Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес

И. В. Балашов, А. В. Кашницкий, С. А. Барталев, С. С. Барталев, М. А. Бурцев, И. И. Ворушилов, В. А. Егоров, В. О. Жарко, Д. А. Кобец, А. М. Константинова, Е. А. Лупян, И. А. Сайгин, К. С. Сенько, Ф. В. Стыценко, И. Г. Сычугов, С. А. Хвостиков, Т. С. Ховратович

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

Статья посвящена информационной системе ВЕГА-Лес, созданной в Институте космических исследований Российской академии наук для решения задач комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России с использованием спутниковых данных. Информационная система ВЕГА-Лес предоставляет широкому кругу удалённых пользователей оперативный доступ к непрерывно обновляемому многолетнему архиву данных дистанционного зондирования Земли, получаемым на их основе тематическим информационным продуктам, а также инструментам автоматизированной обработки, анализа и синтеза различной информации в целях мониторинга и изучения лесных ресурсов и охотничьих угодий. В настоящей работе сделан обзор основных текущих возможностей системы и направлений её развития. Рассмотрены имеющиеся в её составе спутниковые данные и полученные на их основе тематические карты различных характеристик лесов. Также приведён краткий обзор основных доступных пользователям системы инструментов анализа и обработки данных и представлены примеры получения с их помощью различной информации об изменениях лесного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, информационные системы, мониторинг лесов, изменения лесного покрова, инструменты анализа данных, ВЕГА-Лес

Одобрена к печати: 20.08.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88

Введение

Быстрое развитие в последние десятилетия спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и приобретение большинством из них измерительных возможностей (получение радиометрически калиброванных и геометрически точных данных) позволило создать принципиально новые методы и подходы к картографированию и оценке состояния растительного покрова, в том числе лесов (см. например, работы (Барталев, Лупян, 2013; Барталев и др., 2015а, 2016; Hansen et al., 2000, 2013)). Основными особенностями этих методов стали:

- переход на использование не только данных одномоментной съёмки, но и временных рядов наблюдений, что позволило применять для анализа лесного покрова фенологические особенности сезонной динамики различных его типов;
- разработка подходов, обеспечивающих автоматическую адаптацию алгоритмов классификации к особенностям развития растительного покрова в различных регионах, что позволило создать системы максимально автоматизированного картографирования лесов на больших территориях и обеспечило возможность ежегодного проведения такого картографирования;
- высокий уровень автоматизации методов и алгоритмов работы с данными, что обеспечило среди прочего возможность получения объективной (человеко-независимой) информации о состоянии лесов.

Одновременно со значительным ростом количества действующих спутниковых систем наблюдения Земли в последние годы также существенно повысилось их качество и производительность. Нельзя не отметить, что доступ к данным значительного числа спутниковых систем стал свободным и бесплатным. Одновременно с этим появились новые технологии,

обеспечивающие возможность организации эффективной работы с большими объёмами спутниковых данных ДЗЗ (Барталев, Лупян, 2013). В настоящее время накоплены значительные долговременные (с начала XX в.) архивы спутниковых данных и получены на их основе различные характеристики лесного покрова по всей территории России (Барталев и др., 2015а, 2016).

Текущая ситуация позволяет организовать и вести постоянный комплексный дистанционный мониторинг лесного покрова на больших территориях. Возможности ведения такого мониторинга на региональном уровне уже были продемонстрированы, в частности, при создании и опытной эксплуатации комплексной системы мониторинга лесных ресурсов Приморского края (ВЕГА-Приморье, http://primorsky.geosmis.ru/) (Лупян и др., 2016). Таким образом, стало возможно начать интеграцию имеющихся подходов и методов получения и постоянного обновления информации о лесном покрове на основе технологий дистанционного мониторинга в единую информационную систему (ИС). Такая система позволит осуществлять распределённую работу с данными и в конечном итоге вести дистанционный мониторинг лесов России. В 2019 г. на основе инфраструктуры центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) (Лупян и др., 2015а) и входящей в его состав уникальной научной установки ВЕГА-Science (http://sci-vega.ru/), обеспечивающей возможность распределённой работы и анализа данных, в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) был создан действующий прототип такой информационной системы — ИС ВЕГА-Лес (http://forest.geosmis.ru/). В настоящей работе представлены основные текущие возможности этой системы и направления её развития.

Основные текущие задачи ИС ВЕГА-Лес

Информационная система ВЕГА-Лес обеспечивает возможность оперативного доступа к непрерывно обновляемому многолетнему архиву данных ДЗЗ и получаемым на их основе тематическим информационным продуктам, а также инструментам автоматизированной обработки, анализа и синтеза различной информации для решения задач комплексного мониторинга лесов России, включая:

- получение ежегодно актуализируемой информации о качественных и количественных характеристиках лесов (в том числе о площади, запасе древесины, преобладающей породе, полноте и некоторых других характеристиках);
- информации о лесных пожарах и связанных с ними повреждениях лесов (в том числе данные о динамике развития пожаров, пройденной огнём площади, степени повреждения лесов и величине постпожарного отпада);
- информации о площади и степени повреждений лесов под воздействием биотических, метеорологических и других природных факторов (насекомых-вредителей, различных болезней, засух и др.);
- информации об изменениях лесного покрова, связанных с хозяйственной деятельностью, в первую очередь заготовкой древесины (в том числе о площади, запасе и породе вырубленной древесины);
- ежегодной информации о бюджете углерода в лесах (в том числе о динамике основных пулов, объёмов эмиссии и поглощения углерода).

Доступные спутниковые данные и результаты их обработки

Основой для работы в ИС ВЕГА-Лес являются постоянно пополняемые архивы данных ДЗЗ из ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян др., 2015а, 2019). Основная информация архивов — это данные, получаемые со спутников серий Landsat, Sentinel-1/2/3, Terra, Aqua, а также Suomi-NPP, NOAA 20, Proba-V. В то же время в система содержит данные и других спутниковых систем, которые могут использоваться для решения различных задач, связанных с мониторингом лесного покрова. Текущий состав архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП

«ИКИ-Мониторинг» и ИС ВЕГА-Лес, можно найти по веб-ссылке http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6 . На начало лета 2020 г. пользователям было доступно свыше 3,8 Пбайт информации более чем 40 различных спутниковых систем наблюдения Земли. В *табл. 1* приведены основные виды спутниковых данных ДЗЗ, используемые в настоящий момент в системе для оценки и мониторинга состояния лесного покрова.

Таблица 1. Основные виды спутниковых данных ДЗЗ в ИС ВЕГА-Лес

Вид, диапазон	Пространственное разрешение	Прибор (спутник)	Частота наблюдения
Оптика, 0,4–0,9 мкм	1 км	MODIS (Terra/Aqua), AVHRR (NOAA), VIIRS (Suomi NPP, NOAA 20)	От 15 до 25 раз в сутки
	100–300 м	Terra/Aqua (MODIS), VIIRS (Suomi NPP, NOAA 20)	От 5 до 8 раз в сутки
	10–60 м	TM, ETM+, OLI (Landsat), MSI (Sentinel-2A/B), МСС (серия спутников «Канопус-В»), КМСС («Метеор-М»)	От 1 раза в 2 сут до 1 раза в сутки
	Лучше 10 м	ПСС (серия спутников «Канопус-В»), ORBVIEW-3 (архивный)	Несколько раз в год по отдельным участкам
Ближний инфракрасный, 1,4–3,9 мкм	1 км	MODIS (Terra, Aqua), VIIRS (Suomi NPP, NOAA 20), AVHRR (NOAA)	От 15 до 25 раз в сутки
	200–800 м	VIIRS (Suomi NPP, NOAA 20)	От 5 до 8 раз в сутки
	10–30 м	TIRS (Landsat), MSI (Sentinel-2A/B)	От 1 раза в 5 сут до 1 раза в 3 сут
Инфракрасный, 11–12 мкм	1 км	Terra/Aqua (MODIS), VIIRS (Suomi NPP, NOAA 20)	От 15 до 25 раз в сутки
	60 м	TIRS (Landsat)	1 раз в 14 дней
Радиолокаторы	20×40 м	C_SAR (Sentinel-1A/B)	1 раз в 5 дней
Гиперспектрометры	30 м	Hyperion (EO-1) (архивный)	Несколько раз в год

Отметим, что в системе доступны долговременные архивы данных спутниковых наблюдений. По некоторым регионам их глубина превышает 35 лет. Это позволяет не только изучать процессы, происходящие в лесах в настоящий момент, но и анализировать динамику лесного покрова за достаточно продолжительный период времени. Необходимо подчеркнуть, что все архивы данных находятся в доступе в режиме онлайн и для работы с ними не требуется осуществлять специальный заказ. Также следует отметить, что в системе представлены данные с уровнем обработки не ниже L1B (по классификации, приведённой в работе (Лупян, Саворский, 2012)).

В то же время большую роль в системе играют продукты более высоких уровней обработки, в том числе привязанные к определённому времени, очищенные от шумов и влияния облачности композитные изображения. Такие продукты являются основой для создания временных рядов данных, необходимых для решения различных задач картографирования и анализа состояния лесного покрова, а также выявления происходящих в нём изменений. В ИС ВЕГА-Лес в настоящее время доступны композитные изображения, формируемые на основе спутниковых данных различного пространственного разрешения (от 10 до 250 м) с разным временным шагом (день, 4 дня, неделя, месяц, сезон и др.). На *рис. 1* (см. с. 76) приведён пример одного из таких продуктов, доступных в картографическом интерфейсе системы. Характеристики основных из этих продуктов, которые могут использоваться для изучения

лесов, приведены в *табл. 2*. Формирование таких композитных изображений полностью автоматизировано и реализовано на основе методов и технологий, разработанных в ИКИ РАН (Барталев, Лупян, 2013; Кобец и др., 2015б).

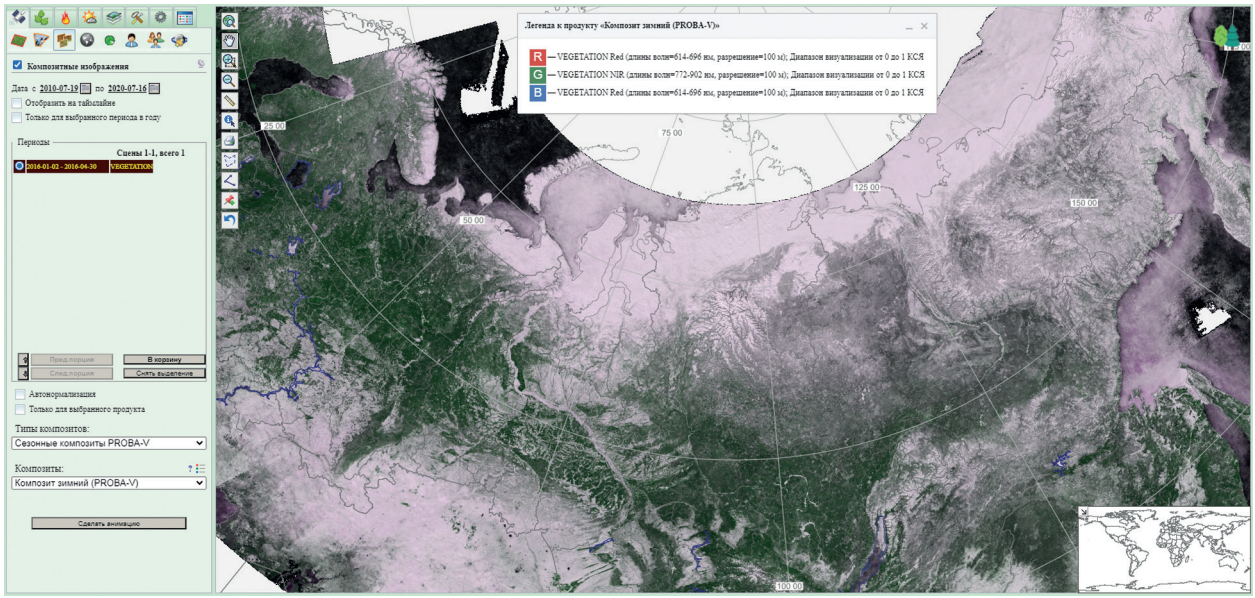

Рис. 1. Пример картографического интерфейса ИС ВЕГА-Лес с отображением доступного в системе свободного от влияния облаков композитного изображения за зимний сезон 2016 г. по данным спутниковой системы Proba-V. Данный композит может использоваться для построения маски леса и оценки запаса древесины

Таблица 2. Основные виды безоблачных композитных изображений в ИС ВЕГА-Лес для оценки и мониторинга лесов

Система ДЗЗ	Измеряемая характеристика земного покрова	Продолжительность периода интеграции свободных от шумов данных	Частота построения композитных изображений
MODIS-Terra/ Aqua	КСЯ (Red), КСЯ (NIR)	сутки	ежесуточно
	КСЯ (Red), КСЯ (NIR)	неделя	еженедельно
	КСЯ (Red), КСЯ (NIR), КСЯ (SWIR)	15 апреля – 15 июня 15 июня – 15 августа 15 августа – 15 октября	ежегодно
	КСЯ (Red), КСЯ (NIR)	1 января – 30 апреля	ежегодно
	NDVI, PVI	сутки	ежесуточно
	NDVI, PVI	неделя	еженедельно
	LAI	неделя	еженедельно
PROBA-V	КСЯ (Red), КСЯ (NIR), КСЯ (SWIR)	15 апреля – 15 июня 15 июня – 15 августа 15 августа – 15 октября	ежегодно
	КСЯ (Red), КСЯ (NIR)	1 января – 30 апреля	ежегодно
Landsat	КСЯ (Red), КСЯ (NIR), КСЯ (SWIR)	1 мая – 30 сентября	ежегодно
	КСЯ (Red), КСЯ (NIR)	1 ноября – 31 марта	ежегодно

Примечание: КСЯ (Red), КСЯ (NIR), КСЯ (SWIR) — коэффициенты спектральной яркости, измеренные в красном, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах спектра соответственно; NDVI — *англ.* Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс; PVI — *англ.* Perpendicular Vegetation Index, перпендикулярный вегетационный индекс; LAI — *англ.* Leaf Area Index, индекс площади листовой поверхности.

В ИС ВЕГА-Лес доступно значительное число регулярно обновляемых картографических продуктов с различными характеристиками состояния лесов. Характеристики основных из этих продуктов приведены в *табл. 3*. Особо следует отметить, что данные продукты не являются статическими, а регулярно обновляются и дополняются. Для этого в ИКИ РАН была создана технология автоматической обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земли, на основе которой реализованы процедуры потоковой обработки различной спутниковой информации (Кобец и др., 2015б; Лупян и др., 2015б).

Таблица 3. Основные представленные в ИС ВЕГА-Лес информационные продукты о состоянии лесного покрова

Описание продукта	Используемые данные, пространственное разрешение (м)	Частота обновления (1 раз в указанный период)	Временной охват	Использующиеся алгоритмы	Ссылки на работы
Типы земного покрова	MODIS, 250 Proba-V, 100	год	2001 г. – наст. вр., 2016 г.	Алгоритм ИКИ РАН	(Барталев и др., 2011; Егоров и др., 2018)
Преобладающие древесные породы	MODIS, 250	год	2001 г. – наст. вр.	Алгоритм ИКИ РАН	(Жарко, Барталев, 2014)
Запасы стволовой древесины	MODIS, 250	год	2001 г. – наст. вр.	Алгоритм ИКИ РАН	(Барталев и др., 2016; Жарко и др., 2018)
Степень повреждения лесов пожарами (категории состояния)	MODIS, 250	год	2006 г. – наст. вр.	Алгоритм ИКИ РАН	(Барталев и др., 2015б; Стыценко и др., 2013)
Пройденная огнём площадь в лесах	MODIS, 250	неделя	2006 г. – наст. вр.	Алгоритм ИКИ РАН	(Барталев и др., 2012)
Проективное покрытие лесов	MODIS, 250	год	2001 г. – наст. вр.	Алгоритм ИКИ РАН	(Ховратович, Барталев, 2019)
Наблюдение пожаров по данным регистрации активного горения (БД Fire MC6)	MODIS, 1000	ежедневно	2001 г. – наст. вр.	Детектирование — MOD14 в версии MC6 по данным FIRMS LANCE. Формирование пожаров (объединение горячих точек) — алгоритм ИКИ РАН	(Лупян и др., 2013; Флитман и др., 2011; Giglio et al., 2016)
Наблюдение пожаров по данным регистрации активного горения (БД Fire MV)	MODIS, 1000 VIIRS, 375	ежедневно	2012 г. – наст. вр.	Данные по термическим аномалиям — архивы MODIS и VIIRS FIRMS центра LANCE. Формирование пожаров (объединение горячих точек) — алгоритм ИКИ РАН	
Категории среды обитания охотничьих животных	MODIS, 250	год	2017 г.	Алгоритм ИКИ РАН	–

Отметим, что сведения о качественных и количественных характеристиках среды обитания животного мира являются ключевыми для планирования и ведения охотничьего хозяйства.

Эти данные позволяют определить ёмкость среды обитания видов животных, наметить способы поддержания их численности в течение продолжительного времени. Наиболее полную и актуальную информацию о состоянии среды обитания охотничьих животных дают картографические материалы, получаемые на основе данных ДЗЗ. Полученная по данным MODIS и входящая в состав информационного обеспечения ИС ВЕГА-Лес карта классов среды обитания охотничьих животных разработана с учётом отраслевых требований к тематическому содержанию такого рода карт, регламентированных Приказом Минприроды России от 31 августа 2010 г. № 335. В частности, карта подразделяет леса лиственных пород на группы мягколиственных и твердолиственных, выделяет в отдельные классы молодые насаждения и пойменную растительность как категории земель, представляющие особое значение для использования в интересах охотничьего хозяйства.

Возможности анализа

Одновременно с доступом к постоянно пополняющимся архивам спутниковых данных ДЗЗ и различной информации о состоянии лесного покрова, полученной на их основе, пользователи ИС ВЕГА-Лес получают достаточно широкий набор возможностей их анализа. В системе имеется значительное число инструментов, позволяющих проводить обработку информации аналогично специализированным настольным комплексам, обеспечивающим работу с данными ДЗЗ. При этом в отличие от сложных и обычно дорогостоящих настольных приложений пользователям ИС ВЕГА-Лес достаточно иметь лишь веб-браузер, а вся обработка данных осуществляется с использованием удалённых вычислительных ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Отметим, что в системе имеются как инструменты, позволяющие вести многоцелевой анализ и обработку спутниковых данных, так и специализированные инструменты обработки данных ДЗЗ, ориентированные на решение конкретных задач, связанных с изучением и мониторингом лесного покрова. Ниже мы представим описание некоторых основных инструментов, реализованных в настоящий момент в ИС ВЕГА-Лес.

Инструменты анализа и обработки спутниковых данных общего назначения

Анализ и обработка различных пространственных данных осуществляется в системе с помощью картографического веб-интерфейса, созданного на основе технологий, разработанных в ИКИ РАН (Лупян и др., 2015б). Стандартные его возможности, в частности, позволяют:

- проводить выбор данных, просматривать, сравнивать и формировать для последующего анализа наборы спутниковых данных из удалённых распределённых архивов;
- анализировать изменение типа территории в любой точке России. Такая информация даётся на основе имеющихся в системе карт типов земного покрова (см. *табл. 3*);
- проводить с помощью специализированных инструментов интерактивный анализ и обработку доступных спутниковых данных (в том числе разновременных) и результатов их обработки с использованием удалённых вычислительных ресурсов, предоставляемых системой. В качестве примера можно привести инструменты обучаемой и необучаемой классификации, сегментации, расчёта спектральных индексов, проведения попиксельных вычислений, цветовой коррекции и т. д.;
- анализировать с помощью графиков временные, пространственные и спектральные ряды данных;
- проводить измерение длины и площади различных объектов, а также расчёт их статистических характеристик по доступным данным;
- проводить совместный анализ спутниковых данных и метеорологической информации;
- готовить презентационные материалы на основе имеющихся данных для иллюстрации различных явлений и процессов.

С достаточно полным списком текущих возможностей анализа данных, которые имеются в системе ВЕГА-Лес, можно ознакомиться в работе (Лупян и др., 2019) и в руководстве пользователя системы ВЕГА-Science (http://sci-vega.ru/docs/manual/).

Инструменты мониторинга и анализа лесных пожаров и их последствий

Система обеспечивает широкий спектр возможностей работы с информацией о лесных пожарах для оперативного мониторинга в период их возникновения и действия, а также для оценки их последствий. Следует отметить, что задача дистанционного спутникового мониторинга лесных пожаров и их последствий имеет уже почти полувековую историю и ей посвящено огромное число работ. В России создана и действует одна из самых крупных в мире систем дистанционного мониторинга лесных пожаров — ИСДМ-Рослесхоз (Лупян и др., 2015в). Технологической основой системы ИСДМ-Рослесхоз, как и ИС ВЕГА-Лес, стали разработки ИКИ РАН. Поэтому многие реализованные решения, связанные с мониторингом и анализом лесных пожаров и их последствий, хорошо отработаны и имеют многолетнюю практику использования. В частности, в ИС ВЕГА-Лес имеются все основные возможности, необходимые для ведения оперативного мониторинга лесных пожаров, которые были реализованы в системе ИСДМ-Рослесхоз (Лупян и др., 2015в). При этом ИС ВЕГА-Лес в части, связанной с лесными пожарами, ориентирована не столько на работу с оперативной информацией о лесных пожарах, сколько на анализ долговременных рядов данных наблюдений пожаров и их последствий. Поэтому особое внимание уделяется созданию и ведению однородных рядов данных о лесных пожарах. В составе ИС ВЕГА-Лес сегодня ведутся различные базы данных (БД), сформированные на основе данных наблюдений активного горения, а также продуктов о состоянии лесного покрова, приведённых в *табл. 3*.

Для *оперативного мониторинга пожаров* в ИС ВЕГА-Лес используются возможности различных спутниковых систем, позволяющих детектировать горячие точки. При этом для формирования однородных долговременных БД наблюдений активной стадии горения используется только информация, получаемая на основе данных приборов MODIS и VIIRS. Эти приборы позволяют получать информацию по отдельным регионам на территории России от 4 до 6 раз в сутки. В системе реализована разработанная в ИКИ РАН методика, позволяющая проводить объединение отдельных горячих точек в пожары, отслеживать их динамику и оценивать площадь. Достаточно подробно данная методика описана в работах (Лупян и др., 2003, 2017; Стыценко и др., 2016). Для оценки постпожарных повреждений в системе используются данные как среднего разрешения (прибор MODIS), так и высокого (приборы TM, ETM+, OLI, MSI).

В системе реализовано значительное число инструментов, позволяющих проводить пространственный и временной анализ данных о пожарах. Принципы построения и возможности данных инструментов в целом аналогичны принципам построения и возможностям инструментов, которые используются для работы с информацией о лесных пожарах в ИСДМ-Рослесхоз и ИС ВЕГА-Приморье и были подробно описаны, в частности, в работах (Лупян и др., 2015в, 2016). Это позволило предоставить пользователям системы достаточно обширный и хорошо зарекомендовавший себя инструментарий для работы с однородными долговременными архивами информации о лесных пожарах на всей территории России.

Специальные инструменты анализа состояния лесного покрова и его изменений

В ИС ВЕГА-Лес внедрены различные специальные инструменты для проведения автоматизированной интерактивной обработки спутниковых данных с использованием вычислительных ресурсов, предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Такие инструменты ориентированы в основном на работу с данными высокого пространственного разрешения (например, с данными приборов TM, ETM+, OLI, MSI) и позволяют детально оценивать и изучать различные

характеристики лесного покрова на отдельных территориях. В настоящем разделе приведены основные возможности таких инструментов по анализу состояния лесного покрова и его изменений.

Инструмент оконтуривания лесных гарей основан на использовании возможностей необучаемой кластеризации, а в сложных случаях также и обучаемой классификации под контролем пользователя (Кашницкий и др., 2015б). Он позволяет в интерактивном режиме выделять области, повреждённые пожаром однотипно с точки зрения пользователя системы, на основе данных со спутников Landsat-4/5/7/8, Sentinel-2A/B и других, доступных в системе. Детектирование пожарных повреждений леса и получение контуров гарей сведено с помощью данного инструмента к проведению набора стандартных операций, что позволяет более чётко формализовать задачу и сделать её менее зависимой от квалификации оператора, а также ускорить процесс проведения картографирования. Таким образом, инструмент позволяет оптимизировать процедуры картографирования повреждений леса пожарами и перейти к массовой оценке последствий лесных пожаров на большой территории. Кроме того, в интерактивном режиме возможна многоэтапная обработка, в том числе маскирование водных объектов, предварительное выделение маски леса с использованием зимних данных или по существующим маскам леса, повышение точности выделения повреждённого участка с помощью перекластеризации, тонкой настройки метода классификации и т. д. Также с помощью данного инструмента возможно аналогичным образом выделение участков леса, повреждённых другими деструктивными факторами, не связанными с пожарами.

Инструмент локального уточнения карт растительного покрова, сформированных на основе спутниковых данных среднего пространственного разрешения (Кашницкий и др., 2015а). Такое уточнение происходит с помощью обучаемой классификации данных высокого пространственного разрешения (например, Landsat-4/5/7/8, Sentinel-2A/B). При этом за основу для построения обучающей выборки берутся различные карты, полученные по данным среднего пространственного разрешения (см. *табл. 3*). Например, пиксели на таких картах, окружённые определённым количеством пикселей того же класса, считаются наиболее доверенными и в их границах могут быть выбраны пиксели для обучающей выборки на данных высокого пространственного разрешения. Таким образом, на основе карт, имеющихся в системе, может автоматически формироваться обучающая выборка для проведения классификации данных высокого пространственного разрешения в конкретных районах.

Инструмент детектирования изменения лесного покрова ориентирован в первую очередь на выявление мест, в которых исчез лесной покров. Предполагает использование данных в оптическом диапазоне спутников Landsat и Sentinel-2, полный архив которых на территорию России доступен пользователям ИС ВЕГА-Лес. Подробно реализованный в инструменте метод детектирования изменений описан в работе (Ховратович и др., 2019). Метод основан на использовании временной серии снимков до и после момента изменений, которые отбираются в интерактивном режиме оператором системы. На паре выбранных снимков проводится сравнение получаемых оценок проективного покрытия древесного полога леса в пикселе. Такие оценки рассчитываются на основе линейной модели спектральных смесей с двумя чистыми компонентами, соответствующими лесу и нелесным территориям. В итоге формируется результат с процентом изменения лесного покрова в каждом пикселе за период времени, прошедший между отобранными двумя снимками. С помощью данного инструмента можно в автоматизированном режиме проводить анализ изменений (например, детектировать лесные рубки), произошедших на достаточно большой территории (Кашницкий и др., 2019).

Инструмент оценки проективного покрытия леса основан на том же принципе, что и предыдущий инструмент, и ориентирован на выявление и анализ зарастающих участков (сельскохозяйственных земель, рубок, участков лесовосстановления и т. д.). В настоящее время проводится опытная эксплуатация и тестирование данного инструмента. Первые эксперименты показали его работоспособность и применимость для детектирования появления леса на ранее безлесных участках.

Ещё раз обратим внимание, что для работы с описанными инструментами пользователям достаточно иметь только веб-браузер и подключение к сети интернет. Все операции обработки

проводятся на вычислительных ресурсах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в режиме реального времени и не требуют скачивания или заказа наборов спутниковой информации на компьютер пользователя или наличия у него собственных вычислительных мощностей.

BI-инструменты для анализа данных

Для анализа информационных продуктов высокого уровня обработки в ИС ВЕГА-Лес на базе BI-технологий (*англ.* Business Intelligence) реализованы специальные инструменты, обеспечивающие пространственный и временной анализ данных. Принципы и схемы построения таких инструментов для анализа результатов обработки спутниковых данных описаны в работе (Кобец и др., 2015а). Инструменты позволяют проводить оценку динамики характеристик лесного покрова на различных уровнях интеграции от отдельных лесничеств до субъектов Российской Федерации. Для анализа с помощью BI-аналитики доступны различные информационные продукты, представленные в ИС ВЕГА-Лес (см. *табл. 3*). Пространственный и временной анализ информации возможен в табличном, графическом и картографическом виде. Примеры таких инструментов приведены на *рис. 2–4* (см. с. 82). На *рис. 2* показан пример интерактивного графика изменения площади некоторых классов лесного покрова от времени на территории России в XX в. В верхней части расположены «фильтры» (классы растительности, группы растительности, федеральные округа, субъекты федерации, лесничества, годы). Выставлением и снятием соответствующих управляющих элементов пользователь может отфильтровать интересующую его информацию (например, выбрать субъект федерации), при этом график перестроится в режиме реального времени.

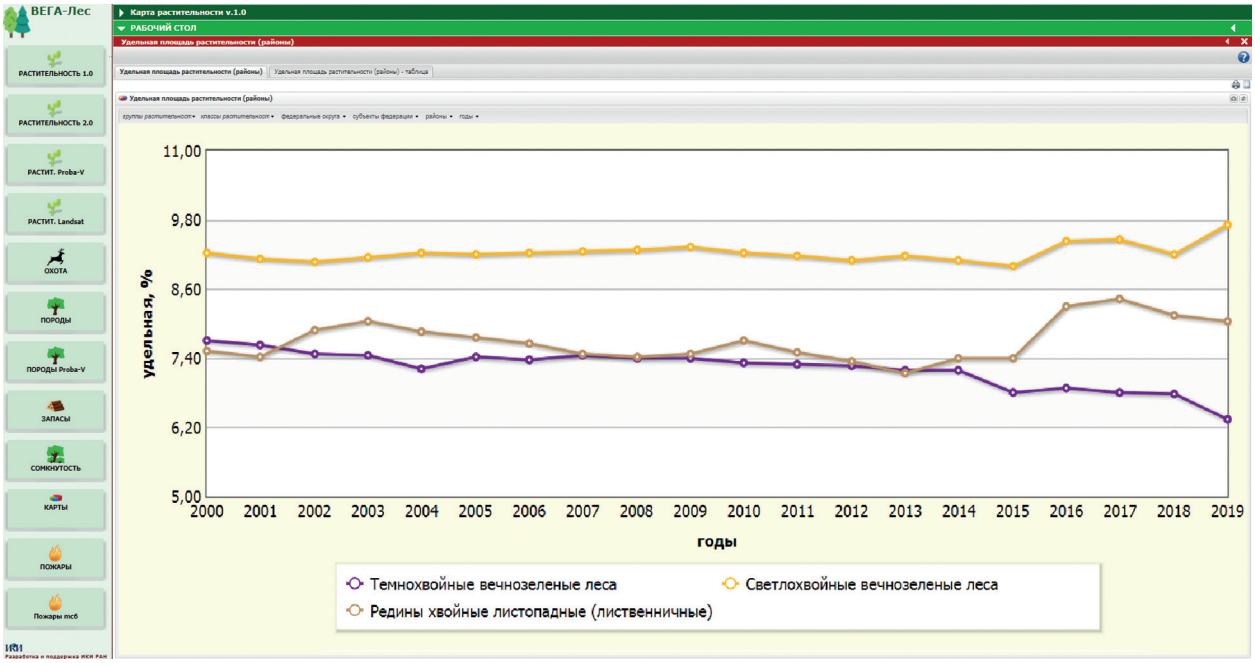

Рис. 2. График удельной площади некоторых классов лесной растительности по территории России с 2000 по 2019 г.

На *рис. 3* приведён пример части интерактивной таблицы площадей (абсолютной (га) и относительной (%)) различных классов и групп лесного покрова по всей территории России. В данном случае одно измерение отложено по горизонтали (годы), а остальные — иерархически по вертикали (группы и классы растительности развёрнуты, а субъекты федерации и лесничества свёрнуты). Пользователь может развернуть либо свернуть любое измерение в иерархии, отсортировать или отфильтровать только интересующие измерения.

		годы											
		2019		2018		2017		2016		2015		2014	
группы растительности	классы растительности	площадь, Га	удельная,%	площадь, Га	удельная,%	площадь, Га	удельная,%	площадь, Га	удельная,%	площадь, Га	удельная,%	площадь, Га	удельная,%
Итого		**919 493 914**	**57,2**	**911 009 113**	**57,7**	**921 155 445**	**62,0**	**918 585 843**	**64,8**	**913 204 289**	**59,1**	**915 255 603**	
Леса	Итого	820 032 365	58,3	811 581 352	57,8	826 233 700	58,1	827 208 515	58,4	805 468 170	56,9	809 920 583	
	Темнохвойные вечнозеленые леса	74 928 867	5,8	78 090 567	6,2	77 803 527	6,2	79 686 090	6,3	81 105 402	6,4	83 147 157	
	Светлохвойные вечнозеленые леса	111 531 466	8,7	105 526 734	8,3	108 874 352	8,5	108 496 456	8,5	103 220 755	8,1	104 387 395	
	Лиственные леса	148 838 980	10,6	142 155 372	10,1	143 623 315	10,1	143 201 913	10,1	137 477 938	9,7	137 762 196	
	Смешанные леса с преобладанием хвойных	45 992 725	3,5	46 514 430	3,6	49 786 496	3,8	49 097 326	3,8	50 037 115	4,1	49 064 406	
	Смешанные леса	41 511 704	3,6	42 774 385	3,5	43 866 267	3,5	43 025 972	3,5	43 049 390	3,5	42 588 637	
	Смешанные леса с преобладанием лиственных	47 240 091	3,7	48 985 527	4,1	51 307 049	4,1	49 405 130	3,9	49 903 067	4,1	48 914 562	
	Хвойные листопадные (лиственничные) леса	260 659 100	24,0	256 813 212	23,6	257 411 659	22,7	262 689 132	23,2	258 606 221	23,7	261 881 990	
	Редины хвойные листопадные (лиственничные)	89 329 432	7,9	90 721 125	8,1	93 561 035	8,3	91 606 496	8,2	82 068 282	7,3	82 174 241	
Прочая растительность	Итого	99 461 548	6,2	99 427 761	6,3	94 921 745	6,4	91 377 328	6,7	107 736 119	7,0	105 335 020	
	Свежие гари	16 761 973	1,0	16 219 701	1,0	11 540 331	0,8	7 483 165	0,5	23 472 460	1,5	19 975 532	
	Пахотные земли	82 699 575	13,6	83 208 060	12,5	83 381 414	12,6	83 894 163	12,6	84 263 659	12,3	85 359 488	

Рис. 3. Часть таблицы площади растительности различных классов и групп по территории России с 2000 по 2019 г.

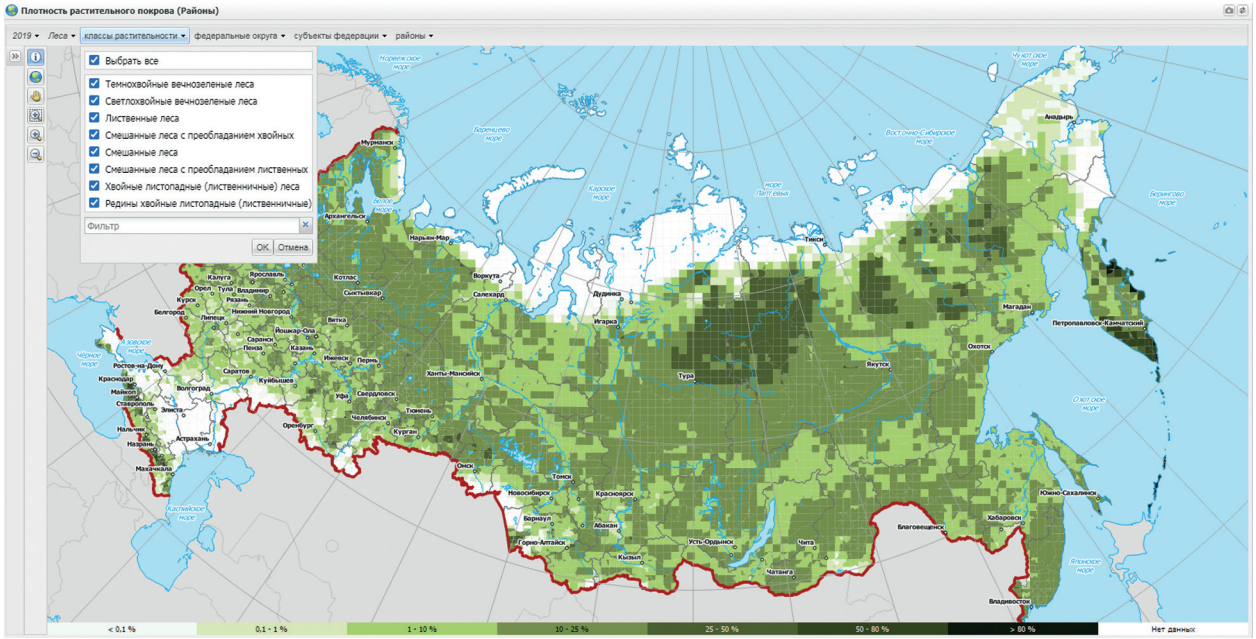

Рис. 4. Плотность группы растительного покрова «Лес» по всей территории России на 2019 г.

На *рис. 4* представлена интерактивная карта плотности растительного покрова на 2019 г. по всей территории России. Плотность вычисляется в границах каждого тайла (отношение площади соответствующих пикселов к общей площади тайла), легенда приведена в нижней части формы (от светло- до тёмно-зелёного). Пользователь также имеет возможность отфильтровать информацию (например, выбрать конкретный класс растительности). В любой интерактивной форме можно сохранить полученный результат, экспортировав его в один из форматов (word, excel, html, pdf для табличных данных либо png для карт и графиков).

Заключение

Таким образом, в ИС ВЕГА-Лес в настоящее время интегрированы различные спутниковые данные, информационные продукты и инструменты, позволяющие вести изучение и мониторинг лесных ресурсов и охотничьих угодий России. По мере развития системы предполагается формировать в её составе новые информационные продукты и расширять возможно-

сти инструментального анализа данных для решения задач комплексного мониторинга лесов. Особо отметим, что, поскольку созданная система обеспечивает возможность распределённой работы с данными, на её основе можно выполнять различные научные и прикладные проекты. Уже сейчас возможности системы используются в разных проектах в области исследования лесного покрова, которые выполняет ИКИ РАН и его партнёры. В частности, ведётся разработка специализированных блоков, ориентированных на решение таких задач, как:

- мониторинг бюджета углерода в лесах России (проект Российского научного фонда «Космическая научная обсерватория углерода лесов России»);
- прогнозирование процессов зарастания просек воздушных линий электропередачи лесной и другой древесно-кустарниковой растительностью на территории присутствия ПАО «Россети».

Также отметим, что в ИС ВЕГА-Лес уже сейчас реализованы возможности предоставления различных информационных сервисов. Они могут обеспечивать специализированные научные и прикладные информационные системы данными, необходимыми для мониторинга лесных ресурсов и охотничьих угодий России. Создание таких сервисов стало возможным благодаря разработкам в ИКИ РАН технологии автоматизированной обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земли, обеспечивающей получение информации о лесных ресурсах и охотничьих угодьях.

Создание системы осуществлялось при поддержке проекта Минобрнауки «Разработка технологий автоматизированной обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для создания и поддержки информационных сервисов мониторинга лесных ресурсов и охотничьих угодий России» (Соглашение ЭБ 075-15-2019-1374, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0294).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
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. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Флитман Е. В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
4. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.* (2015а) Состояние и перспективы развития спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
5. *Барталев С. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* (2015б) Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
6. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
7. *Егоров В. А.*, *Барталев С. А.*, *Колбудаев П. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.* Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286.
8. *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.

9. *Жарко В. О.*, *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.* Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
10. *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015а) Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
11. *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Барталев С. С.*, *Балашов И. В.*, *Ефремов В. Ю.*, *Стыценко Ф. В.* (2015б) Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16.
12. *Кашницкий А. В.*, *Ховратович Т. С.*, *Балашов И. В.* Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-103-111.
13. *Кобец Д. А.*, *Балашов И. В.*, *Данилов И. Д.*, *Лупян Е. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.* (2015а) Использование BI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
14. *Кобец Д. А.*, *Матвеев А. М.*, *Мазуров А. А.*, *Прошин А. А.* (2015б) Организация автоматизированной многопотоковой обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 145–155.
15. *Лупян Е. А.*, *Саворский В. П.* Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–97.
16. *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. Сер. «Экология» / Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2003. Вып. 68. 134 с.
17. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Флитман Е. В.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Стыценко Ф. В.*, *Ершов Д. В.*, *Антонов В. Н.*, *Крамарева Л. С.* Спутниковые наблюдения лесных пожаров в России в 21 веке // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: докл. 5-й Всероссийской конф., посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В. И. Сухих и Г. Н. Коровина. Москва, 22–24 апр. 2013. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 43–46.
18. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015а) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
19. *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Кобец Д. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* (2015б) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.
20. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Котельников Р. В.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Жарко В. О.*, *Ковганко К. А.*, *Колбудаев П. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Прошин А. А.*, *Мазуров А. А.*, *Уваров И. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Флитман Е. В.*, *Хвостиков С. А.*, *Шуляк П. П.* (2015в) Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 222–250.
21. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. С.*, *Бурцев М. А.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Жарко В. О.*, *Кашницкий А. В.*, *Колбудаев П. А.*, *Крамарева Л. С.*, *Мазуров А. А.*, *Оксюкевич А. Ю.*, *Плотников Д. Е.*, *Прошин А. А.*, *Сенько К. С.*, *Уваров И. А.*, *Хвостиков С. А.*, *Ховратович Т. С.* Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «ВЕГА-Приморье» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 11–28.

22. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Кобец Д. А.*, *Сенько К. С.*, *Стыценко Ф. В.*, *Сычугов И. Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
23. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
24. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
25. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Иванова А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Сычугов И. Г.* Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 289–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
26. *Флитман Е. В.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Галеев А. А.*, *Егоров В. А.*, *Котельников Р. В.*, *Лупян Е. А.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Прошин А. А.* Построение системы работы с данными прибора MODIS для решения задач мониторинга лесных пожаров и их последствий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 127–138.
27. *Ховратович Т. С.*, *Барталев С. А.* Возможности построения ежегодных оценок сомкнутости полога и полноты лесов по данным спутниковой системы MODIS // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 463. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
28. *Ховратович Т. С.*, *Барталев С. А.*, *Кашницкий А. В.* Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
29. *Giglio L.*, *Schroeder W.*, *Justice C.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054. URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/.
30. *Hansen M.*, *Defries R.*, *Townshend J.*, *Sohlberg R.* Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. Iss. 6–7. P. 1331–1364.
31. *Hansen M. C.*, *Potapov P.*, *Moore R.*, *Hancher M.*, *Turubanova S.*, *Tyukavina A.*, *Thau D.*, *Stehman S. V.*, *Goetz S. J.*, *Loveland T. R.*, *Kommareddy A.*, *Egorov A.*, *Chini L.*, *Justice C.*, *Townshend J. R. G.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853.

VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia

I. V. Balashov, A. V. Kashnitskii, S. A. Bartalev, S. S. Bartalev, M. A. Burtsev, I. I. Vorushilov, V. A. Egorov, V. O. Zharko, D. A. Kobets, A. M. Konstantinova, E. A. Loupian, I. A. Saigin, K. S. Senko, F. V. Stytsenko, I. G. Sychugov, S. A. Khvostikov, T. S. Khovratovich

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

The paper is devoted to the VEGA-Les information system created at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences to solve the problems of integrated monitoring of forests and hunting grounds in Russia using satellite data. The VEGA-Les information system provides a wide range

of remote users with online access to a continuously updated long-term archive of Earth remote sensing data, thematic information products obtained on their basis, as well as tools for automated processing, analysis and synthesis of various information in order to monitor and study forest resources and hunting land. This paper provides an overview of the main current capabilities of this system and the directions of its development. The satellite data available in the system and the thematic maps of various forest characteristics obtained on their basis are considered. An overview of the tools for analyzing and processing data available to users of the system is also made, and examples of obtaining with their help various information about changes in forest cover are given.

Keyword: remote sensing, information systems, forest monitoring, forest cover changes, data analysis tools, VEGA-Les

Accepted: 20.08.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88

References

1. Bartalev S. A., Loupian E. A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektroradiometra MODIS (Mapping of Russia vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated Burnt Area Assessment Based on Combine Use of Multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ Satellite Data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27.
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A. (2015a), Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova Rossii (Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221.
5. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A. (2015b), Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
6. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
7. Egorov V. A., Bartalev S. A., Kolbudaev P. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Karta rastitel'nogo pokrova Rossii, poluchennaya po dannym sputnikovoi sistemy Proba-V (Land cover map of Russia derived from Proba-V satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15. No. 2, pp. 282–286.
8. Zharko V. O., Bartalev S. A., Otsenka raspoznavaemosti drevesnykh porod lesa na osnove sputnikovykh dannykh o sezonnykh izmeneniyakh ikh spektral'no-otrazhatel'nykh kharakteristik (Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 159–170.
9. Zharko V. O., Bartalev S. A., Egorov V. A., Issledovanie vozmozhnostei otsenki zapasov drevesiny v lesakh Primorskogo kraya po dannym sputnikovoi sistemy Proba-V (Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data) *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157–168, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
10. Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015a), Sozdanie instrumentov dlya udalennoi obrabotki sputnikovykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
11. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Bartalev S. S., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Stytsenko F. V. (2015b), Optimizatsiya interaktivnykh protsedur kartografirovaniya garei v informatsionnykh

sistemakh distantsionnogo monitoringa prirodnykh pozharov (Optimization of burn mapping interactive procedures in remote fire monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 7–16.

12. Kashnitskii A. V., Khovratovich T. S., Balashov I. V., Organizatsiya obrabotki dannykh DZZ pri reshenii zadachi detektirovaniya izmenenii lesnogo pokrova na bol'shikh territoriyakh (The organization of remote sensing data processing to solving problems of deforestation detection in large areas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 103–111, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-103-111.
13. Kobets D. A., Balashov I. V., Danilov I. D., Loupian E. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A. (2015a), Ispol'zovanie VI-tekhnologii dlya sozdaniya instrumentov dlya analiza dannykh sputnikovogo monitoringa (The BI technologys use to create tools for data analysis of satellite remote sensing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 17–27.
14. Kobets D. A., Matveev A. M., Mazurov A. A., Proshin A. A. (2015b), Organizatsiya avtomatizirovannoi mnogopotokovoi obrabotki sputnikovoi informatsii v sistemakh distantsionnogo monitoringa (Organization of automated multithreaded processing of satellite information in remote monitoring systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 145–155.
15. Loupian E. A., Savorskii V. P., Bazovye produkty obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Basic products of Earth Remote Sensing Data Processing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 87–97.
16. Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Grishin A. M., Afonin S. V., Belov V. V., Gridnev Yu. V., Matvienko G. G., Solov'ev V. S., Antonov V. N., Tkachenko V. A., *Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v Rossii. Itogi. Problemy. Perspektivy: analiticheskii obzor*, *Ser. "Ecologicheskaya"* (Forest fires satellite monitoring in Russia. Results. Problems. Perspectives: analytical overview, Ser, Ecological), Institute of Atmospheric Optics, Novosibirsk, 2003, Issue 68, 134 p.
17. Loupian E. A., Bartalev S. A., Flitman E. V., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Stytsenko F. V., Ershov D. V., Antonov V. N., Kramareva L. S., Sputnikovye nablyudeniya lesnykh pozharov v Rossii v 21 veke (Satellite observations of forest fires in Russia in the 21st century), *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve* (Aerospace Method and GIS-Technologies in Forestry and Forest Management), Proc. 5th All-Russia Conf., Moscow, 22–24 Apr. 2013, Moscow, 2013, pp. 43–46.
18. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015a), Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving,processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
19. Loupian E. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Mateev A. M., Nazirov R. R., Proshin A. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Flitman E. V. (2015b), Sozdanie tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Development of technologies for creation of remote monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 53–75.
20. Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Kotel'nikov R. V., Balashov I. V., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kovganko K.A, Kolbudaev P. A., Krasheninnikova Yu. S., Proshin A. A., Mazurov A. A., Uvarov I. A., Stytsenko F. V., Sychugov G., Flitman E. V., Khvostikov S. A., Shulyak P. P. (2015c), Organizatsiya raboty so sputnikovymi dannymi v informatsionnoi sisteme distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva (ISDM-Rosleskhoz) (Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 222–250.
21. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Bartalev S. S., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kashnitskii A. V., Kolbudaev P. A., Kramareva L. S., Mazurov A. A., Oksyukevich A. Yu., Plotnikov D. E., Proshin A. A., Senko K. S., Uvarov I. A., Khvostikov S. A., Khovratovich T. S., Informatsionnaya sistema kompleksnogo distantsionnogo monitoringa lesov "Vega-Primor'e" (Vega-Primorie: complex remote forest monitoring information system), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 11–28, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-11-28.
22. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)),

Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.

23. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP "IKI-Monitoring") (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
24. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS (Post-Fire Forest Tree Mortality Assessment Method Using MODIS Satellite Data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266.
25. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Ivanova A. A., Loupian E. A., Sychugov I. G., Vozmozhnosti otsenki ploshchadei lesnykh pozharov v regionakh Rossii na osnove dannykh sputnikovogo detektirovaniya aktivnogo goreniya (Forest burnt area assessment possibilities in regions of Russia based on active fires detection by satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 189–298, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
26. Flitman E. V., Balashov I. V., Burtsev M. A., Galeev A. A., Egorov V. A., Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Mazurov A. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Postroenie sistemy raboty s dannymi pribora MODIS dlya resheniya zadach monitoringa lesnykh pozharov i ikh posledstvii (Organization of the MODIS Instrument Data Processing System for the Tasks of Monitoring Forest Fires and Their Aftereffects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 127–138.
27. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Vozmozhnosti postroeniya ezhegodnykh otsenok somknutosti pologa i polnoty lesov po dannym sputnikovoi sistemy MODIS (Possibilities of constructing annual estimates of closed canopy and forest density using data from the MODIS satellite system), *Materialy Semnadtsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 463, DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
28. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. V., Metod detektirovaniya izmenenii lesov na osnove podpiksel'noi otsenki proektivnogo pokrytiya drevesnogo pologa po raznovremennym sputnikovym izobrazheniyam (Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
29. Giglio L., Schroeder W., Justice C., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, pp. 31–41, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054, available at: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/.
30. Hansen M., Defries R., Townshend J., Sohlberg R., Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach, *Intern. J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, Issue 6–7, pp. 1331–1364.
31. Hansen M. C., Potapov P., Moore R., Hancher M., Turubanova S., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A. V., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, Issue 6160, pp. 850–853.