

На правах рукописи

УДК 528.8

**Королева Наталья Васильевна**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И  
АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ  
С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЕСОВ**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН и в Московском Государственном Университете Геодезии и Картографии

Научный руководитель: кандидат технических наук  
Ершов Дмитрий Владимирович

Научный консультант: доктор геолого-минералогических наук  
Зверев Анатолий Тихонович

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Живичин Алексей Николаевич

кандидат технических наук  
Стеценко Александр Филиппович

Ведущая организация: Государственный научно-исследовательский и производственный центр «Природа»  
(ФГУП «Госцентр «Природа»)

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» декабря 2009 года в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д.212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний Ученого совета.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_» ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Краснопевцев Б.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Данные дистанционного зондирования с искусственных спутников Земли находят свое применение в изучение лесов России с 70-х годов прошлого века. Космические снимки используются для обнаружения и оценки последствий пожаров, контроля вырубок, выявления промышленных загрязнений, мониторинга массового размножения насекомых-вредителей и решения многих других хозяйственных и экологических задач. Однако эффективное использование спутниковых изображений невозможно без соответствующих методов и алгоритмов их обработки.

По мере развития спутниковых систем, когда на смену фотографическим приборам дистанционного зондирования пришли многоспектральные сканеры, значительно расширились свойства принимаемой информации. Современные спутниковые системы получают снимки с высокой оперативностью, ежедневной периодичностью и регулярным потоком данных, что открывает новые возможности для усовершенствования существующих методов и алгоритмов обработки космических снимков.

Наличие длительного периода спутниковых наблюдений, широкого охвата территории, и как следствие обработка большого массива данных, требует минимизации участия экспертов в процессе их тематической интерпретации. На разработку таких, в максимальной степени автоматизированных методов и алгоритмов обработки космических снимков, и были направлены исследования в рамках представленной диссертационной работы.

**Цели и задачи исследований.** Целью диссертации явилась разработка и исследование методов и алгоритмов обработки космических снимков среднего пространственного разрешения, полученных съемочной системой Terra-MODIS, с целью выявления очагов размножения сибирского шелкопряда и определения степени повреждения лесов этим вредителем. Достижение данной цели потребовало решения следующих задач:

- изучение действующих современных спутниковых систем, используемых для дистанционного мониторинга лесов;
- исследование и анализ существующих методов и алгоритмов обработки космических снимков с целью выявления повреждения лесов, вызванных насекомыми-вредителями;
- разработка алгоритма предварительной обработки данных наблюдений спектрорадиометра MODIS и формирование наборов спутниковых изображений, очищенных от влияния облачного и снежного покровов;
- разработка автоматизированного метода обработки многолетних временных серий спутниковых изображений MODIS для детектирования участков повреждения лесов сибирским шелкопрядом;
- разработка метода обработки спутниковых изображений MODIS для оценки степени повреждения лесов сибирским шелкопрядом;
- проведение анализа полученных результатов и оценка их точности.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые предложен автоматизированный метод анализа многолетних разновременных серий спутниковых изображений MODIS для выявления повреждений лесов в результате массового размножения сибирского шелкопряда;
- разработан метод обработки спутниковых изображений среднего пространственного разрешения MODIS для оценки степени повреждения лесов сибирским шелкопрядом.

**Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:**

- автоматизированный алгоритм предварительной обработки данных наблюдений спектрорадиометра MODIS для формирования очищенных от влияния облачности и снежного покрова спутниковых изображений в интересах лесопатологического мониторинга;
- результаты исследования автоматизированного метода обработки многолетних разновременных серий спутниковых изображений MODIS для

детектирования очагов массового размножения сибирского шелкопряда на примере Красноярского края;

- метод обработки спутниковых изображений среднего пространственного разрешения MODIS с целью оценки степени повреждения лесов сибирским шелкопрядом.

**Практическая значимость.** Метод детектирования очагов повреждения лесов сибирским шелкопрядом был использован для получения информации о размерах площадей и пространственном размещении поврежденных участков леса в Красноярском крае и Иркутской области в период с 2002 по 2006 гг., что дало возможность сформировать базу данных многолетних наблюдений очагов повреждений в исследуемом регионе. Результаты работы (растровые изображения и векторные слои участков повреждения лесов насекомыми-вредителями) использованы при разработке Блока дистанционного лесопатологического мониторинга (БЛПМ) Информационной системы дистанционного мониторинга лесов (ИСДМ Рослесхоз). Документально подтвержден ввод в опытную эксплуатацию программного комплекса выявления крупномасштабных усыханий лесов от насекомых-вредителей и других факторов непиrogenного характера по данным спектрорадиометра MODIS в БЛПМ ИСДМ Рослесхоз, созданного на основе разработанного метода.

**Апробация.** Основные положения диссертации и результаты работы докладывались на 7 российских и международных конференциях. На третьей открытой Всероссийской конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» автор отмечен дипломом за второе место в конкурсе молодых ученых.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 11 научных работ, 2 из которых помещены в рекомендованных ВАК России журналах. Все основные разработки и исследования методов и алгоритмов и их результаты получены автором лично.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая 29 рисунков, 20 таблиц и 4 приложения.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы. Сформулированы основные цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе «Краткий обзор существующих спутниковых систем и методов дешифрирования космических снимков для выявления повреждений лесов» проанализированы причины и особенности возникновения вспышек сибирского шелкопряда, приведено описание спектрально-отражательных свойств древесной растительности различного состояния, представлен обзор действующих систем спутниковой съемки лесов, а также изучен существующий опыт использования ДДЗ в применении к задачам лесопатологического мониторинга.

Решение различных задач мониторинга лесов требует привлечения адекватных по своим параметрам спутниковых систем дистанционного зондирования исходя из характеристик объектов наблюдения, а именно их пространственных размеров и структуры, особенностей временной динамики и спектрально-энергетических свойств.

Для картографирования лесов на больших территориях используются данные спутниковых систем глобального обзора NOAA-AVHRR и SPOT-Vegetation (1-4 км), позволяющие проводить ежедневный мониторинг и детектирование повреждений лесов насекомыми-вредителями, в том числе сибирским шелкопрядом. Однако, ввиду относительно низкого пространственного разрешения их использование может приводить к значительным погрешностям в оценках покрытой лесом площади на локальном уровне. При этом выявление поврежденных лесов возможно только при наличии очагов размножения насекомых-вредителей на десятки или сотни тысяч гектар.

Данные высокого пространственного разрешения спутников Landsat-TM/ETM+ и SPOT-HRV (10-30 метров) позволяют добиваться более точных оценок и могут быть эффективно использованы для изучения лесов на локальном уровне. Однако ограниченная доступность снимков для сплошного покрытия больших территорий и спектральная изменчивость лесного покрова в течение вегетационного сезона делает затруднительной применение однотипных алгоритмов автоматической обработки спутниковых изображений высокого разрешения и экстраполяцию получаемых результатов на уровень крупных регионов. Использование данных высокого и сверхвысокого разрешения также существенно ограничивается их относительно высокой стоимостью, низкой частотой проведения наблюдений, а также влиянием облачного покрова и дымов от пожаров и т.п., затрудняющих регулярный спутниковый мониторинг повреждений в течение вегетационного сезона.

Более информативными космическими снимками для изучения крупномасштабных процессов в лесах, связанных с массовым размножением насекомых-вредителей по ряду технических характеристик может обеспечить система дистанционного зондирования Terra/Aqua-MODIS. Доступность, свободное распространение, возможность ежедневно наблюдать одну и ту же территорию за счет широкой полосы обзора, большое количество спектральных каналов и три пространственных разрешения от 250 метров до 1 км позволяют одним спутником охватить задачи и регионального и национального масштаба.

Наличие доступного набора спутниковых данных является одним из важнейших факторов, определяющих последующие методы и алгоритмы обработки космических снимков. Возможно использование двух принципиально разных подходов: один из них предполагает использование изображений полученных в некий фиксированный момент времени в процессе или после деструктивного воздействия с последующей их визуальной интерпретацией или автоматической классификацией. Другой подход основан на сопоставлении одновременных изображений, первое из которых получено перед воздействием, а второе после него.

Большинство исследователей в своих методах по оценке повреждения (дефолиации) лесных насаждений применяют алгоритмы управляемой или неуправляемой классификаций изображений. Однако методы классификации изображений позволяют распознавать весьма ограниченное (как правило, не более трех) число классов дефолиации. Данные ограничения возникают в результате низкого пространственного разрешения или недостаточно регулярного поступления спутниковой информации. Другое существенное ограничение связано с необходимостью подготовки репрезентативного набора опорных данных для классификации, сопряженного, как правило, с проведением дорогостоящих авиационных и наземных обследований. Кроме того, большинство методов предусматривает участие эксперта в процессе обработки, а также отсутствие длительного периода спутниковых наблюдений за изменениями в лесном регионе, и, следовательно, отсутствие возможности автоматизации задач.

Основной целью исследований, изложенных в диссертации, является разработка методов и алгоритмов обработки космических снимков, направленных на возможность автоматизации выявления и оценки степени дефолиации лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом. Методы выявления поврежденных насекомыми участков леса базируются на анализе многовременных данных спектрорадиометра MODIS, позволяющих проводить ежемесячный мониторинг крупномасштабных изменений в лесах и наблюдать весь ареал повреждений. На начальных этапах обработки спутниковых данных не требуется наличие априорных данных о повреждении.

Во второй главе «Исследование информативных возможностей данных спектрорадиометра MODIS» приведены основные характеристики данных, получаемых съемочной системой MODIS, проведен сравнительный анализ информативности 16-ти дневных и 30-ти дневных композитных изображений, полученных по космическим снимкам MODIS, проанализированы спектральные характеристики объектов наблюдения при дистанционном зондировании лесных территорий. В процессе исследований определена комбинация спектральных



каналов и соответствующих им вегетационных индексов, информативных для выявления очагов размножения сибирского шелкопряда. А также исследована межгодовая и сезонная динамика и изменчивость вегетационных индексов поврежденных насекомыми лесов.

Полученные со спутника данные спектрорадиометра MODIS в центрах приема NASA по программе EOS (Earth Observing System) проходят несколько уровней предварительной обработки, результатом которой является набор стандартных производных продуктов спутниковых изображений с улучшенными спектральными характеристиками. Данные с первичным уровнем предобработки представлены в виде ежедневных продуктов, содержащих информацию суточных наблюдений прибора. Из первичных продуктов формируются композитные безоблачные изображения, вегетационные индексы и другие тематические продукты за разные временные интервалы.

В диссертационной работе был проведен сравнительный анализ информативности спектральных каналов 16-ти дневного композитного изображения (продукт NASA MOD13Q1) и 30-ти дневного композитного изображения (продукт ИКИ РАН), созданных из ежедневных первичных продуктов MOD09GQK, MOD09GHK, MOD09GST. Проведенный анализ делимости объектов близких по спектрально-отражательным характеристикам (гари, вырубки, болота и др.) с повреждениями лесов от сибирского шелкопряда показал, что спектральные каналы 30-ти дневного композитного изображения показывает наилучшую общую делимость между классами по сравнению со спектральными каналами 16-ти дневного композитного изображения. Это связано с тем, что продукт NASA включает средний ИК канал 2105 – 2155 нм, а продукт ИКИ РАН канал 1628 – 1652 нм. Изучение динамики спектральной яркости лесов до и после повреждений выявило также, что межгодовой анализ композитных изображений, является наиболее информативным по сравнению с внутрисезонным.

По результатам спектрального анализа и на основе существующих методов оценки состояния лесов по космическим снимкам при разработке метода

дополнительно с исходными каналами было решено использовать комбинацию выбранных каналов в виде нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI и коротковолнового вегетационного индекса SWVI, чувствительных к изменению в состоянии зеленых фракций древесной растительности:

$$NDVI = \frac{R_{0,85} - R_{0,65}}{R_{0,85} + R_{0,65}} , \quad (1)$$

$$SWVI = \frac{R_{0,85} - R_{1,65}}{R_{0,85} + R_{1,65}} , \quad (2)$$

где  $R_{0,65}$ ,  $R_{0,85}$  и  $R_{1,65}$  - спектральные каналы композитного изображения MODIS, соответствующие 620-670 нм, 841-876 нм и 1628-1652 нм диапазонам электромагнитного спектра.

Физической предпосылкой для использования представленных индексов является наименьшее отражение света хлорофиллом здоровых растений  $R_{0,65}$  в красной зоне спектра, максимальное отражение неповрежденной растительности  $NIR_{0,85}$  в ближней ИК части спектра, а также низкий уровень отражения светового излучения водой  $MIR_{1,65}$  в среднем ИК спектральном диапазоне, реагирующем на изменение влагосодержания в подстилающей поверхности и в атмосфере.

В третьей главе «Методика обработки космических снимков с целью оценки степени повреждения лесов» представлена методика оценки степени дефолиации лесов сибирским шелкопрядом по данным космической съемки, включающая автоматизированный алгоритм предварительной обработки данных спектрорадиометра MODIS, методы тематической обработки спутниковых изображений для выявления поврежденных лесных территорий и оценки степени дефолиации насаждений. Исследованы взаимосвязи участков повреждений лесов с формами рельефа и удаленностью от дорог для разработки правил отнесения обнаруженных изменений к повреждениям лесов от сибирского шелкопряда.

Оценка степени дефолиации лесов, поврежденных в результате массового размножения насекомых-вредителей, включает в себя три этапа (базовых блока):

1. предварительная обработка спутниковых изображений;
2. детектирование крупномасштабного усыхания;
3. оценка степени повреждения лесных массивов.

В первом блоке производится обработка исходных спутниковых изображений для улучшения их качества и подготовка для последующей тематической обработки.

Во втором проводится выявление участков усыхания лесов и идентификация возможных причин их нарушения, включая территории лесов, непосредственно поврежденные сибирским шелкопрядом.

В третьем блоке на территориях, пораженных сибирским шелкопрядом, производится оценка степени повреждения лесных массивов.

**Блок 1.** Предварительная обработка разработана для улучшения качества 16-ти дневных композитных изображений, построенных по данным Terra-MODIS. Продукт MOD13Q1 создается по стандартной технологии NASA методом выбора из всего доступного набора измерений за 16 дней максимальных значений NDVI с учетом положения пикселя относительно надира. В результате такого подхода композитное изображение содержит фрагменты облачности и ее тени, снег, лед, дымы от пожаров, отдельные области с более низким разрешением, сбойные измерения датчиков.

С целью минимизации влияния вышеперечисленных недостатков был разработан алгоритм дополнительной обработки продуктов MOD13Q1, состоящий из нескольких этапов (Ершов Д.В., Девятова Н.В., 2005):

- Маскирование фрагментов облачности, снега/льда, дымов от пожаров на основе экспериментально подобранных порогов на основе анализа спектральных сигнатур яркостей этих объектов;
- Учет влияния различий в пространственном разрешении на основе анализа вспомогательных данных, характеризующих положение спутника и Солнца в момент съемки;

- Сглаживание временных композитных серий с учётом маскирующих изображений, отсутствующие из-за сбоев значения во временной серии заполняются линейной аппроксимацией временного ряда.

Выделение облачности, снега, льда, дымов от пожаров выполняется с использованием порогов, подобранных экспериментально на основе анализа спектральных сигнатур яркостей этих объектов. В результате обработки изображения формируется тематический слой, содержащий классы облачности, снега, льда и смешанный класс, объединяющий все три объекта. Земная поверхность свободная от облаков, снега и льда кодируется отдельным классом.

$$CP1 = \begin{cases} (R_{0,46}/10000 \geq 0,1) \text{ and } (NDSI \geq 0.4), 1 \\ (R_{0,46}/10000 \geq 0,1) \text{ and } (0.4 > NDSI \geq -0.2), 2 \\ (R_{0,46}/10000 \geq 0,1) \text{ and } (-0,2 > NDSI > -0,5), 3 \\ (R_{0,46}/10000 < 0,1) \text{ or } (NDSI \leq -0.5), 4 \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

где класс 1 – снег, лед

класс 2 – облачность

класс 3 – смешанный класс (облачность, дымы от пожаров, снег/лед)

класс 4 – земная поверхность, без вышеперечисленных классов

Для учета влияния различий в пространственном разрешении используется вспомогательный канал, отражающий значение зенитного угла прибора относительно вертикальной оси. Используя модель экспоненциальной зависимости значения пространственного разрешения от угла наклона сканирующего луча прибора, был определен порог для пикселей композитных изображений, реальное разрешение которых превышает 250 метров не более чем на 20%. В результате формируется тематический слой:

$$CP2 = \begin{cases} (|K9| > 0 \text{ and } |K9| < 20^\circ), 0 \\ 5, \text{ в противном случае} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $K9$  – канал с зенитными углами наблюдения датчика MODIS продукт MOD13Q1 (250 м);

код 5 – плохое разрешение.

На основе двух маскирующих изображений формируется единая маска «поврежденных» пикселей  $\{CP\}=CP1 \cup CP2$ . Полученный продукт используется для обнуления «плохих» пикселей исходного изображения.

В сформированных временных сериях спутниковых изображений в ряду значений яркости данного пикселя могут встречаться однократные аномальные выбросы, обусловленные различиями условий освещения и наблюдения, остаточным влиянием облаков, снега и теней. Для фильтрации таких выбросов производится расчет среднего значения  $\mu$  и стандартного отклонения  $\sigma$  яркостей пикселей временных серий спутниковых изображений. Пиксели, выходящие за границы интервала  $[\mu - 1,5 \cdot \sigma; \mu + 1,5 \cdot \sigma]$ , обнуляются. Отсутствующие из-за сбоев значения заполняются линейной аппроксимацией временного ряда.

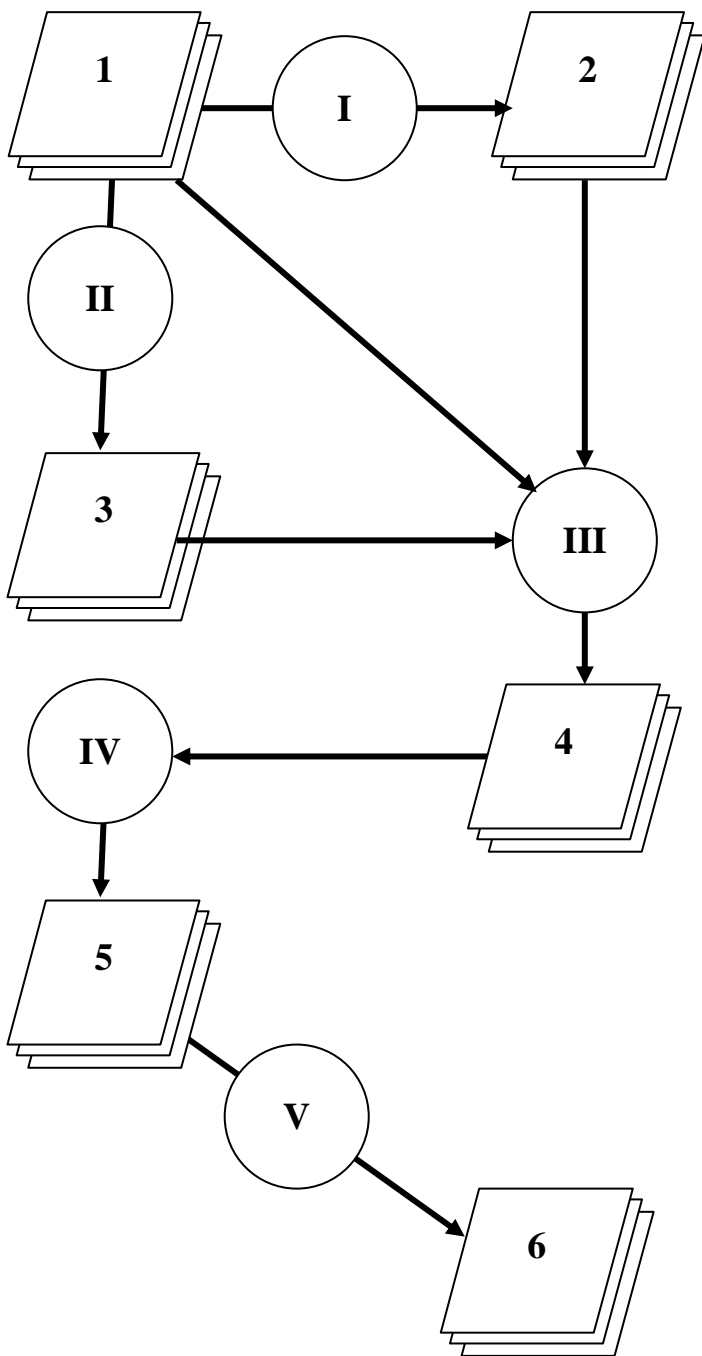
Блок-схема предварительной обработки изображений MODIS для формирования улучшенных композитных изображений представлена на рис. 1.

Улучшенные 16-ти композитные изображения использовались при сравнительном анализе информативности данных MODIS для тематической обработки с 30-ти дневными продуктами ИКИ РАН (Егоров В.А., Барталев С.А., 2006; Нейштадт И.А., 2006).

**Блок 2.** Детектирование лесов, поврежденных насекомыми, производится с использованием серии производных продуктов – 30-дневных композитных изображений MODIS (мозаик), очищенных от влияния облачности, снегов, сбойных измерений и других факторов.

Первым этапом рассчитываются коротковолновый вегетационный индекс SWVI и нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI для пикселей спутникового изображения, совпадающих с маской лесов или покрытых лесом территорий.

На втором этапе происходит непосредственно выявление изменений, основанное на построении межгодовых разностей изображения индексов SWVI и NDVI, полученных на основе ежемесячных мозаик за период с мая по сентябрь.



#### Этапы обработки данных:

I. Маскирование артефактов на изображениях (16-х дневных продуктах MOD13Q1), вызванных снегами, остаточной облачностью, тенями, дымами от лесных пожаров

II. Маскирование участков изображений с низким пространственным разрешением

III. Исключение (обнуление) из композитных изображений вышеуказанных артефактов

IV. Расчет среднего значения и стандартного отклонения яркостей пикселей временного набора спутниковых композитных изображений. Обнуление пикселей, значения которых выходят за границы интервала  $[\mu - 1,5 \cdot \sigma; \mu + 1,5 \cdot \sigma]$

V. Сглаживание временных композитных серий с учётом маскирующих изображений, отсутствующие из-за сбоев значения во временной серии заполняются линейной аппроксимацией

#### Спутниковые изображения:

1. Временные серии 16-дневных продуктов MOD13Q1 2001-2004 гг.
2. Набор маскирующих изображений остаточной облачности и др. артефактов
3. Набор маскирующих изображений низкого пространственного разрешения
4. Временные серии 16-дневных продуктов MOD13Q1 без пикселей, выявленных на I и II этапах обработки
5. Набор 16-дневных спутниковых изображений MODIS без шумов
6. Набор улучшенных 16-дневных спутниковых изображений MODIS

Рис. 1. Блок-схема предварительной обработки композитных изображений MOD13Q1

Для устранения низкочастотных изменений, представленных одиночными пикселями, и подчеркивания контраста высокочастотных изменений для индекса SWVI применяется процедура суммирования его значений в скользящем окне 3x3 пикселя. Исследования результатов фильтрации индекса NDVI показали низкую эффективность этого подхода, в связи с чем, эта процедура для изображений NDVI не применяется. В дальнейшем обработка изображений вегетационных индексов проводится по общему алгоритму. Формируются гистограммы распределения разностных изображений индексов SWVI / NDVI и рассчитываются их средние значения и стандартные отклонения.

Для минимизации влияния фенологии растительности, а также изменений случайного характера используется принцип многоступенчатого выявления поврежденных территорий. Для этого при получении очередного композитного изображения индекса SWVI / NDVI проводится его анализ с аналогичным изображением, полученным в предыдущий год в три этапа сравнения данных: относительно предыдущего месяца, текущего месяца и последующего месяца (рис. 2). Пиксель относится к классу повреждений «1», если степень повреждения сильная и повторяемость выявленных изменений превышает два из трех возможных, и к классу повреждений «2», если степень повреждения слабая и повторяемость выявленных изменений составляет три из трех возможных.

Первый и второй классы используются для формирования маски территории с изменениями в растительном покрове, вызванными различными деструктивными факторами. Совпадение масок, полученных по результатам обработки индексов SWVI и NDVI, определяет участки лесов с подозрением на повреждения от насекомых-вредителей.

На третьем этапе производится идентификация выявленных изменений с использованием вспомогательной информации. Применяются данные о наиболее встречаемых в лесах России типах изменений (лесные пожары, насекомые-вредители, вырубки).

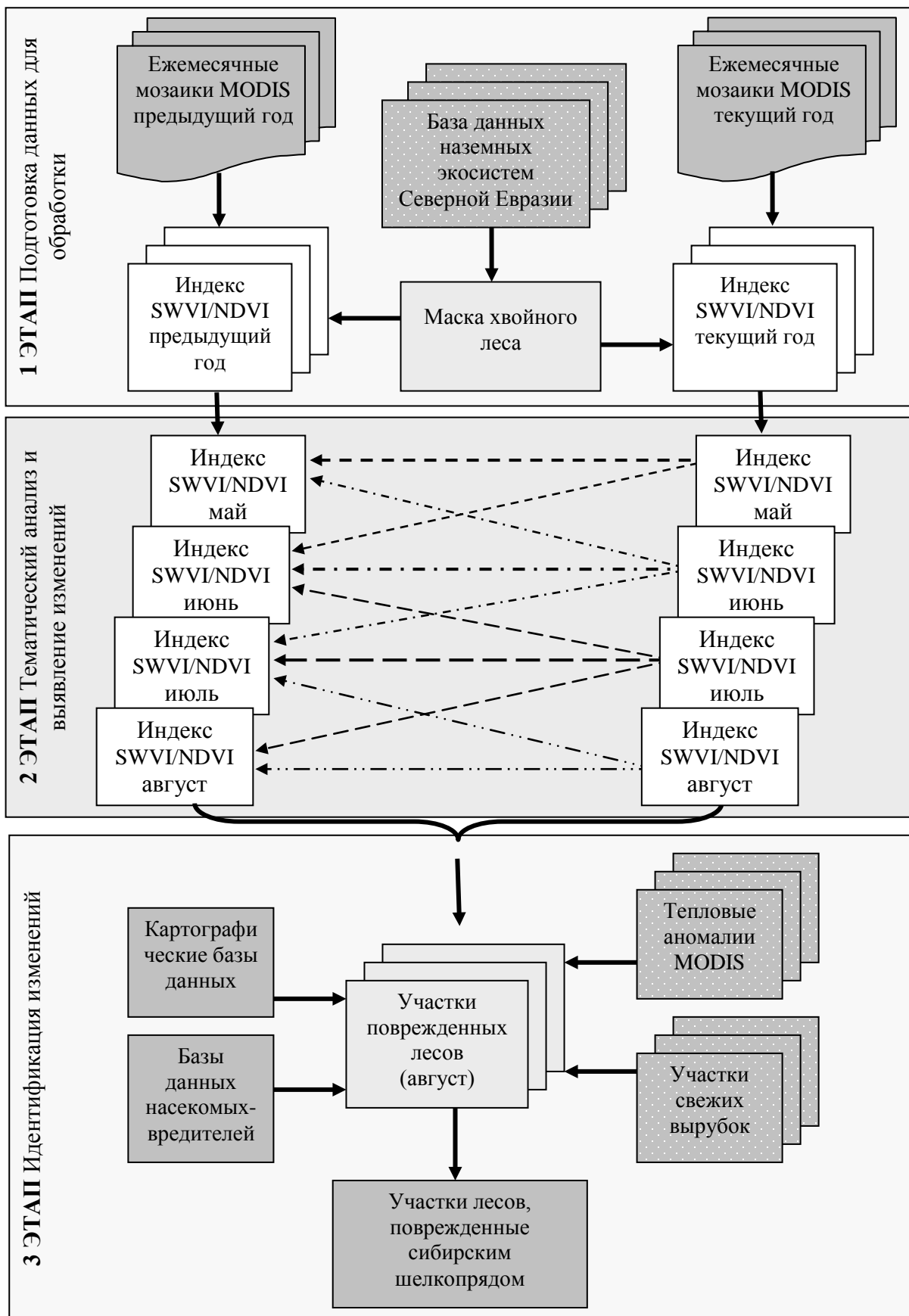


Рис. 2. Блок-схема тематической обработки спутниковых изображений MODIS с целью выявления повреждений лесов сибирским шелкопрядом



Для этого формируются продукты по результатам обработки спутниковых временных серий SPOT-Vegetation и Terra-MODIS, такие как пройденные огнем площади, тепловые аномалии и участки свежих вырубок, а также тематические и топографические карты, содержащие картографическую информацию (дорожная сеть, населенные пункты, рельеф и т.п.) и данные по распространению очагов различных насекомых-вредителей.

Выявленные в результате обработки участки повреждения насекомыми близки по спектрально-отражательным свойствам к горям, свежим вырубкам и болотам, и являются наиболее перепутываемыми классами. Поэтому помимо спектральных свойств в качестве дополнительных признаков для классификации повреждений было решено использовать вспомогательные сведения о рельефе и дорожной сети.

Проведенный анализ между наиболее перепутываемыми классами выявил следующие закономерности: диапазон высот на горях и повреждениях насекомыми довольно широк, от 100 до 2500 м у гарей, и от 300 до 1000 м у повреждений насекомыми, с максимумами на высоте 500-600 м, что не позволяет однозначно отделять их друг от друга.

Преобладающее число вырубок располагается на высотах 400-500 м, также перемешиваясь с повреждениями от насекомых. В то же время болотные комплексы имеют достаточно низкое расположение относительно уровня моря, находясь преимущественно на высотах 100-200 м, что дает возможность отделять их от других типов изменений.

Также хорошую делимость повреждений насекомых от болот дает информация об уровне склона. Заболоченные и низинные территории, покрытые водой, имеют угол склона преимущественно меньше 1 градуса, в то время как остальные типы повреждений значительно больший перепад высот. Таким образом, информация о характере рельефа может быть использована для устранения выявленных аномалий, вызванных изменениями растительного покрова в речных долинах и низинных территориях.

Анализ удаленности выявленных категорий изменений от дорожной сети показал следующую закономерность: природные объекты, такие как болота и участки лесов, поврежденные насекомыми, располагаются главным образом на значительном расстоянии от дорог, превышающем 20 км. Объекты же преимущественно антропогенного происхождения, такие как вырубки и гари, находятся в непосредственной близости к дорогам, в пределах 3-5 км зоны, в местах активного лесопользования. Следовательно, применение информации о дорожной сети позволяет отделить вырубки и гари от повреждений, вызванных насекомыми.

**Блок 3.** В основе метода обработки спутниковых изображений с целью определения степени повреждения (дефолиации) деревьев используется предположение о формировании в двумерном пространстве признаков (красного и ближнего ИК каналов) линии почвы, являющейся началом отсчета для определения количества растительности в пикселе спутникового изображения. Точки, максимально удаленные от линии почв и находящиеся в области низкого отражения в красной области спектра и высокого отражения в ближней инфракрасной области, соответствуют плотной растительности. Таким образом, угловое расстояние между измеряемой яркостью и линией почвы гипотетически связано с сомкнутостью полога. Оценки сомкнутости полога, полученные за разные годы, могут использоваться для определения состояния растительности, и в частности степени дефолиации зеленых фракций крон деревьев (или величины объедания хвои насекомыми).

В качестве исходных экспериментальных данных для определения степени повреждения используются летние композитные изображения MODIS  $i-1$  и  $i$  годов. Для каждого года рассчитывается уравнение линии почвы:

$$R_{0,85} = a * R_{0,65} - b \quad (5)$$

Местоположение пикселя спутникового изображения относительно линии почвы в двумерном пространстве красного и ближнего ИК каналов определяется через угловое расстояние (рис. 3):

$$l_x = (\theta - \arctg(a)) * r_x \quad (6)$$

где

$$\theta = \arctg \frac{R_{0,85} - b}{a * R_{0,65}} \quad (7)$$

Процент проективного покрытия растительности в пикселе изображения (или сомкнутость полога) определяется через отношение угловых расстояний:

$$P = \frac{l_x}{l_{90}} = \frac{\theta - \arctg(a)}{90 - \arctg(a)} \quad (8)$$

Нижний член уравнения описывает расстояние соответствующее максимально плотной растительности.

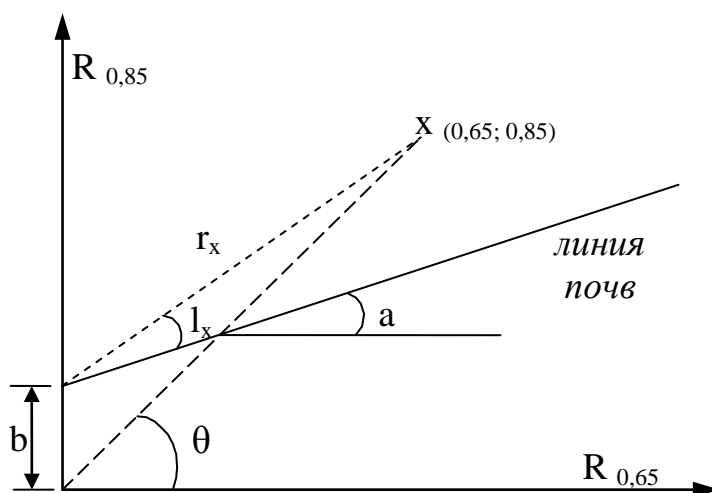


Рис. 3. Двумерное пространство красного и ближнего ИК каналов

Отличие в сомкнутости полога между годами используется для определения величины отпада или степени дефолиации. В результате обработки данных формируется карта, содержащая классы распределения деревьев по категориям состояния: 1) до 20% - здоровые; 2) 20-40% - ослабленные; 3) 40-60% - сильноослабленные; 3) 60-80% - усыхающие; 5) 80% - 90% и более 90% - свежий и старый сухостой.

Блок-схема метода определения степени повреждения (дефолиации) лесов представлена на рис. 4.

В четвертой главе «Проведение экспериментальных работ» приводятся результаты апробации методики оценки степени повреждения темнохвойных лесов сибирским шелкопрядом в междуречье Кана и Бирюсы на границе Красноярского края и Иркутской области. Проведен сравнительный анализ

полученных результатов с данными наземных обследований и спутниковых изображений высокого пространственного разрешения Landsat-TM.

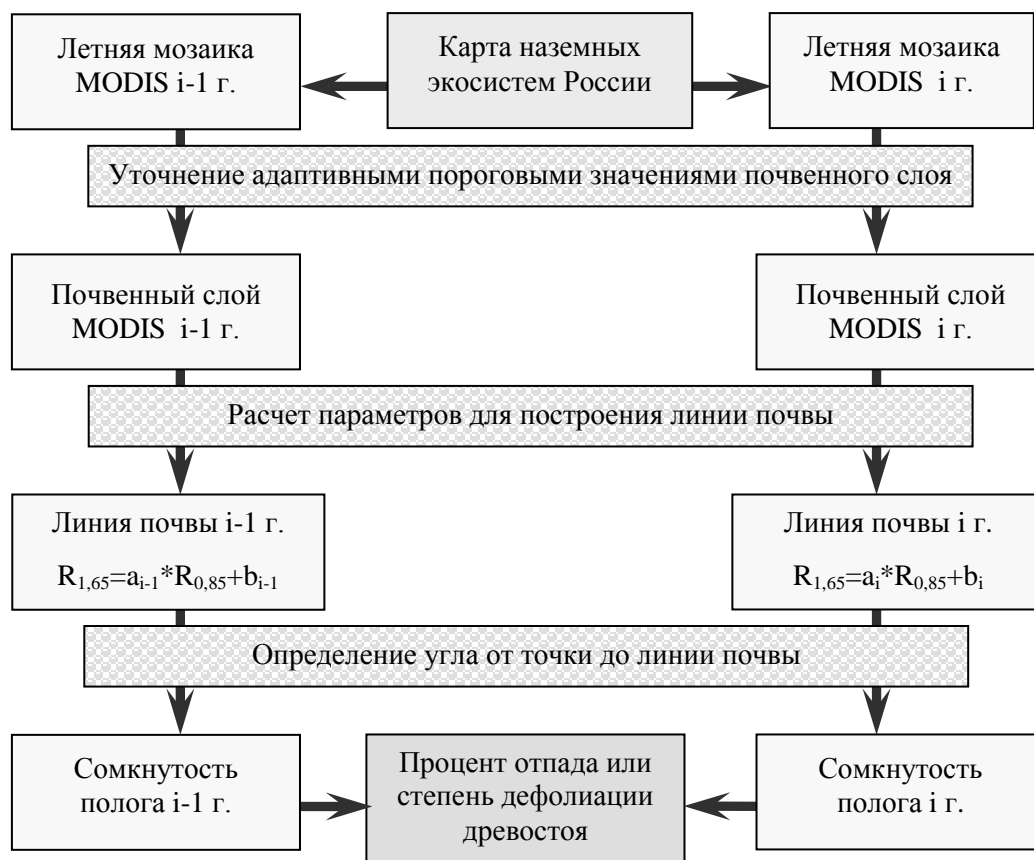


Рис. 4. Блок-схема метода обработки спутниковых изображений с целью определения степени повреждения лесов

На основе разработанных методов и алгоритмов получены фактические данные о вероятных очагах повреждений, их пространственном размещении, и степени дефолиации на выявленных территориях поражения темнохвойных лесов (рис. 5).

Для оценки точности определения площадей проводился сравнительный анализ с данными съемки высокого пространственного разрешения Landsat-5 (30 м). Исходя из сравнения площадей 11 тестовых участков повреждений, можно сделать вывод о хорошем уровне согласованности оценок из двух независимых источников данных, т.к. коэффициент корреляции в регрессионном уравнении равен 0,97. При малых площадях (< 50 га) алгоритм дает заниженную оценку. При размерах очагов повреждений более 200 га измерение площадей осуществляется с завышением. Предельный порог значений выявляемых

площадей рассмотренным методом с применением вышеперечисленных спутниковых данных составляет 25,07 га. Достоверность правильного определения участков леса, поврежденных сибирским шелкопрядом, составила 96,03%. Ошибки пропуска цели и ложных тревог составляют 3,97% и 0,87% соответственно.

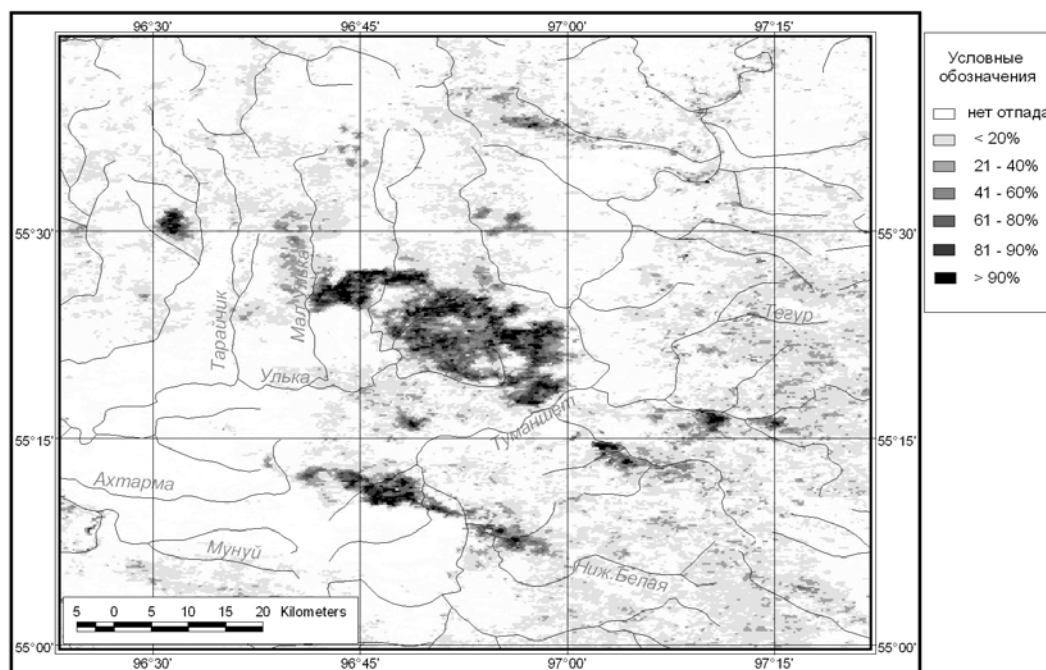


Рис. 5. Степень дефолиации древостоев, %

Для определения точности оценки степени повреждения был проведен сравнительный анализ с данными наземных наблюдений. Для сравнения использовались данные о средневзвешенной категории состояния, полученной из распределения деревьев по категориям состояния усреднением в выделе, и значения степени повреждения, полученные по данным MODIS, также усредненные на выдел. Проведенный анализ показал сходимость данных с коэффициентом корреляции 0,81. Достоверность правильного определения слабой степени повреждения соответствует 80%, средней степени повреждения – 88% и сильной степени повреждения – 91%.

В заключении приведены основные результаты и выводы:

- Разработан автоматизированный алгоритм предварительной обработки данных спектрорадиометра MODIS, который позволяет формировать очищенные от влияния облачности и снежного покрова спутниковые изображения;

- Разработан автоматизированный метод обработки многолетних разновременных серий спутниковых изображений MODIS, позволяющий выявлять изменения в лесных массивах, связанные с массовым размножением сибирского шелкопряда. Разработанный метод при малых площадях (< 50 га) дает заниженную оценку. При размерах очагов повреждений более 200 га измерение площадей осуществляется с завышением. Достоверность правильного определения участков леса, поврежденных сибирским шелкопрядом, составляет 96,03%. Ошибки пропуска цели и ложных тревог составляют 3,97% и 0,87% соответственно;
- Разработан метод обработки спутниковых изображений среднего пространственного разрешения MODIS для оценки степени повреждения лесов сибирским шелкопрядом, позволяющий выявлять не менее 5 классов распределения деревьев по категории состояния. Достоверность правильного определения слабой степени повреждения соответствует 80%, средней степени повреждения – 88% и сильной степени повреждения – 91%.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### Статьи

1. Девятова Н.В., Ершов Д.В. Применение данных спутниковой съемки при мониторинге массового размножения сибирского шелкопряда // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – М., 2008. №2 – С. 161-167.
2. Девятова Н.В., Ершов Д.В. Методика выявления очагов массового размножения насекомых-вредителей леса по данным MODIS-TERRA // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – М., 2008. №5 – С. 27-33.
3. Девятова Н.В., Ершов Д.В. Съемка MODIS/TERRA в мониторинге вспышек массового размножения очагов насекомых-вредителей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и

объектов. Сборник научных статей. Выпуск 2. Том II – М.: «GRANP polygraph», 2005, С. 262-266.

4. Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С. Оценка повреждений лесов сибирским шелкопрядом в Центральной Якутии по данным спектрорадиометра MODIS-TERRA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 3. Том II. – М.: ООО «Азбука-2000», 2006. С 306-314.
5. Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С. Определение масштабов усыхания хвойных лесов Европейского Севера России по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 4. Том II. – М.: ООО «Азбука-2000», 2007. С 204-211.
6. Ершов Д.В., Королева Н.В. Мониторинг крупномасштабного усыхания темнохвойных лесов Архангельской области по спутниковым данным // Усыхающие ельники Архангельской области, проблемы и пути их решения. Сборник – Архангельск: департамент лесного комплекса Архангельской области; Центр защиты леса Архангельской области, 2007. – С. 31-37.

#### Тезисы

7. Девятова Н.В., Ершов Д.В. Съёмка MODIS/TERRA в мониторинге вспышек очагов насекомых-вредителей // Вторая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 16-18 ноября 2004 г. Сборник тезисов конференции.
8. Девятова Н.В., Ершов Д.В. Оценка состояния и динамики лесов, поврежденных насекомыми-вредителями по данным спектрорадиометра MODIS // Третья всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005 г. Сборник тезисов конференции.

9. Девятова Н.В., Ершов Д.В. Определение масштабов усыхания хвойных лесов Европейского Севера России по данным спутниковых наблюдений // Четвёртая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г. Сборник тезисов конференции.
10. Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С. Мониторинг усыхания хвойных лесов Европейского севера России по данным спектрометра MODIS // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады IV Международной конференции (Москва, 17 –19 апреля 2007 г.) – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007 – С. 106-107.
11. Королева Н.В., Ершов Д.В. Исследование возможности оценки степени повреждения лесов насекомыми-вредителями по данным спектрометра MODIS // Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г. Сборник тезисов конференции.