

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

УДК 528.8:581.5

ИЗУЧЕНИЕ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д. Г. Щепашенко^{1,2}, А. З. Швиденко^{1,3}, К. Пергер¹, К. Дресел¹, Ш. Фриц¹,
П. И. Лакида⁴, Л. В. Мухортова³, В. А. Усольцев⁵, К. С. Бобкова⁶,
А. Ф. Осипов⁶, О. В. Мартыненко², В. Н. Карминов², П. В. Онтиков²,
М. В. Щепашенко⁷, Ф. Кракснер¹

¹ *Международный институт прикладного системного анализа (IIASA)
Австрия, 2361, Лаксенбург, Шлосплатц, 1*

² *Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана
141005, Московская обл., Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1*

³ *Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

⁴ *Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, 03041, Киев, ул. Героев обороны, 15*

⁵ *Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202*

⁶ *Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
167982, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28*

⁷ *Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников
и специалистов лесного хозяйства
141200, Московская область, Пушкино, ул. Институтская, 17*

E-mail: schepd@iiasa.ac.at, shvidenk@iiasa.ac.at, perger@iiasa.ac.at, dresel@iiasa.ac.at,
fritz@iiasa.ac.at, petro.lakyda@ukr.net, l.mukhortova@gmail.com, usoltsev50@mail.ru,
bobkova@ib.komisc.ru, osipov@ib.komisc.ru, martinen@mgul.ac.ru, karminov@mgul.ac.ru,
opv86@mail.ru, mariaschep@gmail.com, kraxner@iiasa.ac.at

Поступила в редакцию 24.11.2016 г.

Дан обзор современных методов, инструментов и перспектив мониторинга лесной фитомассы в глобальном масштабе. Рассмотрены преимущества и недостатки различных дистанционных методов космического базирования, включая оптические, радарные (С-, L-, P-диапазонов) и лазерные, а также соответствующие им инструменты, находящиеся на орбите (MODIS, Proba-V, Landsat, Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS PALSAR, Envisat ASAR) или готовящиеся к запуску (BIOMASS, GEDI, NISAR, SAOCOM-CS). Подчеркнута роль наземных методов в разработке моделей фитомассы, обеспечении калибровки и проверки дистанционных данных. Описаны имеющиеся в свободном доступе карты, базы данных и эмпирические модели (как по-деревные – аллометрические, так и на уровне насаждений) лесной фитомассы. Описаны функциональные

© Щепашенко Д. Г., Швиденко А. З., Пергер К., Дресел К., Фриц Ш., Лакида П. И., Мухортова Л. В., Усольцев В. А., Бобкова К. С., Осипов А. Ф., Мартыненко О. В., Карминов В. Н., Онтиков П. В., Щепашенко М. В., Кракснер Ф., 2017

возможности интернет-портала Biomass.Geo-Wiki.org, который предоставляет доступ к коллекции глобальных и региональных карт фитомассы в полном разрешении с унифицированной легендой, наложенных на снимки высокого разрешения. Анонсирована международная кооперация ученых, проводящих измерения на постоянных пробных площадях (Forest Observation System), и рассмотрены ее перспективы в развитии сети наземных наблюдений во взаимодействии с дистанционным сообществом. Кратко рассмотрены перспективы беспилотных летательных аппаратов в инвентаризации лесов. Авторы адресуют данный обзор специалистам лесного хозяйства и научным работникам в области лесоведения и экологии, которые не являются экспертами в дистанционном зондировании, но хотят получить представление о современных тенденциях в этой области знания. Также статья нацелена на уменьшение разобщенности научных коллективов и более широкий обмен данными и знаниями между дистанционным и экологическим сообществами.

Ключевые слова: *лесная фитомасса, дистанционное зондирование, Geo-Wiki, Forest-observation-System.net.*

DOI: 10.15372/SJFS20170401

ВВЕДЕНИЕ

Всемирная метеорологическая организация при ООН назвала надземную фитомассу (above-ground biomass) одним из основных индикаторов в климатических исследованиях – Essential Climate Variable (Bojinski et al., 2014). Растительность является значительным резервуаром углерода, соизмеримым с количеством углерода в атмосфере. Она может выступать как существенным нетто-поглотителем углерода из атмосферы (в результате фотосинтеза), так и его источником (при уменьшении площади лесов и их деградации). Фитомасса рассматривается также в контексте задач устойчивого развития – Sustainable Development Goals (Müller et al., 2015), принятых на конференции ООН RIO+20 в 2012 г. Фитомасса упоминается в шести из семнадцати целей устойчивого развития, при этом подчеркивается ее роль в обеспечении продуктами питания, энергетике, строительстве, сдерживании климатических изменений, охране природы, сохранении биоразнообразия и пр.

Все перечисленное говорит о большой важности оценки запасов и мониторинга динамики фитомассы в глобальном масштабе. Эта задача выполнима только на основе дистанционных методов, обеспечивающих оперативное и сплошное (wall-to-wall) картографирование территории. Наземные методы (постоянные и временные пробные площади, государственная инвентаризация лесов) также остаются востребованными, главным образом для калибровки и валидации данных дистанционного зондирования, а также для разработки моделей зависимости фитомассы от таксационных показателей лесов.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕСНОЙ ФИТОМАССЫ

Сплошное и оперативное картографирование лесной фитомассы способно обеспечить дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), но в настоящее время существуют только косвенные методы дистанционной оценки фитомассы. Все имеющиеся методы можно разделить на три группы – оптические, радарные и лазерные. У каждого из них имеются свои преимущества и недостатки. Перечислим некоторые из имеющихся на орбите или ожидаемых инструментов, информация с которых поставляется в открытый доступ и может быть использована для оценки фитомассы.

Среди *оптических инструментов* наиболее известны MODIS (пространственное разрешение около 250 м), Proba-V (~100 м), Landsat (30 м), Sentinel-2 (10 м). Они позволяют вычислить вегетационные индексы (например, «индекс зелени» NDVI), выделить классы земельного покрова (Барталев и др., 2011, 2015), установить типы растительности (древесная/травянистая, вечнозеленая/листопадная) и оценить некоторые биофизические показатели лесных насаждений, например сомкнутость крон (Hansen et al., 2013). Однако многие важные параметры лесов оптические методы надежно не отражают. Так, проблематично отличить молодой лес от старого или выявить средние диаметр и высоту древостоев, поэтому оптические инструменты сами по себе недостаточны для надежной оценки фитомассы. Хотя известны успешные попытки распознать преобладающие древесные породы и оценить запас древесины различными косвенными методами, например по зимним снимкам, когда снег делает изобра-

жение деревьев более контрастным (Жарко, Барталев, 2014). Облачность является серьезным препятствием в использовании оптических данных.

Радарные инструменты чувствительны к запасам воды в тканях растений. Проникновение радарного сигнала в кроны зависит от длины волны. Чем больше длина волны, тем глубже под полог леса и в более крупные части растений он проникает. Для оценки запасов фитомассы использовали инструменты следующих диапазонов длин волн (и соответствующих частот): диапазон X, длина волны 2.5–3.75 см; диапазон C – 3.75–7.5 см; диапазон L – 15–30 см и радары ультравысоких частот – 30–100 см, из которых наиболее перспективен Р-диапазон (около 70 см). Облачность не мешает радарному сигналу, но он чувствителен к влажности почвы, что накладывает дополнительные ограничения.

Диапазон C, чувствительный к мелким частям кроны (хвоя, листья, тонкие ветви), представлен на спутниках Envisat ASAR (пространственное разрешение около 150 м) и Sentinel-1 (10 м). Сигнал довольно быстро насыщается при увеличении количества фитомассы (в ряде исследований пороговым значением указывался запас древостоя 60–80 м³/га), и лес со средними запасами фитомассы неотличим от леса с высокими запасами. Несмотря на эти недостатки, длинные временные серии изображений и агрегация данных до 1 км позволяют получить оценку запаса древостоев (Santoro et al., 2015) и фитомассы (Turner et al., 2014) лесов бореальной зоны с достаточно высокой точностью, хотя насыщение сигнала при запасах древостоев выше 250–300 м³/га приводит к относительно небольшим систематическим ошибкам.

Единственный радар в диапазоне L, который (частично) поставляет данные в свободный доступ, представлен на японском спутнике ALOS PALSAR (~15 м). Считается, что этот диапазон чувствителен к содержанию воды в кроне деревьев. Возможности этого инструмента в картографировании запаса насаждений показаны, например, в работе C. Hüttich et al. (2014). Все же в различных технологических подходах надежно определять фитомассу как C-, так и L-диапазоны могут только до 100 т/га. При более высоких значениях сказывается насыщение сигнала. В 2020 г. NASA планирует запуск радара L-диапазона NISAR с пространственным разрешением около 10 м, который будет работать в поляриметрическом режиме, давая стереоскопическую картину объекта из нескольких точек на-

блюдения. Данный инструмент должен обеспечить точность определения фитомассы $\pm 10\%$ при агрегировании до 100 м для лесов с запасами надземной фитомассы до 150 т/га. Также появится возможность определить высоту кроны.

В процессе принятия решения находится миссия Европейского и Аргентинского космических агентств SAOCOM-CS, также оборудованная L-диапазонным радаром и специально предназначенная для томографии лесов, сочетающая в себе поляри- и интерферометрические возможности с пространственным разрешением около 5 м. Этот инструмент позволит оценить трехмерную структуру леса, что достигается использованием второго спутника-компаньона (SC) с принимающей антенной, обеспечивающего стереоскопическую картину.

Первый радар спутникового базирования в диапазоне P, чувствительный к запасам воды в древесине и способный оценить фитомассу лесов с большими запасами (более 50 т/га), готовится к запуску Европейским космическим агентством в 2021 г. (проект BIOMASS). Пространственное разрешение при определении фитомассы составляет 200 м с предполагаемой ошибкой в 20 %. Изменения лесного покрова будут фиксироваться с разрешением 50 м. Будет измеряться и высота кроны. Его основная цель – дождевые тропические леса с высокими запасами фитомассы, постоянно скрытые облаками. Северная Америка и Европа исключены из наблюдения из-за возможного конфликта с инструментами военного назначения. Сибирь остается в планах наблюдений.

Лазерные методы (LiDAR) позволяют оценить вертикальную структуру леса с высокой точностью даже при сомкнутом пологе. Один из таких спутников (ICESat) завершил свою работу в 2010 г., запуск следующего (GEDI) NASA планирует в декабре 2018 г. Однако территория охвата GEDI ограничена умеренной и тропической зонами (между 50° с. ш. и 50° ю. ш.). Облачность является препятствием для лазера. Орбитальные лазеры также не способны обеспечить сплошного покрытия, а только выборку из эллипсов ~25 м в диаметре, 15 млн которых предполагается получить в течение одного года эксплуатации аппарата. Полученные данные предполагается агрегировать до 500 м, планируемая точность оценки запасов фитомассы при этом составит 80 %.

Существует значительное количество информационно-инструментальных порталов, позволяющих работать с дистанционными изо-

бражениями и разнообразными картами, построенными на их основе. Среди них можно назвать Geo-Wiki (<http://geo-wiki.org>); WebEOM – Earth Observation Monitor (<http://www.earth-observation-monitor.net/map.php>); TerraNorte RLC (<http://terranorte.iki.rssi.ru/>); COBЗОНД (<http://sovzond.ru/>).

Мы сознательно опустили рассмотрение целого ряда других возможностей ДЗЗ, которые либо недоступны большинству заинтересованных лиц вследствие ограничений по распространению, либо дороги в настоящее время. Сюда можно отнести различные спутники, например DLR TANDEM, многие российские аппараты и др. Среди них также приборы самолетного базирования: гиперспектральные, стереоскопические и особенно лазерные (ALS), способные обеспечить связующее звено между наземными (точечными) и космическими наблюдениями. Беспилотные летательные аппараты (UAV) способны летать ниже облаков. Они в основном несут на борту оптические камеры и производят стереоскопическую съемку, которая дает возможность построить цифровую модель рельефа и определить высоту кроны (при наличии разрывов в кронах). Проводятся эксперименты с установкой лазерных инструментов на UAV, которые будут способны определять не только высоту, но и диаметр деревьев, что произведет революцию в лесоустройстве.

Дистанционные измерения нуждаются в калибровке и проверке результатов по наземным измерениям.

НАЗЕМНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИТОМАССЫ

Наземные методы представляют собой закладку пробных площадей (ПП) с измерением биометрических (таксационных) параметров древостоев. Наиболее трудоемким (и первичным по отношению к прочим) является метод с рубкой модельных деревьев и отбором образцов для последующей сушки и взвешивания (*destructive sampling*), описанный в ряде работ (например, Snowdon et al., 2002; Усольцев, 2007). Этот метод позволяет построить регрессионные модели зависимости фитомассы (общей и по отдельным фракциям) от параметров дерева (высоты и диаметра) или насаждения (возраста, полноты, бонитета). Подобные модели позволяют впоследствии оценить фитомассу без рубки модельных деревьев. Коллекции аллометрических уравнений, позволяющих оценить фитомассу отдель-

ных деревьев исходя из их диаметра и высоты, для основных древесных пород Евразии опубликованы В. А. Усольцевым и др. (2016), для Европы – Р. Муукконен & Р. Мäkipää (2006), для Северной Америки – J. C. Jenkins et al. (2004), для тропиков – J. Chave et al. (2014).

Уравнения для оценки фитомассы на уровне насаждения имеют то преимущество, что учитывают его параметры (в частности полноту) и могут быть применены как для отдельного насаждения, так и для их совокупности (например, для данных государственного лесного реестра). Примеры таких уравнений опубликованы В. А. Усольцевым (2002, 2007), А. З. Швиденко и др. (2004, 2008), Д. Г. Замолодчиковым и др. (2005), А. Shvidenko et al. (2007).

Точность и адекватность регрессионных уравнений зависят от сложности объекта исследования, района и условий произрастания, количества модельных деревьев и других факторов. Показано, что рубка 5–10 деревьев каждой породы на ПП обеспечивает точность оценки общей наземной древесной фитомассы с погрешностью в пределах 10 % (Усольцев, 1985).

Следует упомянуть наземные лазерные приборы (TLS), которые определяют с высокой точностью пространственную структуру леса и объем древесины. Они способны в значительной мере сократить количество назначаемых в рубку модельных деревьев и хорошо подходят для совершенствования аллометрических уравнений.

Уравнения фитомассы, полученные на ПП деструктивным методом или с использованием TLS, позволяют впоследствии восстановить структуру фитомассы насаждений по таксационным показателям и оценить их подземную часть.

Проект Forest Observation System (FOS) (<http://forest-observation-system.net/>) представляет собой международное сотрудничество, имеющее целью создать глобальную базу данных постоянных ПП, пригодных для калибровки и проверки данных ДЗЗ, моделирования экосистемных функций. Также FOS анализирует пробелы в имеющихся знаниях и имеет целью способствовать инвестициям в развитие сети постоянных ПП. FOS ставит задачу объединить к взаимной выгоде усилия ученых из двух разных областей знаний: ДЗЗ и экологии (в широком смысле, включая сюда всех проводящих измерения на ПП). В результате такого сотрудничества специалисты по ДЗЗ могут получить стандартизированные наземные данные высокого качества. FOS предлагает стандартизованную

процедуру обработки первичных (подеревных) данных, которая позволяет агрегировать данные и извлекать те немногие показатели, которые необходимы для ДЗЗ. Экологи получают доступ к глобальной информации о фитомассе лесов, имеющихся пропусках в знаниях. Объединение в международный консорциум повышает уровень совместных публикаций и шансы на получение исследовательских грантов.

Калибровка и проверка спутниковых данных требуют синхронизированных по времени измерений на земле и из космоса. Поэтому необходима координация усилий (и финансирования) к моменту ввода в эксплуатацию описанных выше систем мониторинга фитомассы космического базирования (2019–2021 гг.).

FOS был инициирован рядом специалистов, включая Jérôme Chave (CNRS, Франция), Oliver Phillips (University of Leeds, Великобритания), Stuart J. Davis (STRI, США), Simon Lewis (UCL, Великобритания), Dmitry Schepaschenko (IIASA, Австрия) и Klaus Scipal (ESA, Нидерланды), при финансовой поддержке Европейского космического агентства. На текущем (начальном) этапе FOS объединил усилия таких сетей, как Center for Tropical Forest Science Forest Global Earth Observatory (CTFS-ForestGEO), ForestPlots.net (включая RAINFOR, AfriTRON и T-FORCES) и IIASA сеть в Северной Евразии (включая Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Институт леса КНЦ СО РАН, Ботанический сад УрО РАН, Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины). FOS – открытая инициатива, которая будет расширяться за счет привлечения большего количества участников.

Минимальный набор параметров в базе данных включает: название института и ФИО ответственного лица, географические координаты, число деревьев, тип леса и состав насаждения, среднюю высоту, надземную фитомассу древостоя. Размер ПП должен быть как минимум 0.25 га, но предпочтительнее 1 га и более.

Данные лазерной съемки самолетного базирования (airborne LiDAR) являются важным звеном изучения пространственного размещения фитомассы и позволяют масштабировать данные ПП для калибровки и валидации спутниковых данных. FOS также аккумулирует доступные данные, полученные приборами самолетного базирования, например, на суперсайте Европейского космического агентства в Габоне.

База данных размещена в сети интернет (<http://forest-observation-system.net/>) в открытом доступе и содержит как метаданные (например, кто проводил исследования, где и какие параметры измерялись), так и сами данные, если авторы разрешили открытый доступ к ним (рис. 1).

Основное назначение базы данных FOS – обеспечить наземную информацию для калибровки и валидации будущей миссии Европейского космического агентства по оценке биомассы лесов планеты (ESA Earth Explorer BIOMASS mission). Осуществляется также координация с другими проектами (например, с проектом EKA GlobBiomass) и космическими программами (такими как NASA GEDI, NISAR; ESA SAOCOM-CS).

КАРТЫ ЛЕСНОЙ ФИТОМАССЫ

Коллекция глобальных и региональных карт лесной фитомассы собрана и регулярно обновляется на портале <http://biomass.geo-wiki.org>. Все карты получили стандартизованную легенду, содержат ссылки на авторов разработки (продукта) и на описание методов (рис. 2). Этот портал создан в IIASA для того, чтобы представить обзор имеющихся продуктов и помочь пользователям в выборе лучшего для определенного региона и конкретной задачи.

Есть возможность сравнить карты биомассы со снимками высокого разрешения, имеющимися в Google map и Bing map. Для территории России имеется несколько карт фитомассы с пространственным разрешением 1 км. Глобальная карта лесной фитомассы (Kindermann et al., 2008) построена на основе статистических данных ФАО, дистанционной карты чистой первичной продукции MODIS и карты хозяйственной деятельности. Карта фитомассы бореальной зоны (Thurner et al., 2014; Santoro et al., 2015) построена на временных сериях радарных данных С-диапазона с ENVISAT ASAR. Карта фитомассы растительности России (Schepaschenko et al., 2011) построена на данных государственного лесного реестра и набора дистанционных продуктов, включая оптические и радарные. Все эти карты доступны для просмотра на портале <http://biomass.geo-wiki.org> со ссылкой на источники.

Помимо Geo-Wiki IIASA разрабатывает бесплатные мобильные приложения и интернет-решения, которые помогают объединить усилия многих ученых и широкие слои заинтересованной общественности для решения задач интеграции разнообразных данных о земельном

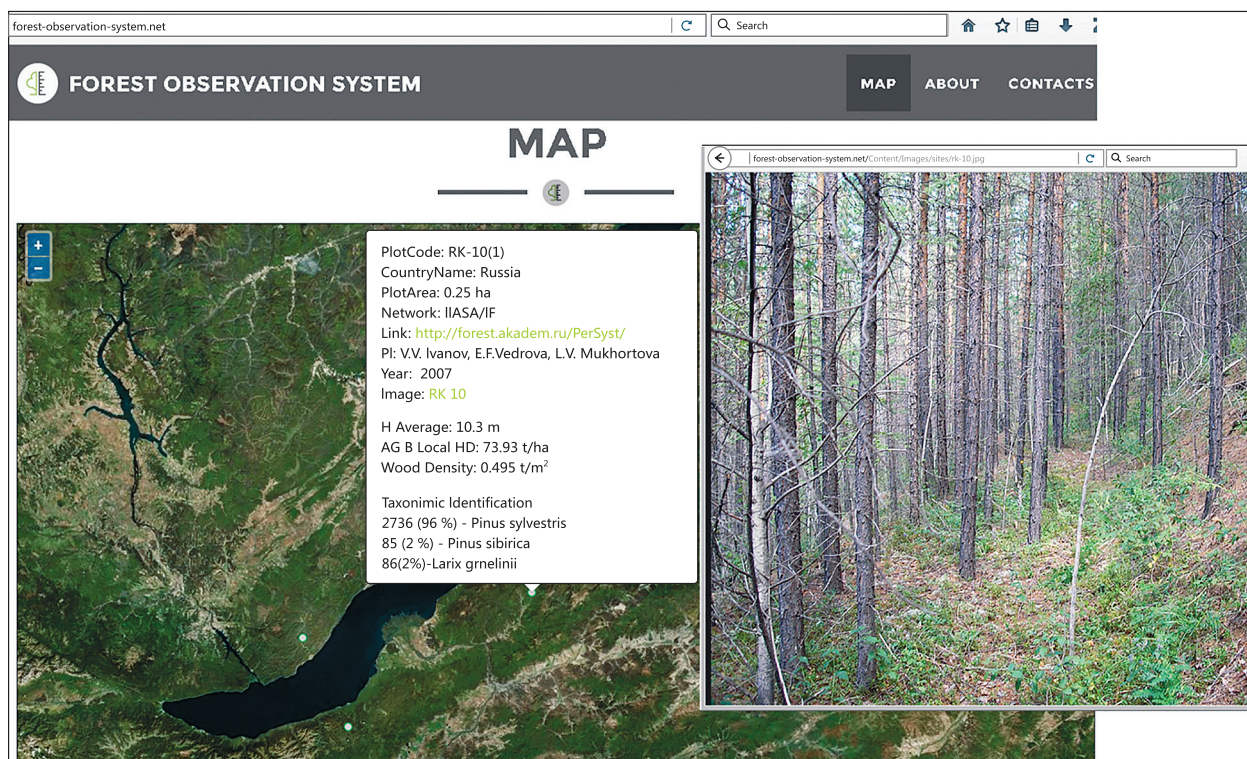


Рис. 1. Внешний вид портала <http://forest-observation-system.net/>, демонстрирующий информацию о постоянных ПП.

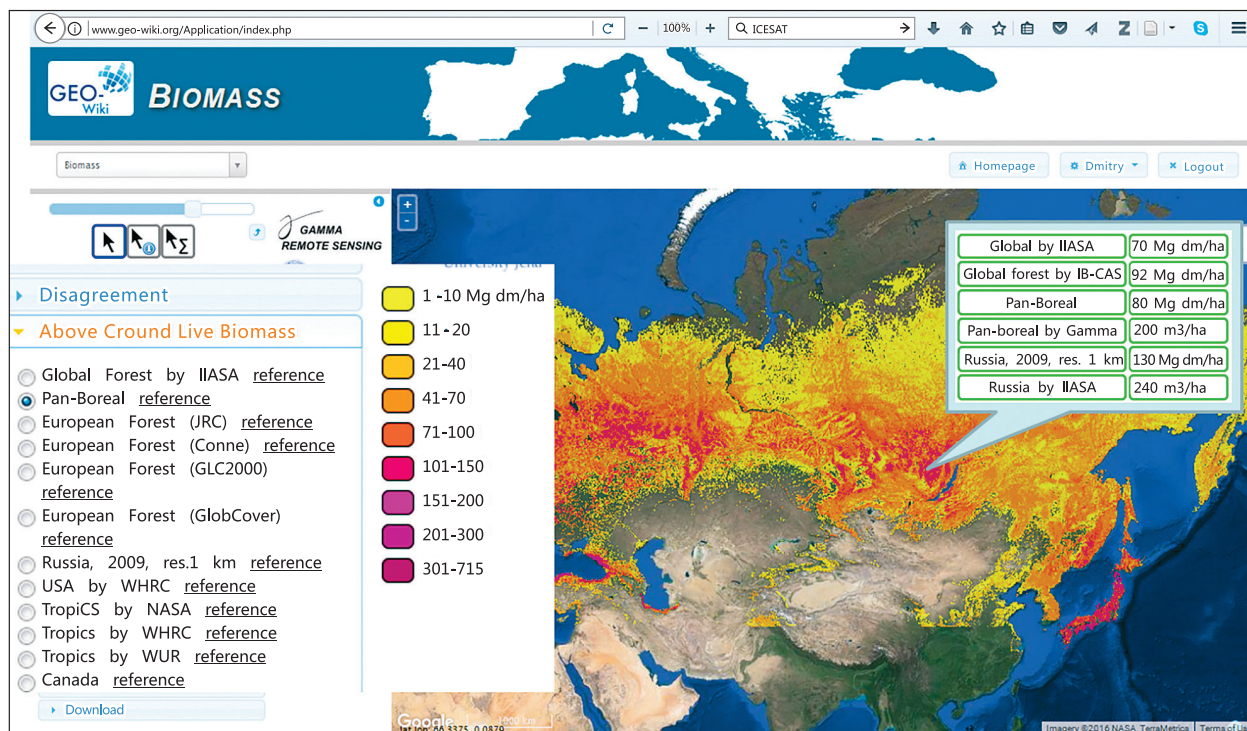


Рис. 2. Внешний вид портала Biomass.Geo-Wiki.org с визуализацией карты фитомассы и значения с пяти имеющихся карт в произвольно взятой точке.

покрове, землепользовании и особенно о лесах (See et al., 2015). Одним из результатов такой работы являются интегральные карты лесного покрова (Щепащенко и др., 2015; Schepaschenko et al., 2015a, b; Онтиков и др., 2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся и особенно ожидаемые в ближайшем будущем средства дистанционного зондирования обладают беспрецедентными возможностями для улучшения наших знаний о лесах и таких важнейших показателях продуктивности и жизнеспособности лесных экосистем, как фитомасса и ее динамика. Современная наука утверждает, что глобальное потепление свыше 2 °С будет создавать значительные риски для лесов планеты, различные в разных районах. Последние результаты показывают, что при любых сценариях этот рубеж (+2 °С) будет превзойден к середине столетия (Watson, 2016), т. е. роль оперативной информации о состоянии лесов и изменениях в них в настоящее время весьма велика.

Каждый из перечисленных методов привносит свой элемент мозаики в изучение лесной фитомассы. Только системный подход к проблеме, комбинация различных методов и объединение усилий специалистов из разных областей знаний могут обеспечить надежную оценку динамики лесной фитомассы в пространстве и во времени.

Данная статья подготовлена частично при поддержке проекта ЕКА IFBN (4000114425/15/NL/FF/gp).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.

Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.

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. 2014. Т. 11. № 3. С. 159–170.

Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Коровин Г. Н. Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // Лесоведение. 2005. № 6. С. 73–81.

Онтиков П. В., Щепащенко Д. Г., Карминов В. Н., Дюрауер М., Мартыненко О. В. Динамика площадей древесных насаждений Московского региона за 2000–2013 годы // Вестн. Московск. гос. ун-та леса – Лесн. вестник. 2016. Т. 20. № 1. С. 184–188.

Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985. 192 с.

Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с.

Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии. Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Усольцев В. А., Часовских В. П., Норицина Ю. В., Норицин Д. В. Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 68–76.

Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России (таблицы и модели биопродуктивности) // Лесн. хоз-во. 2004. № 2. С. 40–44.

Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Федеральное агентство лесн. хоз-ва, 2008. 886 с.

Щепащенко Д. Г., Швиденко А. З., Лесив М. Ю., Онтиков П. В., Щепащенко М. В., Кракснер Ф. Площадь лесов России и ее динамика на основе синтеза продуктов дистанционного зондирования // Лесоведение. 2015. № 3. С. 163–171.

Bojinski S., Verstraete M., Peterson T. C., Richter C., Simmons A., Zemp M. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2014. V. 95. N. 9. P. 1431–1443.

Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W. B. C., Duque A., Eid T., Fearnside P. M., Goodman R. C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W. A.,

- Muller Landau H. C., Mencuccini M., Nelson B. W., Ngomanda A., Nogueira E. M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C. M., Saldarriaga J., Vieilleden G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees // *Global Change Biol.* 2014. V. 20. P. 3177–3190.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Komma-reddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. V. 342. P. 850–853.
- Hüttich C., Korets M., Bartalev S., Zharko V., Schepaschenko D., Shvidenko A., Schmillius C. Exploiting growing stock volume maps for large scale forest resource assessment: Cross-comparisons of ASAR- and PALSAR-based GSV estimates with forest inventory in Central Siberia // *Forests*. 2014. V. 5. N. 7. P. 1753–1776.
- Jenkins J. C., Chojnacky D. C., Heath L. S., Birdsey R. A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species // *USDA For. Serv. Northeastern Res. Stat. Gen. Tech. Rep. NE-319*. 2004. 45 p.
- Kindermann G. E., McCallum I., Fritz S., Obersteiner M. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics // *Silva Fenn.* 2008. V. 42. N. 3. P. 387–396.
- Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // *Silva Fenn.* 2006. V. 40. N. 4. P. 763–773.
- Müller A., Weigelt J., Götz A., Schmidt O., Alva I. L., Matuschke I., Ehling U., Beringer T. The role of biomass in the sustainable development goals: a reality check and governance implications. IASS Working Paper. Potsdam: Inst. Advanced Sustainability Stud., 2015. 36 p.
- Santoro M., Beaudoin A., Beer C., Cartus O., Fransson J. E. S., Hall R.J., Pathe C., Schmillius C., Schepaschenko D., Shvidenko A., Thurner M., Wegmüller U. Forest growing stock volume of the northern hemisphere: spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR // *Rem. Sens. Environ.* 2015. V. 168. P. 316–334.
- Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Obersteiner M. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *Land Use Sci.* 2011. V. 6. N. 4. P. 245–259.
- Schepaschenko D., Kraxner F., See L., Fuss S., McCallum I., Fritz S., Perger C., Shvidenko A., Kindermann G., Frank S., Tum M., Schmid E., Balkovič J., Guenther K. Global biomass information: from data generation to application // *Handbook of Clean Energy Systems* / J. Y. Chichester (Ed.). Wiley, 2015a. V. 1. P. 11–33.
- Schepaschenko D., See L., Lesiv M., McCallum I., Fritz S., Salk C., Perger C., Shvidenko A., Albrecht F., Kraxner F., Duerauer M., Obersteiner M. Development of a global hybrid forest mask through the synergy of remote sensing, crowdsourcing and FAO statistics // *Rem. Sens. Environ.* 2015b. V. 162. P. 208–220.
- See L., Fritz S., Perger C., Schill C., McCallum I., Schepaschenko D., Dürauer M., Sturn T., Karne M., Kraxner F., Obersteiner M. Harnessing the power of volunteers, the internet and Google Earth to collect and validate global spatial information using Geo-Wiki // *Technol. Forecasting and Soc. Change*. 2015. V. 98. P. 324–335.
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Bou-loui Yu. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // *Ecol. Model.* 2007. V. 204. P. 163–179.
- Snowdon P., Raison J., Keith H., Ritson P., Grierson P., Adams M., Montagu K., Bi H., Burrows W., Eamus D. Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system. Tech. Rep. 31. Canberra: Austral. Greenhouse Office, 2002. 76 p.
- Thurner M., Beer C., Santoro M., Carvalhais N., Wutzler T., Schepaschenko D., Shvidenko A., Kompter E., Ahrens B., Levick S. R., Schmillius C. Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests // *Global Ecol. Biogeogr.* 2014. V. 23. N. 3. P. 297–310.
- Watson J. Bring climate change back from the future // *Nature*. 2016. V. 534. P. 437.

FOREST BIOMASS OBSERVATION: CURRENT STATE AND PROSPECTIVE

D. G. Schepaschenko^{1,2}, A. Z. Shvidenko^{1,3}, C. Perger¹, C. Dresel¹, S. Fritz¹, P. I. Lakyda⁴,
L. V. Mukhortova³, V. A. Usoltsev⁵, K. S. Bobkova⁶, A. F. Osipov⁶, O. V. Martynenko²,
V. N. Karminov², P. V. Ontikov², M. V. Shchepashchenko⁷, F. Kraxner¹

¹ International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

Schlossplatz, 1, Laxenburg, 2361 Austria

² Mytischki Branch of N. E. Bauman Moscow State Technical University

Pervaya Institutskaya str., 1, Mytischki, Moscow Oblast, 141005 Russian Federation

³ Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

Solitary Unit V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

⁴ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041 Ukraine

⁵ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch

8 Marta str., 202, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

⁶ Institute of Biology, Komi Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Ural Branch

Kommunisticheskaya str., 28, Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation

⁷ Russian Institute of Continuous Education in Forestry

Institutskaya str., 17, Pushkino, Moscow Oblast, 141200 Russian Federation

E-mail: schepd@iiasa.ac.at, shvidenk@iiasa.ac.at, perger@iiasa.ac.at, dresel@iiasa.ac.at,
fritz@iiasa.ac.at, petro.lakyda@ukr.net, l.mukhortova@gmail.com, usoltsev50@mail.ru,
bobkova@ib.komisc.ru, osipov@ib.komisc.ru, martinen@mgul.ac.ru, karminov@mgul.ac.ru,
opv86@mail.ru, mariaschep@gmail.com, kraxner@iiasa.ac.at

With this article, we provide an overview of the methods, instruments and initiatives for forest biomass observation at global scale. We focus on the freely available information, provided by both remote and in-situ observations. The advantages and limitation of various space borne methods, including optical, radar (C, L and P band) and LiDAR, as well as respective instruments available on the orbit (MODIS, Proba-V, Landsat, Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS PALSAR, Envisat ASAR) or expecting (BIOMASS, GEDI, NISAR, SAOCOM-CS) are discussed. We emphasize the role of *in-situ* methods in the development of a biomass models, providing calibration and validation of remote sensing data. We focus on freely available forest biomass maps, databases and empirical models. We describe the functionality of Biomass.Geo-Wiki.org portal, which provides access to a collection of global and regional biomass maps in full resolution with unified legend and units overlaid with high-resolution imagery. The Forest-Observation-System.net is announced as an international cooperation to establish a global *in-situ* forest biomass database to support earth observation and to encourage investment in relevant field-based observations and science. Prospects of unmanned aerial vehicles in the forest inventory are briefly discussed. The work was partly supported by ESA IFBN project (contract 4000114425/15/NL/FF/gp).

Keywords: forest phytomass, remote sensing, Geo-Wiki, Forest-observation-System.net.

How to cite: Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Perger C., Dresel C., Fritz S., Lakyda P. I., Mukhortova L. V., Usoltsev V. A., Bobkova K. S., Osipov A. F., Martynenko O. V., Karminov V. N., Ontikov P. V., Shchepashchenko M. V., Kraxner F. Forest biomass observation: current state and prospective // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2017. N. 4: 3–11 (in Russian with English abstract)