

Основные принципы построения информационной системы дистанционного мониторинга биологического разнообразия лесов России

Д.В. Ершов, Н.В. Лукина

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

E-mail: ershov@ifi.rssi.ru

Рассмотрены основные принципы построения информационной системы дистанционного мониторинга биологического разнообразия лесов России. Описаны экосистемные функции и услуги, критерии и индикаторы биоразнообразия лесов, которые могут оцениваться с использованием спутниковой информации. Дана краткая характеристика современных спутниковых систем. Предложена схема информационной системы с описанием ее основных элементов. Приводятся основные требования к информационному обеспечению системы на федеральном, региональном и локальном уровнях.

Ключевые слова: биоразнообразие лесов, экосистемные функции и услуги, дистанционный мониторинг, информационная система.

Введение

Леса являются самыми распространенными экосистемами нашей планеты. Особая роль в сохранении биоразнообразия лесов принадлежит России, на долю которой приходится 22% всех мировых лесных ресурсов, в том числе более половины бореальных лесов планеты. Деструктивные воздействия антропогенных и природных факторов существенно и негативно влияют на биоразнообразие лесов. Динамика биологического разнообразия лесных экосистем обусловлена комбинированным действием множества природных и антропогенных факторов, что создает методические сложности в оценке, мониторинге и прогнозе динамики биоразнообразия лесов на разных пространственных уровнях. К основным факторам динамики биоразнообразия лесных экосистем относят изменения климата, пожары, рубки, промышленное загрязнение, массовые вспышки численности насекомых, грибные болезни, изменение землепользования.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) лесных экосистем являются важнейшим источником информации для оценки их биологического разнообразия. Использование спутниковых данных позволяет оценивать информативные индикаторы биоразнообразия, которым уделено большое внимание в документах Конвенции о биологическом разнообразии: в Стратегическом плане по биоразнообразию 2011–2020 гг. (CBD COP 10 [сайт]. URL: <http://www.cbd.int/cop10>) и документах Партнерства по индикаторам биоразнообразия (National indicators..., 2011; BIP: [сайт]. URL: <http://www.bipindicators.net>), а также в материалах Монреальского процесса по бореальным и умеренным лесам (Criteria and indicators..., 2009) и Министерской конференции по защите лесов Европы (Леса Европы, MCPFE; Filipchuk, 2011). В этих документах подчеркивается настоятельная необходимость в постоянном обновлении данных по биоразнообразию. Этим требованиям отвечают современные возможности ДЗЗ и технологии их обработки. Анализ временной динамики полученных дистанционными

методами данных по индикаторам биоразнообразия с помощью ГИС-технологий на различных пространственных уровнях (локальный, региональный и национальный) позволяет осуществлять мониторинг и прогноз состояния и динамики биоразнообразия с учетом интенсивности и частоты внешних возмущающих факторов (деструктивных воздействий).

Для оценки и мониторинга биоразнообразия лесов необходимо создание информационной системы дистанционного мониторинга, обеспечивающей оценку воздействия основных естественных и антропогенных факторов на биоразнообразие, индикаторы оценки биоразнообразия и экосистемных функций / услуг. Цель данной статьи – обсудить основные принципы построения такой системы.

Для построения информационной системы дистанционного мониторинга биоразнообразия лесов необходимо решить следующие задачи.

- Выявить информативные критерии и индикаторы биоразнообразия лесов, которые могут оцениваться на основе данных ДЗЗ.
- Идентифицировать экосистемные функции / услуги, которые могут с использованием данных ДЗЗ.
- Разработать методы и технологии тематической обработки спутниковых данных для получения соответствующих тематических продуктов, карт и характеристик лесов.
- Разработать интерфейсы обмена данными между блоками информационной системы мониторинга биоразнообразия.
- Разработать методы и технологии пространственного анализа тематических продуктов для оценки критериев и индикаторов, экосистемных функций и услуг.
- Разработать ГИС-интерфейсов представления тематических продуктов и результатов их анализа для оценки критериев и индикаторов, экосистемных функций и услуг лесов на различных пространственных уровнях (локальный, региональный и национальный).

Критерии и индикаторы сохранения биологического разнообразия

Индикаторы биоразнообразия лесов разрабатываются в рамках различных международных процессов, таких как Конвенция о биологическом разнообразии, Министерская конференция по защите лесов Европы (Леса Европы, MCPFE), Монреальский процесс по бореальным и умеренным лесам. Среди предложенных в рамках этих процессов индикаторов для наших целей важны показатели, которые могут быть оценены на основе спутниковой информации. Среди индикаторов, разработанных в рамках Конвенции, это такие показатели, как площади лесов и их породная структура, площади различных местообитаний, площади особо охраняемых природных территорий, площади лесов с устойчивым управлением лесными ресурсами (определяется при наличии сертификата), динамика площади лесов, динамика площади нарушенных лесов, фрагментация лесов.

В рамках процесса «Леса Европы» Критерий 4 «Сохранение и восстановление биологического разнообразия лесных экосистем» оценивается на основе следующих индикаторов биоразнообразия, которые могут определяться с использованием спутниковой информации:

площади лесов, сформированных разными древесными породами; площади лесов разного типа возобновления (естественное, естественное с посадками, культуры, порослевое), площади лесов, не нарушенных человеком, квазиестественных и лесных культур, площади лесов с доминированием интродуцированных древесных видов (более 50% участия в составе древостоя), пространственная мозаика лесного покрова на ландшафтном уровне; площади лесов, находящихся под охраной с целью сохранения биоразнообразия, ландшафтов и специфических природных элементов (по классификатору MCPFE).

Для оценки экосистемного разнообразия на основе спутниковой информации в рамках Монреальского процесса могут оцениваться следующие индикаторы: площади и доли площадей лесов, сформированных разными древесными породами; площади лесов на разных сукцессионных стадиях, площади лесов разных классов возраста и типов собственников, площади и доли площадей лесов на охраняемых территориях, сформированных различными древесными породами, разного класса возраста и сукцессионных стадий; фрагментацию лесов. Предложенные индикаторы можно отнести к структурным параметрам биоразнообразия, которые позволяют оценить пространственное распределение показателей экосистемного разнообразия лесов на основе спутниковых данных. Поскольку представления о взаимосвязях между биоразнообразием и экосистемными функциями / услугами активно развиваются, спутниковые данные позволяют также оценивать выполнение лесами экосистемных функций.

Экосистемные функции / услуги леса

В основе экосистемных функций / услуг лежит биоразнообразие в различных его проявлениях. Биоразнообразие рассматривается как механизм, обеспечивающий людей экосистемными услугами (CBD, 2008), и как основа для противостояния деградации экосистем и сохранения стабильности внутри экосистем. Между биологическим разнообразием и экосистемными функциями существуют тесные взаимосвязи (Schwartz et al., 2000; Bunker et al., 2005; Ricketts, 2004; Flynn et al., 2009; Phillpott et al., 2009).

Выделяют четыре категории экосистемных функций / услуг: обеспечивающие, поддерживающие, регулирующие и культурные (МЕА, 2005). Леса, являясь важнейшими рефугиумами биоразнообразия и обеспечивая местообитания для более половины известных видов растений и животных, выполняют множество экосистемных функций / услуг. К обеспечивающим услугам относят снабжение продовольствием, водой, древесиной и волокнами. Леса ежегодно обеспечивают 3,3 млрд кубометров древесины, включая 1,8 млрд кубометров древесного топлива и древесного угля, а также снабжают многочисленными недеревесными продуктами, которые играют очень важную роль в экономической жизни сотен миллионов людей. На лесных водосборах формируется более 75% доступной пресной воды. Поддерживающие и регулирующие услуги относят к экологическим. Примерами поддерживающих услуг являются почвообразование, фотосинтез и круговорот элементов питания, переработка отходов человеческой жизнедеятельности. К регуливающим услугам относят регулирование биогеохимических циклов, климата. В лесах сконцентрировано около 50%

мирового наземного запаса органического углерода, лесная биомасса составляет около 80% наземной биомассы. Две трети глобальной наземной нетто-первичной продукции создается в лесах. Восстановление лесного покрова способствует ослаблению изменений климата. Уменьшение лесного покрова и ухудшение состояния лесов приводят к катастрофическим событиям, таким как наводнения, оползни, эрозия почв. Леса способствуют удовлетворению рекреационных, эстетических и духовных потребностей людей.

Для оценки связей между биоразнообразием и экосистемными услугами необходимо решение двух основных задач: идентификация ключевого провайдера экосистемных функций / услуг и идентификация различных аспектов структуры сообществ, которые влияют на функции в ландшафтах (Luck et al., 2003; Kremen, 2005). Один из принятых подходов к исследованию влияния факторов на величину и изменчивость экосистемных услуг в ландшафтах основывается на обилии наиболее важного провайдера экосистемных услуг; он применяется для экосистем, в которых ярко выраженный доминант вносит значительный вклад в выполнение функций / обеспечение услуг (Solan et al., 2004). Этот подход применим для лесных экосистем.

Экосистемные функции/услуги варьируют в пространстве и во времени. Они могут осуществляться в локальном, региональном, глобальном и «вложенном» (nested) уровнях (Diaz et al., 2003; Symstad et al., 2003). Понимание роли масштабов / уровней в осуществлении той или иной функции необходимо для принятия управленческих решений.

Основными задачами в решении проблемы взаимосвязи экосистемные функции – биоразнообразие для разработки систем поддержки принятия решений в лесном хозяйстве с использованием, в том числе, методов ДЗЗ являются следующие: идентифицировать компоненты биоразнообразия, которые являются ключевыми провайдерами экосистемных функций / услуг и характеризуют функциональные взаимосвязи; определить различные аспекты структуры лесных сообществ, которые влияют на функции в ландшафтах; оценить ключевые факторы, влияющие на выполнение экосистемных функций / обеспечение экосистемными услугами; установить пространственно-временные шкалы, на которых функционируют провайдеры, продуцирующие экосистемные функции / услуги.

Методы анализа спутниковых данных для оценки биоразнообразия и экосистемных функций / услуг

Использование соответствующих методов тематического анализа спутниковых данных позволяет оценивать биоразнообразие лесов и экосистемных функций с использованием индикаторов, соответствующих международным стандартам:

1. Картографирование лесов по основным древесным породам и их соотношение в составе смешанных насаждений. *Карты лесов по основным древесным породам и их соотношению в составе смешанных насаждений необходимы для обеспечения информации по оценке экосистемного разнообразия на основе таких индикаторов, как площадь лесов, формируемых различными древесными породами, относительно всей площади лесов и относительно охраняемых территорий; площадь*

лесов на различных стадиях сукцессий, разнообразие видов древесных растений и фрагментарность лесов исследуемой территории и др. Этот продукт может использоваться для оценки таких экосистемных функций, как продуцирование органического вещества, формирование биогеохимических циклов, процессов почвообразования, гидрологического режима, для оценки защитных функций вблизи крупных водоемов и рек. Картографирование лесов, формируемых одной доминирующей древесной породой, и смешанных насаждений осуществляется на основе алгоритма локально-адаптивной классификации сезонных изображений среднего и высокого пространственного разрешения с обучением (Уваров, Барталев, 2010; Барталев и др., 2012). Распознавание участков основано на анализе в многомерном пространстве спектральных каналов расстояний между значением спектральных яркостей опорных сигнатур лесных классов и яркостью пикселя спутникового изображения с неизвестным тематической принадлежностью.

2. Картографирование возрастной структуры лесов. Этот продукт может также использоваться для оценки экосистемного разнообразия на основе таких индикаторов, как площади лесов, формируемых различными древесными породами в соответствии с классами возраста относительно всей площади лесов, относительно охраняемой территории лесного фонда. Позволяет уточнять и оценивать как обеспечивающие, так и экологические функции / услуги. Картографирование возрастной структуры насаждений доминирующей лесной породы осуществляется на восстановлении регрессионной зависимости между спектральными яркостями зимних спутниковых изображений и данными наземных измерений высоты древесной породы исследуемой территории. С помощью данных о взаимосвязях между высотой и возрастом насаждений осуществляется восстановление возраста древесного стоя с учетом региональных лесорастительных условий (Сочилова, Ершов, 2013).
3. Количественная оценка и картографирование запасов стволовой древесины, живой надземной биомассы и лесных горючих материалов. Этот продукт может использоваться для оценки обеспечивающих функций (древесина, волокна) и таких экологических функций, как продуцирование органического вещества и регулирование циклов углерода (вносимого лесом вклада в глобальный углеродный цикл). Оценка проводится на основе таких индикаторов, как общий запас древесины на корню основных лесобразующих пород на лесных землях, углеродный пул лесов, формируемых разными древесными породами с учетом класса возраста и стадии сукцессии, вклад лесов в общий глобальный углеродный бюджет, включая поглощение и эмиссии углерода. Картографирование запасов стволовой древесины доминирующей лесной породы осуществляется на восстановлении регрессионной зависимости между спектральными яркостями зимних спутниковых изображений и данными наземных измерений запасов древесной породы исследуемой территории (Сочилова, Ершов, 2012). Оценка запасов массы основных проводников горения вдоль вертикального профиля древесного полога (верхний полог, подрост и подлесок, валеж, напочвенный покров

и лесная подстилка) осуществляется на основе комбинации данных наземных и таксационных измерений, материалов спутниковой съемки среднего и высокого пространственного разрешения, карт породной и возрастной структуры лесов и данных о плодородии и увлажнении почв (Сочилова и др., 2009).

4. Выявление и картографирование участков гарей и погибших насаждений. *Этот продукт может использоваться для учета влияния различных факторов на леса с оценкой их санитарного состояния и жизнеспособности. Оцениваются площади лесов, находившихся под воздействием таких факторов, как вредные насекомые, пожары, ураганы, снеголомы, затопления и др. Проводится пространственно-временной анализ спутниковых продуктов с целью выбора участков усыхания лесов с высокой (более 75% поврежденного древостоя) степенью дефолиации и дехромации древесных растений в текущем году и без признаков положительной динамики состояния по сравнению с предыдущим годом спутниковых наблюдений (Девятова и др., 2006; Исаев и др., 2012; Стыщенко и др., 2013).*
5. Оценка степени дефолиации и дехромации древесных растений усыхающих лесов. *Этот продукт может использоваться для оценки изменения выполнения таких экосистемных функций, как продуцирование органического вещества, регулирование биогеохимических циклов. Оцениваются изменения вклада лесных экосистем в выполнение функций в зависимости от степени дефолиации и дехромации, обусловленных действием неблагоприятных факторов (лесные пожары, вырубки, ветровалы, массовое размножение вредных насекомых). Оценку степени дефолиации и дехромации древесных растений проводят на основе многоспектральных спутниковых данных текущего года методом декомпозиции спектральных смесей (Барталев и др., 1999). При этом в качестве опорных данных о спектрально-отражательных характеристиках неповрежденных лесов используют данные спутниковых наблюдений в период, предшествующий началу усыхания.*
6. Выявление и картографирование участков сплошных рубок леса. *Этот продукт может использоваться для оценки влияния рубок на экологические функции, такие как продуцирование органического вещества, формирования биогеохимических циклов, плодородия почв, гидрологического режима. Индикатором является объем ежегодной рубки древесины по сравнению с пороговыми значениями в регионе. Картографирование осуществляется на основе пространственно-временного анализа спутниковых продуктов с целью определения площадей, на которых производились рубки в текущем году, методом выявления отрицательной динамики спектральных яркостей древесного полога относительно предыдущего года (Барталев и др., 2009; Королева, Ершов, 2012).*
7. Выявление и оценка площадей участков долговременной деградации лесов. *Этот продукт может использоваться для оценки влияния воздушного промышленного загрязнения на санитарное состояние и жизнеспособность лесов и их экосистемные функции (продуцирование органического вещества, регулирование циклов углерода, азота, серы, тяжелых металлов и других элементов, регулирование почвенных*

процессов, формирование гидрологического режима). Выявление участков долговременной деградации лесов основано на поиске отрицательных трендов многолетней динамики значений спектральных вегетационных индексов, характеризующих продуктивность и состояние лесов (включая долю поглощенной фотосинтетически активной радиации, объем зеленой биомассы, концентрацию хлорофилла и влагосодержание в вегетирующих органах лесной растительности) (Барталев и др., 2008).

Классификация современных спутниковых систем

В зависимости от детальности съемки (пространственное разрешение) и периодичности наблюдения одной и той же территории (временное разрешение) с учетом возможностей съемочной аппаратуры (спектральное разрешение) спутниковые данные могут решать многие задачи мониторинга биологического разнообразия лесов на глобальном (национальном), региональном и локальном уровнях.

Первый тип данных представлен глобальными спутниковыми системами NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS, Метеор-М1/MCY-MP, способными покрывать обширные территории России и ежедневно осуществлять наблюдение одной и той же территории с низким пространственным разрешением. С помощью этих систем в России решаются оперативные задачи дистанционного лесопожарного мониторинга (Лупян и др., 2003; Ершов и др., 2004; Барталев и др., 2010). На основе этих данных также формируются и многолетние данные, позволяющие отслеживать тренды и динамику состояния лесной растительности.

Второй тип данных представлен изображениями 36-канального спектрорадиометра MODIS (250–500 м) среднего пространственного разрешения спутников TERRA (1999 г.) и AQUA (2001 г.) и 22-канального радиометра VIIRS (375–750 м) среднего пространственного разрешения нового спутника Suomi NPP (2011 г.), которые охватывают также весь спектр задач мониторинга долгосрочных процессов в лесах – неделя, декада, месяц и год. Эти системы по своему охвату могут решать как национальные (федеральные), так и региональные задачи мониторинга состояния и динамики биоразнообразия лесов.

Региональный мониторинг биологического разнообразия лесов может решаться с использованием данных спутниковой съемки высокого пространственного разрешения. Характерными представителями таких систем являются LANDSAT 5, 7, 8 (15–30 м), TERRA-ASTER (15–90 м), SPOT 2, 4 (10–20 м) и МЕТЕОР-М1/KMCC (50 м), предназначенные для уточнения оценок площадей лесов, участков гарей, ветровалов, свежих вырубок и других нарушений, а также оценки повреждения древостоев на уровне субъектов РФ, районов и других муниципальных и производственных (лесничества) образований.

Локальный набор спутниковых данных используется для детальной оценки видового разнообразия небольших по размерам насаждений лесов, их состояния и определения возможных причин нарушений, а также для планирования мероприятий по наземному обследованию лесной экосистемы (закладки пробных площадок). Характерными представителями таких систем являются SPOT5-HRG (2,5–10 м), RapidEye (5 м), IKONOS (1–3 м), Quickbird (1–3 м), РЕСУРС-ДК (1–3 м) и их аналоги.

Архитектура информационной системы

Для реализации и обеспечения решения вышеперечисленных задач необходимо создать информационную систему дистанционного мониторинга биологического разнообразия лесов, принципиальная схема, которой приводится на *рис. 1*.

Система поддерживается информацией и данными от пяти блоков (подсистем), включающих динамическое картографирование и оценку лесных ресурсов, мониторинг лесных пожаров и других негативных воздействий на леса (лесопатологический мониторинг), мониторинг лесопользования и лесовосстановления.

В первую очередь, это карты типов наземных экосистем и покрытых лесом территорий, сомкнутости древостоя, пространственного распределения лесов по видовому составу, соотношению хвойных и лиственных пород, возрастной структуре и запасу биомассы лесов. Затем карты пройденных пожарами лесных участков и степени повреждения огнем лесной растительности, участков усыханий лесов разной категории состояния в результате массового размножения вредных насекомых, длительных погодных засух и ураганных ветров. И, наконец, места концентрации сплошных рубок и площади лесопользования в регионах. На основе этих данных ведутся учет и мониторинг долгосрочных изменений в лесах. В этом же блоке предусмотрены элементы моделирования динамики лесов в условиях глобального изменения климата.

Данные наземных наблюдений на основе регулярных сетей (например, ICP-forest программа) или нерегулярных, приуроченных к лесорастительным условиям (ландшафтам, экосистемам, бассейнам рек и т.п.), являются информационной основой для локального уровня оценки биологического разнообразия лесов, а также для калибровки спутниковых данных и верификации тематических продуктов

Блок мониторинга биоразнообразия обеспечивает информацией о состоянии биоразнообразия.

Блок экосистемных функций и услуг лесов на глобальном (национальном), региональном и локальном уровнях обеспечивает оценку категории обеспечивающих услуг (древесина, волокна) и двух категорий экологических услуг – поддерживающих и регулирующих: почвообразование, продуцирование органического вещества, регулирование циклов углерода и элементов питания, регулирование климата и др.

Полученные результаты обеспечивают основу для оценки состояния биологического разнообразия лесов России и принятия стратегических и тактических решений по устойчивому их управлению.

Требования к информационному обеспечению системы

Одной из задач, которые требуется решать для определения взаимосвязей биоразнообразие – экосистемные функции / услуги, является установление пространственных шкал, на которых функционируют провайдеры, продуцирующие экосистемные функции/услуги. Выделяются три уровня (*табл. 1*): *глобальный (национальный), региональный (субрегиональный) и локальный.*

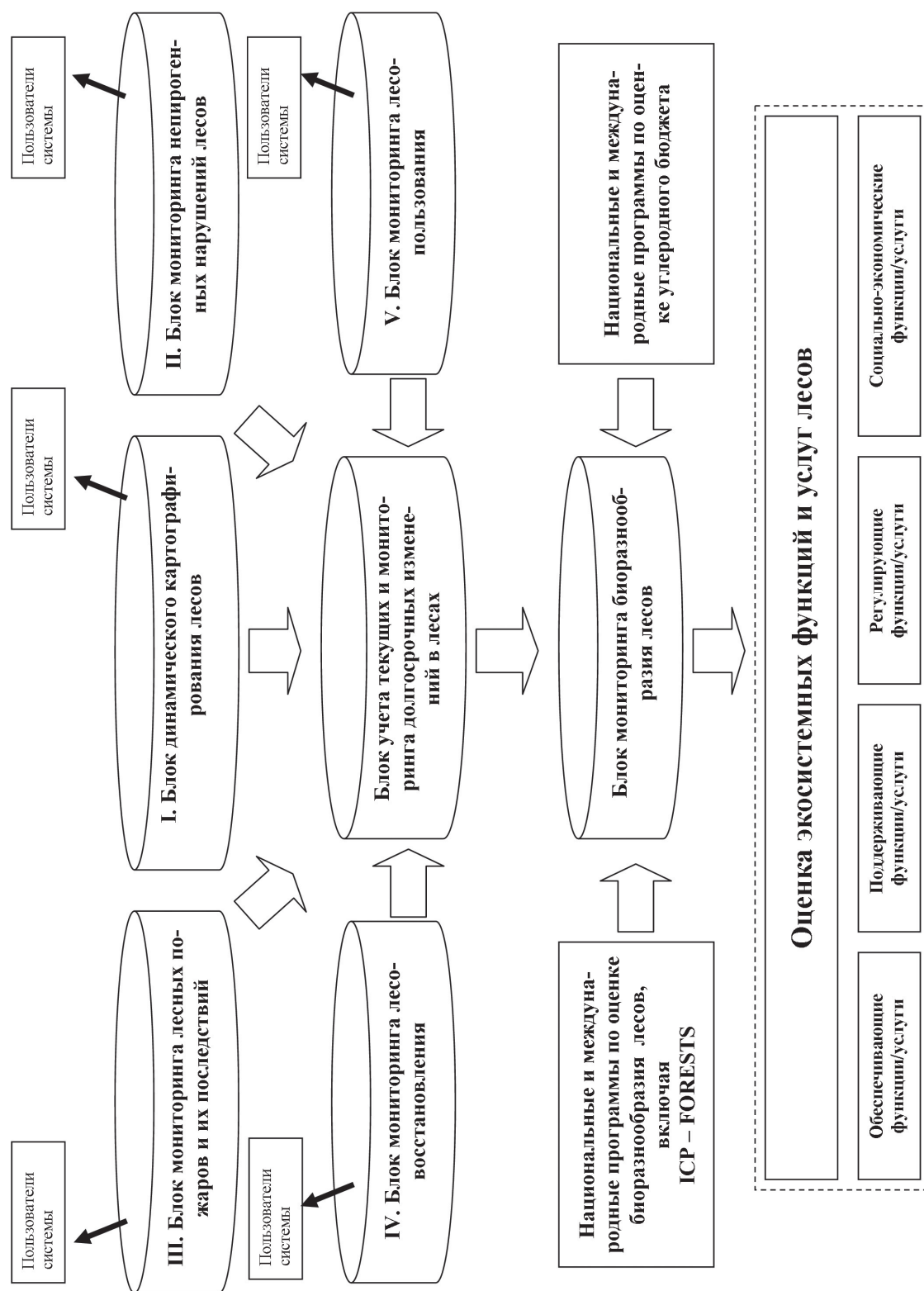


Рис. 1. Архитектура информационной системы космического мониторинга биоразнообразия лесных экосистем

Таблица 1. Основные требования к информационному обеспечению мониторинга биоразнообразия лесов

<i>Состав информации</i>	<i>Федеральный уровень</i>	<i>Региональный уровень</i>	<i>Локальный уровень</i>
Картографические данные			
Топографическая основа	1:2,5 млн, 1:1 млн масштаба	1:500 тыс., 1:200 тыс. масштаба	1:100 тыс., 1:50, 1:25 тыс. масштаба
Административные границы	Федеральный округ, субъект	Субъект, административный район	Административный район, муниципалитет
Производственные границы	Лесной район	Лесничество, участковое лесничество	Лесной участок (квартал), урочище
Природные границы	Бассейны крупных рек	Бассейны средних рек	Бассейны малых рек
Спутниковые и наземные данные			
Производные продукты	- Сезонные и ежемесячные безоблачные композиты на всю территорию России низкого разрешения (1 км – 250 м) - Вегетационные индексы	- Декадные, ежемесячные мозаики на регион среднего разрешения (250 м) - Сезонные безоблачные композиты высокого разрешения (10–30 м) - Вегетационные индексы	- Выборочная съемка детального разрешения (1–5 м) - Вегетационные индексы
Лесные карты	Карта лесных экосистем по данным MODIS (250 м)	Карта лесных экосистем по данным LANDSAT (30 м)	Карта лесного участка по данным детального разрешения (1–5 м)
Тематические продукты с характеристикой лесов	- Породный состав - Запас стволовой древесины - Возраст насаждений - Сомкнутость лесного покрова	- Породный состав - Запас стволовой древесины - Возраст насаждений - Сомкнутость лесного покрова	- Породный состав древостоя - Запас древостоя - Возраст древостоя - Сомкнутость древостоя
Тематические продукты нарушений	- Крупные гари и погибшие насаждения от других негативных воздействий - Места концентрации свежих сплошных вырубок	- Лесные массивы поврежденных лесов от пожаров и других негативных воздействий - Контуры свежих вырубок	- Небольшие участки поврежденного леса (куртины) пожарами и другими негативными воздействиями - Отдельные деревья с категорией состояния
Дополнительные данные	- Данные наземных наблюдений нац. и межд. программ - Данные метеонаблюдений - Данные лесного реестра	- Данные наземных наблюдений нац. и межд. программ - Данные метеонаблюдений - Данные лесоустройства	- Данные наземных наблюдений нац. и межд. программ - Данные лесоустройства

На *глобальном (национальном) уровне* для принятия стратегических решений по сохранению биоразнообразия и устойчивому управлению лесами необходима агрегированная тематическая и картографическая информация о площадях лесов, их видовом составе, сукцессионном статусе, возрастной структуре, запасах стволовой биомассы, масштабах нарушений от лесных пожаров, насекомых-вредителей и ураганных ветров.

Информационная система *глобального (национального) уровня* обеспечит возможность районирования территории России (федеральных округов) по степени фрагментарности лесов, лесистости территории, степени их нарушенности и другим индикаторам. Мониторинг изменений индикаторов позволит оценить ситуацию по продвижению государства к устойчивому управлению лесами как в целом по стране, так и по крупным регионам.

Информационная система *регионального уровня* необходима для принятия тактических решений и планирования мероприятий для продвижения субъекта к устойчивому управлению лесами. Ее основой являются интегрированные тематические и картографические базы данных мониторинга состояния и динамики лесов на уровне субъекта. Административно-производственной единицей территории субъекта может рассматриваться административный район и лесничество, а природной единицей статистического учета – бассейны средних рек. Агрегация характеристик лесов и их состояния, полученных по спутниковым данным, позволит обеспечить комплексную оценку индикаторов биоразнообразия на уровне этих территориальных единиц.

Оценки *локального уровня* проводятся в регионах с сильно развитой дорожной инфраструктурой, антропогенной нагрузкой на леса, а также их значительной фрагментарностью. В результате они должны обеспечивать детальную картину состояния лесного участка и оценивать индикаторы биоразнообразия для принятия соответствующих хозяйственных решений с целью сохранения и восстановления устойчивости локальной экосистемы. Для принятия оперативных решений необходимы тематические и картографические базы данных детальной информации на основе данных наземных обследований и выборочной съемки сверхвысокого пространственного разрешения. Это обеспечивает необходимость выявления причин ухудшения устойчивости экосистемы, разработки мер по ее восстановлению, а также организации постоянных наблюдений за состоянием и динамикой восстановительных процессов.

Заключение

Современные средства зондирования Земли из космоса являются важнейшим источником информации для изучения лесов. Использование спутниковых данных расширяет возможности оценки биологического разнообразия и экосистемных функций / услуг лесов, а также закладывает основу для построения системы мониторинга на федеральном, региональном и локальном уровнях.

Применение методов и алгоритмов спутникового картографирования позволяет актуализировать данные о породной структуре лесов, их продуктивности, масштабах

обезлесивания и лесовосстановления, оценивать различные стадии восстановительных сукцессий после пожаров, массового размножения вредных насекомых и болезней леса, рубок.

Объективные и регулярно актуализируемые данные о лесных экосистемах, обеспечивающие возможность моделирования их динамики при различных сценариях комбинированного действия природных и антропогенных факторов, необходимы для оценки биологического разнообразия и включения индикаторов биоразнообразия в системы поддержки принятия решений, направленных на устойчивое управление лесами.

Предложенная архитектура информационной системы дистанционного мониторинга биологического разнообразия в общем виде демонстрирует все составляющие и источники информации, которые необходимы для организации мониторинга критериев и индикаторов биологического разнообразия и экосистемных функций/ услуг на различных стадиях демультипликативных и дигрессионных сукцессий лесов.

Для установления взаимосвязей биоразнообразие – экосистемные функции/услуги определены три базовых уровня пространственной детализации информации и требования к данным, на которых можно отслеживать эффективность функционирования провайдеров, продуцирующих экосистемные функции и услуги.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательского проекта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Разработка научно-технических основ оценки биоразнообразия лесов России и принципов системы построения его мониторинга», шифр «2013-1.5-14-515-0041», государственный контракт № 14.515.11.0014 от 14.03.2013 г.

Литература

1. *Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С.* Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исследование Земли из космоса. 1999. № 4. С. 76–86.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Корец М.А., Балцтер Х., Герлах Р., Шмиллиус К.* Возможности использования данных спутниковых наблюдений для оценки вызванных пожарами повреждений и эмиссий углерода в лесах Центральной Сибири // Пожары в лесных экосистемах Сибири: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2008. С. 91–93.
3. *Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. II. С. 343–351.
4. *Барталев С.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е.* Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.

5. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А.* Развитие методологии спутникового картографирования лесных экосистем Северной Евразии // Разнообразие и динамика лесных экосистем России: В 2 кн. Кн. 1. Товарищество научных изданий «КМК», 2012. С. 261–286.
6. *Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С.* Оценка повреждений лесов сибирским шелкопрядом в Центральной Якутии по данным спектрорадиометра MODIS-TERRA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 306–314.
7. *Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Тащилин С.А.* Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. С. 47–57.
8. *Исаев А.С., Лямцев Н.И., Ершов Д.В.* Контроль численности лесных насекомых в системе лесозащитного мониторинга // Разнообразие и динамика лесных экосистем России: В 2 кн. Кн. 1. Товарищество научных изданий «КМК», 2012. С. 383–421.
9. *Королева Н.В., Ершов Д.В.* Разработка автоматизированного алгоритма выявления и идентификации изменений в лесах по данным высокого пространственного разрешения Landsat-TM // Десятая Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. тезисов конференции. Москва, ИКИ РАН, 12–16 ноября 2012 г.
10. *Лупян Е.А., Мазуров А.А., Флитман Е.В., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Новик В.П., Абушенко Н.А., Алтынцев Д.А., Кошелев В.В., Тащилин С.А., Татарников А.В., Сухинин А.И., Пономарев Е.И., Гришин А.М., Афонин С.В., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Матвиенко Г.Г., Соловьев В.С., Антонов В.Н., Ткаченко В.А.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы. Аналит. обзор / ИОА; ГПНТБ СО РАН. Сер. Экология. Вып. 68. Новосибирск, 2003.
11. *Сочилова Е.Н., Ершов Д.В., Коровин Г.Н.* Методы создания карт запасов лесных горючих материалов низкого пространственного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 441–449.
12. *Сочилова Е.Н., Ершов Д.В.* Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277–282.
13. *Сочилова Е.Н., Ершов Д.В.* Методы определения значений таксационных показателей лесных насаждений на основе комплексной обработки спутниковых данных и наземных наблюдений // Геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина. Москва, 22–24 апреля 2013 г. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 207–211.
14. *Стыценок Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами по спутниковым данным MODIS // Геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина. Москва, 22–24 апреля 2013 г. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 211–214.

15. 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. 2010. Т. 7. № 1. С. 353–365.
16. Bunker D.E., DeClerck F.A., Bradford J.C., Colwell R., Garden P., Perfecto I., Phillips O., Sankaran M., Naeem S. 2005. Biodiversity loss and above-ground carbon storage in a tropical forest // Science. Vol. 301. P. 1029–1031.
17. CBD (Convention on Biological diversity). Forest biodiversity. 2008. [Электронный ресурс] URL: <http://www.cbd.int/forest/about.shtml> (дата обращения: 03.09.2009).
18. Criteria and indicators for the conservation and sustainable management of temperate and boreal forests. The Montreal Process. Fourth Edition. October 2009.
19. Diaz S., Symstad A.J., Chapin F.S., Wardle D.A., Hueneke L.F. Functional diversity revealed by removal Experiments // Trends Ecol. Evol. 2003. Vol. 18. P. 140–146.
20. Elmqvist T., Folke C., Nystrom M., Peterson G., Begtsson J., Walker B. 2003. Response diversity, ecosystem change, and resilience // Front. Ecol. Environ. Vol. 1. P. 199–206.
21. Filipchuk A. Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe // FOREST EUROPE, UNECE and FAO 2011: State of Europe's Forest. P. 337.
22. Flynn D., Gogol-Prokurat M., Nogueira T., Molinari N., Trautman Richers B., Lin B.B., Simpson N., Mayfield M.M., DeClerck F. 2009. Loss of functional diversity under land use intensification across multiple taxa // Ecology Letters. Vol. 12. P. 22–33.
23. Kremen C. 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? // Ecology Letters. Vol. 8. P. 468–479.
24. Luck G.W., Daily G.C., Ehrlich P.R. 2003. Population diversity and ecosystem services // Trends Ecol. Evol. Vol. 18. P. 331–336.
25. MEA 2005 – Millennium Ecosystem Assessment – Sub-global assessments. 2005. In UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. Retrieved 13:50, July 8, 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://maps.grida.no/go/graphic/millennium-ecosystem-assessment-sub-global-assessments>.
26. National indicators, monitoring and reporting for the Strategic Plan for biodiversity 2011–2020. A review of experience and recommendations in support of the CBD Ad Hoc Technical Expert Group (AHTEG) on indicators for the Strategic Plan 2011–2020. 2011. [Электронный ресурс] URL: <http://www.bipindicators.net/news/nationalindicatorsreport>.
27. Philippott S.M., Soong O., Lowenstein J.H., Luz Pulido A., Tobar Lopez D., Flynn D.F.B., DeClerck F. 2009. Functional richness and ecosystem services: bird predation on arthropods in tropical agroecosystems // Ecological applications. Vol. 19. No. 7. P. 1558–1867.
28. Ricketts T.H. 2004. Tropical forest fragments enhance pollinator activity in nearby coffee Crops // Conservation Biology. Vol. 18. P. 1262–1271.
29. Solan M., Cardinale B.J., Downing A.L., Engelhardt K.A.M., Ruesink J.L., Srivastava D.S. 2004. Extinction and Ecosystem Function in the Marine Benthos // Science. Vol. 306. No. 5699. P. 1177–1180. DOI: 10.1126/science.1103960.

30. Symstad A.J., Chapin F.S., Wall D.H., Gross K.L., Huenneke L.F., Mittelbach G.G., Peters D.P.C., Tilman D. 2003. Long-term and large-scale perspectives on the relationship between biodiversity and ecosystem functioning // *BioScience*. Vol. 53. P. 89–98.

Basic principles of the Russian remote sensed information system for forest biodiversity assessment

D.V. Ershov, N.V. Lukina

Centre for Forest Ecology and Productivity of RAS, Moscow, Russia
E-mail: ershov@ifi.rssi.ru

The main principles of the Russian remote sensed information system for forest biodiversity and forest ecosystem functions/services assessment were discussed. The forest ecosystem functions and services, criteria and indicators of forest biodiversity that can be estimated on the basis of satellite data were identified. The structure of information system and description of its elements was presented. The satellite operation system was briefly characterized. Requirements for information support system on the the federal, regional and local levels have been formulated.

Keywords: forest biodiversity, ecosystem functions/ services, remote sensing, information system.