

Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова

С.А. Барталев, Е.А. Лупян

Институт космических исследований РАН

117997 Москва, Профсоюзная 84/32

E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

В работе дается обзор основных направлений исследований и разработок Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова. Рассматриваются вопросы методологии картографирования наземных экосистем и оценки их изменений под воздействием различных деструктивных факторов на основе данных дистанционного зондирования со спутников. Анализируются перспективные направления разработки методов спутникового мониторинга растительного покрова с учетом планов развития систем дистанционного зондирования, современных тенденций предоставления открытого доступа к глобальным архивам данных, национальных и международных приоритетов в области охраны окружающей среды, управления природными ресурсами, исследований глобальных изменений биосферы.

Ключевые слова: растительный покров, наземные экосистемы, дистанционное зондирование, методы обработки спутниковых данных.

Введение

В развитии методологии и технологий спутникового мониторинга растительного покрова, а также практическом использовании его результатов, на наш взгляд, можно выделить три последовательных этапа (*табл. 1*):

1. *Начальный этап (середина 1970-х – конец 1990-х годов)*, характеризуемый ограниченным доступом к спутниковым данным, доминированием методов визуального анализа и интерактивной обработки изображений, а также эпизодическим применением разрабатываемых методов и технологий на локальном и региональном уровнях, преимущественно в целях демонстрации их потенциальных возможностей.
2. *Переходный этап (конец 1990-х – начало 2000-х годов)*, отличающийся существенным упрощением доступа к данным (как правило, историческим) вследствие изменения политики их распространения и использования интернет-технологий, появлением возможностей получения и автоматизированной обработки временных рядов данных на большие территории континентального и планетарного уровней, осуществлением крупных международных проектов в области глобального картографирования и мониторинга наземных экосистем.
3. *Современный этап (начало 2000-х годов – настоящее время)*, характерные черты которого определяются нарастающим уровнем открытости доступа к спутниковым данным, предоставляющим возможности их оперативного получения и формирования однородных (по радиометрическому и геометрическому качеству) многолетних рядов, развитием автоматических технологий предварительной и тематической обработки данных, а также созданием web-сервисов on-line предоставления информационных продуктов и инструментов их анализа для оценки состояния и динамики растительного покрова.

Таблица 1. Основные этапы развития методологии спутникового мониторинга растительного покрова

<i>Начальный этап развития (с середины 1970-х годов)</i>	<i>Переходный этап развития (конец 1990-х – начало 2000-х годов)</i>	<i>Современный этап развития (с начала 2000-х годов)</i>
Спутниковые данные		
<ul style="list-style-type: none"> • Отсутствие свободного доступа к данным • Значительное время на получение данных • Локальный и региональный охват 	<p>Свободный on-line доступ к глобальным архивам исторических данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> • SPOT-Vegetation • Terra/Aqua-MODIS • Landsat-TM/ETM+ 	<p>Свободный on-line доступ к оперативно обновляемым глобальным архивам данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Terra/Aqua-MODIS, NPP-VIIRS, Proba-V • Landsat-TM/ETM+, LDCM • Sentinel-2 и -3 (в перспективе)
Методы обработки спутниковых данных		
<ul style="list-style-type: none"> • Методы визуального анализа и интерактивной обработки изображений 	<ul style="list-style-type: none"> • Методы автоматизированной обработки временных рядов данных 	<ul style="list-style-type: none"> • Технологии обработки многолетних рядов данных на большие территории
Вычислительные средства		
<ul style="list-style-type: none"> • Крупные вычислительные комплексы коллективного пользования 	<ul style="list-style-type: none"> • Обработка больших массивов данных на персональных компьютерах 	<ul style="list-style-type: none"> • Кластерные и «облачные» технологии обработки сверхбольших массивов данных
Технологии мониторинга		
<ul style="list-style-type: none"> • Технологии региональной инвентаризации лесов, пастбищ, с.х. посевов и др. 	<ul style="list-style-type: none"> • Автоматические технологии обработки данных и доступа к результатам на основе Интернет 	<ul style="list-style-type: none"> • Автоматические web-сервисы on-line предоставления информационных продуктов и инструментов анализа данных
Пользователи		
<ul style="list-style-type: none"> • Преимущественное использование в демонстрационных целях 	<ul style="list-style-type: none"> • Крупные государственные организации (например, НПО «Авиалесоохрана») 	<ul style="list-style-type: none"> • Международные организации (FAO и др.) • Государственные организации • Частные компании

Не останавливаясь на анализе различных исторических аспектов формирования современного облика методологии спутникового мониторинга растительного покрова, считаем необходимым отметить, что вектор текущего развития данного научного направления в России в значительной степени был задан рядом основополагающих разработок, связанных с созданием методов анализа спутниковых данных и технологий построения информационных систем мониторинга окружающей среды, обеспечивших возможности регулярного получения информации о земном покрове на национальном (субконтинентальном) уровне территориального охвата. В этом направлении наиболее активно проводились работы ИКИ РАН в кооперации с Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН).

Использование разработанных методов и технологий позволило в начале 2000-х годов создать ряд тематических продуктов и специализированных систем мониторинга наземных экосистем. К числу такого рода продуктов, в частности, следует отнести полученную по данным SPOT-Vegetation карту наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003), нашедшую широкое использование в научных проектах и интегрированную в большое число действующих систем мониторинга окружающей среды. К этому же времени была введена в эксплуатацию не имеющая до настоящего времени аналогов в нашей стране по уровню функциональности Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Рослесхоза (ИСДМ-Рослесхоз) (Лупян и др., 2007; Абушенко и др., 2000; Ершов и др., 2004). Получили развитие автоматические методы картографирования повреждений растительного покрова пожарами на основе данных SPOT-Vegetation, позволившие сформировать многолетнюю базу данных о поврежденных огнем участках на территории России (Егоров и др., 2006) и бореального пояса планеты (Bartalev et al., 2007).

С начала 2000-х годов активно разрабатывались и методы спутникового мониторинга сельскохозяйственных угодий. Так, на основе многолетних рядов данных MODIS был разработан метод распознавания используемых пахотных земель и создана соответствующая цифровая карта на территорию России (Барталев и др., 2006), нашедшая использование при проведении Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2006 г. Была создана и введена в опытную эксплуатацию в интересах Министерства сельского хозяйства РФ Система дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса (СДМЗ АПК) (Лупян и др., 2009).

Одним из важных организационных моментов развития данного научного направления стало создание в ИКИ РАН в 2002 г. Лаборатории методов спутникового мониторинга наземных экосистем со следующими приоритетными задачами:

- разработка методов получения по данным спутниковых наблюдений информации о количественных и качественных характеристиках наземных экосистем, в первую очередь, растительного покрова, для исследования процессов глобальных изменений биосферы и решения задач обеспечения устойчивого развития человеческого сообщества;
- использование спутниковых данных и методов их анализа для мониторинга ключевых индикаторов изменений в наземных экосистемах Евразии с целью оценки и прогноза последствий воздействия на них природных и антропогенных факторов;
- интеграция разрабатываемых методов и получаемых данных в прикладные системы спутникового мониторинга наземных экосистем для оценки природных ресурсов и предупреждения опасных природных и антропогенных явлений.

При этом к отличительным чертам выполняемых в данном направлении исследований и разработок можно отнести следующие во многом взаимосвязанные особенности:

- высокий уровень автоматизации методов обработки спутниковых данных, предлагающих минимальное участие человека;
- адаптивность разрабатываемых алгоритмов обработки данных для обеспечения возможности их использования без дополнительной настройки параметров в широком диапазоне условий спутниковых наблюдений;

- возможность эффективного использования разрабатываемых методов (в частности, как следствие вышеуказанных особенностей) на больших территориях, в том числе национального, континентального и глобального охвата;
- интенсивное использование временных рядов данных многоспектральных спутниковых наблюдений и комплексирование данных различного пространственного разрешения (от десятков метров до километров).

Выполненные за прошедшее десятилетие научные исследования в области спутникового мониторинга наземных экосистем были, прежде всего, сфокусированы на решение задач в следующих основных направлениях:

- разработка комплекса алгоритмов, методов и технологий предварительной обработки спутниковых данных (фильтрация влияния мешающих факторов и случайных шумов) для повышения достоверности результатов их последующего тематического анализа;
- разработка комплекса адаптивных алгоритмов, методов и технологий автоматического распознавания типов земной поверхности по спутниковым данным для картографирования растительного покрова и выявления изменений в наземных экосистемах, вызванных различными деструктивными воздействиями природного и антропогенного характера;
- создание на основе разработанных методов и технологий обработки спутниковых данных тематических продуктов, отражающих состояние и динамику растительного покрова;
- разработка методов ассимиляции результатов обработки спутниковых данных в математические модели прогноза динамики наземных экосистем.

Выполненные разработки широко используются в ряде прикладных систем спутникового мониторинга окружающей среды, в частности таких как Информационный спутниковый сервис мониторинга растительного покрова ВЕГА, разработанный в интересах широкого круга пользователей (Лупян и др., 2011).

В настоящей статье дается обзор основных направлений исследований и разработок ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова. Рассматриваются вопросы методологии картографирования растительного покрова, оценки его состояния и динамики с использованием данных дистанционного зондирования. Анализируются перспективные направления разработки методов спутникового мониторинга наземных экосистем с учетом существующих планов развития систем дистанционного зондирования, современных тенденций предоставления открытого доступа к глобальным архивам данных, приоритетов в области охраны окружающей среды, управления природными ресурсами, исследований изменений биосферы и климата.

Спутниковые данные и методы их предварительной обработки

Беспрецедентно (в исторической ретроспективе) высокий уровень доступности спутниковых данных как одна из основных черт современного развития методологии мониторинга наземных экосистем порождает мощную мотивацию для разработки новых

методов и технологий их обработки, а также создания информационных систем мониторинга окружающей среды для широкого круга пользователей, не ограниченного рамками ведомственной или территориальной принадлежности.

В основе современных тенденций в области распространения спутниковых данных лежит осуществляемая рядом некоторых ключевых в данной области государственных ведомств (Геологическая служба США, Европейское космическое агентство и некоторые другие) политика открытого доступа к данным, получаемым в широком диапазоне величин пространственного разрешения. В настоящее время при решении задач мониторинга наземных экосистем с различной степенью интенсивности используются данные спутниковых систем низкого и среднего пространственного разрешения (250 м – 1 км), таких как NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra/Aqua-MODIS, Envisat-MERIS, NPP-VIIRS. Политика открытого доступа к данным также декларируется в отношении спутниковых систем Proba-V и Sentinel-3, рассматриваемых в качестве приемников по отношению к SPOT-Vegetation и Envisat-MERIS. Предоставленный в последние годы открытый доступ к данным Landsat-TM/ETM+, имеющим пространственное разрешение 15–30 м, существенно расширил возможности мониторинга наземных экосистем. Ожидается, что данные новых систем высокого пространственного разрешения LDCM (Landsat Data Continuity Mission) и Sentinel-2 также будут полностью открыты для доступа. В случае успешной реализации имеющихся планов по вводу в эксплуатацию указанных спутников в полном объеме будет создана возможность регулярного получения данных высокого пространственного разрешения (10–30 м) с периодичностью 2–3 дня, что, в свою очередь, потребует развития технологий их потоковой обработки и интеграции в информационные системы мониторинга окружающей среды.

Следует отметить, что эффективность использования спутниковых данных для решения задач мониторинга наземных экосистем в значительной степени определяется уровнем оперативности их поступления в доступные информационные архивы и технологиями предоставления к ним доступа. Необходимо при этом также учитывать различия в стандартах обработки спутниковых данных, определяющих уровень их радиометрического и геометрического качества и, следовательно, возможность формирования на их основе однородных временных рядов измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности и построения соответствующих алгоритмов тематической обработки. Анализ особенностей имеющихся в настоящее время в открытом доступе спутниковых данных и технологических схем их распространения показывает, что данные систем Terra/Aqua-MODIS и Landsat-TM/ETM+ сейчас в наибольшей степени удовлетворяют следующим необходимым для построения эффективных систем мониторинга наземных экосистем, требованиям:

- 1) наличие устойчивых технических условий для построения автоматических интернет-технологий поиска данных в удаленных архивах и их потоковой передачи в базы данных специализированных информационных систем мониторинга;
- 2) регулярное обновление архивов спутниковых данных в близком к реальному режиму времени;

- 3) высокое радиометрическое и геометрическое качество помещаемых в архивы данных, проходящих стандартизованную предварительную обработку;
- 4) наличие многолетних однородных (по радиометрическим и геометрическим свойствам) рядов данных спутниковых наблюдений на всю территорию Земли.

На основании указанных предпосылок были сформированы многолетние, охватывающие территорию России и стран ближайшего окружения архивы данных MODIS и Landsat-TM/ETM+, а также разработаны технологии их непрерывного обновления и обработки для получения производных продуктов (Лупян и др., 2012).

Выполненный на начальных стадиях формирования архива данных MODIS анализ показал, что распространяемые Геологической службой США стандартные продукты данных (<https://lpdaac.usgs.gov>) по уровню качества не полностью удовлетворяют требованиям разработки на их основе эффективных автоматических методов картографирования и мониторинга наземных экосистем. Это, в свою очередь, потребовало развития методов фильтрации данных, подверженных влиянию облачного покрова и снижения влияния эффектов анизотропии отраженного излучения при меняющихся угловых условиях солнечного освещения и наблюдения поверхности. Решение этой задачи потребовало проведения исследований и разработок по созданию автоматических технологий обработки данных MODIS, обеспечивающих получение производных продуктов данных с уровнем качества, удовлетворяющим требованиям разработки автоматических технологий формирования тематических информационных продуктов.

Метод предварительной обработки данных MODIS позволяет формировать улучшенные продукты данных для их тематического анализа (Барталев и др., 2011). В ходе обработки данных выполняется отделение пикселов, непригодных для использования в силу больших зенитных углов визирования и влияния облачного покрова, с формированием для заданных промежутков времени композитных изображений (*рис. 1*), характеризуемых редуцированным влиянием мешающих факторов.

Для дополнительной компенсации влияния условий съемки и заполнения пропусков в данных наблюдений поверхности разработан алгоритм полиномиальной аппроксимации временных рядов данных с использованием динамического скользящего окна, включающего фиксированное количество измерений для вычисления коэффициентов полинома (Плотников, 2011). Алгоритм позволяет решать задачи заполнения пропущенных значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) или вегетационного индекса, а также исключение измерений, сделанных под остаточным влиянием мешающих факторов и сглаживания временных рядов данных одновременно.

Открывшаяся в последние годы возможность массового использования в системах мониторинга окружающей среды оперативно обновляемых данных Landsat-TM/ETM+ (<http://glovis.usgs.gov>) привела к развитию технологий их потоковой обработки. Технология предварительной обработки данных Landsat-TM/ETM+ и формирования на их основе композитных изображений (*рис. 2*), включает в себя следующие основные этапы:

- радиометрическая калибровка изображений Landsat-TM/ETM+;
- выявление изображений облаков и теней;

- восстановление значений пикселов на сбойных участках изображений Landsat ETM+;
- усреднение свободных от влияния мешающих факторов временных рядов данных за заданные интервалы времени и формирование композитных изображений.

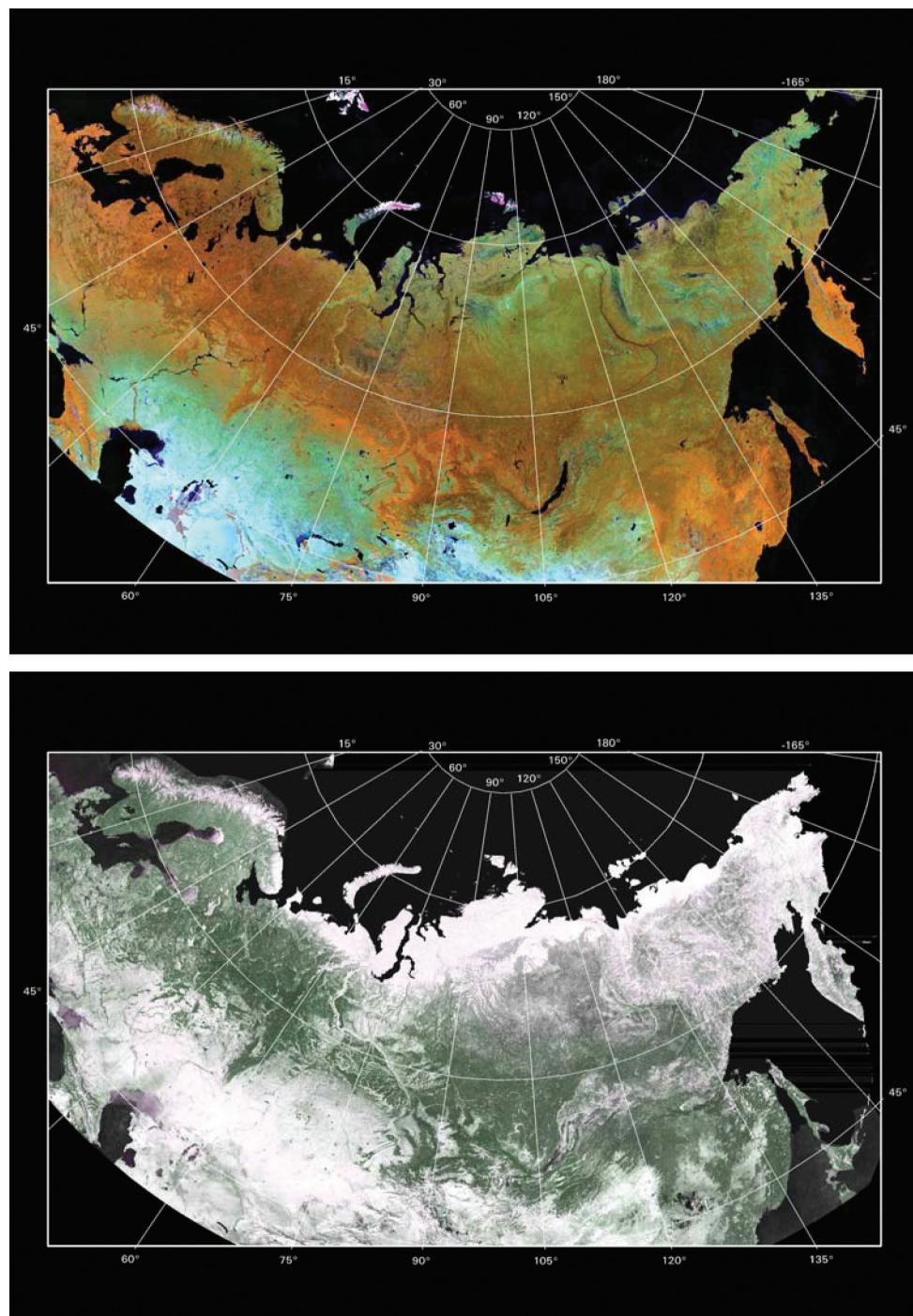


Рис. 1. Примеры очищенных от влияния облаков и других мешающих факторов композитных изображений Северной Евразии по данным MODIS за 15 июня – 15 августа 2010 г. (верхнее изображение, RGB: NIR-SWIR-Red) и 1 ноября 2009 г. – 31 марта 2010 г. (нижнее изображение, RGB: Red-NIR-Red). Red-0.65 мкм; NIR-0.86мкм; SWIR-1.64 мкм

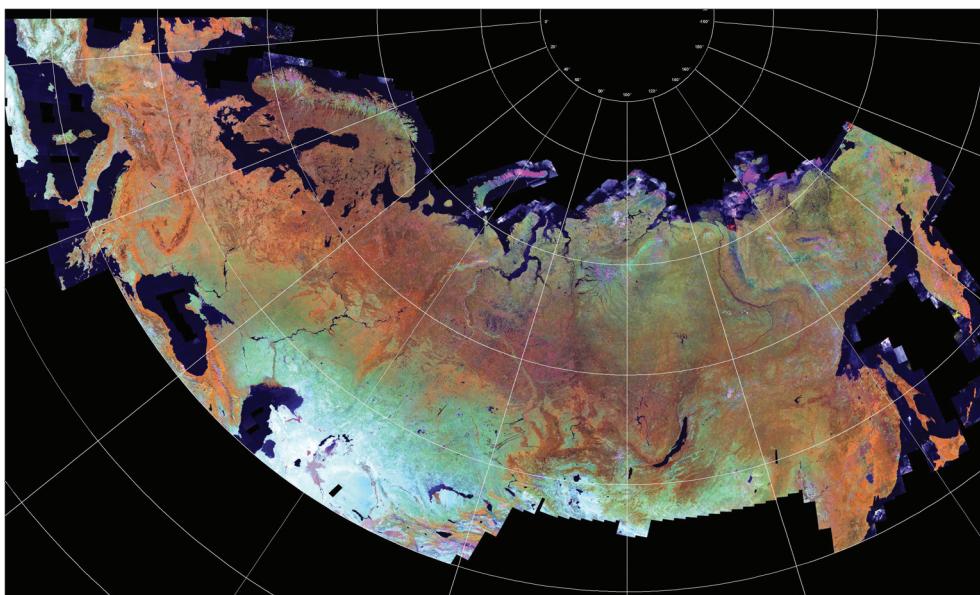


Рис. 2. Пример композитного изображения Северной Евразии по данным съемки Landsat-TM/ETM+ в период май–сентябрь 2011 г. (RGB: NIR-SWIR-Red; Red-0.67 мкм; NIR-0.83 мкм; SWIR-1.65 мкм)

Спутниковое картографирование растительного покрова

Принципиально новый шаг в развитии методологии континентального и глобального спутникового картографирования наземных экосистем сопряжен с разработкой алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm), впервые использованного при создании карты растительного покрова России по данным MODIS (Барталев и др., 2011). В основе алгоритма лежит принцип пространственной локализации процессов обучения классификатора и распознавания объектов наблюдаемой поверхности. Использование указанного алгоритма позволяет обеспечить адаптивность классификатора к пространственным изменениям физико-географических условий местности как одного из важнейших требований, предъявляемых к методам обработки спутниковых данных на глобальном уровне. В отличие от ранее известных методов алгоритму LAGMA генетически присущ механизм учета пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик (или любых других признаков распознавания) одноименных типов земного покрова. Это обеспечивает возможность унифицированного картографирования растительного покрова больших территорий без необходимости предварительной стратификации. Указанная особенность предложенного метода открывает потенциальную возможность его эффективного использования для создания карт растительного покрова любого, вплоть до глобального, географического охвата.

Использование алгоритма LAGMA позволило, в частности, создать на основе данных MODIS 2010 г. карту растительного покрова России TerraNorte RLC (*рис. 3*) с пространственным разрешением 250 м (Барталев и др., 2011). На момент публикации карта TerraNorte RLC являлась наиболее современным, объективным и детальным источником информации о пространственном распределении растительного покрова России. Легенда

карты включает в себя 22 тематических класса, 18 из которых характеризуют различные типы растительности, выделенные с учетом их жизненных форм, типов вегетативных органов и фенологической динамики.

Одно из перспективных направлений развития методологии спутникового картографирования наземных экосистем сопряжено с разработкой автоматической технологии регулярного (ежегодного) обновления карт растительного покрова. Разработанная технология динамического спутникового картографирования позволила сформировать по данным MODIS временной ряд ежегодных карт растительного покрова России за период 2000–2012 гг. (Барталев и др., 2013). Полученный временной ряд карт открывает новую возможность оценки многолетних изменений наземных экосистем под воздействием природных и антропогенных деструктивных факторов, а также процессов возобновления и сукцессионной динамики растительного покрова.



Рис. 3. Карта растительного покрова России TerraNorte RLC по данным MODIS

Выполненные исследования продемонстрировали принципиальную возможность распознавания лесов, различающихся преобладающей породой деревьев, по временным сериям спутниковых данных MODIS. Полученный к настоящему времени экспериментальный вариант карты лесов России (Жарко и др., 2013) отражает пространственное распределение двенадцати, выделенных по критерию преобладающей породы, классов лесных экосистем. При этом в основу метода картографирования было положено использование алгоритма распознавания LAGMA и временных рядов еженедельных композитных изображений MODIS в красном и ближнем ИК спектральных каналах, отражающих различия фенологической динамики древесных пород.

Вместе с тем в силу относительно низкого пространственно разрешения данных MODIS полученные на их основе карты не обеспечивают достаточную для решения некоторых практических задач точность оценки площади лесного покрова в регионах с высоким уровнем его фрагментированности. Одним из путей преодоления данного ограничения

может являться подпиксельная оценка площади лесов на основе комбинированного использования спутниковых данных различного пространственного разрешения. В частности, разработанный метод локально-адаптивной подпиксельной оценки покрытой лесом площади основан на совместном использовании спутниковых данных MODIS и выборочных изображений Landsat-TM/ETM+. В основу метода положено локализованное восстановление линейных регрессионных зависимостей между значениями спектральной яркости пикселов MODIS и величиной лесистости, получаемой по данным Landsat-TM/ETM+. Восстановление зависимостей производится в узлах регулярной сети заданного шага с использованием получаемых по данным MODIS зимнего периода значений спектральной яркости в красном канале в период покрытия территории снегом. Дополнительно проводится коррекция коэффициентов регрессионных зависимостей для обеспечения максимальной согласованности значений лесистости на границах регулярных ячеек. При этом в качестве вспомогательного источника данных используется карта растительности TerraNorte RLC, отражающая различные типы лесного покрова. В рамках апробации данного метода построена карта лесистости Европейской части России.

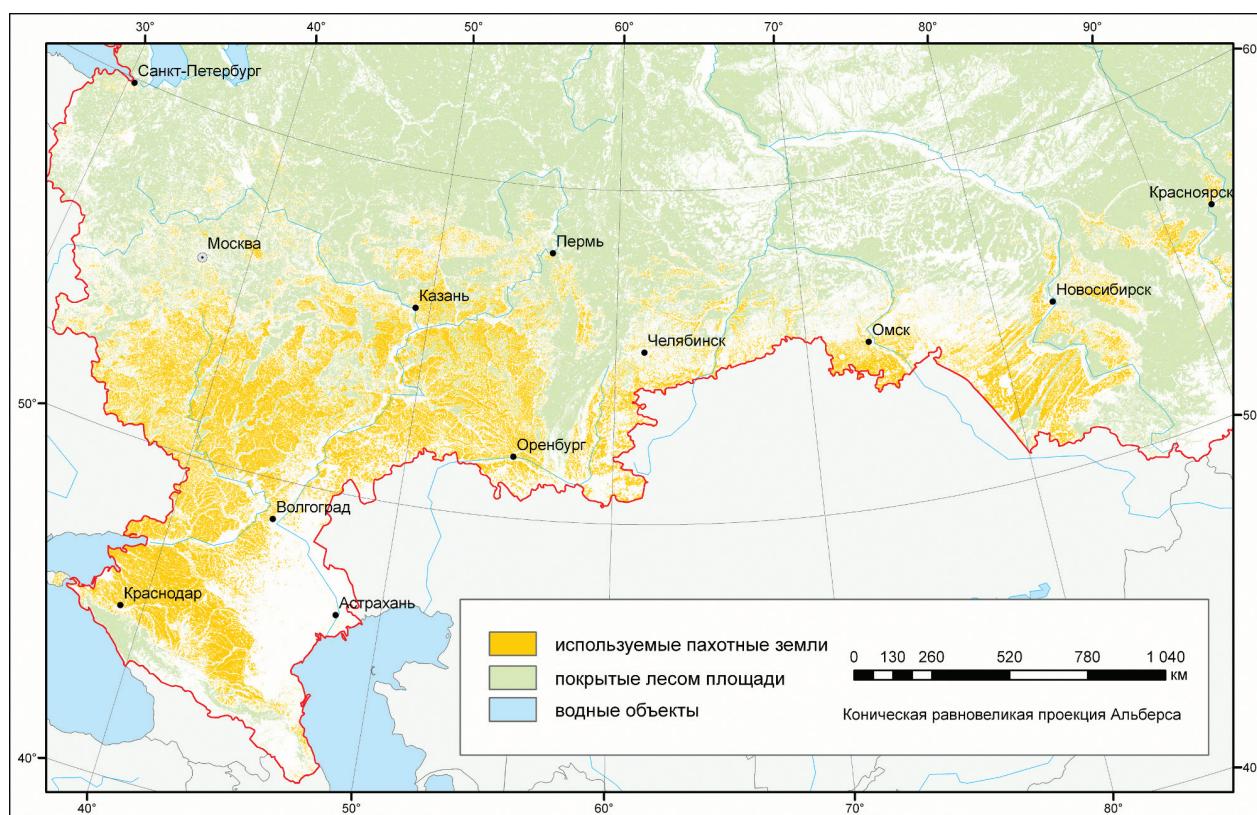


Рис. 4. Карта пахотных земель России по данным MODIS

Будучи одной из наиболее экономически важных категорий земель России, сельскохозяйственные угодья в силу присущей им нерегулярности временной динамики отражательных характеристик требуют разработки специализированных методов распознавания по спутниковым данным. Метод распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных MODIS предполагает вычисление набора признаков, учитывающих особенности сезонной и межгодовой динамики отражательных характеристик, отличающих

пашню от других сельскохозяйственных угодий и естественной растительности (Барталев и др., 2011). Использование указанных признаков и алгоритма классификации LAGMA позволило создать карту пахотных земель России (*рис. 4*) и технологию ее ежегодного обновления.

Наличие выраженных особенностей сезонной динамики отражательных характеристик позволило разработать не требующие использования опорной информации методы выделения на основе формируемых по данным MODIS временных рядов перпендикулярного вегетационного индекса PVI осенних всходов озимых культур (Плотников и др., 2008) и полей чистого пара (Барталев и др., 2006).

Разработка метода распознавания и оценки площади сельскохозяйственных культур по спутниковым данным относится к числу приоритетных задач, требующих решения. Одним из ограничений, стоящих на пути разработки и применения указанного метода для больших территорий, является сложность сбора презентативного набора опорных данных для обучения классификатора. При этом необходимо учитывать высокую вариабельность сезонной динамики отражательных характеристик культур, вызываемую различиями сроков сева, метеорологических условий и используемой агротехники.

Выполненные исследования по оценке возможностей распознавания сельскохозяйственных культур на локальном уровне демонстрируют, что использование временных рядов данных MODIS позволяет с высокой точностью проводить классификацию посевов на основе их фазовых портретов в двумерном пространстве КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах. При распознавании культур на территории Ленинско-Кузнецкого района Кемеровской области с использованием полученной по результатам наземного обследования обучающей выборки средняя точность классификации составила 89,6% (Плотников и др., 2011).

Спутниковая оценка повреждений растительного покрова

Оценка изменений земного покрова на основе разновременных спутниковых данных относится к числу классических задач дистанционного зондирования Земли, для решения которой предложено множество методов (Coppin and Bauer, 1996; Lu et al., 2004). Вместе с тем наличие накопленных к настоящему времени многолетних рядов однородных данных спутниковых наблюдений позволяет предложить новые подходы к решению данной задачи. В частности, доступность длинных (начиная с 2000 г.) рядов данных MODIS открывает возможности построения адаптивных алгоритмов детектирования изменений растительного покрова на основе формируемой за исторический период спутниковых наблюдений статистической нормы сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик поверхности. Пространственно-временная адаптивность такого рода алгоритмов обеспечивается за счет реализованных в них механизмов автоматической настройки переменных во времени значений пороговых критериев детектирования изменений растительного покрова для каждого пикселя изображения.

Получение статистической нормы спектрального вегетационного индекса VI включает оценку среднего многолетнего значения $M_{VI}^N(\Theta^*, t)$ и стандартного отклонения $\sigma_{VI}^N(\Theta^*, t)$ индекса для каждого пикселя с координатами Θ^* в день года t :

$$M_{VI}^N(\Theta^*, t) = \sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} VI(\Theta^*, t, y)$$

$$\sigma_{VI}^N(\Theta^*, t) = \frac{1}{N} \left(\sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} (VI(\Theta^*, t, y) - M_{VI}^N(\Theta^*, t))^2 \right)^{1/2}$$

$$\forall t(t = \overline{1,365}) \text{ и } \forall y(y = \overline{1, Y}),$$

где y – индекс года внутри опорного периода продолжительностью Y ; Δt – ширина временного скользящего окна для статистической оценки внутригодовой динамики индекса VI; $N = Y(2\Delta t + 1)$ – общее количество измерений, используемых при оценке индекса VI для заданного пикселя Θ^* в день t .

Описанные ниже алгоритмы детектирования и оценки изменений растительного покрова под воздействием различных деструктивных факторов основаны на построении статистической нормы сезонной динамики нормализованного разностного NDVI (Kriegler et al., 1969) и коротковолнового SWVI (Fraser et al., 2000) вегетационных индексов, рассчитываемых по формулам:

$$NDVI = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \text{ и } SWVI = \frac{R_2 - R_6}{R_2 + R_6},$$

где R_1 , R_2 , и R_6 – значения КСЯ, измеренные спектрорадиометром MODIS соответственно в спектральных каналах красного (620–670 нм), ближнего ИК (841–876 нм) и среднего ИК (1628–1652 нм) диапазонов длин волн.

При этом выполняется пространственная передискретизация данных измерений R_6 в среднем ИК канале, имеющих размер пикселов 460 м, до номинальной величины 230 м. Получение непрерывных временных рядов NDVI и SWVI достигается восстановлением их значений в образовавшихся в результате фильтрации данных пропусках на основе упомянутого выше алгоритма полиномиальной аппроксимации (Плотников и др., 2011).

Указанные выше вегетационные индексы являются информативными для выявления повреждений растительного покрова различными факторами (пожары, засухи, болезни и др.) в силу использования для их получения данных в диапазонах длин волн, в которых спектральное отражение поверхности находится в зависимости от содержания хлорофилла и влаги. При этом предложенный подход к выявлению поврежденных участков обладает высоким уровнем универсальности и может быть распространен на различные типы изменений растительного покрова и используемые спектрально-отражательные характеристики (включая вегетационные индексы и измеренные в заданных диапазонах длин волн КСЯ) в зависимости от особенностей изучаемых явлений.

Оценка площади и степени повреждений растительного покрова пожарами

Описанный выше подход к выявлению повреждений растительного покрова нашел, в частности, применение при разработке технологии интегрированной оценки пройденной огнем площади на основе данных MODIS и Landsat-TM/ETM+ (Барталев и др., 2012). Технология предусматривает комплексирование трех типов оценок площади пожаров, отличающихся уровнями оперативности получения данных и их точности. Наиболее оперативная оценка основана на пространственно-временной агрегации результатов детектирования действующих пожаров по данным MODIS с пространственным разрешением около 1 км. Последующая уточненная оценка площади пожаров предполагает дополнительное использование данных MODIS пространственного разрешения 230 м для выявления повреждений растительного покрова на основе анализа изменений его спектрально-отражательных характеристик по отношению к их статистической норме. Наиболее точная оценка площади пожаров основана на использовании изображений Landsat-TM/ETM+ с пространственным разрешением около 30 м. Разработанная технологическая схема предполагает комплексирование на уровне отдельных пожаров трех различных типов данных путем использования наиболее точной оценки из всех доступных на текущий момент времени. Технология реализована в виде модулей в составе ИСДМ-Рослесхоз и web-сервиса ВЕГА и позволяет получать многолетние однородные в пространственно-временном отношении оценки поврежденной пожарами площади на территории России.

Оценка степени повреждения затронутых огнем лесов является важной составляющей информационного обеспечения лесного хозяйства и биосферных исследований. Данные о площади погибших и поврежденных лесов необходимы, в частности, для определения экономического и экологического ущерба от пожаров, а также объемов пирогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами основан на использовании временных рядов данных измерений КСЯ прибором MODIS в ближнем и среднем ИК диапазонах (Стыценко и др., 2013). Метод предусматривает использование статистической нормы SWVI, построенной на основе данных наблюдений в течение предыдущих пяти лет. Кроме того, метод предполагает использование предварительно полученных регрессионных зависимостей между величинами разновременного вегетационного индекса RdSWVI (Miller and Thode, 2007) и показателями состояния лесов, оцениваемыми на тестовых участках в ходе наземных обследований поврежденных пожарами насаждений. При этом значения RdSWVI вычисляются на основе временного ряда среднемноголетних значений SWVI и ежедневно измеряемой величины вегетационного индекса в текущем году. Из оценки исключаются участки леса с краткосрочными изменениями на основе индекса, характеризующего интегральное отклонение SWVI от его многолетней нормы в период после пожара. По результатам использования данного метода для оценки повреждений лесов пожарами в 2007–2012 гг. получено, что погибшие насаждения составили около 24% от пройденной огнем площади.

Оценка повреждений растительного покрова засухой

Участившиеся в последние годы в мире экстремальные погодные явления, в частности вызывающие атмосферную и почвенную засуху, продолжительные периоды высоких летних температур при низком уровне осадков, способны оказывать мощное негативное воздействие на растительный покров, приводя к гибели посевов, ослаблению и усыханию лесов.

Использование данных регулярных спутниковых наблюдений и накопленных к настоящему времени многолетних данных архивов позволяет оперативно выявлять участки повреждений растительности засухой. Разработанная технология на основе временных рядов NDVI по данным спектрорадиометра MODIS, а также результатов независимо выполняемой классификации различных типов растительного покрова дает возможность детектировать участки их аномального развития по уровню отклонения вегетационного индекса от среднемноголетней фенологической динамики.

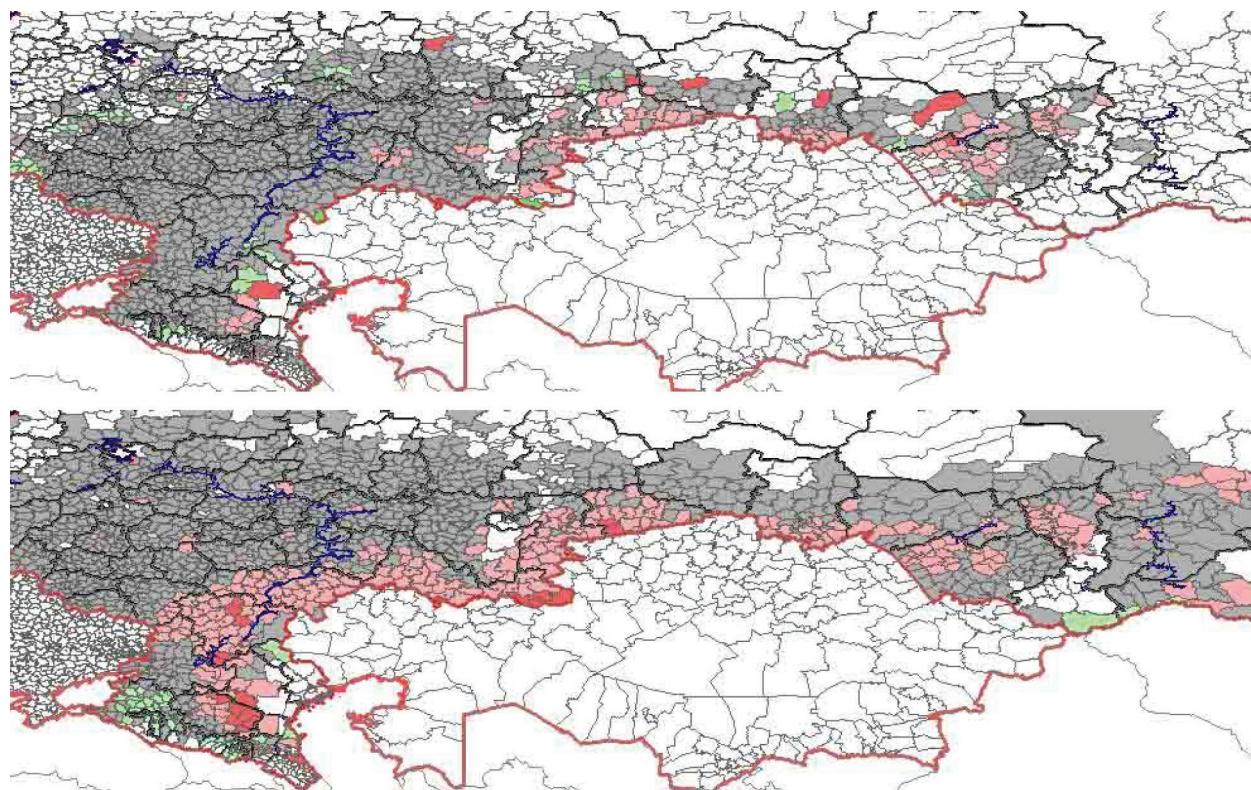


Рис. 5. Оценка состояния посевов в период засухи 2012 г. по величине отклонения (%) сезонного максимума NDVI от его среднемноголетнего значения по данным MODIS

Приведенные в качестве примера на *рис. 5* карты отражают состояние посевов на уровне административных районов в период засухи 2012 г. При этом оценивалось относительное отклонение (%) максимального значения NDVI в течение 2012 г. от среднемноголетней величины сезонного максимума вегетационного индекса для соответствующего типа растительного покрова в период 2000–2011 гг. в пределах административного района. Выполненный на основе полученных данных анализ позволил прийти к выводу о различ-

ных масштабах повреждений засухой озимых и яровых культур, а также был использован для прогноза урожая зерновых в 2012 г. (http://vega.smislab.ru/press/2012_07_31_crop.pdf), достоверность которого в последующем подтверждена данными официальной статистической отчетности.

Заключение

Представленный обзор содержит краткое описание основных направлений исследований и разработок ИКИ РАН в области методов и технологий спутникового мониторинга растительности, проводимых преимущественно в течение последнего десятилетия. Следует отметить, что, не претендуя на исчерпывающую полноту, данный обзор включил в себя лишь наиболее значимые результаты в области методов предварительной и тематической обработки спутниковых данных, доведенные до уровня завершенных информационных продуктов национального или субконтинентального уровня территориального охвата и уже нашедшие широкое практическое использование. В силу ограничений, накладываемых на объем публикации форматом журнальной статьи, в обзор практически не вошли результаты текущих (т.е. не завершенных) разработок, исследований локального и регионального уровней, а также разработок в области автоматических технологий обработки спутниковых данных и информационных систем предоставления результатов пользователям, требующих отдельного рассмотрения. В данном контексте, тем не менее необходимо упомянуть стоящий в ряду ключевых разработок ИКИ РАН web-сервис дистанционного мониторинга растительного покрова ВЕГА (<http://vega.smislab.ru>), обеспечивающий доступ к большинству описанных в настоящем обзоре информационных продуктов и предоставляющий инструменты их интерактивного анализа.

Проводимые в настоящее время исследования и разработки сфокусированы на следующие приоритетные направления.

- Дальнейшее развитие методов автоматического распознавания типов земного покрова по спутниковым данным с целью повышения тематической детальности получаемых карт, отражающих состояние и режимы функционирования наземных экосистем.
- Разработка методов спутниковой оценки биофизических характеристик растительного покрова (биомасса, проективное покрытие и др.).
- Повышение пространственной детальности результатов мониторинга растительного покрова за счет развития автоматизированных методов и технологий обработки данных спутниковых систем высокого пространственного разрешения (включая Landsat-TM/ETM+, LCM и Sentinel-2).
- Расширение географического охвата российской системы спутникового мониторинга наземных экосистем на циркумполлярный (boreальный пояс планеты) и глобальный уровни.

Представленные в работе результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках следующих Государственных контрактов.

- Государственный контракт № 14.515.11.0007 на выполнение НИР по теме «Разработка методов дистанционного мониторинга природных пожаров для оценки их воздействия на окружающую среду и прогнозирования техногенных рисков».
- Государственный контракт № 14.515.11.0011 на выполнение НИР по теме «Влияние климатических изменений, погодных условий и экологических факторов на заболеваемость природно-очаговыми трансмиссивными инфекциями».
- Государственный контракт № 14.515.11.0014 на выполнение НИР по теме «Разработка научно-технических основ оценки биоразнообразия лесов и принципов построения системы его мониторинга на основе спутниковых данных».

Литература

1. Абушенко Н.А., Барталев С.А., Беляев А.И., Еришов В.В., Коровин Г.Н., Кошелев В.В., Лупян Е.А., Крашенинникова Ю.С., Мазуров А.А., Минько Н.П., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России // Наукоемкие технологии. 2000. Т. 1. № 2. С. 4–18.
2. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.
3. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А. Метод выявления используемых пахотных земель по данным дистанционного зондирования со спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Выпуск 3. Т. II. С. 271–280.
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
5. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации. Компьютерная оптика. Самара. ИСОИ РАН. 2011. Т.35. № 1. С. 103–116.
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
7. Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лукина Н.В. О современных возможностях непрерывной инвентаризации лесов России на основе спутниковых данных // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве:

Доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22–24 апреля 2013г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 13–15.

8. Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка, 2006. Вып. 2. С. 98–109.
9. Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Тацкилин С.А. Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 47–57.
10. Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А. Картографирование породной структуры лесного покрова России по спутниковым данным MODIS // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22–24 апреля 2013г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 144–145.
11. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Королева Н.В., Абушленко Н.А., Тацкилин С.А., Сухинин А.И., Афонин С.В., Белов В.В., Гришин А.М., Соловьев В.С. Спутниковый мониторинг лесов России // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 443–447.
12. Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю. Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмический курьер. 2009. № 6. С. 47–49.
13. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
14. Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мальцев Д.В., Матвеев А.М., Прошин А.А., Толпин В.А., Халикова О.А., Крашенникова Ю.С. Возможности работы с долговременным архивом данных спутников LANDSAT по территории России и приграничных стран // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 307–315.
15. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. II. С. 322–330.
16. Плотников Д.Е. Разработка методов дистанционной оценки растительного покрова на основе многолетних спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектральной яркости: Автореферат дисс. ... канд. физико-математических наук // Институт космических исследований Российской академии наук. М., 2011.
17. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Жарко В.О., Михайлов В.В., Просянникова О.И. Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 199–208.

18. Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами по спутниковым данным MODIS // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22–24 апреля 2013г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 211–214.
19. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing, 2003. V. 24. No. 9. P. 1977–1982.
20. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A. Multi-Year Circumpolar Assessment the Area Burnt in Boreal Ecosystems Using SPOT-Vegetation // International Journal of Remote Sensing. 2007. V. 28. No. 6. P. 1397–1404.
21. Coppi P., Bauer M. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery, Remote Sensing of the Environment, 1996. 13. P. 207–304.
22. Fraser R.H., Li Z., Landry R. SPOT-VEGETATION for characterising boreal forest fires // Int. J. Remote Sens. 2000. V. 21. P. 3525–3532.
23. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition // Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment. 1969. P. 97–131.
24. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques // International Journal of Remote Sensing. 2004. V. 25. No. 12. P. 2365–2407.
25. Miller J.D., Thode A.E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // Remote Sensing of Environment 109. 2007. P. 66–80.

R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute

S.A. Bartalev and E.A. Loupian

*Space Research Institute, Moscow, Russia
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru*

The paper reviews main R&D directions on methods for satellite monitoring of vegetation cover by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute. The land cover mapping and disturbances driven changes monitoring methodology based on satellite remote sensing technique is described. The paper provides an analysis on perspectives for vegetation cover satellite monitoring developments taking into account remote sensing systems progress, nowadays open access policy to global satellite data archive, national and international priorities on environment protection, natural resources management, and global change science.

Keywords: remote sensing, vegetation cover, terrestrial ecosystems, remote sensing, satellite data processing methods.