Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS

Е. А. Лупян, Ф. В. Стыценко, К. С. Сенько, И. В. Балашов, А. А. Мазуров

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

Во многих работах уже отмечалось, что при оценке площадей, пройденных лесными пожарами, на основе использования данных о детектировании активного горения следует вводить коррекцию геометрических площадей пожаров (объединения детектированных «горячих точек» в одно наблюдаемое событие горения по пространству и времени). Это связано в первую очередь с тем, что используемые для детектирования данные имеют достаточно низкое пространственное разрешение, что может приводить к завышению оценок площадей, пройденных огнём. Настоящая работа посвящена вопросам построения такой коррекции при использовании оценок площадей, пройденных пожарами, на основе детектирования активного горения по данным шестой коллекции приборов MODIS (MC6). Указанная коллекция имеет свои особенности, проанализированные в настоящей работе, которые могут существенно влиять на оценку пройденных огнём площадей. В работе представлены результаты построения коррекции для данных коллекции MC6, которые получены на основе анализа выборки из 5474 пожаров, детектированных на территории России в период 2009–2020 гг. Для указанной выборки были получены данные о гарях (площадях, пройденных лесными пожарами), основанные на использовании изображений высокого пространственного разрешения (10–30 м). Общая площадь картографированных гарей составила 9,06 млн га. На основе сравнения информации о площадях гарей с данными о геометрических площадях пожаров была получена формула коррекции, обсуждаемая в настоящей работе. Показано, что оценка площадей, пройденных лесными пожарами на территории России, по данным детектирования активного горения с применением предложенной коррекции может производиться с точностью порядка 4 %. Подобная точность, по мнению авторов, достаточна для проведения анализа тенденций динамики лесопожарной обстановки на территории России в XXI в. Именно на этот период имеется однородный ряд данных коллекции MC6 прибора MODIS.

Ключевые слова: спутниковые данные, площади пожаров, детектирование пожаров, ошибка определения площади пожара, мониторинг, MODIS

Одобрена к печати: 16.08.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192

Введение

Задача оценки площадей, проходимых лесными пожарами, с использованием данных дистанционного зондирования Земли — достаточно традиционна и до сих пор не теряет свою актуальность. В последние годы это связано в том числе и с тем, что всё острее встают задачи изучения глобальных изменений и влияния на них процессов выбросов в атмосферу углекислого газа, заметную роль в которых играют природные, в том числе лесные, пожары.

К настоящему времени предложен и используется целый ряд методов и подходов к оценке площадей, пройденных природными пожарами, на основе данных дистанционных, прежде всего спутниковых, наблюдений лесных пожаров. Они ориентированы как на оценку площадей отдельных пожаров, так и на получение интегральных оценок на уровне отдельных регионов и стран. Особенности и сложности выполнения таких оценок достаточно подробно обсуждаются, в частности, в работах (Барталев и др., 2012, 2014; Стыценко и др., 2016). В этих исследованиях рассматриваются различные факторы, осложняющие процесс получения оценок площадей, пройденных огнём, и основные направления возможного решения данной задачи.

В настоящее время методы оценки площадей, пройденных огнём, можно разделить на две основные группы:

- методы, основанные на анализе результатов детектирования активного горения (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2017; Пономарев, Иванов, 2012; Bartalev et al., 2013; Loboda, Csiszar, 2005; Loupian et al., 2006; Tansey et al., 2008);
- методы, основанные на анализе последствий пожаров и картографировании гарей (Барталев и др., 2012; Егоров и др., 2006; Bartalev et al., 2013; Fraser et al., 2000; Grégoire et al., 2003; Roy et al., 2008; Sukhinin et al., 2004).

Каждый из указанных методов имеет свои преимущества и недостатки. Безусловно, для получения точных (окончательных) оценок эти методы должны использоваться в комплексе и дополнять друг друга. В то же время следует отметить, что методы второй группы обычно достаточно трудозатратные, хотя они активно развиваются и совершенствуются в последние годы. Информация, формируемая на их основе, обычно получается со значительными временными задержками после окончания действия пожаров. Существующие сегодня ряды такой информации охватывают, как правило, более короткие периоды времени, чем ряды данных, полученных на основе использования методов, основанных на анализе результатов детектирования активного горения. Поэтому в случаях, когда возникают задачи получения оперативных оценок и/или информации за значительные временные интервалы, целесообразно использовать именно методы, основанные на детектировании тепловых аномалий. Эти методы сегодня в основном ориентированы на использование данных низкого пространственного разрешения (375–1000 м). В то же время следует отметить, что такая информация получается довольно часто (для территории России обычно около 8–10 раз в сутки).

Для решения данной задачи в основном используется информация, получаемая приборами MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Terra и Aqua) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite; KA Suomi NPP) (спутник NPP), а также других метеорологический спутниковых систем, имеющих каналы наблюдения в районе 3,7–3,9 мкм. Для работы с такими данными разработаны полностью автоматизированные технологии обработки, обеспечивающие не только детектирование горения на отдельных сеансах наблюдения, но и временное отслеживание развития пожаров и анализ их особенностей (в том числе контроль типов территорий, на которых они развиваются). В нашей стране такие решения созданы, в частности, в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Барталев и др., 2012; Егоров и др., 2006; Лупян и др., 2017; Bartalev и др., 2007). Разработанные технологии используются в настоящее время в различных информационных системах, ориентированных на решение как научных, так и прикладных задач. На их основе реализованы модули оценки пройденной огнём площади, в том числе в составе Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз, https://nffc.aviales.ru), обеспечивающей оперативный мониторинг лесопожарной обстановки на всей территории страны (Барталев и др., 2008; Беляев и др., 2006; Ершов и др., 2004; Ковалев и др., 2020; Котельников и др., 2019; Лупян и др., 2015a; Abushenko et al., 1999; Kotelnikov et al., 2020; Loupian et al., 2006), и спутниковых сервисов семейства ВЕГА: Вега-Science (http://sci-vega.ru), Вега-Pro (http://pro-vega.ru), Вега-Лес (http://forest.geosmis.ru) и др., которые во многом ориентированы на решение задач изучения н научного мониторинга состояния растительного покрова Северной Евразии, в том числе лесов (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2011, 2014).

Особо следует отметить, что на сегодня имеются достаточно большие (более 20 лет) однородные ряды данных наблюдений горения природных пожаров, что позволяет использовать их при анализе процессов, связанных с многолетней динамикой горимости различных территорий, в том числе для оценки динамики площадей, проходимых природными, в первую очередь лесными, пожарами. В то же время необходимо учесть, что, несмотря на то, что информация, использующаяся в настоящее время для детектирования активного горения, имеет относительно высокую частоту наблюдений, в некоторых случаях её может быть недостаточно для детектирования пройденной огнём площади. Вместе с достаточно низким пространственным разрешением такого рода данных это приводит к тому, что получаемые на их основе геометрические оценки площадей могут содержать значительные ошибки. Вопросы,

связанные с возможными ошибками таких оценок, обсуждались, в частности, в работах (Барталев и др., 2012, 2014; Лупян и др., 2003, 2016; Пономарев, Иванов, 2012; Пономарев, Швецов, 2015; Стыценко и др., 2016; Loboda, Csiszar, 2005). Поэтому для получения достоверных значений площадей, пройденных огнём, на основе геометрической площади полигонов, получаемых при детектировании активного горения, требуется использовать специальные подходы, обеспечивающие коррекцию (перенормировку) этих оценок. Подходы к построению такой коррекции были предложены, в частности, в работах (Барталев и др., 2012, 2014). Эти подходы ориентированы на выполнение оценок площадей лесных пожаров, которые в целом менее быстротечные, чем нелесные пожары, и для них в значительной мере можно пренебречь эффектами, связанными с низкой частотой наблюдения. Предлагаемые подходы основываются на проведении сравнения геометрических площадей, получаемых на основе анализа контуров пожаров, полученных по данным наблюдения активного горения (для прибора MODIS разрешение таких данных — порядка 1 км), и площадей повреждений лесного покрова, получаемых на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения (10–30 м). Естественно, подобная коррекция должна учитывать специфику используемых наборов данных наблюдения активного горения. В работе (Барталев и др., 2014) такая коррекция была построена для набора данных, получаемых на основе прибора MODIS с использованием коллекций их обработки не выше пятой (Giglio, 2010).

В то же время в 2015 г. (Giglio, 2015) была выпущена новая версия первичной обработки данных, с использованием которой была проведена переобработка данных всего ряда наблюдений приборами MODIS и сформирована шестая коллекция этих данных (MC6). Эта коллекция имеет свои особенности, которые существенным образом влияют на результаты детектирования активного горения (они будут обсуждаться ниже). Поэтому для работы с данными, получаемыми на основе MC6, в части оценок пройденных огнём площадей, полученных на основе детектирования активного горения, возникла необходимость разработки новой коррекции. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

Особенности детектирования активного горения с использованием шестой коллекции данных приборов MODIS

Описание основных особенностей коллекции MC6 и формируемых на её основе различных информационных продуктов представлено на сайте НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration) по адресу https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/documentation/atbds-plans-guides.

С точки зрения обсуждаемой задачи наиболее интересны вопросы, связанные с особенностями построения продуктов детектирования пожаров, реализованных в рамках перехода на использование коллекции MC6. Эти особенности подробно изложены в документе MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide (Giglio, 2015). К основным моментам, которые могут значительно влиять на вопросы, связанные с оценкой площадей, пройденных лесными пожарами на территории России, на наш взгляд, следует отнести:

- уточнение алгоритмов детектирования облачности (в том числе сокращение ошибок, связанных с детектированием как сплошной облачности, так и участков, занятых смогом, в том числе дымами);
- использование при детектировании точек с подозрением на горение адаптивных температурных порогов, ориентированных на оценку отклонения от средних значений в районе анализируемой точки;
- улучшение расчёта средних температур в окрестностях анализируемых точек с учётом информации о типе поверхностного покрова (вода – суша);
- улучшение используемых контекстных алгоритмов анализа подозрений на пожары, в том числе за счёт введения адаптивных порогов, которые позволили увеличить вероятность детектирования мелких пожаров;
- введение дополнительных критериев для исключения ложных детектирований.

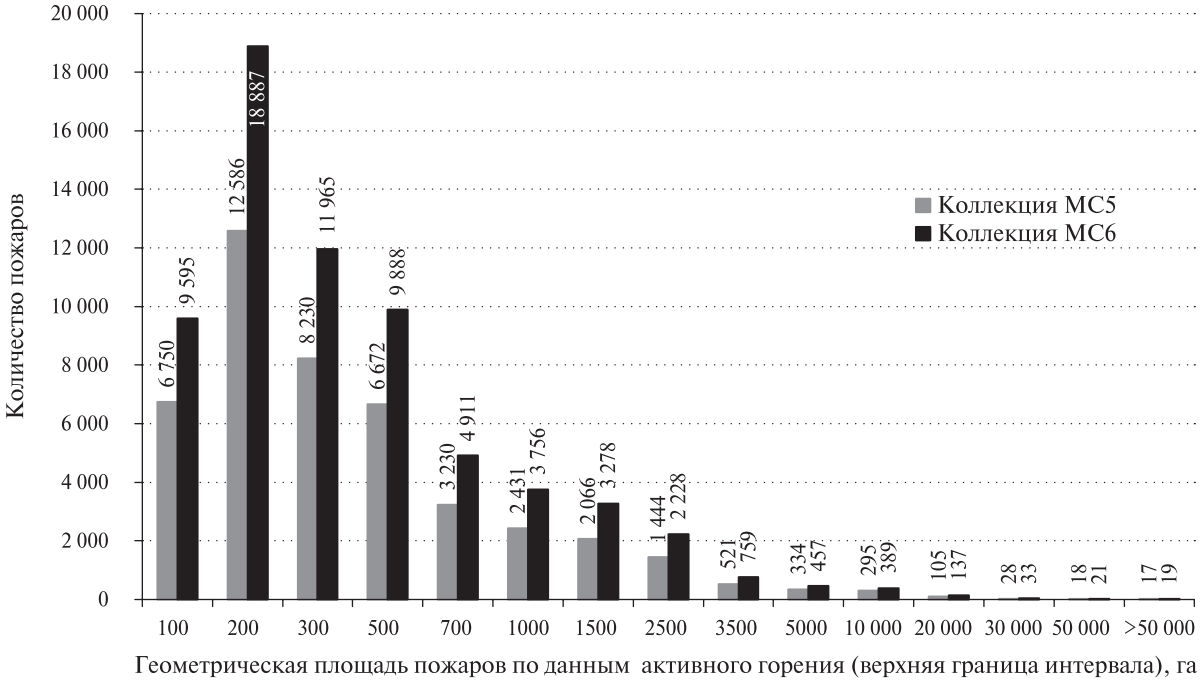


Рис. 1. Среднемноголетнее распределение числа пожаров по диапазонам геометрических площадей пожаров для коллекций МС5 и МС6 за 2001–2015 гг. На горизонтальной оси указана верхняя граница диапазона усреднения

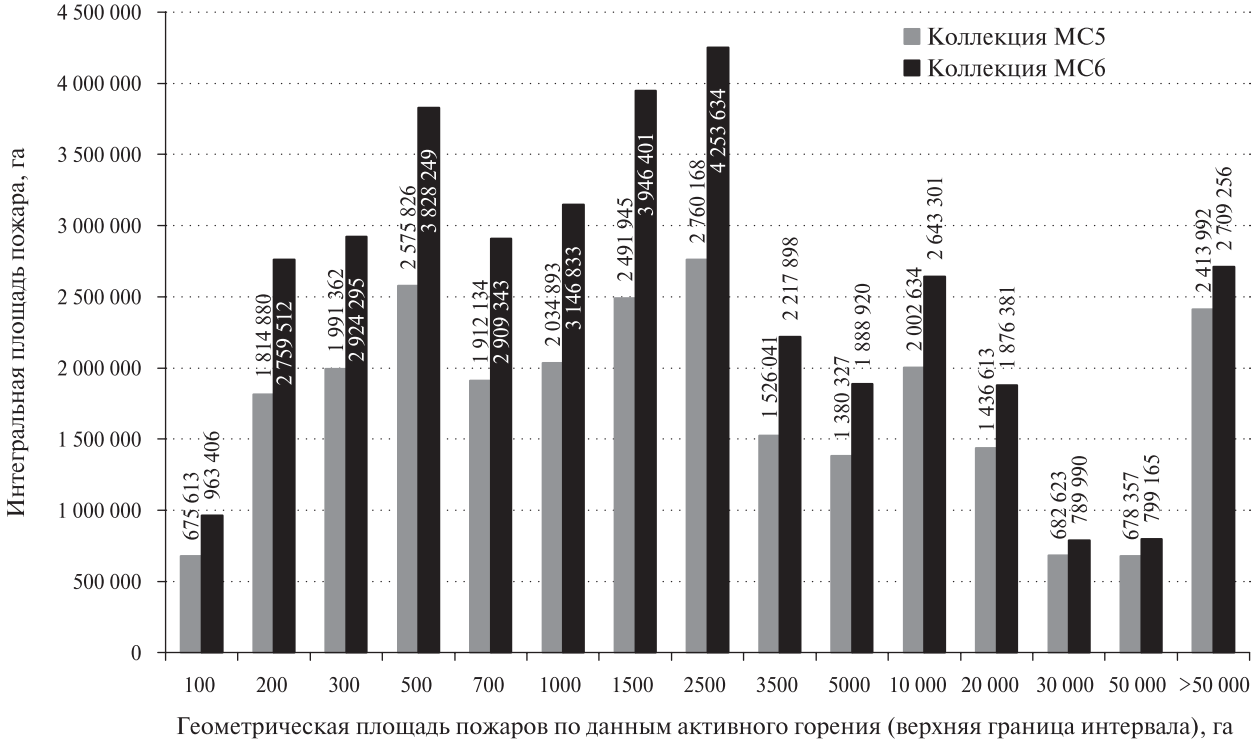


Рис. 2. Среднемноголетнее распределение интегральных площадей пожаров по диапазонам геометрических площадей пожаров для коллекций МС5 и МС6 за 2001–2015 гг. На горизонтальной оси указана верхняя граница диапазона усреднения

Всё это привело в конечном итоге к увеличению числа детектированных горячих точек и заметному изменению количественных и пространственных особенностей детектируемых пожаров. Это хорошо видно из интегральных распределений числа и геометрических

площадей дистанционного наблюдения пожаров на территории России, представленных на *рис. 1–3* (см. с. 181). Технология отслеживания развития пожаров с использованием данных наблюдения активного горения и построения итоговых контуров, пройденных огнём, описана, в частности, в работе (Лупян и др., 2017).

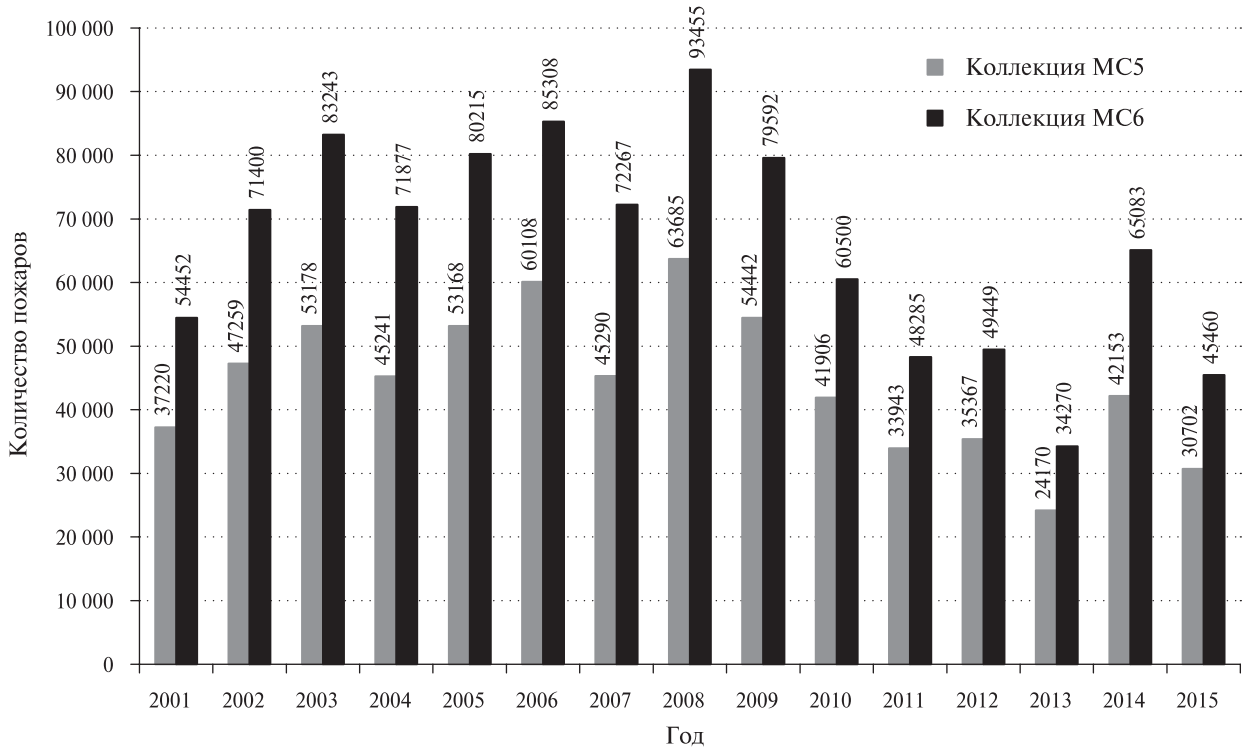
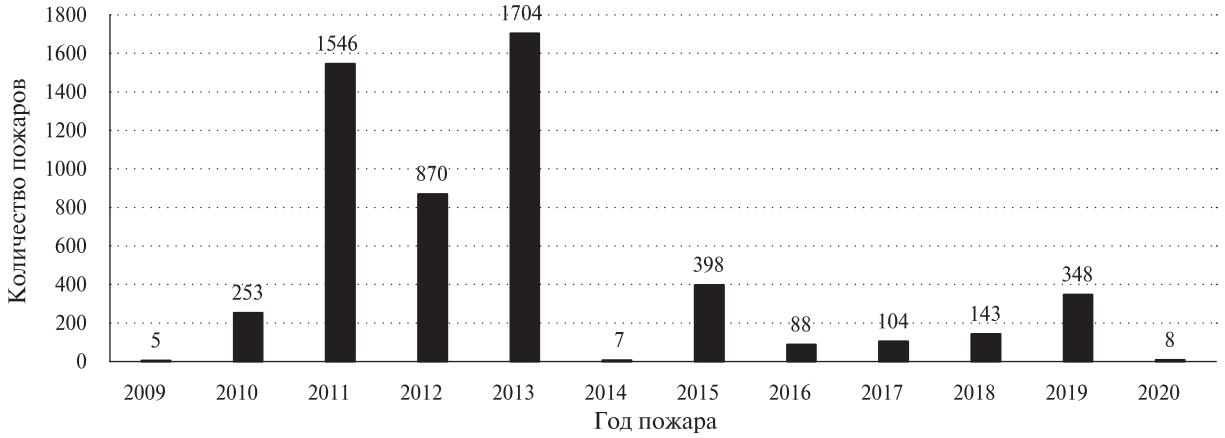


Рис. 3. Число пожаров, наблюдавшихся в различные годы на территории России с использованием коллекций данных МС5 и МС6

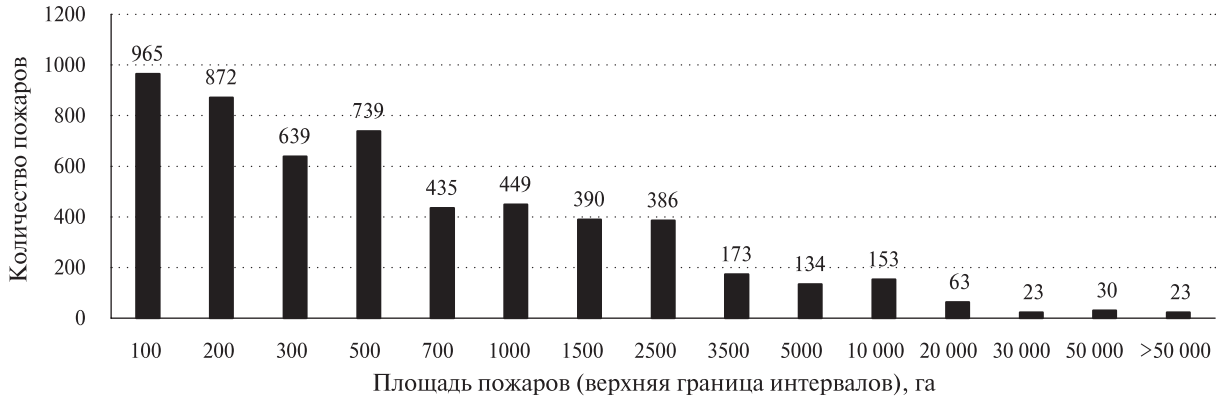
Значительные изменения особенностей распределений, на наш взгляд, свидетельствуют о том, что разработанные ранее коррекции для коллекций МС5 и ниже уже не могут быть использованы для геометрических площадей пожаров, получаемых на основе данных коллекции МС6. Поэтому для корректной оценки лесных пожаров по данным МС6 необходимо провести разработку новой коррекции.

Данные для разработки коррекции геометрических площадей пожаров коллекции МС6

Для построения коррекции при оценке пройденных огнём площадей по данным коллекции МС6 было выполнено сравнение значений площадей, получаемых на основе данных детектирования активного горения, и результатов картографирования гарей (площадей, пройденных огнём) по спутниковым данным высокого пространственного разрешения (10–30 м). Для проведения картографирования гарей были использованы данные следующих приборов: OLI-TIRS (*англ.* Operational Land Imager и Thermal Infrared Sensor) (Landsat-8), ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) (Landsat-7), TM (*англ.* Thematic Mapper) (Landsat-5) и MSI (*англ.* Multispectral Instrument) (Sentinel-2). Использовавшаяся для картографирования гарей автоматизированная технология подробно описана в работах (Барталев и др., 2012, 2014; Кашницкий и др., 2015). Данная технология активно используется в настоящее время для картографирования гарей в информационных системах ИСДМ-Рослесхоз и Вега-Science.



а



б

Рис. 4. Распределение пожаров, вошедших в выборку: *а* — по годам; *б* — по площадям. Площади приведены по данным высокого пространственного разрешения (10–30 м)

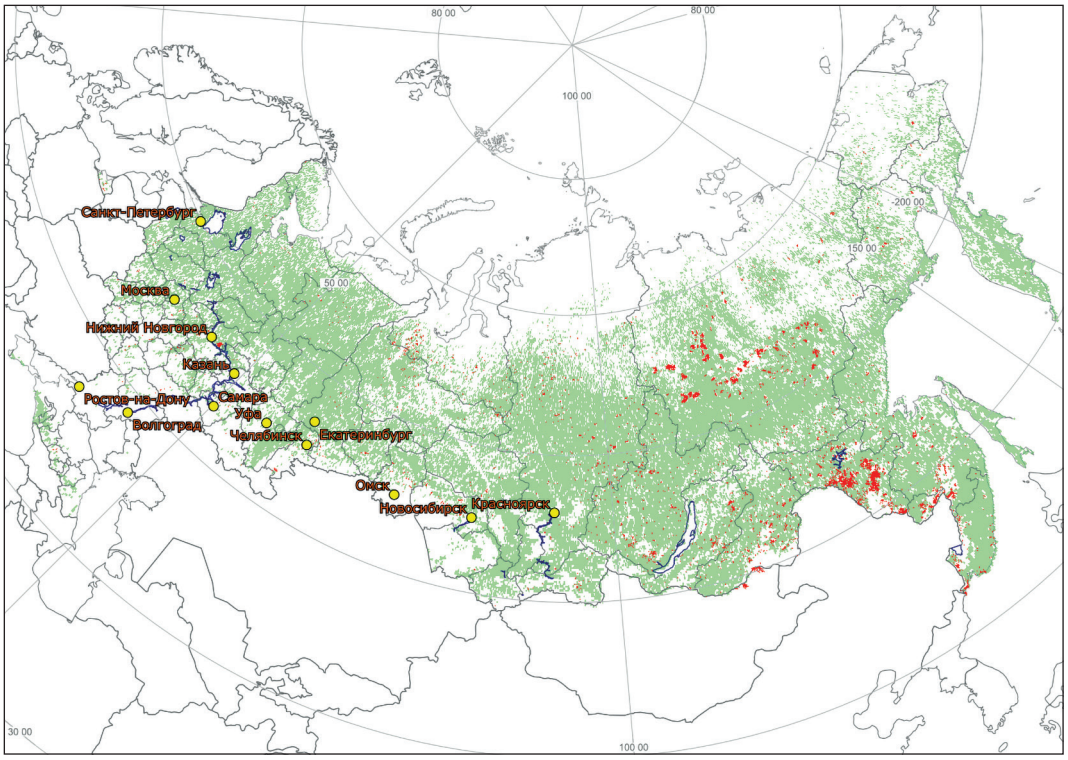


Рис. 5. Пространственное расположение пожаров, вошедших в выборку

Для построения коррекции геометрических площадей пожаров, определённых на основе коллекции MC6, был сформирован объединённый набор результатов картографирования гарей от лесных пожаров, полученных системами ИСДМ-Рослесхоз и Вега-Science в различные годы на территории России. Для сформированного объединённого набора была проведена процедура автоматического сопоставления контуров гарей, полученных на основе данных высокого разрешения, и полигонов пожаров, детектированных по активному горению с использованием коллекции MC6. После этого была проведена процедура экспертной верификации, в ходе которой из рассмотрения были исключены недостоверные или ошибочные полигоны, а также случаи неверного автоматического сопоставления гарей и пожаров.

В результате была сформирована выборка из 5474 пожаров, сопоставленных с гарями, общей площадью 9,0 млн га, включая 3,9 млн га лесной площади, которые наблюдались на территории России в период с 2009 по 2020 г. Распределение пожаров, вошедших в выборку по площадям и годам, представлено на *рис. 4* (см. с. 183). Пространственное распределение пожаров, входящих в сформированный набор, охватывает практически всю территорию России (*рис. 5*, см. с. 183). Таким образом, объём выборки как по интегральным площадям, так и по временному и пространственному распределению позволяет считать его репрезентативным для проведения анализа особенностей оценки площадей, пройденных лесными пожарами, на основе детектирования активного горения на всей территории России.

Построение зависимости для проведения коррекции геометрических площадей пожаров, сформированных на основе данных детектирования горения с использованием коллекции MC6

Особенности соотношения геометрических площадей пожаров, полученных по данным детектирования активного горения, и площадей соответствующих им гарей хорошо видны на двумерной диаграмме, представленной на *рис. 6*.

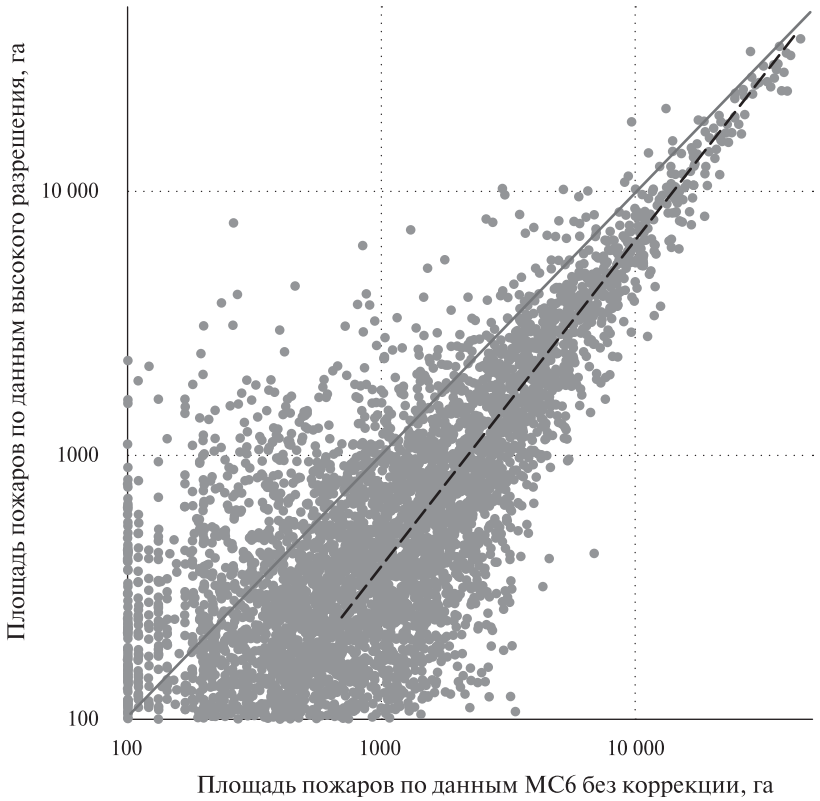


Рис. 6. Сравнение оценок площади пожаров, полученных по результатам детектирования активного горения по данным коллекции MC6, и площадей соответствующих им гарей . Чёрной пунктирной линией показано уравнение регрессии для пожаров с геометрической площадью более 800 га

Видно, что абсолютные расхождения двух оценок зависят от площади конкретного пожара. При этом геометрическая площадь, полученная по данным активного горения, даёт завышенную оценку. Систематическая ошибка такой оценки фактически определяется отклонением среднего значения геометрических площадей пожаров в заданном диапазоне от линии $y = x$ (показана на графиках серым цветом). Эта линия соответствует точному совпадению значений оценок площадей, получаемых на основе данных наблюдения активного горения, и площадей, полученных на основе данных высокого пространственного разрешения. При этом видно, что по мере увеличения площади пожаров ошибка её оценки по геометрической площади пожара по данным активного горения падает. То есть площади крупных пожаров достаточно хорошо оцениваются и по информации, полученной на основе детектирования активного горения. Этот в целом достаточно очевидный факт неоднократно подчёркивался в значительном числе работ (Барталев и др., 2012, 2014; Пономарев, Швецов, 2015). Как отмечалось в исследовании (Барталев и др., 2014), фактически для проведения коррекции нам необходимо построить зависимость систематических ошибок оценок геометрических площадей от значений площади, которая и определит коэффициент коррекции для заданного диапазона площадей (далее — $K_{\text{инт}}(S)$).

Оценка систематических ошибок выполнялась следующим образом:

- проводилось разбиение всей имеющейся выборки на интервалы площадей с применением скользящего окна с изменяемым размером так, чтобы обеспечить статистически значимое количество пожаров в каждом интервале;
- расчёт коэффициента коррекции $K_{\text{инт}}(S_{\text{ср}})$ в заданных интервалах площадей S осуществлялся на основе следующей формулы:

$$K_{\text{инт}}(S_{\text{ср}}) = \frac{\sum_{1}^{n} S_{i_{\text{HR}}}}{\sum_{1}^{n} S_{i_{\text{MOD}}}},$$

  где $S_{i_{\text{MOD}}}$ и $S_{i_{\text{HR}}}$ — значения геометрической площади пожаров, полученные на основе данных активного горения (MC6) и данных высокого разрешения для i-го пожара в интервале; n — количество пожаров в интервале; $S_{\text{ср}}$ — средняя площадь пожара по данным активного горения в интервале;
- на основе полученной информации были рассчитаны аналитические зависимости коэффициента K от площади наблюдаемого пожара S.

Используемый коэффициент коррекции K отражает смещение интегральных площадей пожаров в интервалах. Выбор данного параметра как характеристики систематической погрешности обусловлен простотой его дальнейшего использования для коррекции площадей пожаров, оценённых по данным активного горения с использованием следующего выражения:

$$S_{i_{\text{MOD}k}} = K(S_{i_{\text{MOD}}}) \cdot S_{i_{\text{MOD}}},$$

где $S_{i_{\text{MOD}k}}$ — скорректированная площадь активного горения; $K(S_{i_{\text{MOD}}})$ — коэффициент коррекции, зависящий от значения геометрической площади полигона пожара $S_{i_{\text{MOD}}}$.

Для получения зависимости $K(S_{i_{\text{MOD}}})$ была построена зависимость значений $K_{\text{инт}}$ от средних площадей пожаров в интервале (*рис. 7*, см. с. 186), которая для пожаров площадью от 800 до 80 тыс. га хорошо описывается уравнением $K(S_{i_{\text{MOD}}}) = 0{,}09 S_{i_{\text{MOD}}}^{0{,}21}$. Для пожаров общей площадью более 80 тыс. га коррекция площадей фактически не требуется и описывается уравнением $K(S_{i_{\text{MOD}}}) = 1$.

Анализ имеющейся выборки показал, что для пожаров с небольшой геометрической площадью могут возникать значимые ошибки, связанные не только с пространственным разрешением, но и с пропусками наблюдений для быстротекущих и низкотемпературных пожаров. Это в том числе связано и с тем, что из-за большей чувствительности при детектировании

пожаров по данным коллекции МС6 появилось большее количество отдельно детектированных точек. Учёт этих факторов требует, видимо, дополнительного исследования, поэтому в настоящий момент было решено для пожаров площадью менее 800 га использовать формулу коррекции, которая была получена в работе (Барталев и др., 2014) для коллекции МС5. В то же время с использованием имеющейся выборки нами была оценена ошибка интегральной площади пожаров, к которой могут приводить пропуски в наблюдениях. Она была основана на анализе площадей гарей, которые более чем в два раза превзошли геометрическую площадь соответствующих им пожаров, оценённых на основе детектирования активного горения. Полученная ошибка составила 2,3 % (недоучтённая площадь пожаров).

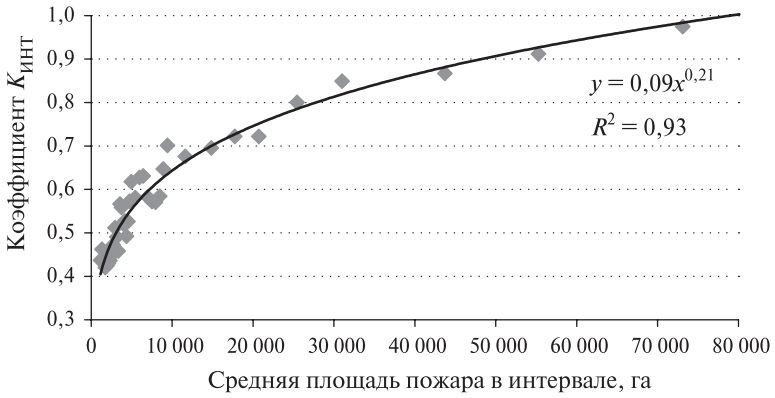


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K_{инт}$ от средней площади пожара в интервале

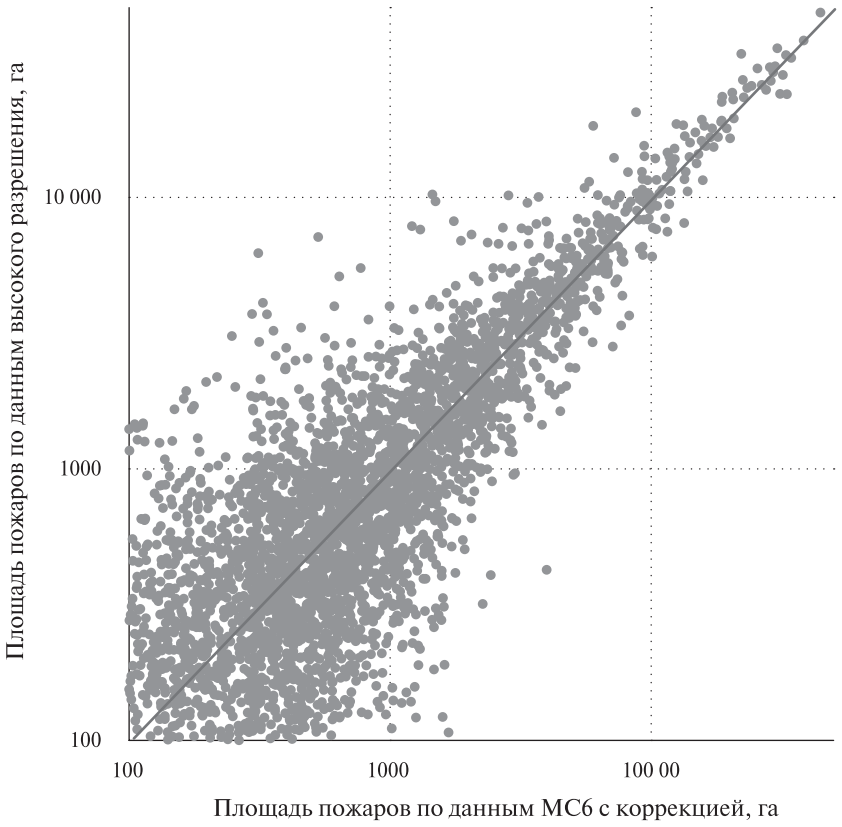


Рис. 8. Гистограмма скорректированных геометрических площадей и площадей гарей анализируемой выборки

С использованием полученной зависимости $K(S_{i_{MOD}})$ была проведена коррекция площадей пожаров имеющейся выборки. На *рис. 8* представлена гистограмма распределения откор-

ректированных геометрических площадей пожаров и площадей гарей. Хорошо видно, что скорректированный набор данных фактически сгруппирован вокруг диагональной линии $y = x$. Это означает, что проведение предлагаемой коррекции позволяет исключить систематическую ошибку. При этом интегральная скорректированная геометрическая площадь пожаров используемой выборки составила 8,77 млн га, что всего на 3,6 % расходится с интегральной площадью гарей в используемой выборке (9,06 млн га). При этом следует отметить, что общая геометрическая площадь пожаров используемой выборки составляет 13,58 млн га, т. е. она почти на 50 % превышает интегральную площадь гарей. Также было рассчитано среднеквадратическое отклонение в каждой используемой группе площадей. Фактически это позволило оценить случайную ошибку определения площади пожара в конкретной группе. С использованием этой информации была произведена оценка точности интегральной скорректированной площади пожаров. Она составила примерно 1,5 %. Расхождение в оценке ошибок интегральных площадей, видимо, можно объяснить тем, что при построении зависимости для коэффициента коррекции явно не учитывались пропуски пожаров, которые, как уже отмечалось, могут возникать из-за не очень высокой частоты их наблюдения с использованием только данных прибора MODIS и составлять 2,3 %. Таким образом, суммарная ошибка, определяемая случайными ошибками и ошибками пропуска пожаров, составляет примерно 3,8 %, что хорошо согласуется с расхождениями, получаемыми при сравнении интегральных площадей гарей и откорректированных площадей пожаров, полученных на основе данных детектирования активного горения.

Таким образом, с учётом того, что для построения коэффициента коррекции геометрических площадей пожаров, определяемых на основе данных детектирования активного горения с использованием коллекции MC6, и проверок точностей оценок интегральных площадей использовался достаточно репрезентативный набор данных (объём выборки соответствует площадям, проходимым лесными пожарами в годы средней горимости), можно утверждать, что получаемые оценки площадей лесных пожаров имеют ошибку порядка 4 %.

Заключение

Представленная в настоящей работе схема коррекции геометрических площадей пожаров, определённых по данным детектирования активного горения на основе коллекции данных MODIS MC6, по мнению авторов, позволит получать оценки интегральных площадей, ежегодно проходимых лесными пожарами на территории России, с ошибкой порядка 4 %. Используя данную коррекцию, можно, в частности, получить и проанализировать особенности динамики лесопожарной обстановки на территории России в XXI в. с использованием однородного ряда данных коллекции MC6.

В заключение также следует отметить, что авторами проведён первичный анализ возможности применения разработанной схемы коррекции к результатам объединённых наблюдений за активным горением с использованием данных приборов MODIS (коллекция MC6) и VIIRS. Проведённый анализ показал, что получаемые результаты достаточно хорошо согласуются с результатами, получаемыми только при использовании данных MODIS, в частности для набора данных за 2015 г., добавление данных VIIRS привело к увеличению общей площади пожаров на 5,4 %, а лесной площади — на 1,0 %. Это позволяет в первом приближении использовать разработанную коррекцию и для работы с объединёнными наборами данных.

Настоящая публикация подготовлена при поддержке темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 01.20.0.2.00164) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2015б).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Коровин Г. Н.*, *Котельников Р. В.*, *Лупян Е. А.*, *Щетинский В. Е.* Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 419–429.
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. 9–27.
3. *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Панова О. Ю.*, *Ефремов В. Ю.* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
4. *Беляев А. И.*, *Коровин Г. Н.*, *Лупян Е. А.* Состояние и перспективы развития Российской системы дистанционного мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 341–350.
5. *Егоров В. А.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.*, *Уваров И. А.* Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2006. № 2. С. 98–109.
6. *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Барталев С. С.*, *Балашов И. В.*, *Ефремов В. Ю.*, *Стыценко Ф. В.* Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16.
7. *Ковалев Н. А.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Бурцев М. А.*, *Ершов Д. В.*, *Кривошеев Н. П.*, *Мазуров А. А.* ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 283–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-283–291.
8. *Котельников Р. В.*, *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.* Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // Лесоведение. 2019. № 5. С. 399–409. DOI: 10.1134/S0024114819050048.
9. *Лупян Е. А.*, *Мазуров А. А.*, *Флитман Е. В.*, *Ершов Д. В.*, *Коровин Г. Н.*, *Новик В. П.*, *Абушенко Н. А.*, *Алтынцев Д. А.*, *Кошелев В. В.*, *Тащилин С. А.*, *Татарников А. В.*, *Сухинин А. И.*, *Пономарев Е. И.*, *Гришин А. М.*, *Афонин С. В.*, *Белов В. В.*, *Гриднев Ю. В.*, *Матвиенко Г. Г.*, *Соловьев В. С.*, *Антонов В. Н.*, *Ткаченко В. А.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы: аналитический обзор. Сер. «Экология». Вып. 70. Новосибирск: СО РАН. ИОА. ГПНТБ, 2003. Вып. 68. 134 с.
10. *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.
11. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Толпин В. А.*, *Жарко В. О.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Оксюкевич А. Ю.* Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.
12. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Ершов 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.* (2015а) 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.
13. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015б) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
14. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Стыценко Ф. В.* Методика оценки площадей, пройденных лесными пожарами, на основе данных спутниковых наблюдений // Доклады 6-й Всероссийской конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии». Москва. 20–22 апр. 2016. М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 43–46.
15. *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 террито-

рии 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.

16. *Пономарев Е. И.*, *Иванов В. А.* Спутниковый мониторинг динамики экстремальных пожаров // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30. № 3–4. С. 307–311.
17. *Пономарев Е. И.*, *Швецов Е. Г.* Спутниковое детектирования лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84.
18. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Иванова А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Сычугов И. Г.* Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 289–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
19. *Abushenko N. A.*, *Bartalev S. A.*, *Belyaev A. I.*, *Ershov D. V.*, *Zakharov M. Y.*, *Loupian E. A.*, *Korovin G. N.*, *Koshelev V. V.*, *Krasheninnikova Yu. S.*, *Mazurov A. A.*, *Min'ko N. P.*, *Nazipov R. R.*, *Semenov S. M.*, *Tashchilin S. A.*, *Flitman E. V.*, *Shchetinsky V. Y.* Near Real-time Satellite Monitoring of Russia for Forest Fire Protection // Mapping Science and Remote Sensing. 1999. V. 36. No. 1. P. 54–61.
20. *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. Бока-Ратон, Флорида: CRC Press, 2013. P. 259–286.
21. *Fraser R. H.*, *Li Z.*, *Cihlar J.* Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest // Remote Sensing Environment. 2000. V. 74. P. 362–376.
22. *Giglio L.* MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide. University of Maryland, 2010. 61 p. URL: https://gis-lab.info/docs/mod14_users_guide_2.4.pdf.
23. *Giglio L.* MODIS collection 6 active fire product user's guide, revision A. University of Maryland. 2015. 64 p. URL: https://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_C6_Fire_User_Guide_A.pdf.
24. *Grégoire J. M.*, *Tansey K.*, *Silva J. M. N.* The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. P. 1369–1376.
25. *Kotelnikov R. V.*, *Loupian E. A.*, *Bartalev S. A.*, *Ershov D. V.* Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz // Contemporary Problems of Ecology. 2020. V. 13(7). P. 795–802. DOI: 10.1134/S1995425520070045.
26. *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.
27. *Loupian E. A.*, *Mazurov A. A.*, *Flitman E. V.*, *Ershov D. V.*, *Korovin G. N.*, *Novik V. P.*, *Abushenko N. A.*, *Altyntsev D. A.*, *Koshelev V. V.*, *Tashchilin S. A.*, *Tatarnikov A. V.*, *Csiszar I.*, *Sukhinin A. I.*, *Ponomarev E. I.*, *Afonin S. V.*, *Belov V. V.*, *Matvienko G. G.*, *Loboda T. V.* 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.
28. *Roy D. P.*, *Boschetti L.*, *Justice C. O.*, *Ju J.* The Collection 5 MODIS Burned Area Product — Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 3690–3707.
29. *Sukhinin A. I.*, *French N. H. F.*, *Kasischke E. S.*, *Hewson J. H.*, *Soja A. J.*, *Csiszar I. A.*, *Hyer E. J.*, *Loboda T.*, *Conrad S. G.*, *Romasko V. I.*, *Pavlichenko E. A.*, *Miskiv S. I.*, *Slinkina O. A.* AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 93(4). P. 546–564.
30. *Tansey K.*, *Gregoire J. M. C.*, *Defourny P.*, *Leigh R.*, *Pekel van Bogaert E.*, *Bartholomé E.*, *Bontemps S.* A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Art. No. L01401.

Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data

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

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

As already noted in several researches for burnt area assessment based on active fire data, it is necessary to use area correction procedure. This is primarily due to the fact that the data used have a rather low spatial resolution which can lead to overestimation of burnt area. The present work is devoted to the development of burnt area correction for MODIS Collection 6 (MC6) active fire data. It is shown that MC6 has some features that can significantly affect burnt area assessment. A correction is developed on the basis of 5474 fires detected by MODIS and mapped using high resolution images (10–30 m). Total area of mapped fires is 9.09 million ha. The new correction formula is developed using the regression analysis of active fire geometry areas and high-resolution areas. It is shown that, using the proposed correction, Russia's burnt area assessment based on active fire detection can be performed at an accuracy of about 4 %. Such accuracy, according to the authors, is sufficient for analyzing trends and dynamics of forest fires over Russia in the 21st century using MC6 data.

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

Accepted: 16.08.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192

References

1. Bartalev S. A., Ershov D. V., Korovin G. N., Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Shchetinskii V. E., Forest fire remote monitoring system of Russian Federation Federal Forestry Agency (state and development prospects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 419–429 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov 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, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Panova O. Yu., Efremov V. Yu., Rapid Mapping of Forest Burnt Areas over Russia Using Landsat Data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 9–20 (in Russian).
4. Belyaev A. I., Korovin G. N., Loupian E. A., Russian forest fires remote monitoring system development state and perspectives, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Issue 3, Vol. 1, pp. 341–350 (in Russian).
5. Egorov V. A., Bartalev S. A., Lupyan E. A., Uvarov I. A., Wild fire monitoring using satellite data, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka*, 2006, No. 2, pp. 98–109 (in Russian).
6. Kashnitsky A. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Bartalev S. S., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Stytsenko F. V., Optimization of burn mapping interactive procedures in remote fire monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 7–16 (in Russian).
7. Kovalev N. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Burtsev M. A., Ershov D. V., Krivosheev N. P., Mazurov A. A., ISDM-Rosleskhoz: 15 years of operation and evolution, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 283–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-283–291.
8. Kotel'nikov R. V., Lupyan 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.
9. Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Grishin A. M., Afonin S. V., Belov V. V., Gridnev Yu. V., Matvienko G. G., Solov'ev V. S., Antonov V. N., Tkachenko V. A., *Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v Rossii. Itogi. Problemy. Perspektivy. analiticheskii*

obzor (Forest fires satellite monitoring in Russia. Results. Problems. Perspectives: Analytical overview), Ser. Ecological, Issue 70, Novosibirsk, 2003, Issue 68, 134 p. (in Russian).

10. 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, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198 (in Russian).
11. Loupian E. A., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Zharko V. O., Krasheninnikova Yu. S., Oksyukevich A. Yu., VEGA satellite service applications in regional remote monitoring systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 215–232 (in Russian).
12. 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. (2015a), 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, Vol. 12, No. 5, pp. 222–250 (in Russian).
13. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015b), IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
14. Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Stytsenko F. V., Forest burn area assessment technique using satellite data, *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii*, *lesnom khozyaistve i ekologii* (Aerospace Methods and GIS-Technologies in Forestry, Forest Management and Ecology), Proc. 6th All-Russia Science Conf., Moscow, 20–22 Apr. 2016, Moscow: TsEPL RAN, 2016, pp. 43–46 (in Russian).
15. 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.
16. Ponomarev E. I., Ivanov V. A., Satellite monitoring of extreme fires dynamic, *Khvoinye boreal'noi zony*, 2012, Vol. 30, No. 3–4, pp. 307–311 (in Russian).
17. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite Detection of Forest Fires and Geoinformation Methods for Calibrating of the Result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84 (in Russian).
18. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Ivanova A. A., Loupian E. A., Sychugov I. G., Forest burnt area assessment possibilities in regions of Russia based on active fires detection by satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 289–298 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
19. Abushenko N. A., Bartalev S. A., Belyaev A. I., Ershov D. V., Zakharov M. Y., Loupian E. A., Korovin G. N., Koshelev V. V., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Min'ko N. P., Nazipov R. R., Semenov S. M., Tashchilin S. A., Flitman E. V., Shchetinsky V. Y., Near Real-time Satellite Monitoring of Russia for Forest Fire Protection, *Mapping Science and Remote Sensing*, 1999, Vol. 36, No. 1, pp. 54–61.
20. 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, Florida: CRC Press, 2013, pp. 259–286.
21. Fraser R. H., Li Z., Cihlar J., Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest, *Remote Sensing of Environment*, 2000, Vol. 74, pp. 362–376.
22. Giglio L., MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide. University of Maryland, 2010, 61 p., available at: https://gis-lab.info/docs/mod14_users_guide_2.4.pdf.
23. Giglio L., MODIS collection 6 active fire product user's guide, revision A. University of Maryland, 2015, 64 p., available at: https://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_C6_Fire_User_Guide_A.pdf.
24. Grégoire J. M., Tansey K., Silva J. M. N., The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, pp. 1369–1376.
25. Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13(7), pp. 795–802, DOI: 10.1134/S1995425520070045.
26. Loboda T., Csiszar I., Estimating burned area from AVHRR and MODIS: validation results and sources of error, *Contemporary Earth Remote Sensing from Space*, 2005, Vol. 2, pp. 415–421.
27. Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Csiszar I., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G., Loboda T. V., Satellite Monitoring of Forest

Fires in Russia at Federal and Regional Levels, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, No. 11, pp. 113–145.
28. Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J., The Collection 5 MODIS Burned Area Product — Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 3690–3707.
29. Sukhinin A. I., French N. H. F., Kasischke E. S., Hewson J. H., Soja A. J., Csiszar I. A., Hyer E. J., Loboda T., Conrad S. G., Romasko V. I., Pavlichenko E. A., Miskiv S. I., Slinkina O. A., AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 93(4), pp. 546–564.
30. Tansey K., Gregoire J. M. C., Defourny P., Leigh R., Pekel van Bogaert E., Bartholomé E., Bontemps S., A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Art. No. L01401.