

Методика оценки покрытой лесом площади по спутниковым изображениям спектрорадиометра MODIS среднего пространственного разрешения

Д.В. Ершов

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: ershov@ifi.rssi.ru

В статье представлена методика оценки покрытой лесом площади по спутниковым данным среднего пространственного разрешения спектрорадиометра MODIS (250 метров). Методика основывается на последовательности процедур по подготовке композитных безоблачных изображений MODIS, определения состава спектральных каналов, формирования опорных спектров оцениваемых компонентов и оценки их площади в пикселе спутникового изображения. Оценка площади производится с применением метода декомпозиции спектральных смесей *Matuie*, в основе которого положен геометрический принцип анализа в двумерном пространстве яркостей пиксела спутникового изображения относительно яркостей «чистых» компонентов, образующих вершина многоугольника. Результаты оценки покрытой лесом площади сравнивались с данными государственного учета лесного фонда на уровне лесохозяйственных предприятий и тематическим продуктом VCF (Vegetation Continues Field), разработанным специалистами НАСА и Университета Мерилленда.

Введение

Леса России являются важнейшей компонентой биосферы, оказывающей существенное влияние на протекающие в ней биогеохимические процессы, включая цикл углерода и других парниковых газов. Помимо цикличности погодных условий это влияние в значительной степени определяется происходящими в лесах крупномасштабными процессами, связанными с лесными пожарами, массовым размножением вредных насекомых, рубкой леса, промышленными выбросами [1, 2]. Предотвращение или хотя бы ослабление этих негативных явлений следует рассматривать как важнейшее условие устойчивого лесопользования и сохранения экологических функций лесов.

Основной целью исследования является разработка методики оценки покрытой лесом площади в пикселе спутникового изображения среднего пространственного разрешения. Количественная оценка покрытой лесом площади в пикселе спутникового изображения необходима для классификации покрытых и непокрытых лесом территорий, определения сомкнутости насаждений, выявления изменений в лесах. В качестве тестовых данных при разработке методики используется зимнее композитное (безоблачное) изображение среднего пространственного разрешения (250 метров) спектрорадиометра MODIS спутников TERRA и AQUA.

Методика формировалась с учетом исследований по следующим направлениям:

- Разработка технологии генерации сезонных композитных изображений Terra/Aqua-MODIS. Формирование тестового набора зимнего, весеннего, летнего и осеннего композитного изображений на всю территорию России за 2004 год.
- Анализ сигнатур спектральных яркостей основных лесообразующих пород России по сезонным композитным изображениям с использованием карт лесов 1990 года и наземных экосистем Северной Евразии 2000 года [3].
- Исследование возможности количественной оценки доли площади лесов в пикселе зимнего композитного изображения с применением линейной модели декомпозиции спектральных смесей.
- Сравнение результатов оценки доли покрытой лесом площади предложенным методом с данными лесистости материалов государственного учета лесного фонда.

1. Создание сезонных изображений на основе спутниковых продуктов MODIS

Полномасштабное картографирование лесов Северной Евразии возможно только при использовании спутниковых изображений, покрывающих всю ее территорию в различные периоды вегетации лесного покрова. Данные спектрорадиометра MODIS, накопленные в мировых архивах с момента запуска спутников TERRA и AQUA, позволяют создавать глобальные и континентальные покрытия в различные периоды фенологии лесной растительности для повышения разделительности и повышения точности классификации основных лесообразующих пород Евразийского континента.

1.1 Алгоритм обработки спутниковых данных

Алгоритм формирования сезонных изображений MODIS состоит из нескольких этапов:

- I. Маскирование артефактов изображений на 16-х дневных композитах (стандартные продукты EOS MOD13Q1 и MYD13A1) [4], вызванных снегами, остаточной облачностью, тенями, дымами от лесных пожаров
- II. Маскирование участков изображений с низким пространственным разрешением
- III. Исключение из композитов вышеуказанных артефактов
- IV. Расчет среднего значения (μ) и стандартного отклонения (σ) яркостей пикселей временного стека спутниковых композитных изображений. Маскирование пикселей, значения которых выходят за границы интервала $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$
- V. Формирование сезонных композитных изображений с учетом вегетационного сезона и схода/появления снежного покрова

Для выделения облачности, снега, льда, дымов от пожаров применяется индекс NDSI. Методы и этапы формирования сезонных изображений детально приводятся в работах [3, 5, 6]. В результате обработки изображения формируется тематический слой, содержащий классы облачности, снега, льда и смешанный класс, объединяющий все три объекта.

Для учета влияния различий в пространственном разрешении при формировании мозаики 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%.

Для устранения остаточных явлений меньшего размера используется статистический анализ временных рядов спутниковых изображений для каждого сезона в отдельности. Для этого формируются временные серии за три месяца, для каждого пикселя которых рассчитывается среднее μ и стандартное отклонение σ значений спектральных яркостей, сохраненных после первых трех этапов обработки. Затем осуществляется маскирование пикселей во временном профиле, значений, расположенных вне границ следующего интервала $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$.

На заключительном этапе формирования сезонных изображений осуществляется усреднение значений спектральных яркостей спутниковых изображений, сохраненных после всех предыдущих этапов обработки данных. В результате для каждого спектрального канала формируется изображение со средними значениями спектральных яркостей. Для зимней мозаики в расчетах учитываются значения яркостей пикселей снежного покрова.

1.2 Сезонные композитные изображения на территории России

Формирование сезонных композитных изображений проводилось с использованием набора производных продуктов – 16-дневных композитных изображений MOD13Q1 «The MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid» и MOD13A1 «The MODIS/Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid» с пространственным разрешением 250 метров и 11 информационными каналами. В его состав входят два индекса: нормированный разностный вегетационный индекс NDVI и улучшенный вегетационный индекс EVI, а также информация об их качестве. Продукт также содержит спектрально-отражательные яркости подстилающей поверхности синего, красного, ближнего ИК (NIR), среднего ИК (MIR) диапазонов электромагнитного спектра.

Архивы спутниковых продуктов MOD13Q1 и MOD13A1 хранятся на серверах NASA по отдельным гранулам размером $10 \times 10^\circ$ градусов по широте и долготе в синусоидальной проекции. Для формирования сезонных изображений мозаик, охватывающих покрытую лесом территорию России необходимо 26 гранул. Для каждой гранулы за год формируется набор из 46 изображений размером 22,8 Гб. Общий объем информации для всей территории России составляет 592,8 Гб.

С помощью алгоритма предварительной обработки, были последовательно подготовлены сезонные композитные изображения 2004 года, уменьшенные фрагменты которых приводятся на рис. 1.

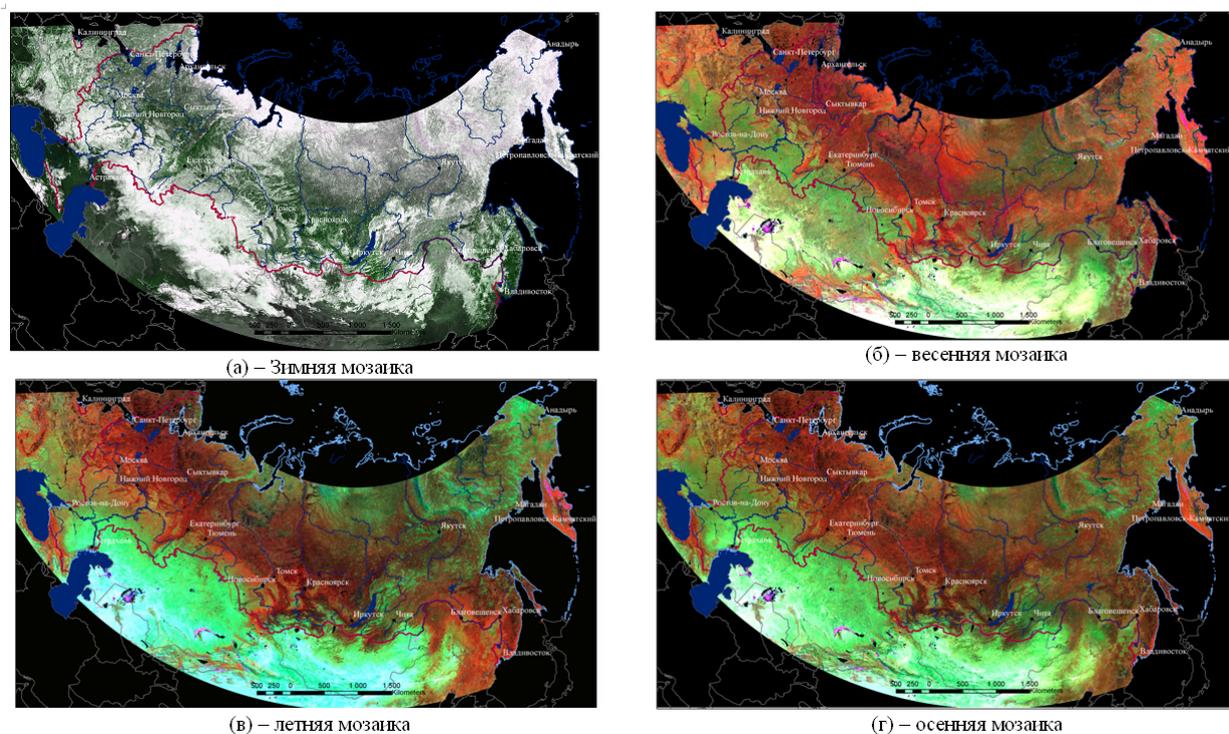


Рис. 1. Сезонные композитные изображения территории России

2. Оценка покрытой лесом площади в пикселе спутникового изображения MODIS

Одним из важных показателей при картографировании лесного покрова является оценка площади проективного покрытия лесов в пикселе спутникового изображения. Данная характеристика позволяет классифицировать леса по сомкнутости, определять лесистость территории, выделять редины и редколесья. В работе рассмотрен методика оценки покрытой лесом площади с использованием линейной модели декомпозиции спектральных смесей.

2.1 Метод анализа спутниковых данных

В основе оценки площадей объектов на субпиксельном уровне лежит известное положение о том, что регистрируемое спутником излучение интегрирует всю радиацию, отражаемую попадающим в поле зрения прибора участком подстилающей поверхности, а соответствующая пикселу яркость может быть выражена линейной функцией взвешенных яркостей отдельных типов объектов или компонентов. При этом вес оцениваемых компонентов принимается пропорциональным их площади в проекции пиксела на земную поверхность. Это позволяет оценить площади компонент в пикселах изображения на основе решения системы линейных уравнений [7]. Преимуществом этого метода является то, что в нем учитываются вариации компонент, а к ограничениям относится необходимость увеличения количества спектральных каналов с ростом требуемого числа компонентов.

При разработке метода оценки покрытой лесом площади в пикселе спутникового изображения использовался метод Matuie [8], апробированный в работе [9]. К числу достоинств метода следует отнести ясную геометрическую интерпретацию, а также отсутствие жесткой связи между количеством используемых спектральных каналов изображения и максимально возможным числом оцениваемых компонентов.

Однако метод не позволяет учитывать вероятностный характер спектральных сигнатур объектов, а также получать оценки в пикселах, лежащих вне многоугольника, координаты вершин которого определяются значениями опорных спектров. Последнее обстоятельство, приводит к появлению, так называемых, “отраженных” пикселов, в которых использованная техника не обеспечивает получения оценок содержания компонентов. Для устранения этого недостатка метод декомпозиции смешанных пикселов дополняется методами попиксельной классификации. В нашем случае используется кластерный анализ для классификации исследуемой территории на однородные в спектральном отношении классы. В дальнейшем для каждого класса рассчитываются средние значения оцениваемых компонентов и присваиваются пикселям, расположенных вне зоны многоугольника.

Полученные в результате значения содержания компонентов для каждого пиксела удобно представлять в виде, так называемых, фракционных изображений, число которых соответствует числу выбранных компонентов, а значения пикселов определяются их содержанием (фракциями).

2.2 Предварительные результаты и оценка точности метода

Эксперименты по оценке покрытой лесом площади были выполнены с использованием описанного выше метода для всей территории России с использованием зимнего композитного изображения MODIS (рис. 1а).

Ниже приведены этапы анализа изображений:

- выбор спектральных каналов, необходимого множества элементарных компонентов смесей и определение их опорных спектров;
- вычисление методом декомпозиции спектральных смесей содержания элементарных компонентов выбранного множества в пикселах изображения и формирование фракционных изображений;
- классификация “отраженных” пикселов и дополнение фракционных изображений;
- вычисление значений доли покрытой лесом площади на основе оценок содержания множества элементарных компонентов в пикселах изображений;
- построение карты покрытой лесом площади по результатам обработки спутниковых изображений;
- сравнительный анализ покрытой лесом площади (продукт ЦЭПЛ) с данными Государственного учета лесного фонда по лесхозам

- сравнительный анализ покрытой лесом площади (продукт ЦЭПЛ) с продуктом VGT (NASA)

Для оценки покрытой лесом площади учитываются следующие три компонента: *древесная растительность (Sf)*; *травянистая растительность (Sg)*; *поверхность земли полностью лишенная растительности или открытая почва (Ss)*.

Применение зимнего изображения упрощает задачу выбора состава компонент и их опорных спектров. Безлесные территории в зимний период в северных и средних широтах обычно покрыты снегом, позволяющие рассматривать его единственной компонентой для непокрытых лесом территорий. Бесснежные территории обычно располагаются в южных широтах России и приходятся на сельскохозяйственные, степные и пустынные территории.

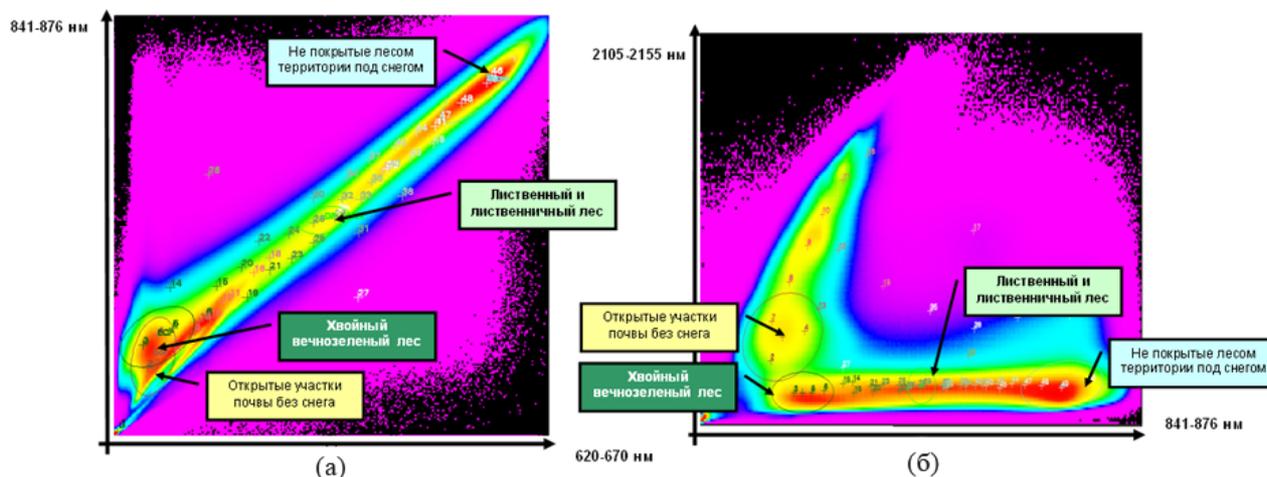


Рис. 2. Двумерные гистограммы яркостей и эллипсы рассеяния для комбинации спектральных каналов (а) 620-670 нм и 841-876 нм и (б) 841-876 нм и 2105-2155 нм

Комбинация каналов 841-876 нм и 2105-2155 нм дают наилучшую разделяемость «покрытой лесом земель» и «открытой почвы» (94%) по сравнению комбинацией 620-670 нм и 841-876 нм (40%), что и послужило основным критерием при выборе их для последующего анализа и применения метода декомпозиции спектральных смесей.

В качестве базовых компонент и их опорных спектров были выбраны «хвойные вечнозеленые леса», «открытая почва без снега» и «непокрытые территории под снегом» (рис. 2). Использование четвертой компоненты – лиственные и хвойные листопадные (лиственничные) леса затруднительно в методе *Matuie*, т.к. в результате образуется многоугольник с вершиной, расположенной под углом около 180° к двум соседним вершинам, принадлежащим «хвойный вечнозеленым лесам» и «непокрытой лесом территории под снегом».

Содержание в пикселах изображения множества элементарных компонент вычислялось с использованием полученных оценок их опорных спектров. В результате были получены фракционные изображения, значения пикселей которых характеризуют содержание искомым компонентом.

С помощью алгоритма неуправляемой классификации ISODATA по зимнему композиту сформировано кластерное изображение. Для каждого кластера были рассчитаны средние значения доли площади вышеперечисленных компонент. Эти данные использовались для заполнения «отраженных» пикселей средними значениями, отнесенных при классификации к соответствующим кластерам. Дополненные значениями компонентом в «отраженных» пикселях фракционные изображения (рис. 3а) составили основу для последующего вычисления покрытой лесом площади и построения карты лесистости (рис. 3б).

Однако считать полученную характеристику полностью соответствующую лесистости нельзя из-за недооценки площади лесов покрытых хвойными листопадными (лиственница) и лиственными породами. В зимнее время кроны деревьев этих пород лишены зеленых фракций, что увеличивает долю площади в пикселе изображения двух других компонентом – снега и открытой

почвы. По-существу, применяя метод к зимнему изображению, мы измеряем два параметра – долю площади проективного покрытия крон деревьев с хвоей (сомкнутость крон) и долю площади проективного покрытия стволов деревьев без хвои/листвы (полноту). Эти два показателя необходимы для лесохозяйственной оценки состояния древостоя. Однако дистанционные методы с использованием оптических данных в основном ориентированы на оценку сомкнутости полога леса, что не линейно связано с полнотой насаждения.

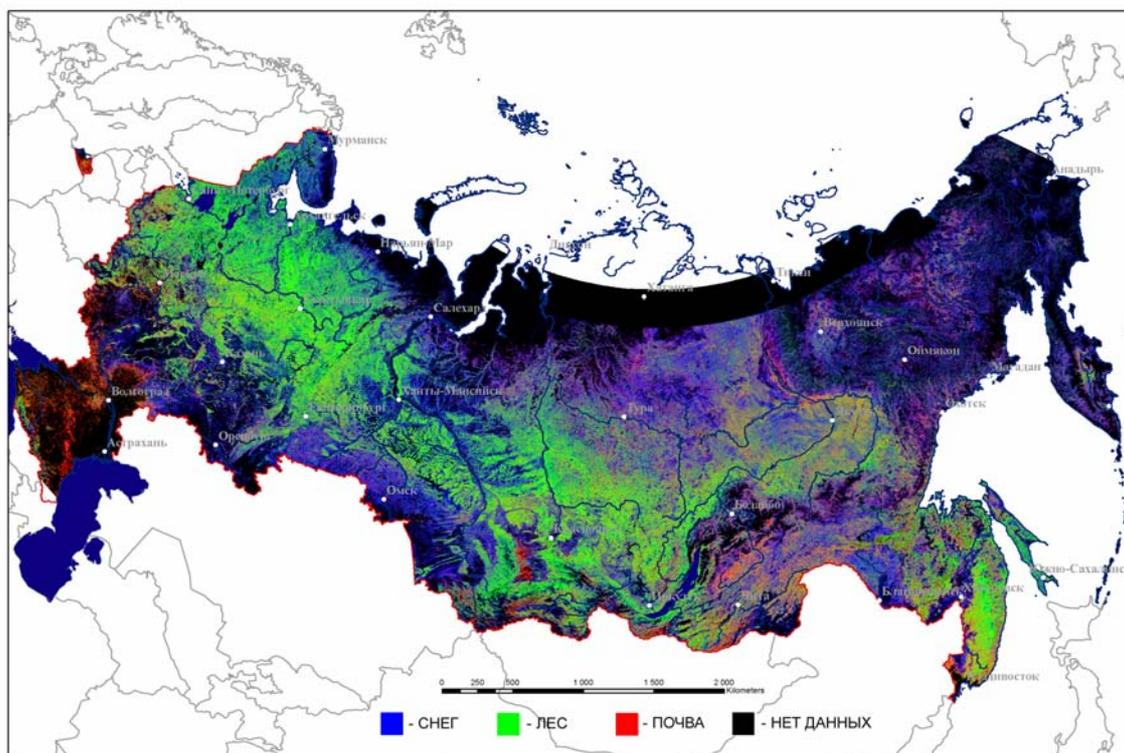


Рис. 3(а) – Фракционное изображение трех компонент: открытая почва, лес и снег

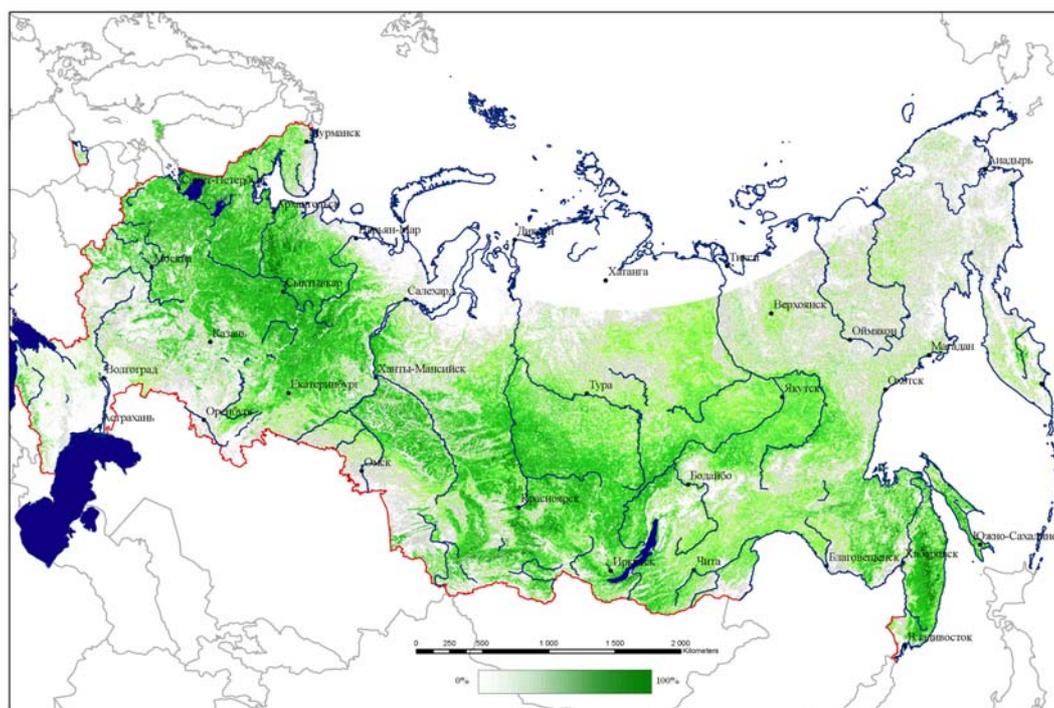
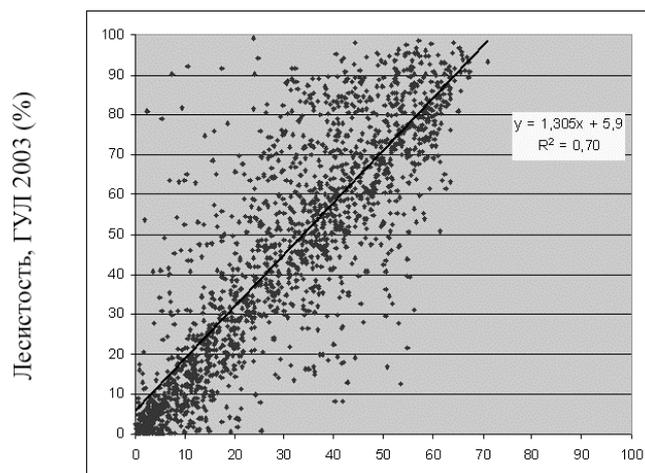
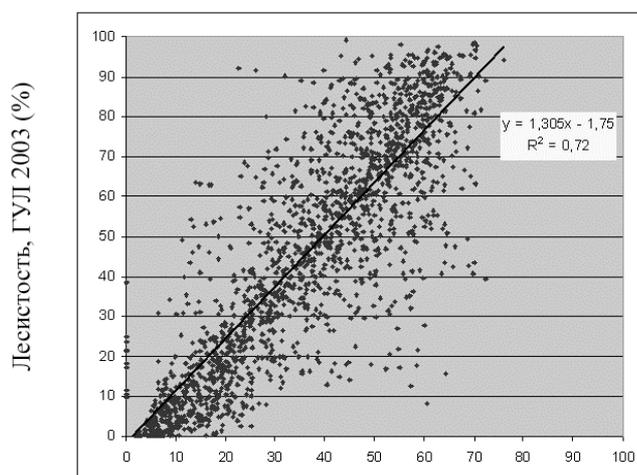


Рис. 3(б) – Карта лесистости по данным обработки зимнего композитного изображения MODIS



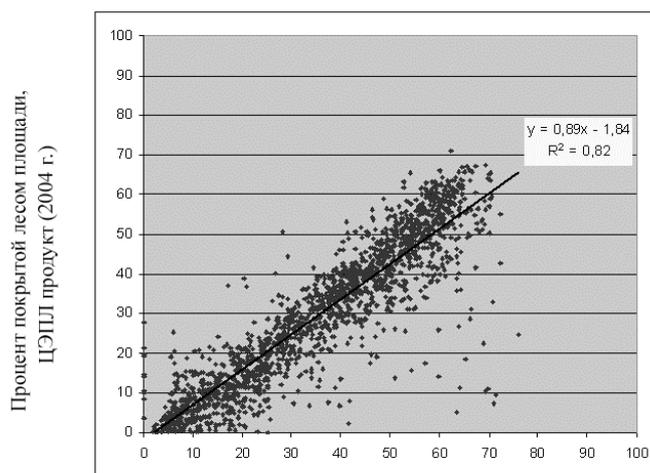
Процент покрытой лесом площади, ЦЭПЛ продукт (2004 г.)

Рис. 4(а) – Связь между покрытой лесом площади по данным MODIS (ЦЭПЛ продукт) и лесистости по ГУЛ 2003 года (1715 лесхозов)



Процент покрытой лесом площади, НАСА продукт (2001 г.)

Рис. 4(б) – Связь между покрытой лесом площади по данным MODIS (НАСА продукт) и лесистости по ГУЛ 2003 года (1715 лесхозов)



Процент покрытой лесом площади, НАСА продукт (2001 г.)

Рис. 4(в) – Связь между покрытой лесом площади по данным MODIS: тематический продукт ЦЭПЛ и НАСА

На рис. 4а приводится регрессионная зависимость, построенная по данным MODIS и Государственного учета лесного фонда (учет 2003 года). Для обеспечения пространственной сопоставимости, данные покрытой лесом площади, оцененные по MODIS, были также усреднены на уровне лесхозов. Как видно из рисунка, наблюдается достаточно хорошая связь между независимыми оценками показателя лесистости. Однако четко просматривается недооценка покрытых лесом площадей по данным MODIS для лесхозов с высокими показателями лесистости (более 70%). Вероятно, это связано преобладанием в этих лесхозах лиственных и лиственничных лесов. Для учета всех факторов (компонентов), участвующих в формировании покрытой лесом площади в пикселе необходимо использовать комбинацию информативных признаков (спектральных каналов) не только зимнего изображения, но изображений других вегетационных сезонов.

Аналогичную ситуацию мы наблюдаем при сравнении данных лесистости (ГУЛ) и продукта VCF (MODIS) 2001 года, разработанного совместно специалистами НАСА и Университетом Мериленда (рис. 4б). Глобальный продукт MOD44В по классификации НАСА, отражает распределение площадей трех компонентов (открытая почва, травянистая растительность, древесная растительность) в пикселе MODIS с пространственным разрешением 500 метров. Детальное описание продукта и алгоритмов приводится в работах [10, 11] и на сайте «Global Land Cover Facility» Университета Мериленда (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/vcf>). Несмотря на достаточно хорошую линейную связь между показателями, недооценка покрытых площадей составляет также около 30%.

Сравнение оценок площадей покрытых лесом, полученных выше описанными методами, проводилось также на уровне лесохозяйственных предприятий. Оба метода оценки покрытой лесом площади демонстрируют достаточно высокую корреляцию (рисунок 4в), что подтверждает перспективность применения алгоритмов декомпозиции спектральных смесей для спутниковых данных среднего пространственного разрешения.

Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение методики и алгоритма оценки покрытой лесом площади на основе комбинации данных MODIS, полученных в различные вегетационные сезоны для уточнения площадей листопадных пород.

Заключение

Разработана методика оценки доли покрытой лесом площади по зимним спутниковым изображениям MODIS с использованием метода декомпозиции спектральной смеси. Сравнение результатов обработки данных MODIS вышеописанным методом с данными государственного учета лесного фонда свидетельствует о перспективности предлагаемого подхода к количественной оценке покрытых лесом площадей по данным среднего пространственного разрешения. Однако для учета всех факторов (компонентов), участвующих в формировании покрытой лесом площади в пикселе необходимо использовать комбинацию информативных признаков (спектральных каналов) не только зимнего спутникового изображения, но данных полученных в различные фенологические фазы роста древесной растительности.

Литература

1. *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 // Сборник научных статей второй Всероссийской конференции Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Москва, Полиграф Сервис, 2005, сс. 388-392
2. *Исаев А.С., Лямцев Н.И., Ершов Д.В.* Прогнозирование и контроль массового размножения лесных насекомых в системе лесознтомологического мониторинга // Лесная таксация и лесоведение. Выпуск 1 (34), Красноярск, 2005, сс. 86-106

3. BARTALEV S.A., A.S. BELWARD, D.V. ERCHOV, and A.S. ISAEV, 2002, A new SPOT4-VEGETATION derived Land Cover Map of Northern Eurasia, International Journal of Remote Sensing, In press, Reference No: RES 103841 and associated cover (reference RES 107158)
4. *Alfredo Huete, Chris Justice, Wim van Leeuwen* (1999), MODIS VEGETATION INDEX (MOD 13): ALGORITHM THEORETICAL BASIS DOCUMENT, Version 3, 129 p., http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
5. *Панова О.В., Еришов Д.В.* Использование данных спектрорадиометра MODIS для регистрации и учета лесных гарей // Сборник научных статей второй Всероссийской конференции Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Москва, Полиграф Сервис, 2005, сс. 388-392.
6. *Девятова Н.В. Еришов Д.В.* Съемка MODIS/TERRA в мониторинге вспышек массового размножения очагов насекомых-вредителей // Сборник научных статей второй Всероссийской конференции Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Москва, Полиграф Сервис, 2005, сс. 262-266
7. *Adams J.B., Smith M.O., Johnson P.E.* Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site // Journal of geophysical research, 1986, N91. - p. 8098 - 8112.
8. *Mathie S., Berthod M., Leymarie P.* Determination of proportions and entropy of land use mixing in pixels of a multispectral satellite image.// IEEE Transactions on geoscience and remote sensing symposium (IGARSS 94), 1994. - pp. 1154 - 1156.
9. *Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С.* Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // «Исследование Земли из космоса», 1999, №4, 76-86
10. *Hansen, M., R. DeFries, J.R. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli, and R. Sohlberg* (2006), Vegetation Continuous Fields MOD44B, 2001 Percent Tree Cover, Collection 4, University of Maryland, College Park, Maryland, 2001
11. *Hansen, M., R.S. DeFries, J.R.G. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli, and R.A. Sohlberg* (2003), "Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm", Earth Interactions, Vol. 7, No 10, pp1-15.