

Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+

С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян,
Ф.В. Стыщенко, Е.В. Флитман

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mails: bartalev@d902.iki.rssi.ru
egorov@d902.iki.rssi.ru, efr@d902.iki.rssi.ru
evgeny@d902.iki.rssi.ru, fedor@d902.iki.rssi.ru
eflitman@gmail.com*

В работе представлена автоматизированная технология интегрированной оценки площади пожаров на основе совместного использования спутниковых данных различного пространственного разрешения, получаемых системами дистанционного зондирования MODIS и Landsat-TM/ETM+. Технология включает получение и комплексирование трех типов оценок площади пожаров, отличающихся уровнями оперативности и точности. Наиболее оперативная оценка площади пожара основана на пространственно-временной агрегации результатов детектирования действующих пожаров по данным MODIS с пространственным разрешением около 1 км. Последующая уточненная оценка площади пожаров получается за счет дополнительного использования данных MODIS пространственного разрешения 230 м, и предполагает выявление участков поврежденного огнем растительного покрова на основе анализа изменений его спектрально-отражательных характеристик. Наиболее точная оценка площади пожаров основана на дополнительном использовании изображений Landsat-TM/ETM+ с пространственным разрешением около 30 м. Разработанная технологическая схема предполагает комплексирование на уровне отдельных пожаров трех различных типов данных путем использования потенциально наиболее точной оценки из всех доступных на текущий момент времени. На основе разработанной технологии реализован модуль оценки пройденной огнем площади в составе Информационной системы дистанционного мониторинга лесов (ИСДМ-Рослесхоз). В работе приведен пример использования технологии для оценки площади, пройденной природными пожарами в 2011 году на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: спутниковая оценка площади пожаров, автоматизированная технология, MODIS, Landsat-TM/ETM+.

1. Анализ состояния проблемы спутниковой оценки площади пожаров

Являясь одним из основных факторов воздействия на лесные и другие типы наземных экосистем России, пожары ежегодно повреждают растительный покров на площади, измеряемой миллионами гектаров (Korovin, 1996). Данные о пройденной огнем площади являются важной информацией для организации эффективной охраны лесов от пожаров, оценки их экологических и экономических последствий.

В зависимости от решаемых задач предъявляются различные требования к уровням оперативности и точности оценки пройденной огнем площади. Так, при организации тушения действующих пожаров основным требованием к получаемой информации является ее оперативность и частота обновления, которая должна достигать нескольких раз в день. При этом, точность получаемых оценок площади часто является менее приоритетной характеристикой. С другой стороны, задачи оценки экономических и экологических последствий пожаров требуют максимально точной оценки пройденных огнем площадей. Такие данные получаются в течение нескольких недель или месяцев после пожара и используются, в частности, для обновления материалов инвентаризации лесов, планирования лесохозяйственных мероприятий, оценки эмиссии углерода и решения ряда других задач.

Методы дистанционного зондирования используются уже более 20 лет для получения информации о природных пожарах, включая детектирование действующих очагов горения, карто-

графирование и оценку поврежденных огнем территорий. Разработан ряд методов детектирования действующих пожаров на основе данных измерений радиационной температуры земной поверхности. Указанные методы основаны на использовании данных, получаемых приборами NOAA-AVHRR (Li et al., 2001), ERS-ATSR2 и Envisat-AATSR (Arino и др., 2005), Terra-MODIS (Giglio и др., 2003). Как следует из анализа научных публикаций, непосредственное использование результатов детектирования действующих пожаров для оценки пройденной огнем площади может приводить к получению недостоверных или противоречивых результатов. В частности Eva и Lambin (1998) не нашли значимой корреляции между количеством выявленных по данным NOAA-AVHRR пикселов, относящихся к действующим пожарам, и пройденной огнем площадью в Центральной Африке. Однако, Loboda и Csiszar (2004) обнаружили для территории Сибири высокий уровень корреляции ($R^2=0.99$) между количеством выявленных по данным MODIS пикселов действующих пожаров и оценками их площади по данным Landsat-ETM+. При этом оценка общей площади пожаров по данным MODIS оказалась меньше на 10%.

Основные недостатки применяемых методов оценки площади пожаров на основе результатов детектирования действующих очагов горения связаны с влиянием комбинации таких факторов, как (Giglio et al., 2006):

- Наличие пропусков в спутниковых наблюдениях действующих пожаров из-за маскирующего влияния облачного покрова и дыма;
- Недостаточно высокая периодичность спутниковых наблюдений;
- Высокая пространственно-временная неоднородность скорости распространения огня, вызванная, в частности, различиями типов и состояния горючих материалов, метеорологических условий, суточной динамикой температуры очагов горения;
- Относительно низкое пространственное разрешение спутниковых приборов, используемых для детектирования действующих пожаров.

Случайный характер совокупного влияния указанных выше приводит к трудностям получения однородных оценок площади пожаров на основе детектирования действующих очагов горения, поскольку точность получаемых результатов может варьировать в значительных пределах в зависимости от региона и времени оценки. Однако использование данного подхода часто не имеет реальной альтернативы при решении оперативных задач по тушению пожаров, для которых наиболее критическим фактором является время получения информации. Это, в свою очередь, диктует необходимость дальнейшего развития методов оценки пройденной огнем площади на основе более глубокой обработки результатов детектирования действующих пожаров.

Ряд методов картографирования пройденных огнем площадей основан на анализе внутригодовых и межгодовых изменений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности. При этом основным источником необходимых данных являются спутниковые приборы низкого пространственного разрешения (500 м - 1 км), такие как NOAA-AVHRR (Sukhinin et al., 2005), SPOT-Vegetation (Grégoire et al., 2003) и Terra/Aqua-MODIS (Roy et al., 2008).

Эти методы обычно основаны на использовании данных измерений спектральной отражательной способности земной поверхности в ближнем и среднем ИК каналах спутниковых приборов. При этом данные спектральных измерений могут непосредственно применяться для выявления изменений или используются для вычисления спектральных вегетационных индексов (таких как, NDVI, SWVI или NBI), позволяющих выявлять участки поврежденного растительного покрова. В ряде исследований (Fraser et al., 2000; Bartalev et al., 2007) продемонстрирована эффективность подхода, состоящего в комбинированном использовании (i) результатов детектирования действующих пожаров и (ii) данных о поврежденных огнем участках, выявленных на основе анализа изменений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности.

Такого рода методы определения площади пожаров обычно имеют большую точность по сравнению с методами, основанными на детектировании действующих очагов горения, и позволяют получать регулярные, в том числе, ежемесячные (Zhang et al., 2003), ежедекадные

(Bartalev et al., 2007) и ежедневные (Tansey et al., 2008) оценки. Указанные методы применяются для картографирования последствий пожаров на больших территориях и позволяют формировать многолетние временные серии данных, незаменимые для получения экологических оценок и при проведении научных исследований. Однако такие данные находят ограниченное применение при решении задач инвентаризации лесов и организации лесохозяйственных мероприятий, которые, как правило, требуют информации более высокого уровня пространственной детальности.

Хорошо также известны возможности картографирования пожаров на основе данных оптических спутниковых приборов высокого пространственного разрешения (Isaev et al., 2002). Вместе с тем, имевший место до недавнего времени низкий уровень доступности спутниковых данных высокого пространственного разрешения лимитировал и их массовое использование для оценки площадей пожаров, ограниченное, как правило, применением для локальных территорий и носившее эпизодический характер. Данная ситуация принципиально изменилась с открытием доступа к глобальному и регулярно пополняемому архиву данных Landsat-TM/ETM+ (<http://glovis.usgs.gov>).

Разработанная Российской академией наук совместно с рядом ведомственных научно-производственных организаций технология дистанционного мониторинга природных пожаров (ТДМП) позволяет создавать соответствующие функциональные модули в составе различных систем контроля окружающей среды. В частности, на основе ТДМП создан модуль детектирования и оценки последствий природных пожаров в функциональной структуре спутникового сервиса ВЕГА, ориентированного на решение задач мониторинга растительного покрова на территории Северной Евразии (Лупян и др., 2011). ТДМП является ключевой технологией для построения и развития Информационной системы дистанционного мониторинга лесов ИСДМ-Рослесхоз (Loupiian et al., 2006; Барталев и др., 2008). Следует отметить, что созданные на основе ТДМП системы позволяют получать однородную информацию о пожарах и их последствиях на огромных территориях. Так, например, спутниковый сервис Вега охватывает практически всю территорию Северной Евразии и позволяет, в частности получать информацию, необходимую для решения задач охраны лесов и других типов земель от пожаров, а также для оценки экономического и экологического ущерба от воздействия огня. При этом, для оценки пройденных огнем площадей в системе используется три основных источника спутниковых данных, а именно:

- (i) результаты детектирования действующих пожаров с использованием стандартного алгоритма MOD14 (Justice et al., 2006) по данным MODIS уровня обработки Level 1B (Toller et al., 2006), полученным станциями приема спутниковых данных сети партнерских организаций. Одновременно осуществляется получение данных MOD14 с веб-сайта системы FIRMS (<http://firefly.geog.umd.edu/firms>);
- (ii) данные ежедневных измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) земной поверхности спектрорадиометром MODIS, включая информацию о геометрических условиях солнечного освещения и проведения спутниковых наблюдений (стандартные продукты MOD09 <http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>);
- (iii) данные Landsat-TM/ETM+, автоматически поступающие в архив данных ИКИ РАН с веб-сайта геологической службы США (USGS Glovis <http://glovis.usgs.gov>). По состоянию на конец 2011 года указанный архив содержал более 122000 сцен Landsat-TM/ETM+ на территорию России, 23000 из которых были получены в 2011 году.

Разработанная в ИКИ РАН автоматизированная технология оценки площади пожаров основана на интеграции всех трех указанных выше источников данных и, получаемых в результате их обработки, информационных продуктов, таких как:

- (i) *AFBA* (*Active Fire Burnt Area*) – границы (полигоны) пройденных огнем участков, формируемые на основе пространственно-временной кластеризации пикселов действующих пожаров (*hot-spots*), выявляемых по данным MODIS с пространственным разрешением около 1 км;

- (ii) *SRBA* (*Surface Reflectance Burnt Area*) – результаты выявления пройденных огнем участков с пространственным разрешением 230 м на основе комбинированного использования продуктов MODIS, включая данные измерений КСЯ земной поверхности и координатах *hot-spots* пикселов;
- (iii) *HRBA* (*High Resolution Burnt Area*) – результаты картографирования пожаров с пространственным разрешением около 30 м на основе данных Landsat-TM/ETM.

Технология интегрированной оценки пройденной огнем площади позволяет получать обновляемую в течение пожароопасного сезона информацию. При этом для каждого пожара используется вся доступная на текущий момент спутниковая информация, и в случае, если для данного пожара доступна информацию из более чем одного источника, то для выбора наиболее точной оценки используется следующая система приоритетов: (1) *HRBA*, (2) *SRBA* и (3) *AFBA*.

Продукт *AFBA* обеспечивает наиболее оперативную оценку пройденной огнем площади, которая может быть замещена одной из двух оценок, полученных на основе продукта *SRBA* или продукта *HRBA*, в зависимости от их доступности. Продукт *SRBA* производится регулярно на основе ежедневных данных MODIS, обычно через несколько недель после получения продукта *AFBA* и, чаще всего, появляется раньше продукта *HRBA*. Эта последовательность может не выполняться в случаях, когда, например, небольшой по площади пожар не был выявлен на основе алгоритма *SRBA*.

Ниже описаны, используемые в спутниковом сервисе ВЕГА методы определения площади пожаров и приводятся оценки пройденной огнем площади на территории России в 2011 году.

2. Методы спутниковой оценки площади пожаров

2.1. Оперативная оценка площади пожаров на основе результатов детектирования действующих очагов горения по данным MODIS

В основе получения продукта *AFBA* лежит использование данных MODIS, принимаемых сетью приемных станций, расположенных в Москве, Пушкино, Ханты-Мансийске, Новосибирске, Красноярске и Хабаровске. На первом этапе данные проходят предварительную обработку до уровня Level 1B (продукт MOD02) и используются в качестве входной информации для алгоритма MOD14 (Justice et al., 2006), осуществляющего детектирование пикселов действующих очагов горения (так называемых *hot-spot* пикселов). Каждый *hot-spot* пиксель имеет несколько атрибутов: (i) географические координаты, (ii) размер пикселя на местности (в том числе вдоль и поперек направления сканирования) и (iii) яркостная температура, полученная на основе двух спектральных каналов MODIS (4 мкм и 11 мкм). Полученные *hot-spot* пиксели затем используются для создания полигонов пожаров и мониторинга их динамики во времени.

Система FIRMS (Fire Information for Resource Management System, <http://firefly.geog.umd.edu>) служит архивом *hot-spot* пикселов, детектированных с помощью алгоритма MOD14. Имеющиеся и регулярно обновляемые в архиве системы FIRMS данные о детектированных *hot-spot* пикселях автоматически вносятся в соответствующую базу данных сервиса ВЕГА, ориентированную на работу с данными о природных пожарах (БД П-ВЕГА). Основная роль использования архива системы FIRMS состоит в компенсации пропусков поступления данных MODIS в результате возможных сбоев на станциях приема или других причин.

Оперативная оценка площадей пожаров включает анализ динамики очагов горения на основе временных серий *hot-spot* пикселов. При этом, одним из этапов анализа является создание полигонов действующих пожаров на основе несвязанных между собой *hot-spot* пикселов с учетом доступной на текущую дату предыстории развития очагов горения. Ниже приводится описание основных этапов алгоритма формирования по данным *hot-spot* пикселов полигонов действующих пожаров.

Этап 1. Определение времени действия очагов горения. Полученным *hot-spot* пикселам в первую очередь необходимо присвоить время проведения спутниковой съемки с целью построения однородных временных серий данных детектирования действующих пожаров. В качестве времени наблюдения очага горения принимается время получения данных на локальной станции приема, а в случае поступления данных из архива FIRMS, время начала соответствующего пятиминутного сегмента данных MODIS.

Этап 2. Формирование hot-spot полигонов. Создание *hot-spot* полигонов является промежуточным этапом, направленным на восстановление границ пикселов MODIS. При этом, в текущей реализации алгоритма допускается упрощение, согласно которому границы пикселов MODIS вдоль и поперек направления сканирования аппроксимируются отрезками параллелей и меридианов.

Этап 3. Формирование полигонов очагов горения. При формировании полигонов очагов горения соответствующие *hot-spot* полигоны для каждого спутникового изображения объединяются с учетом критерия пространственной близости. Несколько *hot-spot* полигонов объединяются в полигон очага горения в случае их перекрытия или если расстояние между ними не превышает 0,3 км. Для каждого изображения MODIS полигон очага горения соответствует оценке пройденной огнем площади на момент спутниковой съемки. При этом анализ временных серий полигонов очагов горения позволяет получать более надежные оценки площади пожаров.

Этап 4. Создание полигонов пройденных огнем участков. Последний и наиболее алгоритмически сложный этап включает в себя анализ динамики распространения огня и агрегирования отдельных полигонов очагов горения за разные даты в соответствующие индивидуальным пожарам объединенные полигоны пройденных огнем участков. БД П-ВЕГА содержит временные серии всех полигонов очагов горения, действовавших в текущем пожароопасном сезоне. При этом, алгоритм включает процедуру принятия решения о том, является ли каждый новый полигон очага горения частью уже существовавшего пожара, либо он должен использоваться для создания в базе данных записи о вновь возникшем пожаре. В случае, если новый полигон очага горения пересекается (или находится на расстоянии менее 1 км) с одним из существовавших полигонов, то они объединяются. В противном случае создается новый полигон очага горения с соответствующим внесением записи в базу данных. Алгоритм идентификации полигонов очагов горения включает также рассмотрение частных случаев, которые могут значительно повлиять на результаты картографирования пройденных огнем площадей. Основным частным случаем является появление полигона очага горения, пространственно пересекающегося с более чем одним ранее сформированным полигоном. В этом случае, начиная с момента детектирования такого очага горения, все пересекающиеся с ним полигоны объединяются, и рассматривается в дальнейшем как единый пожар.

Поскольку в основе формирования полигонов пройденных огнем участков лежит использование результатов детектирования по критерию радиационной температуры действующих пожаров по данным MODIS с пространственным разрешением около 1 км, указанные полигоны могут включать в себя и незатронутые огнем территории. При этом, можно предположить, что такого рода ошибка достигает максимальных значений на границах пожара и уменьшаются по мере приближения к его центру. Для уменьшения влияния такого рода ошибок используется эвристическая формула:

$$S_C = \begin{cases} \left(1 - \frac{k \times \Delta \times (1-\sigma)}{\sqrt{S_G}}\right) \times S_G & \forall S_G > (k \times \Delta)^2 \\ \sigma \times S_G & \forall S_G \leq (k \times \Delta)^2 \end{cases} \quad (1)$$

где

S_G - геометрически измеренная площадь пожара, км²;

S_C - скорректированная площадь пожара, км²;

$\Delta = 1.1$ - номинальный размер пикселя, км;
 $\sigma = 0.25$ - корректирующий коэффициент;
 $k = 4$ - константа.

В основу уравнения (1) положено предположение, что более высокие значения ошибок соответствуют меньшим по площади пожарам из-за возрастающего количества граничных пикселов. Выполнение коррекции в соответствии с уравнением (1) приводит к снижению площади пожара в 4 раза для пожаров размером менее k^2 пикселов. По мере роста размера пожара ($S_G \rightarrow \infty$) коэффициент коррекции приближается к 1 и, таким образом, для больших пожаров процедура коррекции приводит к незначительному изменению оценки площади.

Все поступившее в архив сервиса ВЕГА данных MODIS автоматически обрабатываются на основе описанного выше метода, что обеспечивает обновление данных о пройденных огнем площадях более шести раз в день. Полный цикл обработки данных с момента их приема на наземной станции до момента обновления информации о пройденных огнем площадях в БД П-ВЕГА занимает от 20 до 70 минут в зависимости от количества и площади пожаров, а также наличия доступных вычислительных ресурсов. Если в качестве источника *hot-spot* пикселов используется архив FIRMS, дополнительная задержка получения оценок площади пожаров в среднем составляет около 50 минут и, как правило, не превышает 2-3 часа после пролета спутника.

2.2. Выявление пожаров на основе анализа изменений спектрально-отражательных характеристик земного покрова по данным MODIS

Продукт *SRBA* призван обеспечивать регулярное уточнение оценок площади пожаров в течение пожароопасного сезона, и формируется на основе подхода, предполагающего совместное использование данных измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности и результатов выявления тепловых аномалий (Fraser и др., 2000; Bartalev и др., 2007). В таком подходе тепловые аномалии используются для отделения изменений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности, обусловленных воздействием огня от изменений, вызванных другими факторами. Процедура формирования продукта *SRBA* предусматривает сравнение текущих данных о сезонной динамике спектрально-отражательных свойств поверхности с данными исторических спутниковых наблюдений. Многолетние временные серии спутниковых данных используются для локальной оптимизации значений пороговых критериев для выявления статистически значимых изменений.

Продукт *SRBA* имеет пространственное разрешение 230 м и создается на основе двух стандартных продуктов MODIS, а именно:

- многолетних данных измерений КСЯ земной поверхности (продукт MOD09);
- данных о действующих пожарах в текущем году (продукт MOD14).

Метод картографирования пожаров предусматривает выполнение следующих шагов:

- детектирование шумовых пикселов, т.е. пикселов, в которых значения КСЯ земной поверхности искажены в результате влияния облаков или аппаратных сбоев, а также пикселов, соответствующих покрытой снегом поверхности;
- построение многолетних временных серий ежедневных изображений коротковолнового вегетационного индекса *SWVI* с использованием свободных от влияния шумов пикселов;
- построение статистической нормы сезонной динамики значений *SWVI* на основе многолетних исторических данных спутниковых наблюдений;
- детектирование изменений растительного покрова на основе сравнения сезонной динамики значений *SWVI* в текущем году со статистической нормой;
- картографирование пожаров на основе сопоставления выявленных изменений растительности с результатами детектирования действующих очагов горения.

Процедура предварительной обработки данных MODIS направлена на детектирование шумовых пикселов и включает в себя следующие основные шаги (Барталев и др. 2011):

- маскирование пикселов, соответствующих спутниковым наблюдениям при больших зенитных углах Солнца и визирования;
- детектирование шумовых пикселов, соответствующих спутниковым наблюдениям земной поверхности в условиях значительного влияния облаков и снежного покрова;
- детектирование остаточных шумовых пикселов на основе статистической фильтрации временных серий данных спутниковых наблюдений.

В результате предварительной обработки строится маска шумовых пикселов с пространственным разрешением 460 м.

Для выявления вызванных пожарами изменений растительного покрова формируются ежедневные временные серии вегетационного индекса $SWVI$ (Fraser et al., 2000a), значения которого рассчитываются по формуле:

$$SWVI = \frac{R_2 - R_6}{R_2 + R_6},$$

где, R_2 и R_6 - значения КСЯ, измеренные в спектральных каналах MODIS ближнего ИК (841-876 нм) и среднего ИК (1628-1652 нм) диапазонов длин волн.

При этом данные измерений R_6 в среднем ИК канале, имеющие исходное пространственное 460 м дополнительно линейно дискретизируются до пикселов с размером 230 м. Для получения непрерывных временных серий спутниковых данных, значения индекса $SWVI$ для шумовых пикселов, выявленных на этапе предварительной обработки, восстанавливаются на основе алгоритма сглаживания и заполнения пропущенных значений. Метод выявления пожаров основывается на сравнении значений текущих измерений индекса $SWVI$ с его статистической нормой, полученной на основе исторических данных MODIS. Получение статистической нормы индекса $SWVI$ включает оценку среднего многолетнего значения $M_{swvi}^N(\Theta^*, t)$ и стандартного отклонения $\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)$ индекса для каждого пикселя с координатами Θ^* в день года t :

$$\begin{aligned} M_{swvi}^N(\Theta^*, t) &= \sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} SWVI(\Theta^*, t, y) \\ \sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t) &= \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} (SWVI(\Theta^*, t, y) - M_{swvi}^N(\Theta^*, t))^2 \right)^{1/2}} \end{aligned}$$

$$\forall t (t = \overline{1,365}) \text{ и } \forall y (y = \overline{1,Y})$$

где

y - индекс года внутри опорного периода продолжительностью Y ;

Δt - ширина временного скользящего окна для статистической оценки внутригодовой динамики индекса $SWVI$;

$N = Y(2\Delta t + 1)$ - общее количество измерений, использующихся при оценке индекса $SWVI$ для заданного пикселя Θ^* в день t .

Детектирование пикселов, предположительно соответствующих поврежденной огнем растительности, основано на анализе различий между временными сериями среднего многолетнего значения вегетационного индекса M_{swvi}^N и значения вегетационного индекса для данного года $SWVI^C$. Детектирование аномалий сезонной динамики значения вегетационного индекса в текущем году $SWVI^C$ осуществляется с использованием следующего выражения:

$$SWVI^C(\Theta^*, t) - M_{swvi}^N(\Theta^*, t) < -k\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t),$$

где k - экспериментально определенная константа, определяющая допустимый диапазон разброса многолетних значений индекса $SWVI$. То есть, пиксель считается аномальным, если значение индекса $SWVI^C$ выходит за границы его статистической нормы (рис. 1). Данный подход использует адаптивный порог $M_{swvi}^N - k\sigma_{swvi}^N$, настраиваемый для каждого пикселя и каждого дня года независимо.

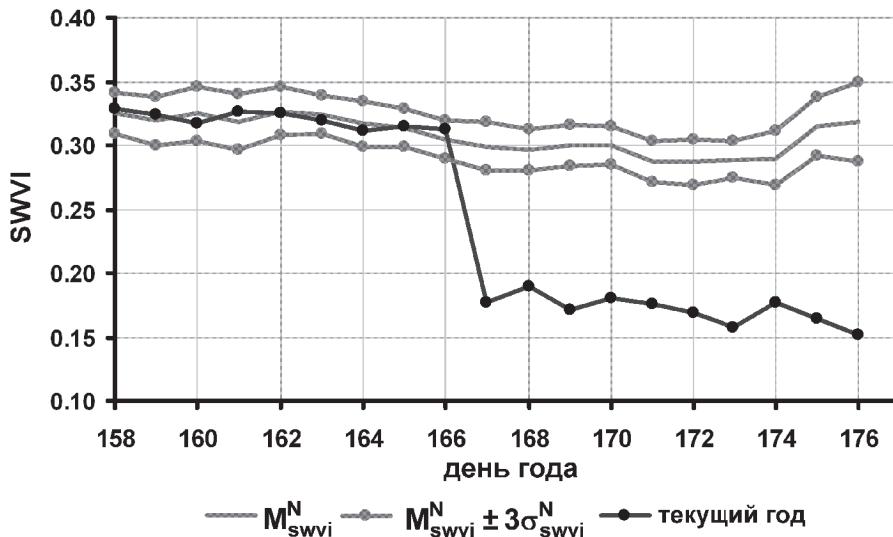


Рис. 1. Пример динамики $SWVI$ поврежденного пожаром растительного покрова

На этом этапе выявленные аномальные пиксели, помимо пожаров могут включать изменения под воздействием прочих возмущающих факторов, таких как затопления, вспышки размножения насекомых и экстремальные погодные условия. Некоторые пиксели также могут демонстрировать аномалии динамики $SWVI$ за счет влияния атмосферы, геометрических условий наблюдения, присутствия остаточных шумов. Для минимизации ошибочного детектирования аномальных пикселов применяется контекстная пространственная фильтрация. Вокруг каждого аномального пикселя с координатами Θ^* рассчитывается среднее $M_{swvi}^W(\Theta^*, t)$ и стандартное отклонение $\sigma_{swvi}^W(\Theta^*, t)$ индекса $SWVI^C$ за дату t внутри растущего окна размером W , которое должно включать не менее 5 пикселов, не отнесенных к аномальным на предыдущем этапе. Пиксель участвует в дальнейшем рассмотрении, если его значение $SWVI^C$ меньше чем $(M_{swvi}^W - \sigma_{swvi}^W)$.

На следующем этапе пиксели группируются в пространственно связные области, которые сопоставляются с выявленными по данным MODIS данными очагами горения для отделения пожаров от изменений, вызванных с другими факторами. Связная область считается пожаром, если более 1% ее площади совпадает с очагами горения во временном окне длиной в двадцать дней. Указанное значение порога было определено эмпирически на основе экспериментального анализа.

Описанные выше метод детектирования пожаров требует настройки нескольких ключевых параметров. Два из этих параметров, а именно длина опорного периода Y и ширина временного скользящего окна Δt , оказывают непосредственное влияние на результат оценки статистической нормы $M_{swvi}^N(\Theta^*, t)$ и $\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)$ сезонной динамики индекса $SWVI$. Третий параметр, масштабирующий коэффициент статистической нормы k , используется для установления допустимого диапазона разброса значений индекса $SWVI$. Оптимальные значения данных параметров были определены экспериментально для территории европейской части России, подвергшейся летом 2010 года воздействию экстремальных пожаров.

На рис. 2 представлены оценки площади пожаров, полученные при различной длине опорного периода Y ($Y = 3,6$) и ширине временного скользящего окна ($\Delta t = 3$ и $\Delta t = 5$).

На основе данных экспериментов, были выбраны параметры $Y = 5$ и $\Delta t = 3$, как наиболее оптимальные. Использование более короткого опорного периода ($Y < 5$) приводит к заметному возрастанию ошибочно детектированных пикселов, в то время как его дальнейшее увеличение приводит к незначительному росту точности оценки площади пожаров.

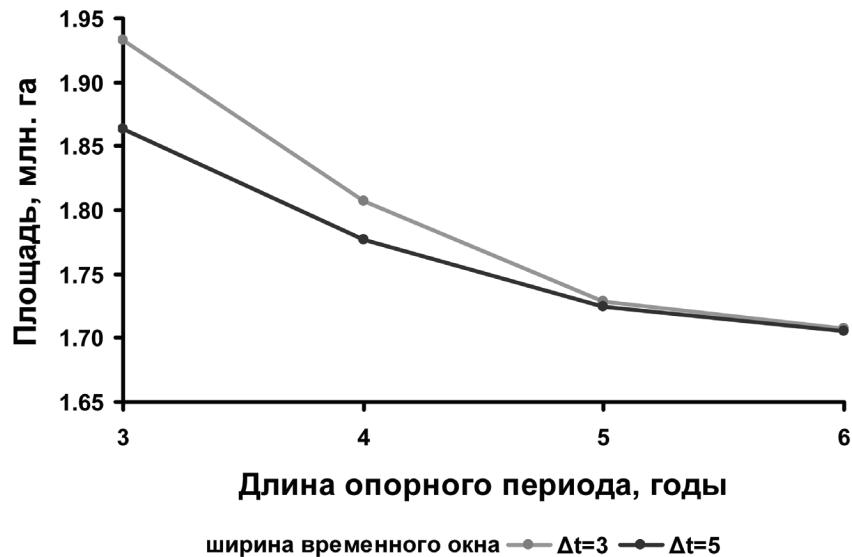


Рис. 2. Оценка площади пожаров при различных значениях параметров длины опорного периода и ширины скользящего окна (гранула MODIS H20V03, 2010 год)

Эксперименты по оценке влияния значений масштабирующего коэффициента k показали (рис. 3), что его изменение в диапазоне от 2 до 3 не приводит к значительным изменениям в оценках площади пожаров, а значение $k = 3$ может быть принято в качестве оптимального, так как при дальнейшем росте k наблюдается резкое снижение площади выявляемых участков повреждений.

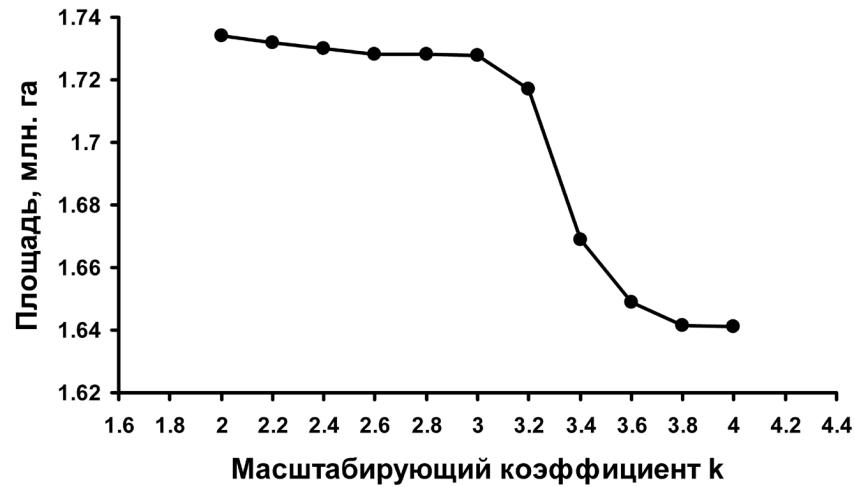


Рис. 3. Оценка площади пожаров при различных значениях масштабирующего коэффициента статистической нормы k

Описанный выше метод позволяет ежедневно детектировать участки поврежденной пожарами растительности для всей территории России с задержкой 20–30 дней в зависимости от доступности свободных от влияния облаков данных спутниковых наблюдений.

2.3. Картографирование пожаров по данным Landsat-TM/ETM+

Из всех формируемых в составе сервиса ВЕГА информационных продуктов, характеризующих пройденную огнем площадь, *HRBA* позволяет оценивать площадь отдельных пожаров с наибольшей точностью. При этом, данный информационный продукт отличается наиболее низким уровнем оперативности получения. Продукт *HRBA* формируется на основе изображений Landsat-TM/ETM+ с пространственным разрешением около 30 м. Основное методическое отличие *HRBA* от других описанных выше информационных продуктов, характеризующих пройденную огнем площадь, заключается в участии эксперта при картографировании пожаров. Особенностью использования продукта *HRBA* для получения оценок площади пожаров в масштабах страны является необходимость его комплексирования с оценками, полученными на основе информационных продуктов *AFBR* и *SRBA*. Указанная особенность вызвана потенциальной неполнотой покрытия пожаров в течение сезона пригодными для использования данными Landsat-TM/ETM+.

Оконтурирование пожаров по изображениям Landsat-TM/ETM+ выполняется с использованием набора специализированных инструментов в среде картографического веб-сервиса, обеспечивающего быстрый доступ к спутниковым данным (рис. 4). В основе веб-сервиса лежит технология GEOSMIS, предоставляющая возможность использования широкого набора ГИС-инструментов и имеющая специализированные функции анализа растительности (Tolpin et al., 2011). Веб-сервис обеспечивает интегрированный доступ к спутниковым данным, включая Landsat-TM/ETM+ и MODIS, а также к цифровым картам растительного покрова, метеорологической и другой информации.

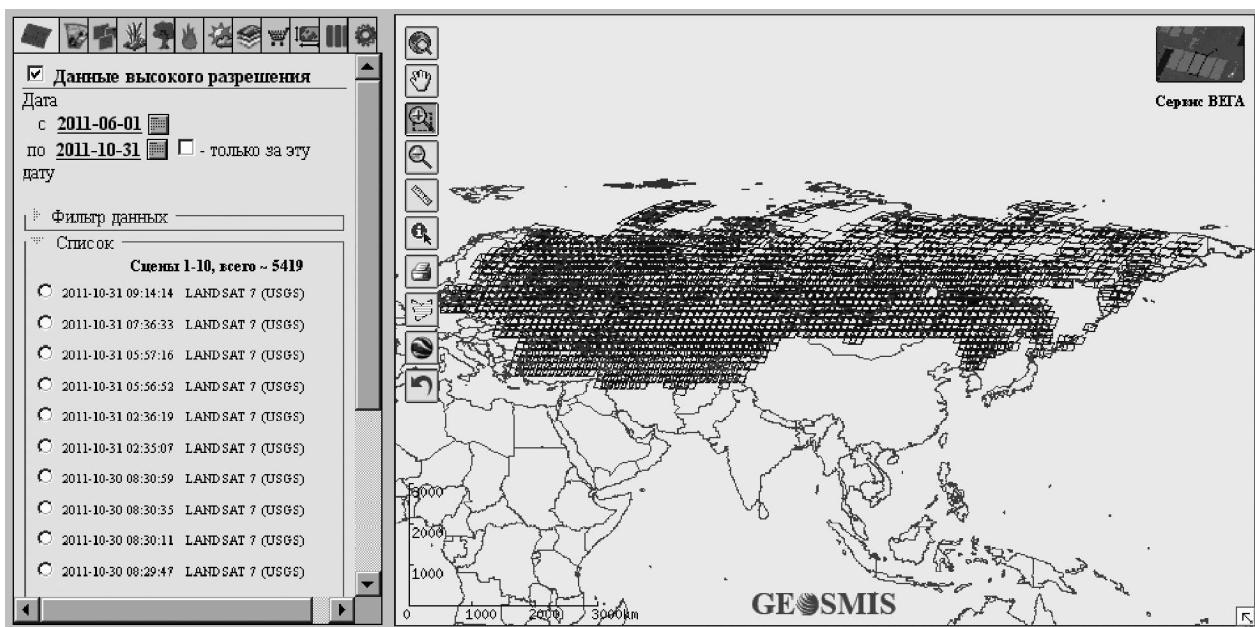


Рис. 4. Веб-интерфейс, используемый для картографирования пожаров по данным Landsat-TM/ETM+

Вебсервис предоставляет следующие возможности для анализа:

- интегрированный анализ спутниковых данных Landsat-TM/ETM+ и MODIS совместно с тематической информацией;
- анализ многолетних рядов спектральных вегетационных индексов для оценки динамики наемных экосистем. Веб-сервис позволяет формировать области интереса и получать многолетние профили вегетационного индекса по выбранному участку земной поверхности.

- доступ к базе данных о пожарах (контуры и характеристики);
- ГИС-анализ спутниковых данных и производных продуктов.

Веб-сервис обеспечивает быстрый и эффективный доступ ко производным продуктам, получаемым на основе спутниковых данных MODIS и Landsat-TM/ETM+, которые непрерывно автоматически загружаются в архив данных веб-сервиса из соответствующих архивов данных NASA и USGS. При этом ежедневные данные MODIS обрабатываются в автоматическом режиме. На первом этапе удаляются пиксели зашумленные облачным покровом и другими мешающими факторами и генерируются еженедельные композитные изображения. На основе композитных изображений рассчитываются значения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) с заполнением пропущенных значений на основе многошаговой процедуры полиномиальной аппроксимации, позволяющей также уменьшить влияние различного рода случайных шумов. Временные серии NDVI, полученные на основе данных MODIS, вносятся в базу данных и на их основе создаются многолетние временные профили для каждого пикселя MODIS. Данные Landsat-TM/ETM+ проходят процедуру предварительной обработки, которая включает радиометрическую и геометрическую коррекцию, после чего цветные синтезированные изображения доступны через интерфейс веб-сервиса. Также веб-сервис предоставляет доступ к картам растительного покрова, ежегодно получаемым по данным MODIS с пространственным разрешением 230 м (Барталев и др., 2011).

Веб-сервис позволяет выделять контуры поврежденных пожарами участков при условии, что в БД П-ВЕГА существуют соответствующий данному пожару полигон *ABFA*, а также, если доступно безоблачное изображение Landsat-TM/ETM+, полученное после окончания пожара. Процедура картографирования пожаров по изображениям Landsat-TM/ETM+, включает в себя следующие шаги:

- выбор имеющегося в составе информационного продукта *ABFA* полигона пожара и поиск имеющихся для данного участка безоблачных изображений Landsat-TM/ETM+;
- выбор режима оконтуривания пожара (автоматический или ручной);
- если на предыдущем этапе был выбран режим автоматического оконтуривания, то проведение визуальной оценки качества полученных результатов, и, в случае необходимости, проведение ручного оконтуривания.

В основу метода автоматического оконтуривания пожаров (Барталев и др., 2009) положен алгоритм сегментации изображений (Златопольский, 1985) с последующей автоматической идентификацией и объединением сегментов.

На рис. 5 приведен пример представления в интерфейсе веб-сервиса результатов выделения пожаров с использованием трех различных методов.

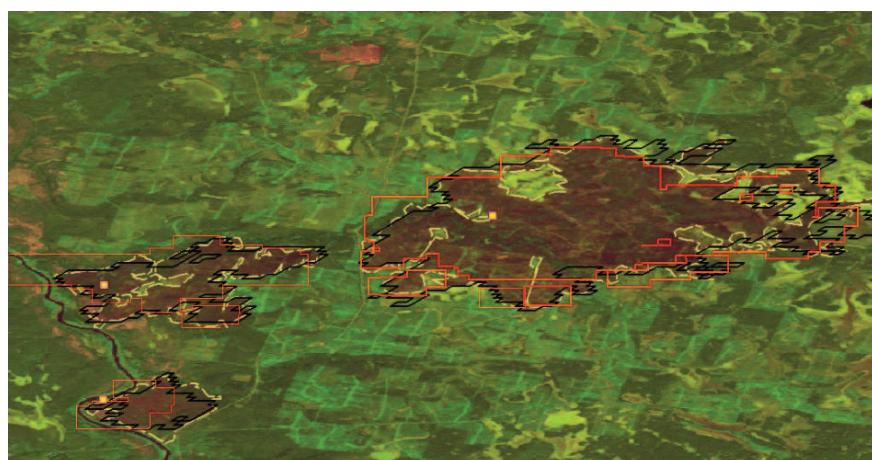


Рис. 5. Пример оконтуривания пожаров с использованием трех различных методов (красный – AFBA, черный – SRBA, желтый – HRBA). Подложка - спутниковое изображение Landsat-TM

3. Интегрированная оценка площади пожаров

Интегрированная оценка площади пожаров предполагает комбинированное использование всех трех, непрерывно обновляемых в течении пожароопасного сезона, информационных продуктов *AFBA*, *SRBA* и *HRBA*, с целью получения наиболее точной для данного момента времени оценки. Полученные на основе трех различных методов и внесенные в БД П-ВЕГА записи о конурах отдельных пожаров связываются между собой через идентификаторы контуров пожаров, входящих в состав информационного продукта *AFBA*. Процедура интеграции информационных продуктов предусматривает проверку контура каждого пожара по данным *AFBA* с целью поиска соответствующих ему контуров пожаров по данным *SRBA* и *HRBA*. Если пожар выявлен только по данным *AFBA*, то при оценке пройденных огнем площадей учитывается только площадь, полученная по результатам детектирования очагов горения. Если же пожар выявлен по данным *SRBA* или *HRBA*, то оценка по данным *AFBA*, замещается соответствующей уточненной оценкой, с приоритетом использования данных *HRBA*, как имеющих большую высокую точность.

При взаимной идентификации контуров, имеющих сложную пространственную структуру, часто встречаются случаи, когда несколько полигонов по данным *AFBA* пересекаются с одним полигоном по данным *HRBA*. Связь между полигонами *AFBA* и *SRBA* может быть даже более сложной, если одному реальному пожару соответствует множество полигонов в каждом из информационных продуктов, не имеющих четкого взаимного пространственного соответствия между ними. Влияние таких неопределенностей на оценку площади пожаров для больших территорий (страна в целом или крупные регионы) достаточно мало, однако должно быть принято во внимание при выполнении оценок на уровне отдельных пожаров.

В этой связи процедура интеграции включает также пространственную кластеризацию полигонов, в результате которой полигоны *SRBA* и *HRBA* группируются в кластеры, связанные с полигонами *AFBA*. При этом, анализируются взаимосвязи пар полигонов *AFBA-SRBA* и *AFBA-HRBA*. В результате процедура кластеризации разделяет набор полигонов на группы, соответствующие отдельным пожарам, и обеспечивает их более точную взаимную идентификацию.

4. Оценка площади пожаров на территории Российской Федерации в 2011 году

Основанная на комплексировании спутниковых данных различного пространственного разрешения технология интегрированной оценки площади пожаров была использована для определения масштабов воздействия огня на растительный покров России в 2011 году.

Полученная на основе информационного продукта *AFBA* оценка площади пожаров составила 10,27 млн. га, из которых 5,06 млн. га приходится на территории покрытые лесом. По данным информационного продукта *SRBA* аналогичные оценки составили 10,41 и 4,38 млн. га соответственно. При этом сравнение оценок площади пожаров, полученным по данным *SRBA* за последние семь лет, показывает, что по масштабам повреждений растительного покрова огнем пожароопасный сезон 2011 года является достаточно типичным (рис. 6).

Использование данных Landsat-TM/ETM+ позволило оконтурить 3609 участков повреждений пожарами, общая площадь которых составила 5,94 млн. га, в том числе 4,00 млн. га покрытых лесом территорий. Гистограмма площадей пожаров приведена на рис. 7. Одновременно с использованием для уточнения интегральной оценки поврежденной огнем площади, указанные данные могут служить в качестве опорных для определения точности методов выявления пожаров по данным MODIS.

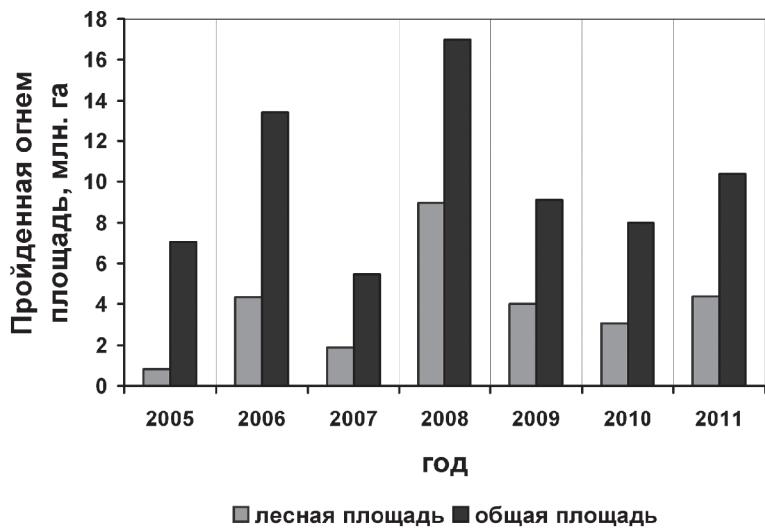


Рис. 6. Площади пожаров на территории РФ по данным MODIS (продукт SRBA) в 2005-2011 гг

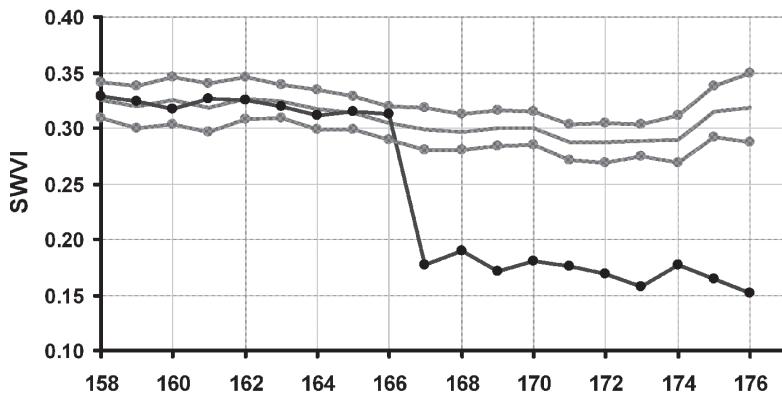


Рис. 7. Гистограмма площадей пожаров по данным Landsat-TM/ETM+

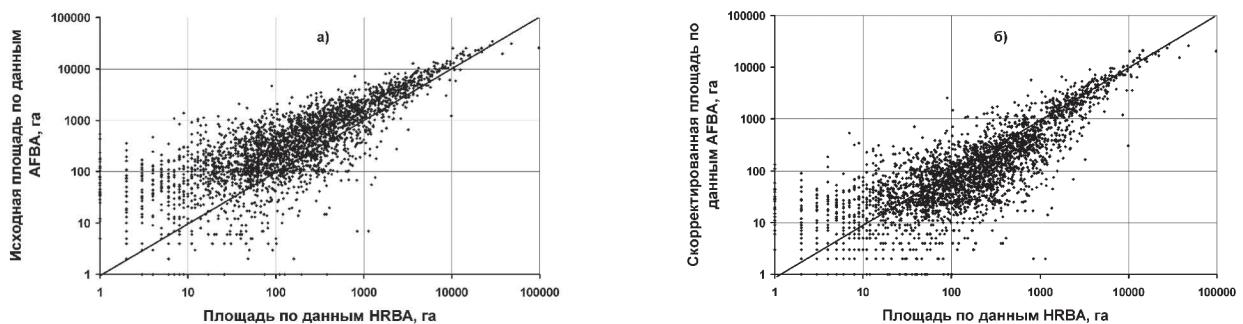


Рис. 8. Сравнение оценок площади пожаров, полученных по результатам детектирования очагов горения по данным MODIS (продукт AFBR) и по изображениям Landsat-TM/ETM+ (продукт HRBA): исходная (а) и скорректированная (б) оценки

Сравнение значений площади пожаров по данным Landsat-TM/ETM+ и на основе детектирования действующих очагов горения по данным MODIS представлено на рис. 8а и 8б, сравнение которых позволяет оценить влияние процедуры коррекции с использованием выражения (1).

Сравнение с данными информационного продукта *HRBA* площадей пожаров, полученных по результатам детектирования действующих очагов горения по данным MODIS и скорректированных с использованием выражения (1) позволило получить оценки значений относительных среднеквадратической и систематической ошибок, составившие соответственно: СКО = $\pm 2,43\%$ и СО = $-14,1\%$. Аналогично полученные оценки точности определения площадей пожаров по данным MODIS методом *SRBA* (рис. 9) составили соответственно СКО = $\pm 1,52\%$; СО = $-8,7\%$



Рис. 9. Сравнение оценок площади пожаров, полученных на основе данных MODIS (продукт SRBA) и по изображениям Landsat-TM/ETM+ (продукт HRBA) для весенних и летних пожаров

Экспериментально полученные зависимости (рис. 10) демонстрируют снижение величины СКО оценки площадей пожаров с ростом их размеров.

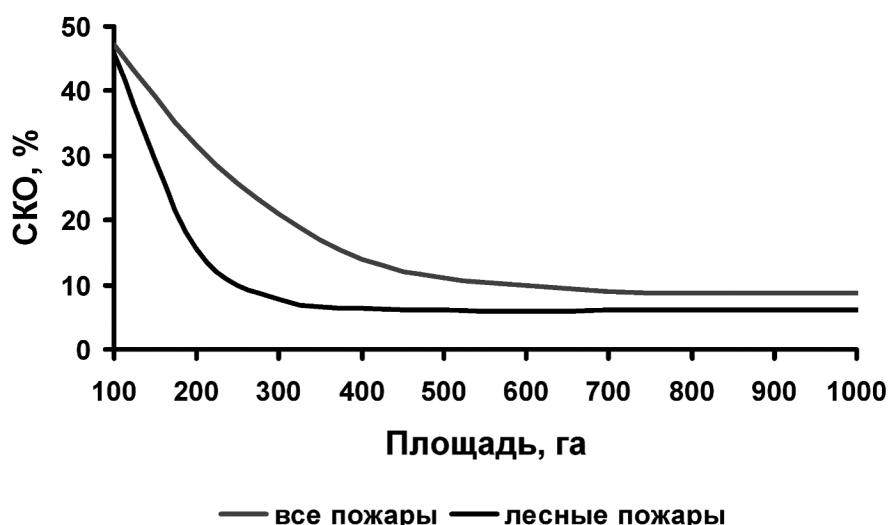


Рис. 10. Динамика СКО оценки на основе данных MODIS (продукт SRBA) площади пожаров от их размеров

Комбинированное использование всех трех типов информационных продуктов позволило получить оценку пройденной огнем площади в 14,32 млн. га, включая 5,79 млн. га покрытых лесом территорий. В таб. 1 представлены региональные оценки площади пожаров на основе каждого из трех разработанных методов и результаты их комплексирования. Представленная на рисунке 11 карта отражает пространственное распределение поврежденных пожарами 2011 года участков по территории России.

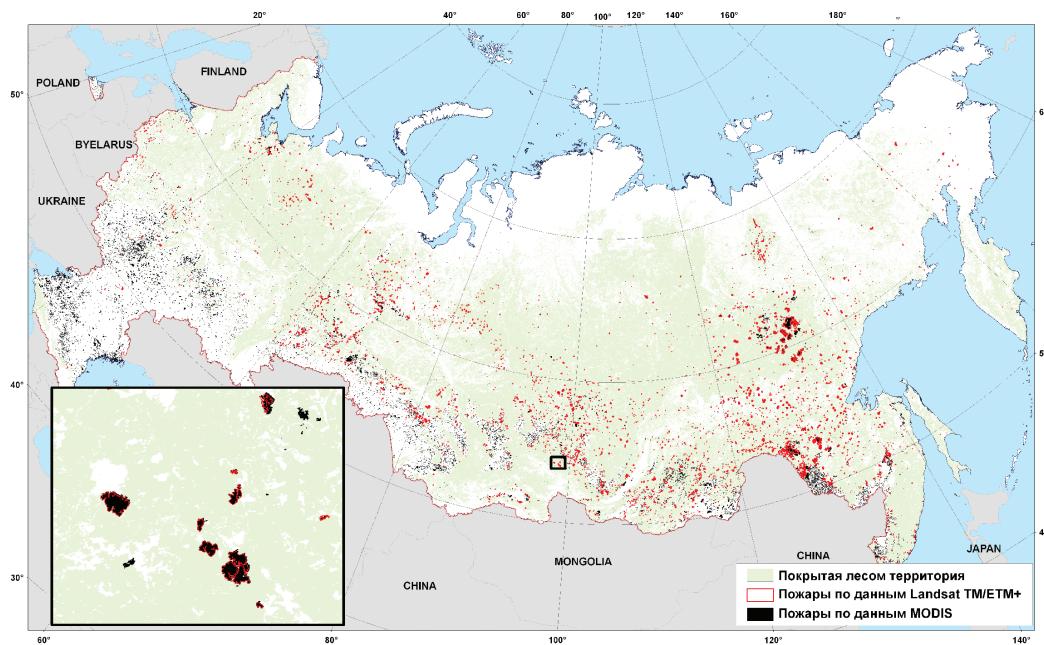


Рис. 11. Выявленные по данным MODIS (продукт SRBA) и Landsat-TM/ETM+ (продукт HRBA) пожары 2011 года на территории России

Заключение

В статье представлен метод определения площади пожаров на основе совместного использования данных MODIS и Landsat-TM/ETM+, одновременно удовлетворяющий требованиям оперативности и максимально возможной точности получаемых оценок. Метод предполагает комплексирование трех типов информационных продуктов, характеризующих площади пожаров на различных уровнях пространственного разрешения, а именно 1 км, 230 м и 30 м.

Таблица 1 Оценки площади, пройденной природными пожарами в 2011 году на территории Российской Федерации по данным MODIS и Landsat-TM/ETM+ с использованием различных методов и результатов их комплексирования

Федеральный округ	продукт АФВА, га		продукт SRBA, га		продукт HRBA, га		Интегрированная оценка, га	
	Общая площадь	в т.ч., леса	Общая площадь	в т.ч., леса	Общая площадь	в т.ч., леса	Общая площадь	в т.ч., леса
Центральный	190 923	11 957	837 272	11 321	36 215	6066	921 400	24 845
Южный	519 866	3 726	855 424	3 930	9745	2 639	1 053 002	3 702
Северо-Западный	163 879	96 794	267 839	142 798	155 947	112 242	247 852	138 478
Дальневосточный	5 144 318	3 320 603	4 023 000	2 855 103	3 924 097	2 818 567	6 194 216	3 900 744
Сибирский	3 231 180	1 335 362	2 660 764	1 109 667	1 356 684	817 199	3 794 757	1 375 317
Уральский	622 398	281 640	808 306	250 709	445 511	242 796	1 002 686	333 100
Приволжский	177 963	7 204	707 892	6 893	8 435	1 414	767 978	9 211
Северо-Кавказский	215 802	1 711	247 488	159	800	512	340 224	1 458
Всего по РФ	10 266 329	5 058 997	10 407 985	4 380 580	5 937 433	4 001 436	14 322 117	5 786 855

В основе первого продукта (*AFBA*) лежит использование результатов детектирования действующих пожаров по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км. Данный продукт позволяет получать наиболее оперативные (несколько раз в день), но наименее точные оценки пройденной огнем площади. Второй продукт (*SRBA*) основан на выявлении изменений в результате воздействия огня спектрально-отражательных характеристик земной поверхности по данным MODIS в сочетании с результатами детектирования очагов горения по значениям их радиационной температуры. Будучи менее оперативным (оценки получаются ежедневно с задержкой 20-30 дней), данный метод позволяет получать более точные оценки с пространственным разрешением 230 м. Оба вышеуказанных метода полностью автоматизированы и обеспечивают регулярную оценку пройденной огнем площади на территории России в течении пожароопасного сезона.

Наиболее точным является продукт *HRBA*, основанный на использовании данных Landsat-TM/ETM+ с пространственным разрешением 30 м. В силу неполноты продукта *HRBA*, его использование для оценки площади пожаров в масштабах России требует комплексирования с оценками, полученными по данным MODIS. Применение разработанной технологии в течение пожароопасного периода 2011 года позволило получить детальные контуры для 3609 пожаров на территории России. При этом суммарная площадь поврежденных огнем участков, оконтуренных по данным Landsat-TM/ETM+ составила 57% общей площади пожаров и, в том числе, 91% покрытой лесом площади в сравнении с оценками, полученными по данным информационного продукта *SRBA*.

Полученные на основе данных MODIS информационные продукты *AFBA* и *SRBA* имеют различную точность (среднеквадратическая ошибка соответственно составляет 14,1% и 8,7%), при этом незначительно систематически занижая получаемые оценки площади пожаров. Комплексирование различных спутниковых данных и методов их обработки позволяет получать наиболее полную на текущий момент и регулярно уточняемую в течение пожароопасного сезона оценку масштабов повреждения растительного покрова пожарами.

Литература

1. *Барталев С.А., и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №4. С.285-302.
2. *Барталев С.А., и др.* Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т.2. №5. С.419-429.
3. *Барталев С.А., и др.* Автоматизированное уточнение площадей, пройденных лесными пожарами, по данным приборов HRV, HRVI // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Выпуск 6. Т. II. С.335-342.
4. *Лупян Е.А., и др.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №1. С.190-198.
5. *Толпин В.А., и др.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №3. С.93-108.
6. *Златопольский А.А.* Сегментация изображений по границам с разрывами // Автоматика и телемеханика. 1985. №9. С.109-117.
7. *Arino, O., Plummer, S. and Defrenne, D.* Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas // Proceedings of the MERIS-AATSR Symposium, ESA publication. 2005. P-597.
8. *Bartalev, S.A. et al.* Multi-Year Circumpolar Assessment the Area Burnt in Boreal Ecosystems Using SPOT-Vegetation // Int. J. Remote Sens. 2007. V.28. P-1397.
9. *Eva, H.D. and Lambin, E.F.* Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach // Remote Sens. Environ. 1998. V.64. P-292.

10. *Fraser, R.H., Li, Z. and Landry, R.* SPOT-VEGETATION for characterising boreal forest fires // Int. J. Remote Sens. 2000a. V.21. P-3525.
11. *Fraser, R.H., Li, Z., Cihlar, J.* Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest // Remote Sens. Environ.. 2000b.74. 362.
12. *Giglio, L., et al.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sens. Environ. 2006. V.87. P-273.
13. *Giglio, L., et al.* Global estimation of burned area using MODIS active fire observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2006. V.6. P-957.
14. *Grégoire, J.M., Tansey, K., Silva, J.M.N.* The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery // Int. J. Remote Sens. 2003. V.24, P-1369.
15. *Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V.* Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sens. Environ. 1995. V.54. P-127.
16. *Isaev, A.S., et al.* Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions // Climate Change. 2002. V.55 P-235.
17. *Justice, C., et al.* MODIS Fire Products Algorithm Technical Background Document. Version 2.3, 2006. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf
18. *Korovin, G.N.* Analysis of the Distribution of Forest Fires in Russia, in Fire in ecosystems of boreal Eurasia // Forestry Sciences. 1996. V.48. 112.
19. *Li, Z., et al.* A review of AVHRR-based fire active fire detection algorithm: Principles, limitations, and recommendations. in Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space // Planning and Coordinated International Effort. 2001. P-199-225.
20. *Loboda, T., Csizsar, 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.
21. *Loupian, E.A., et al.* Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia at Federal and Regional Levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V.11. P-113.
22. *Roy, D.P., et al.* The Collection 5 MODIS Burned Area Product - Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product // Remote Sens. Environ. 2008. V.112. P-3690.
23. *Sukhinin, A.I., et al.* Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies // Remote Sens. Environ. 2005. V.94. P-428.
24. *Tansey, K., et al.* A new, global, multi-annual (2000-2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals // Geophysical Research Letters. 2008. V.35. L01401.
25. *Toller, G.N., et al.* MODIS Level 1B Product User's Guide for Level 1B Version 6.1.0 (Terra) and Version 6.1.1 (Aqua) // NASA Goddard Space Flight Center. 2006. <http://mcst.gsfc.nasa.gov/uploads/files/M1054.pdf>
26. *Zhang, Y.H., et al.* Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT // Remote Sens. Environ. 2003. V.87. P-1.

Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data

**S. A. Bartalev, V. A. Egorov, V.Yu. Efremov, E. A. Loupian
F.V. Stytsenko, E.V. Flitman**

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
117997, 84/32 Profsoyuznaya str., Moscow, Russia
E-mails: bartalev@d902.iki.rssi.ru
egorov@d902.iki.rssi.ru, efr@d902.iki.rssi.ru
evgeny@d902.iki.rssi.ru, fedor@d902.iki.rssi.ru
eflitman@gmail.com*

The paper describes an automated technology for integrated assessment of burnt area based on combined use of multi-resolution satellite data acquired by the Earth observation systems MODIS и Landsat-TM/ETM+. The technology contains of derivation and combining of three types of burnt area products with different levels of assessment rapidness and accuracy. The most rapid burnt area assessment is based on spatial-temporal clustering of hot-spots detected based on the MODIS data with spatial resolution about 1 km. This first burnt area assessment is a subject of consecutive accuracy improvement through additional use of the MODIS data with spatial resolution 230 m. This improved product involves burnt area detection based on analysis of surface reflectance properties changes for fire affected vegetation. The most accurate burnt area assessment is based on additional use of the Landsat-TM/ETM+ images with about 30 m spatial resolution. The developed technology involves integration of all three burnt area products based on use from all available for given time assessments most potentially accurate one for each individual fire event. This technology was applied to estimate burnt area for fire season of year 2011 at the level of entire Russian Federation.

Key words: burnt area satellite assessment, automated technology, MODIS, Landsat-TM/ETM+.