

На правах рукописи

УДК 528.8

БАРТАЛЁВ СВЯТОСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барг

Москва – 2006

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Малинников В.А.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, проф.
Зверев Анатолий Тихонович


кандидат технических наук
Ершов Дмитрий Владимирович

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт
по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных
ситуаций МЧС России

Защита диссертации состоится «20» декабря 2006 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, К-64, Гороховский пер., 4 (ауд. 321).

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

Автореферат разослан « » 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Красноперцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Леса России имеют важное социально-экономическое и экологическое значение. Они представляют собой источник ценных ресурсов, обеспечивают сохранение в связанном состоянии значительной части мирового запаса углерода, выступают в качестве экологического каркаса для сохранения биоразнообразия экосистем, а также выполняют множество других биосферных функций.

Необходимость осуществления регулярного мониторинга состояния лесов обусловлена их непрерывной динамикой вследствие влияния природных и антропогенных факторов (таких как пожары, вырубки, техногенные загрязнения и некоторых других), масштабы, проявления которых существенно варьируют в зависимости от региона. В частности, леса Московской области испытывают на себе сильное антропогенное влияние, обусловленное близостью к мегаполису с более чем десяти миллионным населением. Это выражается в высоком уровне загрязнения атмосферы и почвенного покрова, изменениях гидрологического режима при строительстве дорог и прокладке коммуникаций, вырубке лесов в целях последующей застройки территории, повышенной рекреационной нагрузке, часто приводящей к пожарам.

Современный этап развития методологии мониторинга лесов с целью выработки стратегий рационального лесопользования и защиты окружающей среды предполагает в качестве обязательной компоненты использование методов дистанционного зондирования и геоинформационных систем (ГИС). Согласно современной концепции спутникового мониторинга лесов, выделяются глобальный, континентальный, региональный и локальный уровни наблюдения, различающиеся функциональными задачами, территориальным охватом, а также требованиями к пространственной и тематической детальности получаемой информации. В настоящее время для осуществления мониторинга лесов на глобальном и континентальном уровнях преимущественно используются данные низкого и среднего пространственного разрешения в диапазоне 250 м – 1 км (NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra/Aqua-MODIS и др.). В то же время при решении задач локального уровня (например, на уровне лесохозяйственных предприятий или административных районов) наиболее эффективно использование спутниковых данных высокого разрешения (20-40 м), к числу которых в частности относятся данные Landsat-TM/ETM+, SPOT-HRV/HRVIR и МСУ-Э/Метеор-3М. К особенностям регионального мониторинга лесов, охватывающего крупные административные (субъект РФ или

административный округ) или природные (водосборный бассейн) территориальные образования, относится необходимость комбинированного использования спутниковых данных различного пространственного разрешения. Целью такого рода сочетания спутниковых данных различного разрешения является обеспечение полного территориального охвата региона спутниковым мониторингом при условии достаточного уровня тематической детальности и достоверности получаемых результатов.

При этом задача экологической оценки лесов региона требует обоснования соответствующих индикаторов, доступных для определения с использованием данных спутниковых наблюдений, и позволяющих оценивать структуру и состояние лесов с точки зрения эффективности выполнения ими средозащитных и биосферных функций в условиях возрастающего влияния антропогенной нагрузки.

Цель и задачи исследования. Основной целью диссертационной работы являлась разработка методики региональной оценки экологического состояния лесов по данным спутниковых наблюдений и ее экспериментальная апробация на примере Московской области. Достижение указанной цели потребовало решения следующих научных задач:

- Проведение анализа возможностей современных спутниковых систем дистанционного зондирования в интересах решения задач экологического мониторинга лесов;
- Обоснование системы индикаторов экологического состояния лесов и разработка методики их оценки с использованием данных дистанционного зондирования различного пространственного разрешения и ГИС-технологий;
- Разработка методов предварительной и тематической обработки многоспектральных данных спутниковых наблюдений с целью оценки индикаторов экологического состояния лесов;
- Экспериментальная апробация разработанной методики оценки экологического состояния лесов по данным спутниковых наблюдений на примере Московской области.

Научная новизна и основные результаты диссертационной работы.

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования и разработки позволили получить следующие, обладающие научной новизной, основные результаты:

- Предложена система индикаторов экологического состояния лесов и разработана методика их региональной оценки с использованием данных дистанционного зондирования со спутников и ГИС;

- Разработан метод взаимной радиометрической нормализации разнородных по условиям съемки спутниковых изображений высокого пространственного разрешения в интересах регионального картографирования лесов;
- Разработан метод региональной оценки лесистости территории на основе сочетания данных спутниковых наблюдений среднего (MODIS) и высокого (Landsat-ETM+) пространственного разрешения;
- Разработан и апробирован по спутниковым данным MODIS метод использования спектральных вегетационных индексов для оценки состояния хвойных лесов в условиях повышенной антропогенной нагрузки;
- На основе разработанной методики сформирована база данных об индикаторах экологического состояния лесов Московской области по результатам обработки данных спутниковых наблюдений.

Практическая значимость. Проведенные в рамках диссертационной работы исследования позволили разработать методику региональной экологической оценки состояния лесов в интересах регионального планирования и охраны окружающей среды. Комплексное использование данных дистанционного зондирования различного пространственного разрешения и ГИС-технологий открывают возможность проведения регионального мониторинга экологического состояния лесов на регулярной основе. Разработанные методические подходы апробированы на примере Московской области и могут быть использованы региональными органами управления лесами и природоохранных организациях.

Апробация. Основные положения диссертационной работы доложены на четырех научных конференциях МИИГАиК и ИКИ РАН по вопросам развития и использования методов дистанционного зондирования окружающей среды.

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

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и списка литературы. Объем диссертации составляет 130 страниц, включая 29 рисунков и 16 таблиц.

Выражение признательности. Большую помощь и поддержку на всех этапах работы оказали научный руководитель, профессор д.т.н. В.А. Малишников и заведующий

лабораторией ИКИ РАН к.т.н. С.А. Барталев. Автор выражает большую благодарность М.Ю. Дубинину, А.М. Костиковой, а так же всем коллегам, помогавшим в данной работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование необходимости развития методов спутникового мониторинга в интересах региональной оценки экологического состояния лесов, описание целей и задач исследований, а также основных научных результатов, полученных автором при подготовке диссертационной работы.

Глава 1. Анализ возможностей использования методов дистанционного зондирования для региональной оценки экологического состояния лесов. Московская область относится к регионам с высокой плотностью населения и развитым промышленным потенциалом, что создает значительную антропогенную и рекреационную нагрузку на лесные экосистемы. Лес, как открытая экологическая система, находится в непрерывном взаимодействии с факторами окружающей среды, действие которых может отрицательно сказаться на жизнедеятельности лесного биогеоценоза. По некоторым данным в регионе выявлено 37 зон загрязнения, охватывающих 165 тыс. га земель, покрытых лесами. В этих зонах насчитывается около 23,5 тыс. источников загрязнения, выбрасывающих в атмосферу свыше 300 тыс. т. вредных примесей в год. Поллютанты приводят к видимому ухудшению состояния деревьев, а также могут привести к существенной трансформации продуктивности и биоразнообразия лесных сообществ.

Технологии дистанционного зондирования открывают возможность создания систем мониторинга лесов, включая определение структуры насаждений, выявление крупномасштабных изменений в лесах в результате воздействия пожаров, вырубок и других возмущающих факторов, оценку индикаторов состояния лесной растительности. Как комплексная задача разработка методики региональной оценки экологического состояния лесов требует проведения междисциплинарных исследований в области физических аспектов дистанционного зондирования, алгоритмов анализа спутниковых данных, методов пространственного моделирования и ГИС-технологий. При этом выбор объектов и режимов мониторинга лесов, а также набора измеряемых параметров, должен обеспечивать возможность их прямого или опосредованного использования для оценки индикаторов состояния лесных экосистем и их реакций на факторы негативного воздействия.

В ряде случаев проведение региональной экологической оценки состояния лесов, требует высокой детальности наблюдений при обеспечении их регулярности, что обуславливает целесообразность комбинированного использования материалов зондирования с различных спутниковых приборов. При этом, комбинация данных среднего (например, Terra/Aqua-MODIS) и высокого (например, Landsat-ETM+ или SPOT-HRV) пространственного разрешения является одним из путей оперативного получения сведений о количественных и качественных показателях состояния лесов с высоким уровнем точности по отдельным территориальным образованиям или региону в целом.

Для экологической оценки лесов по спутниковым данным целесообразно использовать индикаторы, отражающие степень покрытия территории лесами, породный состав насаждений и их физиологическое состояние.

Лесистость, как отношение покрытой лесами площади к площади региона, относится к числу основных характеристик, а ее оценка по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения, как правило, обеспечивается с высоким уровнем надежности. При использовании данных низкого или среднего разрешения такого рода оценка сопряжена со значительными погрешностями, в особенности для территорий с фрагментированным лесным покровом.

Одним из возможных подходов для оценки лесистости на больших территориях при обеспечении высокого уровня точности является комбинированное использование спутниковых изображений MODIS и Landsat-ETM+. При этом оптимально сочетание полного покрытия региона данными MODIS с репрезентативной выборкой изображений высокого разрешения. Получаемые при этом по изображениям Landsat-ETM+ опорные значения лесистости могут использоваться для коррекции результатов обработки данных среднего пространственного разрешения.

Интенсивная хозяйственная деятельность или воздействие других возмущающих факторов часто приводит к смене породного состава лесов, и, в частности, к сокращению участия хвойных насаждений в лесном покрове. Во многих случаях формирующиеся после вырубок и пожаров вторичные леса характеризуются преобладанием лиственных и смешанных насаждений в течение достаточно продолжительного периода. В этой связи *доля участия чистых хвойных насаждений* в лесном покрове может служить одной из характеристик экологического состояния лесов в условиях долгосрочной антропогенной нагрузки. Физиологическое состояние лесов в значительной степени определяется *содержанием хлорофилла и уровнем влагообеспеченности* зеленых фракций древесной

растительности. Непосредственное определение абсолютных значений этих показателей по данным дистанционного зондирования в настоящее время затруднено и требует дополнительных наземных измерений. В этой связи целесообразно использовать относительные показатели, получаемые на основе спектральных индексов, коррелирующих с уровнем обеспеченности растений хлорофиллом и влагой, в качестве которых могут использоваться нормализованный разностный индекс растительности NDVI и индекс влагообеспеченности NDWI, определяемые по спектральному отражению в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра.

К особенностям предложенного в настоящее время подхода относится *оценка значений указанных спектральных индексов отдельно для хвойных и лиственных насаждений*, что продиктовано их различной чувствительностью к воздействию негативных факторов среды. При этом, в отличие от лиственных лесов, значения спектральных индексов для хвойной растительности могут выступать в качестве чувствительного индикатора их состояния. Это объясняется тем, что, не будучи подверженным сезонной дефолиации, хвойные насаждения в условиях повышенного уровня загрязнения окружающей среды аккумулируют в вегетативных органах значительно более высокий уровень вредных веществ, что проявляется в снижении уровня хлорофилла и влагосодержания, и как следствие в более высоком уровне угнетения хвойных деревьев. Данное положение нашло подтверждение в результатах экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертационной работы.

С целью обеспечения сопоставимости и возможностей совместного анализа индикаторов состояния лесов, получаемых по спутниковым данным различного пространственного разрешения, снижения влияния случайных факторов, а также удобства пространственного моделирования в среде ГИС предложенная методика предполагает осреднение характеристик состояния лесов в ячейках покрывающей территорию регулярной сети. Исходя из необходимости обеспечения репрезентативности получаемых оценок и пространственного разрешения изображений MODIS, используемых в качестве одного из основных источников спутниковых данных для исследований, было признано целесообразным использовать ячейки сети с размером 10x10 км.

Представленная на рисунке 1 логическая схема отражает основные этапы предложенной методики региональной оценки экологического состояния лесов по спутниковым данным. Как следует из схемы, для апробации методики на примере Московской области используются приборы MODIS (250 м) и Landsat-ETM+ (28,5 м) в

качестве основных источников спутниковых данных. При этом данные MODIS обеспечивают полное покрытие региона и используются в сочетании с репрезентативной выборкой изображений высокого разрешения.

Предварительная обработка спутниковых данных призвана обеспечить их более эффективный тематический анализ за счет снижения влияния мешающих факторов. Так предварительная обработка ежедневных данных наблюдений прибором MODIS направлена на формирование очищенных от влияния облачного покрова композитных изображений региона путем селекции данных за некоторый период наблюдений на основе набора заданных критериев. Предварительная обработка данных Landsat-ETM+ включает в себя их географическую привязку и взаимную радиометрическую нормализацию, и направлена на обеспечение возможности совместной классификации совокупности спутниковых изображений на регион исследований с целью снижения временных затрат на этапе тематической обработки.

На первом этапе тематического анализа изображений предусматривается построение карт лесов по результатам независимой классификации обоих видов спутниковых данных. Набор классов, выделяемых в ходе анализа спутниковых данных, должен обеспечивать отделение покрытых лесом от непокрытых лесом участков, а также подразделение покрытых лесом территорий на хвойные, лиственные и смешанные насаждения. Целесообразно также выделять хвойные насаждения с преобладанием светлохвойных (сосна) и темнохвойных (ель, пихта) пород. В качестве источника вспомогательных данных для классификации изображений могут использоваться лесоустроительные и другие тематические карты, отражающие территориальное распределение лесов региона и их породный состав. Интеграция полученных по результатам классификации изображений MODIS данных о характеристиках лесов в базу данных ГИС предусматривается выполнением калибровки с использованием результатов анализа изображений высокого разрешения. Предложенной методикой предлагается восстановление вида и параметров калибровочных функций путем регрессионного анализа, в качестве входных переменных для которых используются значения лесистости для ячеек сети, полученные по спутниковым изображениям среднего и высокого разрешения.

Полученные в результате классификации изображений MODIS маски хвойных и лиственных лесов используются на дальнейших этапах для вычисления в ячейках сети средних значений индексов NDVI и NDWI, отражающих физиологическое состояние насаждений в части обеспеченности их хлорофиллом и водой.

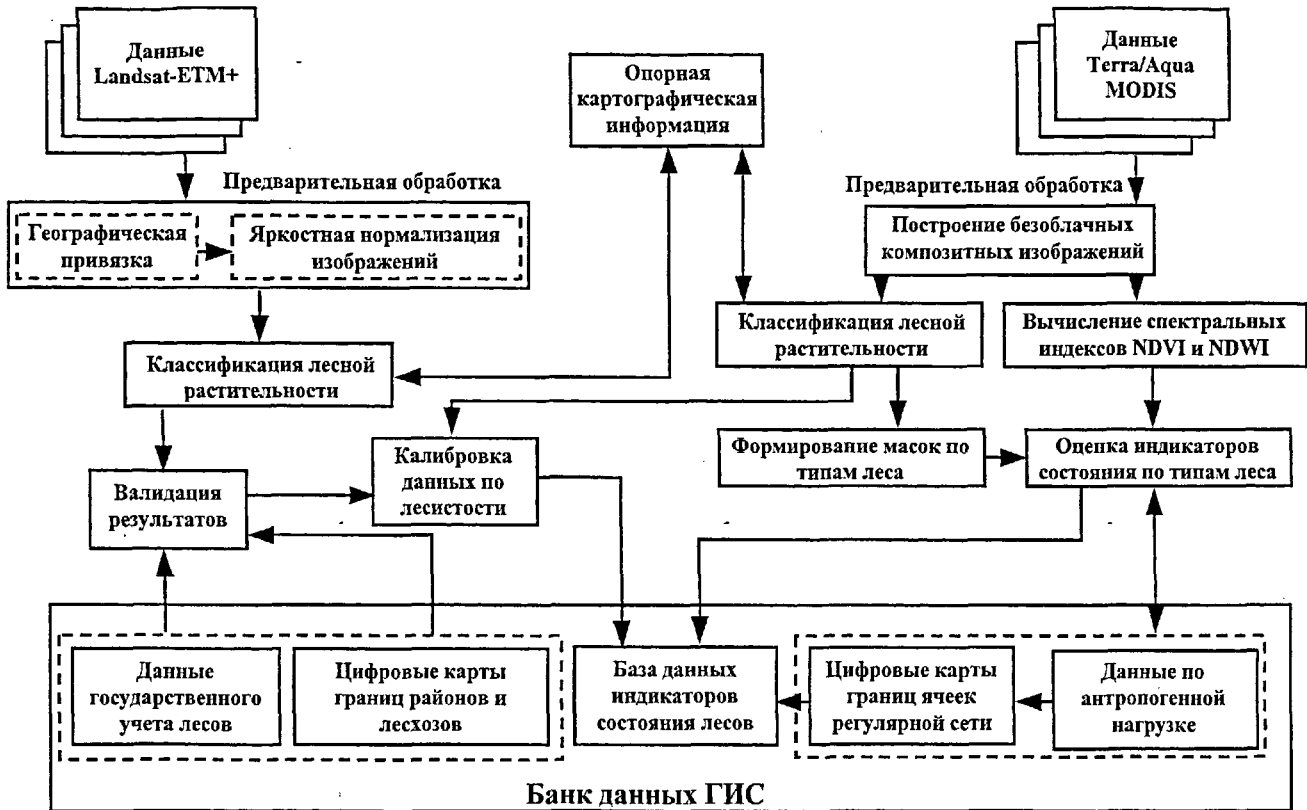


Рис. 1 Логическая схема методики оценки состояния лесов на региональном уровне с использованием данных спутниковых наблюдений и ГИС

При этом целесообразно установить связь значений спектральных индексов с независимыми данными об антропогенной нагрузке на экосистемы, которая, в частности, может выражаться в уровне загрязнения атмосферы и почв вредными веществами.

Получаемые данные об индикаторах экологического состояния лесов позволяют формировать постоянно обновляемую базу данных в составе ГИС по лесам региона. Банк данных ГИС должен также включать в состав информационного обеспечения ряд дополнительных баз данных и цифровых карт.

Глава 2. Картографирование лесов по многоспектральным спутниковым данным высокого пространственного разрешения. Предложенная методика региональной экологической оценки лесов предусматривает использование репрезентативной выборки данных спутниковых наблюдений высокого пространственного разрешения для классификации лесного покрова и оценки таких ключевых индикаторов как лесистость и доля чистых хвойных насаждений в составе покрытой лесом площади.

Одним из широко используемых в настоящее время источников спутниковых данных высокого разрешения является портал программы Global Land Cover Facility (GLCF <http://glcf.uniaccs.umd.edu>). Отобранный из архива набор изображений Landsat ETM+ включал в себя пять спутниковых сцен с незначительным влиянием облачности и максимально возможно приближенных по фазе фенологического развития растительности. Схема покрытия области изображениями Landsat ETM+ представлена на рисунке 2.

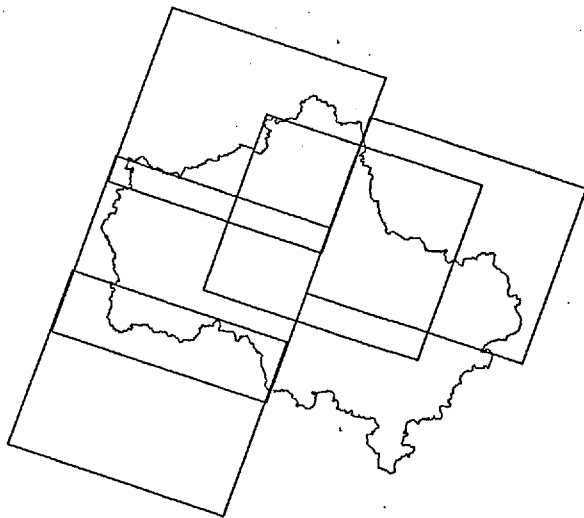


Рис. 2 Схема покрытия Московской области данными Landsat-ETM+

Используемые в работе изображения были приведены в проекцию UTM на эллипсоиде WGS84, а уточнение их взаимной пространственной привязки производилось методом аффинных преобразований по опорным точкам в зоне перекрытия изображений с уровнем погрешности, не превышающей размера одного пикселя.

При построении карт лесов регионального уровня с использованием данных высокого пространственного разрешения, как правило, для обеспечения полного покрытия территории приходится использовать совокупность неоднородных по времени и условиям спутниковой съемки изображений. При этом возникает задача разработки методов использования разнородных изображений с целью минимизации временных затрат и объема необходимых опорных данных при условии обеспечения достаточной тематической точности и информационной детальности получаемых карт.

Один из возможных подходов к решению этой задачи предполагает первоначальное проведение взаимной яркостной нормализации изображений с целью их последующей совместной классификации. В основу метода яркостной нормализации изображений, полученных одним и тем же прибором дистанционного зондирования, положено предположение о том, что, при отсутствии качественных изменений лесов в период между двумя датами наблюдений, различия регистрируемой яркости, прежде всего, связаны с изменениями характеристик пропускания и рассеяния излучения атмосферой, а также фенологической динамикой растительности. При этом была принята линейная модель аппроксимации связи между значениями яркости на уровне прибора дистанционного зондирования R_a и на нижней границе атмосферы R , согласно следующему выражению:

$$R_a = \tau_g(R_{atm} + kR) \quad (1),$$

где:

R_a – яркость подстилающей поверхности на верхней границе атмосферы;

R_{atm} – яркость отраженного атмосферой излучения;

R – яркость подстилающей поверхности на нижней границе атмосферы;

τ_g – коэффициент пропускания атмосферы;

k – коэффициент, зависящий от функции пропускания атмосферы и геометрических условий наблюдения.

Использование линейной модели (1) позволяет выразить следующим образом связь значений яркости для одного и того же участка на двух различающихся временем получения изображений:

$$CN1 = aCN2 + b \quad (2),$$

где: $CN1$ и $CN2$ – уровни яркости участка поверхности в различные моменты наблюдений;
 a и b - коэффициенты уравнения.

Использование выражения (2) позволяет предложить простой метод взаимной яркостной нормализации спутниковых изображений, предполагающий реализацию описанных ниже последовательных этапов.

На первом этапе производится выбор базового изображения, максимально возможно отвечающего следующей группе условий:

- наличие областей взаимного перекрытия базового изображения с максимально большим числом спутниковых изображений для региона наблюдения;
- наличие в зонах перекрытия изображений участков, соответствующих различным, характерным для региона наблюдения, типам лесов;
- соответствие даты наблюдения базового изображения наиболее благоприятной для картографирования лесов фазе фенологического развития растительности.

Следующий этап метода взаимной яркостной нормализации направлен на формирование сети опорных участков в зонах перекрытия спутниковых изображений для оценки значений коэффициентов уравнения (2). Опорные участки в зонах перекрытия соответствующих пар изображений выбираются визуально на покрытых лесом территориях исходя из следующих условий:

- количество опорных участков должно удовлетворять критериям статистической репрезентативности для линейного регрессионного анализа получаемых данных;
- выбранные опорные участки должны обеспечивать максимально широкий охват типов лесных насаждений, различающихся уровнем спектральной яркости;
- опорные участки должны быть свободны от влияния облачности;
- изображения опорных участков не должны содержать признаков качественных изменений лесов в период между датами получения спутниковых изображений.

При этом площадь каждого опорного участка на изображении должна превышать площадь пикселя в несколько раз, что позволяет при последующей оценке средних значений яркости внутри участков скомпенсировать влияние случайных факторов.

Измеренные пары значений средней спектральной яркости для опорных участков в зонах перекрытия изображений используются для оценки методом линейного регрессионного анализа значений коэффициентов уравнения (2) независимо для каждого канала. Получаемые при этом значения линейной корреляции R^2 могут служить критерием

достоверности оценок коэффициентов уравнения и, следовательно, потенциальной эффективности взаимной яркостной нормализации пары изображений.

Завершающим этапом процедуры нормализации является по каналное преобразование спутникового изображения с использованием коэффициентов линейного уравнения с целью компенсации яркостных различий на покрытых лесом территориях.

В соответствии с указанными выше критериями в зонах перекрытия изображений было выбрано по 30 опорных участков размером 3x3 пикселя. Полученные значения коэффициентов уравнения регрессии и корреляции для пары спутниковых изображений представленные в качестве примера в таблице 1. Как видно из приведенных данных, наиболее высокие значения R^2 характерны для спектральных каналов ТМ4 и ТМ5, в то время как значение коэффициента корреляции для ТМ3 может свидетельствовать об относительно невысокой эффективности нормализации изображений в данном канале.

Таблица 1

Пример значений коэффициентов уравнения регрессии и корреляции при яркостной нормализации изображений (на примере сцен №2 и №5)

Канал	Коэффициенты уравнения		R^2
	a	b	
ТМ3	0.45	18.4	0.50
ТМ4	0.70	18.6	0.90
ТМ5	0.95	4.3	0.94
ТМ7	0.84	3.7	0.80

Оценка эффективности нормализации выполнялась с учетом ее влияния на возможности распознавания типов лесов, а ее основой служило сравнение значений критериев внутриклассовой изменчивости (стандартное отклонение уровней яркости внутри класса) и межклассовой разделимости (трансформированная дивергенция) до и после нормализации (таблицы 2 и 3). Влияние яркостной нормализации на гистограммы яркости лесного покрова демонстрируется приведенными на рисунке 3 графиками.

Оценка влияния взаимной нормализации изображений на величину стандартного отклонения спектральной яркости классов лесного покрова

	Класс лесных насаждений								
	Темнохвойные			Светлохвойные			Лиственные		
	TM3	TM4	TM5	TM3	TM4	TM5	TM3	TM4	TM5
До нормализации	3.8	7.1	5.5	4.7	12.0	9.1	8.3	10.3	7.4
После нормализации	2.3	4.7	5.1	3.9	7.4	7.7	4.8	6.5	6.7

Таблица 3

Влияние взаимной нормализации изображений на значения трансформированной дивергенции между классами лесного покрова (до нормализации / после нормализации)

Тип леса	Темнохвойные	Светлохвойные	Лиственные
Темнохвойные		1265.68 / 1686.26	1334.06 / 1897.91
Светлохвойные	1265.68 / 1686.26		686.23 / 967.74
Лиственные	1334.06 / 1897.91	686.23 / 967.74	

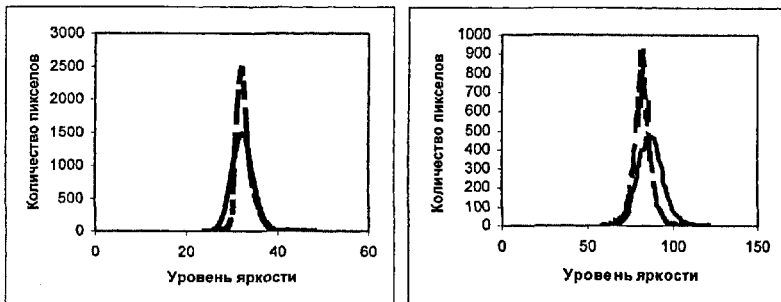


Рис. 3 Влияние яркостной нормализации изображений Landsat-ETM на гистограмму яркости леса в спектральных каналах TM3 (слева) и TM4 (справа). Гистограммы яркостей до и после нормализации показаны соответственно сплошной и пунктирной линиями.

Для классификации совокупности радиометрически нормализованных изображений Landsat-ETM+ были использованы спектральные каналы TM3, TM4, TM5 и TM7, как наиболее информативные для изучения растительности. Предварительная оценка возможностей классификации лесов по данным Landsat-ETM+ продемонстрировала достаточно высокую точность распознавания классов темнохвойных, светлохвойных,

лиственных и смешанных насаждений. Использование алгоритма неконтролируемой классификации ERDAS ISODATA позволило выделить на первом этапе 200 спектральных кластеров, последующая визуальная интерпретация которых была проведена с привлечением карты растительности Московской области и анализа сигнатур кластеров в пространстве яркостей в каналах ТМ3 и ТМ4.

Необходимость повышения точности распознавания темнохвойных лесов, частично перепутываемых с тенями от облаков и участками водной поверхности в прибрежных зонах, потребовала дополнительной тематической обработки спутниковых изображений. Повторная классификация изображений была выполнена только для пикселей отнесенных на предыдущем этапе к указанной совокупности классов с использованием текстурного признака, характеризуемого значениями дисперсии яростей в скользящем окне размером 5x5 пикселей. При этом для участков водной поверхности, как пространственно более однородных, характерны относительно низкие значения признака, что позволило улучшить точность классификации темнохвойных лесов. Дальнейшее улучшение точности выделения темнохвойных лесов было направлено на исключение ошибочно классифицированных участков теней от облаков. Это обеспечивалось процедурой пространственного анализа изображений в окрестности предварительно выявленных участков облачного покрова, детектированных по высоким значениям спектральной яркости во всех используемых спектральных каналах.

Результатом классификации спутниковых изображений Landsat-ETM+ стала карта лесов для части территории Московской области. Сравнительные данные о лесистости ряда лесохозяйственных предприятий области, полученные с использованием полученной карты и материалов Государственного учета лесов (ГУЛ) РФ по состоянию на 1998 год, представлены на рисунке 4.

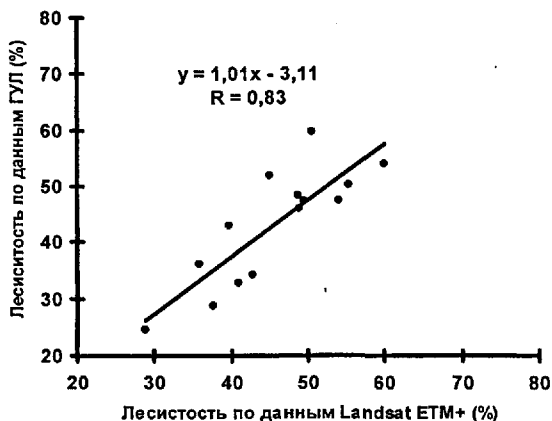


Рис. 4 Связь данных о лесистости для лесхозов Московской области по результатам классификации Landsat ETM+ и материалам ГУЛ (1998 г.)

Глава 3. Региональная экологическая оценка характеристик состояния лесов по многоспектральным спутниковым данным MODIS. Для проведения экспериментальных работ был использован набор очищенных от влияния облачного покрова сезонных композитных изображений, полученных по данным прибора MODIS со спутника Тетра. Полученные данные обеспечивают полное покрытие территории области и включают композитные изображения для летнего (июнь-август) и зимнего (декабрь-февраль) периодов 2002 года. При этом использовались данные наблюдений с пространственным разрешением 250 м в красном (620-670 нм) и ближнем инфракрасном (841-876 нм) спектральных диапазонах и разрешением 500 м в среднем инфракрасном (1628-1652 нм) диапазоне.

На первом этапе была выполнена классификация изображений MODIS для построения карты лесов области с выделением темнохвойных, светлохвойных, лиственных и смешанных лесов. Классификация выполнялась в два последовательных этапа с применением алгоритма кластерного анализа ERDAS ISODATA на основе совместного использования изображений летнего и зимнего периода спутниковых наблюдений. На первом этапе был выполнен кластерный анализ зимнего изображения с последующей тематической интерпретацией спектральных кластеров, позволившей построить бинарную маску покрытия территории области лесами. Последующая более детальная классификация типов лесов проводилась по данным MODIS, полученным в летний период.

При этом в рассмотрение принимались только пиксели, включенные в бинарную маску лесов на предыдущем этапе. Такая последовательность использования разпосезонных спутниковых изображений позволяет достаточно просто исключить ошибки, связанные с перепутыванием классов, относящихся к покрытым и непокрытым лесом территориям.

Оценка по данным MODIS значений спектральных индексов, отражающих относительное содержание хлорофилла и влагообеспеченность лесной растительности, проводилась согласно следующим выражениям:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (3)$$

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (4)$$

где NDVI - нормализованный разностный индекс растительности; NDWI - нормализованный разностный индекс влагосодержания; RED, NIR и SWIR – соответственно значения спектральной яркости в каналах 620-670 нм, 841-876 нм и 1628-1652 нм.

Глава 4. ГИС-анализ экологического состояния лесов Московской области. Возможность комплексной экологической оценки состояния лесов Московской области на основе результатов обработки данных спутниковых наблюдений и информации из других источников может быть обеспечена интеграцией имеющихся данных в среду ГИС, обладающей эффективными средствами анализа и представления разнородной пространственной информации. Решение этой задачи потребовало формирования банка данных, являющегося информационным ядром региональной ГИС и включающим в себя ряд взаимосвязанных цифровых картографических слоев и атрибутивных таблиц, характеризующих различные аспекты состояния лесов региона и организации территории.

Согласно принятой методологии ГИС-анализа предусматривается интеграция результатов обработки спутниковых изображений на уровне ячеек, покрывающей территорию области, регулярной сети. Размер ячеек (10x10 км) сети выбран исходя из условий обеспечения статистической репрезентативности интегральных оценок, получаемых по спутниковым данным MODIS, а также уровня пространственной детальности необходимых для проведения анализа вспомогательных данных об антропогенной нагрузке на территорию области. Регулярная сеть на территорию области, сформированная в проекции UTM на эллипсоиде WGS84, включает в себя 553 ячейки.

Основу банка данных региональной ГИС составляет база данных об индикаторах экологического состояния лесов по данным спутниковых наблюдений. В атрибутивной

таблице базы данных для каждой ячейки сети содержатся значения таких показателей как: лесистость, доля хвойных насаждений в покрытой лесом площади, а также значения NDVI и NDWI отдельно для хвойных и лиственных лесов.

Наряду с базой данных об индикаторах экологического состояния лесов, информационное обеспечение ГИС включает базу данных по антропогенной нагрузке, базу данных ГУЛ для лесохозяйственных предприятий, а также вспомогательные векторные слои границ ячеек регулярной сети, границ административных районов и лесохозяйственных предприятий, покрытия с информацией о дорожной сети и населенных пунктах. Все перечисленные базы данных были сформированы в среде ArcView GIS 3.2 в виде согласованных картографических слоев и атрибутивных таблиц.

Относительная близость времени получения обоих видов спутниковых данных (Landsat-ETM+ и Terra-MODIS) обеспечивает возможность их совместного использования без учета изменений в лесах в период между наблюдениями. Регрессионный анализ данных о лесистости, полученных по обоим видам спутниковых данных, проводился для совокупности ячеек регулярной сети в зоне покрытия территории области изображениями Landsat-ETM+ (рис. 5).

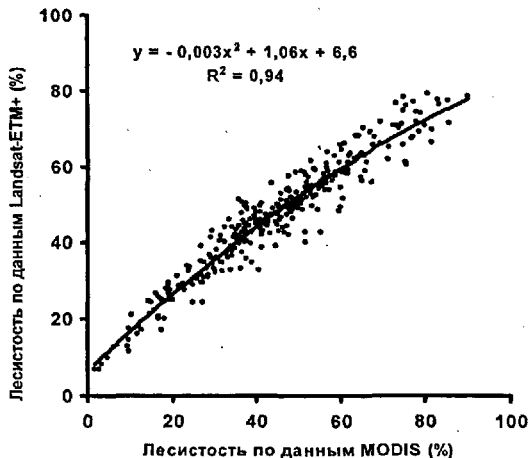


Рис. 5 Связь между значениями лесистости в ячейках регулярной сети (10x10 км) для территории Московской области по данным MODIS и Landsat ETM+

При этом полином второго порядка принят в качестве модели аппроксимации связи между значениями лесистости по данным Landsat ETM+ и MODIS, при значении

коэффициента корреляции $R^2=0,94$. Полиномиальный характер связи объясняется различием величины пространственного разрешения спутниковых данных и свидетельствует о том, что использование данных MODIS приводит к недооценке лесистости для малолесных территорий за счет пропуска мелких массивов лесов. Одновременно при значительном уровне лесистости использование данных MODIS приводит к завышению значений этого показателя за счет большого числа смешанных пикселей, классифицируемых как лесной покров.

Использование представленного на рисунке 5 уравнения позволило уточнить полученные по данным MODIS оценки лесистости для всей территории области. При этом, после проведения процедуры коррекции значение лесистости для области (41,8 %) практически не отличается от данных официальной статистики (41 %), что может служить свидетельством эффективности предложенного методического подхода.

Последующий анализ показал наличие статистически значимой положительной корреляции между значениями NDWI и NDVI для хвойной растительности (рис. 6) и отсутствие таковой для лиственных лесов. Этот факт видимо является следствием более высокой чувствительности хвойных лесов к уровню антропогенной нагрузки, а также взаимосвязи между усыханием и снижением концентрации хлорофилла в лесной растительности. Одним из объяснений этому может являться то, что лиственные леса менее подвержены антропогенному влиянию в силу характерной для них сезонной дефолиации и, следовательно, частичному выводу вредных веществ из органов древесных растений.

При анализе рисунка 6, отображающем связь спектральных индексов для хвойных лесов видно, логично предположить, что соответствующая области низких значений обоих спектральных индексов растительность находится в более угнетённом состоянии по сравнению с другими хвойными насаждениями области.

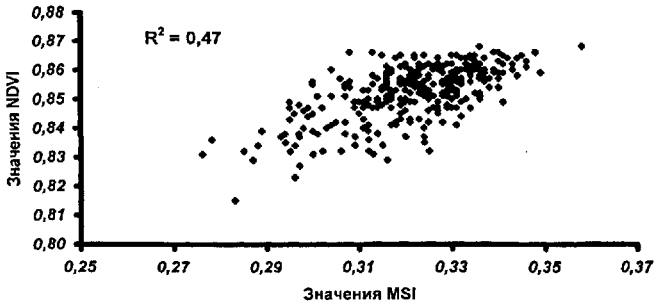
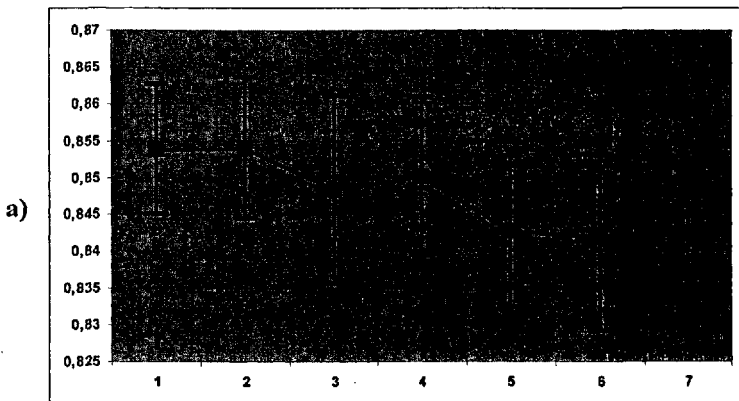


Рис. 6 Связь между значениями спектральных индексов NDWI и NDVI для хвойных лесов Московской области по данным MODIS

Подтверждением этому предположению могут служить результаты анализа взаимосвязи значений спектральных индексов для хвойных лесов с независимо полученными данными об уровне антропогенной нагрузки на территорию области, сравнение которых в ячейках регулярной сети показало пространственную корреляцию.

Дальнейший анализ также продемонстрировал очевидную тенденцию к снижению средних значений обоих спектральных индексов для хвойных лесов по мере роста уровня антропогенной нагрузки на территорию (рис. 7).



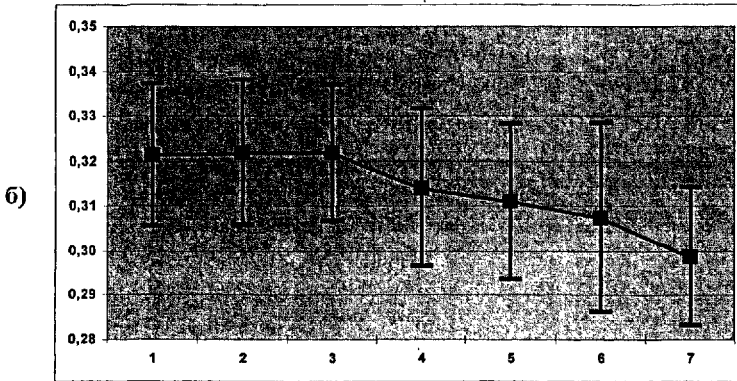


Рис. 7 Средние значения и диапазоны изменений индексов NDVI (а) и NDWI (б) в зависимости от уровня антропогенной нагрузки на территорию

При этом можно наблюдать, что для индекса NDWI характерно более устойчивое снижение значений после достижения некоторых критических значений уровня антропогенной нагрузки, что может служить его характеристикой, как более чувствительного, по сравнению с NDVI, индикатора экологического состояния лесов. Из сравнения динамики обоих спектральных индексов можно также предположить, что реакция лесов на возрастание антропогенной нагрузки, проявляющаяся в снижении концентрации хлорофилла происходит с некоторой задержкой после начала процессов обезвоживания древесной растительности.

Объяснением вариабельности значений спектральных индексов в пределах однородных по условиям антропогенной нагрузки территорий могут служить различия в устойчивости древесных пород, возрастных категорий и, наконец, индивидуальных особенностей отдельных деревьев. В анализе также нуждаются ландшафтные особенности территорий, а также дополнительные неучтенные факторы негативного воздействия на окружающую среду.

Анализ сформированной базы данных ГИС об индикаторах экологического состояния лесов области позволяет выявить территории с наиболее высоким уровнем угнетения лесной растительности. В частности, для хвойных насаждений Ленинского, Люберецкого, Каширского, Химкинского, Красногорского и Домодедовского районов, расположенных в непосредственной близости к городу Москва, характерны относительно низкие значения

спектральных индексов NDVI и NDWI, что может свидетельствовать о высоком уровне угнетения лесов вследствие антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Заключение. Диссертационная работа содержит результаты исследований и научных разработок автора, которые можно рассматривать как решение важной научной задачи по развитию методов мониторинга экологического состояния лесов по данным спутниковых наблюдений. По результатам диссертационной работы можно сделать следующие основные выводы:

- Современное состояние развития методов дистанционного зондирования обеспечивает возможность оценки характеристик состояния лесного покрова и создания системы регионального мониторинга лесов на основе комбинированного использования данных различного пространственного разрешения;
- Методика региональной оценки экологического состояния лесов, предполагает использование спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения (в частности, Terra/Aqua-MODIS и Landsat-ETM+) и направлена на определение индикаторов, отражающих покрытие территории лесами, породный состав насаждений и их физиологическое состояние, характеризуемое относительным уровнем концентрации хлорофилла и влагообеспеченности;
- Разработанный метод взаимной радиометрической нормализации различающихся по условиям съемки изображений Landsat-ETM+ повышает эффективность использования данных спутниковых наблюдений для региональной оценки состояния лесов;
- Эксперименты по классификации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям показали возможность выделения темнохвойных, светлохвойных, лиственных и смешанных лесов с достаточным уровнем достоверности;
- Комплексное использование результатов классификации лесов по данным MODIS и Landsat-ETM+ обеспечивает эффективную возможность оценки лесистости, как одного из важнейших индикаторов экологического состояния лесов региона;
- Анализ взаимосвязей между значениями вегетационных индексов NDVI и NDWI по данным MODIS и уровнем антропогенной нагрузки показал возможность их использования в качестве индикаторов состояния хвойных лесов;
- Анализ сформированной по результатам обработки спутниковых изображений базы данных ГИС об индикаторах экологического состояния лесов Московской области позволяет выявить территории с высоким уровнем угнетения лесной растительности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барталев С.С., Оценка индикаторов состояния лесов Московской области по данным спутниковых наблюдений. // Электронный многопредметный научный журнал «Исследовано в России» том 9 стр. 948-958
2. Барталев С.С., Исследование возможностей классификации лесов Московской области по данным Landsat-ETM+. // Сборник трудов X межвузовского научно-практического семинара студентов, аспирантов и молодых ученых Московского региона по актуальным проблемам экологии и природопользования стр. 114-120
3. Мельник Н.Н., Барталев С.С., Применение информационных систем в целях оптимизации деятельности агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов // Вестник, электротехнологии, электрификации и автоматизации сельского хозяйства. Научный журнал под редакцией Т.Б. Лещинской. Выпуск №3 (13). Раздел информационные технологии. стр. 151-154
4. Барталев С.С., Малинников В.А., Взаимная яркостная нормализация спутниковых изображений при региональном картографировании лесов. // Известия высших учебных заведений специальный выпуск 2006 г. стр. 83-92
5. Барталев С.С., Малинников В.А., Возможности региональной экологической оценки лесов по данным спутниковых наблюдений. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. №6 2006 г. стр.3-18
6. Барталев С.С., Малинников В.А., Эксперименты по региональной оценке характеристик экологического состояния лесов с использованием данных спутниковых наблюдений и ГИС-технологий. Четвёртая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г. Сборник тезисов конференции стр. 202

МГУГиК

105064, Москва К-64, Гороховский пер., 4

Подп. к печати 16.11.2006 Формат 60×90

Бумага офсетная Печ. л. 5 Уч.-изд. л. 5

Тираж 80 экз. Заказ № 252 Цена договорная

