

ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НПО «ЛЕПТОН» И МФТИ В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

С.А. Зотов¹, Е.В. Дмитриев², С.Ю. Шибанов¹

¹ФГАОУ ВО Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

²ФГБУН Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8

zotov.sa@mipt.ru

Представлен метод оценки информационных возможностей спутниковых мультиспектральных и гиперспектральных систем дистанционного зондирования Земли. Предлагаемый подход включает в себя имитационно-статистическое моделирование заданной спутниковой системы и интеллектуальную обработку получаемых с помощью нее данных. В результате получены вероятностные оценки, определяющие возможность решения поставленной задачи за заданное время и с необходимым качеством. Рассматривается практическое применение данного метода для определения информационных возможностей гиперспектрального комплекса космического базирования НА-ГС, разработанного НПО «Лептон» и Московским физико-техническим институтом, при решении задач классификации почвенно-растительного покрова. В качестве тестового участка выбрана территория Валуйского лесничества (Белгородская обл.). Проведенные расчеты показали, что при использовании рассматриваемой аппаратуры, задачи распознавания основных типов объектов и классификации видового состава древостоев могут быть решены в среднем за 262 суток с точностью 91,3 %. В дальнейшем, в процессе введения НА-ГС в эксплуатацию на Международной космической станции, данная методика позволит определить целесообразность включения той или иной задачи мониторинга выбранных территорий в полетное задание.

Ключевые слова: информационные возможности систем ДЗЗ, гиперспектральные изображения, имитационно-статистическое моделирование, машинное обучение, оценка параметров лесных территорий

Ссылка для цитирования: Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Шибанов С.Ю. Оценка информационных возможностей гиперспектрального космического комплекса НПО «Лептон» и МФТИ в задаче мониторинга лесных территорий России // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 26–32.
DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-26-32

Спутниковый мониторинг лесных территорий позволяет оперативно получать информацию о параметрах и жизненном состоянии древостоев. Развитие соответствующих систем и методов обработки получаемой информации актуально для работы различных служб управления лесным хозяйством Российской Федерации (РФ). Под спутниковой системой дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обычно подразумевается прибор ДЗЗ и искусственный спутник Земли (ИСЗ), на котором прибор базируется и с которого осуществляется зондирование. В ряде случаев система может включать один или несколько спутников. По данным спутникового мониторинга можно обнаруживать очаги лесных пожаров, места незаконных вырубок, а также определять таксационные и продукционные параметры древостоев [1–5].

При использовании систем ДЗЗ необходимо иметь представление об оперативности получения и обработки информации. Процесс оценки информационных возможностей той или иной системы ДЗЗ подразумевает определение конкретных задач, решаемых с помощью данной системы, а также расчет характеристик оперативности получения решений при заданной точ-

ности [6]. Представление об информационных возможностях спутниковой системы ДЗЗ при решении той или иной задачи позволяет сделать вывод о целесообразности включения выбранной задачи в полетное задание. Зная информационные возможности, можно разработать рекомендации по улучшению заданной космической системы ДЗЗ в целях расширения информационных возможностей при решении заданного класса задач.

Гиперспектральный спутниковый мониторинг является перспективным направлением развития систем ДЗЗ, имеющим множество приложений в различных областях науки и народного хозяйства [7–10]. Высокое спектральное разрешение позволяет выявить и использовать особенности спектрального распределения отражательной способности исследуемых объектов, решать задачи классификации и определения характеристик исследуемых объектов на новом качественном уровне [11]. При гиперспектральном зондировании лесных территорий исследователи рассматривают задачи более тонкой классификации [12]. При использовании стандартного индексного представления мультиспектральных данных низкого и среднего пространственного разрешения можно

с уверенностью говорить лишь об определении лесистости и классификации на уровне хвойных и лиственных отделов. Привлечение более подробной спектральной информации позволяет более точно определять отдельные таксоны и возрастные классы [13]. Это, в свою очередь, с учетом результатов изучения географической изменчивости экотипов [14, 15], обеспечивает повышение точности оценки биомассы, плотности и прочности древесины.

К основным недостаткам гиперспектрального мониторинга относят большие объемы получаемой информации и высокую сложность методов ее обработки. Зачастую при повышении спектрального разрешения различия между данными соседних спектральных каналов остаются незначительными, так что информация, извлекаемая из этих каналов, может казаться избыточной [16]. Возникает задача оценки информационного содержания получаемых данных как математическая процедура анализа частот появления тех или иных градаций регистрируемых интенсивностей излучения. Следует также отметить, что преимущества гиперспектрального мониторинга оспариваются рядом авторов [17].

Цель работы

Настоящая статья посвящена разработке методики оценки информационных возможностей мультиспектральных и гиперспектральных систем дистанционного зондирования при решении задач автоматизированной классификации параметров лесных территорий. Практическое применение данной методики в первую очередь связано с определением перспектив использования гиперспектрального космического комплекса НА-ГС (научная аппаратура «Гиперспектрометр») совместного производства НПО «Лептон» и МФТИ, который в ближайшем будущем будет установлен на Международной космической станции (МКС).

Материалы и методы

Для оценки информационных возможностей НА-ГС при классификации породного состава древостоев на территории РФ и проведения численных экспериментов рассмотрена территория Валуйского лесничества (Белгородская обл.). Такой выбор обусловлен возможностью наблюдения с борта Международной космической станции (МКС) и наличием актуальных наземных лесотаксационных данных. Задача оценки информационных возможностей состоит из двух частей. На первом этапе проводится оценка времени сбора информации с помощью системы ДЗЗ, необходимой для классификации видового состава древостоев в выбранных районах (далее — оценка оперативности). На втором — определяется ре-

ференсная точность решения указанных задач тематической обработки на основе информации, которую потенциально можно собрать с помощью системы ДЗЗ. Поскольку на данный момент у нас нет реальных гиперспектральных изображений НА-ГС, то для проведения тестовых расчетов нами используются мультиспектральные изображения и, соответственно, рассматривается более простая задача тематической обработки, в которой древостои классифицируются на хвойные и лиственные отделы.

Оценка оперативности

Оперативность системы ДЗЗ количественно характеризуются показателем оперативности, который представляет собой математическое ожидание времени выполнения поставленной задачи [18, 19]. Для определения целесообразности включения задачи мониторинга в полетное задание космической системы ДЗЗ важно знать вероятность завершения сбора информации в заданный срок или с некоторой периодичностью. Оценка показателя оперативности будет производиться на основе имитационно-статистической модели (ИСМ) заданной системы ДЗЗ. Для этого ИСМ должна включать движение спутника, на котором базируется система ДЗЗ, и полосу захвата (ПЗ) камеры. В процессе моделирования системы ДЗЗ определяются траектории движения спутника (или спутников) и параметры съемки при допустимом угле Солнца над горизонтом и облачности. Для дальнейшего решения поставленных задач необходимо, чтобы область интереса (ОИ) — территория, для которой решается задача, была полностью, либо на заданную долю покрыта материалами съемки с заданной шириной ПЗ. Динамика многократного покрытия ОИ сохраняется. После завершения моделирования по сохраненной динамике вычисляется показатель оперативности системы.

Далее приведем информацию о входных данных и параметрах ИСМ при оценке оперативности НА-ГС:

- параметры орбиты спутника соответствуют параметрам орбиты МКС за 5 июня 2018 г., определяются согласно открытому источнику — www.celestrak.com;

- угол обзора гиперспектральных камер НА-ГС — 3,5°;

- ОИ — лесные массивы Валуйского лесничества, их границы известны и показаны на рис. 1;

- статистические данные по облачности за период с 2007 по 2017 гг. определяются из открытого источника — www.esrl.noaa.gov.

При проведении оценки оперативности рассматриваемым методом было принято, что

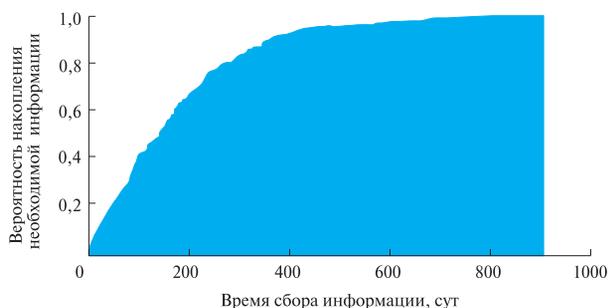


Рис. 1. Гистограмма вероятности накопления информации, необходимой при выполнении задачи классификации видового состава древостоев в зависимости от времени работы НА-ГС

Fig. 1. A histogram of information accumulation probability necessary when classifying the species composition of forest stands depending on the operating time of the NA-GS

информацию следует собирать при угле Солнца над горизонтом не меньше 30° , облачности не более 2 баллов (по десятибалльной шкале), кроме того, необходимо попадание в ПЗ не менее 90 % ОИ.

По результатам моделирования работы НА-ГС с борта МКС проведена оценка среднего ожидаемого времени выполнения задачи классификации, которое составило 172 сут. со среднеквадратичной ошибкой 153 сут. Функция распределения вероятности сбора информации, необходимой при выполнении поставленной задачи классификации, от времени работы НА-ГС представлена на рис. 1. По представленной функции распределения видно, что вероятность в 100 % достигается более, чем за 900 сут. наблюдений. Так как предложенная модель предусматривает наблюдения только в месяцы с мая по сентябрь включительно, то можно утверждать, что информация будет собрана приблизительно через 6 лет наблюдений заданным прибором с заданного космического аппарата (то есть с МКС).

Все это с учетом вероятности появления облачности над выбранным районом. Облачность оказывает значительное влияние на время накопления информации, так как при ее исключении из модели вероятность сбора необходимо информации достигает 100 % уже через 130 сут. наблюдения и можно утверждать, что задача будет выполнена за один сезон наблюдений (за время с мая по сентябрь). Так же следует отметить, что платформа, на которой базируется НА-ГС — МКС — идет по орбите, не предназначенной для ДЗЗ, поэтому в качестве одной из мер по улучшению оперативности при решении этой задачи можно предложить использование космического аппарата, выведенного на солнечно-синхронную орбиту. Также, эффективной мерой будет увеличение космической группировки спутников ДЗЗ с гиперспектральной аппаратурой.

Оценка точности

Для оценки точности выполнения задачи необходимы образцы данных. Не смотря на то, что в настоящее время аппаратура НА-ГС не введена в эксплуатацию, в свободном доступе имеются мультиспектральные изображения Валуйского лесничества. Мы использовали изображения, полученные со спутника Landsat 8 за 29 мая 2018 г. Бортовой мультиспектрометр OLI (Operational Land Imager) снимает поверхность Земли в девяти спектральных каналах, четыре из которых — Blue, Green, Red, NIR — находятся в спектральных диапазонах НА-ГС. Пространственное разрешение 30 м также сопоставимо с разрешением камер НА-ГС (две камеры НА-ГС снимают в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах в пространственном разрешении 45 и 70 м, соответственно) [20]. Поэтому в качестве образца спектрального изображения воспользуемся этим изображением.

Проведем тематическую обработку спектрального изображения для классификации видового состава древостоя и сравним с наземными данными. Тематическая обработка представляет собой попиксельную обучаемую классификацию на основе метода квадратичного дискриминантного анализа [21, 22]. Выбор данного метода для решения рассматриваемой задачи основан на результатах сравнительного анализа, представленного в работе [23]. На обрабатываемом снимке (рис. 2, а) выделяются пять основных классов объектов: лиственный лес, хвойный лес, трава, почва, вода. Если спектральные характеристики классифицируемого объекта значительно отличаются от характеристик представленных классов — тогда объект классифицируется как «Прочие».

В качестве наземных данных предоставлены контуры лесных выделов и преобладающие внутри этих выделов породы деревьев. Предварительно мы объединили все породы деревьев на группы лиственных и хвойных пород, поскольку пространственное разрешение OLI, следовательно, и НА-ГС не позволяет сделать классификацию на конкретные породы. Контуры получившихся выделов представлены на рис. 2, б, поверх тестовых изображений.

Доминантные классы, полученные при тематической обработке, сравнивали с наземными данными, результаты сравнения представлены в таблице в виде матрицы ошибок, точности (precision — доля правильно определенных объектов класса относительно всех объектов этого класса по результатам классификации) и полноты (recall — доля правильно определенных объектов класса относительно всех объектов этого класса по наземным данным), определенных для каждо-

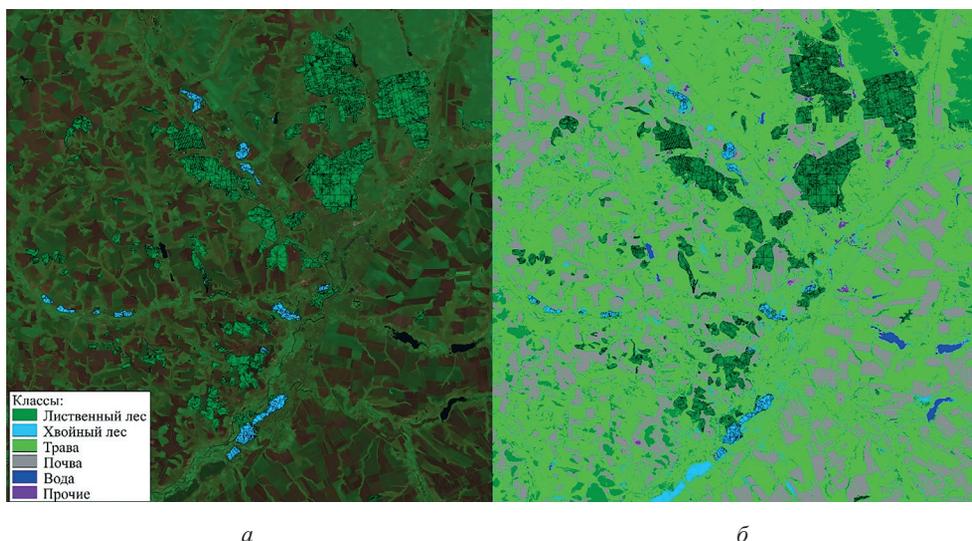


Рис. 2. Наземные данные и результаты обработки: *a* — псевдоцветное изображение тестовой территории, составленное из каналов Landsat 8 (красный — канал ‘RED’, зеленый — канал ‘NIR’, синий — канал ‘SWIR-1’), в черных контурах обозначены границы лесных выделов Валуйского лесничества, цвета их заливки означают доминантный класс внутри контура, согласно наземным данным; *б* — результаты тематической обработки; поверх карты классов, полученной в результате попиксельной классификации снимка Landsat 8, наложены черные контуры тех же выделов, цвета их заливки означают доминантный класс внутри контура

Fig. 2. Ground data and processing results: *a* — a pseudo-color image of the test area composed of Landsat 8 channels (red — ‘RED’ channel, green — ‘NIR’ channel, blue — ‘SWIR-1’ channel), borders of forest stands of the Valuyskoye forestry are marked in black contours, the colors of their fill indicate the dominant class inside the contour, according to ground data; *b* — results of thematic processing; on top of the class map obtained as a result of the pixel-by-pixel classification of the Landsat 8 image, black outlines of the same sections are superimposed, the colors of their fill indicate the dominant class inside the outline

Матрица ошибок и метрики качества Confusion matrix and quality metrics

Показатели		Предсказанные значения						Метрики качества	
		Лиственный лес	Хвойный лес	Трава	Почва	Вода	Прочие	Precision	Recall
Реальные значения	Лиственный лес	3348	18	248	4	0	0	0,993	0,925
	Хвойный лес	25	393	53	10	0	0	0,956	0,817

го класса из наземных данных. Общая точность решения задачи (доля правильной классификации, согласно наземным данным, относительно общего количества объектов) составляет 91,3 %.

Согласно данным таблицы мы можем видеть, что лиственные леса определяются лучше хвойных и для обоих типов леса основная доля ошибок приходится на полноту (recall), то есть часть объектов данного класса по наземным данным определяется неправильно. Также, анализируя матрицу ошибок, мы можем отметить, что объекты «Лиственный лес» и «Хвойный лес» отделяются друг от друга хорошо, однако во многих случаях эти объекты могут классифицироваться как «Трава», то есть лесные участки определяются как травянистая растительность. Это мо-

жет быть следствием не только несовершенства модели, но и в большой степени устареванием или естественными погрешностями имеющихся наземных данных.

Выводы

Предложенная методика оценки информационных возможностей спутниковых систем мониторинга Земли показала свою эффективность при получении вероятностных оценок возможности решения соответствующих типичных задач с помощью гиперспектральной спутниковой аппаратуры НА-ГС. Проведенные тестовые расчеты, проведенные для территории Валуйского лесничества показали, что НА-ГС будет способно решать задачи распознавания основных типов

объектов и классификации видового состава древостоев в среднем за 262 сут. при учете облачности и за 130 сут. без учета облачности. При этом точность классификации типового состава древостоя составляет 91,3 %. В дальнейшем при составлении полетного задания, подобные оценки оперативности можно будет получить таким же образом для любого выбранного района, оценка точности будет претерпевать существенных изменений при решении любой аналогичной задачи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-01-00215 и № 20-07-00370.

Список литературы

- [1] Жердев В.Н., Баранович Д.А., Гусева И.В., Постолов В.Д. Космический мониторинг лесных ресурсов как одно из ведущих направлений выявления и прогнозирования негативных геоэкологических факторов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2011. № 1. С. 179–183.
- [2] Казарян М.Л., Шахраманьян М.А. Мониторинг лесных массивов с помощью космических снимков — контроль вырубок леса // Современные проблемы науки и образования, 2015. № 1. С. 1763.
- [3] Крылов А.М., Владимирова Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геоматика, 2011. № 3. С. 53–57.
- [4] Шимов С.В., Никитина Ю.В. Технология мониторинга вырубок леса с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения // Геоматика, 2011. № 3. С. 47–52.
- [5] Шумаков Ф.Т., Толстохатко В.А., Тарнопильская Н.П. Возможности использования космических снимков для решения задач мониторинга лесов // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2012. № 11. С. 25–29.
- [6] Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Шибанов С.Ю., Козодеров В.В., Донской С.А. Оценка оперативных возможностей гиперспектрального комплекса НА-ГС с использованием имитационно-статистического моделирования // Исследование Земли из космоса, 2019. № 1. С. 74–83.
- [7] Clevers J., Kooistra L., Salas E.A.L. Study of heavy metal contamination in river flood plains using the red-edge position in spectroscopic data // International J. of Remote Sensing, 2004, no. 25(19), pp. 3883–3895.
- [8] Bajwa S.G., Tian L.F. Soil fertility characterization in agricultural fields using hyperspectral remote sensing // Trans. ASAE, 2005, no. 48(6), pp. 2399–2407.
- [9] Ferreira M.P., Zortea M., Zanutta D.C., Shimabukuro Y.E., Filho C.R. de Souza. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data // Remote Sensing of Environment, 2016, no. 179, pp. 66–78.
- [10] Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Mapping forest and peat fires using hyperspectral airborne remote-sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2012, no. 48(9), pp. 941–948.
- [11] Schlerf M., Atzberger C., Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data // Remote Sensing of Environment, 2005, no. 95, pp. 177–194.
- [12] Laurin G.V., Puletti N., Hawthorne W., Liesenberg V., Corona P., Papale D., Chen Q., Valentini R. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data // Remote Sensing of Environment, 2016, no. 176, pp. 163–176.
- [13] Dmitriev E.V., Kozoderov V.V., Dementyev A.O., Sokolov A.A. Recognition of forest species and ages using algorithms based on error-correcting output codes // J. of Siberian Federal University Engineering and technologies, 2017, no. 10(6), pp. 794–804.
- [14] Мельник П.Г., Пронина О.В., Станко Я.Н., Дюжина И.А. Влияние географической изменчивости на продуктивность и физико-механические свойства древесины ели // Лесной вестник/Forestry bulletin, 2014. № 1. С. 45–52.
- [15] Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г. Результаты выращивания провениенций сосны обыкновенной в географических посадках Серебряноборского опытного лесничества // Лесоведение, 2017. № 3. С. 176–182.
- [16] Dmitriev E.V. Classification of the forest cover of Tver oblast using hyperspectral airborne imagery // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2014, no. 50(9), pp. 929–942.
- [17] Herrmann I., Pimstein A., Karnieli A., Cohen Y., Alchanatis V., Bonfil D.J. LAI assessment of wheat and potato crops by VENµS and Sentinel-2 bands // Remote Sensing of Environment, 2011, no. 115, pp. 2141–2151.
- [18] Бахвалов Ю.О., Хатулев В.А., Завора Ю.И., Михеев О.В., Судаков В.М. Новые возможности имитационно-статистического моделирования для оценивания эффективности космических систем ДЗЗ // Исследование Земли из космоса, 2015. № 5. С. 44–50.
- [19] Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2006. 296 с.
- [20] Zanter K. Landsat 8 (L8) data users handbook. USA, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019, 106 p.
- [21] Мерков А.Б. Распознавание образов. Построение и обучение вероятностных моделей. М.: URSS, 2014. 240 с.
- [22] Duda R., Hart P., Stork D. Pattern Classification. USA, Hoboken: A Wiley-Interscience Publication, 2000, 745 p.
- [23] Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Comparative analysis of recognition algorithms for forest cover objects on hyperspectral air-space images // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2017, no. 53(9), pp. 1132–1141.

Сведения об авторах

Зотов Сергей Александрович — аспирант Московского физико-технического института, инженер лаборатории космической оптико-электронной аппаратуры «ЭЛФОКС», zotov.sa@mipt.ru

Дмитриев Егор Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Института вычислительной математики РАН, yegor@mail.ru

Шибанов Сергей Юрьевич — канд. техн. наук, зав. лаборатории космической оптико-электронной аппаратуры «ЭЛФОКС», shibanov.siu@mipt.ru

Поступила в редакцию 15.10.2019.

Принята к публикации 25.04.2020.

INFORMATION CAPABILITIES EVALUATION OF HYPERSPECTRAL SPACE COMPLEX BY SPA «LEPTON» AND MIPT FOR MONITORING FORESTED TERRITORIES IN RUSSIA

S.A. Zotov¹, Y.V. Dmitriev², S.Y. Shibanov¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology, MIPT, 9, Institutsky per., 141701, Dolgoprudny, Moscow reg., Russia

²Institute of Numerical Mathematics, RAS, 8, Gubkina st., 119333, Moscow, Russia

zotov.sa@mipt.ru

The article presents a method for evaluating the information capabilities of multispectral and hyperspectral Earth remote sensing systems. In particular, the article discusses the use of this method in evaluating the information capabilities of the hyperspectral space complex SPA Lepton and the Moscow Institute of Physics and Technology in solving the problem of classifying forests into deciduous and coniferous. The informational capability of the Earth remote sensing system means the possibility of solving the problem in a certain time and with a certain quality. Evaluation of information capabilities is divided into two parts. The first part is an evaluation of the operational capabilities of the multi-, hyperspectral complex, that is, the possible time to solve the problem. The second part is an evaluation of the quality of solving the problem. Evaluation of the information capability of satellite systems for remote sensing of the Earth allows us to determine the appropriateness of including the task of monitoring territories (for example, forest monitoring) in the flight mission for the satellite system, to develop steps to improve information capability in solving the tasks.

Keywords: information capabilities of remote sensing systems, hyperspectral images, simulation-statistical modeling, machine learning, estimation of parameters of forest territories

Suggested citation: Zotov S.A., Dmitriev Y.V., Shibanov S.Y. *Otsenka informatsionnykh vozmozhnostey giperspektral'nogo kosmicheskogo kompleksa NPO «Lepton» i MFTI v zadache monitoringa lesnykh territoriy Rossii* [Information capabilities evaluation of hyperspectral space complex by SPA «Lepton» and MIPT for monitoring forested territories in Russia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 26–32. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-26-32

References

- [1] Zherdev V.N., Baranovich D.A., Guseva I.V., Postolov V.D. *Kosmicheskii monitoring lesnykh resursov kak odno iz vedushchikh napravleniy vyavleniya i prognozirovaniya negativnykh geoekologicheskikh faktorov* [Space monitoring of forest resources as one of the leading directions in identifying and forecasting negative geoeological factors]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Agrarian University], 2011, no. 1, pp. 179–183.
- [2] Kazaryan M.L., Shakhraman'yan M.A. *Monitoring lesnykh massivov s pomoshch'yu kosmicheskikh snimkov — kontrol' vyrubok lesa* [Space monitoring using satellite imagery — control of deforestation]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 1, pp. 1763.
- [3] Krylov A.M., Vladimirova N.A. *Distsionnyy monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoy s'emki* [Remote monitoring of forest conditions based on satellite imagery]. *Geomatika* [Geomatics magazine], 2011, no. 3, pp. 53–57.
- [4] Shimov S.V., Nikitina Yu.V. *Tekhnologiya monitoringa vyrubok lesa s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov vysokogo prostanstvennogo razresheniya* [Technology for monitoring deforestation using high-resolution satellite images]. *Geomatika* [Geomatics magazine], 2011, no. 3, pp. 47–52.
- [5] Shumakov F.T., Tolstokhat'ko V.A., Tarnopil'skaya N.P. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya kosmicheskikh snimkov dlya resheniya zadach monitoringa lesov* [Possibilities of using satellite images for solving forest monitoring tasks]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Enterprise Technologies], 2012, no. 11, pp. 25–29.
- [6] Zotov S.A., Dmitriev E.V., Shibanov S.Yu., Kozoderov V.V., Donskoy S.A. *Otsenka operativnykh vozmozhnostey giperspektral'nogo kompleksa NA-GS s ispol'zovaniem imitatsionno-statisticheskogo modelirovaniya* [Assessment of the operational capabilities of the hyperspectral complex NA-GS using simulation-statistical modeling]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth research from space], 2019, no. 1, pp. 74–83.

- [7] Clevers J., Kooistra L., Salas E.A.L. Study of heavy metal contamination in river flood plains using the red-edge position in spectroscopic data. *International J. of Remote Sensing*, 2004, no. 25(19), pp. 3883–3895.
- [8] Bajwa S.G., Tian L.F. Soil fertility characterization in agricultural fields using hyperspectral remote sensing. *Trans. ASAE*, 2005, no. 48(6), pp. 2399–2407.
- [9] Ferreira M.P., Zortea M., Zanotta D.C., Shimabukuro Y.E., Filho C.R. de Souza. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 2016, no. 179, pp. 66–78.
- [10] Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Mapping forest and peat fires using hyperspectral airborne remote-sensing data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, no. 48(9), pp. 941–948.
- [11] Schlerf M., Atzberger C., Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, no. 95, pp. 177–194.
- [12] Laurin G.V., Puletti N., Hawthorne W., Liesenberg V., Corona P., Papale D., Chen Q., Valentini R. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 2016, no. 176, pp. 163–176.
- [13] Dmitriev E.V., Kozoderov V.V., Dementyev A.O., Sokolov A.A. Recognition of forest species and ages using algorithms based on error-correcting output codes. *J. of Siberian Federal University Engineering and technologies*, 2017, no. 10(6), pp. 794–804.
- [14] Mel'nik P.G., Pronina O.V., Stanko Ya.N., Dyuzhina I.A. *Vliyaniye geograficheskoy izmenchivosti na produktivnost' i fiziko-mekhanicheskie svoystva drevesiny eli* [The influence of geographical variability on the productivity and physico-mechanical properties of spruce wood]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, no. 1, pp. 45–52.
- [15] Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Mel'nik P.G. *Rezul'taty vyrashchivaniya provenientsiy sosny obyknovnoy v geograficheskikh posadkakh Serebryanoborskogo opytnogo lesnichestva* [The results of the cultivation of provinces of Scots pine in the geographical plantings of Serebryanoborsky experimental forestry]. *Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science]*, 2017, no. 3, pp. 176–182.
- [16] Dmitriev E.V. Classification of the forest cover of Tver oblast using hyperspectral airborne imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, no. 50(9), pp. 929–942.
- [17] Herrmann I., Pimstein A., Karnieli A., Cohen Y., Alchanatis V., Bonfil D.J. LAI assessment of wheat and potato crops by VEN μ S and Sentinel-2 bands. *Remote Sensing of Environment*, 2011, no. 115, pp. 2141–2151.
- [18] Bakhvalov Yu.O., Khatulev V.A., Zavora Yu.I., Mikheev O.V., Sudakov V.M. *Novye vozmozhnosti imitatsionno-statisticheskogo modelirovaniya dlya otsenivaniya effektivnosti kosmicheskikh sistem DZZ* [New possibilities of simulation and statistical modeling for evaluating the effectiveness of space remote sensing systems]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2015, no. 5, pp. 44–50.
- [19] Kurenkov V.I., Salmin V.V., Abramov B.A. *Osnovy ustroystva i modelirovaniya tselevogo funktsionirovaniya kosmicheskikh apparatov nablyudeniya* [Fundamentals of the device and simulation of the target functioning of spacecraft]. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet [Samara State Aerospace University] 2006. 296 p.
- [20] Zanter K. *Landsat 8 (L8) data users handbook*. USA, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019. 106 p.
- [21] Merkov A.B. *Raspoznavanie obrazov. Postroyeniye i obuchenie veroyatnostnykh modeley* [Pattern recognition. Building and training probabilistic models]. Moscow: URSS, 2014, 240 p.
- [22] Duda R., Hart P., Stork D. *Pattern Classification*. USA, Hoboken: A Wiley-Interscience Publication, 2000. 745 p.
- [23] Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Comparative analysis of recognition algorithms for forest cover objects on hyperspectral air-space images. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, no. 53(9), pp. 1132–1141.

Authors' information

Zotov Sergey Aleksandrovich — Pg. Student of Moscow Institute of Physics and Technology, Engineer of Space Optoelectronic Equipment Laboratory «ELFOX», zotov.sa@mipt.ru

Dmitriev Egor Vladimirovich — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientist of Institute of Numerical Mathematics, RAS, yegor@mail.ru

Shibanov Sergey Yur'evich — Cand. Sci. (Tech.), Head of Space Optoelectronic Equipment Laboratory «ELFOX», shibanov.siu@mipt.ru

Received 15.10.2019.

Accepted for publication 25.04.2020.