

На правах рукописи

УДК 528.8

Егоров Вячеслав Александрович

**МОНИТОРИНГ ПОВРЕЖДЕНИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО
ПОКРОВА СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПОЖАРАМИ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

25.00.34 - Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2006

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Барталев Сергей Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, проф.
Малинников Василий Александрович

кандидат географических наук,
Тутубалина Ольга Валерьевна

Ведущая организация: Центр по проблемам экологии и продуктивности
лесов РАН

Защита диссертации состоится « 5 » октября 2006 года в 10 час. на заседании диссертационного совета Д.212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, К-64, Гороховский пер., 4 (ауд. 321).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан « 4 » сентября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Краснопевцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Состояние и динамика бореальных экосистем в настоящее время являются предметом пристального внимания ученых и международных политических институтов в связи с их важнейшим экологическим и ресурсным значением, необходимостью сохранения биологического разнообразия, а также исследованиями в области глобальных изменений климата. Огонь является одним из наиболее мощных естественных факторов воздействия на бореальные экосистемы и сопровождается проявлением последствий экологического, социального и экономического характера. Пожары, как важнейший лесообразовательный фактор, в значительной мере определяют состав, структуру и динамику лесов бореальной зоны. В то же время они оказывают разрушительное воздействие на растительность, органический слой почвы и фауну, создают условия для проявления вспышек массового размножения насекомых вредителей, изменяют гидрологический режим грунтов, уничтожают материальные и культурные ценности, загрязняют атмосферу продуктами сгорания. Наличие возможностей оценки последствий пожаров является одним из необходимых условий устойчивого управления лесными ресурсами, охраны окружающей среды, поддержания видового разнообразия, а также понимания причин, прогноза динамики и принятия мер по смягчению возможных последствий изменяющегося климата. Регулярная оценка пройденных огнем площадей в России выполняется службой охраны лесов от пожаров на примерно 2/3 территории лесного фонда, главным образом методом визуальных авиационных и наземных наблюдений. При этом наблюдения за воздействием пожаров на другие типы экосистем (тундра, степи и др.) практически не проводятся, или проводятся на очень ограниченных территориях. В этой связи особый интерес для получения связанных с воздействием огня оценок представляет использование данных спутниковых наблюдений, не имеющее в настоящее время реальной альтернативы в условиях необходимости обеспечения регулярных обследований больших территорий. К преимуществам использования спутниковых данных можно отнести и территориально-временную однородность получаемых оценок, не зависящих от политико-административного деления территории и изменения социально-экономических условий, что является необходимым условием информационного обеспечения научных исследований и

реализации международных соглашений в области охраны окружающей среды и изменений климата. Создание методов и автоматизированных технологий мониторинга по спутниковым данным поврежденных пожарами площадей позволяет существенно расширить контролируемую территорию, а также повысить периодичность и оперативность получения данных о воздействии пожаров, точность определения размеров пройденной огнем площади, оценок экономического ущерба и экологических последствий.

Цель и задачи исследования. Целью проведенных исследований являлось развитие методов и автоматических технологий использования данных спутниковых наблюдений для решения задач мониторинга повреждений бореальных экосистем пожарами. Для достижения указанной цели были решены следующие научные задачи:

- на основе комбинированного использования временных серий спутниковых данных SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS разработан метод выявления поврежденной пожарами растительности бореальных экосистем;
- с использованием разработанного метода сформирован банк данных о повреждениях растительного покрова Северной Евразии пожарами в интересах решения широкого спектра научных и прикладных задач;
- на основе опорной информации из независимых источников выполнена валидация, позволившая оценить точность разработанного метода и сформированных информационных продуктов о повреждениях пожарами экосистем Северной Евразии;
- проведена интеграция автоматической технологии выявления поврежденной огнем растительности в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров в интересах Федерального агентства лесного хозяйства МПР РФ.

Научная новизна работы и защищаемые положения.

1. Разработан новый метод выявления участков поврежденной пожарами растительности по временным сериям спутниковых данных низкого пространственного разрешения, основанный на использовании комбинации спектрально-отражательных и температурных признаков поверхности.

2. Создана автоматическая система выявления пройденных пожарами площадей на основе комбинации временных серий данных спутниковых наблюдений SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS.
3. Впервые создан постоянно обновляемый банк многолетних данных о повреждениях бореальных экосистем Северной Евразии пожарами, а также получены с его использованием уникальные данные о масштабах и сезонной динамике горения для различных типов растительного покрова.
4. Проведена интеграция технологии в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров, разработанную в интересах Федерального агентства лесного хозяйства МПР РФ.

Практическая значимость. Разработанный автором метод выявления повреждений растительности пожарами по данным спутниковых наблюдений позволил создать автоматическую информационную технологию, обеспечивающую получение оценок пройденных огнем площадей на регулярной основе, что, в свою очередь, дало возможность сформировать банк данных долгосрочных наблюдений за воздействием пожаров на наземные экосистемы Северной Евразии. Созданная технология мониторинга поврежденной растительности огнем используется в оперативном режиме в составе Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров в интересах Федерального агентства лесного хозяйства Министерства природных ресурсов РФ. Полученные автором результаты были использованы при выполнении научных проектов, поддержанных Российским Фондом Фундаментальных Исследований, программами Европейской комиссии и Европейского космического агентства.

Постоянно обновляемый банк данных о повреждениях растительного покрова Северной Евразии пожарами находит использование при проведении исследований, связанных с глобальными изменениями климата, в частности, для оценки объемов эмиссий парниковых газов в атмосферу, что позволяет его рассматривать в качестве элемента информационного обеспечения реализации Киотского протокола к Рамочной Конвенции ООН по изменению климата.

Апробация. Основные положения диссертации и полученные результаты доложены на 9 международных и российских симпозиумах, конференциях, семинарах

и совещаниях в Москве, Санкт-Петербурге, Красноярске, Петрозаводске, Италии (Испра), Канаде (Монреаль).

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано 10 печатных работ по теме диссертации в российских научных изданиях, сборниках докладов симпозиумов и конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 125 страниц, включая 26 рисунков, 10 таблиц и 4 приложения.

Выражение признательности. Большую помощь и поддержку на всех этапах работы оказали научный руководитель, заведующий лабораторией ИКИ РАН к.т.н. С.А. Барталев и заместитель директора ИКИ РАН д.т.н. Е.А. Лупян. Автор выражает также искреннюю благодарность И.В. Уварову, В.О. Ильину, а также всем коллегам, помогавшим в подготовке данной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование необходимости развития методов спутникового мониторинга повреждений растительного покрова Северной Евразии пожарами с учетом необходимости решения прикладных задач и информационного обеспечения фундаментальных исследований в области глобальных изменений климата и биосферы, описание целей и задач работы, а также основных научных результатов, полученных автором при подготовке диссертационной работы.

Глава 1. Анализ возможностей использования данных спутниковых наблюдений для мониторинга пожаров. Анализ многолетних данных метеорологических наблюдений наглядно демонстрирует, что глобальное потепление климата наиболее существенно проявляется в бореальной зоне планеты, и, прежде всего, в Северной Евразии, что, в свою очередь, с высокой вероятностью обуславливает усиление пожарной активности в бореальных экосистемах и нарушенности экосистем пожарами. Северная Евразия обладает рядом уникальных экологических, климатических и социально-экономических особенностей и охватывает широкий

спектр биомов, таких как тундра, таежные и широколиственные леса, болота и степи, для которых пожары выступают неотъемлемым фактором динамики экосистем.

Неполный охват территории России системой авиационного и наземного мониторинга пожаров, а также отсутствие инструментальных методов контроля пройденных огнем площадей и оценки степени повреждения лесов приводит к тому, что данные официальной отчетности содержат значительные случайные и систематические ошибки. Это свидетельствует о необходимости разработки методов использования данных спутниковых наблюдений для мониторинга повреждений пожарами лесов и других типов растительного покрова, и в особенности на территориях, не контролируемых авиационными и наземными средствами наблюдения.

Техника дистанционного зондирования со спутников открывает практически безальтернативную возможность регулярного мониторинга последствий пожаров, и особенно, при получении глобальных оценок, а также оценок на уровне крупных регионов. Существующие спутниковые приборы, в частности, такие как SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS, позволяют реализовать преимущества дистанционных методов и создавать системы мониторинга поврежденных огнем экосистем. Эти возможности обусловлены не только техническими характеристиками указанных приборов, но и в не меньшей степени высоким уровнем доступности получаемых данных, включая эффективные системы удаленного доступа пользователей по сети Интернет.

Оптические характеристики очагов горения и поврежденной пожарами растительности создают необходимые физические предпосылки для выявления указанных участков с использованием приборов дистанционного зондирования, регистрирующих отраженное поверхностью излучение в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах. Возможности использования спутниковых данных для выявления повреждений лесов пожарами начинали исследоваться еще в 70-х и 80-х годах прошлого столетия. Эти исследования получили импульс развития с появлением спутникового радиометра NOAA-AVHRR, что объясняется хорошо выбранными для мониторинга активных пожаров спектральными каналами, а также возможностью ежедневных глобальных наблюдений. Исследования были направлены на разработку методов детектирования пожаров по аномально высоким значениям

температуры, а также на выявление участков повреждений на основе спектральных признаков, в частности, индекса NDVI. В некоторых работах был применен комбинированный подход, когда результаты выявления по спектральным признакам повреждений растительности объединялись с данными детектирования температурных аномалий с целью повышения достоверности получаемых результатов.

Результаты многочисленных исследований демонстрируют, что для выявления по спутниковым данным поврежденной огнем растительности наиболее эффективным является комбинация данных наблюдений в каналах ближнего и среднего ИК диапазонов, как следствие их высокой чувствительности к изменениям концентрации хлорофилла и влагосодержания растительности после воздействия огня. Рассчитываемый на основе указанной комбинации спектральных каналов коротковолновый вегетационный индекс SWVI широко используется для изучения повреждений растительности огнем.

Полученные до настоящего времени с использованием спутниковых данных для территории Северной Евразии оценки масштабов повреждений пожарами, как правило, носят эпизодический характер. При этом полученные из различных источников оценки во многом противоречивы и не вполне согласуются между собой. Анализ имеющихся различий в опубликованных оценках показывает, что они могут быть объяснены различиями в характеристиках спутниковых приборов, методах анализа данных, охвате территории, принятых схем классификации типов наземных экосистем и источников вспомогательных данных. Вместе с тем, указанная несогласованность в оценках часто приводит к искаженным представлениям о масштабах воздействия пожаров на наземные экосистемы Северной Евразии, а также к тому, что в ряде исследований используются приблизительные экспертные оценки пройденных огнем площадей.

При анализе информационных продуктов, отражающих повреждения растительности пожарами, важно учитывать, наряду с возможностью получения достоверных интегральных оценок площадей, также и другие аспекты их использования. В частности, необходим анализ уровня достоверности оценок повреждений в различных типах экосистем, так как повреждения в различных типах растительного покрова могут выявляться с различной степенью точности. Кроме того

важной характеристикой информационных продуктов при анализе сезонной динамики развития повреждений является уровень их временного разрешения.

Анализ существующего опыта и систем мониторинга растительных пожаров создает необходимые предпосылки для разработки нового эффективного методологического подхода к оценке масштабов и динамики воздействия огня на наземные экосистемы с использованием временных серий данных спутниковых наблюдений.

Глава 2. Формирование банка данных спутниковых наблюдений и анализ спектрально-отражательных характеристик поврежденной огнем растительности. Необходимые технические предпосылки по получению данных дистанционного зондирования, удовлетворяющих по характеристикам требованиям мониторинга изменений растительности в глобальном и континентальном масштабе получили развитие с появлением спутниковой системы SPOT-Vegetation. Инструмент SPOT-Vegetation призван обеспечить глобальные непрерывные наблюдения за состоянием растительного покрова планеты, и имеет существенные преимущества для решения этой задачи по сравнению с такими, активно используемыми в аналогичных приложениях сенсорами, как NOAA-AVHRR и ERS-ATSR. Эти преимущества обусловлены, в частности, наличием оптимизированных для наблюдения растительности спектральных диапазонов, обеспечением точной радиометрической калибровки измерений, геометрической точностью получаемых изображений и высоким уровнем постоянства величины пространственного разрешения при изменении угла визирования.

Для проведения исследовательских в рамках диссертационной работы была сформирована база данных продуктов S10 SPOT-Vegetation, охватывающая регион Северной Евразии за период 1998-2005 годов, с дальнейшей перспективой ее дополнения вновь поступающими спутниковыми данными. Указанные продукты спутниковых данных формируются с использованием всех наблюдений за каждый десятидневный период путем селекции пикселей, соответствующих максимальному значению NDVI, что позволяет синтезировать изображения с редуцированным влиянием облачности. Ввиду применения атмосферной коррекции при формировании продуктов S10, значения пикселей изображений характеризуются величиной

спектральной яркости, приведенной к уровню верхней границы атмосферы. Данные продуктов S10 содержат также информацию о дате и времени наблюдения, а также геометрических условиях солнечного освещения и наблюдения.

В качестве источника дополнительной информации использовались результаты детектирования активных пожаров по температурным аномалиям с использованием спутниковых изображений Terra/Aqua-MODIS, а именно стандартные продукты MOD14 (версия алгоритма 4.0). Для проведения экспериментальных работ была создана база подекадно агрегированных данных о температурных аномалиях, согласованных по пространственному разрешению и времени наблюдения с продуктами S10 SPOT-Vegetation.

Сформированный банк спутниковых данных на территорию Северной Евразии охватывает период 1998-2005 годов и, в настоящее время, существует возможность его регулярного пополнения. Огромный объем спутниковых данных, сложность их структуры, а также особенности разработанных алгоритмов предварительной и тематической обработки данных многолетних наблюдений, потребовали поиска механизмов эффективного управления сформированным банком данных. Для создания систем хранения спутниковых данных, позволяющих решать широкий спектр задач, в ИКИ РАН была разработана общая архитектура построения автоматизированных систем хранения спутниковых данных (СХСД). В рамках указанной архитектуры основные задачи решаются на основе использования базовых программных компонент: системы ведения архивов, системы администрирования архивами, системы доступа к данным на основе WEB-интерфейсов, системы контроля функционирования СХСД, поддержка хранения спутниковых данных, обеспечение доступа к спутниковым данным.

Анализ спектральных отражательных характеристик различных типов растительности, измеренных с использованием прибора SPOT-Vegetation, проводился для оценки информационной эффективности указанных данных в сравнении с, широко используемыми в исследованиях по глобальному мониторингу растительности, данными радиометра NOAA-AVHRR. По результатам выполненного анализа делимости основных типов наземных экосистем и лесных насаждений различных пород можно сделать следующие выводы о том, что в большинстве случаев данные измерений SPOT-Vegetation демонстрируют более высокий уровень

разделимости типов наземного покрова по сравнению с данными NOAA-AVHRR, а также о том, что наличие среднего ИК канала позволяет обеспечить более высокий уровень делимости типов наземного покрова при классификации насаждений поврежденных пожарами и водных объектов.

Поскольку уровень детектируемости участков повреждений зависят от фенологического состояния растительного покрова и его спектрально-отражательных свойств, возможности выявления поврежденных огнем участков не одинаковы в различных типах экосистем в различные сезоны года. Проведенные исследования позволили количественно оценить эти различия при использовании данных SPOT-Vegetation для выявления поврежденных огнем участков в различных типах лесных насаждений. На основе имеющихся карт лесов по данным SPOT-Vegetation была исследована фенологическая динамика спектрально-временных характеристик различных типов леса (лиственница, ель, дуб, берёза и сосна) в сравнении со спектральными сигнатурами поврежденных в различной степени пожарами лесов.

Представления об уровне делимости различных типов наземного покрова в пространстве спектральных яркостей по данным SPOT-Vegetation могут быть получены на основе эллипсов рассеяния яркости в двумерном пространстве наиболее информативных для изучения растительности спектральных каналов (рис. 1). Было установлено, что в летний период спектрально яркостные различия поврежденной огнем и здоровой лесной растительности максимальны, однако ранней весной и осенью, указанные различия менее отчетливы, что особенно характерно для насаждений с преобладанием лиственницы и сосны.

Глава 3. Метод выявления поврежденных пожарами участков растительного покрова по данным спутниковых наблюдений. Анализ литературных источников, а также выполненные автором исследования, показали, что наилучшие по точности результаты обнаружения повреждений растительного покрова пожарами по спутниковым данным могут быть получены на основе подхода, комбинирующего детектирование участков, отражательные свойства которых претерпели характерные для воздействия огня изменения с поиском участков аномально высокой температуры. При этом детектирование повреждений по изменениям отражательных характеристик поверхности предполагает использование

временных серий спутниковых данных для поиска участков с характерными межгодовыми изменениями, на основе заданных критериев распознавания.

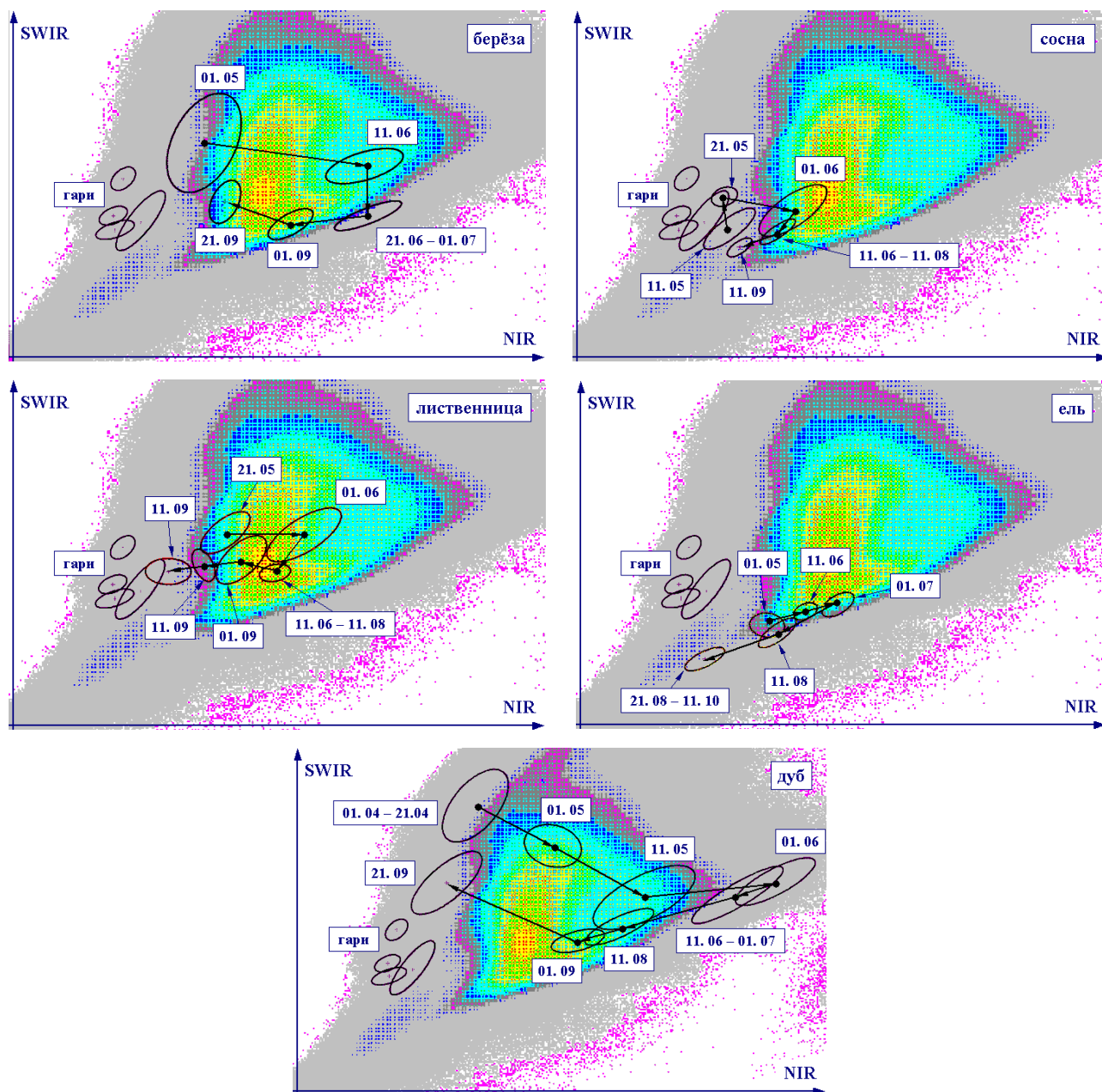


Рис. 1 Сезонная динамика спектральных сигнатур некоторых типов лесов в различных фазах фенологического состояния в сравнении с сигнатурами поврежденных пожарами участков.

Кроме того, результаты исследований также позволили прийти к выводу, что при разработке метода спутникового мониторинга пройденных огнем площадей необходимо учитывать, что возможности выявления поврежденных участков не одинаковы в различных типах экосистем в течение года, и определяются различиями

сезонной динамики спектрально-отражательных свойств растительности. При разработке алгоритмов необходимо также учитывать и тот факт, что наряду с пожарами к сходным изменениям спектрально-отражательных свойств растительного покрова может приводить воздействие и других возмущающих факторов, сопровождаемых угнетением или гибелью растительности, таких как, болезни, засухи, промышленные загрязнения, вспышки массового размножения насекомых фитофагов.

Основываясь на указанных предпосылках, автором был разработан метод выявления повреждений пожарами на основе комбинированного использования временных серий данных SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS, логическая схема которого представлена на рисунке 2.

К числу ограничений затрудняющих использование исходных продуктов спутниковых данных S10 SPOT-Vegetation для выявления пройденных огнем участков относится наличие помех в результате влияния облачности и их теней, сезонного покрытия поверхности снегом, а также аппаратурных дефектов. Выполнение этапа предварительной обработки данных направлено на формирование масок непригодных для тематического анализа пикселей. Алгоритм детектирования зашумленных пикселей предусматривает следующие шаги анализа данных:

- детектирование пикселей, соответствующих покрытой снегом поверхности;
- детектирование пикселей зашумленных в результате влияния облаков;
- детектирование пикселей, подверженных влиянию аппаратурных дефектов, а также остаточному влиянию облаков, теней и т.д.

При этом каждый последующий шаг использует только данные тех пикселей, которые не были определены, как зашумленные, на предыдущих этапах. Результат выявления покрытой снегом территории наряду с фильтрацией зашумленных данных спутниковых наблюдений позволяет также определить и временные границы пожароопасного сезона, что позволяет, снизить число ложно детектированных участков повреждений, а также избегать избыточной обработки данных для регионов покрытых снегом в период наблюдения.

Воздействие огня, в зависимости от интенсивности пожара и типов экосистемы, может приводить к гибели или изменению физиологических характеристик растительности, что, в частности, выражается в снижении

влажностности и концентрации хлорофилла в зеленых фракциях растений. При этом также изменяется и спектральное отражение поврежденных участков в диапазонах длин волн, в которых происходит наиболее интенсивное поглощение оптического излучения молекулами хлорофилла и воды, а именно в ближнем и среднем ИК спектральных диапазонах. Знание этих особенностей положено в основу использования спектрального вегетационного индекса SWVI, вычисляемого по данным соответствующих спектральных каналов SPOT-Vegetation по формуле:

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}},$$

где R_{nir} и R_{swir} – соответственно значения спектрального коэффициента яркости поверхности, измеренные в ближнем и среднем ИК каналах SPOT-Vegetation.

Полученные в результате предварительной обработки данные SPOT-Vegetation используются для вычислений согласно выражению значений SWVI для каждой декады наблюдений за двухлетний период, включающий год, для которого проводится выявление пройденных огнем площадей, а также год ему предшествующий. Для зашумленных наблюдений, выявленных на этапе предварительной обработки данных, производится восстановление значений SWVI методом линейной аппроксимации с использованием свободных от влияния мешающих факторов и ближайших во времени предшествующих и последующих наблюдений.

Выявление вызываемых пожарами изменений растительности требует учета ее естественной сезонной динамики и осуществляется с использованием межгодовых подекадных разностей DWI, вычисляемых для каждого пиксела с координатами (i, j) согласно выражению:

$$DWI^k(i, j, t, t^*) = SWVI^k(i, j, t) - SWVI^k(i, j, t^*),$$

где t - номер декады k -го года, а t^* - номер соответствующей декады $k-1$ года. Для компенсации влияния межгодовых фенологических различий на результаты детектирования повреждений в качестве t^* выбирается декада, соответствующая минимуму функции $DWI^k(i, j, t, t^*) \forall t^* = (t-1, t, t+1)$. Вычисление DWI производится для всех декад, в которые территория была свободна от снега в оба года наблюдений.

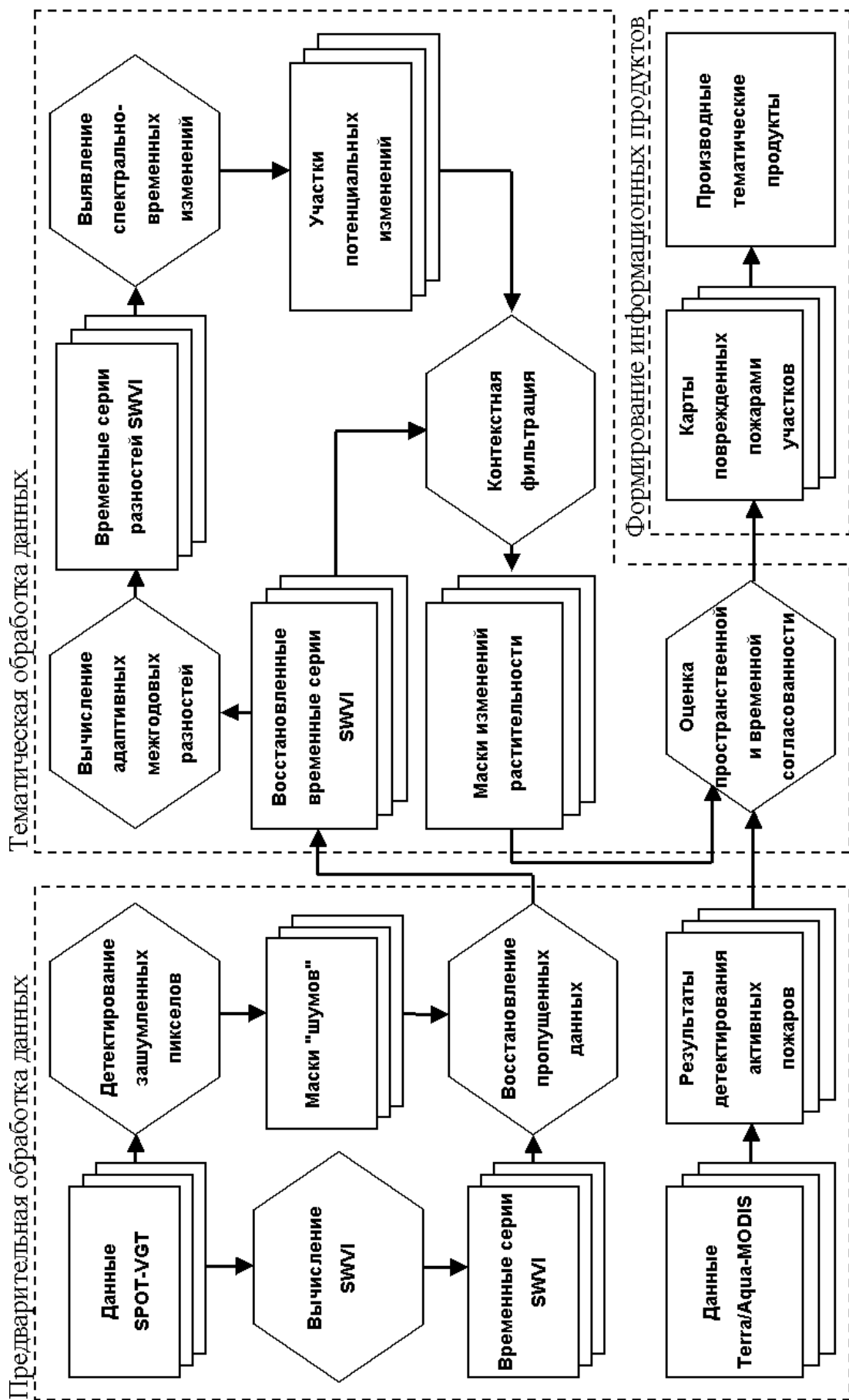


Рис. 2 Логическая схема метода выявления поврежденной пожарами растительности по спутниковым данным SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS

Связанные с воздействием огня различия в состоянии растительности в текущем и предыдущем годах могут выражаться в существенных отклонениях значений DWI от нуля в область отрицательных значений. Для выявления пикселей, соответствующих предполагаемым горям, в качестве первого приближения используется следующий критерий:

$$DWI^k(i, j, t, t^*) < P_1, \text{ где } P_1 = 0.08$$

После использования описанной пороговой процедуры, результаты детектирования содержат наряду с поврежденными пожарами участками также и пиксели, относящиеся к территориям, на которых появление отрицательных аномалий DWI вызвано другими причинами, например разливами рек, различиями в условиях наблюдения и т.д. Фильтрация этих участков осуществляется на основе анализа данных в окрестности каждого отдетектированного пикселя с использованием окна переменного размера. Окно должно содержать не менее пяти пикселей ближайшей окрестности, не включенных во множество пикселей предполагаемых повреждений. Значения SWVI указанных пикселей используются для подекадной оценки среднего M_{swvi} и стандартного отклонения σ_{swvi} окрестности. Пиксел относится к пройденным пожарами участкам, если соответствующее ему значение SWVI меньше чем $(M_{swvi} - \sigma_{swvi})$.

Для идентификации вызванных пожарами повреждений, предусматривается оценка пространственно-временной согласованности выявляемых по данным SPOT-Vegetation изменений с информацией об очагах горения по данным Terra/Aqua-MODIS. Для этого выявленные на предыдущих стадиях пиксели подекадно группируются в связные области, которые пространственно сопоставляются с тепловыми аномалиями текущей и предшествующей декад. Выявленный участок изменений считается поврежденным пожарами, если не менее одного процента его площади совпадает с пикселями тепловых аномалий.

В заключении идентификация типов поврежденных пожарами экосистем осуществлялась на основе использования базы данных Global Land Cover 2000.

Разработанный алгоритм выявления поврежденных пожарами участков с точки зрения обработки представляет собой многоступенчатую вычислительную задачу, оперирующими большими объемами многолетних временных рядов данных

спутниковых наблюдений. Эффективное решение такого рода задач на регулярной основе невозможно без создания системы автоматической обработки спутниковых данных. Для автоматизации обработки спутниковых данных был создан специализированный программный модуль с использованием разработанного в ИКИ РАН комплекса SPUTNIK. Интегрированный в систему SPUTNIK специализированный программный модуль обеспечивает осуществление цикла специальной обработки данных, в то время как базовый программный комплекс отвечает за организацию их поступления, хранения и представления.

Разработанный автором метод открывает возможности мониторинга поврежденной огнем растительности на основе использования временных серий данных спутниковых наблюдений. В результате его использования могут быть получены данные, необходимые для оценки пройденных огнем площадей, восстановления динамики распространения пожаров и определения продолжительности пожароопасных сезонов, как важной характеристики климатических изменений. Реализация метода в виде технологии обеспечивает возможность получения оценок на регулярной основе и создания банка данных долгосрочных наблюдений за воздействием пожаров на растительный покров бореальных экосистем.

Глава 4. Анализ полученных результатов и интеграция разработанного метода в информационную систему мониторинга лесных пожаров России. Сформированная по результатам обработки спутниковых изображений база данных о повреждениях растительного покрова Северной Евразии в настоящее время охватывает период 2000-2005 годов. Пространственное разрешение базы данных составляет примерно 1 км, а временная дискретность – десять дней. База данных доступна для пользователей в виде набора растровых файлов различных форматов с тем, чтобы обеспечить высокий уровень гибкости в выборе программного обеспечения для анализа данных. Внешний доступ пользователей Интернет к базе данных осуществляться через web-сайт информационной системы TerraNorte по адресу <http://terranorte.iki.rssi.ru> с использованием специально разработанных инструментов, предоставляющих широкие возможности осуществления выборки данных с представлением результатов в табличной

или графической форме. Интегральные данные о площадях повреждений пожарами для стран и политико-административных регионов Северной Евразии, полученные с использованием разработанной базы данных, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Площади повреждений бореальных экосистем пожарами в странах Северной Евразии по спутниковым данным (тыс. га)¹

Страны	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Среднее	СКО
Россия	4629,35	5632,46	8278,8	34528,0	2269,9	6890,7	10371,5	12009,2
	2484,42	2757,36	5772,4	22437,1	899,9	1338,9	5948,3	8256,2
Белоруссия	45,7	0,2	614,1	115,7	1,0	3,55	130,0	241,3
	26,5	0,0	283,6	39,5	0,3	0,06	58,3	111,6
Казахстан	2296,62	3110,50	2614,9	4371,5	3132,4	3224,2	3125,0	708,6
	63,99	1,62	6,1	11,6	19,1	3,6	17,7	23,6
Латвия	0,1	0,0	19,0	3,4	0,0	0,3	3,8	7,6
	0,1	0,0	12,5	3,1	0,0	0,0	2,6	5,0
Литва	0,3	0,0	47,7	3,4	0,0	1,5	8,8	19,1
	0,3	0,0	31,8	0,3	0,0	0,1	5,4	12,9
Монголия	741,8	157,5	520,7	836,1	490,9	133,2	480,0	290,3
	124,8	27,1	115,2	71,2	18,9	7,8	60,8	50,7
Норвегия	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,2	0,5
	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,1	0,3
Украина	258,8	30,4	253,8	129,5	30,4	1810,1	418,8	689,0
	16,2	1,9	77,3	32,6	2,0	7,8	23,0	29,0
Финляндия	0,0	0,0	0,0	0,6	0,8	0,1	0,3	0,4
	0,0	0,0	0,0	0,5	0,7	0,0	0,2	0,3
Швеция	0,7	0,0	0,1	1,4	0,1	0,1	0,4	0,6
	0,7	0,0	0,1	1,4	0,1	0,05	0,4	0,6
Эстония	4,7	0,0	0,6	4,0	0,0	0,0	1,6	2,2
	2,8	0,0	0,6	2,7	0,0	0,0	1,0	1,4

Анализ оценок площадей поврежденной пожарами в 2000-2005 годах позволяет, в частности, сделать следующие заключения для территории Северной Евразии:

- повреждения пожарами варьируют, как по масштабам, так и по географической приуроченности. За период наблюдений наименьшие ($8808,0 \cdot 10^3$ га) и наибольшие ($41657,1 \cdot 10^3$ га) повреждения произошли соответственно в 2000 и 2003 годах;
- наибольшие повреждения претерпевают лесные и травяные экосистемы. Площадь их повреждений превышает повреждения во всех других типах экосистем, а совокупная доля составляет 88-91% суммарной площади поврежденных экосистем. При этом

¹ В таблице верхнее значение относится к общей площади повреждений, а нижнее к повреждениям лесов.

соотношение между площадями повреждений лесов и травяного покрова от года к году существенно варьирует;

- при рассмотрении лесных экосистем, наибольшие повреждения выявлены в лиственных лесах, на долю которых приходится от 65%-78% площади поврежденных пожарами лесов;
- наибольшая доля повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами приходится на территорию России и составляет 60-83%, а при рассмотрении только лесов эта доля возрастает до 91-97%.

Анализ сезонной динамики пройденных огнем площадей позволяет также судить о периодах максимального воздействия пожаров и продолжительности пожарных сезонов различных лет в экосистемах различных типов, а также оценивать соотношение масштабов повреждений в различные годы.

Оценка точности метода выявления поврежденной пожарами растительности относится к числу важнейших составляющих исследований. Необходимые для этого опорные данные были получены по спутниковым изображениям высокого разрешения, а также по результатам авиационных и наземных обследований. Репрезентативный набор опорных данных был сформирован автором с использованием изображений Landsat-ETM+ и Метеор-3М/МСУ-Э, пространственное разрешение которых многократно превышает разрешение изображений SPOT-Vegetation. Набор изображений Landsat-ETM+ включал в себя 31 сцену, полученную в 2001-2002 годах для различных регионов России, что позволило выбрать 78 опорных участков. Общая площадь повреждений на опорных участках составила 468 тыс. га, что позволяет рассматривать выборку как репрезентативную. Совместно с ФГУ «Авиалесоохрана» в Красноярском крае были проведены авиационные и наземные измерения контуров гарей 2003 и 2004 годов с использованием GPS.

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. 3). Регрессионное уравнение $S_{ETM}=1.1S_{VGT}-89.4$ ($\forall S_{VGT}\geq 81,3$ га) позволяет оценить порог чувствительности метода выявления поврежденной пожарами растительности. Из указанного уравнения следует, что участки повреждений площадью ниже 89,4 га не могут быть выявлены с использованием данного метода.

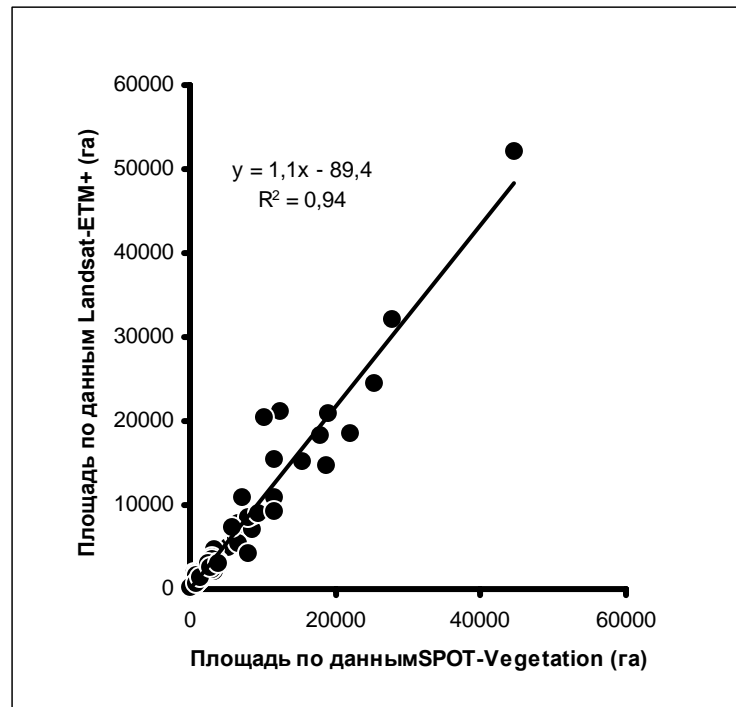


Рис. 3 Сравнение площадей поврежденных пожарами участков по данным SPOT-Vegetation и Landsat-ETM+

Статистический анализ различий между данными опорной и контрольной выборок позволяет оценить точность разработанного метода. Из гистограммы относительных ошибок площадей повреждений (рис. 4), следует, что с высоким уровнем достоверности в качестве распределения вероятностей ошибок может быть принято нормальное распределение. Средняя относительная ошибка составляет -8,7%, величина и знак которой свидетельствует о наличии незначительного систематического занижения площадей повреждений, измеряемых с использованием разработанного метода.

Представленный на рисунке 5 график демонстрирует снижение величины относительной ошибки оценки площадей повреждений по мере роста размеров участков, из которого следует, что, достигая 17% для участков меньших по площади 1000 га, ошибка снижается до уровня 2% для участков площадью от 5000 до 10000 га. Средняя

разница оценок площадей в сравнении с данными авиаоблетов, составила 11%, а отклонения по отдельным участкам лежали в интервале от -13,6% до +10,4%.

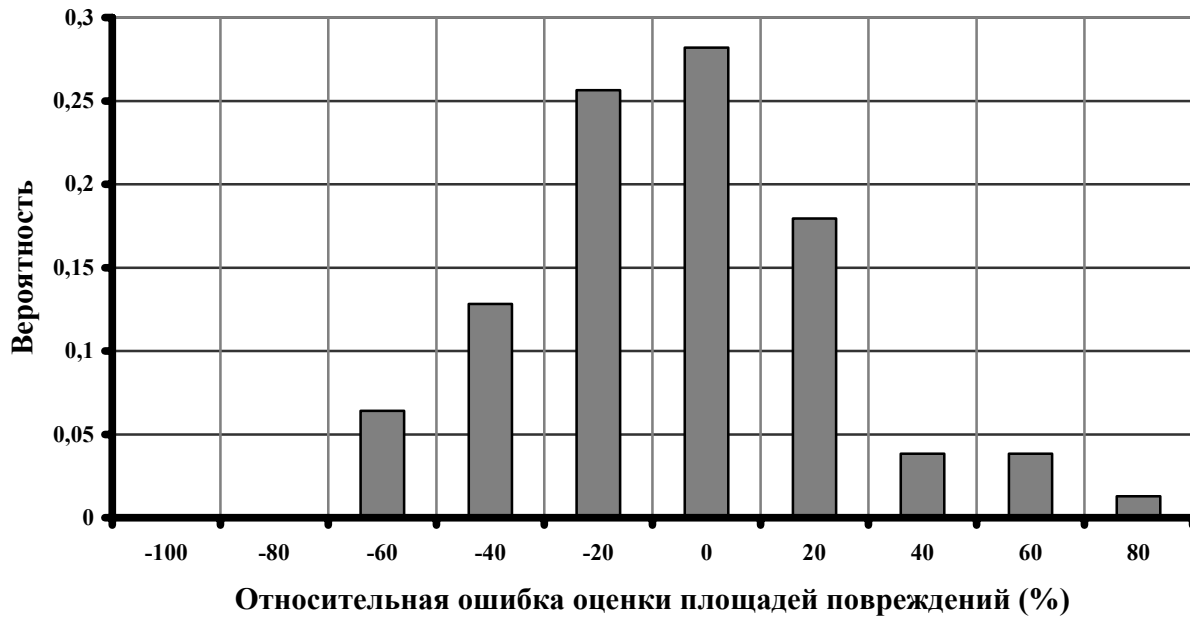


Рис. 4 Гистограмма распределения вероятностей значений относительной ошибки при оценке площадей поврежденных пожарами участков

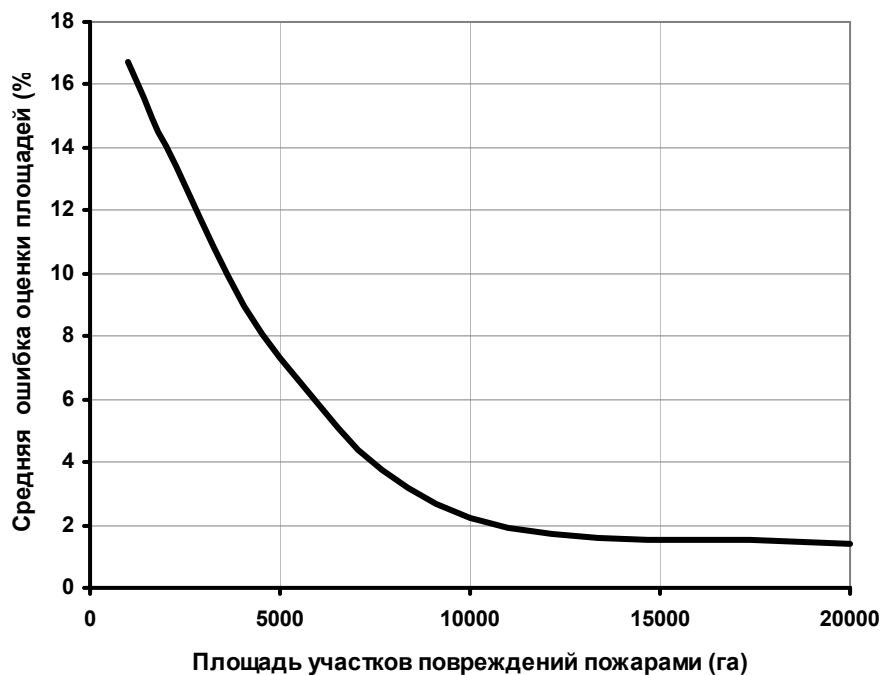


Рис. 5 Зависимость средней относительной ошибки оценки площадей повреждений по данным SPOT-Vegetation от размеров участков

Разработанный автором метод выявления повреждений растительности пожарами, основанный на использовании комбинации спектрально-отражательных и температурных признаков поверхности, позволил создать информационную технологию, обеспечивающую получение оценок пройденных огнем площадей на регулярной основе. Это дало возможность сформировать обновляемый банк данных долгосрочных наблюдений за воздействием пожаров на наземные экосистемы Северной Евразии. Технология выявления поврежденной огнем растительности интегрирована в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров ФГУ «Авиалесоохрана» Министерства природных ресурсов РФ и используется в производственном режиме.

Заключение. Представленная диссертационная работа содержит результаты исследований и научных разработок автора, которые можно рассматривать как решение научной проблемы и развитие методов мониторинга повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений. Полученные автором результаты нашли широкое использование в практике охраны лесов от пожаров, а также при выполнении научных проектов по оценке ресурсно-экологической роли лесов России и исследованиях в области глобальных изменений климата и биосферы.

Разработанный метод выявления повреждений растительности пожарами по данным спутниковых наблюдений позволяет регулярно выявлять пройденные огнем площади. Информационная технология обеспечивает получение оценок пройденных огнем площадей растительного покрова бореальных экосистем. Независимая валидация, проведенная с использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения продемонстрировала возможность получения площадей повреждений лесов с точностью достаточной для их использования в практике лесного хозяйства.

Результаты диссертационной работы впервые позволили получить многолетние данные для объективного изучения пространственно-временных характеристик повреждений растительности огнем в регионе Северной Евразии при подекадной частоте наблюдений, что позволяет исследовать сезонную динамику горения в различных типах наземных экосистем.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А. Синтез улучшенных сезонных изображений Северной Евразии для картографирования и мониторинга динамики растительности по данным SPOT-Vegetation. // Солнечно-земная физика. Выпуск 5 (118), Главный редактор: академик РАН Г.А. Жеребцов, Новосибирск, Издательство СО РАН, 2004 - С. 12-14.
2. Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А. Алгоритм детектирования и оценки площадей повреждённой пожарами растительности по данным SPOT-Vegetation. // Геоинформатика. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК, Москва, 2004 - С. 199-204.
3. Егоров В.А., Барталев С.А. Метод детектирования и оценки площадей повреждённой пожарами растительности по данным SPOT-Vegetation // Сборник тезисов докладов конференции «Исследования космического пространства в интересах фундаментальных наук», Москва, ИКИ РАН, 2004 - С. 13.
4. Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Флитман Е.В. Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV_SAT, // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов, ИКИ РАН, Сборник научных статей, Научные редакторы: д.т.н. Е.А. Лупян, к.ф.-м.н. О.Ю. Лаврова, Москва, Полиграф сервис, 2004 – С. 431-436.
5. Егоров В.А., Барталев С.А. Анализ временных серий спутниковых данных SPOT-Vegetation для детектирования повреждённой пожарами растительности Северной Евразии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов, ИКИ РАН, Сборник научных статей, Научные редакторы: д.т.н. Е.А. Лупян, к.ф.-м.н. О.Ю. Лаврова, Том II, Москва, «GRANP polygraph», 2005 - С. 380-387.
6. Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей,

- поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга SPOT-Vegetation. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов, ИКИ РАН, Сборник научных статей, Научные редакторы: д.т.н. Е.А. Лупян, к.ф.-м.н. О.Ю. Лаврова, Том II, Москва, «GRANP polygraph», 2005 - С. 343-353.
7. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Оценка площади повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000-2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов, ИКИ РАН, Сборник научных статей, Научные редакторы: д.т.н. Е.А. Лупян, к.ф.-м.н. О.Ю. Лаврова, Том II, Москва, «GRANP polygraph», 2005 - С. 354-366.
 8. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Картографирование повреждений пожарами бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сборник тезисов докладов. 31я Конференция по глобальному мониторингу для устойчивого развития и безопасности ISRSE., Санкт-Петербург, 2005, CD-ROM.
 9. Барталев С.А., Егоров В.А., Курятникова Т.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Методы и результаты использования данных спутниковых наблюдений для оценки воздействия пожаров и вырубок на леса России. // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии: Материалы Всероссийского совещания-семинара с международным участием, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Научный редактор: академик РАН А.С. Исаев, Красноярск, 2005 – С. 23-27.
 10. Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, МИИГАиК, Главный редактор: д.т.н. Савиных В.П., Вып.2., Москва, 2006, - С. 98-109.