Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности

И.А. Нейштадт

Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: neishtadt@smis.iki.rssi.ru

В настоящей статье описана методика построения очищенных от влияния облаков, теней и других мешающих факторов композитных изображений по данным спектрорадиометра Terra-MODIS. Рассматриваются возможности использования получаемых композитных изображений в различных приложениях дистанционного зондирования Земли на региональном и субконтинентальном уровнях Северной Евразии, включая решение задач, связанных с картографированием наземных экосистем и мониторингом их динамики в результате воздействия различных факторов.

Введение

Использование данных дистанционного зондирования со спутников предоставляет безальтернативную возможность регулярного мониторинга больших территорий. Современные спутниковые системы среднего и низкого разрешения позволяют получать полное покрытие Земли с периодичностью 1-2 дня. Однако использование этих данных для тематической обработки в интересах картографирования и мониторинга растительности затруднено из-за влияния облачного и снежного покрова, плохого пространственного разрешения при больших зенитных углах наблюдения, различий в условиях наблюдения на разных пролетах спутника. В тоже время для ряда тематических приложений не требуются столь частые наблюдения, а достаточно измерений с периодичностью несколько дней или недель. Это открывает возможность формирования очищенных от влияния мешающих факторов композитных изображений с улучшенными с точки зрения тематического анализа свойствами [1]. Для построения таких изображений требуется разработка автоматических алгоритмов обработки спутниковых данных.

Одной из современных систем дистанционного зондирования Земли среднего разрешения является прибор MODIS, установленный на спутниках Terra и Aqua. Получаемые с его использованием данные широко используются в различных приложениях, в частности, для глобального мониторинга растительности. В данной работе предпринята попытка построения автоматического алгоритма формирования композитных изображений по данным системы Terra-MODIS.

Используемые данные

Прибор MODIS выполняет съемку в 36 спектральных каналах видимого и инфракрасного диапазона длин волн с пространственным разрешением 250м, 500м и 1км [2-5] и обеспечивает ежедневное получение данных наблюдений для любого региона России. Данные наблюдений свободно распространяются Геологической службой США (http://lpdaac.usgs.gov/main.asp).

В качестве входных спутниковых данных в работе использовались стандартные ежедневные продукты, высокая точность географической привязки которых позволяет использовать их для анализа временных рядов измерений на уровне отдельных пикселов. В работе использовались продукты данных спутниковых наблюдений полученных в красном (620-670 нм) и ближнем инфракрасном (841-876 нм) каналах с пространственным разрешением 250 метров (продукт MOD09GQK), данных измерений в каналах голубого (459-479 нм) и среднего инфракрасного диапазонов (1628-1652 нм) длин волн, а также ряда других каналов, пространственное разрешение которых составляет 500 метров (MOD09GHK). Данные распространяются в

синусоидальной проекции [6]. Кроме того, были использованы продукты данных, содержащие информацию о положении спутника и Солнца (MODMGGAD), а также служебную информацию (MOD09GST). Сервер Геологической службы США обеспечивает регулярный доступ к указанным продуктам через 3-5 дней после проведения спутниковой съемки.

В ИКИ РАН разработана система получения и формирования архивов данных ежедневных наблюдений Terra-MODIS [7]. К настоящему времени сформирован архив указанных выше данных ежедневных наблюдений на значительную часть территории России, планируемый к расширению для покрытия всей территории страны и регулярному обновлению по мере поступления спутниковых данных.

Алгоритм предварительной обработки

Обеспечение возможности анализа динамики развития растительности по спутниковым данным сопряжено с необходимостью построения временных рядов данных наблюдений, очищенных от влияния ряда мешающих факторов, к числу которых, прежде всего, относится наличие облачного покрова, снега и теней от облаков. Одним из путей получения такого рода улучшенных данных является построение композитных изображений, формируемых на основе множества наблюдений за выбранный интервал времени таким образом, что элементы изображения заполняются только незашумленными измерениями. Кроме того, построение композитных изображений, наряду с улучшением качества спутниковых данных, позволяет значительно сократить их объем для использования в интересах тематической обработки.

На первом этапе из исходных спутниковых данных исключаются наблюдения, сделанные при зенитном угле наблюдения более 40º, а из нескольких сделанных с одного витка измерений одного и того же пиксела выбирается одно. Этот шаг позволяет уменьшить объем данных для последующей обработки приблизительно в три раза, исключив из дальнейшего рассмотрения измерения с неудовлетворительным фактическим пространственным разрешением.

Следующим этапом обработки является детектирование пикселов облаков, снежного покрова и теней от облаков. Для этого используются данные измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в 3-ем (459-479 нм) *R3* и 6-ом (1628-1652 нм) *R6* каналах прибора MODIS, которые для компенсации условий освещенности нормируются на косинус зенитного угла Солнца в точке наблюдения. В алгоритме используется также Нормализованный Разностный Индекс Снега NDSI [8], определяемый как $NDSI = \frac{R3 - R6}{R3 + R6}$. Для классификации облачности, снега и «чистой поверхности» используются следующие пороговые условия:

(i) «снег», если $R3 \geq 0.1$ и $NDSI \geq 0.4$;

(ii) «облачность», если $R3 \geq 0.1$ и $-0.2 \leq NDSI < 0.4$;

(iii) «полупрозрачная облачность», если $R3 \geq 0.1$ и $-0.2 > NDSI \geq -0.5$;

(iv) «чистая поверхность», во всех остальных случаях.

Пикселы, лежащие на границе облачного покрова, и, поэтому, покрытые облачностью лишь частично, могут быть при этом ошибочно отнесены к классу «чистая поверхность». Для того чтобы скомпенсировать влияние ошибочного детектирования пограничных с облаками участков, пикселы соседние с пикселами класса «облачность» отнесем к данному классу независимо от соответствующих им значений КСЯ. Аналогичная операция проводится для пикселов, отнесенных к классу «снег».

Также целесообразно выявить и исключить из дальнейшего рассмотрения на спутниковом изображении участки теней от облаков. Одним из путей решения этой задачи является оценка потенциальных участков теней от облаков, алгоритм расчета которых требует в качестве одной из входных характеристик данные о высоте облачного покрова в каждом пикселе спутникового изображения. При известных значениях высоты облаков можно рассчитать местоположение соответствующих им теней, используя данные об углах наблюдения и углах Солнца. Введем прямоугольную декартову систему координат с началом в данном со-

ответствующем облаку пикселе с осью Ox направленной на север и осью Oy направленной на восток. Тогда радиус-вектор смещения тени на изображении относительно облака высотой H задается в этой системе следующими координатами:

$$x = H\left(\cos(\psi)\,\mathrm{tg}(\theta) - \cos(\beta)\,\mathrm{tg}(\delta)\right)$$
$$y = H\left(\sin(\psi)\,\mathrm{tg}(\theta) - \sin(\beta)\,\mathrm{tg}(\delta)\right),$$

где ψ – азимутальный угол наблюдения, θ – зенитный угол наблюдения, β – азимутальный угол Солнца, δ – зенитный угол Солнца.

Получение данных о высоте облаков в настоящее время не представляется возможным. Поэтому для расчетов был использован максимально возможный диапазон высоты облачности (0-8 км) для гарантированного, хотя и заведомо избыточного, исключения из рассмотрения всех затененных пикселов. В силу того, что часто облачные пикселы ошибочно попадают в класс «снег» зона теней строится для пикселов обоих классов.

Для формирования композитных изображений, на основе полученных в результате предварительной обработки данных, каждому пикселу присваивается нормированное на косинус зенитного угла визирования значение КСЯ, соответствующее наиболее высокому пространственному разрешению из множества наблюдений за рассматриваемый период, отнесенных к классу «чистая поверхность». В случае если за рассматриваемый период ни одно из измерений не было отнесено к классу «чистая поверхность» соответствующему пикселу присваивается код отсутствия данных.

При рассмотрении временного ряда композитных изображений в ряду значений яркости данного пиксела могут встречаться однократные аномальные выбросы, обусловленные различиями условий освещения и наблюдения, остаточным влиянием облаков, снега и теней. Для сглаживания временного ряда яркости каждого пиксела применяется алгоритм медианной фильтрации. Полученные после медианной фильтрации композитные изображения образуют семейство, которое далее будем называть TM_SIN_XDCYMED (Terra-MODIS Surface reflectance Sinusoidal projection X-day long Y-meter resolution Composite image), где X – число дней наблюдений, используемых для формирования композита, Y – пространственное разрешение, которое может быть равным 250 или 500 м. Продукты TM_SIN_XDCYMED занимают меньший объем по сравнению с данными ежедневных наблюдений и принципиально более удобны для тематической обработки. В настоящее время наибольшее практическое применение нашли композитные изображения, собранные за восьмидневный период наблюдений. Продукты TM_SIN_XDCYMED являются основой для построения композитных изображений за более длительные периоды времени. Например, чтобы построить композитное изображение за месяц вычисляется медиана значений КСЯ для данного пиксела из множества значений композитов TM_SIN_XDCYMED за рассматриваемый период. Таким образом, для построения композитных изображений за большие периоды времени нет необходимости обработки больших массивов данных ежедневных наблюдений, а достаточно использовать композиты TM_SIN_XDCYMED предварительно собранные с периодом в несколько дней.

Разработанное программное обеспечение позволяет варьировать параметры алгоритма для построения композитных изображений необходимых в конкретном приложении. Можно изменять пороги для классификации пикселов, высоту облачности, период, за который собираются композитные изображения, ширину окна медианного фильтра.

В настоящее время в ИКИ РАН создан банк данных композитных изображений TM_SIN_8DC250MED и TM_SIN_8DC500MED, практически полностью покрывающий территорию России, на которой ведется растениеводство. При необходимости существующее программное обеспечение позволяет построить композитные изображения с заданными параметрами на любой регион, который покрыт данными ежедневных наблюдений.

Анализ полученных результатов

Пример полученных композитных изображений приведен на рис. 1. Для демонстрации эффективности использования медианного фильтра на рис. 2 приведен график КСЯ для отдельного пиксела, построенный по восьмидневным композитам до и после применения медианного фильтра. На рис. 3(а) приведено синтезированное изображение построенное по данным стандартных продуктов MOD09Q1, MOD09A1. Для сравнения на рис. 3(б) приведено синтезированное изображение построенное по данным продуктов TM_SIN_8DC250MED, TM_SIN_8DC500MED. Изображения покрывают одну территорию и построены за одинаковый промежуток времени.

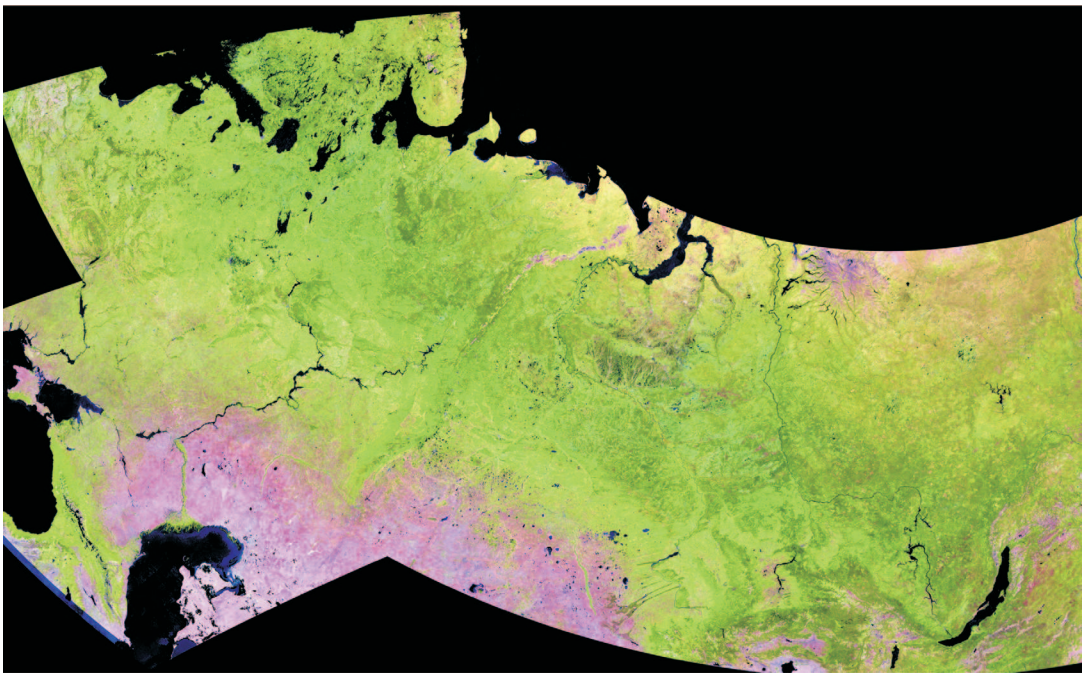


Рис. 1. Композитное изображение Terra-MODIS за июль-август 2005 г, цветовой синтез: красный – канал 1628-1652 нм, синий – канал 620-670 нм, зеленый – канал 841-876 нм

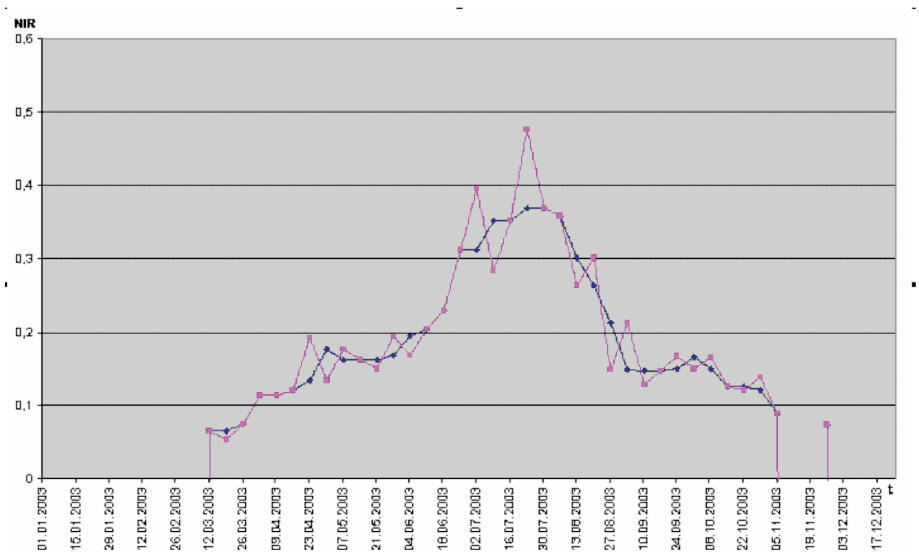
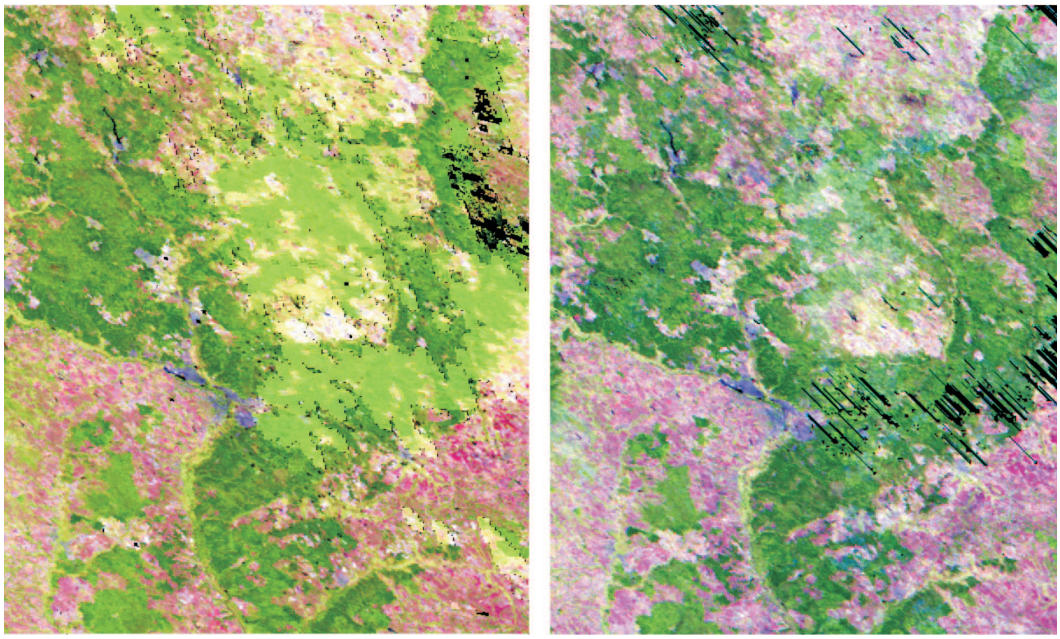


Рис. 2. Использование медианной фильтрация для сглаживания временных рядов данных наблюдений Terra-MODIS. Красной и синей линиями показаны соответственно временные ряды значений КСЯ в ближнем инфракрасном канале до и после медианной фильтрации



а *б*

Рис. 3. Сравнение композитных изображений MOD09Q1 (а) и TM_SIN8DC250MED(б). Цветовой синтез: красный – канал 1628-1652 нм, синий – канал 620-670 нм, зеленый – канал 841-876 нм. Черным цветом показаны участки с отсутствием измерений, удовлетворяющих условиям формирования композитных изображений

Важной характеристикой получаемых композитов является количество измерений отнесенных к классу «чистая поверхность». На рис. 4 показано количество таких измерений по данным продукта TM_SIN_8DC250MED за один год. Видно что для более северных территорий это количество меньше, чем для южных. Это может говорить о том, что для северных территорий в принципе нецелесообразно построение и анализ внутригодовых временных рядов наблюдений на основе предложенного алгоритма, а может применяться только анализ композитных изображений собранных за длительный период (месяц, сезон).

Представленный алгоритм может быть улучшен различными способами. Перспективным является улучшение алгоритма детектирования теней, т.к. в настоящее время алгоритм относит к классу «тени от облаков» избыточное количество пикселов. Возможные улучшения могут включать: улучшение разделимости снежного и облачного покрова, уточнение высоты облачного покрова по данным яркости в спектральных каналах температурного диапазона электромагнитных волн, выявление участков теней на основе пространственного анализа результатов детектирования облаков.

Возможен подбор порогов классификации в каждом пикселе поверхности в соответствии с характерной яркостью конкретной подстилающей поверхности для минимизации ошибок. Представляется перспективным анализ временного ряда ежедневных наблюдений для детектирования пикселов облаков и снега, как резко выделяющихся на фоне остальных измерений. Возможно дополнительное использование измерений в красном и ближнем инфракрасном каналах, которые будучи в меньшей степени предназначенными для наблюдений за облаками, потенциально могут позволить выявлять более мелкие участки облаков за счет более высокого пространственного разрешения по сравнению с данными съемки в голубом и среднем инфракрасном каналах.

Полученные композитные изображения могут использоваться в различных тематических приложениях, связанных с картографированием растительного покрова, мониторингом сельскохозяйственных земель, оценкой динамики лесных экосистем и др. При этом существенно различаются и требования к максимально допустимой продолжительности периода спутниковых наблюдений для формирования композитных изображений, который может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев.

В ИКИ РАН разрабатывается система мониторинга с.-х. земель [9, 10], требующая использования спутниковых наблюдений с достаточно высоким временным разрешением. В этой системе используются

восьмидневные композитные изображения TM_SIN8DC250MED, содержащие информацию о КСЯ наблюдаемой поверхности в красном и ближнем инфракрасном каналах с пространственным разрешением 250м. На вебсайте системы (www.agrocosmos.gvc.ru) предполагается создание интерфейса доступа к композитным изображениям, а также обеспечение возможности получения пользователем временных рядов вегетационного индекса для заданного участка местности.

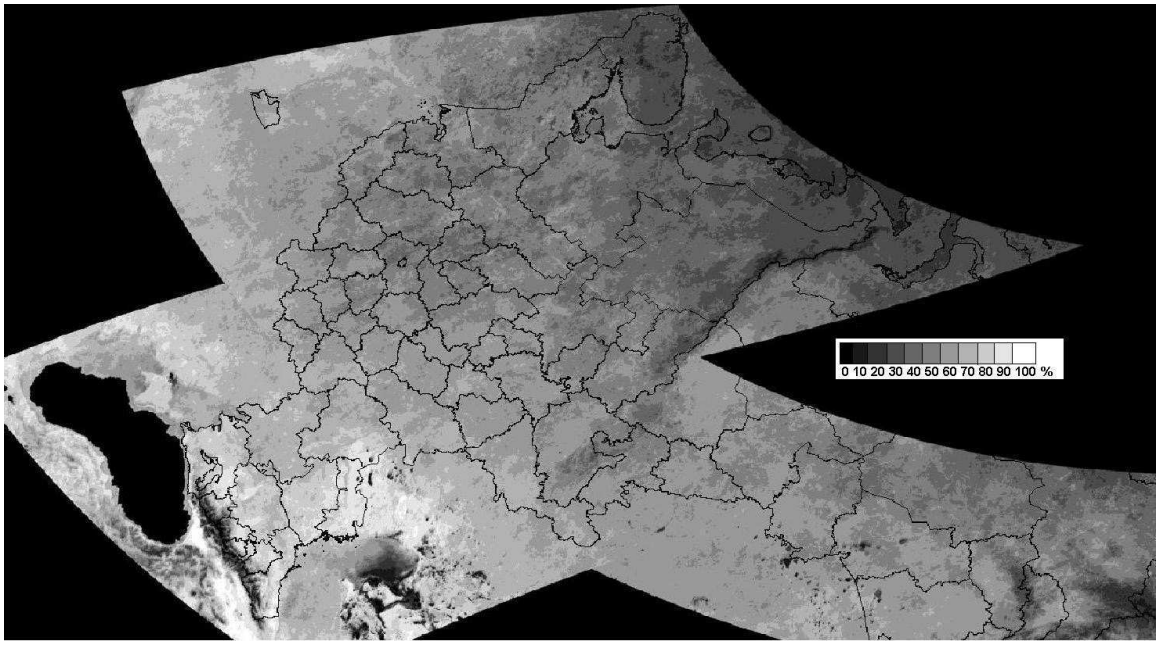


Рис. 4. Доля измерений, соответствующих классу «чистая поверхность», за 2005 год по восьмидневным композитным изображениям Terra-MODIS. Черными линиями показаны границы субъектов РФ

Для создания новой карты растительности Северной Евразии в ИКИ РАН используются сезонные (весна, лето, осень) и помесячные композитные изображения Terra-MODIS. Низкая зашумленность и высокое пространственное разрешение таких композитных изображений позволяют достигать достаточно высокого уровня точности классификации растительности при использовании стандартных методов кластерного анализа изображений. Разработка указанной выше карты в сочетании с автоматической технологией формирования очищенных от влияния мешающих факторов композитных спутниковых изображений Terra-MODIS создает информационную основу для развития ряда систем спутникового мониторинга: сельскохозяйственных земель, оценки последствий лесных пожаров и повреждений лесов насекомыми, выявления вырубок в лесах и других приложений..

Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А.* Синтез улучшенных сезонных изображений Северной Евразии для картографирования и мониторинга динамики растительности по данным SPOT-Vegetation // Дистанционное зондирование поверхности Земли и атмосферы, Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004, вып. 5. С.12-14.
2. *Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F. et al.* An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sensing of Environment, 2002, №83. P.3-15.
3. *Barnes W.L., James J., Guenther B., Salomonson V.V., Xiong X.* On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data // Remote Sensing of Environment, 2002, №83. P.16-30.

4. Earth Observation System (EOS) Data Products Handbook, Eds.: Closs J., King M.D., Spangler S., Greenstone R. // NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland, 2003. Vol. I. 258 p.
5. EOS Reference Handbook, Eds.: Greenstone R., King M.D. // NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland, 1999. 361 p.
6. *Karen A.M., Seong J.C., Usery L.E.* The sinusoidal projection: a new importance in relation to global image data // The Professional Geographer, 2002, №54. P.218-225.
7. *Бурцев М.А., Мазуров А.А., Нейштадт И.А., Прошин А.А.* Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности // данный сборник.
8. *Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V.* Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment, 1995, №54. P.127-140.
9. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А.* Построение карты используемых пахотных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS // данный сборник.
10. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса, 2006, №3. В печати.