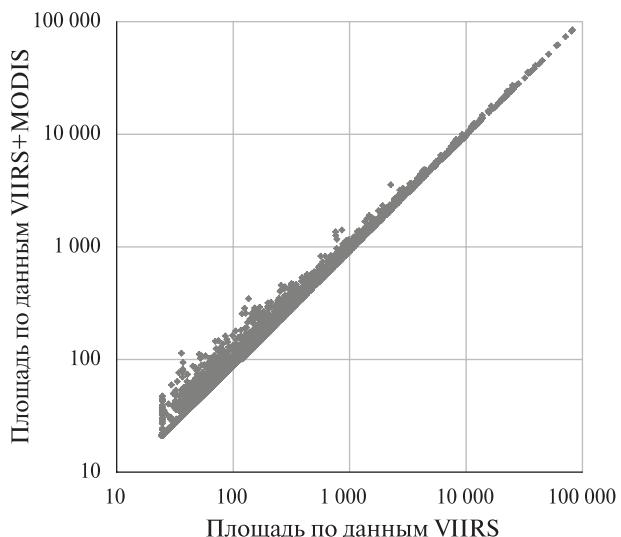


Рис. 10. Функция приведения геометрических площадей пожаров, оценённых по данным VIIRS, к площадям, полученным по совместному набору VIIRS и MODIS

Рис. 11. Гистограмма скорректированных площадей пожаров, оценённых по данным VIIRS и совместным данным VIIRS и MODIS

Применение двойной функции коррекции для набора данных, основанного на данных VIIRS, позволило получить сопоставимые с опорным набором оценки скорректированной площади как отдельных пожаров (*рис. 11*), так и интегральных площадей, составивших 4,55 и 4,59 млн га по данным VIIRS и совместным данным VIIRS и MODIS соответственно (расхождение 0,81 %).



Выводы

Таким образом, предложенные в работе подходы по модификации системы оценки площадей, пройденных пожарами, на основе информации об активном горении, полученной по данным приборов MODIS и VIIRS позволили:

- Улучшить схему оценки площадей, пройденных огнём, по данным прибора MODIS как при оценке площадей, пройденных отдельными пожарами, так и при оценке площадей, пройденных пожарами на различных территориях, в том числе на всей территории РФ. Это вместе с тем может позволить провести детальный анализ динамики лесопожарной обстановки на территории России в XXI в. в период с 2001 по 2025 г.
- Использовать действующую в различных системах дистанционного мониторинга лесных пожаров схему оценки площадей, проходимых лесными пожарами, после окончания работы в 2025–2026 гг. приборов MODIS для работы с данными приборов VIIRS, обеспечив продолжение получения сопоставимых во времени рядов данных.

Важно, что предложенная схема повышения точности оценок на основе выбора модельных пространственных размеров детектированных горячих точек может быть использована для выбора оптимальных параметров для оценки площадей, пройденных пожарами, для разных типов и наборов данных при различных вариантах частот наблюдения.

Особо следует отметить, что при увеличении частоты наблюдений (в том числе за счёт совместного использования данных различных спутниковых систем) будет возможно уменьшить размер модельного пикселя, что должно привести к повышению точности оценок площадей как отдельных пожаров, так и интегральных площадей пожаров на территории мониторинга. При этом при высокой частоте наблюдения возможны ситуации, когда модельный размер пикселя станет меньше размеров пикселей систем, используемых для детектирования зон активного горения.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Балашов И. В., Кашицкий А. В., Барталев С. А. и др. Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничих угодий России ВЕГА Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 73–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.

2. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
3. Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю. Экспресс-картирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
4. Котельников Р.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Еришов Д.В. Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // Лесоведение. 2019. № 5. С. 399–409. DOI: 10.1134/S0024114819050048.
5. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В. и др. Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 231–245. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245.
6. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
7. Лупян Е.А., Барталев С.А., Еришов Д.В., Котельников Р.В., Балашов И.В., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Ковганко К.А., Колбудаев П.А., Крашенинникова Ю.С., Прошин А.А., Мазуров А.А., Уваров И.А., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Флитман Е.В., Хвостиков С.А., Шуляк П.П. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 222–250.
8. 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.
9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. (2021а) Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
10. Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Сенько К.С. и др. (2021б) 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. Лупян Е.А., Лозин Д.В., Барталев С.А. и др. Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 233–249. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
12. Пономарев Е.И., Иванов В.А. Спутниковый мониторинг динамики экстремальных пожаров // Хвойные бореальные зоны. 2012. Т. 30. № 3–4. С. 307–311.
13. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Спутниковое детектирования лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91.
14. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Flitman E.V., Loupian E.A., Stytsenko F.V. Assessment of burned forest areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ imagery // Global forest monitoring from Earth observation / eds. F. Achard, M. C. Hansen. Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013. P. 245–271.
15. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision C. University of Maryland, Dep. Geographical Sciences, 2020. 63 p.
16. Loboda T., Csiszar I. Estimating burned area from AVHRR and MODIS: validation results and sources of error // Contemporary Earth Remote Sensing from Space. 2005. V. 2. P. 415–421.
17. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E. V. et al. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V. 11. P. 113–145. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1013-7>.
18. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. A. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 143. P. 85–96. DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008.
19. Tansey K., Grégoire J.-M., Defourny P. et al. A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Article L01401. <https://doi.org/10.1029/2007GL031567>.

20. Xu W., Wooster M. J. Sentinel-3 SLSTR active fire (AF) detection and FRP daytime product — Algorithm description and global intercomparison to MODIS, VIIRS and Landsat AF data // Science of Remote Sensing. 2023. V. 7. Article 100087. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100087>.

Optimization of forest burnt area assessment using MODIS and VIIRS active fire data

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

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

Active fire detection data are widely used for forest fire monitoring and burnt area assessment. Satellite systems that provide hotspot detection data have limitations in terms of observation frequency (usually several times per day) and spatial resolution. This demands developing burnt area assessment methods and technologies that take into account specific features of the employed satellite instruments. The paper proposes burnt area assessment techniques based on selection of optimal parameters for combining individual hotspots into a single fire event, followed by geometric fire areas correction based on reference data. Reference data may comprise high resolution burnt area data and/or active fire data obtained from other reference satellite systems. The results allowed improving the technique for burnt area estimation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data, both for individual fires and for large territories, including throughout the Russian Federation. The study also allowed using the burnt area assessment technique, which is currently in operation, with VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) data, ensuring continuation of time-consistent fire data inflow.

Keywords: burnt area, wild fire detection, burnt area assessment, active fire, satellite data, monitoring, MODIS, VIIRS

Accepted: 02.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-214-228

References

1. Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Bartalev S. A. et al., VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 4, pp. 73–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. Bartalev S. A., Egorov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 9–26 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Panova O. Y., Efremov V. Yu., Rapid mapping of forest burnt areas over Russia using Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 1, pp. 9–20 (in Russian).
4. Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Space monitoring of forest fires: history of creation and development of ISDM-Rosleskhoz, *Lesovedenie*, 2019, No. 5, pp. 399–409 (in Russian), DOI: 10.1134/S0024114819050048.
5. Lozin D. V., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Adaptation of MOD14 fire detection algorithm to work with the data of MSU-MR device, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 231–245 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245.
6. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E., Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 1, pp. 190–198 (in Russian).

7. Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Kotel'nikov R. V., Balashov I. V., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kovganko K. A., Kolbudaev P. A., Krasheninnikova Yu. S., Proshin A. A., Mazurov A. A., Uvarov I. A., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Flitman E. V., Khvostikov S. A., Shulyak P. P., Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 222–250 (in Russian).
8. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V. et al., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
9. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al. (2021a), Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6. pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
10. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S. et al. (2021b), Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
11. Loupian E. A., Lozin D. V., Bartalev S. A. et al., Assessment of damage to Russian forests by fires in the XXI century based on analysis of fire intensity using MODIS instrument, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 233–249 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
12. Ponomarev E. I., Ivanov V. A., Satellite monitoring of extreme wildfire dynamics, *Khvoynye boreal'noi zony*, 2012, V. 30, No. 3–4, pp. 307–311 (in Russian).
13. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite detection of forest fires and geoinformation methods for calibrating of results, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian).
14. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Flitman E. V., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Assessment of burned forest areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ imagery, In: *Global forest monitoring from Earth observation*, F. Achard, M. C. Hansen (eds.), Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013, pp. 245–271.
15. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O., *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision C*, University of Maryland, Dep. Geographical Sciences, 2020, 63 p.
16. Loboda T., Csiszar I., Estimating burned area from AVHRR and MODIS: validation results and sources of error, *Contemporary Earth Remote Sensing from Space*, 2005, V. 2, pp. 415–421.
17. Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V. et al., Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, V. 11, pp. 113–145, <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1013-7>.
18. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. A., The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment, *Remote Sensing of Environment*, 2014, V. 143, pp. 85–96, DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008.
19. Tansey K., Grégoire J.-M., Defourny P. et al., A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution, *Geophysical Research Letters*, 2008, V. 35, Article L01401, <https://doi.org/10.1029/2007GL031567>.
20. Xu W., Wooster M. J., Sentinel-3 SLSTR active fire (AF) detection and FRP daytime product — Algorithm description and global intercomparison to MODIS, VIIRS and Landsat AF data, *Science of Remote Sensing*, 2023, V. 7, Article 100087, <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100087>.