

Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР

Д. В. Лозин^{1,2}, Е. А. Лупян¹, И. В. Балашов¹, М. А. Бурцев¹,
Е. Е. Волкова¹, А. А. Мазуров¹, А. М. Матвеев¹

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

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

Представлено описание модификации алгоритма MOD14 (*англ.* MODIS fire detection algorithm; MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) для решения задачи автоматического детектирования пожаров по данным с прибора МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения, спутники серии «Метеор-М» № 2). Приведено краткое описание MOD14 и оценка возможной модификации его параметров для адаптации к данным МСУ-МР. Описан процесс нахождения модифицируемых параметров для решения поставленной задачи. Представлено краткое описание изменённых элементов алгоритма. Предложена схема оценки качества работы модифицированного алгоритма. Приводятся результаты оценки работы, выполненной на примере обработки данных МСУ-МР по территории Российской Федерации за 2022 г. Показаны результаты оценки качества работы модифицированного алгоритма: ошибка ложного детектирования (7,3 % для всех пожаров, 2,9 % для лесных) и ошибка пропусков пожаров, развивающихся более 1 нед (0,57 и 0,37 % соответственно). На основе опыта, накопленного при проведении адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР, разработана достаточно универсальная схема процесса адаптации этого алгоритма для использования данных с различных спутниковых систем, обладающих схожими с MODIS спектральными характеристиками каналов. В конце обозначены задачи, решение которых позволит в полном объёме обеспечить автоматический мониторинг пожаров, основанный на использовании адаптированного к данным МСУ-МР алгоритма.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, дистанционный мониторинг пожаров, алгоритмы детектирования пожаров, прибор МСУ-МР, алгоритм MOD14

Одобрена к печати: 05.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245

Введение

Одна из основных задач спутникового мониторинга лесных пожаров — их обнаружение (в том числе раннее) и оперативный контроль динамики развития. При этом необходимым условием обеспечения мониторинга выступает получение оперативной, достоверной и однородной информации по большим территориям. Как уже обсуждалось (см., например, работы (Абушенко и др., 1998; Лупян и др., 2017, Пономарев и др., 2017, 2019)), решение подобных задач возможно только при использовании полностью автоматических алгоритмов детектирования пожаров. Одним из наиболее устойчивых и надёжных автоматических алгоритмов детектирования пожаров по спутниковым данным выступает MOD14 (*англ.* MODIS fire detection algorithm; MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Giglio et al., 2003, 2016, 2020; Justice et al., 2002; Kaufman et al., 1998), рассчитанный на работу с данными прибора MODIS (Bobbe et al., 2002), установленного на спутниках Terra и Aqua. Соответствующий данному прибору информационный продукт пожаров (*англ.* Collection 6 MODIS ActiveFire/HotspotData (MCD14DL)) (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-realtime/firms/c6-mcd14dl>) доступен с 2000 г. и покрывает всю площадь Земли, имея при этом высокий уровень достоверности данных (Giglio et al., 2018). Благодаря всему вышеперечисленному продукт Collection 6 — один из самых широко применяемых как для глобального, так и для регионального мониторинга пожаров и решения широкого круга научных задач (см. например, работы (Лозин, 2023; Лозин и др., 2023; Лупян и др., 2022; Chuvieco et al., 2008;

Ichoku, Kaufman, 2005; Lee et al., 2020; McCarty et al., 2007; Mollicone et al., 2006; Peterson et al., 2014; Vadrevu et al., 2012; Wooster et al., 2005; Zhao et al., 2013)).

В июле 2019 г. был запущен отечественный метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-2. На его борту функционирует прибор МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения), который ведёт съёмку в шести спектральных диапазонах. Сравнение спектральных характеристик каналов MODIS и МСУ-МР представлено в *табл. 1*. Спектральные диапазоны каналов МСУ-МР шире и практически во всех случаях (кроме 3-го канала) содержат в себе диапазоны соответствующих каналов MODIS. Однако в целом прибор МСУ-МР обладает набором каналов, соответствующих каналам 1, 2, 7, 21, 22, 31, 32 прибора MODIS, которые используются при детектировании пожаров.

Таблица 1. Сравнение каналов MODIS, используемых в алгоритме детектирования MOD14, с аналогичными каналами МСУ-МР

MODIS			МСУ-МР		
Номер канала	Спектральные диапазоны, мкм	Температура насыщения, К	Номер канала	Спектральные диапазоны, мкм	Температура насыщения, К
1	0,620–0,670		1	0,5–0,7	
2	0,841–0,876		2	0,7–1,1	
7	2,105–2,155		3	1,6–1,8	
21	3,929–3,989	500	4	3,5–4,1	327
22	3,929–3,989	331			
31	10,780–11,280	400 (Terra) 340 (Aqua)	5	10,5–11,5	317
32	11,770–12,270		6	11,5–12,5	

Каналы 21, 22, 31 MODIS используются непосредственно для детектирования пожаров. Каналы 21 и 22 фактически дублируют друг друга и различаются только температурой насыщения. По умолчанию MOD14 использует данные из 22-го канала, однако при насыщении или пропусках в этих данных MOD14 дополняет их, используя 21-й канал. У МСУ-МР аналогичный канал с высокой температурой насыщения отсутствует. Каналы 1, 2, 7, 32 MODIS в MOD14 используются для различных фильтраций, предотвращая ложные детектирования (ЛД) алгоритма в разных случаях.

Данные МСУ-МР имеют приблизительно такое же пространственное разрешение, как и данные прибора MODIS, которые используются для детектирования пожаров (около 1 км). Орбита спутника «Метеор-М» № 2-2 примерно соответствует орбите спутника Aqua. Всё это позволяет считать, что возможности прибора МСУ-МР в целом сопоставимы с возможностями прибора MODIS, использующимися для решения задачи детектирования пожаров.

Основная задача настоящей работы заключается в адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными МСУ-МР. В работе описан подход проведения такой адаптации и основные характеристики полученного в результате алгоритма, ориентированного на детектирование пожаров по данным прибора МСУ-МР. Представлена проверка результатов работы адаптированного алгоритма на примере обработки данных МСУ-МР за 2022 г. по территории Российской Федерации. На основе сравнения результатов детектирования пожаров по данным MODIS и МСУ-МР проводится оценка точности работы адаптированного алгоритма и возможности его использования для организации мониторинга лесных пожаров на территории РФ с использованием функционала спутников серии «Метеор-М». Также в работе на основе опыта проведения адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР предложена возможная схема процесса, которая может использоваться при адаптации этого алгоритма для работы с данными с других спутниковых систем наблюдения Земли, обладающих сопоставимыми характеристиками с прибором MODIS.

Описание алгоритма MOD14

Задачей алгоритма детектирования пожаров MOD14 является определение на анализируемых спутниковых изображениях горячих точек (ГТ) — пикселей, в которых наблюдается горение. Описание набора характеристик данных прибора, используемых в алгоритме, представлено в *табл. 2*.

Таблица 2. Описание характеристик, используемых в алгоритме MOD14

Значения в каналах MODIS	
Характеристика (значение в канале)	Спектральные диапазоны каналов MODIS, мкм (номер канала)
R_1	0,620–0,670 (1)
R_2	0,841–0,876 (2)
R_3	2,105–2,155 (7)
T_4	3,929–3,989 (21/22)
T_5	10,780–11,280 (31)
T_6	11,770–12,270 (32)
Разностное значение и характеристики фона	
Характеристика	Краткое описание
DT	$T_4 - T_5$
$T_4_mean, T_5_mean, DT_mean$	Средние значения фона вокруг рассматриваемого пикселя
T_4_mad, T_5_mad, DT_mad	Абсолютное среднее отклонение фона
Bkg_fire_mad	Абсолютное среднее отклонение высокотемпературной части фона

Подробно работа данного алгоритма описана в публикации (Giglio et al., 2020), поэтому мы лишь кратко остановимся на основных его особенностях. На первых этапах работы алгоритма для каждого изображения MODIS определяются потенциальные ГТ. Для этого вначале на данных фильтруются гарантированно ошибочные значения, после чего проходит выделение пикселей, покрывающих водную поверхность и облачность (см. *табл. 3*, секция «Маскирование облачности»). Из оставшихся пикселей с помощью набора тестов определяются потенциальные ГТ (см. *табл. 3*, секция «Определение потенциальных ГТ»).

Таблица 3. Параметризованный набор тестов MOD14, использующий описанные в *табл. 2* характеристики анализируемых точек для выявления ГТ

Секция	Тесты
Маскирование облачности	$R_1 + R_2 > \mathbf{cloud_r1r2}$ $T_6 < \mathbf{cloud_t6}$
Определение потенциальных ГТ	$T_4 > \mathbf{low_t4}$ and $R_2 < \mathbf{cloud_r2}$ and $DT > \mathbf{low_dt}$
Характеристика фона (перегретые точки)	$T_4 > \mathbf{bkg_t4}$ and $DT > \mathbf{bkg_dt}$
Пороговые тесты	test1: $T_4 > \mathbf{hot_t4}$ test2: $DT > (DT_mean + \mathbf{sigma1} \times DT_mad)$ test3: $DT > (DT_mean + \mathbf{deldt})$ test4: $T_4 > (T_4_mean + \mathbf{sigma2} \times T_4_mad)$ test5: $T_5 > (T_5_mean + T_5_mad - \mathbf{del31})$ test6: $Bkg_fire_mad > \mathbf{minbkg}$ hotspot = test1 test2×test3×test4×(test5 test6 night)

Для каждого такого пикселя рассчитываются характеристики окружающего фона. Вначале из фона отбрасываются все пиксели, выделенные как облачные или водные. Затем из оставшихся выделяется высокотемпературная часть фона (см. *табл. 3*, секция «Перегретые точки»). Для перегретых точек их среднее значение и отклонения считаются отдельно, все оставшиеся пиксели используются для расчёта статистики фона потенциального пикселя (T_{4_mean} , T_{5_mean} , DT_mean , T_{4_mad} , T_{5_mad} , DT_mad). Далее к каждой потенциальной ГТ применяется набор пороговых тестов. В случае успешного прохождения части из этих тестов (см. *табл. 3*, секция «Пороговые тесты») пиксель помечается как ГТ. На последних этапах работы алгоритма все ГТ проверяются на предмет возможных ЛД, которые могут возникать вследствие высокой температуры подстилающей поверхности, бликов солнца и ложных срабатываний на побережье.

В *табл. 3* приведён набор критериев, рассчитываемых для каждого пикселя изображения, которым должны соответствовать детектируемые ГТ (названия параметров (порогов) выделены полужирным начертанием). Для адаптации алгоритма к работе с данными МСУ-МР необходимо подобрать оптимальные значения данных параметров.

Адаптация параметров MOD14 для работы с данными МСУ-МР

Первым этапом решения поставленной задачи стало сопоставление распределения температуры, регистрируемой MODIS и МСУ-МР на пожарах. Находящийся в открытом доступе информационный продукт пожаров MCD14DL содержит информацию обо всех ГТ, зарегистрированных MODIS, включая температуру в 21/22-м (4 мкм) и 31-м (11 мкм) каналах. Для построения аналогичной выборки по данным МСУ-МР пожары на снятых данным прибором сценах локализовались с опорой на ГТ продукта MCD14DL, которые были зарегистрированы на территории РФ за 2021 г. Каждой ГТ подбирался покрывающий её набор данных МСУ-МР. Время съёмки такого набора отличалось от времени регистрации ГТ не более чем на 30 мин. На момент построения данной выборки учитывалась проблема с возможной ошибкой географической привязки сцен МСУ-МР, поэтому на сцене МСУ-МР выбиралась точка с максимальной яркостной температурой в 4-м канале (4 мкм) в радиусе 9 км вокруг центра с координатами ГТ MODIS. Она принималась за ГТ на сцене МСУ-МР, и для неё рассчитывался описанный в *табл. 2* набор характеристик, после чего этот набор добавлялся в выборку. Далее в автоматизированном режиме выборка проходила различные фильтрации. Исключались дубли и точки, полученные со сбойных данных. Также выделялись группы точек с похожим набором характеристик, относящиеся к данным, на которых не было подтверждено наличие пожара. В результате объём итоговой выборки превысил 12 000 наборов. На *рис. 1* (см. с. 235) представлено сравнение распределения яркостной температуры ГТ продукта MCD14DL и сформированного набора ГТ МСУ-МР в каналах со схожим спектральным диапазоном МСУ-МР (4-й и 5-й каналы) и MODIS (21/22-й и 31-й каналы).

Анализ полученной статистики позволил выделить следующие факторы, определяющие разницу между значениями температуры ГТ, полученными с двух разных приборов:

- температура ГТ в 4-м и 5-м каналах МСУ-МР в среднем ниже температуры ГТ MODIS;
- для набора ГТ МСУ-МР распределение температуры имеет более узкий диапазон;
- насыщение 4-го канала МСУ-МР при температуре в 327 К приводит к большой доле ГТ, зарегистрированных с этой температурой (порядка 35 %).

Также было обнаружено, что для МСУ-МР ГТ, имеющие температуру $280 < T_4 < 300$ К, в большинстве случаев были зарегистрированы на ночных данных. Такие различия говорят о необходимости изменения порогов MOD14 для работы с данными МСУ-МР.

Собранная выборка ГТ по МСУ-МР была дополнена отрицательной выборкой точек (порядка 200 тыс.), не являющихся горячими. Для этого был взят набор данных МСУ-МР, покрывающих области, на которых не было зарегистрировано ГТ MODIS в день съёмки взятого набора данных. Далее параметры MOD14 изменялись таким образом, чтобы алгоритм

срабатывал положительно на обучающей выборке горячих точек и отрицательно на выборке точек, не являющихся горячими. В результате порог hot_t4 был установлен в районе температуры насыщения прибора МСУ-МР (327 К). Также изменениям подверглись параметры σ_1 и σ_2 , определяющие необходимую величину превышения значений T_4 и DT для ГТ от среднего по фону (произведение σ и абсолютного среднего отклонения по фону вокруг точки). Уменьшение значений данных параметров позволило алгоритму увеличить количество правильных детектирований без значимых увеличений количества ЛД.

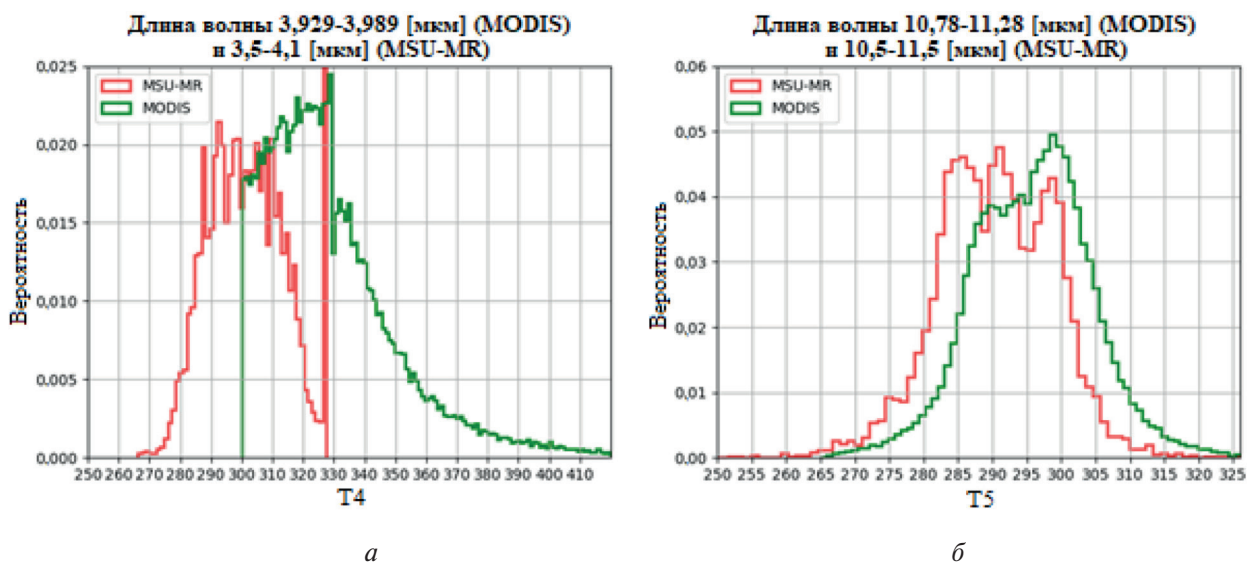


Рис. 1. Распределение яркостной температуры горячих точек по данным МСУ-МР и MODIS: а — канал 4 МСУ-МР и канал 21 MODIS (красная линия в точке 327 по горизонтальной оси достигает значения 0,345 по вертикальной оси); б — канал 5 МСУ-МР и канал 31 MODIS

Таким образом, в результате эксперимента по поиску пикселей с максимальной температурой в канале 4 мкм данных МСУ-МР вокруг ГТ MODIS было получена первая версия набора параметров, позволяющих использовать MOD14 с данными МСУ-МР.

На втором этапе была проведена тестовая обработка данных МСУ-МР за август 2022 г. на территории РФ алгоритмом MOD14 с нулевой версией скорректированных параметров. Детектированные алгоритмом ГТ были изучены на предмет возможных пропусков и ЛД. В результате анализа ошибочных случаев σ_1 и σ_2 были повторно уменьшены.

Третьим этапом стало проведение аналогичной обработки данных МСУ-МР, покрывающих территорию РФ за весь 2022 г., алгоритмом с обновлённой версией параметров. Такое увеличение объёма обрабатываемых данных помогло выделить несколько групп случаев возникающих пропусков.

Первая такая группа связана с детектированием пожаров на ночных наборах данных. Для устранения пропусков изменениям подверглись сразу несколько параметров, которые были отдельно определены для ночных данных. Так, порог hot_t4 был уменьшен на 5 К относительно оригинального MOD14. Также был изменён порог low_t4 , определяющий минимальную температуру T_4 , ниже которой точка не считается ГТ. Как было отмечено ранее, для ночных данных МСУ-МР были зафиксированы ГТ с температурой 280–300 К, поэтому данный порог был соответствующим образом изменён для ночных сцен. Другим порогом, отдельно заданным для ночных данных, является low_dt , определяющий минимально возможную для ГТ DT . Как и в случае с low_t4 , оказалось, что на ночных данных в области пожаров наблюдалось минимальное расхождение в разнице температуры, что послужило мотивацией для уменьшения этого параметра для ночных данных до минимума. Важно отметить, что эксперимент по полному исключению данной проверки для ночных данных привёл к возникновению большого количества ЛД.

Вторая группа пропусков оказалось связана с ложной фильтрацией облачности. Решением проблемы стало увеличение эмпирическим путём значений фильтрующих порогов в видимых каналах ($cloud_r1r2$, $cloud_r2$).

Третья группа пропусков наблюдалась для больших пожаров (больше соседних 10 ГТ на одном наборе данных). Оказалось, что проблема крылась в определении перегретых точек. Пороги, по которым они определялись, оказались слишком высокими для данных МСУ-МР. В результате на крупных пожарах при расчёте фоновых характеристик большая часть пожара вокруг рассчитываемой точки не относилась к перегретым точкам, что приводило к завышению средних значений фона и последующему отрицательному срабатыванию тестов. Уменьшение порогов для определения перегретых точек (bkg_t4 и bkg_dt) стало решением указанной проблемы и свело к минимуму количество пропусков на больших пожарах на рассматриваемых данных.

Некоторое улучшение в точности работы алгоритма также удалось получить благодаря изменениям параметров $del31$ и $minbkg$. $Del31$ определяет минимальную необходимую разницу между T_5 ГТ и суммой среднего и абсолютного среднего отклонения по фону. Для МСУ-МР данный параметр был уменьшен на 1 К. Параметр $minbkg$ определяет абсолютное отклонение для перегретых точек. В случае если оно превышает заданную величину, проверка разницы между T_5 и средним становится необязательной, так как в данном случае малое значение данной разницы, скорее всего, будет связано с действием большого активного пожара, которому принадлежит данная ГТ. Так как в силу насыщения прибора при 327 К в перегреты могут попадать только точки с $315 < T_4 < 327$ К, то максимально возможное абсолютное среднее отклонение для перегретых точек не может превышать 12 К, что сильно меньше, чем для данных MODIS (до 185 К); это и послужило мотивацией для уменьшения данного параметра до минимума.

Основным источником ЛД на рассматриваемых данных оказалось детектирование на водных и горячих поверхностях. Для устранения ЛД на водной поверхности в модифицированном алгоритме, как и в алгоритме MOD14, используется маскирование воды. Для проведения фильтрации ЛД на горячих (перегретых) поверхностях для данных МСУ-МР одной из основных сложностей становится низкая температура насыщения 4-го канала. Эта особенность делает неприменимой для данных МСУ-МР большей части тестов MOD14, фильтрующих горячие поверхности. Поэтому в настоящий момент области, на которых может возникнуть значительное число ошибок из-за перегрева поверхности, исключались из рассмотрения.

Вместе с тем полное исключение таких областей из рассмотрения потенциально может ошибочно фильтровать правильные ГТ в этих областях. Всё это послужило мотивацией для проведения работ по формированию секции фильтрации пустынь и других горячих поверхностей с учётом специфики данных МСУ-МР. Для этого была построена выборка ЛД на пустынях, где пожары заведомо исключены. Далее, аналогично описанному ранее первому этапу адаптации алгоритма, было проанализировано распределение температуры из точек выборки в 4-м (4 мкм) и 5-м (11 мкм) каналах МСУ-МР. Для 4-го канала обнаружилось, что порядка 94 % ЛД имеют предельную температуру в 327 К. Анализ распределения температуры в 5-м канале (рис. 2, см. с. 237) позволил выявить явное смещение в сторону высокой температуры (>310 К). Дополнительно на выборке ЛД был протестирован порог на 2-й канал (0,9 мкм) МСУ-МР, позаимствованный из секции MOD14. Оказалось, что порядка 97 % выборки имеют коэффициент отражения во втором канале $R_2 > 0,15$.

Полученные результаты далее использовались для составления набора тестов, фильтрующих горячие поверхности. Целью в данном случае была одновременная максимизация количества срабатываний фильтрации на выборке точек с горячих поверхностей и минимизация срабатываний на выборке ГТ. Сравнение результатов работы различных вариантов фильтров на двух выборках представлено в табл. 4.

Итогом проведённой работы стало включение набора тестов $R_2 > 0,15$, $T_5 > 310$ К, $T_4 = 327$ К в секцию фильтрации горячих поверхностей. Основываясь на результате проведённого исследования, можно утверждать, что данная секция будет фильтровать порядка 90 % ложных срабатываний, при этом ошибочно фильтруя менее 1 % настоящих ГТ. Такой

результат может стать опорой для дальнейших исследований возможности фильтрации ЛД на горячих поверхностях для данных МСУ-МР.

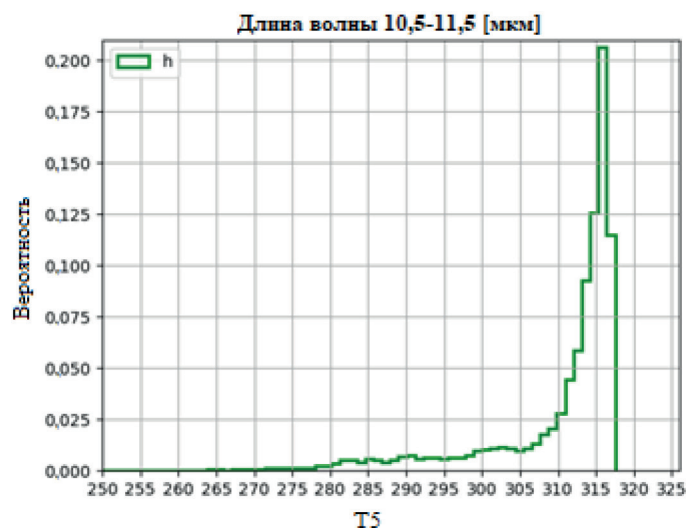


Рис. 2. Распределение яркостной температуры ЛД на горячих поверхностях по данным МСУ-МР в 5-м канале

Таблица 4. Сравнение работы различных вариантов фильтраций на выборках точек на горячих поверхностях и горячих точках

	Всего в выборке	$T_4 = 327 \text{ K}$	$T_5 > 310 \text{ K}$	$T_5 > 310 \text{ K}, T_4 = 327 \text{ K}$	$R_2 > 0,15$	$R_2 > 0,15, T_5 > 310 \text{ K}, T_4 = 327 \text{ K}$
Выборка ЛД на горячей поверхности	164 072	154 332 (94,1 %)	156 640 (95,5 %)	153 424 (93,5 %)	159 790 (97,4 %)	149 404 (91,1 %)
Выборка ГТ	13 351	4603 (34,5 %)	116 (0,9 %)	78 (0,6 %)	6201 (46,4 %)	53 (0,4 %)

Модифицированный алгоритм MOD14 для работы с данными МСУ-МР

Основным результатом проведённых работ по адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными МСУ-МР стал набор параметров (табл. 5), который используется при расчёте тестов (см. табл. 3) для каждого пикселя изображения. Данные изменения вместе с переработкой других секций MOD14 сделали алгоритм применимым к данным МСУ-МР (текущая схема модифицированного алгоритма представлена на рис. 3, см. с. 238).

Таблица 5. Набор параметров оригинального MOD14 и изменённой версии для работы с МСУ-МР

Параметр	Значение для MOD14	Значение для модифицированного алгоритма по данным МСУ-МР
cloud_r1r2	1,2	0,9
cloud_t6	265 К	265 К
low_t4	300 К*	280/300 К (ночной/дневной)
cloud_r2	0,35	0,39
low_dt	10 К*	1/10 К
bkg_t4	315/325 К	315 К
bkg_dt	10/20 К	10 К
hot_t4	320/360 К	315/325 К

Параметр	Значение для MOD14	Значение для модифицированного алгоритма по данным МСУ-МР
sigma1	3,5	1,5
deldt	6 К	6 К
sigma2	3	1,5
del31	4 К	3 К
minbkg	5 К	1 К

* В Collection 6 low_t4 и low_dt являются динамическими и считаются отдельно для каждого скана. В таблице приведены минимальные получаемые значения данных порогов.

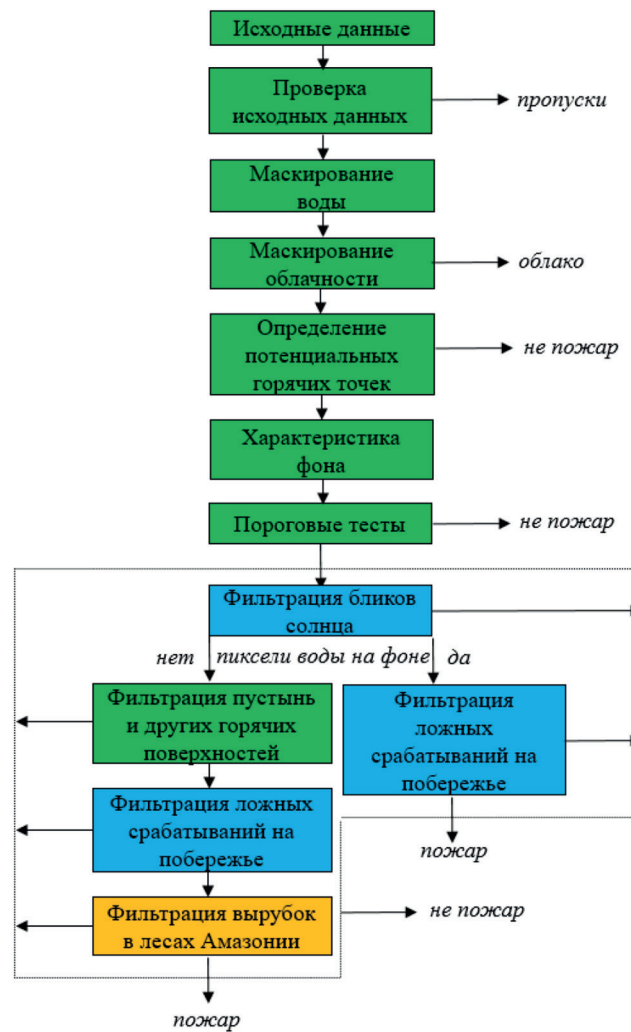


Рис. 3. Схема модифицированного алгоритма MOD14. Зелёным цветом выделены секции, которые так или иначе были изменены для работы с данными МСУ-МР; голубым — секции, оставшиеся без изменений; оранжевым — секция, исключённая из модификации алгоритма

МСУ-МР и сравнение результатов детектирования ГТ по данным MODIS на территории РФ за 2022 г.

Следующим шагом стала оценка качества работы алгоритма. Для этого данную оценку было предложено разбить на два этапа (Сопоставление 1 и Сопоставление 2). На первом этапе (Сопоставление 1) ГТ, детектированные с помощью модифицированного алгоритма (далее

целевые ГТ), сопоставляются с ГТ, детектированными по данным MODIS (далее проверочные ГТ). Если в радиусе в $0,01^\circ$ от целевых ГТ в течение суток со времени детектирования не было зарегистрировано ни одной проверочной ГТ, такие целевые ГТ определяются как ЛД. Одновременно с этим, наоборот, если подобным образом рядом с проверочными ГТ не было обнаружено ни одной целевой ГТ, то такие случаи фиксируются как потенциальные пропуски результата. Таким образом, принимая проверочные ГТ за ожидаемый результат работы модифицированного MOD14 на данных целевого прибора, в процентах оценивается ошибка ложных детектирований и ошибка пропусков алгоритма. Подобный метод сопоставления ГТ, получаемых с разных приборов, использовался в работе (Freeborn et al., 2014). Однако на первом этапе оценка пропусков содержит довольно большую неопределённость, связанную с тем, что спутник, данные которого были обработаны модифицированным алгоритмом, мог не наблюдать проверочные ГТ в силу достаточно быстрого изменения обстановки в районе анализируемых пожаров (например, в период между наблюдениями различными спутниками пожар может возникнуть, фронт пожара может существенно сместиться, развитие облачности может «закрывать» или «открывать» области, в которых происходит горение). На практике оказалось, что неопределённость для обратного сопоставления (проверка целевых ГТ на ЛД) намного меньше. Большая часть выявленных в результате такого сопоставления ЛД при фактической проверке действительно оказывались ошибочными случаями. В связи с этим основной целью Сопоставления 1 представляется минимизация ЛД. При этом количество пропусков при данном сопоставлении не будет показательным, однако всё же не может превышать критически большого значения. Критерием качества результата при Сопоставлении 1 станет доля ЛД, не превышающая 10 %, и доля пропусков, не превышающая 70 %.

После успешного прохождения Сопоставления 1 достаточно низкий показатель ЛД позволяет перейти ко второму этапу (Сопоставление 2). Результаты детектирования ГТ по данным МСУ-МР на этом этапе сопоставляются с ГТ MODIS, входящими в пожары (группы ГТ, объединённых по пространству и времени (Галеев и др., 2005), которые наблюдались более семи дней). Такое сопоставление позволяет свести к минимуму описанную выше неопределённость в оценке пропусков детектирования. Далее для всех пожаров MODIS, для которых не было сопоставлено ни одной ГТ МСУ-МР, проверяется наличие сцен МСУ-МР, пересекающихся с этими пожарами в пространстве и времени (разница не более 3 ч). ГТ пожаров, для которых соответствующих сцен МСУ-МР обнаружено не было, в Сопоставлении 2 не учитываются. Единственной неопределённостью в оценке пропусков остаётся возможное наличие облачности на сценах МСУ-МР, покрывающих несопоставленные пожары MODIS. Таким образом, получаемая оценка является оценкой «сверху». Вместе с тем ЛД в Сопоставлении 2, как и в Сопоставлении 1, оцениваются для всех доступных целевых ГТ по всем проверочным ГТ.

При анализе имеющихся данных МСУ-МР выяснилось, что частично они оказываются недостоверными из-за проблем с географической привязкой или наличия ошибочных значений в пикселях. Для оценки качества работы модифицированного MOD14 либо устранялись ошибки в данных, либо такие данные отбрасывались. Таким образом, Сопоставление 2 было проведено для результата работы модифицированного MOD14 на всех доступных достоверных наборах данных МСУ-МР за 2022 г., покрывающих территорию РФ. Результат сопоставления представлен в *табл. 6*. В соответствии с логикой Сопоставления 2 для оценки ошибки ЛД все полученные ГТ МСУ-МР сравнивались со всеми доступными ГТ MODIS (столбец ГТ МСУ-МР). Для оценки ошибок пропусков ГТ MODIS пожаров соотносились со всеми полученными ГТ МСУ-МР (столбец ГТ MODIS). Следует отметить, что получаемая оценка ошибок пропусков является оценкой «сверху», поскольку не учитывает, что ГТ, обнаруженные по данным MODIS, могут не детектироваться на данных МСУ-МР в силу объективных причин (например, за счёт разности времени наблюдения часть детектированных ГТ по данным MODIS на данных МСУ-МР может быть просто закрыта облачностью). Поэтому для уточнения оценки пропусков визуально был проанализирован 101 пожар MODIS, для которых не было сопоставлено ни одной ГТ МСУ-МР и при этом они покрывались хотя бы одной

сценой МСУ-МР. В результате анализа оказалось, что только 19 % таких пожаров были видны на сценах МСУ-МР. Остальные пожары были покрыты облачностью. Уточнённая таким образом оценка ошибки пропусков приведена в столбце «Уточнённая ошибка пропусков» табл. 6.

Таблица 6. Сопоставление ГТ МСУ-МР и MODIS на территории РФ за 2022 г.

	ГТ МСУ-МР		ГТ MODIS		Ошибки для МСУ-МР		
	Сопоставленные с MODIS	Несопоставленные с MODIS	Сопоставленные с МСУ-МР	Несопоставленные с МСУ-МР	Ошибка ЛД, %	Ошибка пропусков, %	Уточнённая ошибка пропусков, %
Всего	78 842	6216	56 406	1745	7,3	3,0	0,57
Лесные пожары	61 895	1848	49 724	911	2,9	1,8	0,37

Полученные цифры, безусловно, служат серьёзной аргументацией в пользу применимости модификации MOD14 для детектирования ГТ по данным МСУ-МР. Большой объём данных, на котором проводилась проверка качества работы алгоритма, позволяет говорить об устойчивости результата детектирования для разных лесных зон и времени года на территории РФ. Что касается устойчивости алгоритма к изменчивости различных пожарных сезонов, проверка качества его работы на данных за 2023 г., проводимая в режиме реального времени, даёт схожие с представленными показатели ошибок ЛД и пропусков.

Возможная схема проведения адаптации алгоритма MOD14 к работе с данными различных спутниковых систем наблюдения

Приобретённый опыт в адаптации MOD14 для работы с данными МСУ-МР позволил определить общий процесс, который в дальнейшем можно использовать для проведения адаптации алгоритма детектирования пожаров с данными других спутников. Возможная схема такого процесса представлена на рис. 4 (см. с. 241). Общий принцип данного процесса заключается в итерационном подходе, когда каждый шаг внешнего цикла соответствует увеличению объёма данных, на которых проводится калибровка алгоритма (пожарный месяц, год или потоковая обработка). Каждый такой шаг состоит из непосредственной обработки соответствующих данных алгоритмом MOD14 с актуальной версией порогов, а также из проверки получаемых результатов детектирования ГТ. Если результат не соответствует поставленным критериям, выявляются ошибочные случаи, по которым определяется, были ли они следствием ошибок в самих данных (помехи, ошибочные значения, ошибка привязки данных) или следствием неправильно подобранных порогов. Далее либо происходит уточнение данных (фильтрация помех, синтез каналов изображения, допривязка изображения), либо модифицируются пороги. В случае модификации порогов проводится повторная обработка данных. При этом в целях экономии времени далее обрабатываются не сами исходные данные (набор каналов сцен вместе с матрицами широты и долготы), а прошлый результат детектирования. При успешном прохождении новым результатом проверки качества текущая версия порогов становится актуальной и происходит повторная обработка исходных данных.

Оценка качества детектированных ГТ проводится с помощью Сопоставлений 1 и 2, подробное описание которых было представлено в разд. «МСУ-МР и сравнение результатов детектирования ГТ...» Критерием качества результата при Сопоставлении 2 является доля пропусков, не превышающая 10 %, и доля ЛД, не превышающая 3 %. Цель второго этапа заключается в минимизации пропусков при одновременном уменьшении ЛД. Успешное прохождение данного сопоставления при актуальной версии порогов означает либо переход на следующий шаг внешнего цикла, либо окончание процесса адаптации в случае, если проверке подвергались данные, получаемые в потоковом режиме.

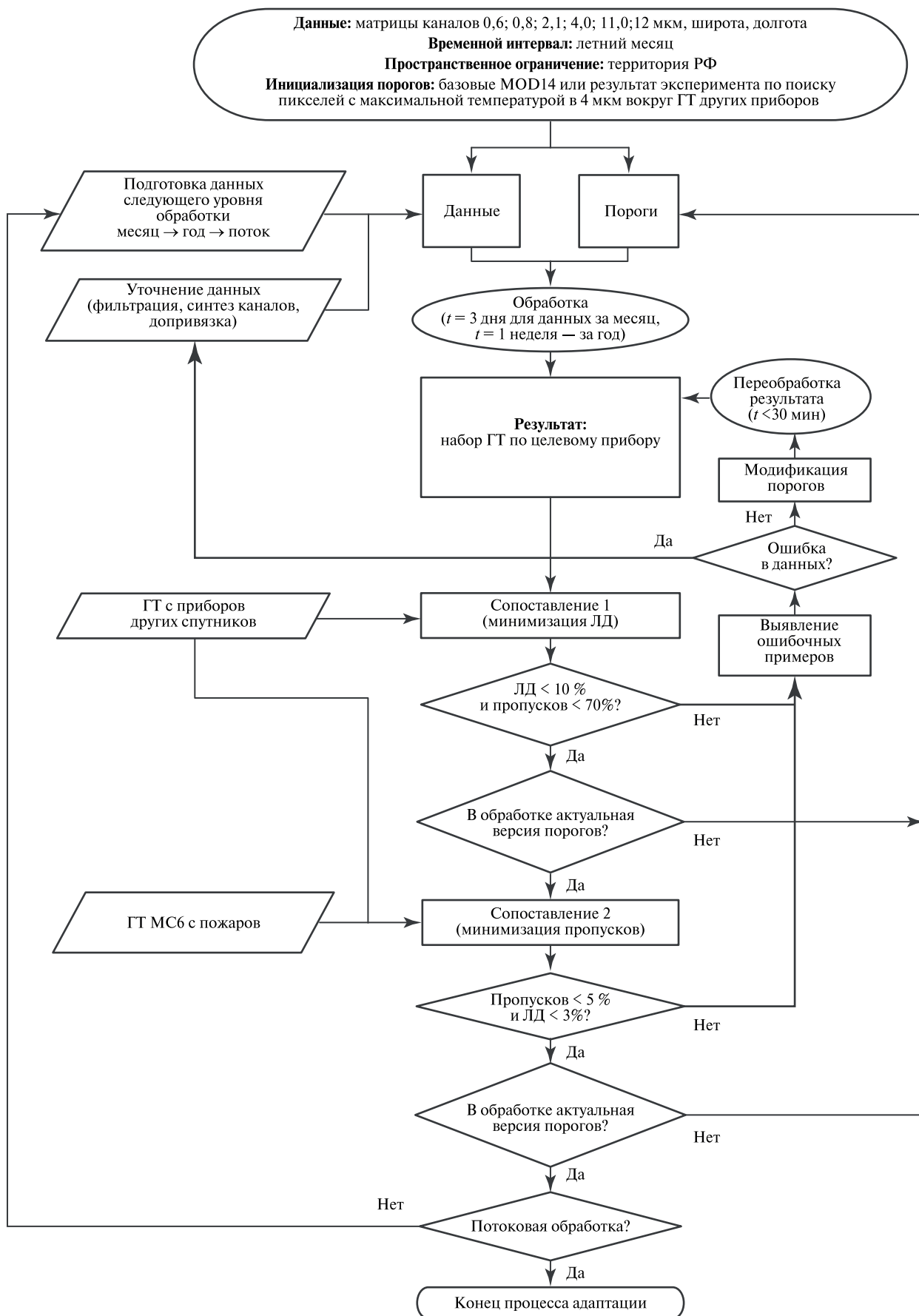


Рис. 4. Схема процесса адаптации алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными других спутников

Заключение

Проведённая адаптация алгоритма MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР на борту спутника «Метеор-М» № 2-2 привела к следующим основным результатам:

- Модифицированный алгоритм позволяет использовать данные прибора МСУ-МР со спутника «Метеор-М» № 2-2 для детектирования лесных пожаров с ошибкой ложных детектирований 2,9 % и ошибкой пропусков 0,3 %, что свидетельствует об устойчивости разработанного метода при обработке большого объёма данных.
- На основе проделанной работы была сформирована достаточно универсальная схема процесса адаптации алгоритма MOD14 для использования данных с различных спутниковых систем, обладающих схожими с MODIS спектральными характеристиками каналов, которые используются в данном алгоритме детектирования пожаров. Примерами таких приборов являются MERSI (*англ.* Medium Resolution Spectral Imager), установленный на китайских спутниках Fengyun-3D/E (<https://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>), и SLSTR (*англ.* Sea and Land Surface Temperature Radiometer) (Polehampton et al., 2023), установленный на спутниках Sentinel-3A/B.

Также были сформулированы дальнейшие направления развития проделанной работы:

- Тестовая потоковая обработка данных МСУ-МР показала, что для обеспечения автоматического мониторинга пожаров необходима организация автоматических процедур устранения (коррекции) ошибочных (сбойных) данных. Для этого в настоящее время разработана система коррекции данных МСУ-МР, которая удаляет фрагменты с ошибочными пикселями и исправляет ошибку географической привязки данных. Однако на настоящий момент эта система позволяет использовать только порядка 63 % от общего количества поступающих данных. В этой связи актуальной остаётся задача совершенствования данной системы для повышения объёма данных, пригодных для последующей обработки модифицированным MOD14.
- Основная цель при проведённой адаптации MOD14 для работы с данными МСУ-МР состояла в достижении устойчивого детектирования лесных пожаров на территории РФ. Для оценки качества детектирования нелесных пожаров предложенным модифицированным алгоритмом требуется дополнительная проверка его работы на нелесных территориях и возможная дальнейшая модификация.
- Расширение зоны мониторинга также может потребовать доработки и в первую очередь — лучшей фильтрации ложных детектирований на перегретых, свободных от растительности поверхностях.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) (<http://ckp.geosmis.ru/>).

Литература

1. Абушенко Н. А., Барталев С. А., Беляев А. И. и др. Опыт и перспективы организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 89–95.
2. Галеев А. А., Прошин А. А., Ершов Д. В. и др. Организация хранения данных спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 367–371.
3. Лозин Д. В. Система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 96–106. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-96-106.
4. Лозин Д. В., Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.
5. *Луян 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.
 6. *Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 7. *Луян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др.* Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
 8. *Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д.* Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS20170503.
 9. *Пономарев Е. И., Харук В. И., Швецов Е. Г.* Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2019. 220 с.
 10. *Bobbe T., Desclotres J., Finco M. et al.* MODIS Land Rapid Response System: implementation with USDA Forest Service and implications for active fire detection and land cover change products from future moderate resolution sensors. NPOESS MAXI Review. Silver Spring, MD, 2002.
 11. *Chuvieco E.* Earth Observation of Global Change. 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-6358-9_6.
 12. *Freeborn P. H., Wooster M. J., Roberts G., Xu W. D.* Evaluating the SEVIRI fire thermal anomaly detection algorithm across the Central African Republic using the MODIS active fire product // Remote Sensing 2014. V. 6. P. 1890–1917. DOI: 10.3390/rs6031890.
 13. *Giglio L., Desclotres J., Justice C. O., Kaufman Y. J.* An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 87. P. 273–282. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
 14. *Giglio L., Schroeder W., Justice C. O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. Iss. 1. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
 15. *Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O.* MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision B. University of Maryland, Dep. Geographical Sciences, 2018. P. 1–62.
 16. *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. P. 1–63.
 17. *Ichoku C., Kaufman Y. J.* A Method to Derive Smoke Emission Rates from MODIS Fire Radiative Energy Measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 11. DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
 18. *Justice C. O., Giglio L., Korontzi S. et al.* The MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. Iss. 1–2. P. 244–262. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7.
 19. *Kaufman Y. J., Justice C. O.* MODIS ATBD: Fire Products. Version 2.2. 1998. 77 p.
 20. *Lee H., Won J.-S., Park W.* An Atmospheric Correction Using High Resolution Numerical Weather Prediction Models for Satellite-Borne Single-Channel Mid-Wavelength and Thermal Infrared Imaging Sensors // Remote Sensing 2020. V. 12. Iss. 853. DOI: 10.3390/rs12050853.
 21. *McCarty J. L., Justice C. O., Korontzi S.* Agricultural burning in the Southeastern United States detected by MODIS // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 108. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.020.
 22. *Mollicone D., Eva H. D., Achard F.* Nature Human role in Russian wild fires // Nature. 2006. V. 440. P. 436–437. DOI: 10.1038/440436a.
 23. *Peterson D. A., Hyer E. J., Campbell J. R. et al.* The 2013 Rim Fire: Implications for predicting extreme fire spread, pyroconvection, and smoke emissions // Bull. American Meteorological Society. 2014. V. 96. Iss. 2. P. 229–247. DOI: 10.1175/bams-d-14-00060.1.
 24. *Polehampton E., Cox C., Smith D. et al.* Copernicus Sentinel-3 SLSTR Land User Handbook. 2023. Ref. OMPC.ACR.HBK.002. 64 p.
 25. *Vadrevu K. P., Ellicott E., Giglio L. et al.* Vegetation fires in the himalayan region — aerosol load, black carbon emissions and smoke plume heights // Atmospheric Environment. 2012. V. 47. P. 241–251. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.11.009.
 26. *Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W.* Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. Iss. D24. DOI: 10.1029/2005JD006318.

27. Zhao C., Chen S., Leung L. R. et al. Uncertainty in modeling dust mass balance and radiative forcing from size parameterization // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013 V. 13. Iss. 21. P. 10733–10753. DOI: 10.5194/acp-13-10733-2013.

Adaptation of MOD14 fire detection algorithm to work with the data of MSU-MR device

D. V. Lozin^{1,2}, E. A. Loupian¹, I. V. Balashov¹, M. A. Burtsev¹,
E. E. Volkova¹, A. A. Mazurov¹, A. M. Matveev¹

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

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

The paper describes a modification of the MOD14 (MODIS fire detection algorithm) algorithm to solve the problem of automatic fire detection based on MSU-MR device data (multiband scanner of low spatial resolution; Meteor-M No. 2 series satellites). A brief description of MOD14 and a possible modification of its parameters assessment to adapt to MSU-MR data are given. The process of finding the modified parameters for solving the task is described. A brief description of the modified elements of the algorithm is presented. A scheme for evaluating the quality of the modified algorithm is proposed. The evaluation results of the work by example of processing 2022 MSU-MR data covering the Russian Federation territory are presented. The results of the modified algorithm quality evaluation are also presented: the error of false detection (7.3 % for all fires, 2.9 % for forest) and the error of omissions of fires developing for more than 1 week (0.57 % for all, 0.37 % for forest). Based on the experience gained while adapting MOD14 to work with MSU-MR data, a fairly universal scheme of the MOD14 adaptation process has been developed for using data from various satellite systems with spectral characteristics similar to MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) channels. Finally, the tasks are outlined whose solution will fully ensure automatic fire monitoring based on the use of the algorithm that is adapted to MSU-MR data.

Keywords: satellite observations, remote fire monitoring, algorithms, fire detection, MSU-MR device, MOD14 algorithm

Accepted: 05.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245

References

1. Abushenko N. A., Bartalev S. A., Belaev A. I. et al., Experience and prospects for organizing operational satellite monitoring of Russian territory for the purposes of forest fire protection services, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 3, pp. 89–95 (in Russian).
2. Galeev A. A., Proshin A. A., Ershov D. V. et al., Forest fires satellite monitoring data storage management, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Issue 2, Vol. 2, pp. 367–371 (in Russian).
3. Lozin D. V., System of operational construction of fire burning intensity maps and estimates of possible loss of forest vegetation as a result of fire, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 96–106 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-96-106.
4. Lozin D. V., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Estimation of northern burnt forests mortality in the XXI century based on MODIS data on fire intensity, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 292–301 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.
5. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V. et al., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.

6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring Shared Use Center 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.
7. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 0.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
8. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D., Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170503.
9. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Shvetsov E. G., *Monitoring of natural fires in Siberia: dynamics of combustion in the modern climate, spatiotemporal patterns, characteristics and forecasts*, Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019, 220 p. (in Russian).
10. Bobbe T., Descloitres J., Finco M. et al., *MODIS Land Rapid Response System: implementation with USDA Forest Service and implications for active fire detection and land cover change products from future moderate resolution sensors*, *NPOESS MAXI Review*, Silver Spring, MD, 2002.
11. Chuvieco E., *Earth Observation of Global Change*, 2008, DOI: 10.1007/978-1-4020-6358-9_6.
12. Freeborn P. H., Wooster M. J., Roberts G., Xu W. D., Evaluating the SEVIRI fire thermal anomaly detection algorithm across the Central African Republic using the MODIS active fire product, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 1890–1917, DOI: 10.3390/rs6031890.
13. Giglio L., Desclotres J., Justice C. O., Kaufman Y. J., An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 87, pp. 273–282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
14. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, Issue 1, pp. 31–41, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
15. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O., *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision B*, University of Maryland, Department of Geographical Sciences, 2018, pp. 1–62.
16. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O., *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision C*, University of Maryland, Department of Geographical Sciences, 2020, pp. 1–63.
17. Ichoku C., Kaufman Y. J., A Method to Derive Smoke Emission Rates from MODIS Fire Radiative Energy Measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 11, DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
18. Justice C. O., Giglio L., Korontzi S. et al., The MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, Issues 1–2, pp. 244–262, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7.
19. Kaufman Y. J., Justice C. O., *MODIS ATBD: Fire Products, Version 2.2*, EOSID#2741, 1998, 77 p.
20. Lee H., Won J.-S., Park W., An Atmospheric Correction Using High Resolution Numerical Weather Prediction Models for Satellite-Borne Single-Channel Mid-Wavelength and Thermal Infrared Imaging Sensors, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Issue 853, DOI: 10.3390/rs12050853.
21. McCarty J. L., Justice C. O., Korontzi S., Agricultural burning in the Southeastern United States detected by MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 108, pp. 151–162, DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.020.
22. Mollicone D., Eva H. D., Achard F., Nature Human role in Russian wild fires, *Nature*, 2006, Vol. 440, pp. 436–437, DOI: 10.1038/440436a.
23. Peterson D. A., Hyer E. J., Campbell J. R. et al., The 2013 Rim Fire: Implications for predicting extreme fire spread, pyroconvection, and smoke emissions, *Bull. American Meteorological Society*, 2014, Vol. 96, Issue 2, pp. 229–247, DOI: 10.1175/bams-d-14-00060.1.
24. Polehampton E., Cox C., Smith D. et al., *Copernicus Sentinel-3 SLSTR Land User Handbook*, 2023, Ref. OMPC.ACR.HBK.002, 64 p.
25. Vadrevu K. P., Ellicott E., Giglio L. et al., Vegetation fires in the himalayan region — aerosol load, black carbon emissions and smoke plume heights, *Atmospheric Environment*, 2012, Vol. 47, pp. 241–251, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.11.009.
26. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Issue D24, DOI: 10.1029/2005JD006318.
27. Zhao C., Chen S., Leung L. R. et al., Uncertainty in modeling dust mass balance and radiative forcing from size parameterization, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, Issue 21, pp. 10733–10753, DOI: 10.5194/acp-13-10733-2013.