

ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПЛОЩАДЕЙ ПОВРЕЖДЕННЫХ ПОЖАРАМИ ЛЕСОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

С.А. Баргалева¹, А.И. Беляев³, В.А. Егоров¹, Д.В. Ершов², Г.Н. Коровин²,
Н.А. Коршунов³, Р.В. Котельников³, Е.А. Лупян¹

¹*Институт космических исследований РАН
117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32
Тел: (095) 3335313; E-mail: bemi@smis.iki.rssi.ru*

²*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32
Тел: (095) 3326877; E-mail: korovin@cepl.rssi.ru*

³*ФГУ «Авиалесоохрана»
141200, Пушкино, Московской области, ул. Горького, 20
Тел.: (095) 993-31-25; E-mail: aviales@space.ru*

Регулярно обновляемые достоверные данные о площадях повреждений растительности огнем необходимы для информационного обеспечения управления природными ресурсами, а также решения научных задач моделирования изменений климата. Разработанная автоматическая система картографирования поврежденной пожарами растительности на основе совместного использования спутниковых данных SPOT-Vegetation для выявления изменений в состоянии растительности и результатов детектирования температурных аномалий по данным Terra/Aqua-MODIS обеспечивает возможность мониторинга повреждений бореальных экосистем пожарами на уровне всего региона Северной Евразии. Для оценки точности разработанного метода была проведена валидация полученных информационных продуктов, ориентированная преимущественно на анализ повреждений в лесных экосистемах. Опорные данные были сформированы с использованием репрезентативного набора спутниковых изображений высокого разрешения Landsat-ETM+ и Метеор-ЗМ/МСУ-Э в различных регионах России, а также по результатам выборочных авиационных и наземных обследований лесных гарей на территории Красноярского края. Сравнительный анализ площадей повреждений, полученных с использованием разработанного метода и опорных данных, позволяет сделать вывод о высоком уровне их согласованности. В работе приводятся количественные оценки и зависимости, позволяющие судить об уровне точности разработанного метода.

Введение

Эффективное управление лесными и другими природными ресурсами, а также решение научных задач моделирования изменений климата требует наличия регулярно обновляемых данных о повреждениях растительности пожарами. Данные дистанционного зондирования Земли со спутников представляют возможности получения такого рода информации на больших территориях, не достижимые на сегодняшний день с использованием других методов.

Разработанная автоматическая система картографирования поврежденной пожарами растительности на основе совместного использования спутниковых данных SPOT-Vegetation для выявления изменений в состоянии растительности и результатов детектирования температурных аномалий по данным Terra/Aqua-MODIS обеспечивает возможность регулярного мониторинга масштабов пирологического воздействия на наземные экосистемы бореальной зоны [1, 2]. Использование этой системы позволило к настоящему времени сформировать банк данных о пройденных огнем участках на всей территории Северной Евразии за период 2000-2003 годов [3]. Оценка точности метода картографирования поврежденной пожарами растительности и получаемых на его основе данных относится к числу важнейших составляющих проводимых исследований и направлена на обеспечение эффективного использования созданной системы.

Важность задачи валидации получаемых с использованием данных дистанционного зондирования информационных продуктов в широком понимании [4] и, в частности, применительно к исследованиям воздействия огня на растительный покров [5-7] достаточно хорошо осознана и широко обсуждается мировым научным сообществом. В частности осознание важности этой задачи привело к созданию в рамках Комитета по спутниковым наблюдениям Земли (CEOS - the Committee on Earth Observation Satellites) Рабочей группы по калибровке и валидации (<http://wgcv.ceos.org>), призванной обеспечить координацию международных усилий в этом направлении.

Общие методические вопросы валидации полученных по спутниковым данным тематических продуктов интенсивно разрабатываются в последние годы, что нашло отражение в целом ряде публикаций [6-11]. Более того, в ряде работ [6,7] рассмотрены специфические вопросы методики валидации результатов

картографирования пройденных огнем площадей по данным низкого разрешения, к которым, в частности, относятся и данные спутниковых наблюдений SPOT-Vegetation.

Осуществление полномасштабной валидации, извлекаемых из спутниковых данных, информационных продуктов континентального уровня сопряжено не только со значительными сложностями научно-методического характера, но и требует существенных организационных и экономических затрат. Полученные к настоящему времени и представленные в данной работе результаты валидации информационных продуктов о повреждениях лесов Северной Евразии пожарами представляют собой важный шаг в данном направлении, и, не претендуя на полноту и завершенность, дают представление об уровне оценки точности разработанных информационных продуктов и позволяют наметить пути дальнейших исследований.

Формирование набора опорных данных

Задача формирования репрезентативного набора данных, которые с достаточным уровнем обоснованности могли бы рассматриваться в качестве опорных, представляет собой не только методологическую проблему, но и связана с трудностями практической реализации по их сбору. Очевидно, что одним из основных требований, предъявляемых к опорным данным, является требование получения их методами, обеспечивающими существенно более высокую геометрическую точность и детальность пространственных измерений, по отношению к исходным спутниковым изображениям SPOT-Vegetation. Этим требованиям могут удовлетворять данные о границах поврежденных участков леса, получаемые по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения, а также по результатам авиационных и наземных обследований с использованием устройств определения географических координат, в частности, GPS приборов.

Исходя из этого критерия, нами было признано целесообразным формирование репрезентативного набора опорных данных с использованием изображений, получаемых со спутников Landsat прибором ETM+ (28.5 м) и Метеор-3М прибором МСУ-Э (38 м), пространственное разрешение которых многократно превышает разрешение изображений SPOT-Vegetation (1,15 км). Основным источником изображений Landsat-ETM+ для данного исследования послужила база данных Global Land Cover Facility (<http://glcf.umiacs.umd.edu>). Кроме того, ряд изображений Landsat-ETM+ был предоставлен Университетом Мэриленд (США) и Лондонским королевским колледжем (Англия), осуществляющих исследовательские проекты по спутниковому мониторингу повреждений растительности пожарами. Изображения Landsat-ETM+ отбирались таким образом, чтобы охватить максимально большее разнообразие поврежденных пожарами типов наземных экосистем. Сформированный в результате набор изображений Landsat-ETM+ включал в себя 31 сцену, полученную в течение 2001-2002 годов для различных регионов России (рис. 1). Использование указанного набора спутниковых сцен позволило выбрать 78 поврежденных огнем участков, выявленных как по данным SPOT-Vegetation, так и обнаруживаемых визуально на изображениях Landsat-ETM+. Таблица 1 содержит информацию о спутниковых изображениях Landsat-ETM+ и участках для валидации, из которой следует, что полученные опорные данные главным образом характеризуют повреждения в лесных экосистемах. Небольшое количество опорных участков относится также к тундровым и болотным экосистемам. Отсутствие опорных данных для степных и других травяных пожаров связано с высокой скоростью восстановления растительного покрова после воздействия огня в этих типах экосистем, период формирования сомкнутого травяного покрова после пожара в которых, в зависимости от различных условий, составляет от одной до нескольких недель. Это приводит к тому, что относительно невысокая, не превышающая два раза в месяц, частота наблюдений с использованием прибора Landsat-ETM+, является критическим ограничением возможности использования указанных спутниковых данных для картографирования повреждений пожарами на территориях с преобладанием травяной растительности. В то же время для картографирования повреждений в лесах и тундре частота наблюдений Landsat-ETM+ не является существенным ограничительным фактором, так как восстановление допожарного состояния растительности в этих типах экосистем занимает существенно более продолжительное время, измеряемое, в зависимости от степени повреждения и ряда других условий, месяцами, годами и даже десятилетиями.

Обработка изображений Landsat-ETM+ для получения опорных данных о границах и площадях поврежденных пожарами участков проводилась автоматическим алгоритмом ERDAS Region Growing с интерактивной настройкой его параметров таким образом, чтобы добиться наилучшего соответствия получаемых результатов с визуальной оценкой эксперта. Представленные на рисунке 2 примеры демонстрируют фрагменты изображений Landsat-ETM+ для некоторых типов лесных и тундровых экосистем, а также результаты выделения контуров поврежденных участков, как с использованием этих изображений, так и по данным SPOT-Vegetation. Из приведенных примеров наглядно видно, что использование ERDAS Region Growing алгоритма позволяет выявлять не только внешние границы поврежденных участков, но и детектировать внутри них относительно небольшие по площади «островки» неповрежденной растительности и водных объектов, что дает возможность формирования более точных опорных данных для валидации. Это является отличительной чертой данного исследования по отношению к известным нам работам близкой

направленности [6, 12], в которых для подготовки опорных данных выделялись лишь внешние границы поврежденных участков с использованием методов визуальной интерпретации спутниковых изображений высокого разрешения. Кроме того, очевидно, что в случаях высокого уровня изрезанности внешних границ поврежденных участков, применение ERDAS Region Growing алгоритма позволяет добиться детальности сложно практически достижимой при использовании методов визуальной интерпретации. Вместе с тем, из анализа представленных на рисунке 2 примеров, очевидно, что высокая изрезанность внешних контуров (рис. 2а) или наличие внутренних «островков» неповрежденных участков (рис. 2б), может приводить к весьма значительным различиям в оценках площадей повреждений, получаемых автоматическим и визуальным методами анализа спутниковых изображений.

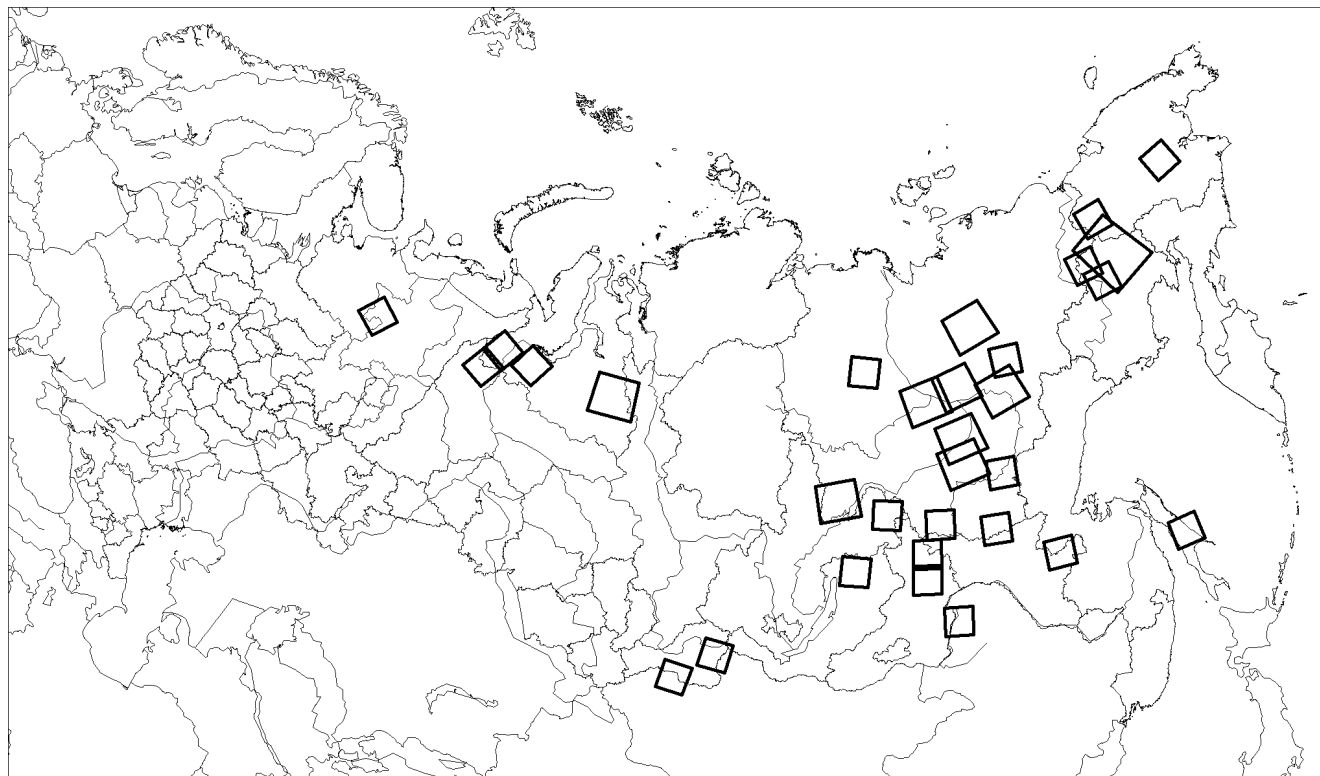


Рис. 1. Географическое расположение сцен Landsat-ETM+ для валидации результатов картографирования поврежденных пожарами наземных экосистем Северной Евразии

В августе 2004 года в Красноярском крае совместно ФГУ «Авиалесоохрана», параллельно с авиационным патрулированием лесов, проводились контрольные облеты выборочных участков лесных гарей 2003 и 2004 годов для определения их границ с использованием устройства GPS. При этом был осуществлен облет семи различающихся размерами и степенью повреждения участков, на одном из которых был также произведен наземный обход по внешней границе гари с измерением географических координат прибором GPS. Для трех из обследованных авиацией участков были получены спутниковые изображения Метеор-ЗМ/МСУ-Э.

Таблица 1. Характеристика спутниковых изображений Landsat-ETM+ и поврежденных пожарами участков для сбора опорных данных

№	Path/Row	Дата съемки	Название региона	Число участков	Преобладающий тип экосистемы
1*	095/14	21. 08.2002	ЧУКОТСКИЙ А.О.	1	ТУНДРА
2*	104/13	05. 08.2002	Чукотский А.О.	1	Хвойные листопадные леса
3*	106/15	02. 07.2002	Магаданская обл.	4	Хвойные листопадные леса
4*	107/14	11. 09.2002	Магаданская обл.	2	Хвойные листопадные леса
5*	108/25	14. 06.2002	Сахалинская обл.	1	Смешанные леса
6*	116/23	22.06.2002	Амурская обл.	2	Хвойные листопадные леса
7*	117/15	29.06.2002	Республика Саха	3	Тундра
8*	119/19	14.08.2002	Республика Саха	1	Смешанные
9*	120/21	04.07.2002	Республика Саха	1	Хвойные листопадные леса
10*	123/24	26.08.2002	Китай	3	Хвойные вечнозелёные леса
11*	124/20	17.08.2002	Республика Саха	3	Хвойные листопадные леса

12*	125/21	08.08.2002	Читинская обл.	1	Смешанные леса
13*	125/22	08.08.2002	Читинская обл.	2	Смешанные леса
14*	128/19	13.08.2002	Иркутская обл.	4	Хвойные листопадные леса
15*	130/21	11.08.2002	Республика Бурятия	1	Хвойные вечнозелёные леса
16*	131/13	17.07.2002	Республика Саха	5	Болота
17*	138/24	04.09.2002	Республика Тува	3	Хвойные вечнозелёные леса
18*	140/25	16.07.2002	Республика Тува	1	Хвойные вечнозелёные леса
19***	122/15	16.06.2002	Республика Саха	7	Хвойные листопадные леса
20***	104/15	18.08.2001	Магаданская обл.	1	Тундра
21*	154/14	02.07.2002	Ямало-Ненецкий А.О.	2	Смешанные леса
22**	118/16	03.07.2001	Республика Саха	1	Смешанные леса
23**	120/13	02.08.2001	Республика Саха	1	Хвойные листопадные леса
24**	122/17	15.05.2002	Республика Саха	1	Хвойные листопадные леса
25**	122/18	19.08.2002	Республика Саха	1	Смешанные леса
26**	125/15	06.09.2001	Республика Саха	3	Смешанные леса
27**	132/18	22.08.2001	Республика Саха	1	Хвойные листопадные леса
28*	162/14	06.09.2000	Ямало-Ненецкий А.О.	12	Смешанные леса и болота
29*	165/14	10.06.2001	Ямало-Ненецкий А.О.	4	Смешанные леса и болота
30*	165/15	10.06.2001	Ханты-Мансийский	1	Смешанные леса
31*	174/16	11.07.2001	Республика Коми	4	Смешанные леса
Всего	-	-	-	78	-

Примечания к таблице 3: В таблице приняты следующие обозначения источников получения спутниковых изображений Landsat-ETM+

- * - Global Land Cover Facility;
- ** - Университет Мэриленд (США);
- *** - Лондонский королевский колледж (Великобритания);

Примеры полученных в результате авиационных облетов и наземного обхода контуров поврежденных участков приведены на рисунке 3, где в ряде случаев они также даются в сравнении с контурами гарей выявленных по данным SPOT-Vegetation и изображениям Метеор-3М/МСУ-Э. Сравнительные данные о площадях участков, обследованных с использованием авиационных и наземных наблюдений, приводятся в таблице 2.

Результаты анализа данных

Анализ результатов выявления по данным SPOT-Vegetation поврежденных огнем участков и полученных различными методами наборов опорных данных преследовал цель получения количественных оценок точности созданных информационных продуктов, а также определения оптимального метода сбора опорных данных исходя из учета комплекса условий методического и организационно-экономического характера.

Таблица 2. Сравнение данных о площадях лесных гарей в Красноярском крае
а) по данным спутниковых и авиационных наблюдений

Год пожара	Площадь (га)		
	SPOT-VGT	Метеор-3М/МСУ-Э	Авиационный облёт
2004	3090,7	нет данных	2720,3
2004	4402,9	нет данных	4916,2
2003	9924,3	10035,7	9323,8
2003	1143,1	1252,9	1236,4
2003	2682,1	2886,6	2564,5
2004	9206,7	нет данных	13012,6

б) по данным авиационных и наземных наблюдений

Год пожара	Площадь (га)	
	Авиационный облёт	Наземный обход
2004	749,2	632,8

Суммарная площадь 78 опорных участков повреждений (таблица 1), выбранных для анализа с использованием Landsat-ETM+, составила 468331,7 га при измерении по результатам анализа изображений высокого разрешения и 437366,3 га по результатам детектирования повреждений с использованием данных

SPOT-Vegetation. Принимая во внимание масштабы ежегодных повреждений пожарами лесов Северной Евразии, которые по имеющимся оценкам [1] в период 2000–2003 годов составляли от 2,83 до 23,64 млн. га, обследованные участки охватывают от 2% до 15% ежегодных пирогенных повреждений лесов, что позволяет рассматривать опорную выборку как статистически репрезентативную.

Сопоставление значений площади поврежденных участков для опорной (Landsat-ETM+) и контрольной (SPOT-Vegetation) выборок демонстрирует хороший уровень согласованности результатов, полученных из двух независимых источников. Это подтверждается результатами корреляционного и регрессионного анализа, демонстрирующего наличие линейной связи с высоким уровнем корреляции ($R^2=0.94$) между двумя наборами данных о площадях повреждений (рис. 4). Регрессионное уравнение $S_{ETM}=1.1S_{VGT}-89.4$ ($S_{VGT} \geq 81,3$ га) позволяет оценить порог чувствительности метода картографирования поврежденной пожарами растительности. В частности из указанного уравнения следует, что участки повреждений площадью ниже 89,4 га принципиально не могут быть выявлены с использованием данного метода. Исходя из того, что площадь на местности соответствующая пикселю SPOT-Vegetation составляет около 132 га на экваторе и снижается по мере удаления от него к полюсам, полученная оценка чувствительности метода представляется достаточно правдоподобной для бореальной зоны.

Для опорных участков, в которых были выявлены наибольшие отклонения в измеренных значениях площадей повреждений, был проведен качественный анализ возможных причин указанных отклонений. Некоторые характерные примеры такого анализа отклонений приведены на рисунке 2.

Статистический анализ различий между данными о площадях поврежденных участков, полученных из обоих (опорный и контрольной) выборок позволяет получить оценки точности разработанного метода в предположении, что опорные данные дают истинные значения площадей повреждений. Из представленной гистограммы (рис. 5) относительных ошибок (различий) площадей повреждений, следует, что с высоким уровнем достоверности в качестве распределения вероятностей ошибок может быть принято нормальное распределение. Средняя относительная ошибка составляет $-6,6\%$, величина и знак которой свидетельствует о наличии незначительного систематического занижения площадей повреждений, измеряемых с использованием разработанного метода. При этом величина стандартного отклонения гистограммы относительных ошибок, равная $\pm 28,7\%$, может характеризовать уровень случайных ошибок при измерении площадей индивидуальных участков повреждений.

Представляется также логичным предположение о наличии обратной зависимости между величиной ошибки измерения площадей поврежденных участков и их размерами, которое было проверено и нашло подтверждение по результатам проведенных исследований. Представленный на рисунке 6 график демонстрирует экспоненциальное снижение величины относительной ошибки определения площадей поврежденных пожарами участков по мере роста их размеров. В качестве характеристики относительной ошибки в данном случае был принят модуль средней величины расхождений между данными опорной и контрольной выборок в группе участков заданного интервала площадей. При этом, каждый i -ый участок повреждения площадью S_i относился к одной из пяти групп на основе следующих критериев: $0 < S_i \leq 1000$ га, $1000 < S_i \leq 2000$ га, $2000 < S_i \leq 5000$ га, $5000 < S_i \leq 10000$ га, $10000 < S_i \leq 20000$ га. Участки площадью выше 20000 га в данном анализе не рассматривались ввиду отсутствия выборки репрезентативного объема для данной группы. Из графика следует, что величина средней относительной ошибки оценки площадей повреждений достигая 17% для участков меньших по площади 1000 га, снижается до уровня 2% для поврежденных участков в интервале площадей от 5000 до 10000 га.

Исходя из сравнения площадей пяти лесных гарей, полученных с использованием спутниковых данных SPOT-Vegetation и результатов авиационных облетов, также можно сделать вывод о хорошем уровне согласованности оценок из двух независимых источников данных. Относительная средняя разница оценок площадей составляет при этом около 11%. Сравнение данных для индивидуальных участков повреждений выявило для одной из обследованных лесных гарей существенное различие с результатами анализа данных SPOT-Vegetation, которое составило 29,2%. Дополнительный анализ показал, что указанная гарь содержит участки пройденных огнем вырубок, что вызывало значительные трудности и порождало высокий уровень неопределенности при визуальном определении границ гари во время ее авиационного облета. Исходя из этого, было признано нецелесообразным использование данных по указанной лесной гари при проведении дальнейшего сравнительного анализа. Без учета данных по этому исключенному из анализа участку величина относительного среднего отклонения площадей (систематическое отклонение) снизилась до -2% . При этом по отдельным контрольным участкам относительные отклонения оценок площадей колебались в интервале от $-13,6\%$ до $+10,4\%$.

Один из важных практических вопросов связан с целесообразностью масштабного проведения дорогостоящих авиационных обследований при дальнейших валидационных работах принимая во внимание возможности использования спутниковых изображений высокого разрешения, как альтернативного источника опорных данных. Анализ данных для двух лесных гарей выявленных по изображениям SPOT-Vegetation, а также обследованных одновременно с использованием авиации и изображений Meteor-3М/МСУ-Э показал близкие значения оценок площадей. Относительные различия оценок с данными ана-

лиза изображений Метеор-3М/МСУ-Э, принятыми в качестве опорных, составили величины $-1,1\%$ и $-8,8\%$, а аналогичное сравнение с данными авиационных наблюдений продемонстрировало отклонения $-6,4\%$ и $+7,5\%$. Непосредственное сравнение данных о площадях поврежденных участков, полученных по изображениям Метеор-3М/МСУ-Э и результатам авиационных наблюдений, которое оказалось возможным выполнить для трех лесных гарей, продемонстрировало, что относительные различия оценок лежат в интервале от $1,3\%$ до $12,6\%$, в среднем составляя величину $7,2\%$. При этом из представленных на рисунке 3 примеров видно, что использование спутниковых изображений высокого разрешения позволяет получать границы лесных гарей с более высокой степенью пространственной детальности по сравнению с данными авиационных облетов.

Широко распространенное представление о том, что проведение наземных обследований дает возможность *a priori* добиваться наивысшей точности получаемых оценок границ и площадей лесных гарей, как показывает наш опыт полевых работ по картографированию контуров поврежденных огнем участков, не может рассматриваться как абсолютно бесспорное. Вместе с тем представляет интерес сравнение данных для одной из гарей, контуры которой были получены как методом авиационного обследования, так и по результатам наземного обхода, что позволило оценить относительное расхождение площадей, составившее $18,4\%$.

Обсуждение результатов и выводы

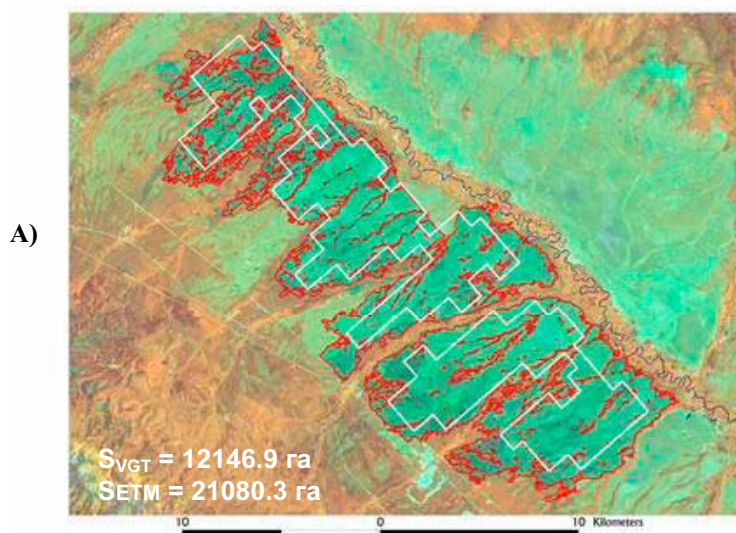
Проведенный комплекс исследований по оценке точности метода картографирования повреждений пожарами бореальных экосистем может рассматриваться в качестве важного этапа валидации, а его результаты позволяют судить об уровне точности определения площадей повреждений в лесных экосистемах, выявляемых по данным SPOT-Vegetation. При этом в качестве возможных источников опорных данных использовались спутниковые изображения высокого разрешения, а также данные авиационного и наземного обследования. Проведенный сравнительный анализ разработанных информационных продуктов, а также, полученных различными методами, опорных данных позволяет сделать следующие выводы:

- (i) Использование спутниковых изображений высокого разрешения является на данном этапе наиболее целесообразным методом сбора опорных данных для валидации информационных продуктов по повреждениям лесов пожарами, получаемых по данным приборов низкого разрешения, к которым, в частности, относится SPOT-Vegetation. Этот вывод основывается на том факте, что авиационные наблюдения, будучи экономически затратным и организационно более сложным методом, не продемонстрировали очевидных преимуществ по точности по сравнению с использованием спутниковых изображений высокого разрешения для сбора опорных данных о границах пройденных огнем участков. Более того, выявлены существенные расхождения в данных авиационного и наземного обследования, в то время как последние рассматриваются в качестве наиболее точного *a priori* из всех доступных в настоящее время методов. Анализ подробности картографирования границ поврежденных участков также показывает преимущества спутниковых изображений высокого разрешения в сравнении с данными авиационных наблюдений. Широкое использование метода наземных наблюдений на данном этапе ограничивается организационной сложностью и высоким уровнем затрат.
- (ii) Сравнение данных о площадях поврежденных лесов, а также отдельных участков тундровых и болотных экосистем, полученных на основе созданных информационных продуктов и сформированного набора опорных данных различных типов, продемонстрировало высокий уровень сходимости площадных оценок. Использование репрезентативного набора опорных данных, полученных на основе спутниковых изображений высокого разрешения Landsat-ETM+, выявило высокий уровень корреляции с оценками площадей повреждений по данным SPOT-Vegetation ($R^2=0.94$). О консервативном характере получаемых площадных оценок повреждений свидетельствует отрицательный знак систематического отклонения по отношению к опорным данным, величина которого составляет $-6,6\%$.
- (iii) Найдена связь между величиной средней относительной ошибки определения площадей повреждений и размерами поврежденных участков, свидетельствующая о наличии между указанными величинами обратной экспоненциальной зависимости. Согласно этой зависимости величина относительной средней ошибки оценки площадей снижается с 17% , при размерах участков ниже 1000 га, до 2% при достижении участками поврежденных площади интервала $5000-10000$ га.
- (iv) Полученная оценка величины порога чувствительности разработанного метода, свидетельствует о том, что с его использованием могут быть выявлены лишь участки повреждений, превышающие площадь $89,4$ га, на наш взгляд, не является практически значимым ограничением. Величина порога чувствительности метода, вытекает из особенностей используемых спутниковых данных, спектрально-отражательных характеристик поврежденных пожарами участков и применяемого алгоритма анализа данных, и должна приниматься во внимание при получении интегральных оценок повреждений растительности пожарами.

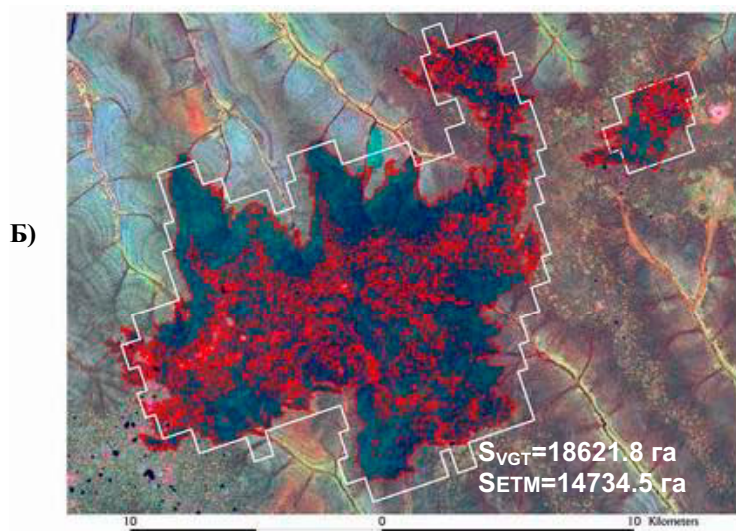
Полученные результаты валидации позволяют оценить уровень точности определения площадей индивидуальных поврежденных пожарами участков, выявляемых по данным SPOT-Vegetation, что является одним из важнейших аспектов дальнейшего практического использования разработанных информационных продуктов, в том числе в интересах службы авиационной охраны лесов от пожаров. Вместе с тем, необходимы дальнейшие исследования, которые позволили бы оценить уровень точности метода при картографировании повреждений в других типах наземных экосистем, в частности на территориях с преобладанием травяной и кустарниковой растительности. В дальнейших работах также необходимо рассмотреть вопросы оценки точности метода с точки зрения возможных пропусков детектирования поврежденных участков или их ошибочного детектирования, что требует применения иной методологии исследований и других подходов к сбору опорных данных. В частности актуальной задачей представляется получение оценок площадей участков повреждений, не выявляемых по данным SPOT-Vegetation ввиду относительно небольшого размера или невысокой степени повреждения.

Литература

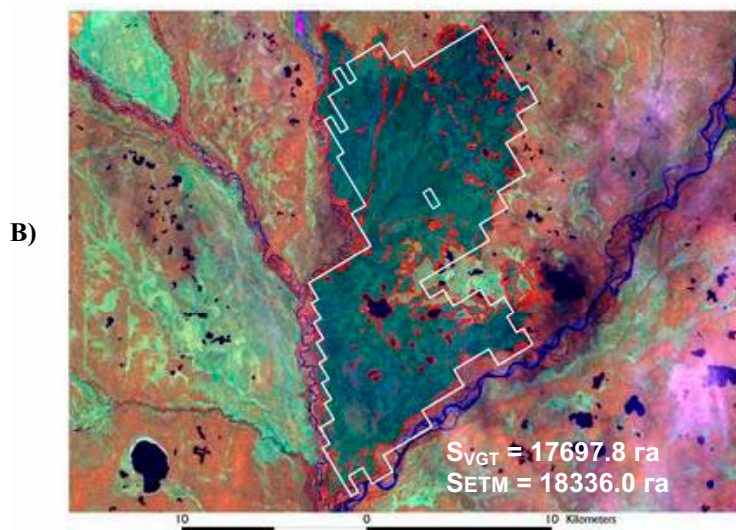
1. Егоров В.А., Барталев С.А., Лулян Е.А. Алгоритм детектирования и оценки площадей повреждённой пожарами растительности по данным SPOT-Vegetation // *Геоинформатика. В сб. международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАуК, Москва, 2004, 199-204 с.*
2. Егоров В.А., Барталев С.А. Анализ временных серий спутниковых данных SPOT-Vegetation для детектирования повреждённой пожарами растительности Северной Евразии // *Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004г. (настоящий сборник)*
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Лулян Е.А., Уваров И.А. Оценка площадей повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000–2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation // *Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004г. (настоящий сборник)*
4. Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J. and Baret, F., 2000. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 3383 – 3390.
5. Morisette, J., C. Justice, J. Pereira, J.M. Grégoire, and P. Frost, 2001. Report from the GOFC - Fire: Satellite Product Validation Workshop *The Earth Observer*, September/October, v. 13, n. 5, p. 15-18.
6. Boschetti L., S. Flasse, S. Trigg, P. A. Brivio, and M. Maggi, 2001. A methodology for the validation of low resolution remotely sensed data products, In proceedings of 4th ASITA conference, Vol. 1, pp. 293-298, Rimini 9-12 October 2001.
7. Boschetti, L., Eva, H., Brivio, P.A. and Gallego, J., 2004. The validation protocol of GBA2000 global burned area maps IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing, session Land Degradation and Fires, Anchorage, 20-24 September 2004, volume III: 2107-2110.
8. Muchoney, D., Strahler, A., Hodges, J., and LoCastro J., 1999. The IGBP DISCover Confidence Sites and the System for Terrestrial Ecosystem Parameterization: Tools for Validating Global Land-Cover Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, pp. 1061-1067.
9. Scepan, J., 1999. "Thematic validation of high-resolution global land-cover data sets." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65: 1051-1060.
10. Stehman, S. V., 2000. "Practical implications of design-based sampling inference for thematic map accuracy assessment." *Remote Sensing of Environment* 72,35-45.
11. Woodcock, C. E., and Gopal, S., 2000, Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 153–172.
12. Zhang Y.-H., M.J. Wooster, O. Tutubalina, G.L.W. Perry, 2003, Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 87, Issue 1, pp. 1–15



Заболоченные смешанные леса в центральной части Сахалинской области, поврежденные пожарами в период с мая по июнь 2002 года. Оценка площади повреждений по данным SPOT-Vegetation существенно занижена ввиду высокого уровня изрезанности границ поврежденного участка.

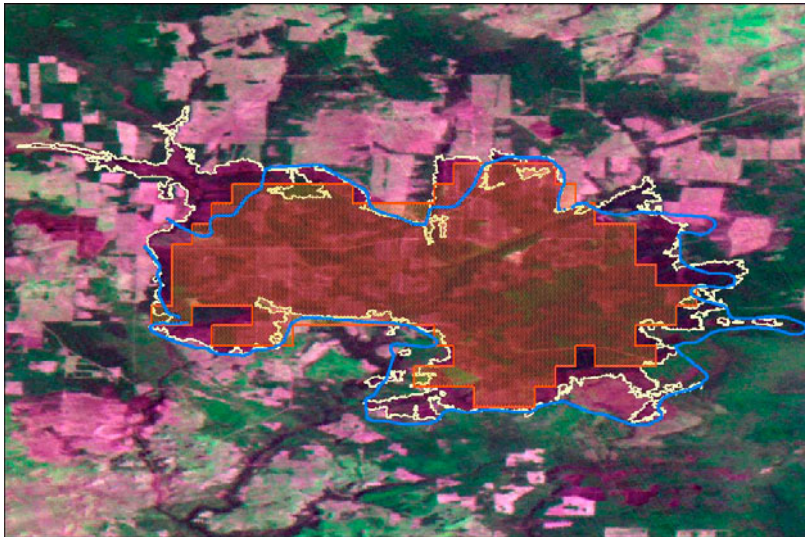


Тундра на севере республики Саха, поврежденная пожарами в период с июля по август 2001 года. Оценка площади повреждений по данным SPOT-Vegetation существенно завышена за счет многочисленных небольшого размера озер и болот внутри поврежденного участка.

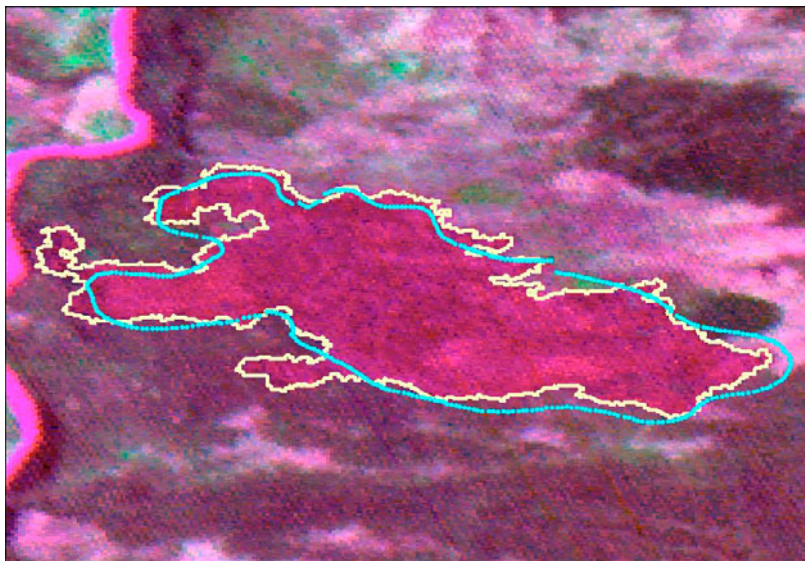


Лиственничное насаждение в центральной части республики Саха, поврежденное пожарами в период с июля по август 2001 года. Пример хорошего совпадения оценок площади повреждений по данным SPOT-Vegetation и результатам анализа изображений Landsat-ETM+.

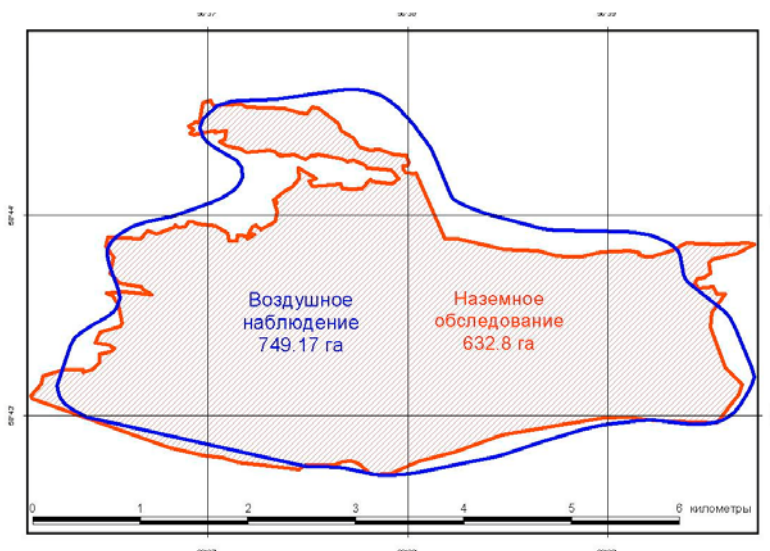
Рис. 2. Примеры выделения границ поврежденных пожарами участков в различных типах наземных экосистем по результатам обработки данных SPOT-Vegetation (белые контуры) изображений Landsat-ETM+ (красные контуры)



Сравнение результатов выявления границ лесной гари по данным SPOT-Vegetation (красный контур, площадь - 9834,6 га), изображению Метеор-3М/МСУ-Э (желтый контур, площадь - 12023,1 га) и результатам авиационного облета (синий контур, площадь - 12649,2 га).



Сравнение результатов выявления границ лесной гари по изображению Метеор-3М/МСУ-Э (желтый контур, площадь - 1252,8 га) и результатам авиационного облета (синий контур, площадь - 1236,4 га).



Сравнение результатов выявления границ лесной гари по результатам авиационного облета (синий контур, площадь - 749,2 га) и наземного обхода (красный контур, площадь - 632,8 га).

Рис. 3. Сравнение контуров и оценок площади участков лесных гарей в Красноярском крае по данным спутниковых, самолетных и наземных наблюдений

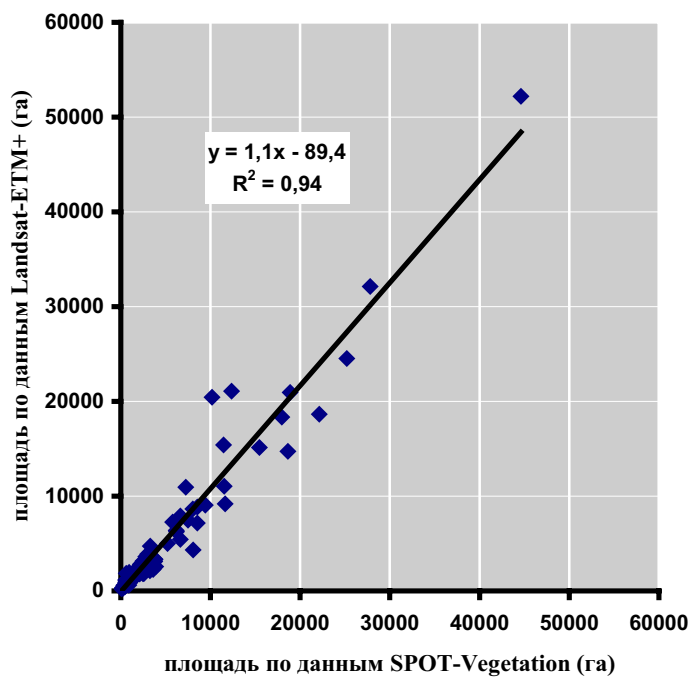


Рис. 4. Линейная регрессионная связь данных о площадях поврежденных пожарами участков по результатам анализа спутниковых изображений SPOT-Vegetation и Landsat-ETM+

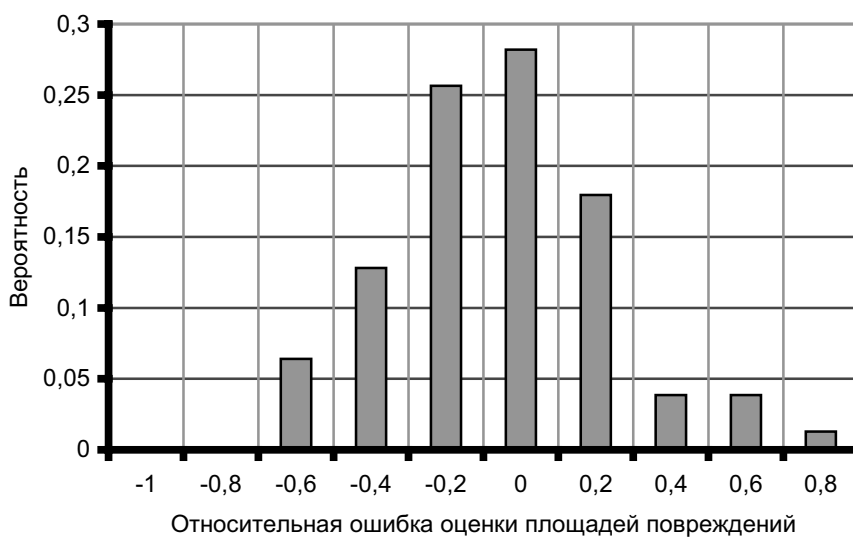


Рис. 5. Гистограмма распределения вероятностей значений относительной ошибки при оценке площадей поврежденных пожарами участков

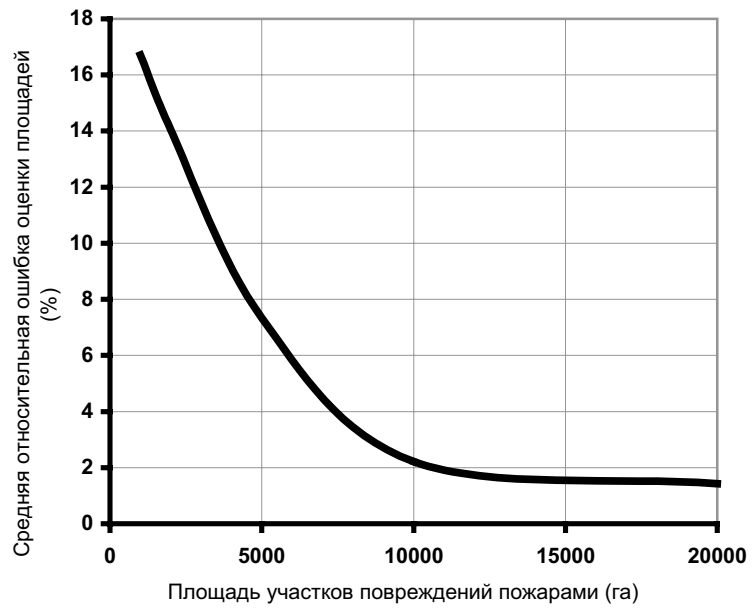


Рис. 6. Зависимость средней относительной ошибки оценки площадей повреждений по данным SPOT-Vegetation от размеров поврежденных пожарами участков