

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*528.8: 574.4: 912.43:630

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ
ГЛОБАЛЬНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

© 2011 г. С. А. Барталев¹, Д. В. Ершов², А. С. Исаев², Е. А. Лупян¹

¹ Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32
e-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

² Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32
e-mail: ebch@cepl.rssi.ru

Поступила в редакцию 23.04.2011 г.

Леса планеты в силу важности выполняемых ими экологических, социальных и экономических функций, находясь в условиях нарастающего воздействия различных, часто деструктивных природных и антропогенных факторов, привлекают все большее внимание ученых, политических институтов и общественных организаций. Пройдя вместе с мировой космонавтикой 50-летний путь своего развития, спутниковый мониторинг лесов к настоящему времени приобрел черты одной из наиболее наукоемких и высокотехнологических областей человеческой деятельности. Современный этап развития спутникового мониторинга лесов характеризуется использованием широкого спектра орбитальных систем дистанционного зондирования Земли, высокоразвитых информационных и коммуникационных технологий, наличием многолетних глобальных банков данных дистанционных измерений и методов их автоматической обработки, интерфейсов эффективного доступа пользователей к получаемым результатам. Совокупность существующих предпосылок обуславливает своевременность практической постановки задачи разработки системы глобального спутникового мониторинга лесов Земли как инструмента, необходимого для рационального использования лесных ресурсов, сохранения биоразнообразия экосистем, фундаментальных исследований биосферных и климатических изменений.

Глобальный спутниковый мониторинг лесов, картографирование земного покрова, наземные экосистемы, выявление изменений в лесах, временные серии спутниковых изображений.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРОБЛЕМЫ

Согласно последним данным ФАО¹ ООН [3] покрытая лесом площадь Земли оценивается в 40 млн км², что составляет примерно 31% мирового земельного фонда (без учета Антарктиды и Гренландии). При этом на пять наиболее богатых лесами стран (Российская Федерация, Бразилия, Канада, США и Китай) приходится две трети всей лесной площади мира.

Выполняя множество экологических (климатообразующая, водоохранная и т.д.), экономических, социальных и других важнейших функций, леса планеты представляют собой феномен все-

мирного значения. Вместе с тем в мире сохраняются достаточно высокие темпы сокращения площади лесов (в среднем за последнее десятилетие – около 13 млн га в год [3]) в результате их гибели под воздействием различных природных и антропогенных факторов, вырубок и экспансии сельскохозяйственных земель.

В силу понимания необходимости получения актуальной и объективной информации о состоянии лесов планеты ФАО ООН каждые пять лет осуществляет их глобальную оценку, последняя из которых была завершена в 2010 г. При выполнении программы глобальной оценки лесных ресурсов в 2010 г., наряду с традиционно поступающими из стран материалами национальной статистики, ФАО ООН впервые в своей практике использовала в масштабах всей планеты данные дистанционного зондирования Земли со спутни-

¹ ФАО (Food and Agriculture Organisation) – межправительственная организация, созданная в рамках ООН с целью сбора и анализа информации по вопросам продовольствия.

ков для получения независимой и географически однородной информации о лесном покрове [39].

Этот шаг, безусловно, был подготовлен многолетними исследованиями и разработками в области глобального спутникового мониторинга окружающей среды, проводимыми начиная примерно с середины 1990-х гг. рядом научно-исследовательских организаций в рамках крупных международных программ и национальных проектов отдельных государств. К последним можно отнести США и некоторые развитые страны Европейского союза, такие как Бельгия, Германия и Франция.

Первый, заслуживающий, на наш взгляд, упоминания в данном контексте опыт спутникового картографирования лесов планеты, был получен в рамках Международной геосферно-биосферной программы (проект IGBP-DISCover [33]) 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 около 1 км и легендой, включающей 17 тематических классов, в том числе пять различных типов лесов. В дальнейшем на основе повторной, более глубокой обработки этого же набора данных NOAA-AVHRR в Университете штата Мэриленд (США) была получена более точная версия карты земного покрова [28].

Методология глобального спутникового картографирования лесов получила развитие в рамках международного проекта Global Land Cover 2000 (GLC2000), координируемого Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии [17]. 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. Легенда GLC2000 содержит 22 класса земной поверхности, а формальная процедура валидации, выполненная сетью региональных экспертов на основе спутниковых изображений Landsat-ETM+, позволила получить интегральную оценку точности распознавания классов 68.6% [34]. Введение дополнительного параметра, так называемого “тематического расстояния”, при оценке точности распознавания классов привело к росту этой величины до 90.3%.

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 в Университете г. Бостона (США) [20] автоматическая технология обеспечивает возможность ежегодного глобального картографирования земного покрова по данным MODIS с пространственным разрешением 500 м и выделением множества классов согласно легенде IGBP-DISCover.

К числу последних разработок в области глобального спутникового картографирования лесов можно отнести проект GlobCover [14], целью которого являлась разработка автоматической технологии построения карт земного покрова планеты на основе данных прибора Envisat-MERIS. Полученные в рамках проекта GlobCover глобальные карты лесов основаны на результатах наблюдений 2005 и 2009 гг., имеют пространственное разрешение 300 м и близкую к карте GLC2000 легенду.

Дополнительная информация об упомянутых выше и некоторых других проектах по глобальному картографированию лесов содержится в табл. 1.

Рассматривая методические вопросы спутникового картографирования лесов, нельзя не отметить важность наличия формализованных критериев определения классов легенды, основанных на общих для создаваемых карт принципах и не допускающих неоднозначностей содержательной интерпретации. Это позволяет обеспечить принципиальную возможность сопоставления полученных в разное время разнородных глобальных карт и оценки на их основе динамики лесного покрова. Принципиально новым шагом к унификации подходов к тематическому описанию классов явилась разработанная ФАО ООН система классификации земного покрова LCCS (Land Cover Classification System) [18], ставшая “де-факто” стандартом и эффективным инструментом формирования легенд глобальных спутниковых карт лесов.

Современные инструментальные возможности глобального спутникового картографирования лесов характеризуются и наличием методов оценки его характеристик в непрерывных шкалах, в качестве подхода, альтернативного заданию ограниченного числа тематических классов на основе предварительно выбранных пороговых критериев. К числу наиболее широко используемых глобальных продуктов этого класса относится

Таблица 1. Основные проекты глобального спутникового картографирования лесов

Проект	Спутниковая система	Пространственное разрешение	Обновляемость карты	Разработчик	Год публикации
IGBP-DISCover	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	Международная геосферно-биосферная программа	1999
UML	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	Университет штата Мэриленд (США)	2000
TREES [12]	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии	2001
GLC2000	SPOT-VGT	1 км	Нет	То же	2005
VCF	MODIS	500 м	Да	Университет штата Южная Дакота (США)	2005
GlobCover	Envisat-MERIS	300 м	Да	Европейское космическое агентство	2008
MODIS LC	MODIS	500 м	Да	Университет г. Бостона (США)	2010

TREES – проект по глобальному спутниковому мониторингу тропических лесов.

созданная в Университете штата Южная Дакота (США) база данных VCF (Vegetation Continuous Fields), характеризующая проективное покрытие территории древесной растительностью [29].

Существенное развитие получили и методы глобального мониторинга растительных пожаров, включая детектирование активных очагов горения и картографирование поврежденных лесов и других наземных экосистем. Не останавливаясь на анализе отдельных проектов по глобальному мониторингу пожаров, основные из которых приведены в табл. 2, отметим, что они базируются на использовании спутниковых данных низкого пространственного разрешения, получаемых системами NOAA-AVHRR, MODIS, SPOT-Vegetation, ERS-ATSR и Envisat-AATSR.

Одновременно следует отметить, что, несмотря на очевидную практическую важность получения данных о степени повреждения и гибели лесов в результате пожаров, использование спутниковых данных для решения этой задачи на глобальном уровне пока не получило развития. Несмотря на проводимые исследования и разработки [48], еще не получено законченных результатов и в области глобального спутникового мониторинга изменений в лесах под воздействием насекомых-вредителей, вырубок и отличных от пожаров деструктивных факторов различной природы, приводящих к гибели насаждений.

К числу перспективных, на наш взгляд, направлений исследований и разработок в области гло-

бального спутникового мониторинга лесов можно отнести также методы оценки их биофизических характеристик, включая индекс листовой поверхности, биомассу, долю поглощенной ФАР² и некоторые другие. Данные о биофизических характеристиках лесов и их динамике необходимы для получения ресурсных оценок и моделирования процессов обмена веществом и энергией между лесными экосистемами, атмосферой и гидросферой. Кроме того, использование данных о биофизических характеристиках лесов позволяет повысить эффективность решения и ряда других задач, включая количественную оценку изменения их состояния в результате стрессовых воздействий, оценку хода восстановления лесной растительности, определение сроков наступления основных фаз ее фенологического развития и некоторые другие. Наиболее широко для глобальной оценки биофизических характеристик лесов в настоящее время используются данные спутниковых систем SPOT-Vegetation и Terra-MODIS [38, 31].

В силу научно-методической и технологической сложности, а также необходимости привлечения знаний региональных экспертов, разработка методов глобального спутникового мониторинга лесов требует широкой международной кооперации, одним из эффективных инструментов развития которой является программа глобального наблю-

²ФАР – фотосинтетически активная радиация, или используемая при фотосинтезе часть солнечной радиации с длиной волн 0.38–0.71 мкм.

Таблица 2. Основные проекты глобального спутникового мониторинга лесных пожаров

Проект	Спутниковая система	Объект мониторинга	Пространственное разрешение	Период	Разработчик
World Fire Web [27]	NOAA-AVHRR	Действующие очаги пожаров	1 км	1999–2001	Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии
GBA2000 [44]	SPOT-VGT	Пожарища и гари	1 км	2000	То же
L3JRC [43]	SPOT-VGT	Пожарища и гари	1 км	2000–2007	Университет г. Лейстера (Великобритания)
MOD14/MYD14 [23]	Terra/Aqua-MODIS	Действующие очаги пожаров	1 км	2000 – наст. время	Университет штата Мэриленд (США)
MCD45A1 [41]	Terra/Aqua-MODIS	Гари	500 м	2001– наст. время	То же
World Fire Atlas [13]	ERS-ATSR2, Envisat-AATSR	Действующие очаги пожаров	1 км	1995–2000, 2003 – наст. время	Европейское космическое агентство
GLOBSCAR [25]	ERS-ATSR	Гари	1 км	2000	То же
GLOBCARBON [37, 40]	SPOT-VGT	Гари	1 км	1998–2003	“–”
GFED [21, 22,47]	MODIS, ATSR, TRMM-VIRS	Действующие очаги пожаров	1 км	1997 – наст. время	Национальное агентство по авиационной и исследованию космического пространства (NASA), США

GFED – Глобальная база данных пожарных эмиссий (Global Fire Emission Database).

TRMM – Миссия по измерению тропических дождей (Tropical Rainfall Measuring Mission).

дения за лесным покровом и динамикой земель GOF-C-GOLD (Global Observation of Forest Cover and Land Dynamics) [24].

Важным этапом глобального мониторинга лесов является оценка точности разрабатываемых тематических продуктов. Наглядным свидетельством этому служат существенные различия в оценках покрытой лесом площади по данным нескольких широко используемых глобальных спутниковых карт земного покрова [30]. В настоящее время методы валидации глобальных карт земного покрова базируются на результатах экспертного анализа спутниковых данных высокого пространственного разрешения для сети тестовых участков. Для этого в рамках программы GOF-C-GOLD созданы региональные сети экспертов, обеспечивающие валидацию глобальных продуктов с учетом специфики лесорастительных условий на основе имеющихся знаний, материалов выборочного наземного обследования или инвентаризации лесов [26]. В рамках проекта GLC2000 валидация карты наземных экосистем выполнялась на основе визуальной интерпретации изображений Landsat-TM для сети

статистически отобранных тестовых участков на всей территории земного шара [34].

В связи с необходимостью разработки общепринятой методологии валидации глобальных продуктов международной группой ученых даны развернутые рекомендации по гармонизации и оценке точности глобальных спутниковых карт земного покрова [42].

Стремительное развитие методов и технологий глобальной дистанционной оценки лесов, их состояния и динамики также обусловлено, на наш взгляд, наличием колоссальных по объему архивов спутниковых данных различного пространственного разрешения, накопленных за последнее десятилетие и открытых для общего доступа. Лидирующее положение здесь занимают системы сбора, хранения, первичной обработки и доступа к спутниковым данным, разработанные в рамках программ Национального космического агентства (NASA) и Геологической службы (USGS) США. В рамках программы “Система наблюдения Земли” (EOS) производится сбор, обработка и архивация данных спектрорадиометра MODIS

со спутников Terra и Aqua, обеспечивающего с 1999 г. ежедневные измерения отраженного и собственного излучения Земли в различных диапазонах электромагнитного спектра. Созданы сервисы распространения данных через единый центр DAAC³ для доступа к продуктам первичной обработки MODIS (LAADS⁴ Web) [36] и производным продуктам для анализа состояния земной поверхности (LP⁵ DAAC) [35]. Общий объем данных только продуктов LP DAAC составляет на сегодняшний день около 15 000 Терабайт. Архив и система распространения базируются в Научном центре наблюдений за наземными ресурсами EROS⁶ Геологической службы США. Этот центр распространяет и данные высокого пространственного разрешения, получаемые спутниками серии Landsat с 1972 года по настоящее время [32], а также множеством других спутниковых систем (EO-1 ALI, EO-1 Hyperion, MRLC, Aster TIR, Aster VNIR) [45]. В Европе создана система распространения открытых данных наблюдения спутниковой системой SPOT-Vegetation [19].

РАЗВИТИЕ В РОССИИ МЕТОДОВ ГЛОБАЛЬНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

Несмотря на исключительно высокую научную и практическую важность проблемы, в настоящее время в России не существует принятой на государственном уровне и централизованно поддерживаемой программы по созданию системы глобального спутникового мониторинга лесов. В условиях отсутствия такого рода программы инициативные исследования и разработки в данной области ведутся главным образом в рамках межинститутской кооперации заинтересованных научных учреждений Российской академии наук, включающей Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ) и Институт космических исследований (ИКИ). Будучи вовлеченными с начала 2000-х гг. в выполнение ряда крупных международных и российских программ дистанционного зондирования окружающей среды, указанные организации к настоящему времени сумели создать конкурентоспособный в мире научно-технический задел, обеспечивающий возможность разработки в ближайшие годы в России полнофункциональной системы глобального спутникового мониторинга лесов.

³ DAAC – Distributed Active Archive Center.

⁴ LAADS – Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System.

⁵ LP – Land Processing.

⁶ EROS – Earth Resources Observation and Science Center.

Создание указанного научно-технического задела в значительной степени стимулировалось нацеленностью выполняемых проектов на охват столь больших территорий (Россия, Северная Евразия), что найденные для их реализации методические и технологические решения удовлетворяют и большинству требований, предъявляемых к системам глобального спутникового мониторинга.

Выполняемые исследования и разработки в настоящее время проводятся применительно к лесам бореальной зоны планеты. Леса бореального пояса характеризуются огромной протяженностью, слабой доступностью для непосредственного наблюдения, сложностью и динамичностью формирующих экосистем. Им свойственна тесная связь слагающих компонентов: атмосферы, гидросферы, растительности, животного мира, почв и литогенной основы. Несмотря на неоднородность занимаемого пространства, бореальные леса обладают определенной общностью свойств и структуры, что позволяет устанавливать закономерности их строения, территориального размещения и развития. Наиболее успешно это осуществляется на основе данных космических съемок, регистрирующих элементы земного покрова на большой территории в различных спектральных диапазонах. При тематическом спутниковом картографировании объектами изучения являются не только отдельные лесные участки, но и природно-территориальные комплексы различной величины и сложности. Для их выявления и группировки используются индикационные свойства рельефа, горных пород, древесных растений, почв, последствий человеческой деятельности и др. На основе данных космической съемки составляются серии тематических разномасштабных карт, используемых для лесорастительного и лесохозяйственного районирования, получения ресурсных и тематических карт, характеризующих динамику лесного покрова территории.

Созданный в Институте космических исследований РАН архив данных MODIS и Landsat-TM/ETM+ охватывает территорию Северной Евразии за период с 2000 г. по настоящее время с ежедневным обновлением в автоматическом режиме [9].

Разработанная в рамках проекта GLC2000 по данным SPOT-Vegetation с пространственным разрешением 1 км карта наземных экосистем Северной Евразии [15] отражает географическое распределение основных типов лесных формаций, кустарниковой и травяной растительности, болот, тундровых экосистем и ряда других биомов. Использованный для создания карты метод включает предварительную обработку спутниковых

данных для формирования набора производных продуктов, адаптированных для изучения лесов, и их классификацию методом последовательной семантической декомпозиции. Для классификации использован набор признаков, включающий среднесезонные (весна, лето и осень) значения спектральной яркости, индекс оптической анизотропности поверхности, спектральный индекс влажности, индекс волнового подобия, характеризующий меру отличия временного профиля значений вегетационного индекса NDVI от идеализированной “волновой” траектории.

Созданная карта впервые наглядно продемонстрировала масштабную смену коренных хвойных лесов вторичными лиственными лесами в европейской части России, Центральной Сибири и на Дальнем Востоке в результате интенсивных вырубок второй половины прошлого столетия и пожаров. Анализ карты также позволил оценить масштабы зарастания лесом заброшенных в период постперестроечного спада экономики сельскохозяйственных земель в ряде регионов России. Карта наземных экосистем Северной Евразии находится в открытом доступе [46] и насчитывает около 500 зарегистрированных пользователей в различных странах мира.

Вместе с тем следует отметить, что 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 данных и не обеспечивал полную повторяемость результатов.

Принципиально новым шагом в развитии методологии глобального картографирования земного покрова явилась разработка алгоритма локально-адаптивной классификации спутниковых данных LAGMA (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) [11], в основе которого лежит принцип пространственной локализации процессов обучения классификатора и распознавания объектов наблюдаемой поверхности. Использование указанного алгоритма позволяет обеспечить адаптивность классификации к пространственным изменениям физико-географических условий местности как одного из важнейших требований, предъявляемых к методам обработки спутниковых данных на глобальном уровне.

Использование алгоритма LAGMA позволило создать новую карту растительности России на основе спутниковых данных MODIS [2]. Она

имеет пространственное разрешение 250 м, а ее легенда включает в себя восемь классов различных лесных формаций. В настоящее время эта карта является наиболее детальным в пространственном и тематическом отношении источником информации о лесах России, полученным на всю территорию страны на основе спутниковых данных. При этом необходимо учитывать, что процесс построения карты полностью автоматизирован; это обеспечивает полную повторяемость получаемых результатов и позволяет проводить ежегодное картографирование лесов в масштабах страны. Наиболее актуальной из серии имеющихся к настоящему моменту спутниковых карт лесов России является карта по данным MODIS 2010 г.

Выполненные исследования позволили разработать метод и автоматическую технологию спутникового картографирования поврежденных пожарами лесов на основе временных серий данных приборов SPOT-Vegetation и MODIS [16, 6]. Метод предполагает использование комбинации спектральных признаков для выявления межгодовых изменений в состоянии лесов и результатов детектирования действующих пожаров по anomalously высокой температуре поверхности.

Сформированный с использованием разработанной технологии банк данных в настоящее время представляет собой наиболее полный и достоверный источник информации о повреждениях огнем растительного покрова бореальной зоны планеты. Полученные данные впервые дали возможность получения объективной информации о пространственно-временных характеристиках повреждений растительности пожарами для всей территории Северной Евразии за относительно продолжительный период (2000–2010 гг.) при ежедневной частоте наблюдений, что позволяет достаточно детально анализировать сезонную динамику пожаров в различных типах лесных экосистем. Разработанный метод позволил также создать на основе данных SPOT-Vegetation циркулярный банк данных повреждений лесов пожарами, охватывающий бореальный пояс планеты, за период с 2000 г. по настоящее время при ежелекционной частоте наблюдений.

Применение временных рядов спутниковых данных MODIS позволяет регистрировать крупномасштабные усыхания лесов Северной Евразии, вызванные массовым размножением насекомых-вредителей [4, 5]. Разработанные методы автоматизированного картографирования очагов массового размножения короеда типографа (*Ips typographus* L.) в лесах европейского севера России и сибирского шелкопряда (*Dendrolimus*

sibiricus superans Tschetv.) в лесах Сибири и Дальнего Востока апробированы в рамках национальной системы дистанционного мониторинга лесов [10]. Лесоэнтомологический мониторинг рассматривается как важный элемент контроля состояния лесов, обеспечивающий при надлежащем исполнении сохранение их важнейших ресурсно-экологических функций [8]. Характерной чертой лесоэнтомологического мониторинга является системный подход к анализу динамических процессов, способствующих нарушению устойчивости лесных экосистем к насекомым-вредителям. Это позволяет правильно оценить биоценотическую роль и хозяйственную значимость отдельных видов и группировок насекомых, оптимизировать существующие методы контроля их численности, а также разработать принципиально новую систему слежения за изменением состояния лесов, подверженных массовому нападению насекомых с различными типами популяционной динамики.

Комбинированное использование спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения позволяет эффективно получать информацию о масштабах вырубке лесов как одного из значимых факторов антропогенного воздействия на наземные экосистемы бореальной зоны. В частности, использование временных серий спутниковых данных MODIS позволяет детектировать сплошные вырубки леса в таежных регионах Европейского Севера России и Центральной Сибири, где площади вырубок достигают 50 га и более. В регионах с ограниченным лесопользованием вырубки имеют значительно меньшие размеры (до 10 га). Для их обследования целесообразно использовать спутниковые изображения высокого разрешения.

Созданные методы и алгоритмы автоматической обработки данных, технологии ведения архивов спутниковых данных и результатов их обработки, системы оперативного доступа к результатам дистанционного мониторинга широкого круга территориально распределенных пользователей, а также подходы к организации, управлению и контролю работоспособности различных систем мониторинга используются при создании промышленных систем дистанционного мониторинга.

Так, на основе указанных технологий разработана Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [7], позволяющая оперативно получать информацию обо всех возникающих лесных пожарах на территории России и пограничных регионов.

Система обеспечивает оперативное детектирование пожаров, определение пройденных огнем площадей и оценку вызванных пожарами повреждений. Информация, предоставляемая системой, сегодня используется для организации мониторинга и тушения природных пожаров. На большей части лесного фонда страны (зона космического мониторинга первого уровня) организация тушения пожаров осуществляется только после их обнаружения ИСДМ-Рослесхоз и оценки возможных угроз объектам инфраструктуры. Система позволяет проводить совместный анализ наземной и спутниковой информации, в том числе и для оценки эффективности принимаемых мер по тушению пожаров. ИСДМ-Рослесхоз – одна из наиболее крупных подобных систем в мире. В нее входит семь центров приема и автоматической обработки информации, охватывающей все основные природно-территориальные комплексы таежной зоны Евразии.

Развиваются также специализированные системы, направленные на получение спутниковой информации, необходимой для проведения научных исследований. Так, например, в ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН в рамках различных научных программ и проектов активно развиваются технологии дистанционного мониторинга бореальных экосистем. Такие технологии позволяют на основе дистанционных методов исследовать поведение растительности на больших территориях, строить карты растительного покрова, оценивать его динамику в связи с климатическими изменениями, изучать процессы реакции растительности на погодные аномалии. Подобные исследования еще два десятилетия назад можно было проводить только на отдельных тестовых полигонах, с организацией специальных экспедиций и выборочных наземных наблюдений. Сейчас они выполняются на основе анализа обширной информации, ежедневно поставляемой космическими системами дистанционного зондирования Земли.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СИСТЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

Развивая концепцию системы глобального спутникового мониторинга лесов, некоторые положения которой нами были уже предложены ранее [1], еще раз подчеркнем, что спутниковые системы дистанционного зондирования являются одним из наиболее эффективных инструментов изучения долговременных крупномасштабных процессов в биосфере. Имеющиеся в настоящее время спутниковые приборы и методы анализа

Таблица 3. Приоритетные направления глобального спутникового мониторинга лесов

Направление мониторинга	Наблюдаемые объекты и явления	Оцениваемые характеристики
Картографирование и оценка структуры лесных экосистем	Растительный покров различных биомов Водно-болотные комплексы Непокрытые растительностью земли	Жизненные формы растительности Тип вегетативных органов Тип фенологической динамики растительности Видовой состав растительности Возрастная структура лесов
Оценка биофизических характеристик лесов	Лесной растительный покров	Надземная биомасса Индекс листовой поверхности (LAI) Объем первичной продукции (NPP) Доля поглощенной ФАР (fPAR) Концентрация хлорофилла 3D-структура лесного покрова
Оценка возмущающих воздействий на леса	Лесные пожары Вырубки лесов Факторы биотического воздействия Факторы техногенного воздействия Восстановительная динамика лесов	Тип фактора воздействия Площадь повреждений Степень повреждений Время события Скорость восстановления лесной растительности
Оценка фенологической динамики лесов	Фенологическая динамика лесных экосистем	Продолжительность вегетационного сезона Сроки наступления фенологических фаз
Оценка многолетних трендов состояния лесов	Границы биомов и зоны перехода между ними Структура лесного покрова Биофизические характеристики лесов Возмущающие воздействия на леса Фенологические ритмы растительности	Наличие трендовой динамики Направление трендовой динамики Скорость трендовой динамики
Оценка физических характеристик поверхности	Все типы лесных экосистем	Альбедо поверхности Температура поверхности Влагосодержание напочвенного покрова

данных дистанционного зондирования дают возможность регулярного получения в глобальном масштабе оценок многих характеристик лесов, необходимых для исследований в области изменений климата, а также моделирования возможных сценариев будущих изменений (табл. 3).

Система глобального спутникового мониторинга лесов должна обеспечивать выполнение таких базовых функций, как:

- создание и непрерывное обновление сверхбольших (объемы, измеряемые Петабайтами) банков спутниковых данных;

- предварительная обработка спутниковых данных (пространственная “привязка”, радиомет-

рическая 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 физических и биофизических характеристик земной поверхности на основе данных дистанционных измерений;

- валидация результатов мониторинга, в том числе с привлечением международных региональных экспертов;

– создание интерфейсов удаленного доступа пользователей к глобальным банкам спутниковых данных и полученной на их основе информации.

Масштабность решаемых задач, сопряженных с обработкой сверхбольших массивов спутниковых данных и глобальным моделированием, обуславливает необходимость использования высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Опираясь на опыт использования данных дистанционного зондирования, важно отметить, что эффективность использования алгоритмов и методов тематического анализа спутниковых данных достигается за счет привлечения высококачественных производных спутниковых продуктов, созданных на этапе их предварительной обработки. Поэтому данный блок системы мониторинга лесов является одним из важнейших наряду с другими ее элементами.

Система автоматизированного распознавания объектов земной поверхности на глобальном уровне должна базироваться на специализированных алгоритмах, адаптивных к пространственно-временным изменениям физико-географических условий. Это позволит учитывать локальные и региональные изменения лесорастительных условий при извлечении из спутниковых данных информации о пространственном распределении покрытых и непокрытых лесом территорий, породной и возрастной структуре лесов, а также других количественных и качественных характеристик древесной, кустарниковой и травяной растительности.

Возмущающие воздействия на растительный покров, к числу которых относятся природные и антропогенные факторы, в значительной мере определяют потоки углерода между экосистемами и атмосферой, характеристики циклов энергии и воды в геосистеме. Оценка возмущающих воздействий на леса и их последствий является приоритетной составляющей спутникового мониторинга лесов, основанной на выявлении изменений в лесах с использованием временных серий данных спутниковых наблюдений, а также получении детальных характеристик, отражающих масштабы и интенсивность возмущающего воздействия.

Оценка биофизических характеристик лесов ориентирована на получение данных, необходимых в качестве входных параметров для моделирования процессов энерго- и газообмена в системе “растительность–атмосфера”, и, в частности, создание моделей углеродного цикла. Адекватное описание и моделирование процессов энергообмена в системе “растительность–атмосфера” связано с получением оценок таких биофизиче-

ских характеристик растительности, как наземная и, в частности, зеленая биомасса, площадь листовой поверхности, объем чистой первичной продукции, доля поглощаемой фотосинтетически активной радиации, концентрация хлорофилла, трехмерная структура растительного покрова. Эти характеристики чрезвычайно важны для оценок компонентов углеродного баланса в наземных экосистемах, включая запас углерода и скорость его накопления экосистемой.

Ряд доступных для дистанционного измерения физических характеристик поверхности, в частности, таких как альbedo, температура и влагосодержание, используются в качестве входных переменных в моделях динамики роста и развития растительности, необходимых для оценок объемов чистой первичной продукции, интенсивности стока углерода и накопления его в растительной биомассе. Поэтому оценка физических характеристик поверхности является необходимым компонентом глобального спутникового мониторинга лесных экосистем.

Наблюдения за состоянием и динамикой наземных экосистем в настоящее время осуществляются с использованием широкого спектра спутниковых приборов с различными уровнями пространственного разрешения, спектральными каналами, частотой наблюдения и некоторыми другими параметрами. Табл. 4 характеризует возможности использования современных спутниковых приборов наблюдения Земли в оптическом диапазоне электромагнитного спектра для решения приоритетных задач мониторинга лесных экосистем.

Современная система глобального спутникового мониторинга лесов должна иметь взаимосвязь с региональными системами посредством обменных протоколов между однотипными продуктами и характеристиками. Например, согласованность и сопоставимость легенд карт различных уровней и регионов может быть обеспечена использованием разработанной ФАО системой классификации наземного покрова LCCS [18]. Это позволит создать эффективную систему валидации глобальных продуктов системы с привлечением при необходимости международных региональных экспертов. При этом она должна быть оснащена соответствующими методами и инструментами для качественной и количественной оценки точности тематических продуктов.

И, наконец, важнейшим элементом системы является обеспечение доступа к банкам спутниковых продуктов и полученной на их основе информации. В первую очередь, это должны быть

Таблица 4. Возможности спутниковых оптических приборов наблюдения Земли для мониторинга лесов

Направления мониторинга лесов	Спутниковые приборы			
	Низкое разрешение (~1 км)	Среднее разрешение (250–500 м)	Высокое разрешение (20–50 м)	Детальное разрешение (1–5 м)
Картографирование лесов	NOAA-AVHRR SPOT-VGT MODIS	MODIS Envisat-MERIS	Landsat-TM/ ETM+ SPOT-HRVIR IRS-LISS	IKONOS Quick-Bird SPOT-HRG
Оценка биофизических характеристик лесов биомассы, LAI, NPP, fPAR концентрации хлорофилла 3D-структуры лесов	SPOT-VGT	Envisat-MERIS Terra-MISR MODIS		
Оценка возмущающих воздействий				
последствий пожаров последствий воздействия биотических и техногенных факторов	NOAA-AVHRR SPOT-VGT MODIS	MODIS	Landsat-TM/ ETM+ Terra-ASTER SPOT-HRVIR	IKONOS Quick-Bird SPOT-HRG
масштабов вырубок детектирование очагов горения	NOAA-AVHRR MODIS		Landsat-TM/ ETM+ Terra-ASTER	
Оценка фенологической динамики лесов	NOAA-AVHRR			
Оценка многолетних трендов состояния лесов	SPOT-VGT MODIS		Landsat-TM/ ETM+ SPOT-HRVIR	
Оценка температуры и влажности поверхности	NOAA-AVHRR MODIS		Landsat-TM/ ETM+ Terra-ASTER	

Заштрихованные ячейки – спутниковые приборы не могут быть использованы.

интерфейсы для визуализации информационных продуктов системы, инструменты статистического и пространственного анализа, возможности импорта и экспорта картографической, статистической и графической информации.

Заключение. Существующий уровень обеспеченности объективной и регулярно обновляемой информацией о состоянии лесного покрова планеты является пока еще недостаточным и не отвечает современным экологическим, экономическим и политическим вызовам. Данные национальной статистики и разрозненных научных проектов часто несопоставимы, не дают целостной картины актуального состояния лесов и, следовательно, не могут быть положены в основу корректного анализа и прогнозирования их динамики. Очевидно,

что для получения достоверной и однородной в масштабах планеты информации в настоящее время не существует реальной альтернативы использованию спутниковых данных.

Вместе с тем, несмотря на активную работу по развитию методов и технологий глобального спутникового мониторинга лесного покрова планеты, проводимую рядом ведущих научных организаций мира (преимущественно в США и странах Евросоюза), достаточно развитых систем к настоящему времени еще не создано. Создание и эксплуатация такого рода систем сопряжены с необходимостью решения ряда сложных научно-методических, технологических и организационных задач, несопоставимых по уровню сложности с разработкой систем спутни-

кового мониторинга лесов отдельных стран или регионов.

В настоящее время в России имеются все необходимые условия для выполнения крупной национальной научной программы мирового уровня в области глобального спутникового мониторинга лесных экосистем и других растительных ресурсов планеты. Полученная на регулярной основе объективная информация о лесных ресурсах позволит оптимизировать их использование, создаст дополнительные преимущества в области международной торговли (в том числе, в рамках ВТО), будет способствовать развитию новых внешних рынков (включая формирующийся рынок биотоплива) и обеспечению экологической безопасности.

Важный политический эффект от выполнения такой национальной научной программы будет достигнут за счет повышения вклада России в институты и действующие соглашения ООН, в том числе такие, как ФАО, международные конвенции по биологическому разнообразию и борьбе с опустыниванием, Рамочная конвенция по климатическим изменениям и Киотскому протоколу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Исаев А.С., Лупян Е.А.* Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сибирский экол. журн. 2005. Т. 12. № 6. С. 1039–1054.
2. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Карта растительного покрова России. М.: ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН, 2010.
3. Глобальная оценка лесных ресурсов, 2010 год. Основные выводы // ФАО ООН. 2010. С. 12.
4. *Девятова Н.В., Ершов Д.В.* Применение данных спутниковой съемки при мониторинге массового размножения сибирского шелкопряда // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 2. С. 161–167.
5. *Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С.* Определение масштабов усыхания хвойных лесов Европейского Севера России по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. М.: ООО “Азбука-2000”, 2007. Вып. 4. С. 204–211.
6. *Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценок Ф.В.* Сравнительный анализ результатов детектирования пройденных огнем площадей территории Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation и Terra-MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. М.: ООО “Азбука-2000”, 2008. Вып. 5. С. 292–296.
7. *Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Тацилин С.А.* Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. М.: “Полиграф Сервис”. 2004, Вып. 1. С. 47–57.
8. *Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г., Недорезов Л.В., Кондаков Ю.П., Киселев В.В., Суховольский В.Г.* Популяционная динамика лесных насекомых. М.: Наука, 2001. 374 с.
9. *Лупян Е.А., Назиров Р.Р.* Организация архивов спутниковых данных для решения задач глобального изменения климата // Электронный журн. “Исследовано в России”. 2000. № 32. С. 438–450.
10. *Толпин В.А., Ершов Д.В., Ефремов В.Ю., Кобельков М.Е., Лупян Е.А.* Организация доступа пользователей системы дистанционного лесопатологического мониторинга к спутниковым данным и результатам их обработки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. М.: ООО “Азбука-2000”, 2008. Вып. 5. С. 577–585.
11. *Уваров И.А., Барталев С.А.* Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. М.: ООО “Азбука-2000”, 2010. Вып. 7. С. 353–365.
12. *Achard F., Eva H.D., Mayaux P.* Tropical forest mapping from coarse spatial resolution satellite data: production and accuracy assessment issues // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 22. P. 2741–2762.
13. *Arino O., Plummer S.* Along track scanning radiometer world fire atlas: validation of the 1997–98 Active Fire Product // 2001, IGBP-DIS Working Paper 23, IGBP, Sweden. 66 p.
14. *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. N 136. P. 24–31.
15. *Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S.* A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Int. J. Remote Sens. 2003. V. 24. N 9. P. 1977–1982.
16. *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 // Int. J. Remote Sens. 2007. V. 28. N 6. P. 1397–1404.
17. *Bartholome E., Belward A.S.* GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // Int. J. Remote Sens. 2005. V. 26. P. 1959–1977.

18. *Di Gregorio A.* UN land cover classification system (LCCS) – classification concepts and user manual for software version 2 // United Nations Food and Agricultural Organization. 2005. www.glcn-lccs.org
19. Free Vegetation products: <http://free.vgt.vito.be/>
20. *Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., Schaaf C.* Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. P. 287–302.
21. GFED – Global Fire Emission Database. <http://ess1.ess.uci.edu/~jranders/data/GFED2/readme.pdf>
22. *Giglio L., Kendall J.D., Mack R.* A multi-year fire data set for the tropics derived from the TRMM VIRS // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 24. N 22. P. 4505–4525.
23. *Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 87. P. 273–282.
24. Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOF-C-GOLD) // www.fao.org/gtos/gofc-gold
25. GLOBSCAR Final report. http://due.esrin.esa.int/prjs/Results/192-106-252-100_20041514631.pdf
26. GOF-C-GOLD Fire Network <http://gofc-fire.umd.edu/RegNtwks/index.asp>
27. *Grégoire J.-M., Pinnock S.* The world fire web network. A satellite based system for globally mapping fires in vegetation // Publication of the European Communities. 2000. S.P.I.00.11. P. 6.
28. *Hansen M., DeFries R., Townshend J.R.G., Sohlberg R.* Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier // *Int. J. Remote Sens.* 2000. V. 21. № 6–7. P. 1331–1365.
29. *Hansen M.C., Townshend J., DeFries R.S., Carroll M.* Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales // *Int. J. Remote Sens.* 2005. V. 26. № 19. P. 4359–4380.
30. *Herold M., Woodcock C., Mayaux P., Baccini A., Schmullius C.* Some challenges in global land cover mapping: an assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. P. 2538–2556.
31. *Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., El-Saleous N.* An overview of MODIS land data processing and product status // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. P. 3–15.
32. Landsat missions. <http://landsat.usgs.gov/>
33. *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 // *Photogramm. Eng. Rem. S.* 1999. V. 65. N9. P. 1021–1032.
34. *Mayaux P., Eva H., Gallego J., Strahler A., Herold M., Shefali A., Naumov S., de Miranda E., di Bella C., Johansson D., Ordoyne C., Kopin I., Belward A.* Validation of the Global Land Cover 2000 Map // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44. № 7–1. P. 1728–1739.
35. MODIS land products. <http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp>
36. MODIS Level 1 data, geolocation, cloud mask, and Atmosphere products (LAADS): <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>
37. *Plummer S., Ranera F., Arino O.* The GLOBCARBON Initiative: Populating the Earth with burned areas // *Geophysical Research Abstracts*. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-08581. 2005, V. 7.
38. *Plummer S., Arino O., Simon W., Steffen W.* Establishing an Earth observation product service for the terrestrial carbon community: the GLOBCARBON initiative // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006 11, 97–111 10.1007/s11027-006-1012-8.
39. *Ridder R.M.* Global forest resources assessment 2010. Options and recommendations for a global remote sensing survey of forests // UN FAO. 2007. P. 56.
40. *Roy D.P., Boschetti L.* Southern Africa validation of the MODIS, L3JRC and GLOBCARBON burned area products // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 47. № 4. P. 1032–1044.
41. *Roy D.P., Jin Y., Lewis P.E., Justice C.O.* Prototyping a global algorithm for systematic fireaffected area mapping using MODIS time series data // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 97. P. 137–162.
42. *Strahler A.H., Boschetti L., Foody G.M., Friedl M.A., Hansen M.C., Herold M., Mayaux P., Morissette J.T., Stehman S.V., Woodcock C.E.* Global land cover validation: recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2006. 58 p.
43. *Tansey K., Gregoire J.-M., Pereira J.M.C., Defourny P., Leigh R., Pekel J.-F., Barros A., Silva J., van Bogaert E., Bartholomé E., Bontemps S.* L3JRC – A global, multi-year (2000–2007) burnt area product (1 km resolution and daily time steps) // *Remote Sensing and Photogrammetry Society Annual Conference*. 2007. Newcastle upon Tyne, UK, 11–14 September 2007.
44. *Tansey K., Grégoire J.-M., Binaghi E., Boschetti L., Brivio P.A., Ershov D., Flasse S., Fraser R., Graetz D., Maggi M., Peduzzi P., Pereira J.M.C., Silva J., Sousa A., Stroppiana D.* A global inventory of burned areas at 1 km resolution for the year 2000 derived from spot vegetation data // *Climatic Change*. 2004. V. 67. P. 345–377.
45. USGS Global Visualisation Viewer (GloVis). http://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/glovis
46. TerraNorte – the information system of the boreal ecosystems monitoring. <http://terranorte.iki.rssi.ru>

47. *van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Kasibhatla P.S., Arellano A.F., Jr.* Inter-annual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004 // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 3423–3441.
48. *Zhan X., Sohlberg R.A., Townshend J.R.G., Dimiceli C., Carroll M.L., Eastman J.C., Hansen M.C., Defries R.S.* Detection of land cover changes using MODIS 250 m data // *Remote Sensing of Environment.* 2002. V. 83. № 1–2. P. 336–350.

The Main Problems and Perspectives of Developing a System of Global Satellite Monitoring of Forests

S. A. Bartalev, D. V. Ershov, A. S. Isaev, E. A. Lupyan

Forests of the planet attract a growing attention of scientists, political institutes and public organizations due to their ecological, social, and economic functions and effects of destructive, natural, and anthropogenic factors. Having passed the 50-year pathway of development along with astronautics, satellite monitoring became one of the largest science-capacious and highly technological fields of human activity. The current stage of the satellite forest monitoring is characterized by the use of a wide spectrum of orbital systems for remote sounding of the Earth, by highly developed information and communication technologies, the presence of long-term global databases of remote measurements and methods of their automatic processing, and by interfaces of efficient access of users to the results obtained. The combination of existing prerequisites determines the opportune practical problem of elaborating a system of global satellite monitoring of forests as an instrument necessary for the rational use of forest resources, conservation of ecosystem biodiversity, and basic research of the biosphere and climate changes.