

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА MODIS ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ И УЧЕТА ЛЕСНЫХ ГАРЕЙ

О.В. Панова, Д.В. Ершов

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
Тел.: (095) 332-6877, E-mails: olga@ifi.rssi.ru, ershov@ifi.rssi.ru*

Детектирование и картографирование поврежденных пожарами лесов спутниковыми методами и средствами является одной из основных задач современной системы мониторинга лесных пожаров. Необходимость регулярного учета горимости лесов и последствий пожаров на всей территории Северной Евразии существенно усиливается в связи с ратификацией и вступление в действие Киотского протокола, введение ограничений на размеры эмиссий парниковых газов. В статье приводится метод картографирования лесных гарей по данным спектрорадиометра MODIS, основанный на анализе спектральной изменчивости яркостей разновременных изображений до и после пожара. Подробно рассмотрены результаты проведенного исследования, возможные источники ошибок и направления повышения точности рассмотренного в статье метода.

Введение

Проблема обнаружения, регистрации и учета лесных пожаров имеет глобальное значение. Лесные пожары, являясь одним из основных источников парниковых газов и аэрозолей в атмосферу планеты, вносят существенный вклад в развитие парникового эффекта. На международном уровне принято целый ряд межгосударственных соглашений, направленных на улучшения методов и средств контроля за лесными пожарами. Ратификация Киотского соглашения [1] обязывает стран-участниц проводить оценки выбросов парниковых газов в атмосферу и всячески воздерживаться от их увеличения, для чего развивать национальные системы их дистанционного мониторинга, совершенствовать измерительные средства и накапливать банки данных по выбросам в атмосферу. За последние 10 лет начато осуществление целого ряда международных проектов, направленных на создание и поддержку дистанционных методов и средств глобального мониторинга лесных пожаров. Самые последние инициативные программы предусматривают создание региональных сетей глобального наблюдения за лесным покровом (GOF/GOLD) и их динамикой, в рамках которых создаются региональные сети по мониторингу лесных пожаров [8].

В России наблюдение, обнаружение и контроль за лесными пожарами возложен на Федеральное агентство лесного хозяйства. Российская система дистанционного мониторинга лесных пожаров [2] используется лесоохранными подразделениями (ФГУ Авиалесоохрана) лесной службы для принятия оперативных управленческих решений по своевременному обнаружению и тушению лесных пожаров. Развитие и разработка новых методов детектирования и картирования лесных пожаров позволяет поддерживать и развивать действующую систему на современном уровне.

Целью представленного исследования является изучение информационных возможностей спектро-радиометра MODIS и разработка соответствующих методов применительно к задаче картографирования лесных гарей.

1. Современное состояние проблемы лесных пожаров в России

Лесной пожар является мощным фактором, определяющим структуру и динамику наземных экосистем северной Евразии.

Ежегодно в Северной Евразии лесные пожары принимают характер стихийного бедствия и оказывают разрушительное воздействие на растительность, фауну и находящиеся в лесах материальные и культурные ценности. В последнее время наблюдается тенденция к возрастанию горимости и сокращению периода повторяемости катастрофических пожаров. В частности, за последние 40 лет пики катастрофической горимости отмечались в 1976, 1988, 1998 и 2003 годах, что явно свидетельствует о сокращении периода с 12 до 5 лет [3]. В России, только на активно охраняемой территории лесного фонда по данным официальной статистики ежегодно возникает от 20 до 45 тысяч лесных пожаров, охватывающих площадь от 0,5 до 6 млн. гектар [4]. Наносимый огнем ущерб ежегодно измеряется миллиардами рублей и явно недооценивается из-за отсутствия регулярного учета горимости лесов и последствий пожаров в северных районах Сибири и Дальнего Востока. Необходимость постоянного учета горимости лесов и последствий пожаров на всей территории Северной Евразии существенно усиливается в связи с ратификацией и вступлением в действие Киотского протокола, введением ограничений на размеры эмиссий парниковых газов.

Наличие неохранных территорий со слаборазвитой инфраструктурой практически исключает возможность корректного учета лесных пожаров и их последствий без широкого использования средств и методов спутникового мониторинга. Все большую роль эти средства и методы играют в решении проблемы управления лесными пожарами и сокращения масштабов разрушительного воздействия огня на лесные системы, снижения размеров пожарных эмиссий парниковых газов.

Анализ существующих методов и средств дистанционного зондирования показывает [5-8], что с их помощью может решаться целый ряд практических задач, связанных с оценкой реальных масштабов горимости лесов на всей территории Северной Евразии, воздействия пожаров на лесные экосистемы и их углеродный обмен с атмосферой. К их числу относятся:

- Регистрация крупных лесных пожаров и оценка пройденных ими площадей лесного фонда.
- Оценка структуры пройденных огнем площадей и степени повреждения им лесной растительности.
- Оценка последствий лесных пожаров и хода лесовосстановительного процесса на гарях.

Решение первой из указанных задач связано, прежде всего, с регистрацией крупных лесных пожаров (более 200 га), на долю которых приходится до 95% всей ежегодно охватываемой огнем площади. Высокая периодичность наблюдения с метеорологических спутников за всей территорией бореальных лесов позволяет получать оперативную информацию о координатах и размерах крупных лесных пожаров и использовать ее для целенаправленной съемки таких пожаров и гарей с ресурсных спутников.

Наряду с обнаружением и оценкой параметров лесных пожаров космическая система обеспечивает контроль динамики пожара и прогноз его поведения, наблюдение за метеорологической обстановкой в зоне действия пожара, оценку влагосодержания лесных горючих материалов и пожарной опасности в лесу по условиям погоды.

Появление новых космических систем (TERRA/AQUA) с радиометрами среднего пространственно-го разрешения MODIS, развитие телекоммуникационных сетей существенно увеличивает возможности космических средств и методов наблюдения за лесными пожарами.

2. Методика выявления участков, пройденных пожарами

Под лесной гарью понимается лесная площадь с насаждением, погибшим в результате пожара [9]. Анализ спектральных сигнатур показывает, что для картографирования свежих гарей наиболее информативными являются красный, ближний и средний ИК спектральные диапазоны. Метод основан на анализе межгодовой изменчивости состояния полога древесной растительности, поврежденной лесными пожарами.

Для реализации этого метода использовались 32-дневные композитные изображения MODIS 2001, 2002 и 2003 пожароопасных сезонов, сформированные в одни и те же месяцы. Дополнительно кроме данных MODIS использовался также целый ряд вспомогательных продуктов: тепловые аномалии детектированных лесных пожаров, данные о лесном покрове, результаты обработки SPOT-VGT, данные спутниковой съемки высокого пространственного разрешения Landsat-7.

В методе картографирования лесных гарей по данным MODIS используются два индекса, которые являются наиболее чувствительными к изменениям в состоянии растительного покрова – нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI и нормализованный индекс водного стресса NDStI.

Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является хорошо известной комбинацией красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов, часто используемой для изучения состояния и динамики растительного покрова.

При возгорании лесной растительности происходит изменение в ее состоянии выражающее в потере зеленых фракций. При картографировании гарей существует потребность в характеристике, которая была бы наиболее чувствительна к повреждениям лесных насаждений, выражающемся, в частности, в потере биомассы и воды после пожаров. В качестве такого признака может рассматриваться комбинация ближнего и среднего инфракрасного каналов - нормализованного индекса водного стресса (NDStI):

$$NDStI = \frac{SWIR_{ch7} - SWIR_{ch5}}{SWIR_{ch7} + SWIR_{ch5}}, \quad \text{где} \quad (1)$$

ch5 и ch7 - номера спектральных каналов изображения MODIS, соответствующие соответственно 1230-1250 нм и 2105-2155 нм диапазонам электромагнитного спектра. Первый диапазон чувствителен к изменениям спектрально-отражательных свойств растительного покрова. Второй средний ИК диапазон реагирует на изменение влагосодержания в подстилающей поверхности и в атмосфере, что часто используется для изучения стрессовых ситуаций и явлений. В связи с этим мы условно назвали NDStI – индекс водного стресса.

Алгоритм включает в себя три этапа обработки спутниковых данных TERRA/MODIS (рис.1). На первом этапе (подготовительном) формируются изображения с вегетационными индексами NDVI и NDStI. После этого производится первичное, предварительное выделение участков с подозрением на свежие гари, основанное на выявлении изменений индексов в экспериментально подобранных пределах. Здесь же вы-

полняется процедура маскирования остаточной облачности и дымов от пожаров, которое не было устранено на этапе создания ежемесячных композитов.

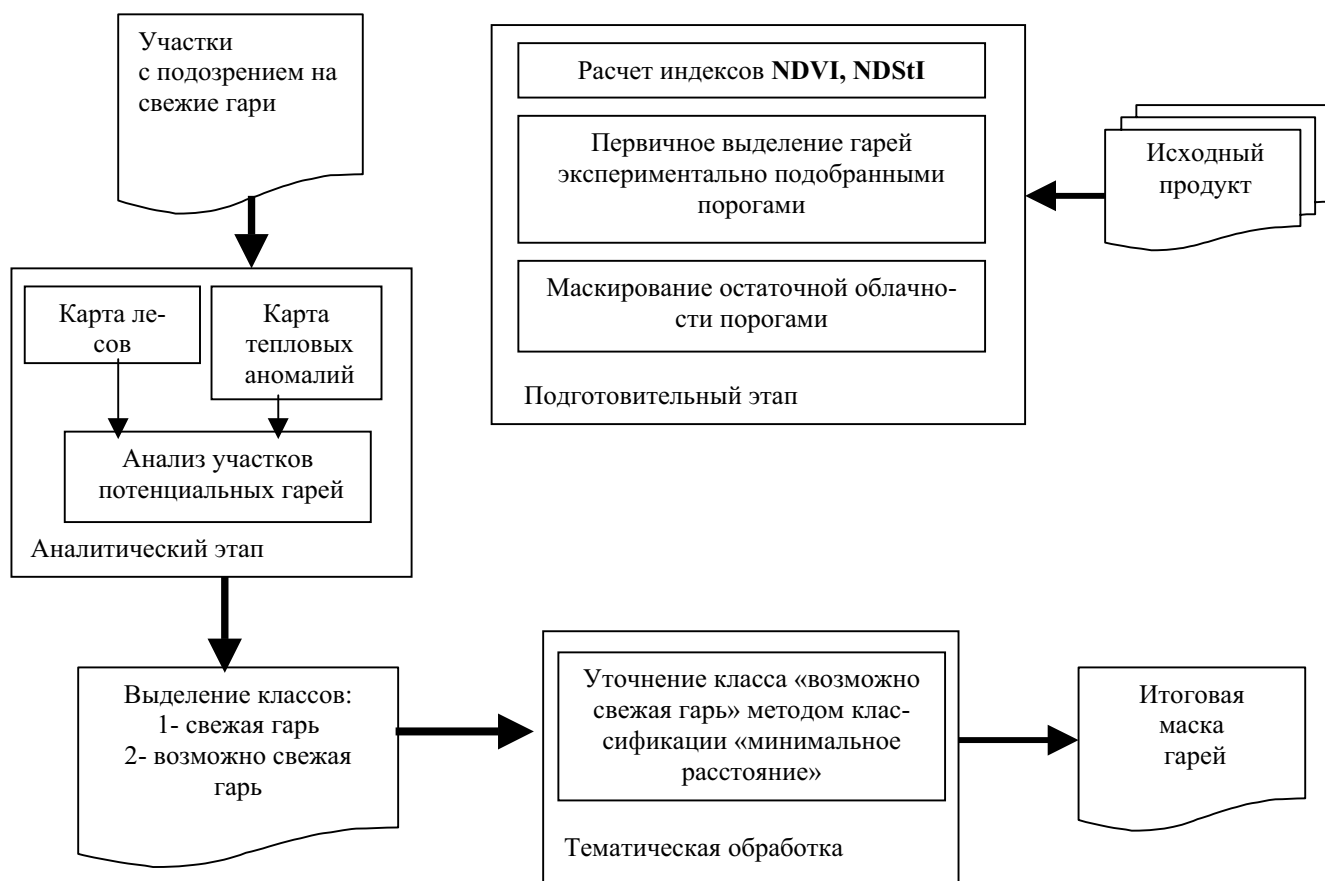


Рис. 1. Блок-схема реализации алгоритма картирования

На втором этапе предварительно выявленные участки гарей относятся к покрытым и непокрытым лесом территориям с помощью карты наземных экосистем Северной Евразии. Здесь же осуществляется идентификация свежих гарей, совпадающих с маской тепловых аномалий детектированных по тепловым каналам спектрорадиометра MODIS.

Третий этап предназначен для тематической обработки с целью выделения двух классов, в первый из которых отнесены участки, где точно был обнаружен очаг возгорания и образовалась лесная гарь, а во второй класс попали участки леса, где очаг возгорания по тепловым каналам MODIS обнаружен не был, а значит возможны другие причины, не связанные с лесными пожарами, повлекшие к изменениям в состоянии лесной растительности. На последнем этапе производится уточнение маски лесных гарей, а также исключение из неё групп пикселей, площадью менее 100 га (рис 1.)

По результатам обработки композитных изображений за три летних месяца, полученных в период с июня по сентябрь 2001, 2002 и 2003 года, было выявлено:

- в 2002 году 86 378 лесных гарей площадью 6 123 100 га;
- в 2003 году 117 510 лесных гарей площадью 6 622 750 га.

Фрагмент карты свежих гарей за 2002 год на территорию Якутии приводится на рисунке 2. Результаты обработки использовались в сравнительном анализе с данными SPOT-VGT и Landsat-7.

3. Сравнительный анализ результатов эксперимента

Сравнительный анализ результатов обработки спутниковых изображений MODIS с другими данными по пожарам проводился двумя способами:

1. статистический – на уровне субъектов РФ;
2. выборочный - на уровне отдельных тестовых гарей

Первый подход основан на подсчете интегральной статистики площадей гарей на уровне областей, попавших на территорию тестового региона. В качестве тестовых данных использовались карты пройденных огнем площадей, созданные по спутниковым данным SPOT-VEGETATION [11].

Второй подход основан на сравнении площадей тестовых гарей MODIS и гарей, дешифрированных визуально на выборочных космических изображениях высокого пространственного разрешения Landsat-7/ETM+.

Интегральная оценка площадей, полученных различными методами по данным спутниковых систем VEGETATION и MODIS, позволяет оценить точности, выявить преимущества и недостатки рассматриваемого метода для регионов с различной лесистостью, а также наметить пути его улучшения.

Как видно из таблицы 1, наибольшие расхождения в оценке площадей наблюдаются в 2002 году в Амурской области, республиках Бурятия и Саха (Якутия), а в 2003 году в Читинской и Иркутской областях, республиках Бурятия и Тува. Это связано с рядом причин.

В 2002 году в Якутии действовали крупные лесные пожары на протяжении нескольких месяцев (июнь-август), что создавала сложную экологическую обстановку, связанную с сильной задымленностью территории. 32-дневные мозаики MODIS содержат множество пикселей, яркости которых отражают дымовые шлейфы от пожаров, не позволяющие выделять описанным алгоритмом. В результате площадь гарей на этой территории занижена в пределах 20% (рис.3).

Таблица 1. Площади лесных гарей в разрезе субъектов РФ по данным VEGETATION и MODIS.

Название области	2002				2003			
	VGT, га	MODIS, га	Разница в площади	Процент несовпадения	VGT, га	MODIS, га	Разница в площади	Процент несовпадения
Республика Саха (Якутия)	3306874	2649281	657593	19,9	458323	480584	-22261	-4,9
Республика Тува	414766	380110	34656	8,4	45068	54589	-9521	-21,1
Иркутская область	100804	118484	-17680	-17,5	1384821	726484	658337	47,5
Читинская область	93160	92182	978	1,0	2278577	1257838	1020739	44,8
Амурская область	36165	20437	15728	43,5	22390	21683	707	3,2
Республика Бурятия	13293	29233	-15940	-119,9	2345192	1548639	796553	34,0

Причиной занижения площадей гарей по MODIS в 2003 году в Иркутской, Читинской области и республике Бурятия связано также с сильной задымленностью этой территории в июне и июле, в результате чего 32-х дневные композитные изображения содержат множество пикселей с дымами, закрывающих часть прогоревших территорий. Важно отметить также, что изучаемый алгоритм выделяет гари только в лесах по карте наземных экосистем северной Евразии. Алгоритм картирования пройденных огнем площадей по SPOT-VGT напротив анализирует изменения яркостей как на покрытой, так и на непокрытой лесом территории. Все это приводит к занижению площадей гарей по MODIS при подсчете их на уровне областей.

Для получения оценки точности рассматриваемого в статье алгоритма необходимо было использовать независимый источник данных более высокого пространственного разрешения. Для этой цели были привлечены данные Landsat-7, с помощью которых на тестовых гарях проводилась оценка точности метода и определены его предельные точности. Для анализа были визуально отобраны и выделены 11 тестовых гарей по изображениям Landsat-7.

В таблице 2 приведены площади гарей в гектарах, определенные по данным трех спутниковых систем.

Таблица 2. Площади гарей, определенные по данным Landsat и MODIS

№ гари	Landsat (га)	Modis (га)	Дм
1	17163	20000	16,5
2	17767	7725	-56,5
3	48768	30900	-36,6
4	9390	10625	13,1
5	14713	9075	-38,3
6	6085	4200	-30,9
7	2983	2300	-22,8
8	5090	5750	12,9
9	5467	3025	-44,6
10	6260	8625	37,7
11	141079	120200	-14,7

Выбор тестовых гарей выполнялся с учетом следующих критериев:

- Пожар должен быть ликвидирован или самостоятельно затухнуть на момент съемки Landsat-7;
- Площадь гари должна четко дешифрироваться (без облаков, дымов) на изображениях и полностью попадать на сцены Landsat-7;

Однако удовлетворить полностью эти требования достаточно сложно в виду ограниченного набора спутниковых изображений Landsat-7 доступных для анализа, поэтому несколько гарей было выделено с действующими или затухающими пожарами.

В результате возникли осложнения при сравнении площадей с тестовыми гарями (№ 2 и 3) на снимках Landsat-7 за 23 июля 2002 года. На момент съемки в этих местах действовали пожары, и часть территории покрыта дымами. В результате на 32-дневном композите за июль 2002 года отсутствуют часть гарей реально появившихся в этом месяце. А если использовать август, то за месяц площадь этих гарей увеличилась в несколько раз. Подобные ситуации возникают с гарями № 6, 9 и 10. Эти гари изображены на сценах Landsat-7, полученных 17 августа.

Регрессионный анализ значений площадей гарей по данным MODIS показал достаточно высокую сходимость полученных оценок с результатами дешифрирования Landsat-7 (рисунок 4). Квадрат коэффициента корреляции составляет $R^2 = 0,98$, а регрессионное уравнение имеет следующий вид: $y = 0,83x$. Коэффициент «а», отвечающий за угол наклона ($a = 0,83$), имеет значение близкое к единице, что свидетельствует о хорошей сходимости и совпадении полученных результатов.

Выводы

По результатам проведенного сравнительного анализа с данными других спутниковых систем можно сделать следующие выводы:

- Рассмотренный алгоритм картографирования свежих лесных гарей с использованием 32-дневных композитов MODIS выделяет их со среднеквадратической ошибкой в среднем около 30%;
- Важно отметить, что, несмотря на невысокую точность определения площадей по MODIS, сохраняется тесная связь их с площадями, определенными по Landsat-7, о чем свидетельствует высокий коэффициент корреляции $R^2 = 0,98$;

Большинство недостатков, ограничивающих точность и возможности алгоритма, связано с качеством использованных композитных изображений и методом их создания. Развитие метода картирования гарей по спутниковым изображениям MODIS предлагается в следующих направлениях:

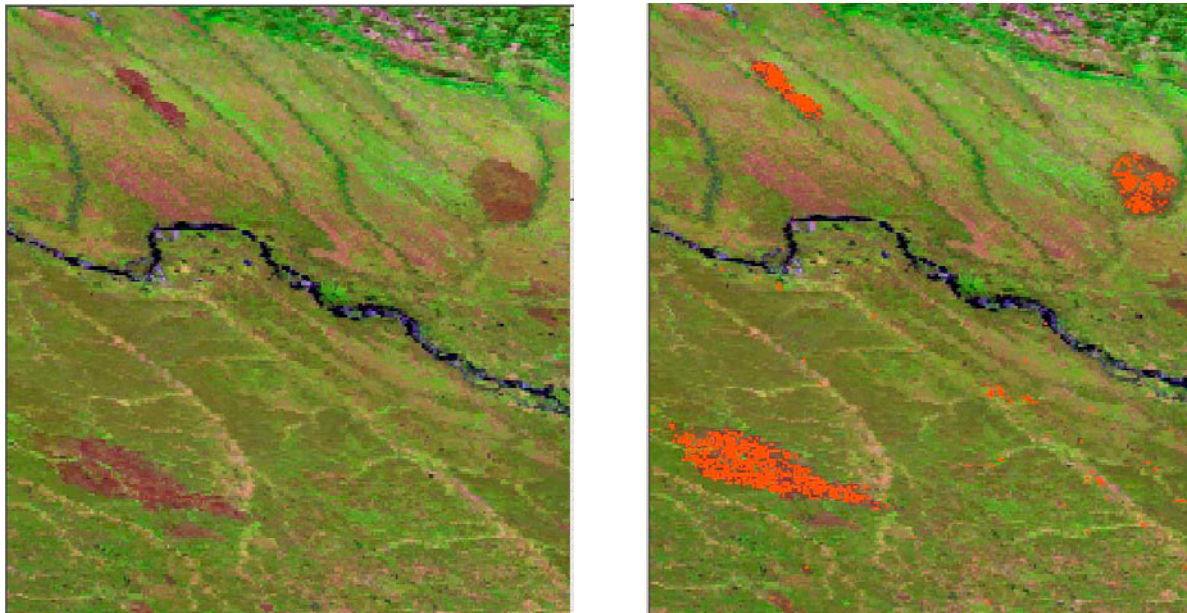
- Использовать ежедневные или декадные композитные изображения с целью увеличения периодичности и частоты наблюдения лесных территорий;
- Использовать композитные изображения MODIS среднего пространственного разрешения (250 метров), что повысит точность определения площадей гарей;
- Перейти на анализ временных рядов, накапливаемых в течение пожароопасного сезона, чтобы учитывать влияние фенологии растительности в весенне-осенние периоды наблюдения, а также природные явления, связанные с весенним паводком, а также появлением и сходом снежного покрова.

Таким образом, несмотря на выявленные недостатки, алгоритм позволяет автоматизировать процесс картографирования лесных гарей, что является актуальным для получения оценок площадей лесных гарей для неохраемых авиационными и наземными средствами обширных лесных территорий Сибири и Дальнего Востока.

Литература

1. *Коровин Г.Н., Барталев С.А., Беляев А.И.* Интегрированная система мониторинга лесных пожаров// ж. "Лесное хозяйство". 1998, №4 с.45-48.
2. *Беляев А.И., Ершов Д.В.* и др. Современные возможности российской системы оперативного спутникового мониторинга лесных пожаров//Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. М.: ЦЭПЛ РАН. 2002. с. 34-37.
3. *А.З. Швиденко, Д.Ф. Ефремов.* Долговременные экологические последствия катастрофических лесных пожаров в лесах Дальнего Востока и их вклад в глобальные процессы// материалы научно-практического семинара «Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне», Хабаровск, 9-12 сентября 2003 г., изд-во «Алекс», Москва 2004, сс.157-166
4. *А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, В.И. Сухих, С.П. Титов, А.И. Уткин, А.А. Голуб, Д.Г. Замолотчиков, А.А. Пряжников.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России // Аналитический обзор, Центр экологической политики России, 155 с., М., 1995

5. Белов В.В., Лурия Е.А., Мазуров А.А., Флитман Е.В., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Новик В.П., Абушенко Н. А., Алтынцева Д. А., Кошелев В.В., Тащилин С. А., Татарников А. В., Сухинин А. И., Пономарев Е. И., Гришин А.М., Афонин С.В., Гриднев Ю.В., Матвиенко Г.Г., Соловьев В.С., Антонов В.Н., Ткаченко В.А., Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы. Аналит. обзор / ИОА; ГПНТБ СО РАН. - Новосибирск, 2003. - с. - (Сер. Экология. Вып. 68)
6. А.И. Беляев, Д.В. Ершов, Е.А. Лурия, Б.В. Романюк, А.И. Сухинин, С.А. Тащилин Национальная система сбора, обработки и анализа информации о природных пожарах и ее сопряжение с международными и региональными информационными сетями // материалы научно-практического семинара «Управление лесными пожарами на эко-региональном уровне», Хабаровск, 9-12 сентября 2003 г., из-во «Алекс», Москва 2004, сс.157-16
7. Белов В.В., Афонин С.В. Космомониторинг лесных пожаров и задача их раннего обнаружения//Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. М.: ЦЭПЛ РАН. 2002. с. 111-115.
8. Соловьев В.С., Васильев Е.К.. Результаты спутникового мониторинга лесных пожаров на территории Восточной Сибири//Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. М.: ЦЭПЛ РАН. 2002. с. 201-202.
9. И.Г. Гольдаммер, А.И. Сухинин. Существующая ситуация с пожарами в Российской Федерации: выводы для расширения международного и регионального сотрудничества в рамках ООН и глобальных программ по мониторингу и оценки пожаров // материалы научно-практического семинара «Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне», Хабаровск, 9-12 сентября 2003 г., из-во «Алекс», Москва 2004, сс.157-166
10. Рекомендации по обнаружению и тушению лесных пожаров // Приложение 1. Используемые термины и выражаемые ими понятия, п.50, утв. Рослесхозом от 17 декабря 1997 г.
11. Барталев С.А., Егоров В.А., Лурия Е.А., Уваров И.А. Оценка площади повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000-2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation // материалы Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», Москва, 16-18 ноября 2004 года.



Пройденная огнем территория

Рис. 2. Пример выявления гарей в центральной Якутии в 2003 году с помощью алгоритма картографирования прогоревших территорий.

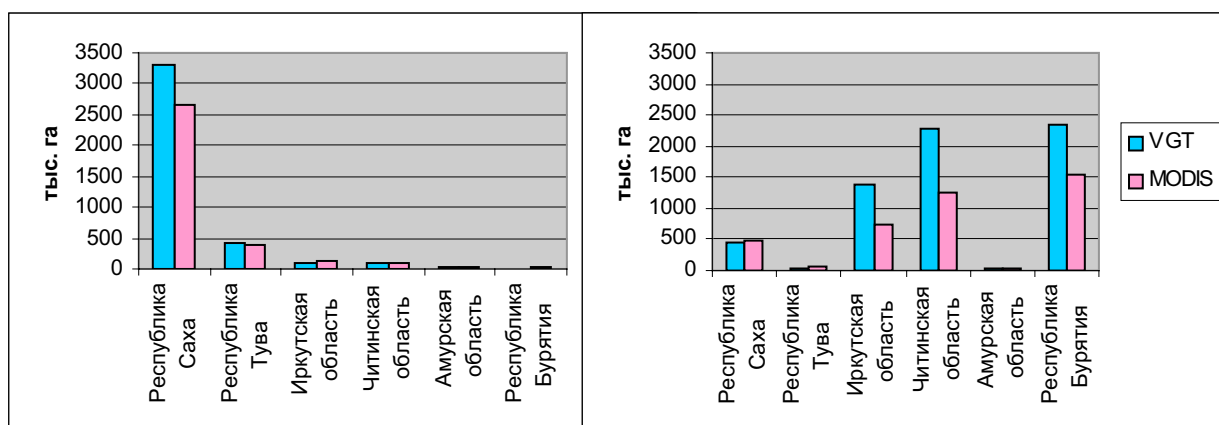


Рис. 3. Сравнение площадей гарей по субъектам РФ а) 2002 г.; б) 2003 г.

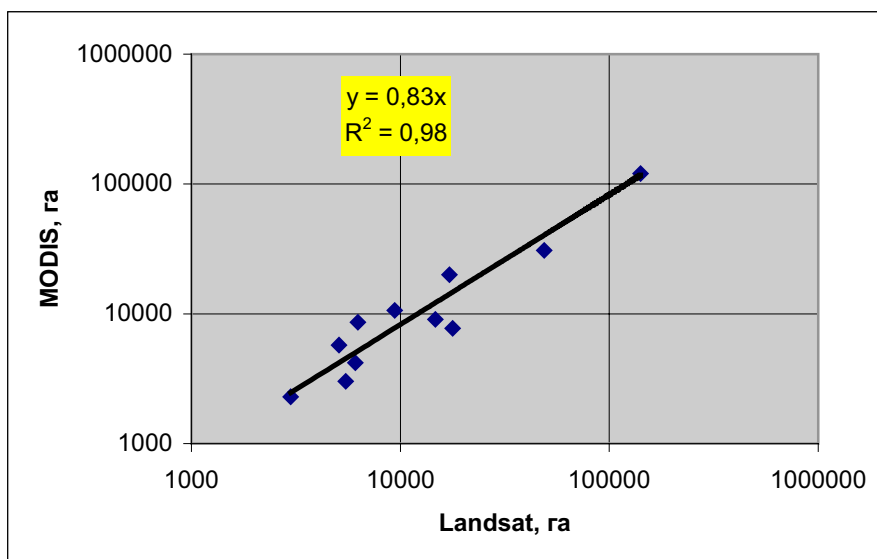


Рис. 4. Сравнительный анализ значений площадей гарей по данным MODIS и Landsat-7