

Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России

С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян,
Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

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 картографирования растительного покрова России на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Рассматриваются в историческом контексте основные этапы развития методологии и отличительные особенности разрабатываемых автоматизированных методов спутникового картографирования растительного покрова. Дается характеристика созданных к настоящему времени по данным дистанционного зондирования на территорию России тематических карт, предоставляющих информацию о пространственном распределении типов растительного покрова, породной структуры и запасов стволовой древесины лесов, используемых пахотных земель. Анализируются перспективные направления исследований и разработок в области методов спутникового мониторинга растительного покрова с учетом новых технических возможностей систем дистанционного зондирования.

Ключевые слова: растительный покров, дистанционное зондирование, методы спутникового картографирования

Введение

Растительный покров является неотъемлемой составляющей биосферы Земли и фундаментальным фактором создания условий для жизни на нашей планете (Вернадский, 1989). По имеющимся оценкам, примерно 77% поверхности суши (без учета Антарктиды и Гренландии) или 130–135 млн. км² занято различными видами растительного покрова, представленного лесами (31,7%), пастбищами (26,0%), пашней (10,3%) и другими, как правило, менее продуктивными типами земель (Максаковский, 2003). Будучи крайне неравномерной, структура растительного покрова является одним из факторов, определяющих направления экономического развития многих стран мира, включая такие отрасли, как лесная промышленность, сельскохозяйственное растениеводство, пастбищное животноводство, биоэнергетика. В частности, по покрытой лесом площади в тройку мировых лидеров входят Россия (7,64 млн. км²), Бразилия (5,66 млн. км²) и Канада (2,47 млн. км²), а по площади пастбищ – Австралия (4,14 млн. км²), Китай (4,00 млн. км²) и США (2,40 млн. км²). К странам, располагающим наибольшей площадью пахотных земель, относятся США (1,86 млн. км²), Индия (1,66 млн. км²) и Россия (1,18 млн. км²).

Являясь источником ценных биологических ресурсов, растительный покров Земли одновременно выполняет и ряд важнейших функций регулятора фундаментальных процессов обмена энергией и веществом на планете, играет огромную экологическую и социально-культурную роль для человечества. Антропогенное воздействие и глобальные изменения климата в настоящее время сопровождаются нарастанием процессов трансформации и деградации растительного покрова, обусловленных, в частности,

природными пожарами, вырубкой лесов и их гибелью в результате техногенного воздействия, вспышками массового размножения насекомых-вредителей, изменениями режимов землепользования, опустыниванием. Наряду с ростом населения эти факторы приводят в ряде регионов к нехватке продовольствия и питьевой воды, а предпринимаемые попытки расширения пахотных угодий могут вызывать деградацию почв и снижение уровня их продуктивности.

В настоящее время обеспеченность объективной и регулярно обновляемой информацией о состоянии растительного покрова является недостаточной и не отвечает современным политическим, экономическим и экологическим требованиям. Разрозненные данные отдельных стран и международных структур часто несопоставимы и не дают целостной картины актуального состояния растительного покрова и, следовательно, не могут быть положены в основу анализа и прогнозирования его динамики.

Указанные предпосылки послужили основанием для развития методов картографирования растительного покрова, основанных на использовании систем дистанционного зондирования Земли из космоса. Технические возможности современных спутниковых систем дистанционного зондирования позволяют осуществлять глобальные наблюдения растительного покрова в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения, величин пространственного и временного разрешения. В период с начала 1990-х гг. до настоящего времени в мире инициирован ряд крупных международных и национальных программ, направленных на развитие возможностей глобального спутникового картографирования растительного покрова. К их числу можно отнести программы Европейской комиссии (ЕС), Европейского космического агентства (ESA), Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных наций (ФАО ООН), Национального космического агентства США (NASA), Министерства науки Китая, направленные на развитие возможностей глобального спутникового картографирования земного покрова. Результаты этих проектов используются для оценки лесных ресурсов, обеспечения продовольственной безопасности, оценки последствий и прогнозного моделирования климатических изменений.

Примеры наиболее известных проектов в области глобального спутникового картографирования растительного покрова приведены в *табл. 1*. Первый, заслуживающий, на наш взгляд, упоминания в данном контексте опыт спутникового картографирования растительного покрова планеты, был получен в рамках Международной геосферно-иосферной программы (проект IGBP-DISCover (Loveland et al., 1999)) на основе данных радиометра NOAA-AVHRR, собранных сетью наземных приемных станций в 1992–1993 гг. Выполнение проекта позволило создать глобальную карту земного покрова с пространственным разрешением 1 км и легендой, включающей 17 тематических классов. В дальнейшем на основе более глубокой обработки этого же набора данных NOAA-AVHRR Университетом штата Мэриленд (США) была получена более точная версия карты земного покрова (Hansen et al., 2000).

Таблица 1. Примеры международных проектов в области глобального спутникового картографирования растительного покрова

Проект	Спутниковая система	Пространственное разрешение	Обновляемость карты	Разработчики	Год публикации
IGBP-DISCover	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	МГБП ¹	1999
UML	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	Университет шт. Мэриленд (США)	2000
GLC2000	SPOT-VGT	1 км	Нет	Объединенный исследовательский центр ЕК	2005
GlobCover	Envisat-MERIS	300 м	Да	Европейское космическое агентство	2008
MODIS LC	MODIS	500 м	Да	Университет Бостона (США)	2010
GLC30	Landsat	30 м	Нет	Национальный центр геоматики (Китай)	2015

¹ МГБП – Международная геосферно-биосферная программа

Методология глобального спутникового картографирования растительного покрова получила существенное развитие в рамках международного проекта Global Land Cover 2000 (GLC2000), координируемого Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии (Bartholome, Belward, 2005). В основу проекта было положено использование данных с пространственным разрешением около 1 км, полученных прибором VEGETATION со спутника SPOT-4. Несмотря на близкую величину пространственного разрешения, глобальная карта земного покрова GLC2000 отличается более высокими, по сравнению с картой IGBP-DISCover, уровнями тематической детальности и точности, а ее легенда содержит 22 класса.

Дальнейшее развитие глобального спутникового картографирования лесов сопряжено с появлением спектрорадиометра MODIS, осуществляющего со спутников Terra и Aqua измерения отраженного и собственного излучения поверхности в 36 диапазонах длин волн с пространственным разрешением 250 м, 500 м и 1 км в зависимости от спектрального канала. Разработанная Университетом Бостона (США) (Friedl et al., 2010) автоматическая технология обеспечивает возможность ежегодного глобального картографирования земного покрова по данным MODIS согласно легенде IGBP-DISCover с пространственным разрешением 500 м.

К числу получивших достаточную известность разработок в области глобального спутникового картографирования растительного покрова можно отнести и проект GlobCover (Arino et al., 2008), целью которого являлась разработка автоматической технологии построения карт на основе данных спутниковой системы Envisat-MERIS. Полученные в рамках проекта GlobCover глобальные карты растительного покрова основаны на данных наблюдений 2005 и 2009 гг., имеют пространственное разрешение 300 м и близкую к карте GLC2000 легенду.

Пространственно наиболее детальная (разрешение 30 м) на настоящий момент глобальная спутниковая карта земного покрова создана Национальным центром геоматики Китайской Народной Республики по данным системы Landsat в рамках проекта GLC30 (Chen et al., 2015). Легенда карты GLC30 имеет относительно низкий уровень тематической детальности, включая лишь десять различных классов земного покрова. Следует отметить, что в силу используемого метода, включающего интерактивную обработку и визуальную интерпретацию спутниковых изображений большим числом экспертов, результаты картографирования характеризуются относительно высоким уровнем субъективности.

Стремительное развитие методов глобального спутникового картографирования растительного покрова обусловлено, на наш взгляд, наличием колоссальных по объему архивов спутниковых данных различного пространственного разрешения, открытых для общего доступа. В частности, наиболее широкое использование в проектах по глобальному картографированию растительного покрова находят данные спутниковых систем Terra/Aqua-MODIS, SPOT-VEGETATION, Proba-V и Landsat-TM/ETM/OLI.

Полученный к настоящему времени опыт глобального спутникового картографирования в значительной мере может быть применен и при создании карт растительного

покрова России. Эта применимость диктуется огромной территорией России, порождающей близость методических и технических проблем, возникающих при решении задач картографирования растительного покрова на глобальном и национальном уровнях, одновременно наделяя сходными чертами используемые для их решения научно-методические подходы.

Проводимые Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) исследования максимально учитывают опыт, полученный при реализации проектов в области глобального картографирования растительного покрова, одновременно стремясь к приданию своим методическим и технологическим разработкам ряда рассмотренных ниже основополагающих отличий.

Основные результаты развития методологии автоматизированного спутникового картографирования растительного покрова России

В начале 2000-х гг. в ИКИ РАН сформировались условия для разворачивания целенаправленных исследований и разработок в области спутникового картографирования растительного покрова на национальном уровне. Была создана развитая техническая инфраструктура и разработаны программные комплексы хранения и автоматизированной обработки больших объемов спутниковых данных. Начались работы по формированию непрерывно обновляемых многолетних архивов спутниковых данных, охватывающих всю территорию России и близлежащих государств Северной Евразии. В том числе была создана автоматическая технология непрерывного обновления архива ежедневных данных системы Terra-MODIS, положенного в основу разработки ИКИ РАН целого ряда тематических карт, характеризующих растительный покров России. Были сформированы архивы и некоторых других спутниковых данных, удовлетворяющих по характеристикам условиям решения задач спутникового картографирования растительного покрова, в частности таких, как данные инструмента SPOT-VEGETATION. К этому же времени получили развитие автоматизированные технологии управления потоковой обработкой больших массивов спутниковых данных.

На период 2000-х гг. пришлось и формирование в ИКИ РАН научной школы и коллектива ученых в области автоматизированных методов спутникового картографирования растительного покрова. К числу отличительных черт развиваемой в ИКИ РАН методологии спутникового картографирования растительного покрова можно отнести следующие основные положения:

- направленность на разработку методов и технологий автоматической обработки данных дистанционного зондирования, обеспечивающих полную воспроизводимость результатов картографирования;
- ориентированность на разработку адаптивных алгоритмов тематической обработки данных, обеспечивающих локализованную (само)настройку оптимальных па-

раметров в зависимости от пространственного расположения картографируемого объекта и времени проведения спутниковых наблюдений;

- применимость разрабатываемых методов и технологий для картографирования растительного покрова на больших территориях вплоть до глобального охвата (крупные страны, континенты и планета в целом);
- возможность формирования однородных временных рядов спутниковых карт, способных характеризовать динамику растительного покрова (*концепция динамического картографирования*).

При этом, выступая в качестве целеполагающих условий развиваемой методологии спутникового картографирования растительного покрова, два последних положения в значительной степени могут рассматриваться и как следствие первых двух. Рассматривая развитие научной методологии в историческом аспекте, необходимо отметить, что выработка вышеперечисленных положений в значительной мере опиралась на опыт исследований и разработок, накопленный при создании карты наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003) в рамках проекта GLC2000.

Созданная на основе данных спутниковой системы SPOT-VEGETATION карта наземных экосистем Северной Евразии имеет пространственное разрешение около 1 км, а ее легенда включает в себя 27 тематических классов, образующих семь различных групп, таких как леса, кустарники, травянистая растительность, водно-болотные комплексы, тундра, растительные комплексы и непокрытые растительностью земли. Достигнутый при создании карты наземных экосистем Северной Евразии уровень тематической детальности и достоверности, а также свободный доступ к ее цифровой версии, создали предпосылки для широкого использования карты в научных проектах и практических приложениях, насчитывающего сотни зарегистрированных пользователей в различных странах мира. Созданная карта впервые наглядно продемонстрировала масштабную смену коренных хвойных лесов вторичными лиственными лесами в Европейской части России, центральной Сибири и Дальнего Востока в результате интенсивных вырубок во второй половине прошлого столетия и пожаров. Анализ карты также позволил оценить масштабы зарастания лесом заброшенных в период постперестроечного спада экономики сельскохозяйственных земель в ряде регионов России.

Однако метод создания карты наземных экосистем Северной Евразии предполагал значительную роль экспертов непосредственно в процессе классификации спутниковых данных. Как следствие, процесс тематического картографирования был сопряжен с большими временными затратами, содержал элементы субъективности в процессе интерпретации спутниковых данных и не обеспечивал полную воспроизводимость результатов.

Полученный при создании карты опыт позволил сделать ряд важных выводов. Было продемонстрировано, в частности, что решение задач картографирования больших территорий требует учета фактора пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик земного покрова, влияние которого, как правило, возрастает с увеличением географического охвата. В различных проектах по глобальному спутниковому картографи-

рованию растительного покрова учет данного фактора обеспечивался на основе различных подходов. Одним из широко используемых методических приемов, призванных снизить влияние фактора пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик одноименных типов земного покрова, является стратификация территории с классификацией спутниковых данных в границах отдельных страт. В предельно простом случае, как в проекте IGBP-DIS, в качестве страт выступают отдельные континенты (Belward, 1996), а по мере усложнения подходов выделяются регионы, однородные по совокупности критериев, учитывающих меняющиеся физико-географические, геоботанические и некоторые другие природные условия (Arino et al, 2008). Другой, используемый в ряде проектов по картографированию больших территорий, методический прием по снижению влияния географической изменчивости спектрально-отражательных характеристик одноименных типов земного покрова состоит в гиперкластеризации. Суть гиперкластеризации заключается в дробном разбиении пространства признаков распознавания для выделения однородных групп пикселей (кластеров), число которых в десятки раз превышает число тематических классов легенды создаваемой карты.

Несмотря на то, что использование вышеуказанных методических приемов в ряде случаев является полезным и практически оправданным, они не способны, на наш взгляд, обеспечить универсальное и полное решение проблемы географической изменчивости спектрально-отражательных характеристик земного покрова. Более того, по нашему мнению, именно отсутствие в используемых методах распознавания механизмов адекватного учета указанного фактора является фундаментальным ограничением дальнейшего качественного роста уровня достоверности при спутниковом картографировании земного покрова больших территорий.

К числу важных, следующих из опыта создания карты наземных экосистем Северной Евразии, выводов также следует отнести и необходимость максимально полного использования возможностей извлечения тематической информации о растительности из временных рядов спутниковых данных, способных характеризовать как сезонную, так и многолетнюю динамику спектрально-отражательных характеристик земного покрова.

Сделанные в ходе создания карты наземных экосистем Северной Евразии выводы позволили придать дальнейшим разработкам ИКИ РАН в области спутникового картографирования растительного покрова принципиально новые черты, в значительной мере определившие не только полученные к настоящему моменту результаты, но и задающие тренд, как дальнейшего развития методологии, так и совершенствования получаемых картографических продуктов.

Анализ возможностей получения на основе спутниковых данных информации о растительном покрове показывает, что в значительной степени они определяются рядом физических, технических и методических предпосылок, таких как:

- особенности отражаемого поверхностью излучения как комплексной функции типа земной поверхности, ее структурных и физико-химических характеристик с одной стороны, и, с другой стороны, длин волн электромагнитного излучения, времени и угловых условий наблюдения;

- возможности спутникового сенсора по регистрации отраженного излучения как функции упомянутых выше параметров наблюдения;
- наличие моделей описания структурных и физико-химических свойств наблюдаемой поверхности в пространстве регистрируемых сигналов и основанных на них методов анализа данных спутниковых наблюдений.

Первые две группы из упомянутых выше особенностей предопределены свойствами объекта наблюдения и характеристиками спутниковых сенсоров, в то время как выбор методов анализа данных должен исходить из адекватных описаний связей характеристик наземных экосистем с получаемыми приборами дистанционного зондирования сигналами.

Упомянутый выше архив данных MODIS, сформированный в ИКИ РАН, содержит многолетний и ежедневно пополняемый временной ряд стандартных продуктов данных MOD09, охватывающих всю территорию Северной Евразии (Бурцев и др., 2006). Наличие отвечающего требованиям спутникового картографирования растительного покрова на национальном уровне архива данных MODIS в значительной мере предопределило их широкомасштабное использование в исследованиях и разработках в ИКИ РАН с 2003 г. до настоящего времени. Более того, по мере увеличения продолжительности временного ряда данных MODIS открываются возможности разработки методов извлечения из него недоступной ранее информации о растительном покрове. В этом смысле появление новых систем дистанционного зондирования, в том числе и более высокого пространственного разрешения, не сможет в ближайшей перспективе создать альтернативу данным MODIS в решении задач, требующих длинных временных рядов данных, характеризующихся высокой частотой регулярных наблюдений.

Конкретизируя различные аспекты исследований и разработок по развитию методологии спутникового мониторинга можно выделить следующие основные направления:

- методы предварительной обработки спутниковых данных;
- методы классификации типов растительного покрова;
- методы оценки характеристик растительного покрова.

При решении задач картографирования растительного покрова предварительная обработка временных рядов данных MODIS направлена на снижение влияния мешающих факторов, таких как облака и образуемые ими тени, сезонный снежный покров и аппаратные шумы. Выполненный на начальных стадиях формирования архива данных MODIS анализ показал, что распространяемые Геологической службой США стандартные продукты данных (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table) по уровню качества не полностью удовлетворяют требованиям разработки на их основе эффективных автоматических методов картографирования растительного покрова. 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 продук-

тов с уровнем качества, удовлетворяющим требованиям разработки автоматических методов спутникового картографирования.

Метод предварительной обработки данных MODIS позволяет формировать улучшенные продукты данных для их тематического анализа (Барталев и др., 2011a). Разработанные методы предварительной обработки данных MODIS призваны обеспечить максимально возможное снижение влияния вышеуказанных факторов, предусматривая выполнение следующих основных этапов:

- исключение пикселей с превышающими некоторый порог значениями угловых характеристик освещения и наблюдения;
- исключение пикселей, испытывающих влияние снежного и облачного покрова;
- исключение пикселей, соответствующих участкам теней от облаков;
- статистическая фильтрация временных рядов данных;
- построение свободных от влияния мешающих факторов композитных изображений с заданным временным разрешением.

Для дополнительной компенсации влияния условий съёмки 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 и др., 2014). Алгоритм позволяет решать задачи заполнения пропущенных значений коэффициента спектральной яркости или вегетационного индекса, а также исключения измерений, сделанных под остаточным влиянием мешающих факторов и сглаживания временных рядов данных одновременно.

Принципиально новый шаг в развитии методологии спутникового картографирования растительного покрова сопряжен с разработкой ИКИ РАН алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) (Bartalev et al., 2014). 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.

Будучи изначально разработанным для решения задач классификации данных спутниковых наблюдений методом максимального правдоподобия, алгоритм LAGMA получил дальнейшее развитие за счет включения в него дополнительных опций, дающих возможно-

сти использования непараметрических методов распознавания образов и регрессионного оценивания характеристик земного покрова в количественных шкалах.

Упомянутые выше методические разработки, реализованные в виде высокопроизводительных программных комплексов и автоматических технологий предварительной обработки и классификации спутниковых данных, позволили ИКИ РАН создать целый ряд тематических карт национального уровня, характеризующих структуру и характеристики растительного покрова России, включая такие, как:

- карта типов растительного покрова;
- карта используемых пахотных земель;
- карта преобладающих пород леса;
- карта запасов стволовой древесины в лесах.

При этом, реализуя упомянутую ранее концепцию динамического картографирования растительного покрова, составляющую одну из отличительных особенностей проводимых ИКИ РАН исследований и разработок в данной области, были сформированы однородные ежегодно обновляемые временные ряды перечисленных выше спутниковых карт. Пространственное разрешение всех полученных на основе данных MODIS карт растительного покрова составляет 230 м.

Временной ряд созданных к настоящему времени карт типов растительного покрова России (Барталев и др., 2011а), охватывает период 2000–2014 гг. и ежегодно дополняется по мере завершения сбора и обработки спутниковых данных. 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. В настоящее время эта карта является наиболее детальным в пространственном и тематическом отношении источником информации о типах растительного покрова России, полученным на всю территорию страны на основе спутниковых данных. При этом необходимо учитывать, что процесс построения карты автоматизирован, что обеспечивает полную повторяемость получаемых результатов и позволяет проводить ежегодное картографирование растительного покрова в масштабах страны. Полученный временной ряд карт открывает принципиально новые возможности оценки многолетних изменений наземных экосистем под воздействием природных и антропогенных деструктивных факторов, а также процессов возобновления и сукцессионной динамики растительного покрова.

Будучи одной из наиболее экономически важных категорий земель России, сельскохозяйственные угодья в силу присущей им нерегулярности временной динамики отражательных характеристик, потребовали разработки специализированного метода их 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., 2011б). Использование указанных признаков и алгоритма классификации LAGMA позволило создать карту пахотных земель России (рис. 2) и технологию ее ежегодного обновления.



Рис. 1. Карта типов растительного покрова России по состоянию на 2014 г.

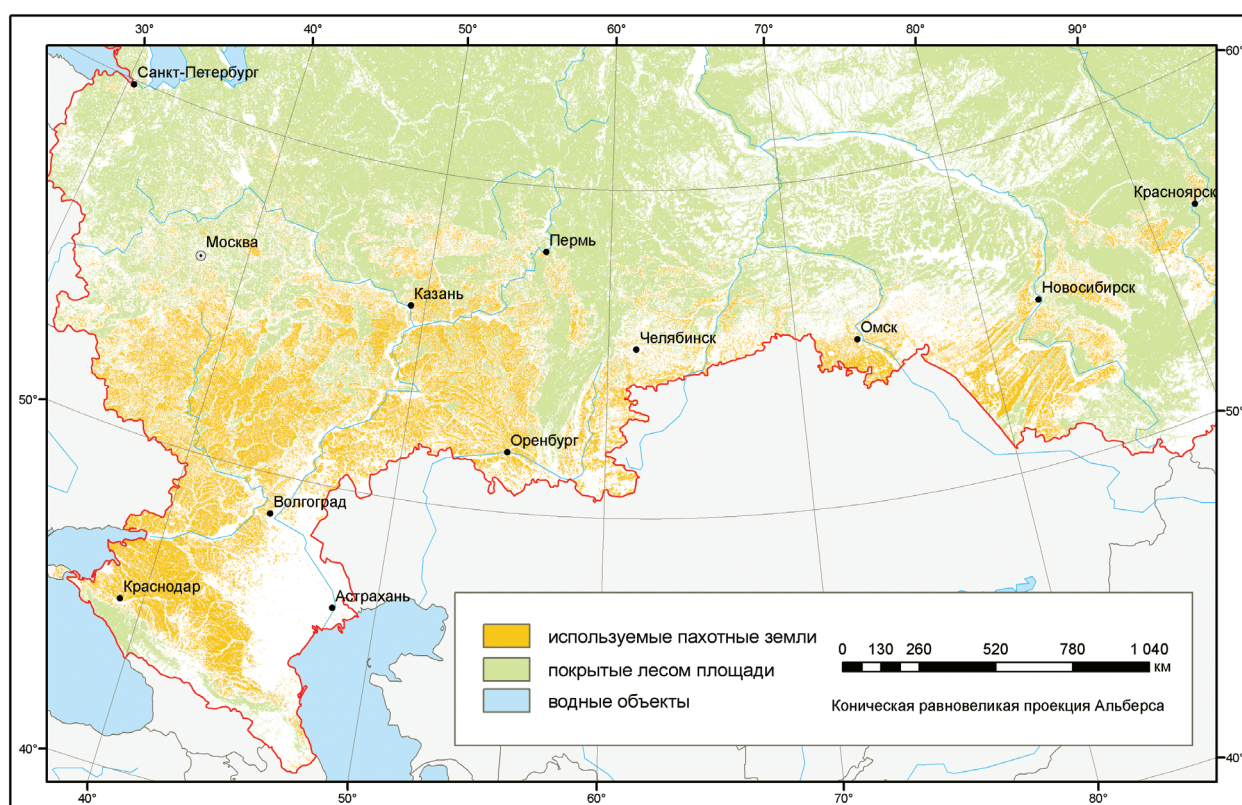


Рис. 2. Карта пахотных земель России по состоянию на 2013 г.

Выполненные исследования продемонстрировали принципиальную возможность распознавания лесов, различающихся преобладающей породой деревьев, по временным сериям спутниковых данных MODIS (Жарко, Барталев, 2014а). Полученный к настоящему времени экспериментальный вариант карты лесов России (рис. 3) отражает пространственное распределение двенадцати классов лесных экосистем, выделенных по критерию преобладающей породы. 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.



Рис. 3. Карта лесов России по состоянию на 2013 г.

Экспериментальные исследования ИКИ РАН также продемонстрировали эффективность использования полученных в зимний период спутниковых данных, традиционно считающихся малоинформативными при изучении растительности, для картографирования и оценки характеристик лесного покрова. Так, параметризация модели зависимости отражательной способности покрытого снегом лесного покрова от величины запаса стволовой древесины и применение полученной зависимости к спутниковым данным MODIS зимнего периода позволили разработать экспериментальный вариант карты запасов древесины в лесах России (Ховратович и др., 2013) (рис. 4). При этом регрессионная оценка параметров используемой модели и восстановление значений запаса выполнялись средствами программного комплекса LAGMA, что позволило учесть пространственную вариабельность характеристик различных типов лесного покрова на больших территориях.



Рис. 4. Карта запаса древесины по состоянию на 2013 г.

В соответствии с концепцией динамического картографирования указанный метод может использоваться для формирования временной серии ежегодных согласованных карт запаса ствольной древесины. Наличие уникальных данных такого рода потенциально позволяет выполнять дистанционную оценку возрастной структуры лесного покрова на основе ассимиляции ежегодных измерений запаса по спутниковым данным в модель динамики лесов (Жарко, Барталев, 2014б).

Перспективные направления развития методологии спутникового картографирования растительного покрова

Разработанная к настоящему времени ИКИ РАН методология автоматизированного картографирования растительного покрова и опыт создания на ее основе с использованием данных MODIS серии тематических карт, на наш взгляд, не имеют аналогов не только в нашей стране, но и за ее пределами. Вместе с тем, все более расширяющееся практическое использование карт растительного покрова в различных областях экономической деятельности (лесное хозяйство и лесная промышленность, сельское хозяйство, охотничье хозяйство) и научно-исследовательских проектах позволяет уточнять требования пользователей к их тематической нагрузке, выявлять и систематизировать имеющиеся неточности картографирования, планировать пути дальнейшего совершенствования методологии. Стимулирующее влияние на развитие методологии спутникового картографи-

рования растительного покрова оказывает и запуск в эксплуатацию новых, отвечающих необходимым техническим требованиям и обладающих улучшенными характеристиками, спутниковых систем дистанционного зондирования. При этом можно выделить следующие приоритетные цели совершенствования методологии спутникового картографирования растительного покрова:

- повышение точности классификации и оценки характеристик растительного покрова;
- повышение пространственного разрешения карт растительного покрова;
- расширение состава картографируемых тематических классов и характеристик растительного покрова.

Необходимо отметить, что оценка достигнутой к настоящему времени тематической точности (валидация) существующих спутниковых карт растительного покрова представляет собой самостоятельную задачу исследований, не решенную к настоящему времени в полной мере. Основным фактором, лимитирующим возможности валидации созданных карт, является чрезвычайная трудоемкость формирования наборов опорных данных о растительном покрове, полностью отвечающих предъявляемым к ним требованиям репрезентативности и достоверности. Однако удовлетворение требованию достоверности опорных данных часто может быть достигнуто лишь при проведении специализированных наземных обследований. В связи с практической сложностью формирования полноценных наборов опорных данных для валидации карт часто приходится прибегать к косвенным оценкам их точности на основе сравнения с доступной информацией, в качестве которой могут выступать, например, данные официальной статистики, материалы инвентаризации лесов, существующие тематические карты или результаты визуальной интерпретации спутниковых изображений. Будучи, безусловно, полезным для выявления макроскопических ошибок спутникового картографирования растительного покрова, использование такого рода данных тем не менее дает лишь весьма приблизительное представление о реальной точности создаваемых карт. В связи с этим организация и проведение полномасштабной валидации созданных и создаваемых карт растительного покрова приобретает особую актуальность, находясь в ряду приоритетных задач перспективных исследований.

Созданные карты находят применение для мониторинга и прогноза развития лесных пожаров, оценки степени повреждения лесов огнем и причиненного им ущерба, мониторинга санитарного состояния лесов, оценки среды обитания и учета численности охотничьих ресурсов, оценки биологического разнообразия в лесах и решения целого ряда других задач. Вместе с тем следует отметить, что относительно невысокий уровень пространственного разрешения (230 м) созданных к настоящему времени карт существенно ограничивает их эффективное использование в ряде регионов страны и решение на их основе ряда прикладных задач. В частности, уровень пространственного разрешения указанных карт очевидно недостаточен для их эффективного использования в малолесных регионах страны с преобладанием колочных или фрагментированных лесов. Кроме того, пространственное разрешение карт накладывает ограничения и на возможности их ис-

пользования для оценки процессов лесопользования и лесовозобновления на вырубках с достаточной полнотой и достоверностью.

Исходя из вышесказанного, очевидно, что существующие ограничения диктуют необходимость создания карт растительного покрова России более высокого пространственного разрешения. В тоже время, несмотря на кажущуюся очевидность путей решения данной проблемы за счет использования спутниковых данных более высокого пространственного разрешения, необходимо отметить, что, будучи, безусловно, необходимым, это условие не является единственным и достаточным. В частности, выполненные ранее исследования (Барталев, Лупян, 2013) убедительно показывают, что автоматизированное распознавание категорий лесных и нелесных земель, лесов различной породной структуры, сельскохозяйственных земель должно опираться на использование данных дистанционных наблюдений достаточно высокого временного разрешения, что накладывает дополнительные ограничения на возможности выбора спутниковых систем для решения этой задачи. Таким образом, с учетом необходимости удовлетворения двум противоречащим условиям (в силу характерной для современной группировки спутников дистанционного зондирования обратной зависимости между величинами пространственного и временного разрешения), обоснованный выбор источника спутниковых данных, способных обеспечить повышение детальности автоматизированного картографирования растительного покрова в масштабах страны до недавнего времени представлялся достаточно проблематичным.

Ввод в эксплуатацию в 2014 г. новых систем ДЗЗ Метеор-М КМСС и Proba-V, отличающихся уникальным сочетанием пространственного (60–100 м) и временного разрешения (не менее 10–15 наблюдений в месяц для территории России) получаемых данных, открыл потенциальную возможность дальнейшего существенного развития методов спутникового картографирования растительного покрова. Появление данных столь частых спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности с достаточно высоким уровнем пространственного разрешения обеспечивает возможность разработки методов автоматизированного распознавания типов растительного покрова, учитывающих различия их сезонной динамики, при недостижимом ранее сочетании уровней пространственной и тематической детальности. Это позволяет рассматривать в качестве одной из приоритетных задач разработку методов картографирования растительного покрова в масштабах страны с пространственным разрешением не ниже 100 м, обеспечивая, таким образом, более чем двукратное повышение уровня детальности формируемых карт в сравнении с их ближайшими аналогами. При этом предполагается максимально полное использование и дальнейшее развитие разработанных ИКИ РАН методических, алгоритмических и программных решений. Это позволит обеспечить тематическую преемственность новых картографических продуктов и осуществимость их разработки в сжатые сроки.

В качестве более отдаленной перспективы можно рассматривать дальнейшее повышение пространственного разрешения спутниковых карт растительного покрова России до

величины 15–30 м за счет использования данных, получаемых системами Landsat-OLI и Sentinel-2. Необходимую основу для проведения разработок в этом направлении создает сформированный в ИКИ РАН архив данных Landsat-TM/ETM+/OLI для всей территории страны. Вместе с тем, картографирование растительного покрова на национальном уровне со столь высоким пространственным разрешением сопряжено с необходимостью существенного развития технической инфраструктуры, а также поиска более эффективных технологических решений в области хранения и обработки сверхбольших объемов спутниковых данных.

Заключение

Разработка и эксплуатация системы спутникового картографирования растительного покрова на национальном уровне сопряжена с необходимостью решения ряда сложных научно-методических, технологических и организационных задач. В частности, система спутникового картографирования растительного покрова России должна обеспечивать выполнение таких базовых функций, как:

- создание и непрерывное обновление сверхбольших (объемы, измеряемые петабайтами) банков спутниковых данных;
- предварительная обработка спутниковых данных (пространственная привязка, радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция, фильтрация различного рода помех) для обеспечения необходимого уровня их качества;
- автоматическое распознавание объектов земной поверхности на основе специализированных алгоритмов, адаптивных к пространственно-временным изменениям физико-географических условий;
- оценка биофизических характеристик земной поверхности на основе данных дистанционных измерений;
- валидация результатов мониторинга, в том числе с привлечением региональных экспертов;
- создание интерфейсов удаленного доступа пользователей к банкам спутниковых данных и полученной на их основе картографической информации.

Масштабность задач спутникового картографирования растительного покрова, сопряженных с обработкой сверхбольших массивов спутниковых данных, обуславливает необходимость использования высокопроизводительных вычислительных комплексов. Опираясь на полученный к настоящему моменту опыт важно отметить, что методы автоматизированного картографирования растительного покрова требуют использования производных продуктов спутниковых данных, прошедших достаточно глубокую предварительную обработку.

В ИКИ РАН создан значительный научно-технологический задел в области методов и технологий спутникового картографирования растительного покрова, не только не уступающий, а по ряду направлений и превосходящий существующий в мире уровень.

К настоящему времени накоплены многолетние архивы спутниковых данных, разработаны уникальные автоматизированные методы и технологии их обработки.

Совокупность вышеуказанных предпосылок обеспечивает потенциальную возможность разработки на их основе системы глобального космического мониторинга растительного покрова.

Настоящая публикация подготовлена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.

Литература

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов 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. 2011а. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. 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. 2011б. Т. 35. № 1. С. 103–116.
3. Барталев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
4. Бурцев М.А., Мазуров А.А., Нейштадт И.А., Прошин А.А. Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 170–174.
5. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.
6. Жарко В.О., Барталев С.А. Ассимиляция измерений запаса стволовой древесины по спутниковым данным в модель динамики лесов для оценки их возрастной структуры // Двенадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2014 г. Сборник тезисов конференции, 2014б. С. 359.
7. Жарко В.О., Барталев С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014а. Т. 11. № 3. С. 159–170.
8. Максаковский В.П. Географическая картина мира. Кн. I: Общая характеристика мира. М.: Дрофа, 2003. 496 с.
9. Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
10. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Жарко В.О. Метод оценки запаса стволовой древесины на основе совместного использования продуктов данных ASAR и MODIS // Одиннадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2013 г. Сборник тезисов конференции, 2013. С. 331.
11. Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.L. GlobCover: the most detailed portrait of Earth // ESA Bulletin - European Space Agency. 2008. No. 136. P. 24–31.
12. Bartalev S.A., Belward A., Ershov D.V., Isaev A.S. A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 24. Issue 9. P. 1977–1982.
13. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 5. Issue 1. P. 55–64.
14. Bartholome E., Belward A. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26. Issue 9. P. 1959–1977.
15. Belward A. (ed.). The IGBP-DIS Global 1 Km Land Cover Data Set “DISCover”: Proposal and Implementation Plans: Report of the Land Recover Working Group of IGBP-DIS. IGBP-DIS, 1996.
16. Chen Jun, Chen Jin, Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. Vol. 103. P. 7–27.
17. Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. Issue 1. P. 168–182.
18. Hansen M., DeFries R., Townshend J.R.G., Sohlberg R. Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. Issue 6–7. P. 1331–1365.
19. Loveland T.R., Zhu Z., Ohlen D.O., Brown J.F., Reed B.C., Yang L. An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process // Photogrammetric engineering and remote sensing. 1999. Vol. 65. No. 9. P. 1021–1032.

Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover

S.A. Bartalev, V.A. Egorov, V.O. Zharko, E.A. Loupian,
D.E. Plotnikov, S.A. Khvostikov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

This paper presents an overview of main research activities and obtained results of Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS) in the area of Russia's vegetation cover mapping methods based on satellite Earth remote sensing data. A historical overview of the main stages of the methodology development and specific features of automated methods of mapping vegetation cover from satellite data developed by IKI RAS is presented. A description of thematic maps that have been produced up to date based on satellite data for the territory of Russia, characterising spatial distribution of land cover types and arable lands as well as dominant tree species and growing stock volumes of forests is presented. Promising research and development areas in the field of vegetation cover satellite monitoring methods are analyzed considering new technical capabilities of remote sensing systems.

Keywords: vegetation cover, remote sensing, satellite mapping methods

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometrii MODIS (Russian land cover satellite mapping using MODIS spectroradiometer data), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011a, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Raspoznavaniye pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnykh sputnikovyykh dannykh spektrometrii MODIS i lokal'no-adaptivnoi klassifikatsii (Arable lands recognition based on multi-annual MODIS spectroradiometer satellite data and locally-adaptive classification), *Komp'yuternaya optika*, 2011b, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.
3. Bartalev S.A., Loupian E.A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
4. Burtsev M.A., Mazurov A.A., Neishtadt I.A., Proshin A.A., Postroyeniye arkhiva sputnikovyykh dannykh dlya analiza dinamiki rastitel'nosti (Creation of satellite data archive for the analysis of vegetation dynamics), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Issue 3, Vol. 1, pp. 170–174.
5. Vernadskii V.I., *Biosfera i noosfera* (Biosphere and Noosphere), Moscow: Nauka, 1989. 261 p.
6. Zharko V.O., Bartalev S.A., Otsenka raspoznavayemosti drevesnykh porod lesa na osnove sputnikovyykh dannykh o sezonnykh izmeneniyakh ikh spektral'no-otrazhatel'nykh kharakteristik (Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014a, Vol. 11, No. 3, pp. 159–170.
7. Zharko V.O., Bartalev S.A., Assimilyatsiya izmerenii zapasa stvolovoi drevesiny po sputnikovym dannym v model' dinamiki lesov dlya otsenki ikh vozrastnoi struktury (Assimilation of growing stock volume satellite measurements into forest dynamics model to estimate their age structure), *12 konferentsiya "Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (12th Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, 10–14 November 2014, Book of Abstracts, p. 359.
8. Maksakovskii V.P., *Geograficheskaya kartina mira. Kn. I: Obshchaya kharakteristika mira* (Geographical picture of the world. Book I: General characteristic of the world), Moscow: Drofa, 2003, 496 p.
9. Plotnikov D.E., Miklashevich T.S., Bartalev S.A., Vosstanovleniye vremennykh ryadov dannykh dstantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
10. Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Zharko V.O., Metod otsenki zapasa stvolovoi drevesiny na osnove sovmestnogo ispol'zovaniya produktov dannykh ASAR i MODIS (Growing stock volume estimation method based on joint use of ASAR and MODIS data products), *11 konferentsiya "Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (11th Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, 11–15 November 2013, Book of Abstracts, p. 331.
11. Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.L., GlobCover: the most detailed portrait of Earth, *ESA Bulletin - European Space Agency*, 2008, No. 136, pp. 24–31.
12. Bartalev S.A., Belward A., Ershov D.V., Isaev A.S., A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, Issue 9, pp. 1977–1982.
13. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, Issue 1, pp. 55–64.

14. Bartholome E., Belward A., GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data, *International Journal of Remote Sensing*, 2005, Vol. 26, Issue 9, pp. 1959–1977.
15. Belward A., *The IGBP-DIS Global 1 Km Land Cover Data Set "DISCover": Proposal and Implementation Plans: Report of the Land Recover Working Group of IGBP-DIS*, IGBP-DIS, 1996.
16. Chen Jun, Chen Jin, Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J., Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 103, pp. 7–27.
17. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, Issue 1, pp. 168–182.
18. Hansen M., DeFries R., Townshend J.R.G., Sohlberg R., Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier, *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, Issue 6–7, pp. 1331–1365.
19. Loveland T.R., Zhu Z., Ohlen D.O., Brown J.F., Reed B.C., Yang L., An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1999, Vol. 65, No. 9, pp. 1021–1032.