Метод автоматического детектирования повреждений растительного покрова природными пожарами по данным спутников серий Landsat и Sentinel-2

А.В. Кашницкий

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: kashnizky@gmail.com

Описывается метод автоматического детектирования повреждений растительности природными пожарами по данным с пространственным разрешением 10—30 м/пиксель. Выбор области, в которой необходимо искать повреждения от конкретного пожара, проводится с помощью информации об активном горении по данным прибора MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Выделение повреждённых огнём участков происходит в этой области уже по данным спутников серий Landsat и Sentinel-2. Метод основан на сопоставлении изменений вегетационного индекса в инфракрасном диапазоне после завершения пожара и до его начала. Оценка точности работы метода была проведена по созданной вручную контрольной базе лесных гарей за 2020 и 2021 гг., всего 1112 гарей. Среднее расстояние Жаккара для всех гарей из контрольной базы составило 0,71. Таким образом, разработанный метод вполне пригоден для массового автоматического детектирования повреждений и достаточного числа безоблачных съёмок. В дальнейшем разработанный метод может позволить ежегодно создавать карту повреждений лесов природными пожарами по данным с пространственным разрешением 10—30 м/пиксель.

Ключевые слова: Sentinel-2, Landsat, MODIS, ДЗЗ, спутниковые данные, лесные пожары, мониторинг лесных пожаров, обработка спутниковых данных, детектирование гарей

Одобрена к печати: 30.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-29-38

Введение

Природные пожары на территории России ежегодно проходят огромные площади и приводят к множеству негативных последствий. Один из основных способов оценки масштаба и динамики природных пожаров заключается в анализе информации о пройденной огнём площади и площади повреждённой огнём лесной растительности (контурах гарей). Такую информацию на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время получают с помощью детектирования:

- активного горения. Для решения этой задачи используется информация с пространственным разрешением от сотен метров до километра (например, (Лупян и др., 2017));
- повреждений растительного покрова. Здесь можно выделить работы, выполненные на основе данных среднего пространственного разрешения (сотни метров на пиксель) (например, (Барталев и др., 2015)) и на основе данных высокого пространственного разрешения (до 10 м/пиксель) (например, (Барталев и др., 2014)).

Способ с использованием данных активного горения основывается на достаточно устойчивых и полностью автоматических методах детектирования участков активного горения. Недостатки этого способа в первую очередь связаны с низким пространственным разрешением используемых данных (от сотен метров до километров).

На основе данных среднего (100-500 м) пространственного разрешения удалось создать автоматические методы обработки спутниковых данных на всю территорию России, позволяющие выделять и картографировать участки растительности, повреждённые огнём (Барталев и др., 2015). Эти методы позволяют получить долговременные однородные ряды данных о площадях, на которых возникли повреждения лесного покрова. Однако такие оценки,

хотя и могут использоваться для анализа пожаров в масштабах регионов и страны, являются недостаточно точными и неприменимы в ряде случаев, например при анализе мелких лесных пожаров (Пономарев, Швецов, 2015; Стыценко и др., 2016). Способ на основе анализа повреждений по данным высокого (до 10 м/пиксель) пространственного разрешения даёт наиболее точные результаты для отдельных пожаров. Тем не менее до настоящего времени не существовало полностью автоматических методов обработки таких данных, позволяющих получать надёжную информацию на больших территориях. Поэтому для массовой обработки информации на уровне крупных регионов или страны используются методы, требующие участия операторов и ручной обработки данных. Это приводит к достаточно большим временным затратам, а также вносит определённую субъективность в процесс обработки и получаемые результаты, таким образом затрудняя получение однородных долговременных рядов данных по большой территории.

Для решения описанной проблемы была сформулирована задача, выполненная в настоящей работе, а именно: необходимость разработки метода автоматического детектирования постпожарных повреждений растительного покрова на территории России на основе данных ДЗЗ высокого (10–30 м/пиксель) пространственного разрешения. С его помощью может быть реализована возможность получения точной и независимой информации о повреждениях лесов пожарами на территории России с пространственным разрешением 10–30 м/пиксель. В статье описываются подходы, позволившие перейти к автоматическому получению контуров постпожарных повреждений растительности, основные этапы работы созданного метода и оценивается его точность. Также обсуждаются возможные проблемы разработанного метода и дальнейшие шаги по его применению.

Описание метода

Для решения поставленной задачи был выбран следующий подход. Использовалась информация о контурах природных пожаров на основе активного горения по данным прибора MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) как указание для дальнейшего получения данных спутников серий Landsat и Sentinel-2 в оптическом и инфракрасном диапазонах. Затем с помощью этих данных проводилось выделение повреждённых огнём участков в области обнаруженного активного горения. Схема обработки в соответствии с предложенным подходом приведена на *рис. 1* (см. с. 31). Опишем далее каждый этап работы метода.

Контуры природных пожаров (пройденной огнём территории) получаются из ранее созданной в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) базы данных (Лупян и др., 2017). Такие контуры были получены путём объединения горячих точек (пожарных пикселей) на отдельных сеансах спутников Aqua и Terra, полученных из коллекции данных MC6 прибора MODIS (Лупян и др., 2021). Таким образом, в качестве входной информации используются контуры пройденной огнём площади всех обнаруженных по активному горению пожаров на территории России. Отметим, что пространственное разрешение этих данных составляет всего 1 км/пиксель. Также по информации активного горения есть дополнительные сведения о времени начала и времени завершения каждого пожара. Эти моменты соответствуют первому и последнему обнаружению горячей точки в области пожара на данных прибора MODIS.

Для каждого полученного из базы данных контура проводится поиск соответствующих ему повреждений растительности по данным высокого (10–30 м/пиксель) пространственного разрешения. Схема обработки итеративная. На первом шаге обработка происходит в границах прямоугольника, описывающего контур пожара по данным активного горения. В границах этой области выполняется поиск всех доступных сцен спутников серии Landsat и Sentinel-2 за следующие интервалы времени. После завершения пожара — начиная с момента последнего детектирования активного горения и не позднее, чем через 45 дней после этого момента. Далее этот интервал дат расширяется на 10 дней в каждую сторону и получается интервал дат для выбора данных до возникновения пожара. Данные в этом интервале

времени подбираются за два предыдущих года. Все данные извлекаются из архивов Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). Предполагается использование данных после проведения атмосферной коррекции. С учётом способа выделения повреждений, который будет описан далее, допустимо в отдельных случаях также использование данных без атмосферной коррекции. Однако вопрос сопоставления информации с коррекцией и без неё, а также влияния этого на точность не исследовался в настоящей работе.



Рис. 1. Схема работы метода

Все найденные сцены проходят предварительную обработку, включающую в себя перевод информации в каждом пикселе в коэффициент спектральной яркости (КСЯ), приведение географической проекции и пространственного разрешения, а также обрезку по границам области обработки, полученным на предыдущем этапе. Исходная проекция всех используемых данных спутников серий Landsat и Sentinel-2 — универсальная поперечная проекция Меркатора UTM (*анел*. Universal Transverse Mercator). Проекция (зона в проекции UTM) и пространственное разрешение, в которую переводятся все данные, выбирается на основе первой по времени сцены.

На следующем этапе проводится попиксельное маскирование каждой сцены. В качестве масок используются имеющиеся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» стандартные маски облачности. Для данных спутников серии Sentinel-2 это результат классификации сцены, полученный алгоритмом Sen2Cor. Указанный продукт подробно описан в технической документации (https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/) и ряде работ (например, (Louis et al., 2016)). Для данных спутников серии Landsat это может быть один из трёх продуктов в зависимости от наличия данных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг»: стандартный продукт качества коллекции 2 (https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsatcollection-2-quality-assessment-bands), стандартный продукт качества коллекции 1 (https:// www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-1-level-1-quality-assessment-band) или маска облачности, полученная с помощью алгоритма FMASK. Маскируются все пиксели, не относящиеся к классу «чистая поверхность», а также водные пиксели. Применение таких стандартных масок позволяет убрать большую часть сплошной облачности из обработки. Однако отметим, что все используемые маски имеют различные ошибки, из-за чего в обработке в отдельных случаях может оставаться значительное количество облачных пикселей, дымки или теней от облаков. Также ошибки возможны и в обратную сторону, когда маскируются чистые пиксели: например, сильно повреждённая растительность может быть маскирована как тени от облаков. Особенно много ошибок обнаруживается на сценах, в которых значительную часть занимает облачность. В связи с этим на следующем этапе проводится полное исключение сцен с облачностью выше порога в области обработки. Порог был подобран эмпирически в результате анализа нескольких сотен гарей 2021 г. в центральной Сибири и составляет 20 % от общего числа пикселей. То есть в случае, если маскированные пиксели занимают более 20 % от числа всех пикселей в области обработки, то такие сцены полностью удаляются, включая безоблачные пиксели облачных сцен.

На следующем этапе для каждой оставшейся в обработке сцены проводится расчёт спектральных индексов NDSI (*англ*. Normalized Differencial Snow Index) и NBRswir (*англ*. Normalized Burn Ratio — нормализованный индекс гарей; *англ*. short wave infrared, коротковолновый инфракрасный) по формулам:

$$NDSI = \frac{BLUE - SWIR2}{BLUE + SWIR2}$$
, $NBRswir = \frac{SWIR2 - SWIR1}{SWIR2 + SWIR1}$,

где BLUE — голубой; SWIR1, SWIR2 — значения КСЯ в каналах соответствующих диапазонов электромагнитного спектра. Для прибора OLI (*англ*. Operational Land Imager) (спутники серии Landsat) это каналы 2, 6, 7 соответственно; для прибора MSI (*англ*. Multispectral Instrument) (спутники серии Sentinel-2) — каналы 2, 11, 12.

Спектральный индекс NDSI применяется для дополнительного исключения оставшейся облачности. Независимо для периодов до начала и после завершения пожара оставляются только такие значения, которые не выходят за пределы трёх среднеквадратических отклонений от медианного значения за период. Интервалы периодов «до» (за два года) и «после» были описаны ранее.

Спектральный индекс NBRswir (Liu et al., 2020) чувствителен к любым изменениям растительного покрова. Маска повреждений вычисляется с его помощью на основе разностного индекса:

 $DifNBRswir = medianNBRswir_{nocne} - medianNBRswir_{no}$,

где DifNBRswir — разностный индекс; medianNBRswit_{после} — медианное значение за интервал после завершения пожара; medianNBRswit_{до} — медианное значение за интервал до начала пожара. Маской считаются все такие пиксели, где:

 $DifNBRswir > 0,15 \quad \text{или} \quad (DifNBRswir > 0,05 \quad \text{и} \quad DifNBRswir > 2stdNBRswir_{\text{до}}),$

где stdNBRswir_{до} — среднеквадратическое отклонение индекса NBRswir за указанный ранее интервал времени до начала пожара (за два года).

Представленные в формуле коэффициенты подобраны эмпирически в результате анализа нескольких сотен гарей 2021 г. в центральной Сибири. Отметим, что в отдельных случаях может потребоваться коррекция приведённых коэффициентов.

На следующем этапе проводится пространственная фильтрация полученной маски с медианным фильтром окном в 3 пикселя. При этом из-за особенностей видимости повреждений растительности на спутниковых данных некоторые участки гари могут быть не детектированы в маске. И наоборот, могут быть отдельные пиксели или группы пикселей с детектированными изменениями, при этом не имеющими отношения к пожарным повреждениям растительности. Для объединения всех определённых по маске участков на следующем этапе совершается ряд дополнительных операций, на схеме на *рис. 1* обозначенных как объединение и ассоциация векторных контуров с пожаром. Для этого полученная маска векторизуется. Выбирается самый большой по площади отдельный полигон детектированных по маске повреждений в области обработки. Вводится предположение, что этот полигон связан именно с пожаром, повреждения от которого детектируются. Вокруг него создаётся буфер в 200 м, и все более мелкие полигоны, попавшие в этот буфер, добавляются к ассоциированному с пожаром векторному объекту. После добавления операция повторяется, но буфер формируется уже вокруг нового объединённого объекта. Эта операция происходит итеративно до тех пор, пока новые полигоны не перестанут добавляться к векторному объекту, ассоциированному с пожаром. В результате имеется единый векторный объект, выступающий финальным контуром повреждений растительности для данной области обработки.

На последнем этапе осуществляется проверка выхода полученного векторного контура повреждений за границы области обработки. Процесс на этом этапе продемонстрирован на *рис. 2.* Если границы контура повреждений пересекают границы прямоугольной области обработки, то область расширяется на 20 % от текущего размера. Расширение на каждой итерации происходит только в ту сторону, где произошло пересечение границ. После этого все этапы обработки повторяются, начиная с подбора спутниковых данных. Если пересечений границ детектированного векторного объекта и границ прямоугольной области обработки нет, то процедура поиска повреждений завершается. Как уже было отмечено, на первом шаге процедура начинается с области контура пожара по данным активного горения. Значение расширения в 20 % было подобрано эмпирически в результате анализа нескольких сотен гарей 2021 г. в центральной Сибири.



Рис. 2. Этап проверки выхода контура за границы области обработки на примере поиска повреждений одного пожара. В качестве подложки использован слой World Imagery. 2.1 — контур пожара по активному горению; 2.2-2.9 — результирующая растровая маска (до этапа векторизации) на каждом шаге последовательного расширения области обработки; на 2.10 — индекс NBRswir на сцене после пожара, наглядно демонстрирующий повреждения растительности; на 2.11 — финальный векторный контур повреждений, полученный с помощью описываемого метода

Оценка точности и обсуждение возможных ошибок

Оценка точности описываемого метода проведена по ранее созданной базе контуров лесных гарей (Kashnitskii et al., 2021). Вся информация из этой базы данных (БД) считалась контрольной. Указанная база представляет собой набор записей, содержащих информацию о пространственном контуре постпожарных повреждений растительности на основе данных высокого пространственного разрешения, характеристиках спутниковых данных, по которым этот контур был получен, а также дополнительную информацию о пожаре на основе данных активного горения. Данная база гарей была получена несколькими операторами в ручном режиме с помощью метода, описанного в работе (Кашницкий и др., 2015). Эта база представляется достаточно надёжным источником информации о контурах постпожарных повреждений леса, несмотря на некоторые возможные ошибки при её наполнении, которые обусловлены как сложностью самого процесса, так и человеческим фактором. Поскольку и записи в контрольной базе данных, и результаты обработки с помощью описываемого метода — векторные контуры, то в качестве метрики точности было использовано расстояние Жаккара (англ. Jaccard distance, далее -J). Для каждой гари эта метрика была рассчитана как отношение площади пересечения контрольного и полученного описываемым методом контуров к площади их объединения. Результаты оценки точности представлены в таблице.

Год	Всего гарей в контрольной БД	Гарей с расстоянием Жаккара (% от найденных)				
		J > 0,7	J > 0,5	J < 0,5	Не удалось найти контур (% от всех)	Среднее J
2021	251	172 (71 %)	205 (84 %)	38 (16 %)	8 (3 %)	0,70
2020	861	596 (74 %)	672 (83 %)	133 (17 %)	56 (7 %)	0,72

Показатели оценки точности работы метода по контрольной базе гарей

Хотя контрольная база гарей содержит информацию за промежуток времени с 2009 до 2021 г., для оценки были использованы только гари за 2020 и 2021 гг. Это связано с наличием в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» на всю территорию России нужных данных с атмосферной коррекцией и продуктов для маскирования облачности только за период с 2019 г. Так как в методе используется информация за два предшествующих пожару года, то надёжно массово обработать данные для оценки удалось только за отдельные годы. За другие годы получение контуров гарей возможно только по отдельным участкам или за ограниченные периоды времени. Как уже было описано выше, вопрос совместного использования данных с атмосферной коррекцией и без неё не решался в настоящей работе.

Отметим также возможные проблемы и недостатки метода и проведённой оценки точности. Из-за несовершенства применяемого способа создания контрольной базы гарей возможная точность описываемого автоматического метода может быть как выше, так и ниже указанных значений. При проведении визуального экспертного анализа результатов обработки выяснилось, что в отдельных случаях автоматическим методом был получен более точный контур повреждений по сравнению с контуром, имеющимся в контрольной базе гарей. Однако также проблемой оценки оказывается тот факт, что в контрольной базе собраны только такие гари, которые надёжно были детектированы экспертом и по которым имеются близкие ко времени пожара безоблачные снимки.

Для более полной оценки разработанного метода была проведена обработка всех лесных пожаров на территории России за 2022 г. Для уменьшения ошибок и ложных срабатываний брались такие пожары, которые детектировались по активному горению несколько раз. Лесным считался пожар, более 80 % которого относится к лесным пикселям на основе карты растительного покрова по данным MODIS. Метод получения этой карты был описан в работе (Барталев и др., 2016). Поскольку автор не имел надёжных точных контуров гарей за 2022 г., то оценка результатов проводилась только визуальным сопоставлением полученного методом контура с видимыми на спутниковых данных повреждениями. Примеры полученных контуров приведены на *рис. 3.* Все контуры на всех рисунках показаны на фоне разновременного синтеза каналов, где в качестве красного канала синтеза использовано медианное значение индекса NBRswir по всем чистым измерениям за период после завершения пожара, в качестве зелёного и голубого каналов — медианное значение индекса NBRswir по всем чистым измерениям за период после завершения пожара, в качестве уелёного и голубого каналов — медианное значение индекса NBRswir по всем чистым измерениям за интервал до начала пожара. На таком разновременном синтезе все повреждённые участки растительности отображаются оттенками красного.



Рис. 3. Примеры результатов работы метода. Зелёный контур получен с помощью описываемого метода по данным высокого пространственного разрешения; оранжевый контур получен по данным активного горения. Контуры показаны на фоне разновременного синтеза (пояснения в тексте). В качестве подложки использована мозаика World Imagery

Приведём основные обнаруженные в результате визуального анализа проблемы выделения контуров:

- Методические проблемы с влиянием хозяйственной деятельности человека (сельское хозяйство, рубки леса, постоянные огни). А именно, ряд детектированных контуров очевидно неверный или вообще не связан с пожарами и объясняется процессами распашки или рубкой леса.
- Проблемы на частично покрытых лесом территориях. Метод создавался в первую очередь для детектирования контуров повреждений лесной растительности и плохо работает для нелесных пожаров.
- Проблемы наличия данных. В ряде случаев из-за полного отсутствия безоблачных измерений на часть гари контур не включал все повреждённые участки. Также к проблеме наличия данных относится и неверное определение контура в случае единичных безоблачных измерений, особенно при плохом качестве применяемых масок облачности. В отдельных случаях неравномерность покрытия данными приводила к хорошему выделению контура в одной части гари и плохому — в другой.
- Проблемы порогов и слабых повреждений. В ряде случаев выбранные пороги не покрывали все повреждения растительности. Особенно это актуально для быстро зарастающих весенних гарей, для которых выбранный длинный интервал в 45 дней после завершения является слишком большим при слабом повреждении растительности.

Проблемы объединения векторных объектов и ассоциации контуров с пожаром. В случае наличия рядом других пожаров могла возникать ситуация, когда к пожару приписывался контур гари другого, рядом расположенного пожара. Также отмечены случаи, когда не вся область гари попадала в контур, так как её часть была отделена участком, на котором повреждения не видны. И расстояние между такими участками с видимыми повреждениями было больше, чем выбранное значение буфера в 200 м.

Некоторые из описанных проблем могут быть решены при дальнейшем совершенствовании метода. Например, исключить объекты, связанные с сельским хозяйством или расположенные на частично покрытых лесом территориях, поможет применение более точной маски леса. Проблемы с наличием данных можно решить, если полностью исключать из обработки ситуации, где число безоблачных измерений меньше некоторого числа, не позволяющего собрать надёжную статистическую информацию о каждой точке обрабатываемой области. С другой стороны, такое решение существенно уменьшит общее число гарей, которые можно детектировать с помощью предложенного метода.

Заключение

Несмотря на ряд описанных проблем, можно заключить, что разработанный метод пригоден для массового автоматического детектирования повреждений растительности природными пожарами в случае наличия достаточно сильных повреждений и достаточного числа безоблачных съёмок. Дальнейшим направлением работ может быть:

- совершенствование метода и решение обозначенных проблем;
- реализация возможности совместного использования серий данных спутников Landsat и Sentinel-2, а также данных с атмосферной коррекцией и без неё;
- выработка критериев гарантийного срабатывания метода;
- переход к выделению внутри контуров участков разной степени повреждений, а также повреждений разных типов растительного покрова;
- валидация получаемых контуров повреждений и контрольной базы гарей, в том числе с использованием наземной информации;
- создание карт повреждений лесной растительности и внедрение их в оперативную практику.

Работа выполнена при поддержке гранта МК-4903.2021.1.5. Получение и обработка спутниковых данных были реализованы с помощью возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Литература

- 1. 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.
- 2. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- 3. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 4. *Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Барталев С.С., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Стыцен*ко 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.
- 5. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения)

// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.

- 6. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 7. Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Сенько К.С., Балашов И.В., Мазуров А.А. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
- 8. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–84. DOI: 10.7868/S0205961415010054.
- 9. *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.
- Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Saigin I. A., Stytsenko F. V., Loupian E. A. Research database of burnt areas over Russia based on high resolution remote sensing data // All-Russian Conf. with Intern. Participation "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes" (SDM-2021): CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3006. P. 108–115. DOI: 10.25743/SDM.2021.79.43.015.
- 11. *Liu S.*, *Zheng Y.*, *Dalponte M.*, *Tong X.* A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data // European J. Remote Sensing. 2020. V. 53. No. 1. P. 104–112. DOI: 10.1080/22797254.2020.1738900.
- Louis J., Debaecker V., Pflug B., Main-Knorn M., Bieniarz J., Mueller-Wilm U., Cadau E., Gascon F. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users // Proc. Living Planet Symp. Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. ESA SP-740. 8 p.

Method for automatic detection of burned areas by wildfires using Landsat and Sentinel-2 satellite data

A.V. Kashnitskii

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: kashnizky@gmail.com

This paper describes a method of automatic detection of vegetation damage by natural fires using data with a spatial resolution of 10-30 meters per pixel. The area to be searched for fire damage is selected using information on active burning from MODIS data. The fire-damaged areas are identified in this area by data from Landsat and Sentinel-2 satellites. The method is based on the comparison of changes in the vegetation index in the infrared range after the end of the fire and before its start. The accuracy of the method was evaluated using a manually created benchmark database of forest burned areas for the years 2020 and 2021 (total 1112 burned areas). The average Jaccard distance for all the burned areas in the control database was 0.71. Thus, the developed method is quite suitable for mass automatic detection of vegetation damage by natural fires in case of sufficiently strong damage and sufficient number of cloudless surveys. In the future, the developed method may allow to create an annual map of forest damage by natural fires using data with a spatial resolution of 10-30 meters per pixel.

Keywords: Sentinel-2, Landsat, MODIS, remote sensing, satellite data, forest fires, forest fire monitoring, satellite data processing, burned areas detection

> Accepted: 30.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-29-38

References

- 1. 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).
- 2. Bartalev S.A., Styitsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
- 3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
- 4. 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).
- 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.
- Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the "IKI-Monitoring" center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S., Balashov I. V., Mazurov A. A., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
- 8. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite detection of forest fires and Geoinformation Methods for calibration of results, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415010054.
- 9. 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.
- Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Saigin I. A., Stytsenko F. V., Loupian E. A., Research database of burnt areas over Russia based on high resolution remote sensing data, *All-Russian Conf. with Intern. Participation "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes"* (SDM-2021): CEUR Workshop Proc., 2021, Vol. 3006, pp. 108–115, DOI: 10.25743/SDM.2021.79.43.015.
- 11. Liu S., Zheng Y., Dalponte M., Tong X., A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data, *European J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 53, No. 1, pp. 104–112, DOI: 10.1080/22797254.2020.1738900.
- Louis J., Debaecker V., Pflug B., Main-Knorn M., Bieniarz J., Mueller-Wilm U., Cadau E., Gascon F., Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users, *Proc. Living Planet Symp.*, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016, ESA SP-740, 8 p.