

Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем

С.А. Барталев¹, Д.В. Ершов², Е.А. Лупян¹, В.А. Толпин¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

117997 Москва, Профсоюзная, 84/32

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

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

E-mail: tolpin@d902.iki.rssi.ru

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

117997 Москва, Профсоюзная, 84/32

E-mail: ebch@cepl.rssi.ru

Спутниковый сервис ВЕГА обеспечивает возможности решения широкого круга задач, включая оперативное выявление и анализ изменений в лесном покрове, экспресс оценку породной структуры и запаса стволовой древесины лесов. ВЕГА представляет собой эффективный инструмент, позволяющий в кратчайшие сроки и с минимальными затратами оценить состояние и ресурсный потенциал лесов любого интересующего региона на территории Российской Федерации. Круг потенциальных пользователей спутникового сервиса включает в себя лесохозяйственные и лесопромышленные организации, кредитные и страховые компании, органы управления лесами различных уровней, природоохранные и научно-исследовательские структуры. Спутниковый сервис ВЕГА создан на основе автоматизированных технологий сбора, обработки и распространения спутниковых данных разработанных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Ключевые слова: спутниковый сервис ВЕГА, многолетний архив данных, мониторинг наземных экосистем, оценка лесных ресурсов.

Введение

Леса России являются одним из важнейших источников природных ресурсов с огромным экономическим потенциалом и уникальными экологическими функциями. Эффективное управление лесными ресурсами и их рациональное использование возможно только при наличии достоверной и регулярно обновляемой информации о состоянии и динамике лесов. В настоящее время наряду с традиционной инвентаризацией лесов все большее применение находят методы их дистанционного мониторинга, основанные на использовании данных спутниковых наблюдений Земли, позволяющие получать оперативную и объективную информацию о лесных ресурсах. Особенно актуальным является использование методов дистанционного мониторинга лесов для огромной территории России, включающей труднодоступные регионы Сибири и Дальнего Востока.

Современные спутниковые системы обеспечивают непрерывный сбор данных о состоянии земной поверхности с различным временным и пространственным разрешением. Необходимость эффективного использования получаемых при этом сверхбольших массивов данных требует создания максимально автоматизированных технологий их сбора, хранения, первичной обработки и тематического анализа, распространения результатов конечным пользователям. Разработанные к настоящему времени такого рода технологии, а также наличие в открытом доступе источников оперативно обновляемых архивов спутниковых данных глобального охвата обеспечили необходимые предпосылки для создания и запуска в эксплуатацию спутникового сервиса ВЕГА (<http://vega.smislab.ru>).

Спутниковый сервис ВЕГА (Лупян и др., 2011) предназначен для оперативной информационной поддержки решения широкого круга научных и прикладных задач мониторинга растительного покрова планеты, в том числе, лесов и сельскохозяйственных земель. Доступные к настоящему времени и получающие непрерывное развитие в составе спутникового сервиса архивы спутниковых данных, информационные продукты и инструменты

их анализа дают уникальную возможность дистанционной экспресс оценки лесных ресурсов России.

К настоящему времени в ИКИ РАН собраны и непрерывно пополняются многолетние архивы спутниковых данных, основанные преимущественно на использовании открытых источников данных, в качестве основных из которых на настоящем этапе выступают системы Terra/Aqua-MODIS и Landsat-TM/ETM+.

Временные ряды ежедневно покрывающих всю территорию России данных спектро-радиометра MODIS имеют пространственное разрешение 250 м, 500 м и 1 км в различных спектральных каналах и охватывают период с 2000 года по настоящее время. Созданные автоматизированные технологии предварительной обработки данных MODIS позволяют очищать их от влияния облаков и строить непрерывные временные ряды спектральных вегетационных индексов, тесно коррелирующих с объемом и состоянием зеленой биомассы растительности. Использование указанных данных позволило разработать целый ряд методов мониторинга лесов, основанных на анализе сезонной и многолетней динамики временных рядов спектральных вегетационных индексов.

Данные MODIS также положены в основу технологий картографирования растительного покрова России (Барталев и др., 2011) и оценки повреждений лесов пожарами (Bartalev et al., 2007).

Совместная обработка данных государственного учета лесного фонда на уровне лесохозяйственных предприятий и карты растительного покрова России с использованием ГИС-анализа позволила сформировать пространственно распределенную базу данных запасов древесины основных групп лесобразующих пород (Сочилова и др., 2009).

Важным элементом системы является непрерывно пополняемый многолетний архив данных Landsat-TM/ETM+ с пространственным разрешением около 30 м на территорию России и сопредельных государств. Разработанная технология первичной обработки, хранения изображений и оперативного доступа к ним в интерфейсе спутникового сервиса ВЕГА дает принципиально новые возможности пространственно-временного анализа этих данных для выявления изменений в лесах, вызванных пожарами, болезнями, экстремальными погодными явлениями, вырубками и другими деструктивными факторами (Толпин и др., 2008).

Основные функциональные возможности сервиса ВЕГА

Сервис ВЕГА включает картографический интерфейс (рис. 1), разработанной на базе созданной в ИКИ РАН технологии GEOSMIS (Толпин и др., 2011) и снабженный как стандартными ГИС инструментами навигации по карте России, так и специализированными функциями анализа растительности.

В частности, для решения задач мониторинга лесов в составе спутникового сервиса обеспечивается возможность задания границ произвольных лесных участков на территории России для построения временных профилей вегетационного индекса, а также оценки площади и запасов насаждений по группам древесных пород.

Для удобства отображения информация группируется по видам информационных продуктов, включая: спутниковые данные высокого (Landsat-TM/ETM) и среднего (MODIS) пространственного разрешения, сельскохозяйственные земли, леса, природные пожары, метеорологическая и картографическая информация.

Инструменты анализа данных в составе сервиса ВЕГА обеспечивают следующие функциональные возможности:

- комплексный анализ спутниковых данных различного пространственного разрешения и результатов их обработки, картографических и атрибутивных данных;
- оценка многолетней динамики спектрального вегетационного индекса для определения причин и времени изменений в лесах;

- поддержка и обновление базы данных контуров и характеристик лесных участков для обеспечения возможности мониторинг их состояния;
- геоинформационный анализ спутниковых данных во времени и пространстве;
- оценка статистики и формирование аналитических форм, характеризующих состояние лесов на заданных участках.

Базовые информационные продукты в составе сервиса ВЕГА

Интерфейс сервиса ВЕГА обеспечивает оперативный доступ к информационным продуктам, получаемым по данным спутниковых систем Landsat-TM/ETM+ (30м) и Modis (250м). Вышеуказанные данные автоматически обновляются по мере их появления в каталогах архивов геологической службы США (<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>).

Ежедневно поступающие продукты MODIS (MOD09), автоматически обрабатываются с целью устранения зашумленных измерений, связанных с облачным покровом и другими искажающими факторами, что приводит к образованию пропусков в наблюдениях. С целью компенсации этого эффекта на основе данных ежедневных измерений формируются недельные композитные изображения. Полученные композитные изображения используются для вычисления значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI с последующей интерполяцией и сглаживанием временных рядов данных для устранения выбросов случайного характера. Получаемые временные ряды NDVI в каждой точке земной поверхности интегрируются в единую информационную базу спутниковых продуктов и используются для построения графиков сезонного и многолетнего поведения вегетационного индекса.

Данные Landsat-TM/ETM+ проходят радиометрическую и геометрическую коррекцию и используются для получения цветосинтезированных изображений на уровне отдельных сцен. Для цветового синтеза изображения используется комбинация спектральных каналов красного, ближнего и среднего ИК диапазонов длин волн. В качестве дополнительного информационного продукта создается изображение нормализованного разностного вегетационного индекса.

В перспективе предполагается дополнить сервис ВЕГА блоком фильтрации облачности по данным Landsat-TM/ETM+ и динамического построения безоблачных композитных изображений высокого пространственного разрешения на всю территорию России.

В качестве основных тематических продуктов для осуществления функций мониторинга лесов в среде сервиса ВЕГА используются карты растительного покрова России и запасов лесов, а также карты выявленных по данным MODIS очагов природных пожаров и поврежденных огнем насаждений.

В состав информационного обеспечения спутникового сервиса включена карта растительного покрова России, созданная на основе данных спутникового спектрорадиометра MODIS. Будучи основанной на спутниковых данных 2010 года с пространственным разрешением 250 м, созданная карта в настоящее время не имеет аналогов и является наиболее современным, объективным и детальным источником информации о пространственном распределении лесного покрова по территории России. Легенда карты включает в себя 22 тематических класса, 18 из которых характеризуют различные типы растительности, выделенные с учетом их жизненных форм, типов вегетативных органов и фенологической динамики. В состав легенды карты включены классы следующих лесных формаций:

- *темнохвойные вечнозеленые насаждения*, в пологе которых не менее 80% площади крон составляют теневыносливые виды хвойных деревьев, включая ель, пихту и сибирскую сосну (кедр);
- *светлохвойные вечнозеленые насаждения*, в пологе которых не менее 80% площади крон составляют деревья сосны обыкновенной;

- *лиственные насаждения*, в пологе которых не менее 80% площади занимают кроны березы и осины, а также широколиственных пород, включая дуб, липу, ясень, клен, вяз и некоторые другие виды;
- *смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород*, в которых кроны хвойных деревьев занимают от 60 до 80%, а лиственных от 20% до 40% площади полога;
- *смешанные насаждения*, в которых площади крон хвойных и лиственных пород деревьев представлены примерно в равных пропорциях (40–60 %) в пологе;
- *смешанные насаждения с преобладанием лиственных пород*, в которых кроны лиственных пород деревьев занимают от 60 до 80%, а хвойных от 20% до 40% площади полога;
- *хвойные листопадные (лиственничные) насаждения*, в пологе насаждений которых кроны деревьев лиственницы занимают более 80% площади;
- *редины хвойные листопадные (лиственничные)*, представляющие собой участки, занятые отдельно стоящими деревьями или разреженными насаждениями лиственницы с проективным покрытием крон менее 20%.

Региональные карты растительного покрова создаются на основе предварительно очищенных от влияния облаков разносезонных спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+. Методы картографирования лесов используют алгоритмы классификации с обучением, с формированием опорной выборки использованием карты растительного покрова России и выборочных материалах лесоустройства.

Информационными источниками для создания карты запасов стволовой древесины лесов на территорию России являются спутниковая карта растительного покрова и данные государственного учета лесного фонда на уровне лесохозяйственных предприятий (лесхозов). Для каждого лесного массива внутри лесхоза рассчитываются относительные ($\text{м}^3/\text{га}$) запасы с учетом его принадлежности к различным классам лесов. Ошибка определения запасов на основе полученной карты в значительной мере зависит от точности данных государственного учета лесного фонда и может существенно варьировать по территории России в зависимости от давности и разряда проведенных лесоустроительных работ.

В перспективе предполагается создание характеризующих запасы лесов информационных продуктов по данным радиолокационных и оптических спутниковых систем с использованием выборочных наземных измерений на основе регрессионных зависимостей между запасами наземной биомассы и дистанционно измеряемыми характеристиками. Для оптических систем используются спектрально-отражательные яркости отдельных каналов или их комбинаций (Fazakas et al., 1999, Franco-Lopez et al., 2001, Fournier et al., 2003). Полученные оценки биомассы преобразуются запасы стволовой древесины посредством аллометрических уравнений. Наиболее точное восстановление указанных взаимосвязей возможно для однородных лиственных пород или лиственничных лесов при использовании спутниковых изображений зимнего периода.

Оценка запасов лесов на основе данных радарных систем предполагает использование когерентных изображений, полученных при различной поляризации (Schmullius et al., 2001).

Использование спутникового сервиса ВЕГА для мониторинга лесов и оценки лесных ресурсов

Использование имеющихся в составе сервиса ВЕГА спутниковых данных, информационных продуктов и инструментов их анализа позволяет эффективно решать целый ряд задач мониторинга лесов.

Так, например, анализ поведения индекса NDVI в течение вегетационного сезона в сравнении с многолетними данными позволяет выявлять изменения в лесах и определять дату деструктивного воздействия с оценкой площади изменений на основе изображений высокого

пространственного разрешения. Приведенный на рис. 1 пример иллюстрирует вышеописанную возможность на примере выявления изменений в лесах Вологодской области в результате деструктивного воздействия ветровала. Анализ динамики кривой вегетационного индекса позволяет с точностью до недели определить дату вывала древостоя в результате ураганного ветра.

Сервис ВЕГА позволяет также выявлять изменения растительности на вырубках и гарях с целью оценки хода лесовозобновления, включая контроль проведения соответствующих лесовосстановительных мероприятий. Проведение ряда лесовосстановительных мероприятий (подготовка почвы, рубки ухода, осветление молодняков) сопровождается изменениями динамики спектрального вегетационного индекса и может являться одним из информативных индикаторов.

Сервис ВЕГА позволяет проводить экспресс оценку запасов стволовой древесины лесных пород произвольно заданного участка леса. Эта возможность обеспечивает решение таких задач как экспресс-оценка ресурсного потенциала лесных участков, отведенных под рубку, оценка объемов вырубки или ущерба от пожаров в объемах погибшей древесины.

Так, совместное использование изображений Landsat-TM/ETM+ и карт лесов позволяет оконтурить заданный участок и получить данные о распределении запасов стволовой древесины по группам лесных пород (рис. 2).

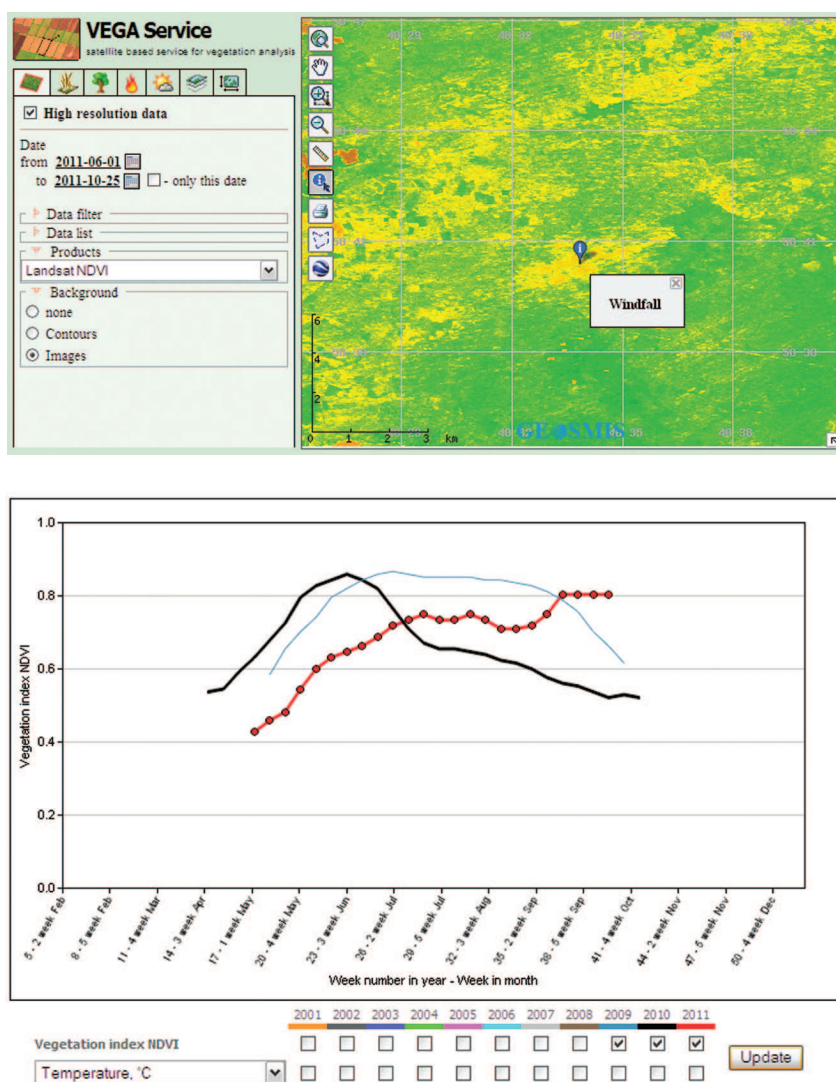


Рис. 1 Пример определения даты гибели лесов под воздействием ветровала на основе анализа динамики кривой NDVI

Заключение

Современное развитие спутниковых систем дистанционного зондирования Земли позволяет осуществлять непрерывный мониторинг состояния и динамики лесных ресурсов больших территорий. Получаемый при этом огромный объем спутниковых данных требует создания максимально автоматизированных технологий их сбора, хранения, первичной обработки и тематического анализа, распространения результатов конечным пользователям. Разработанный на основе автоматизированных технологий обработки спутниковых данных спутниковый сервис ВЕГА (<http://vega.smislab.ru>) открывает принципиально новые возможности дистанционного мониторинга лесных ресурсов России с перспективой расширения зоны географического охвата на другие страны и регионы планеты.

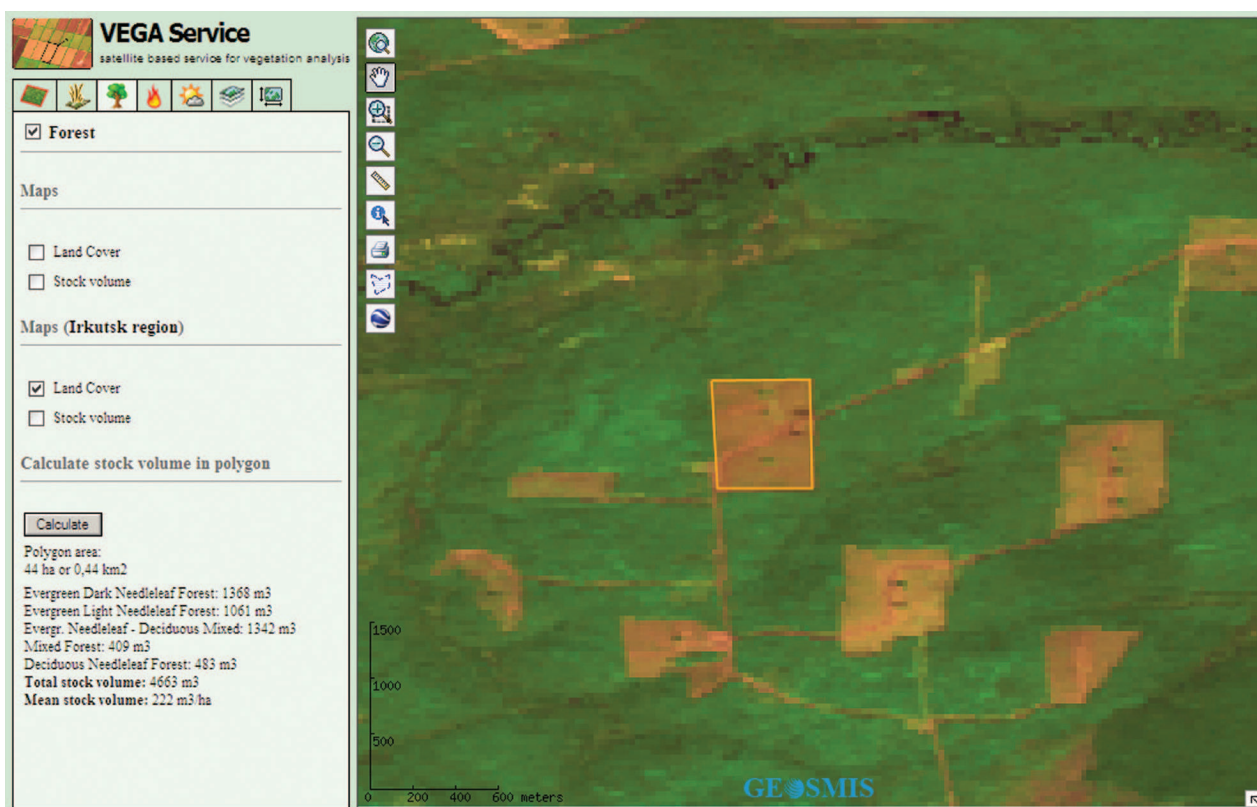


Рис. 2. Пример применения инструмента определения запасов, вырубленной древесины с использованием сервиса ВЕГА. Слева приводятся расчеты площади и запасов основных типов лесов. (Calculation: Polygon area: 44 ha (0,44 km²); Stock volume: Evergreen Dark Needleleaf Forest: 1368 m³; Evergreen Light Needleleaf Forest: 1061 m³; Evergreen Needleleaf - Deciduous Mixed Forest: 1342 m³; Mixed Forest: 409 m³; Deciduous Needleleaf Forest: 483 m³; Total stock volume: 4663 m³; Mean stock volume: 222 m³/ha)

Сервис основан на преимущественном использовании открытых источников спутниковых данных, в качестве основных из которых на настоящем этапе выступают системы Terra/Aqua-MODIS и Landsat-TM/ETM+. Дальнейшее развитие сервиса предусматривает обеспечение опциональных возможностей полностью интегрированного в его среду on-line доступа к широкому спектру спутниковых данных, в том числе получаемых системами радиолокационного зондирования и оптическими системами сверхвысокого пространственного разрешения.

Спутниковый сервис ВЕГА обеспечивает возможности решения широкого круга задач, включая оперативное выявление и анализ изменений в лесном покрове, экспресс оценку

породной структуры и запаса стволовой древесины лесов. ВЕГА представляет собой эффективный инструмент, позволяющий в кратчайшие сроки и с минимальными затратами оценить состояние и ресурсный потенциал лесов любого интересующего региона на территории Российской Федерации. Круг потенциальных пользователей спутникового сервиса включает в себя лесохозяйственные и лесопромышленные организации, кредитные и страховые компании, органы управления лесами различных уровней, природоохранные и научно-исследовательские структуры.

Система автоматизированного формирования и ведения архивов данных использующаяся в сервисе Вега создана при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 2011-1.4-514-045-087).

Литература

1. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. №1. С. 190–198.
2. *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.
3. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. and Uvarov I.A.* Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation // Int. J. Remote Sens. 2007. V. 28, №6, P. 1397–1404
4. *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. Выпуск 6. Том II. С. 441–449.
5. *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, 2008. Вып. 5. Том II. С. 577–585.
6. *Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. № 3. С. 93–108.
7. *Fazakas Z., Nilsson M., Olsson H., 1999.* Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. Agric. For. Meteorol. 98–99, 417–425.
8. *Fournier R.A., J.E. Luther L., Guindon M.C., Lambert D., Piercey R.J. Hall, Wulder M.A.* 2003. Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec. Canadian Journal of Forest Research. 33(10): 1846–1863.
9. *Franco-Lopez H., Ek A.R., Bauer M.E., 2001.* Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-Nearest Neighbors method. Remote Sens. Environ. 77 (3), 251–274.
10. *Schmullius C., Baker H., Baltzer H. et al., SIBERIA--SAR Imaging for Boreal Ecology and Radar Interferometry Applications, C. Schmullius et al., Eds. Jena, Germany: Friedrich-Schiller Univ., 2001.* <http://www.siberia1.uni-jena.de/>

Possibilities of Satellite Service VEGA Using for Different Tasks of Land Ecosystems Monitoring

S.A. Bartalev¹, D.V. Ershov², E.A. Loupian¹, V.A. Tolpin¹

¹ *Space Research Institute, Russian Academy of Science*

117997 Moscow, Profsoyuznaya Street 84/32

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

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

E-mail: tolpin@d902.iki.rssi.ru

² *Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Science,*

117997 Moscow, Profsoyuznaya Street 84/32

E-mail: ebch@cepl.rssi.ru

Web-service VEGA makes it possible to perform a broad spectrum of tasks comprising prompt detection and analysis of forest cover change, estimation of three species composition and forests stock volume. VEGA is an effective instrument that allows assessment of forest condition and its resource potential in any region of the Russian Federation territory in the shortest possible time and with minimal cost. Among the potential users of the web-service there are forestry, pulp industry, loan and insurance companies, forest management bodies of various levels, environment protection organisations and research institutions. The satellite service VEGA is created on the basis of the automated technologies of collecting, image processing and distribution of the satellite data developed at Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (SRI RAS).

Key words: satellite service VEGA, long-term data archive, land ecosystem monitoring, forest resource assessment