

УДК 528.8

На правах рукописи

БАРТАЛЕВ Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И
ДИНАМИКИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук

Официальные оппоненты: Член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Чернявский Григорий Маркелович

Доктор технических наук
Кузнецов Алексей Евгеньевич

Доктор технических наук
Копылов Василий Николаевич

Ведущая организация:

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

Защита диссертации состоится 20 сентября 2007 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.113.01 в Институте космических исследований РАН по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований РАН.

Автореферат разослан «___» августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.113.01

Акимов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов леса имеют глобальное экологическое, экономическое и социальное значение. Обеспеченность информацией о состоянии и динамике лесов планеты все еще остается недостаточной и не отвечает современным требованиям устойчивого управления лесными ресурсами, охраны окружающей среды и исследований в области глобальных изменений биосферы и климата.

Необходимость осуществления мониторинга лесов на огромных территориях, особенности природно-географических условий и недостаточное развитие инфраструктуры ряда регионов побуждают рассматривать дистанционные, и в особенности спутниковые, наблюдения в качестве приоритетного источника информации о состоянии и динамике лесов, что определяет актуальность развития соответствующих методов обработки получаемых данных. Использование методов дистанционного зондирования обеспечивает практически недостижимое другими существующими средствами повышение уровня достоверности, оперативности и регулярности измерения ключевых характеристик состояния и динамики лесного покрова. Основу разрабатываемых методов обработки данных дистанционного зондирования составляют теоретически и экспериментально устанавливаемые взаимосвязи между измеряемыми спутниковыми приборами спектрально-энергетическими параметрами отраженного или собственного излучения наблюдаемой поверхности и структурными, физиологическими, биофизическими и другими характеристиками лесов.

Цель и задачи исследований. Целью проведенных исследований являлась разработка новых методов обработки данных спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне электромагнитного спектра для решения широкого круга задач мониторинга лесов. Достижение данной цели потребовало решения следующих задач:

- обоснование приоритетных направлений развития методов оценки состояния и динамики лесов по данным спутниковых наблюдений на основе анализа современных задач мониторинга лесных экосистем и технических средств дистанционного зондирования;

- проведение комплексных экспериментальных исследований информационных возможностей современных спутниковых приборов дистанционного зондирования;
- разработка новых признаков распознавания различных типов лесных экосистем и ассоциированных с ними объектов и явлений на основе использования временных серий данных спутниковых наблюдений;
- разработка комплекса автоматизированных и автоматических методов обработки данных спутниковых наблюдений для решения задач картографирования, оценки состояния и динамики лесов;
- разработка информационной системы для обеспечения эффективного доступа к результатам спутникового мониторинга лесов на различных уровнях пространственной дифференциации.

Методы исследований. В работе использованы методы контроля состояния природной среды с помощью оптико-электронных систем дистанционного зондирования, методы распознавания образов и обработки изображений, математического моделирования, анализа временных серий данных, математической статистики, геоинформатики, системного и прикладного программирования.

Научная новизна работы. В работе предложена отвечающая современным требованиям структура системы дистанционного мониторинга лесов и обоснован состав измеряемых характеристик лесной растительности. Наряду с этим диссертационная работа содержит следующие обладающие научной новизной результаты оригинальных исследований и разработок автора:

- методы предварительной обработки временных серий данных спутниковых наблюдений и формирования свободных от влияния облачности и других мешающих факторов композитных спутниковых изображений для повышения эффективности решения тематических задач мониторинга лесов;
- методы оценки по спутниковым данным качественных и количественных характеристик лесных и других типов наземных экосистем на основе спектральных, спектрально-временных и спектрально-угловых признаков;
- методы детектирования и оценки повреждений лесов под воздействием природных и антропогенных деструктивных факторов по многолетним временным сериям данных спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне длин волн;

- полученные с использованием разработанных в диссертационной работе методов результаты экспериментальных исследований и уникальные тематические продукты и базы данных, позволяющие оценивать состояние и динамику лесов на континентальном и глобальном уровнях пространственного охвата.

Основные защищаемые положения.

1. Методы предварительной обработки временных серий спутниковых данных для компенсации влияния облаков, сезонного присутствия снежного покрова, различий в условиях наблюдения поверхности и аппаратурных помех;
2. Система признаков для классификации лесов и других типов наземных экосистем, получаемая по временным сериям данных спутниковых наблюдений на основе спектральных, спектрально-временных и спектрально-угловых отражательных характеристик подстилающей поверхности;
3. Метод картографирования лесных и других типов наземных экосистем по спутниковым данным на основе комплексного использования измеренных характеристик отраженного излучения и вспомогательных данных о подстилающей поверхности, а также созданная с использованием разработанного метода карта наземных экосистем Северной Евразии;
4. Автоматический метод выявления повреждений лесной и другой растительности пожарами по временным сериям спутниковых данных и созданная на его основе многолетняя циркумполярная база данных о пирогенных повреждениях в различных типах наземных экосистем;
5. Методы оценки породной структуры лесов и степени повреждения насаждений насекомыми по многоспектральным спутниковым изображениям на основе использования моделей спектрального смешения;
6. Методы выявления по разновременным многоспектральным спутниковым изображениям изменений в лесах под воздействием различных деструктивных факторов;
7. Информационная система спутникового мониторинга лесов, обеспечивающая систематизированное хранение и обновление банка данных о состоянии и динамике лесного покрова, а также доступ пользователей к результатам мониторинга для решения задач управления природными ресурсами, охраны окружающей среды и проведения исследований динамики биосферы и климата.

Практическая значимость. Полученные автором результаты нашли применение при создании действующих систем спутникового мониторинга лесов, выполнении научных и прикладных проектов, а также при проведении фундаментальных исследований. Созданная карта наземных экосистем Северной Евразии в настоящее время насчитывает более 300 зарегистрированных пользователей в различных странах мира. Она стала составной частью глобальной базы данных GLC 2000, принята в качестве базовой карты в рамках международной инициативы NEESPI по изучению Северной Евразии, используется как информационная основа в системах мониторинга лесных пожаров и лесопатологического мониторинга.

Разработанный метод картографирования повреждений растительности пожарами по спутниковым данным позволил впервые сформировать многолетний циркумполярный банк данных о пройденных огнем площадях. Использование банка данных открывает возможность оценки объемов пирогенных эмиссий углерода в атмосферу, что позволяет его рассматривать в качестве элемента информационного обеспечения реализации Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Созданная технология картографирования поврежденной огнем растительности используется в составе Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ.

Методы выявления и оценки изменений в лесах по спутниковым изображениям были использованы при реализации ряда международных проектов, в частности, проекта Всемирного банка по оценке повреждений лесов Красноярского края сибирским шелкопрядом, проекта по изучению бореальных¹ лесов Рабочей группы по окружающей среде Российско-Американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству, научно-исследовательских проектов в рамках программ Европейской комиссии.

Разработанные базы данных включены в информационную систему TerraNorte и используются при моделировании биогеохимических циклов, оценке биологического разнообразия и в исследованиях взаимодействия лесов с климатической системой и обществом.

¹ Бореальные экосистемы - это экосистемы бореальной или, другими словами, северной (от греческого Borealis) биоклиматической зоны Земли. Часто в качестве синонима бореальным экосистемам используется термин таежные экосистемы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на 60 российских и международных симпозиумах, конференциях, семинарах и научных совещаниях в Москве, Санкт-Петербурге, Красноярске, Иркутске, Томске, Новосибирске, Суздале, а также в Австрии (Вена), Германии (Гамбург, Йена, Берлин), Италии (Рим, Испра), Канаде (Монреаль), США (Вашингтон, Мэриленд), Франции (Париж, Тулуза, Монпелье), Китае (Пекин), Словакии (Братислава).

Личный вклад. Представленные в диссертационной работе методы обработки данных спутниковых наблюдений для оценки состояния и динамики лесов разработаны лично автором или под его непосредственным научным руководством.

Публикации. По результатам исследований и разработок по теме диссертации опубликовано 115 печатных работ, в том числе 72 научных статьи в российских и зарубежных периодических научных изданиях, сборниках докладов симпозиумов и конференций, официальных изданиях Европейской комиссии и других организаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации составляет 291 страницу, включая 78 рисунков и 29 таблиц. Библиографический список содержит 244 литературных источника.

Автор глубоко признателен академику РАН А.С. Исаеву за поддержку проводимых научных исследований и плодотворное сотрудничество, а также д.с.-х.н. Г.Н. Коровину и д.с.-х.н. В.И. Сухих, оказывавших методологическую помощь в исследованиях. Многолетнее сотрудничество автора с д.т.н. Е.А. Лупяном и к.т.н Д.В. Ершовым позволило реализовать научные результаты работы в виде широко используемых технологий спутникового мониторинга лесов. Автор пользуется возможностью также выразить благодарность всем сотрудникам Отдела технологий спутникового мониторинга ИКИ РАН.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит обоснование перспективных направлений развития методов использования данных спутниковых наблюдений для оценки состояния и динамики лесов с учетом современных приоритетов, описание цели и задач, а также основных научных результатов диссертационной работы.

Глава 1. Анализ приоритетных задач и разработка структуры спутникового мониторинга лесов. Леса, как важнейший компонент наземных экосистем, взаимодействуют с климатической, гидрологической и социально-экономической системами Земли, а механизмы взаимодействия между ними основаны на процессах энергомассообмена. Наряду с экономическим значением лесов мировым сообществом достигается все большее понимание их экологической роли как регулятора фундаментальных процессов, отвечающих за обмен энергией и веществом. Лесные экосистемы являются поглотителем углерода, накапливающимся в связанном виде в древесном пологе насаждений, лесной подстилке, почвах и торфяных болотах. Составляющие углеродного цикла в лесах, а именно поглощение, депонирование и эмиссия углерода, зависят от многих условий и определяются интенсивностью фотосинтеза, как функции породно-возрастной структуры насаждений, почвенных и климатических характеристик, а также процессами разложения биомассы и деструктивными воздействиями на лесные экосистемы.

Среди деструктивных факторов воздействия на леса ведущая роль принадлежит пожарам, вырубкам, а также повреждениям лесов болезнями, насекомыми и промышленными загрязнениями. Согласно далеко неполным данным официальной статистики на охраняемой территории лесного фонда России ежегодно регистрируется от 12 до 36 тысяч пожаров, охватывающих территорию от 0,5 до 5,2 млн. га. Последствия массовых размножений насекомых в бореальных лесах сопоставимы с ущербом от пожаров, а на территории России средние ежегодные площади очагов распространения вредных насекомых составляют около 2,2 млн. га. Существенное влияние на леса оказывает хозяйственная деятельность человека, и в первую очередь рубка. В период наиболее интенсивной вырубки лесов в 60-80-х гг. прошлого столетия в России ежегодно вырубалось около двух миллионов гектар леса.

Вместе с тем сбор информации о деструктивных явлениях в лесах и оценка масштабов их воздействия проводится не на всей территории, а по регулярности и достоверности не отвечает современным требованиям. В России регулярные авиационные и наземные наблюдения за пожарами проводятся на территории, составляющей около 75% площади лесного фонда. Недостаточно широкое использование инструментальных методов оценки поврежденных огнем насаждений, масштабов лесопользования, а также лесов, погибших в результате болезней,

воздействия насекомых и промышленных загрязнений приводит к значительным погрешностям в данных статистической отчетности. Существенные неточности характерны также для данных о динамике лесовосстановления на гарях и вырубках.

Огромные размеры лесов в сочетании с ограниченной доступностью ряда регионов, а также отсутствие отвечающей современным требованиям системы сбора информации о лесах диктуют необходимость широкого использования для мониторинга лесов данных спутниковых наблюдений. Методы использования спутниковых данных для мониторинга лесов получили развитие в начале 70-х годов XX века. В СССР, а затем в России, исследования в области использования данных спутниковых наблюдений в интересах лесного хозяйства и лесоведения позволили обосновать перечень задач и структуру системы мониторинга лесов, а также разработать ряд методов и технологий. В настоящее время в России методы дистанционного зондирования становятся неотъемлемой частью инвентаризации лесов, охраны лесов от пожаров и вредных насекомых, оценки лесопользования.

В последние годы наметилась потребность в расширении направлений исследований в области спутникового мониторинга лесов. В частности, тенденции усиления экологической компоненты мониторинга лесов обуславливаются проблемами глобального изменения климата и снижения биоразнообразия, развитием взглядов на лес как на регулятор процессов обмена веществом и энергией на планете. Развитие техники и методов дистанционного зондирования создало практические предпосылки для мониторинга лесов на глобальном уровне и получения оценок, необходимых для исследований в области изменений климата и биосферы. Таблица 1 отражает приоритетные направления спутникового мониторинга лесов и содержит характеристику объектов наблюдения и измеряемых параметров.

Принимая во внимание современные приоритеты и опираясь на имеющийся в мире опыт использования данных дистанционного зондирования, предложена функциональная структура системы спутникового мониторинга лесов (рис. 1).

Подсистема сбора спутниковых данных предполагает получение и первичную обработку необходимых для мониторинга лесов данных широкого спектра приборов, различающихся уровнем пространственного разрешения, спектральными каналами, частотой наблюдения и другими параметрами.

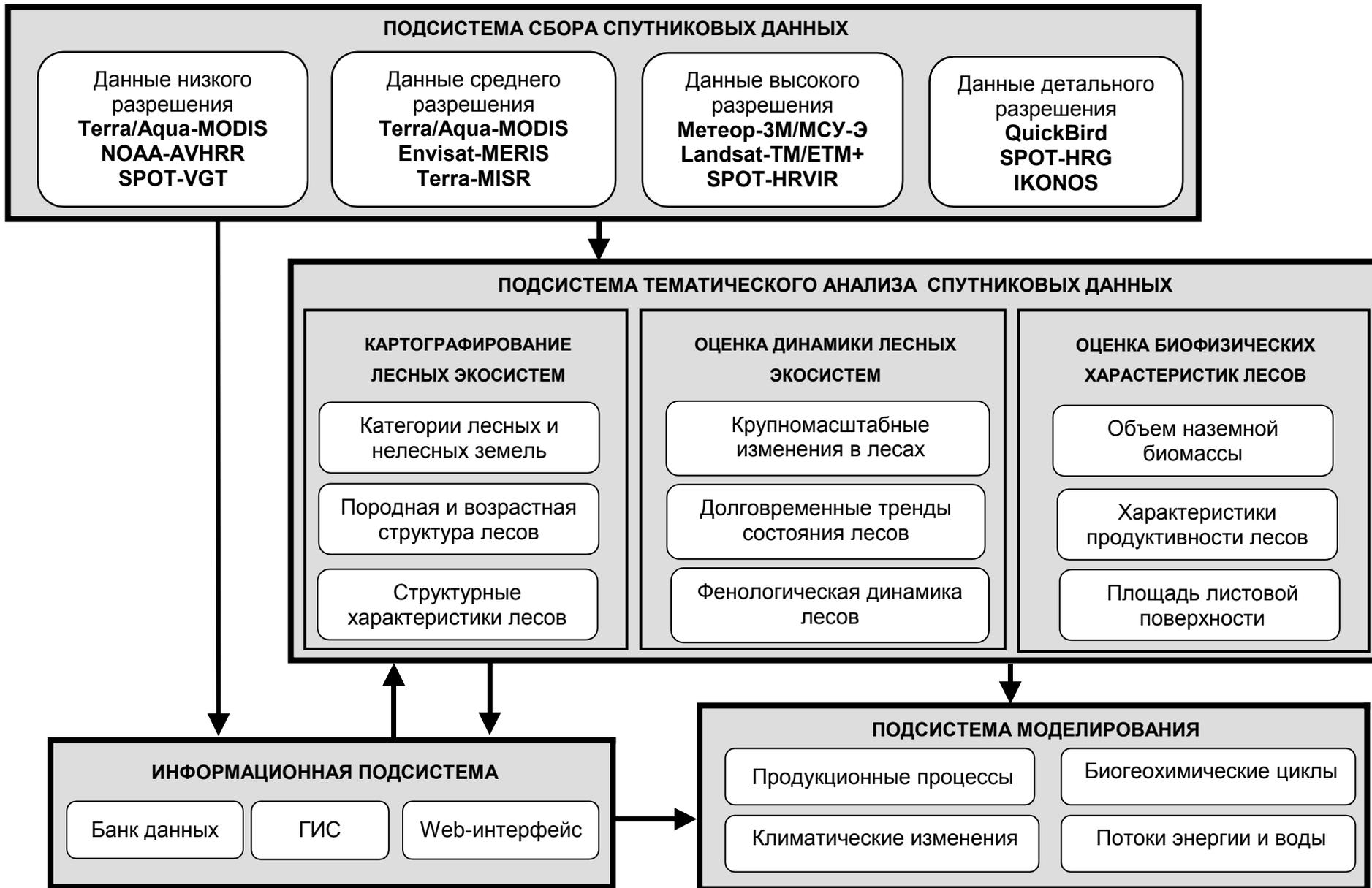


Рис. 1 Структура системы спутникового мониторинга лесов

Возможности широко используемых в настоящее время для мониторинга лесов оптических спутниковых приборов представлены в таблице 2.

Таблица 1

Приоритетные направления спутникового мониторинга лесных экосистем

НАПРАВЛЕНИЕ МОНИТОРИНГА	НАБЛЮДАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ И ЯВЛЕНИЯ	ОЦЕНИВАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
<i>Картографирование и оценка структуры лесов</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Растительный покров - Водно-болотные комплексы - Непокрытые растительностью земли 	<ul style="list-style-type: none"> - Жизненные формы растительности - Тип вегетативных органов - Фенологический тип растительности - Видовой состав растительности - Возрастная структура лесов
<i>Оценка биофизических характеристик лесов</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Лесной покров 	<ul style="list-style-type: none"> - Надземная биомасса - Индекс листовой поверхности (LAI) - Объем первичной продукции (NPP) - Доля поглощенной ФАР² (fPAR) - Концентрация хлорофилла - 3D структура лесного покрова
<i>Оценка возмущающих воздействий на леса</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Лесные пожары - Вырубки лесов - Факторы биотического воздействия - Факторы техногенного воздействия - Восстановительная динамика лесов 	<ul style="list-style-type: none"> - Тип фактора воздействия - Площадь повреждений - Степень повреждений - Время события - Скорость восстановления растительности
<i>Оценка фенологической динамики лесов</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Фенологическая динамика лесных экосистем 	<ul style="list-style-type: none"> - Продолжительность залегания снега - Продолжительность вегетационного сезона - Сроки наступления фенологических фаз
<i>Оценка многолетних трендов состояния лесов</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Границы биомов и зоны перехода - Структура лесного покрова - Биофизические характеристики - Режимы землепользования - Возмущающие воздействия на леса - Фенологические ритмы 	<ul style="list-style-type: none"> - Наличие трендовой динамики - Направление трендовой динамики - Скорость трендовой динамики
<i>Оценка физических характеристик поверхности</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Все типы наземных экосистем 	<ul style="list-style-type: none"> - Альbedo - Температура - Влажесодержание

Подсистема тематического анализа спутниковых данных включает в себя блоки картографирования лесов, оценки их динамики и биофизических характеристик.

Картографирование лесных экосистем предусматривает получение информации о пространственном распределении категорий земель, породно-возрастной структуре и других характеристиках лесов. Целесообразно выделять глобальный, континентальный, региональный и локальный уровни картографирования, различающиеся пространственным разрешением и детальностью легенд получаемых карт.

Требования климатических моделей к пространственному разрешению данных об экосистемах, как правило, определяются диапазоном от единиц до десятков

² ФАР – фотосинтетически активная радиация или используемая при фотосинтезе часть солнечной радиации с длинами волн 0,38 - 0,71 мкм

километров. Региональные и локальные исследования биогеохимических циклов требуют данных о структуре экосистем уровня детальности, измеряемого сотнями или даже десятками метров. Согласованность легенд карт различных уровней может быть обеспечена использованием разработанной ФАО системы классификации наземного покрова LCCS, учитывающей, в частности, следующие признаки растительности:

- жизненные формы (древесная, кустарниковая, травяная, мохово-лишайниковая);
- типы вегетативных органов (хвойные, лиственные);
- типы фенологической динамики (вечнозеленые, листопадные).

Таблица 2

Возможности оптических спутниковых приборов для мониторинга лесов

Направления мониторинга лесов	Спутниковые приборы различного пространственного разрешения			
	Низкое (~1км)	Среднее (250-500 м)	Высокое (20-50 м)	Детальное (1-5 м)
Картографирование лесов	NOAA-AVHRR SPOT-Vegetation Terra/Aqua-MODIS	Terra/Aqua-MODIS Envisat-MERIS	Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER SPOT- HRV/HRVIR Метеоп-3М/МСУ-Э IRS-LISS	IKONOS QuickBird SPOT-HRG IRS-PAN
Оценка биофизических характеристик				
Оценка биомассы, LAI, NPP, fPAR				
Оценка концентрации хлорофилла		Envisat-MERIS		
Оценка 3D структуры лесов	SPOT-Vegetation	Terra-MISR Terra/Aqua-MODIS		
Оценка возмущающих воздействий				
Детектирование пожаров	NOAA-AVHRR Terra/Aqua-MODIS	Terra/Aqua-MODIS	Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER	
Оценка последствий пожаров	NOAA-AVHRR SPOT-Vegetation Terra/Aqua-MODIS		Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER SPOT-HRV/HRVIR Метеоп-3М/МСУ-Э IRS-LISS	IKONOS QuickBird SPOT-HRG IRS-PAN
Оценка воздействия биотических и техногенных факторов				
Вырубки лесов				
Оценка фенологической динамики	NOAA-AVHRR SPOT-Vegetation Terra/Aqua-MODIS			
Оценка трендов состояния		Landsat-TM/ETM+ SPOT- HRV/HRVIR		
Оценка физических характеристик поверхности	NOAA-AVHRR Terra/Aqua-MODIS		Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER	

Современные возможности спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне в значительной мере удовлетворяют указанным требованиям к классификации растительности на основе спектральных, спектрально-временных и спектрально-угловых признаков.

Оценка динамики лесных экосистем должна обеспечивать выявление следующих типов изменений:

- *крупномасштабные изменения лесного покрова* в результате деструктивных факторов воздействия (пожары, вырубки, ветровалы и др.);
- *долгосрочные тренды состояния лесов*, отражающие их восстановительную и сукцессионную динамику, реакции на продолжительное антропогенное воздействие и изменения климата, проявляющиеся, в частности, в изменении породной структуры и продукционных характеристик насаждений, смещении границ биомов;
- *фенологические изменения лесных экосистем*, определяемые сезонной ритмикой развития растительности, наличием снежного покрова, частотой возникновения и масштабами воздействия пожаров.

Возмущающие воздействия на леса, вызываемые различными факторами биотического, абиотического и антропогенного характера, в значительной мере определяют характеристики потоков углерода, энергии и воды между экосистемами и атмосферой. Оценка возмущающих воздействий является приоритетной составляющей спутникового мониторинга лесов, основанной на выявлении участков изменений и получении характеристик интенсивности воздействия с использованием временных серий данных наблюдений.

Изменения климата могут вызывать трендовую динамику характеристик насаждений, а также модифицировать режимы действия климатозависимых факторов воздействия на леса. *Оценка многолетних трендов состояния лесов* по спутниковым данным требует выявления и интерпретации следующих типов их динамики:

- изменения характеристик фенологических ритмов;
- изменения биофизических характеристик;
- изменения режимов действия пожаров и биотических факторов воздействия;
- изменения видового состава;
- смещения границ биомов и переходных зон между биомами.

Одним из направлений спутникового мониторинга лесов является *оценка их фенологических ритмов*, характеристики которых могут служить в качестве индикаторов влияния климатических изменений. К числу такого рода характеристик относятся продолжительность залегания снежного покрова, даты начала и окончания вегетационного периода, сроки наступления отдельных фаз развития растительности.

Решение указанных выше задач требует использования временных серий спутниковых данных. При этом рассмотрение совокупной динамики лесов в виде суперпозиции быстрых изменений, сезонной ритмики и трендовой динамики состояния позволяет формализовать постановку задачи мониторинга лесов и осуществлять разработку методов анализа спутниковых данных на основе такого рода формализации.

Оценка биофизических характеристик лесов (биомасса, FPAR, NPP, NEP, LAI) ориентирована на получение данных, необходимых в качестве входных параметров в моделях процессов энергомассообмена в системе лес-атмосфера и углеродного цикла.

Ряд доступных для дистанционного измерения *физических характеристик*, таких как альbedo, температура и влагосодержание поверхности используются в качестве переменных в моделях динамики растительности, необходимых для оценок объемов чистой первичной продукции, интенсивности стока углерода и его накопления в биомассе.

Подсистема моделирования включает в себя, в частности, модели продукционных процессов в лесах и их сукцессионной динамики, модели биогеохимических циклов, а также модели взаимодействия лесных экосистем и климата. Интеграция получаемых по результатам спутниковых наблюдений данных в модели позволяет уточнить оценки потоков углерода в лесах, улучшить понимание взаимосвязей изменений экосистем с социальными процессами и климатом.

Информационная подсистема включает в себя банк данных, ГИС вместе с модулями пространственного анализа, и предусматривает возможности удаленного доступа пользователей на основе Интернет-технологий.

Анализ современного состояния спутниковых методов дистанционного зондирования Земли свидетельствует о наличии реальных предпосылок для создания системы мониторинга лесов в интересах решения задач оценки лесных ресурсов, охраны и защиты леса, информационного обеспечения исследований глобальных изменений климата и биосферы. Методы получения и обработки временных серий спутниковых данных дают возможность регулярного картографирования лесов и оценки в них изменений в результате пожаров, вырубок и других факторов, выявления трендовой динамики состояния насаждений под влиянием антропогенной нагрузки, оценки реакций экосистем на изменения климата.

Глава 2. Картографирование лесов и других типов наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений. Возможности извлечения из спутниковых данных информации о наземных экосистемах определяются рядом физических, технических и методических предпосылок, в том числе:

- особенностями отраженного излучения, как комплексной функции типа земной поверхности, ее структурных и физико-химических характеристик;
- характеристиками спутниковых приборов и условиями наблюдения;
- наличием моделей описания характеристик поверхности в пространстве регистрируемых сигналов и методов анализа данных наблюдений.

Появление системы SPOT-Vegetation, имеющей пространственное разрешение 1,15 км, открыло широкие возможности получения спутниковых данных, удовлетворяющих требованиям глобального мониторинга растительности. Для разработки метода картографирования наземных экосистем Северной Евразии были использованы продукты спутниковых данных SPOT-Vegetation S10, охватывающие регион с координатами 42°-75° С.Ш. и 5°-180° В.Д. за период 1999-2000 годов. Указанные данные имеют существенно редуцированное влияние облачности за счет формирования за каждый десятидневный период наблюдений композитных изображений на основе критерия максимума нормализованного разностного вегетационного индекса *NDVI*, вычисляемого следующим образом:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}, \quad (1)$$

где R_{red} и R_{nir} - значения коэффициента спектральной яркости, измеряемые в каналах 0,61-0,68 мкм и 0,78-0,89 мкм.

Результаты оценки информативности данных SPOT-Vegetation для картографирования лесов позволили сделать следующие выводы:

- данные дают возможность учитывать спектральные, спектрально-временные и спектрально-угловые отражательные характеристики лесов и других типов экосистем для их классификации;
- наличие измерений в среднем ИК диапазоне (1,58-1,75 мкм) дает существенные преимущества при распознавании болот, гарей и погибших насаждений;

- фенологическая динамика *NDVI* может быть использована при классификации хвойных и лиственных лесов, а также их отделения от других категорий земель;
- модели BRDF, описывающие угловую зависимость (индикатрису) отражения поверхности, могут быть использованы для повышения точности классификации экосистем по спутниковым данным.

Разработанный метод картографирования лесов по спутниковым данным, характеризуется следующими этапами (рис. 2):

- предварительная обработка спутниковых данных;
- формирование набора производных продуктов данных и признаков для распознавания типов лесных и других наземных экосистем;
- классификация типов подстилающей поверхности методом последовательной семантической декомпозиции.

Предварительная обработка данных направлена на выявление пикселей непригодных для анализа из-за влияния снега, облаков и теней от них, нестабильной работы сенсора. При этом на первом этапе используется система фиксированных порогов, применяемых к данным спектральных каналов 0,43-0,47 мкм и 1,58-1,75 мкм и значениям нормализованного разностного индекса снега *NDSI*:

$$NDSI = \frac{R_{red} - R_{swir}}{R_{red} + R_{swir}}, \quad (2)$$

где R_{red} и R_{swir} - значения коэффициента спектральной яркости, измеряемые в каналах 0,61-0,68 мкм и 1,58-1,75 мкм.

На последующем этапе зашумленные пиксели детектируются адаптивным пороговым алгоритмом, основанным на анализе временных рядов наблюдений в спектральном диапазоне 1,58-1,75 мкм. Критерием для детектирования указанных пикселей является выход значений коэффициента спектральной яркости за границы интервалов, определяемых удвоенным стандартным отклонением от среднего значения, вычисляемых для заданного временного интервала наблюдений при фиксированных географических координатах.

Полученные маски зашумленных пикселей используются для формирования производных продуктов спутниковых данных и вычисления признаков для классификации наземных экосистем, включая:

Предварительная обработка и получение производных продуктов спутниковых данных

Тематический анализ данных

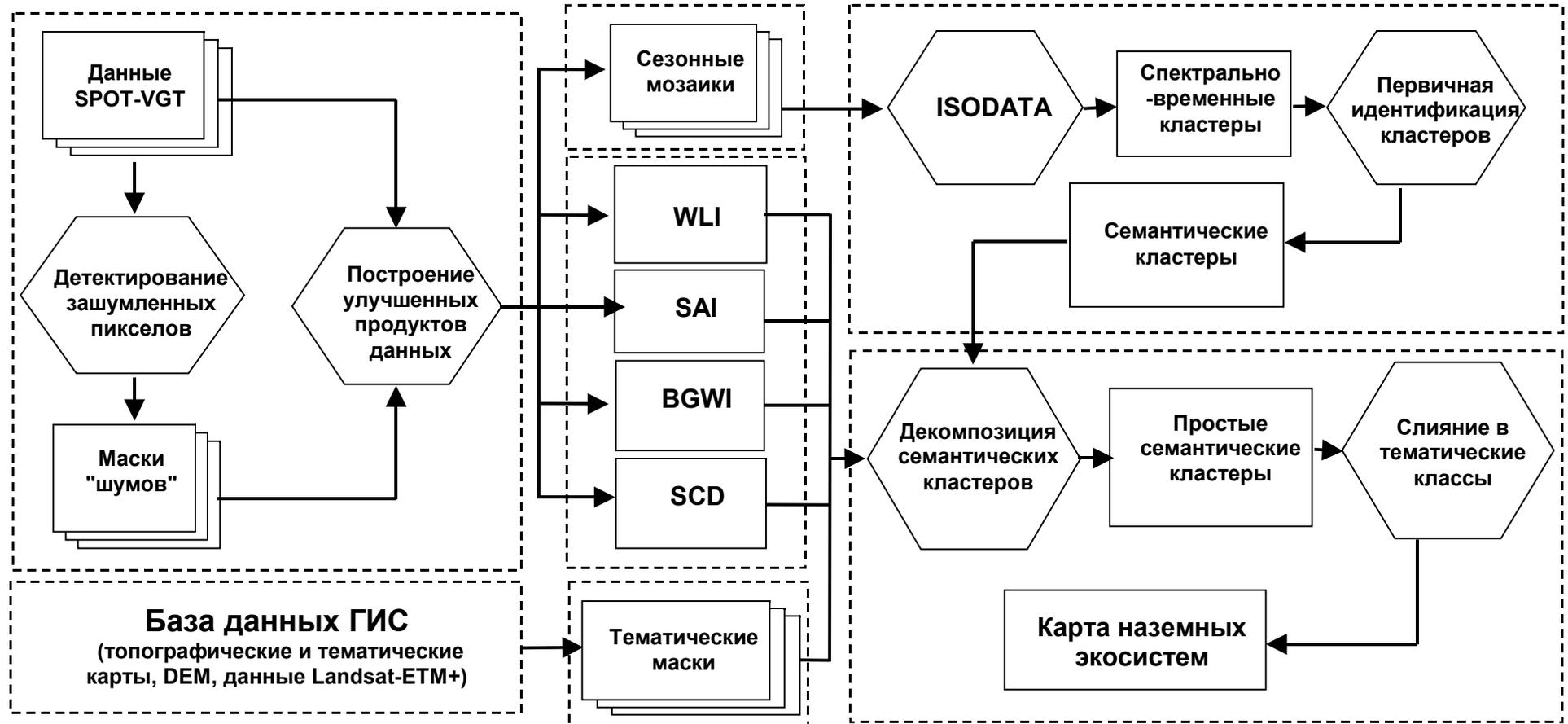


Рис. 2 Логическая схема метода картографирования экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation

- свободные от влияния мешающих факторов композитные многоспектральные изображения (мозаики) весеннего, летнего и осеннего сезонов, полученные осреднением незашумленных данных за соответствующие периоды наблюдений;
- индекс влажности *BGWI (Bi-spectral Gradient Wetness Index)*, физической предпосылкой для получения которого является высокий уровень поглощения водой электромагнитного излучения в среднем ИК диапазоне. *BGWI* вычисляется в двумерном пространстве, образуемом измерениями коэффициента спектральной яркости в ближнем (0,78-0,89 мкм) и среднем (1,58-1,75 мкм) ИК диапазонах, и выражается углом между направлением от точки, соответствующей яркости воды, на заданную точку и осью среднего ИК канала. Индекс разработан с целью повышения точности классификации участков повышенного (болота) и пониженного (гари) уровня влагосодержания в растительности и почве;
- индекс волнового подобия *WLI (Wave-Likeness Index)* извлекается из временного ряда значений *NDVI* в течение вегетационного сезона и характеризует меру его отличия от идеализированной «волновой» траектории, в качестве которой принимается аппроксимация временного ряда периодической функцией;
- индекс оптической анизотропности поверхности *SAI (Surface Anisotropy Index)*, полученный на основе функции BRDF, описанной с помощью MRPV модели;
- продолжительность залегания снежного покрова (*признак SCD*), как фактора определяющего распределение растительности в бореальной зоне, оценивается по спутниковым данным и представляет собой важный признак для классификации экосистем. В частности, этот признак дает возможность повысить точность распознавания тундры и степей.

Сезонные композитные изображения описывают фенологическую динамику отражательных свойств поверхности с временным разрешением достаточным для классификации большинства типов экосистем. Однако для распознавания сельскохозяйственных земель необходимо использование данных с более высокой частотой наблюдений. Этому требованию удовлетворяет индекс волнового подобия *WLI*, представляющий собой меру различия между реальной и идеализированной траекториями фенологической динамики растительности в предположении отсутствия возмущающих факторов в течение рассматриваемого сезона. При этом реальная фенологическая динамика растительности описывается временным рядом

NDVI, а его аппроксимация периодической функцией служит в качестве идеализированной траектории динамики растительности. Сравнение значений *WLI* с картой землепользования продемонстрировало высокий уровень эффективности индекса при отделении пахотных земель от степей.

Характеристики оптической анизотропности поверхности могут быть использованы для классификации лесов на основе различных подходов. Разработанный на основе модели *MRPV* индекс *SAI* основан на восстановлении линейных уравнений связи между значениями нормализованных коэффициентов спектральной яркости в парах спектральных каналов, коэффициенты которых с учетом идентичности геометрических условий съемки могут характеризовать уровень анизотропности отраженного излучения наблюдаемой поверхности. Оценка индекса *SAI* проводилась с использованием скользящего вдоль временной серии данных окна и оценки линейной корреляции для проверки правильности предположения о неизменности отражательных свойств поверхности и атмосферных условий для данной группы последовательных наблюдений. Индекс был использован для более точного отделения лиственных лесов от лугов, а также темнохвойных лесов от грядово-мочажинных болот.

Легенда карты наземных экосистем Северной Евразии включает в себя 27 классов, образующих семь различных групп, таких как леса, кустарники, травянистая растительность, водно-болотные комплексы, тундра, растительные комплексы и непокрытые растительностью земли. При этом для территории России выделяются следующие семь классов покрытых лесом земель: темнохвойные вечнозеленые леса, светлохвойные вечнозеленые леса, светлохвойные листопадные леса, лиственные леса, смешанные леса, смешанные леса с преобладанием лиственных и смешанные леса с преобладанием хвойных пород.

В основу классификации изображений положено использование *метода последовательной семантической декомпозиции*. На первом этапе выполняется кластерный анализ (алгоритм *ISODATA*) трех сезонных композитных изображений с получением большого числа (150-200) *спектрально-временных кластеров*. Первичная тематическая интерпретация кластеров позволяет присвоить им однозначное или комплексное наименование (в зависимости от уровня интерпретируемости) и сформировать начальный набор *семантических кластеров*. При этом имеющие

комплексные наименования кластеры являются объектом дальнейшей декомпозиции с использованием доступных признаков и алгоритмов классификации (пороговые процедуры, управляемая классификация или кластерный анализ). Целью декомпозиции является получение набора однозначно интерпретируемых в рамках выбранной легенды простых семантических кластеров. После достижения данного условия одинаково именованные кластеры объединяются в *тематические классы*.

Тематическая интерпретация является одним из ключевых элементов процедуры классификации экосистем по спутниковым данным. При этом необходимо синергетическое использование знаний о физических особенностях спектрального отражения и информации эколого-географического характера. Большое значение при интерпретации спектрально-временных кластеров имеет анализ расположения и сезонной динамики их спектральных сигнатур в пространстве яркостей R_{red} и R_{nir} по отношению к линии почв и направлению максимального индекса листовой поверхности.

Созданная с использованием разработанного метода карта наземных экосистем Северной Евразии прошла трехэтапную оценку достоверности, включая:

- независимую экспертную проверку, выполненную последовательно в ячейках регулярной сети ($2^\circ \times 2^\circ$), покрывающей всю территорию России;
- сравнение с материалами учета лесов на уровне субъектов РФ;
- сравнение с данными визуальной интерпретации репрезентативной выборки изображений Landsat-ETM+ в рамках независимой валидации глобальной карты наземных экосистем GLC 2000.

По результатам экспертного анализа, выполненного с привлечением материалов лесоустройства для 1523 лесхозов, интегральная точность классификации наземных экосистем составила 90,3%. При этом средняя точность классификации типов леса характеризуется величиной 85,6%. Сравнение покрытой лесом площади по данным карты с материалами государственного учета лесов (по состоянию 1998 год) позволяет сделать вывод о высоком уровне согласованности оценок из двух независимых источников (рис. 3). Независимая валидация результатов картографирования с использованием 51 сцены Landsat-ETM+ на территории Северной Евразии показала, что средняя точность классификации типов леса составляет 91,9%.

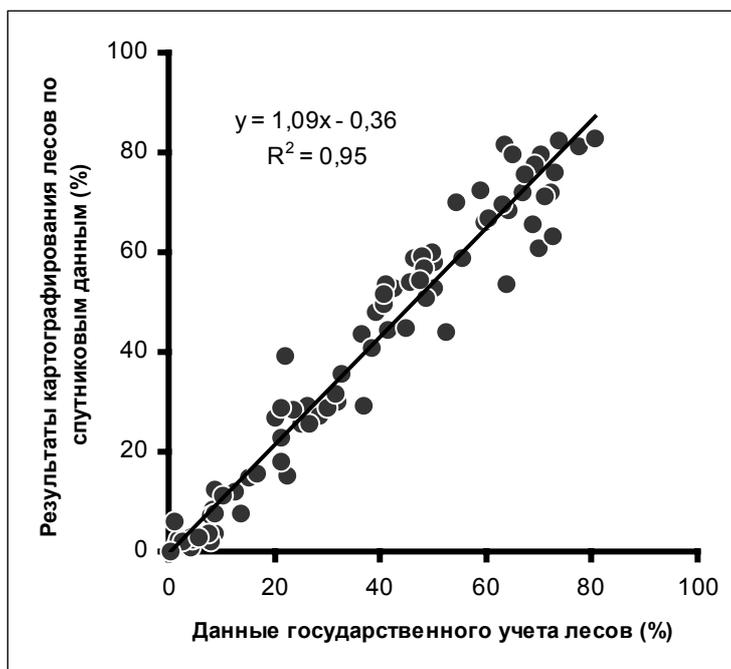


Рис. 3 Сравнение доли покрытой лесом площади в субъектах РФ по данным карты наземных экосистем Северной Евразии и государственного учета лесов

Глава 3. Глобальный мониторинг повреждений лесов пожарами по временным сериям данных спутниковых наблюдений. В основе подходов, применяемых при определении объемов пирогенных эмиссий углерода в атмосферу и оценке ущерба от пожаров, наряду с рядом других параметров, лежит использование данных о площадях повреждений.

Выявление повреждений экосистем пожарами по спутниковым данным может основываться на использовании различных подходов, а именно на детектировании поврежденных участков по изменениям их отражательных свойств, на детектировании очагов горения по аномально высокой температуре или на комбинации указанных возможностей. Принятый подход основан на комбинированном использовании временных серий данных о спектрально-отражательных и температурных свойствах поверхности, получаемых приборами SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS, имеющих пространственное разрешение около 1 км при наблюдениях близких к надиру.

Воздействие огня приводит к гибели или изменению физиологических характеристик растительности, что, в частности, выражается в снижении влагосодержания и концентрации хлорофилла в зеленых фракциях. Спектральное отражение поврежденных участков при этом наиболее сильно изменяется в ближнем

и среднем ИК диапазонах. На учете этих особенностей основано использование для выявления поврежденных огнем участков коротковолнового вегетационного индекса *SWVI*, вычисляемого по данным SPOT-Vegetation согласно выражения:

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}} \quad (3)$$

где R_{nir} и R_{swir} – значения спектрального коэффициента яркости подстилающей поверхности в ближнем (0,78-0,89 мкм) и среднем (1,58-1,75 мкм) ИК каналах.

Возможности детектирования участков повреждений зависят от фенологического состояния растительности, определяющего ее спектрально-отражательные свойства, и не одинаковы в различных типах экосистем в различные сезоны года. Проведенные исследования позволили оценить и использовать эти различия для детектирования повреждений на основе сравнения значений *SWVI* в соответствующие декады текущего и предыдущего годов и разработанного набора критериев распознавания. Необходимо также учитывать, что наряду с пожарами к сходным изменениям отражательных свойств может приводить воздействие и других факторов, сопровождаемых угнетением или гибелью растительности. Вследствие этого для выявления пройденных пожарами участков целесообразно привлечение дополнительной информации, в качестве которой могут выступать данные об очагах горения, детектируемых по аномально высокой температуре с использованием данных Terra/Aqua-MODIS.

Разработанный метод выявления повреждений пожарами по спутниковым данным (рис. 4) основан на использовании совокупности критериев, учитывающих изменения отражательных свойств поверхности под воздействием огня, а также компенсирующих вероятные ошибки распознавания вследствие межгодовых различий фенологической динамики экосистем и влияния ряда мешающих факторов. На основе исходных подекадных данных SPOT-Vegetation, прошедших предварительную обработку, формируются временные ряды значений *SWVI* за два последовательных года (текущий и предшествующий) и осуществляется коррекция межгодовых различий фенологической динамики растительности. 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 по времени наблюдений.

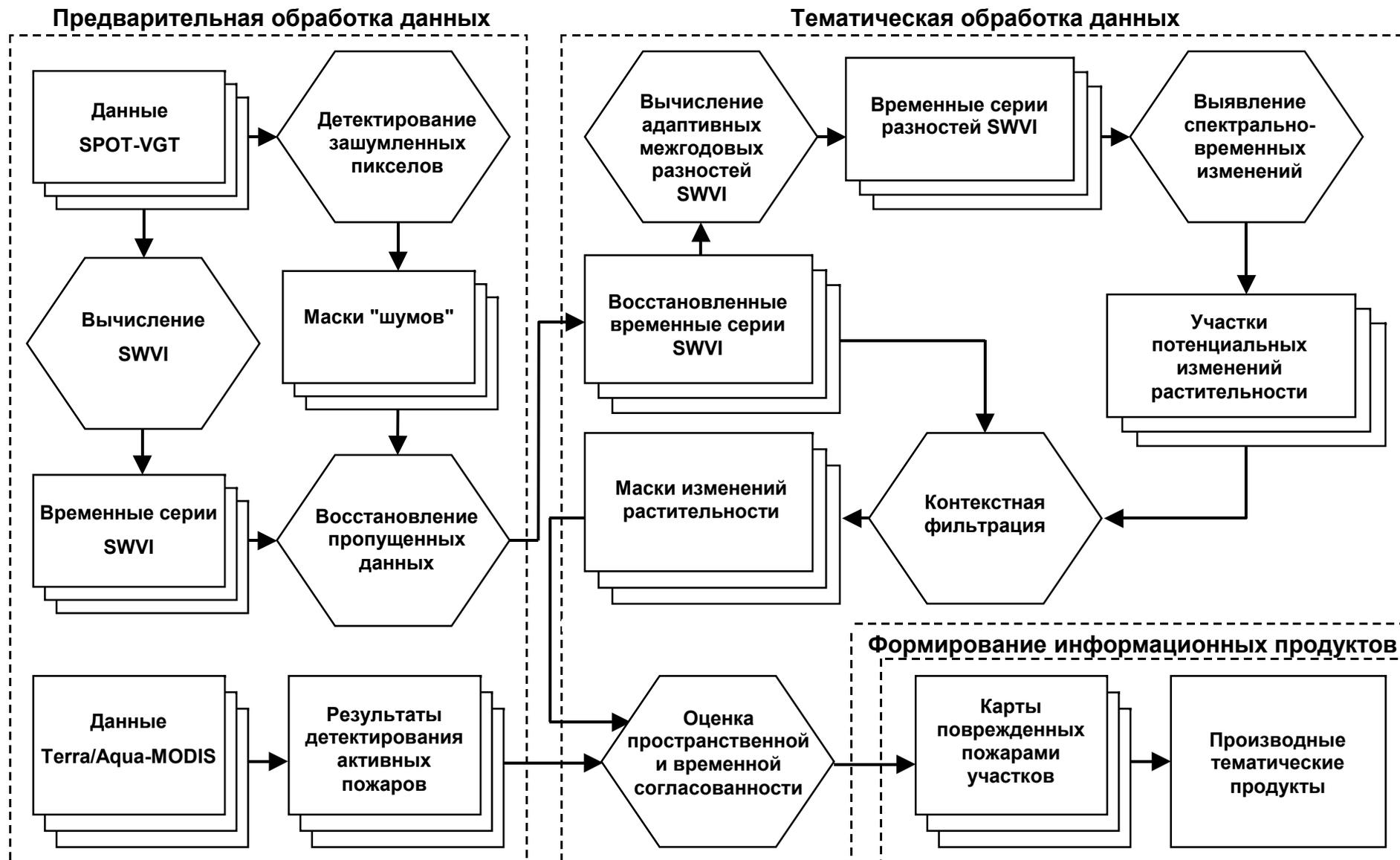


Рис.4 Логическая схема метода выявления поврежденной пожарами растительности по спутниковым данным

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

$$DWI^k(i, j, t, t^*) = SWVI^k(i, j, t) - SWVI^{k-1}(i, j, t^*), \quad (4)$$

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 $DWI^k(i, j, t, t^*) \forall t^* = (t-1, t, t+1)$.

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 повреждениям, в качестве первого приближения используется следующий критерий:

$$DWI^k(i, j, t, t^*) < P_1, \quad (5)$$

где P_1 - пороговое значение, полученное на основе предварительного статистического анализа значений DWI поврежденных пожарами участков.

После применения описанной выше 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. Первичная фильтрация этих участков осуществляется на основе анализа статистической значимости их спектрально-яркостных отличий от ближайшего окружения с использованием окна переменного размера (контекстная фильтрация). 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 поврежденным участкам, если соответствующее ему значение $SWVI$ не превышает величину $(M_{swvi} - \sigma_{swvi})$.

На последнем этапе обработки проводится оценка пространственно-временной согласованности участков изменений с выявленными по данным Terra/Aqua-MODIS

тепловыми аномалиями для идентификации вызванных пожарами повреждений растительности и заключительной фильтрации изменений, связанных с другими факторами.

На основе разработанного метода была создана автоматическая технология, обеспечивающая регулярное выявление пройденных огнем площадей и вошедшая составной частью в систему мониторинга лесных пожаров Федеральной службы лесного хозяйства РФ. Использование разработанной технологии позволило сформировать многолетний регулярно обновляемый циркумполярный банк данных о пройденных огнем участках на территорию бореального пояса планеты. Данные о площадях повреждений за период 2000-2004 годов для стран бореального пояса представлены в таблице 3.

Таблица 3

Площади повреждений экосистем пожарами в странах бореального пояса³

Северная Евразия

Страны	2000	2001	2002	2003	2004	Среднее	СКО ⁴
Россия	4629,4	5614,4	8209,3	33563,3	2269,9	10857,3	11511,7
	2484,4	2757,4	5772,4	22437,1	899,9	6870,2	7941,4
Белоруссия	45,7	0,2	613,8	115,7	1,0	155,3	233,1
	26,5	0,0	283,6	39,5	0,3	70,0	107,9
Казахстан	2296,6	3110,5	2614,6	4371,0	3132,4	3105,0	706,8
	64,0	1,6	6,1	11,6	19,1	20,5	22,5
Латвия	0,1	0,0	19,0	3,4	0,0	4,5	7,4
	0,1	0,0	12,5	3,1	0,0	3,1	4,8
Литва	0,3	0,0	47,7	3,4	0,0	10,3	18,8
	0,3	0,0	31,8	0,3	0,0	6,5	12,7
Монголия	741,8	157,5	519,9	835,5	490,9	549,1	235,3
	124,8	27,1	115,2	71,2	18,9	71,4	43,6
Норвегия	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,3	0,5
	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,1	0,3
Украина	258,8	30,4	252,6	129,2	30,4	140,3	100,9
	16,2	1,9	77,3	32,6	2,0	26,0	28,0
Финляндия	0,0	0,0	0,0	0,6	0,8	0,3	0,3
	0,0	0,0	0,0	0,5	0,7	0,2	0,3
Швеция	0,7	0,0	0,1	1,4	0,1	0,5	0,5
	0,7	0,0	0,1	1,4	0,1	0,5	0,5
Эстония	4,7	0,0	0,6	4,0	0,0	1,9	2,1
	2,8	0,0	0,6	2,7	0,0	1,2	1,3

Северная Америка

Канада	1005,6	790,7	4352,4	2780,1	2996,0	2385,0	1487,0
	439,5	478,6	2980,9	2159,8	2210,0	1653,8	1138,2
США (Аляска)	261,1	1,9	793,2	235,1	2302,7	718,8	931,6
	78,2	0,2	456,5	182,8	1689,4	481,4	697,0

³ Площадь выражена в тысячах гектар. Верхнее значение относится к общей площади повреждений, а нижнее к поврежденным лесам.

⁴ СКО – среднеквадратическое отклонение площадей повреждений.

Необходимые для оценки точности разработанного метода опорные данные были получены по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения Landsat-ETM+ (28,5 м), а также по результатам авиационных и наземных обследований. Набор данных Landsat-ETM+ включал в себя 31 спутниковое изображение, полученные в 2001-2002 годах для различных регионов России, что позволило выбрать 78 опорных участков с общей площадью повреждений пожарами около 468 тысяч гектар. Совместно с ФГУ «Авиалесоохрана» в Красноярском крае были проведены авиационные и наземные измерения контуров гарей 2003 и 2004 годов с использованием прибора GPS.

Сопоставление полученных по данным SPOT-Vegetation и опорных значений площадей поврежденных пожарами участков демонстрирует хороший уровень согласованности результатов, что подтверждается наличием линейной связи между двумя наборами данных и высоким значением коэффициента детерминации ($R^2=0,94$) (рис. 5). Кроме того, полученное уравнение регрессии позволяет оценить площадь минимального выявляемого данным методом участка повреждений, составляющую 89,4 га. Величина и знак средней ошибки (-6,6%) свидетельствует о незначительном систематическом занижении площадей повреждений, определяемых с использованием разработанного метода.

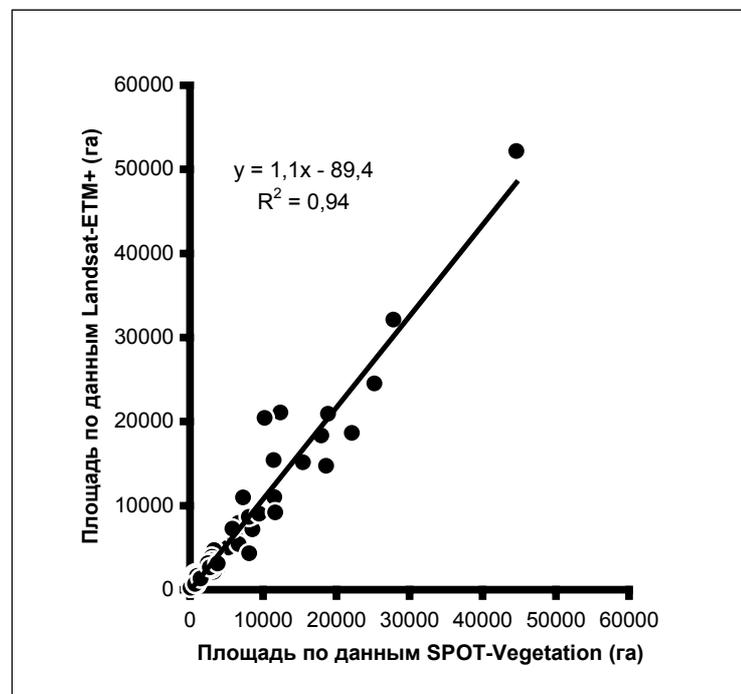


Рис. 5 Сравнение площадей поврежденных пожарами участков по данным SPOT-Vegetation и Landsat-ETM+

Представленный на рисунке 6 график демонстрирует снижение относительной ошибки определения 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 авиационных облетов, составила 11%, а отклонения по отдельным участкам лежали в интервале от -13,6% до +10,4%.

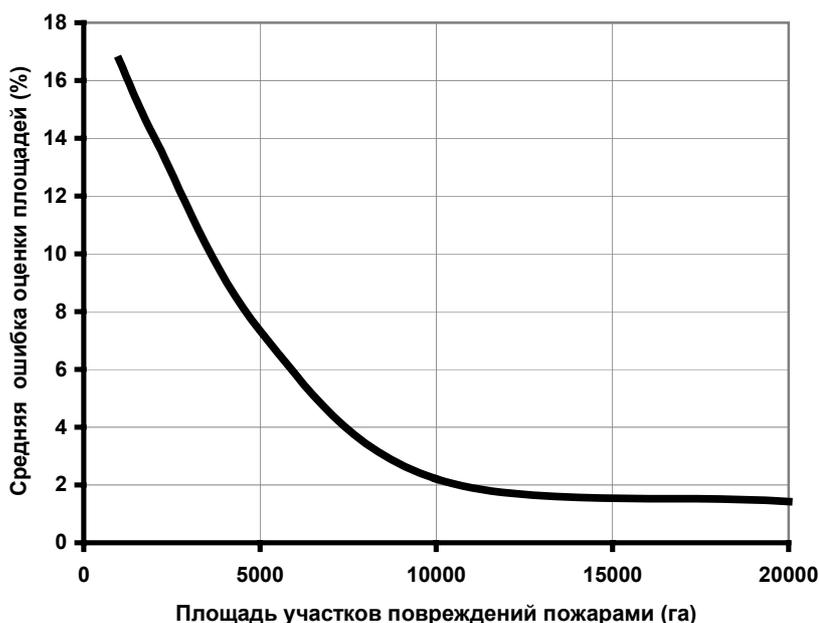


Рис. 6 Зависимость средней относительной ошибки оценки площадей повреждений по данным SPOT-Vegetation от размеров участков

Созданный банк данных представляет собой в настоящее время наиболее полный набор однородных по точности многолетних данных о повреждениях огнем растительности для всей бореальной зоны. Полученные данные дают возможность объективно судить о пространственно-временных характеристиках повреждений за относительно продолжительный период при подекадной частоте наблюдений, что позволяет, в частности, анализировать сезонную динамику горения, выявлять периоды наибольшей активности пожаров и оценивать продолжительность пожароопасных сезонов в различных типах экосистем. Анализ многолетних оценок повреждений лесов Северной Евразии пожарами позволяет, в частности, подтвердить факт наибольшей подверженности воздействию огня насаждений лиственницы, на долю которых в различные годы приходится 65%-78% поврежденной площади.

Банк данных о повреждениях растительности пожарами находит широкое применение при управлении лесными ресурсами, охране окружающей среды и оценке объемов пирогенных эмиссий углерода в атмосферу.

Глава 4. Методы оценки состояния и динамики лесов по многоспектральным спутниковым данным. В главе рассмотрены методы анализа спутниковых изображений с пространственным разрешением 20-45 м (Landsat-TM/ETM+, SPOT-HRV/HRVIR, Ресурс-О1/Метеор3М-МСУ-Э) для оценки состояния и динамики лесов, в частности, определения их породно-возрастной структуры, степени повреждения насекомыми, изменений в результате деструктивных факторов воздействия.

В исследованиях использовалась совокупность подходов к обработке изображений, основанных на управляемой классификации, кластерном анализе и методах декомпозиции спектральных смесей. При этом декомпозиция спектральных смесей, предполагающая оценку доли участия классов в пикселах, осуществлялась различными методами, а именно на основе решения системы уравнений и использовании геометрического подхода. Первый метод основан на описании спектральной яркости пиксела линейной функцией взвешенных значений яркости типов объектов (компонентов) с весами пропорциональными их площади на земной поверхности. Это позволяет оценивать доли компонент на основе решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I eps_i^2 \rightarrow min \\ R_i = \sum_{k=1}^K m_k R_{ik} + eps_i \\ \sum_{k=1}^K m_k = 1 \end{cases} \quad (6)$$

где i - индекс спектрального канала ($i=1, I$), k - индекс компоненты ($k=1, K$), R_i - коэффициент спектральной яркости пиксела в i -ом канале, R_{ik} - коэффициент спектральной яркости k -ой компоненты в i -ом канале, m_k - доля площади k -ой компоненты; eps_i - погрешность измерения коэффициента спектральной яркости в i -ом канале. Результат минимизации $\sum_{i=1}^I eps_i^2 \rightarrow min$ принимается в качестве оценки вектора долей площади компонент m_k в пикселе.

К преимуществам метода относится возможность учета вариаций яркости компонент, а к ограничениям необходимость увеличения количества спектральных каналов с ростом числа компонент. При использовании систем с большим количеством каналов (например, Envisat-MERIS) это ограничение не является существенным, в то время как для данных приборов Метеор-3М/МСУ-Э и SPOT-HRV возможности подхода ограничены.

Альтернативный подход к декомпозиции спектральных смесей основан на вычислении содержания компонент на основе взаимного расположения в двумерном пространстве спектральных яркостей оцениваемого пиксела и опорных спектров. Содержание k -ой компоненты в пикселе, имеющем координаты S , определяется согласно (7) по соотношению расстояний $Dist$ между элементами многоугольника (рис. 7), координаты вершин которого соответствуют значениям опорных спектров S_k :

$$m_k = \frac{Dist(S_k, S'_k) - Dist(S_k, S)}{Dist(S_k, S'_k)}, \text{ а } \sum_{k=1}^K m_k = 1. \quad (7)$$

Метод имеет ясную геометрическую интерпретацию, а также свободен от жесткой связи между количеством спектральных каналов и числом оцениваемых компонент. В то же время он не позволяет учитывать вероятностный характер яркостей объектов, а также получать оценки в пикселах вне многоугольника, координаты вершин которого определяются значениями опорных спектров.

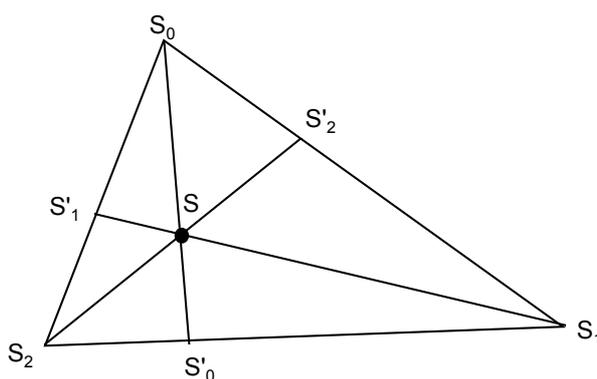


Рис. 7 Геометрический подход к декомпозиции спектральных смесей

Оценка распознаваемости лесов различных преобладающих пород и возрастных групп по многоспектральным спутниковым данным позволила сделать вывод о высокой степени делимости насаждений сосны, ели и лиственных деревьев. При этом возможно выделение до трех возрастных категорий насаждений. Было показано,

что на измеряемые по изображениям яркостные свойства лесов оказывают влияние факторы полноты насаждений, наличия подроста и подлеска под пологом, характеристики рельефа местности.

Методы попиксельной классификации изображений позволяют достаточно точно выделять однородные хвойные и лиственные насаждения с возрастанием ошибок в смешанных лесах, природа которых связана с отнесением пикселей изображения к одному наиболее вероятному классу. Это послужило основанием для исследования возможности оценки породной структуры насаждений методом декомпозиции спектральных смесей на примере использования данных Landsat-TM.

При выборе компонентов смеси, как важнейшего этапа в реализации выбранного подхода, необходимо использовать априорные знания о породной структуре лесов, а также уровне разделимости пород по спектральным сигнатурам. Полученные оценки содержания сосны, ели и лиственных деревьев были сопоставлены с данными лесоинвентаризации, а также с результатами классификации методом максимального правдоподобия (таб. 4). Согласованность данных о содержании древесных пород на уровне отдельных насаждений характеризуется величиной коэффициента детерминации R^2 . Результаты сопоставления показывают хорошую согласованность оценок методом декомпозиции спектральных смесей с данными лесоустройства, а также его преимущества по отношению к методу управляемой классификации.

Таблица 4

Сравнение полученных различными методами оценок содержания пород в лесах с данными лесоустройства

Древесные породы	Данные лесоустройства	По данным Landsat-TM		
		Контролируемая классификация	Метод декомпозиции спектральных смесей	
	%	%	%	R^2
Сосна	45,1	29,0	45,0	0,77
Ель	18,8	26,0	21,9	0,76
Лиственные	36,1	45,0	33,2	0,86

Результаты исследования возможностей использования данных дистанционного зондирования для оценки повреждений лесов под воздействием насекомых показывают, что методы классификации позволяют распознавать ограниченное (как правило, не более трех) число классов дефолиации, а насаждения на ранних стадиях

повреждений слабо отделимы от неповрежденных лесов. Применение этих методов требует наличия опорных данных, что сопряжено, как правило, с необходимостью проведения наземных работ. Наряду с наличием повреждений яркостные свойства лесов определяются их породно-возрастной структурой, сомкнутостью полога в условиях разнообразия растительных ассоциаций нижних ярусов и напочвенного покрова, что достаточно трудно учесть при использовании методов классификации. Основанный на использовании техники декомпозиции спектральных смесей метод оценки дефолиации насаждений, под которой понимается доля утраченных в результате деструктивного воздействия зеленых фракций деревьев, в значительной мере свободен от указанных ограничений.

Эксперименты по оценке повреждений лесов насекомыми проводились с использованием данных SPOT-HRV (3.08.1995) и Ресурс-О1/МСУ-Э (28.06.1997) в Красноярском крае, где вспышка массового размножения сибирского шелкопряда в 1994-96 гг. привела к гибели темнохвойных лесов на площади более чем 0,7 млн. га.

Исходя из знаний о преимущественной подверженности темнохвойных пород данному виду воздействия, породном составе насаждений и влиянии элементов экосистемы на формирование спектрального отклика было выбрано следующее множество компонент спектральных смесей:

- деревья темнохвойных пород с полной дефолиацией;
- незатронутые повреждениями деревья темнохвойных пород;
- деревья светлохвойных пород;
- деревья лиственных пород;
- открытые участки напочвенного покрова.

Полученные оценки свидетельствуют о том, что в период с 3.08.1995 по 28.06.1997 средняя дефолиация насаждений в зоне повреждения лесов насекомыми выросла с 35,1 % до 40%. При этом сократилась площадь лесов с уровнем дефолиации 30-40%, за счет увеличения площади насаждений с дефолиацией 50-70%. Сравнение полученных результатов с данными наземного обследования позволило оценить значение коэффициента детерминации ($R^2=0,81$). К преимуществам данного метода оценки дефолиации можно отнести гибкость в выборе числа и границ классов повреждений, возможность учета влияния породной структуры и полноты

насаждений, а также отсутствие обязательного требования по наличию опорных данных.

В основе использования спутниковых изображений для выявления изменений в лесах лежит знание особенностей спектрального отражения различными компонентами лесных экосистем, а также связей между типами трансформаций лесного покрова и изменениями его отражательных свойств. Необходимо учитывать, что к различиям в отражательных свойствах могут приводить также различия фенологического состояния лесов, атмосферных и геометрических условий наблюдения. При выявлении изменений в лесах спутниковые изображения могут выступать в качестве источника информации о состоянии лесного покрова в различные отсчеты времени или сочетаться с другими пространственно-координированными данными (например, лесотаксационными базами данных ГИС), а в зависимости от типов сопоставляемых данных методы их анализа имеют существенные отличительные особенности.

Методология выявления изменений в лесах на основе спутниковых изображений отражена на рисунке 8. Изображения могут быть представлены как одиночными, так и разновременными данными спутниковых наблюдений, а банк данных ГИС формируется, как правило, по материалам лесоустройства. Предварительная обработка изображений включает в себя их геометрическую и радиометрическую коррекцию. Содержание последней зависит от методики тематического анализа и может включать коррекцию геометрических условий наблюдения, влияния атмосферы, рельефа местности или взаимную радиометрическую нормализацию разновременных изображений для интегральной компенсации влияния указанных выше факторов, а также различий фенологического состояния лесной растительности.

Формирование признакового описания зависит от доступности одномоментных или разновременных спутниковых изображений, согласованности типов изображений и условий их получения, видов подлежащих выявлению изменений и методов их детектирования. Таблица 5 дает представление о типах информативных признаков и методах выявления изменений в лесах при различных вариантах доступных данных.



Рис. 8 Логическая схема выявления изменений в лесах с использованием спутниковых изображений

Информативные признаки и методы выявления изменений в лесах

ТИПЫ ПРИЗНАКОВ	ПРИОРИТЕТНЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ		
	Разновременные изображения, полученные сенсором одного типа в близких условиях		Одиночные изображения и ГИС
<p><u>исходные изображения</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • спектральные яркости; <p><u>...или признаки, основанные на спектральных преобразованиях</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • спектральные индексы; • главные компоненты; <p><u>...или признаки, основанные на пространственном анализе</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • морфологические признаки; • текстурные признаки; <p><u>...или признаки, основанные на тематическом анализе данных</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • результаты классификации; • результаты декомпозиции смесей 	<ul style="list-style-type: none"> • анализ векторов изменений по разностным изображениям; • совместная классификация разновременных изображений; • сопоставление результатов независимого анализа разновременных изображений; • цветовой синтез разновременных изображений 	<ul style="list-style-type: none"> • сопоставление результатов независимого анализа разновременных изображений; • совместная классификация разновременных изображений 	<ul style="list-style-type: none"> • выявление аномальных значений признаков на гипотетически однородных участках; • сопоставление результатов тематической обработки изображений с картами лесов

Этап выделения *областей интереса* на изображениях выполняется с использованием банка данных ГИС и предназначен для локализации однородных участков с заданными лесотаксационными характеристиками. Значимость этого этапа варьирует в зависимости от используемой техники детектирования изменений. Он может быть отнесен к числу ключевых при выявлении изменений с использованием одномоментных изображений и носит вспомогательный характер при анализе разновременных спутниковых данных.

Набор начальных данных определяет не только формирование информативных признаков, но и технику последующего анализа. Наиболее широкий арсенал методов может быть использован при выявлении изменений по разновременным изображениям, полученным одним типом сенсора в сходных условиях съемки. Выполненные исследования позволили оценить преимущества и ограничения (табл. б) использования различных методов анализа разновременных изображений для выявления изменений в лесах, среди которых такие, как:

- метод сопоставления результатов независимой классификации изображений;
- метод поканальных разностей радиометрически нормализованных изображений;
- метод покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей.

Преимущества и ограничения методов выявления изменений в лесах по
разновременным спутниковым данным

МЕТОДЫ	ПРЕИМУЩЕСТВА	ОГРАНИЧЕНИЯ
Сравнение результатов классификации	<ul style="list-style-type: none"> – Высокий уровень независимости от различий фенологического состояния лесов и условий съемки – Простота интерпретации изменений 	<ul style="list-style-type: none"> – Типы выявляемых изменений ограничены заданным множеством классов – Невозможность выявления изменений переходных типов – Необходимость априорных знаний и активного участия эксперта
Поканальные разности взаимно нормализованных изображений	<ul style="list-style-type: none"> – Возможность выявления изменений переходного характера – Возможность полной автоматизации 	<ul style="list-style-type: none"> – Сложность интерпретации изменений – Существенная зависимость от различий фенологического состояния лесов и условий съемки – Необходимость задания порогов
Покомпонентные разности результатов анализа спектральных смесей	<ul style="list-style-type: none"> – Высокий уровень независимости от различий фенологического состояния лесов и условий съемки – Простота интерпретации изменений – Возможность выявления и оценки переходных изменений – Возможность полной автоматизации 	<ul style="list-style-type: none"> – Существенная зависимость результатов от множества анализируемых компонент – Необходимость данных о спектральных яркостях чистых компонент

Этап классификации/интерпретации изменений направлен на определение их типов и фильтрацию не связанных с изменениями лесов яркостных аномалий. К появлению последних могут приводить различия атмосферных условий и фенологического состояния лесов, ошибки пространственного совмещения изображений. Интерпретация осуществляется на основе экспертного анализа с использованием банка данных ГИС и опорных данных о спектральных яркостях основных элементов лесных экосистем.

По результатам исследований, в частности, установлено, что применение метода декомпозиции спектральных смесей позволяет выявлять по разновременным изображениям Landsat-ETM+ не только сплошнолесосечные вырубки, но и изменение сомкнутости насаждений в результате лесовосстановления или выборочных вырубок.

Использование указанных выше подходов часто ограничивается недоступностью спутниковых данных предыдущих лет. Это послужило основанием для разработки метода выявления изменений на основе использования изображений в сочетании с данными предыдущей лесоинвентаризации (рис. 9). Метод основан на реализации запросов к базе данных в составе ГИС лесоустройства и последовательном выборе гипотетически однородных по спектрально-отражательным характеристикам участков изображения. Яркостная однородность (в статистическом смысле) участков достигается на основе априорных знаний о зависимости

спектральных яркостей насаждений от их таксационных характеристик. Исходя из данной гипотезы, можно предположить, что изменениям в лесах должны соответствовать аномалии яркости изображения, что и положено в основу предложенного подхода.

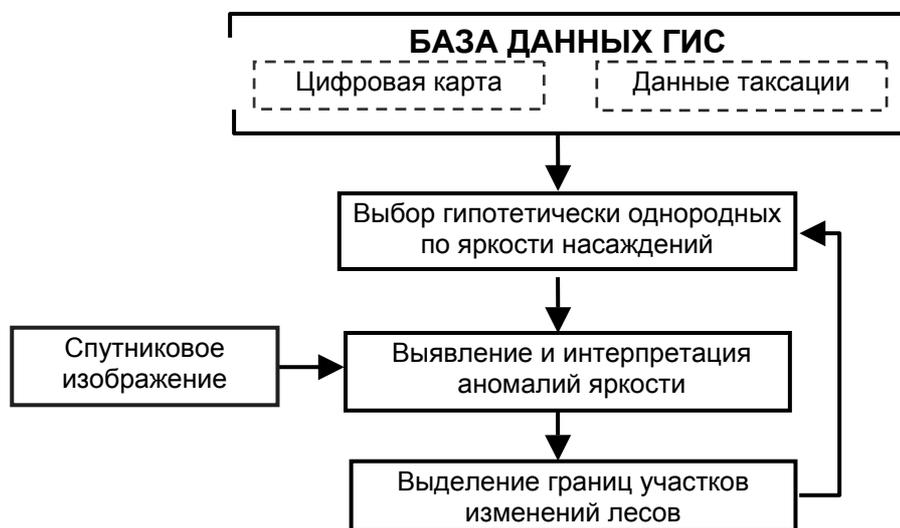


Рис. 9 Логическая схема выявления изменений в лесах на основе одиночного спутникового изображения и ГИС

Апробация метода проводилась с использованием данных SPOT-HRV (1995 год) и базы данных лесоинвентаризации (1991 год) для выявления вырубок в лесах Московской области. Анализ проводился для спелых и приспевающих насаждений с преобладанием сосны, ели, березы и осины. При интерпретации аномалий яркости учитывался класс бонитета насаждений. Были выявлены вырубки на площади 23,9 га, а среднее отклонение измеренных значений площадей отдельных вырубок от данных полевых обследований составило 12%.

Глава 5. Информационная система представления результатов спутникового мониторинга лесов. Необходимость обеспечения эффективного доступа широкого круга ученых и специалистов к данным о состоянии лесов послужила основанием для разработки информационной системы спутникового мониторинга бореальных экосистем TerraNorte (рис. 10).

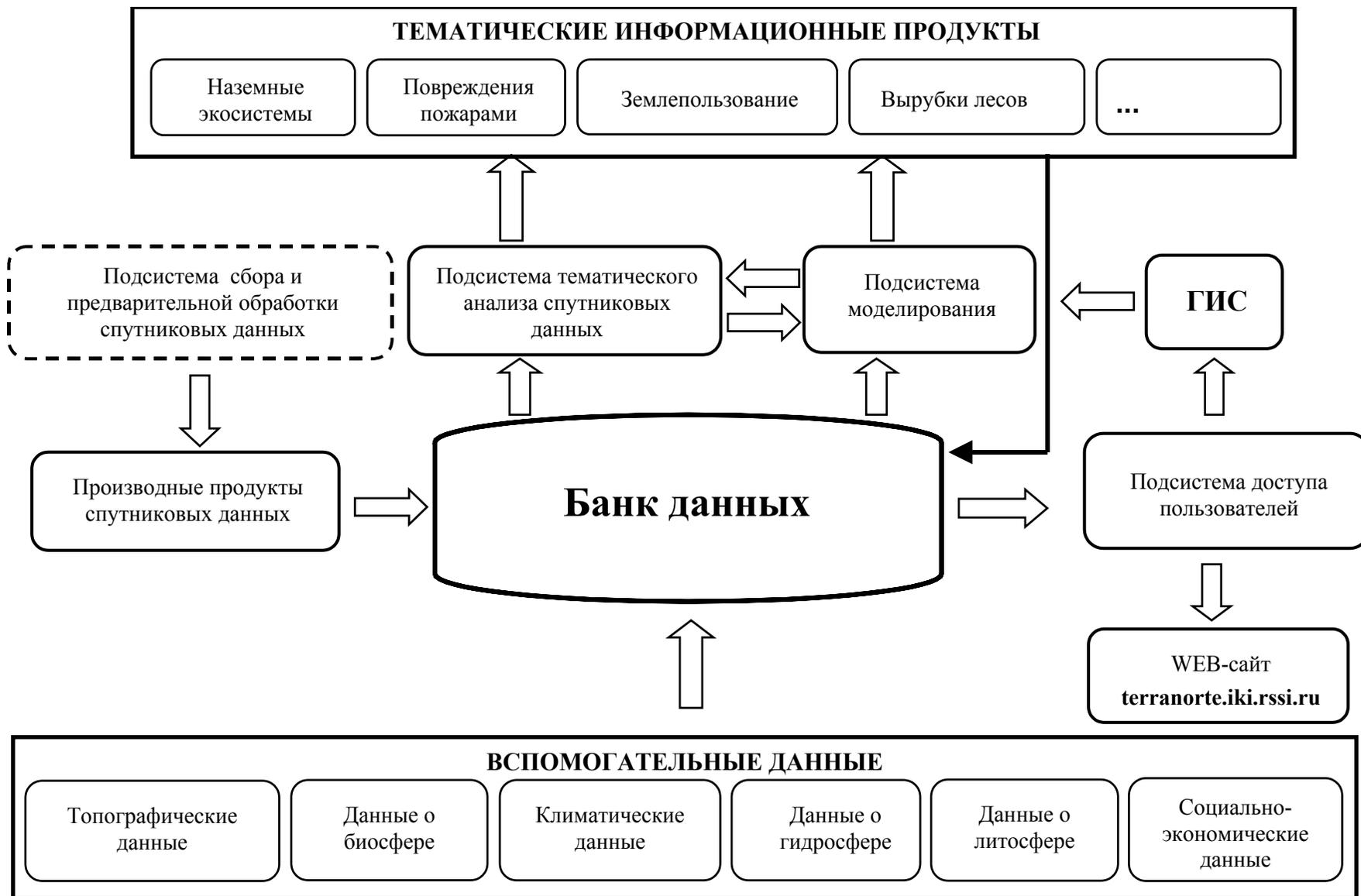


Рис. 10 Структура информационной системы спутникового мониторинга бореальных экосистем

Основным назначением системы TerraNorte является обеспечение систематизированного хранения и обновления банка географических данных о состоянии и динамике лесов и других типов экосистем, полученных на основе данных спутниковых наблюдений, а также доступа пользователей к информации с использованием Интернет-технологий в интересах проведения фундаментальных исследований, управления природными ресурсами и охраны окружающей среды.

Банк данных является ядром системы и содержит спутниковые данные и результаты их тематической обработки, а также полученные из различных источников данные о структуре и динамике экосистем, климате, социально-экономическом развитии и других аспектах состояния бореального региона. В зависимости от географического охвата в банке данных выделяются *циркумполярный, субконтинентальный, региональный и локальный уровни*. При этом циркумполярному уровню соответствуют наиболее обобщенные данные, охватывающие бореальный регион планеты, а субконтинентальному – данные на территорию Северной Евразии или России. Региональный и локальный уровни банка данных содержат наиболее детальную информацию соответственно для отдельных субъектов РФ и сети тестовых участков.

В банке данных системы можно выделить такие, различающиеся генезисом, форматами хранения и принципами использования, типы данных, как спутниковые изображения, цифровые карты и атрибутивные (фактологические) данные.

Данные спутниковых наблюдений представлены в банке данных динамическими наборами изображений, получаемых приборами NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra-MODIS, Landsat-TM/ETM+, SPOT-HRV, Метеор-3М /МСУ-Э.

В настоящее время банк данных содержит следующие ряды спутниковых данных на циркумполярном или субконтинентальном уровнях:

- данные SPOT-Vegetation (1998-2006 годы, охват циркумполярный);
- данные NOAA-AVHRR (1998-2006 годы, охват субконтинентальный);
- данные Terra-MODIS (2001-2006 годы, охват субконтинентальный).

Картографическая компонента банка данных представлена топографическими основами различных масштабов, картами административно-территориального деления, а также тематическими картами растительности, типов лесного покрова,

почв, водно-болотных комплексов, землепользования. В частности, циркумполярный и субконтинентальный уровни банка данных содержат такие наборы данных, как:

- циркумполярная база данных о повреждениях пожарами в 2000-2006 годах;
- глобальная карта наземных экосистем GLC 2000;
- карта наземных экосистем Северной Евразии;
- карта лесов России.

На локальном уровне банк данных содержит информацию о лесах тестовых участков, основу которой составляют цифровые планы лесонасаждений и совмещенные с ними базы лесотаксационных данных. На ряд тестовых участков имеются данные, отражающие состояние и изменения лесов в связи с вырубками, воздействием вспышек массового размножения насекомых и лесных пожаров.

С целью обеспечения эффективной выдачи информации пользователям, дополнительной обработки данных и создания новых информационных продуктов разработаны структура и формат внутреннего представления географической информации в банке данных.

Геоинформационная система предназначена для обеспечения доступа локальных пользователей к банку данных, пространственного анализа и моделирования, получения информационных продуктов более высокого уровня.

Подсистема удаленного доступа к банку данных на основе Интернет (<http://terranorte.iki.rssi.ru>) обеспечивает возможность получения информационных продуктов, а также синтезируемых по запросам табличных и графических документов. В частности, пользователю предоставляется возможность интерактивной реализации запросов к банку данных и получения информации о сезонной динамике повреждений экосистем пожарами. Программное обеспечение сервера позволяет получать данные о повреждениях для заданных политико-административных регионов различного уровня (субъекты РФ, федеральные округа, страны) с различным уровнем обобщения по типам экосистем.

Раздел «Карты on-line» предназначен для интерактивного доступа к спутниковым и картографическим данным непосредственно в окне web-браузера, что дает возможность их анализа без инсталляции специального программного обеспечения на локальном компьютере пользователя.

Техническая реализация системы основана на использовании обеспечивающих хранение банка данных файл-серверов, данные между которыми распределены в соответствии с их статусом, типом и форматом хранения. Подготовка информационных продуктов осуществляется автоматическими и автоматизированными алгоритмами обработки данных, реализованными в виде специальных программных модулей и стандартных пакетов обработки данных дистанционного зондирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит результаты исследований и разработок автора, представляющие собой решение важной научной проблемы развития методов обработки спутниковых данных, получаемых оптико-электронными системами дистанционного зондирования, для оценки состояния и динамики лесов. Выполненный автором анализ современных приоритетов в области информационного обеспечения управления лесными ресурсами, охраны и защиты лесов, фундаментальных исследований в области глобальных изменений биосферы и климата, а также разработанных к настоящему времени технических средств и методов дистанционного зондирования позволил предложить структуру и обосновать перспективные направления развития системы спутникового мониторинга лесов. Проведенные исследования информационных возможностей современных спутниковых приборов дистанционного зондирования в оптическом диапазоне электромагнитного спектра дали возможность оценить потенциал их использования для мониторинга лесов. Предложенные в работе новые признаки, критерии и алгоритмы распознавания различных типов лесных и других наземных экосистем, оценки их структурных характеристик и выявления изменений в лесах под воздействием деструктивных факторов были положены в основу разработки соответствующих методов обработки спутниковых данных дистанционного зондирования в интересах решения задач мониторинга лесов. К их числу относятся картографирование и определение породной структуры лесов, детектирование и оценка повреждений лесов в связи с воздействием пожаров, насекомых, вырубок, а также других природных и антропогенных факторов.

По результатам выполненных в диссертационной работе исследований и разработок можно сделать следующие выводы:

- Предложенная структура системы спутникового мониторинга лесов отвечает современному уровню развития технических средств и методов дистанционного зондирования Земли, а также существующим приоритетам в области управления лесными ресурсами, охраны окружающей среды, исследований глобальных изменений биосферы и климата;
- Разработанные методы предварительной обработки временных серий данных спутниковых наблюдений позволяют минимизировать влияние облаков, сезонного присутствия снежного покрова, различий в условиях наблюдения, аппаратных шумов сенсора, что существенно повышает эффективность тематического анализа спутниковых данных для решения задач мониторинга лесов;
- Предложенные признаки, характеризующие спектральные, спектрально-временные и спектрально-угловые отражательные свойства подстилающей поверхности, могут быть получены с использованием временных серий данных спутниковых наблюдений и позволяют распознавать основные типы лесов и других наземных экосистем;
- Основанный на комплексном использовании характеристик отраженного излучения и последовательной семантической декомпозиции спектрально-временных кластеров метод позволяет выполнять классификацию основных типов подстилающей поверхности для картографирования наземных экосистем по спутниковым данным;
- Созданная с использованием данных спутниковых наблюдений SPOT-Vegetation на основе разработанных в диссертационной работе методов карта наземных экосистем Северной Евразии представляет собой на данном уровне пространственного охвата один из наиболее надежных в настоящее время источников информации о лесах региона, что подтверждается данными оценки достоверности полученных результатов;
- Разработанный автоматический метод выявления повреждений лесов и другой растительности пожарами основан на комплексной обработке временных серий данных спутниковых наблюдений приборами SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-

MODIS и комбинированном учете признаков, характеризующих изменения температурных и спектрально-отражательных свойств поверхности. Валидация полученных результатов с использованием опорных данных продемонстрировала высокий уровень точности разработанного метода;

- Созданная на основе разработанного в диссертационной работе метода циркумполярная база данных о повреждениях экосистем пожарами впервые позволила получить репрезентативные глобальные оценки масштабов и сезонной динамики пирогенных повреждений в различных типах лесного покрова;
- Основанные на использовании оригинальных подходов методы оценки состояния и динамики лесов по многоспектральным спутниковым изображениям позволяют определять породную структуру насаждений, а также выявлять и оценивать изменения в лесах в результате воздействия различных деструктивных факторов;
- Разработанная информационная система обеспечивает систематизированное хранение и обновление банка данных о состоянии и динамике лесных экосистем на различных уровнях пространственного охвата, а также эффективный доступ пользователей к результатам спутникового мониторинга на основе Интернет-технологий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абушенко Н.А., Барталев С.А., Беляев А.И., Ершов Д.В., Захаров М.Ю., Лупян Е.А., Коровин Г.Н., Кошелев В.В., Крашенинникова Ю.С., Мазуров А.А., Минько Н.П., Назиров Р.Р., Семенов С.М., Тащилин С.А., Флитман Е.В., Щетинский В.Е. Опыт организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // Исследование Земли из космоса, 1998. - №3. - С. 89-95.
2. Абушенко Н.А., Барталев С.А., Беляев А.И., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Кошелев В.В., Лупян Е.А., Крашенинникова Ю.С., Мазуров А.А., Минько Н.П., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России // Научные технологии, 2000. - Т. 1.- № 2. - С.

- 4-18.
3. Арманд Н.А., Барталев С.А., Илларионов Г.П., Кондауров Н.С., Сухих В.И., Харин О.А., Чумаченко С.И., Шалаев В.С., Шмаленюк А.С. Некоторые итоги реализации Федеральной целевой программы Государственной поддержки интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2000 годы // Экология, мониторинг и рациональное природопользование, Вып. 302 (II), М.: МГУЛ, 1999. - С. 305-309.
 4. Барталев С.А., Брейдо М.Д. Коррекция пространственно-временных искажений ввода фотоизображений в систему интерактивной обработки // Исследование Земли из космоса, 1988. - № 2. - С. 83-89.
 5. Барталев С.А., Брейдо М.Д. Автоматизированное определение таксационных характеристик кустарниковой растительности пустынь по дистанционным данным // Геодезия и аэрофотосъемка, 1989. - № 4. - С. 94-102.
 6. Брейдо М.Д., Жирин В.М., Барталев С.А., Бахтинова Е.В. Определение некоторых характеристик кормовых ресурсов пустынных пастбищ по аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса, 1989. - № 3. - С. 66-76.
 7. Барталев С.А., Каторгин М.А. Автоматизация обработки материалов космической и самолетной съемок для оценки состояния растительного покрова пустынь // Лесохозяйственная информация, М.: ВНИИЦЛесресурс, 1990. - № 1. - 8 с.
 8. Барталев С.А., Жирин В.М., Романович Э.Н. Применение ГИС-технологии в решении задач мониторинга лесов водоохранной зоны озера Байкал // Проблемы мониторинга и моделирования динамики лесных экосистем: Сб. статей под ред. академика РАН А.С. Исаева, М.: «Экос-информ», 1995. - С. 59-76.
 9. Барталев С.А., Жирин В.М., Ершов Д.В. Сравнительный анализ данных спутниковых систем Космос-1939, SPOT и Landsat-TM при изучении бореальных лесов // Исследование Земли из космоса, 1995. - №1. - С. 101-114.
 10. Барталев С.А., Коровин Г.Н., Шлапак Б.В. Оценка распознаваемости лесных пожаров по данным радиометра AVHRR со спутников серии NOAA // Международный форум по проблемам науки, техники и образования, М.:

- МИИГАиК, 1997. - Вып. II (8). - С. 22-25.
11. Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С. Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исследование Земли из космоса, 1998. - № 3. - С. 95-107.
 12. Барталев С.А., Ершов Д.В., Новик В.П. Изучение лесов России по данным дистанционного зондирования из космоса // ARCREVIEW, М.: DATA+, 2001. - №2 (17). - С. 7.
 13. Барталев С.А., Белвард А.С., Ершов Д.В. Новая карта типов земного покрова бореальных систем Евразии по данным SPOT4-VEGETATION // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Сб. статей под ред. В.И. Сухих, М.: МГУЛ, 2002. - С. 30-34.
 14. 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, Вып. 5 (118), редактор академик РАН Г.А. Жеребцов, Новосибирск: СО РАН, 2004. - С. 12-14.
 15. Барталев С.А., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, М.: Полиграф сервис, 2004. - С. 131-139.
 16. Барталев С.А., Исаев А.С. Современные возможности спутникового мониторинга динамики лесных бореальных экосистем Северной Евразии // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты: Сб. статей под ред. А.Д. Волкова и А.Н. Громцева, Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. - С. 18-28.
 17. 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: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Том II, М.: «GRANP polygraph», 2005. - С. 354-

18. 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: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Том II, М.: «GRANP polygraph», 2005. - С. 343-353.
19. Барталев С.А., Егоров В.А., Курятникова Т.С., 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: Сб. статей под ред. академика РАН А.С. Исаева, ИЛ СО РАН, Красноярск, 2005. - С. 23-27.
20. Барталев С.А., Исаев А.С., Лупян Е.А. Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сибирский экологический журнал, 2005.- № 6.- Т. 12. - С. 1039-1054.
21. Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Том II, М.: «GRANP polygraph», 2005. - С. 217-227.
22. Барталев С.А., Лупян Е.А. Спутниковый мониторинг бореальных экосистем // Природа. - 2005. - № 9. - С.44-53.
23. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса, 2006. - № 3.- С. 68-75.
24. Барталев С.А., Исаев А.С., Ершов Д.В. Актуальные задачи, возможности и перспективные направления развития методов спутникового мониторинга бореальных лесов // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Сб. докладов IV Международной конференции (Москва 17-19 апреля 2007 г.), отв. редактор

- В.И. Сухих, М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. - С. 20-22.
25. Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А. Алгоритм детектирования и оценки площадей поврежденной пожарами растительности по данным SPOT-Vegetation. // Труды международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК, М.: Геоинформатика, 2004. - С. 199-204.
26. Егоров В.А., Барталев С.А. Анализ временных серий спутниковых данных SPOT-Vegetation для детектирования поврежденной пожарами растительности Северной Евразии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Том II, М.: «GRANP polygraph», 2005. - С. 380-387.
27. 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, 2006.- Вып.2.- С. 98-109.
28. Жирин В.М., Барталев С.А., Ершов Д.В. Спектрометрическая оценка состояния древесных растений при мониторинге лесов // Проблемы мониторинга и моделирования динамики лесных экосистем: Сб. статей под ред. академика РАН А.С. Исаева, М.: «Журнал Экос-информ», 1995. - С. 24-42.
29. Корец М.А., Данилова И.В., Сухинин А.И., Бычков В.А., Барталев С.А. Использование данных Envisat MERIS для оценки степени нарушенности лесов пожарами // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов, Сб. статей под ред. академика РАН А.С. Исаева, Красноярск: ИЛ СО РАН, 2005. - С. 58-62.
30. Корец М.А., Рыжкова В.А., Барталев С.А. Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT-MERIS и SPOT-Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Т. 2., М.: «Азбука-2000», 2006.- С. 330-334.
31. Коровин Г.Н., Барталев С.А., Беляев А.И. Интегрированная система мониторинга лесных пожаров // Лесное хозяйство, 1998. - № 4. - С. 45-48.
32. Лупян Е.А., Барталев С.А., Бурцев М.А., Егоров В.А., Мазуров А.А., Прошин А.А. Построение долговременного архива спутниковых данных по территории России для решения задач оценки состояния и динамики наземных экосистем

- // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Сб. докладов IV Международной конференции (Москва 17-19 апреля 2007 г.), отв. редактор В.И. Сухих, М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007 - С. 57-60.
33. Сухих В.И., Барталев С.А., Жирин В.М. Использование космических изображений и ГИС для инвентаризации и мониторинга лесов России // Дистанционное зондирование Земли и решение задач природопользования и экологии на Федеральном и региональном уровнях, М.: ЦПИ РКА, 1996. - С. 63-69.
34. Уваров И.А., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Ховратович Т.С. Структура и функциональные возможности информационной системы TerraNorte для поддержки спутникового мониторинга бореальных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Т. 2, М.: «Азбука-2000», 2006.- С. 375-379.
35. Лупян Е.А., Зиман Я.Л., Лаврова О.Ю., Барталев С.А. Создание систем, методов и технологий дистанционного зондирования // Аэрокосмический курьер, 2007. -№2. - С. 22-25.
36. Bartalev S., Deshayes M., Durrieu S., Fabre G., Stach N., Sukhikh V. Monitoring by change detection in three different forest environments // Applications of Remote Sensing in European forest Monitoring. - 1996. - EUR 17685 EN - P. 293-308.
37. Bartalev S., Dwyer E., Eva H., Feltz J., Giglio L., Justice C., Korovin G., Lioussé C., Michou M., Pinnock S., Prins E., Rasmussen K., Roy D. and B. Stocks Report of the 4th IGBP-DIS Fire Working Group Meeting // IGBP-DIS Working Paper #21, IGBP. - Toulouse, France. - 1999. - 65 p.
38. Bartalev S., Achard F., Erchov D. and Gond V. The potential contribution of SPOT4/VEGETATION data for mapping Siberian forest cover at the continental scale // Proceedings of the VEGETATION conference, Italy. - 2000. - P. 127-142.
39. Bartalev S.A., Belward A.S. Land cover and phenological monitoring in boreal ecosystems using the SPOT-VEGETATION instrument: new observations for climate studies // Use of Earth Observation data for phenological monitoring, JRC, Ispra - 2002. - P. 41-48.

40. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. - Vol. 24. - № 9 - 2003. - P. 1977-1982.
41. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. and Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation // International Journal of Remote Sensing. - Vol. 28. - № 6 - 2007. - P.1397-1404.
42. Bartholomé E., Belward A.S., Achard F., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Grégoire J-M., Mayaux P., Stibig H-J. GLC 2000 - Global Land Cover mapping for the year 2000 // European Commission, JRC. - EUR 20524 EN - 2002. - 55 p.
43. Dontchenko V.V., Johannessen O.M., Bobylev L.P., Bartalev S.A. ERS/SAR data application for Russian boreal forests mapping and monitoring // Proc. IGARSS'99. - 1999. - P. 311-314.
44. Groisman P. Ya., Bartalev S.A. A New Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI): Science Plan of Integrated Approach to Regional Climate and Environment Change Studies // Global and Planetary Change, 2006. Vol./Issue: 56/3-4, P. 215-234.
45. Isaev A.S., Korovin G.N., Bartalev S.A., Ershov D., Janetos A., Kasischke E.S., Shugart H.H., French N.H., Orlick B.E. and Murphy T.L. Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions // Climate Change - Vol. 55 (1-2). - 2002. - P. 235-249.
46. Janetos A., Isaev A., Sukhikh V., Zhirin V., Bartalev S., Ershov D., Shatalov A., Gurskiy M., Pismenniy A., Ziemelis T., Shugart H., Orlick B., Murphy T., Kasischke E., French N. and Stone T. Boreal Forest Characterization and Sustainability Study // Report on Phase I and II Results. U.S. Russian Joint Comm. on Econ. & Tech. Cooperation Environ. WG. 1998. 13 p.
47. Pereira J.M.C., Flasse S., Hoffman A., Pereira J.A.R., González-Alonso F., Trigg S., Vasconcelos M.J.P., Bartalev S., Lynham T.J., Korovin G., Lee B.S. Operational use of remote sensing for fire management: regional case studies // Global and Regional Wildfire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort. - SPB Acad. Publ., Netherlands. - 2001. - P.267-290.