

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МОНИТОРИНГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В.Г. Аковецкий<sup>1</sup>, А.В. Афанасьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

geoinforisk@mail.ru

Предложена новая двухуровневая технология проведения комплексного мониторинга леса. Здесь на первом уровне осуществляется локальное зонирование территорий пожарной опасности, лесозащитное зонирование посредством классификационных индексов с многозональных космических изображений. На втором уровне наблюдения выделенных участков проводятся посредством детальных изображений высокого разрешения, получаемых беспилотными летательными аппаратами. Применение предложенной технологии дает возможность в большинстве случаев заменить съемку со станций наземного базирования на съемку с беспилотных летательных аппаратов, что существенно повышает производительность, точность и надежность проведения мониторинга.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, аэрокосмический мониторинг, спектральный индекс, геоинформационная среда, геоинформационная система

**Ссылка для цитирования:** Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 29–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-29-36

Одной из главных задач управления развитием лесного хозяйства является обеспечение интенсивного комплексного использования лесных ресурсов с сохранением их экологического и генетического потенциалов. Охрана, защита и воспроизводство лесов предполагает информационное сопровождение управления лесным комплексом и охраной природы всех уровней [1–3]. Для их решения, в частности, предусматривается проведение таких видов мониторинга как: *лесопожарный, лесопатологический и воспроизводства леса.*

*Лесопожарный мониторинг* включает в себя изучение пожарной опасности в лесах и предотвращение лесных пожаров посредством их обнаружения и учета на основе применения наземных, авиационных и космических систем. В результате его проведения принимаются управляющие решения по лесопожарным формированиям, пожарной технике и оборудованию.

*Лесопатологический мониторинг* предполагает наблюдения, анализ, оценку, прогноз санитарного и лесопатологического состояния леса посредством наземных и аэрокосмических съемок.

*Мониторинг воспроизводства лесов* предусматривает сбор и анализ информации о воспроизводстве лесов с помощью наземных, авиационных и космических средств. В результате его проведения определяются изменение площади земель под лесами и участков леса, требующих восстановления, характеристики лесных насаждений и эффективность воспроизводства лесов.

### Цель работы

Цель работы — проведение экспериментальной апробации методов и технологии двухуровневой интерпретации космических многозональных изображений и изображений, получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в задачах комплексного мониторинга леса.

### Материалы и методы

Характерной особенностью рассмотренных выше видов мониторинга является использование дистанционных методов наземного, воздушного и космического базирования [4–6]. На основе системного комплексного подхода, сочетающего в себе оптимизацию технологий дистанционных полевых съемок и функциональную интерпретацию состояния растительности, вызванного хозяйственной деятельностью человека (вырубками) [7] и природными факторами (пожарами, засухой) [8–10].

Технологическая схема комплексного мониторинга леса включает в себя (рис. 1) следующие процессы:

- построение геоинформационной среды исследуемой территории;
- получение фотоизображений и их интерпретацию;
- информационное сопровождение управления лесным комплексом.

*Геоинформационная среда* исследуемой территории представляет собой совокупность геопространственных данных, обеспечивающих построение территориальных и объектно-ориен-



**Рис. 1.** Технологическая схема мониторинга леса  
**Fig. 1.** Technological forest monitoring scheme

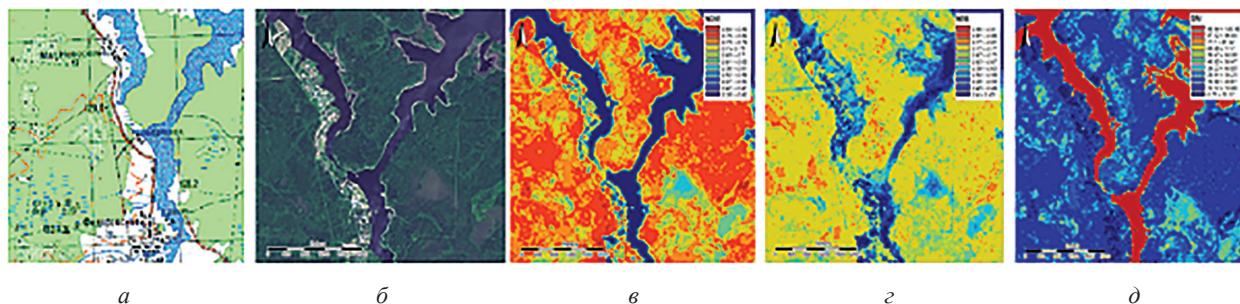
тированных моделей местности в геопозиционированном пространстве геоинформационных систем (ГИС). Она используется при комплексном решении задач разного уровня покрытия территории: планетарный, национальный, региональный, локальный и детальный. В рассматриваемом случае, геопространственные данные получают посредством систем глобального позиционирования ГЛОНАСС, GPS; спутников Landsat-7, 8 [13]; SPOT-6, 7 [14]; Pleiades-1, 2 [15]; Ресурс-П 1, 2, 3; наземного геодезического оборудования топографических съемок, оборудования БПЛА и топографических карт местности. В их перечень входят: цифровые топографические и геоботанические карты; архивные аэрофотоснимки, космические снимки, и цифровые изображения, получаемые по радиоканалам борта авиационных и космических беспилотных летательных аппаратов, а также цифровые изображения эталонов видов и состояния растительного покрова. Эти данные хранятся в базах данных ГИС и служат геопространственной основой для построения объектно-ориентированных моделей: лесного комплекса, источников природного (пожаров, засух, колоний жуков-короедов) и техногенного воздействия (вырубок, автодорог, инженерных построек, несанкционированных свалок). Они также используются для зонирования территорий и построения фоновых опорных моделей ее растительности.

Для получения текущей информации о состоянии лесного комплекса мониторинг выполняют посредством систем наземного, воздушного и космического базирования [11, 12].

В качестве систем наземного базирования используют комплексы измерительных станций, которые позволяют выполнять съемку в масштабе 1:100 — 1:10 000 в режимах цифровой измерительной фотокамеры, электронного тахеометра, лазерного сканера и станции глобального позиционирования (Leica Nova модели MS 50 и MS 60). Данные станции с успехом применяются для инвентаризации, создания фотоэталонов, определения фоновых параметров растительности (высоты, толщины, наименования вида).

В качестве систем воздушного базирования используются аэросъемочные системы, размещаемые на пилотируемых и беспилотных носителях. Для целей мониторинговых наблюдений целесообразно использовать архивные снимки и изображения, получаемые в ходе проведения оперативных съемок на заданный момент исследований в масштабе 1:100 — 1:100 000.

Космические изображения позволяют решать комплексные задачи, включающие отображение исследуемой территории как в различных масштабах (1:2000 — 1:1000 000), так и в различных спектральных диапазонах. Для этого широко применяются космические аппараты (КА) Landsat-7, Landsat-8 [13], SPOT-6, 7 [14], Pleiades-1, 2 [15], Ресурс-П 1, 2, 3.



**Рис. 2.** Зонирование пожароопасности территории по космическим изображениям с КА Landsat-8: *a* — опорная топографическая карта; *б* — цифровое цветное изображение; *в-д* — классификационные спектры исследуемой территории по индексам NDVI, NBR, BAI, соответственно

**Fig. 2.** Zoning of the fire hazard territory according to space images from the Landsat-8 spacecraft: *a* — reference topographic map; *б* — digital color image; *в-д* — classification spectra of the study area according to the NDVI, NBR, BAI indices, respectively



**Рис. 3.** Лесопатологическое и санитарное зонирование по изображениям с БПЛА DJI Phantom 4: *a* — зона леса (ель + береза); *б* — большие деревья; *в* — свалка мусора; *г* — вырубка леса

**Fig. 3.** Forest pathological and sanitary zoning according to images from UAV DJI Phantom 4: *a* — forest zone (spruce + birch); *б* — diseased trees; *в* — landfill; *г* — deforestation

Важное место в задачах мониторинговых наблюдений занимают методы и технологии интерпретации аэрокосмических изображений, выполняемые в визуальных, автоматизированных и автоматических режимах [1, 16]. Технологии интерпретации включают процессы: обнаружения, классификации, распознавания и векторизации состояния объектов растительности. Их эффективность определяется возможностью выделения интересующих индикаторов по изображениям местности. Данные технологии непосредственно связаны с параметрами съемочных камер, которые определяют пространственное и спектральное разрешение получаемых изображений местности.

Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет сочетать космические и воздушные средства наблюдения, а также автоматические и визуальные режимы интерпретации, т. е. комплексные модели мониторинга.

Рассмотрим примеры практической апробации комплексного подхода интерпретации мониторинговых наблюдений при решении задач зонирования пожарной опасности, лесопатологического зонирования санитарного состояния лесов и зонирования воспроизводства лесного комплекса с помощью КА Landsat-7, Landsat-8,

архивных аэроснимков и текущих изображений исследуемой территории, полученных с БПЛА.

Разработкой ГИС-технологий космического мониторинга пожаров в Казахстане занимаются в Институте космических исследований с 2001 г., который с 2002 г. осуществляет оперативный космический мониторинг пожароопасных областей Казахстана. В процессе эксплуатации постоянно проводится совершенствование технологий с учетом реальных возможностей и потребностей Министерства чрезвычайных ситуаций, использующего эту информацию.

Разработанная интегрированная система космического мониторинга пожаров базируется на данных дистанционного зондирования NOAA AVHRR и EOS-AM Terra MODIS [17]. Она включает в себя комплекс ГИС-технологий, обеспечивающих: оперативное обнаружение очагов пожаров по космическим снимкам; их географическую привязку; оценку потенциальной опасности обнаруженных очагов; картирование площадей, пострадавших от пожаров; оценку потенциального ущерба сельскохозяйственных угодий от пожаров и риска пожароопасности различных территорий и моделирование развития пожаров по метеоданным.

Опыт практического применения спектральных индексов при обработке изображений пожароопасных территорий, полученных с КА Landsat-7 и SPOT-5, представлен в работе [18], в которой контроль правильности классификации проводился по опорным тестовым участкам, установленным в ходе наземных исследований.

Задачи мониторинга пожароопасности в рамках настоящей работы решались на основе классификации и последующего зонирования космических изображений, полученных с КА Landsat-8, которые отображали объекты растительного покрова в девяти спектральных диапазонах [13]. Классификация осуществлялась по трем индексам: NDVI, NBR, BAI (рис. 2).

*Нормализованный разностный вегетационный индекс* (NDVI) характеризует фотосинтез растений. Различное отражение в красном и ближнем инфракрасном каналах позволяет контролировать относительную «зеленость» растительности по спектральному отражению солнечной радиации. Благодаря этому свойству по данному индексу классифицируются зоны пожарной опасности, поскольку повышенные значения температуры почвы и воздуха приводят к дефициту влаги, что, в свою очередь, обуславливает пожелтение листы растительности и ее увядание. Индекс фиксирует изменение цветовых характеристик растительности, снижающих отражение солнечной энергии в ближнем инфракрасном диапазоне. Его значение вычисляется по формуле [19]

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR — значения пикселей ближнего инфракрасного (ИК) канала;

RED — значения пикселей красного канала.

*Нормализованный индекс гарей* (NBR) предназначен для характеристики территорий, на которых был пожар. Это уточненный показатель термальной активности территории. Он адаптирован к использованию изображений, полученных с КА Landsat, с несколькими ИК-каналами. Для расчета используется ближний и коротковолновый ИК-диапазоны. Его значение определяется по уравнению [20]

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR},$$

где NIR — значения пикселей ближнего ИК-канала;

SWIR — значения пикселей из коротковолнового ИК-канала.

По *индексу выгоревших областей* (BAI) проводится анализ гарей и оценка их общего состояния на основании различия в отражательной способности в красной и ближней ИК-области спектра.

Его значение можно вычислить по формуле [21]

$$BAI = \frac{1}{(0,1 - RED)^2 + (0,06 - NIR)^2},$$

где RED — значения пикселей красного канала;

NIR — значения пикселей из ближнего ИК-канала.

## Результаты и обсуждение

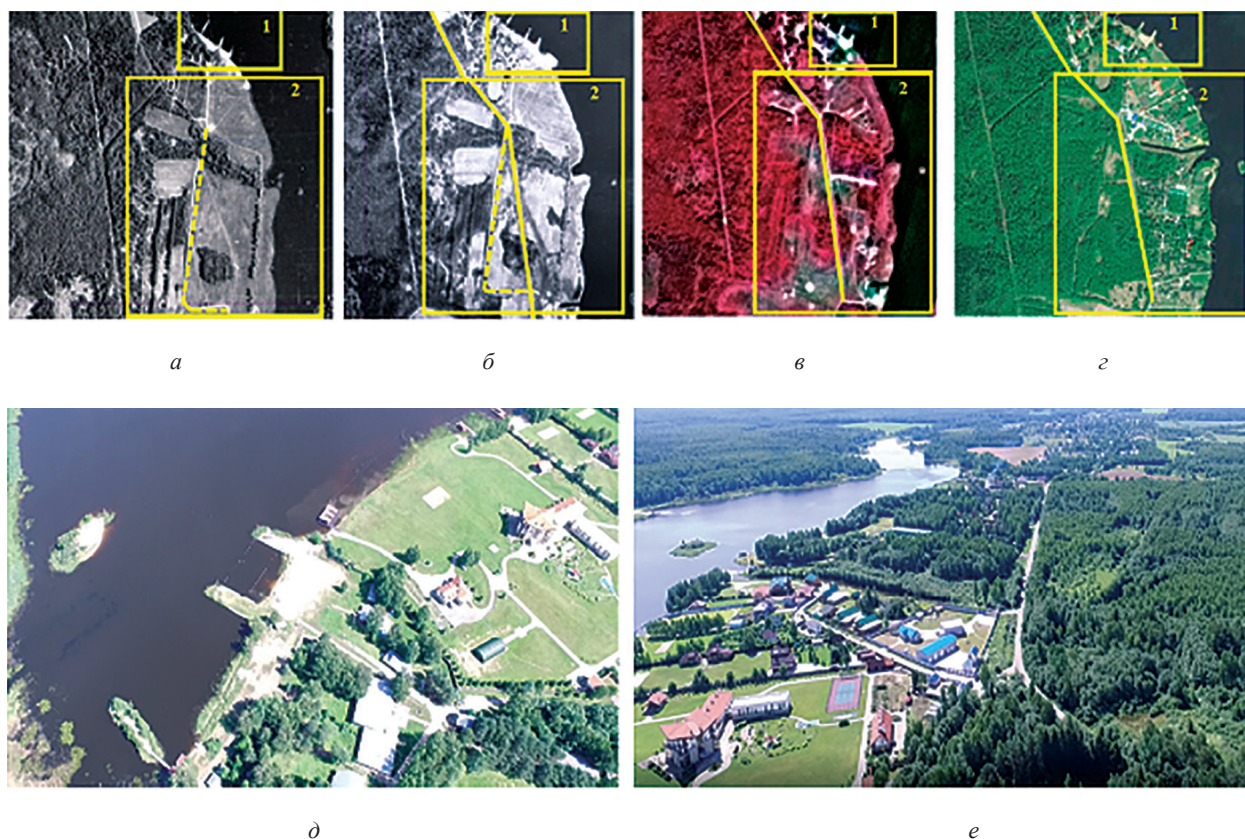
Классификация и зонирование территории (Тверская область, Конаковский район, Ивановское водохранилище) выполнялись на программном комплексе АГИР-ТМ, который зонировал территории в автоматическом и автоматизированном режимах (см. рис. 2, а–д).

Поскольку в 2017 г. опасность природных пожаров на исследуемой территории отсутствовала, данная классификация была использована для лесопатологического зонирования территории (рис. 3). На основе использования индекса NDVI были выделены участки территории леса, где были обнаружены значительные значения коэффициента, на уровне 0,84–0,89. Детальные изображения этих участков, полученные с борта БПЛА, позволили выделить участки (показаны в виде окружностей красного цвета): больных сухих деревьев (см. рис. 3, б); территорию на лесной поляне, где находилась несанкционированная свалка бытовых отходов (см. рис. 3, в); территорию, где находилась вырубка деревьев (см. рис. 3, г). Значения коэффициента 0,69–0,79 соответствовали участкам смешанного лесного массива здоровых деревьев (ель, береза) (см. рис. 3, а).

Важной задачей мониторинга лесного комплекса является зонирование воспроизводства лесов. Для ее решения использовались: аэроснимки территории 1982 г. (рис. 4, а) и 1990 г. (см. рис. 4, б), космический снимок территории с КА Landsat-7, 2002 г. (см. рис. 4, в) и с КА Landsat-8, 2017 г. (см. рис. 4, г), изображения территории, полученные с БПЛА (см. рис. 4, д и 4, е).

Следует также отметить, что коттеджные участки на исследуемой территории ограждены забором, который препятствует свободному доступу к Ивановскому водохранилищу. На участке 1 зафиксировано незначительное увеличение растительного покрова вдоль границы с коттеджным участком.

Временной анализ снимков показал, что на участке 2 в период с 1982 г. по 1990 г. была проложена автодорога (сплошная желтая линия — рис. 4, б–г), которая пересекла островные участки лесного массива. С ее вводом старая полевая автодорога (штриховая желтая линия — рис. 4, в, г) покрылась лесным массивом и в настоящее время практически неразличима на изображениях.



**Рис. 4.** Комплексные мониторинговые наблюдения воспроизводства лесного комплекса: *a* — аэроснимок, 1982 г.; *б* — аэроснимок, 1990 г.; *в* — снимок с КА Landsat-7, 2002 г.; *г* — снимок с КА Landsat-8, 2017 г.; *д* — участок 1, изображение с БПЛА, 2017 г.; *е* — участок 2, изображение с БПЛА, 2017 г.

**Fig. 4.** Complex monitoring of the reforestation: *a* — aerial photograph, 1982; *б* — aerial photograph, 1990; *в* — image from Landsat-7 spacecraft, 2002; *г* — image from the Landsat-8 spacecraft, 2017; *д* — plot 1, image from a UAV, 2017; *е* — section 2, image from a UAV, 2017

За промежуток времени с 1990 г. по 2017 г. на исследуемой территории активно проводилось коттеджное строительство. Вдоль береговой линии водохранилища наблюдаются посадки молодых деревьев, которые выполняют роль береговой защиты.

Комплексные наблюдения показали, что на исследуемой территории, расположенной в Тверской области, общее состояние лесного массива находится в хорошем состоянии. Только на отдельных участках встречаются отдельные нарушения санитарного режима состояния лесных земель, связанные с влиянием коттеджного строительства и отсутствием достаточной инфраструктуры утилизации отходов.

### Выводы

Результаты практической апробации предложенной технологии двухуровневой интерпретации космических изображений и изображений, полученных авиационными БПЛА, показали эффективность предложенного подхода. Он позволяет по многоспектральным космическим изображениям мелкого масштаба осуществлять

качественное комплексное зонирование территории посредством лесопожарного, лесопатологического и санитарного мониторинга. Эффективность применения современных БПЛА зависит от площади проведения работ и выбора места их запуска. Наличие локальных участков предстоящих исследований позволяет оптимизировать временные и финансовые затраты по их проведению. Важным моментом при реализации данного подхода является применение процедур автоматической и автоматизированной интерпретации изображений интересующих объектов, как по космическим снимкам, так и по снимкам, получаемым с помощью БПЛА. Наличие автоматического режима принятия решений позволяет приступить к разработке цифровых геоинформационных платформ четвертого поколения, основанных на сетевых решениях и искусственном интеллекте в задачах проведения мониторинговых наблюдений критических зон на территории земной поверхности. Это становится особенно важно в связи с изменением климата и возрастанием роли воздействия природных факторов на состояние окружающей среды.

## Список литературы

- [1] Рязанцева Н.Е., Аковецкий В.Г., Зубалий А.М., Бурикова Ю.Н., Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Шокина О.И. Методы экологических исследований. М.: ИНФРА-М, 2019. 474 с.
- [2] Хамедов В.А., Мазуров Б.Т. Разработка методических вопросов создания системы спутникового мониторинга состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса территории Западной Сибири // Вестник СГУГиТ, 2015. Вып. 3 (31). С. 16–31.
- [3] Мазуров Б.Т., Аврунев Е.И., Хамедов В.А. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т. 14. № 4. С. 103–111.
- [4] Бахтинова Е.В., Соколов А.Ю., Никольский Д.Б., Кантемиров Ю.И. Полуавтоматическое выявление вырубок леса на мультивременных радарных и радарно-оптических цветных композитах // Геоматика, 2012. № 1. С. 52–55.
- [5] Хамедов В.А. Мониторинг состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса // Решетневские чтения, 2013. Т. 2. С. 265–267.
- [6] Хамедов В.А. Сравнение методов обнаружения лесных гарей по оптическим и радиолокационным снимкам // Вестник СГУГиТ, 2016. Вып. 3 (35). С. 43–54.
- [7] Хамедов В.А., Мазуров Б.Т. Оценка точности определения площадей лесных рубок с использованием снимков с российского космического аппарата «Ресурс-П» № 1 // Вестник СГУГиТ, 2015. Вып. 4 (32). С. 42–50.
- [8] Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Еремеев А.В., Макеева М.А., Хамедов В.А. Автоматизированная система спутникового мониторинга пожарной обстановки в технологических коридорах трубопроводов и лесах ХМАО // Оптика атмосферы и океана, 2009. Т. 22. № 1. С. 90–95.
- [9] Копылов В.Н., Полищук Ю.М., Хамедов В.А. Геоинформационная технология оценки последствий лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования // Геоинформатика, 2006. № 1. С. 56–61.
- [10] Копылов В.Н., Хамедов В.А. Информационная технология оперативного обнаружения лесных пожаров // Материалы науч.-практ. семинара «Проблемы природной безопасности Югры: мониторинг и прогнозирование экстремальных гидрометеорологических явлений и лесных пожаров» (Ханты-Мансийск, 9–10 июня 2008 г.). Ханты-Мансийск: ОАО «Информационно-издательский центр», 2008. С. 18–23.
- [11] Аковецкий В.Г. Аэрокосмический мониторинг месторождений нефти и газа. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008, 454 с.
- [12] Украинский П.А. Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 4. С. 229–238.
- [13] Zanter K. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016, 106 p.
- [14] Coeurdevey L., Soubirane J. SPOT 6/7 Imagery // User Guide, 2013, July 8, 120 p.
- [15] Coeurdevey L., Gabriel-Robez C., Pléiades Imagery // User Guide, 2012, October 18, 118 p.
- [16] Курбанов Э.А. Решение вопросов космического мониторинга лесных гарей в комплексных пакетах ENVI и ArcGIS // Геоматика, 2012. № 4. С. 82–92.
- [17] Архипкин О.П., Спивак Л.Ф., Сагатдинова Г.Н. Пятилетний опыт оперативного космического мониторинга пожаров в Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2007. Т. 1. С. 103–110.
- [18] Бартаев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыщенко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
- [19] Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1974, vol. 1, p. 48–62.
- [20] Key C.H., Benson N. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio // Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 1–51.
- [21] Chuvieco E., Pilar M.M., Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-nearinfrared spectral domain for burned land discrimination // Remote Sensing of Environment, 2002, v. 112, pp. 2381–2396.

## Сведения об авторах

**Аковецкий Виктор Геннадьевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Геоэкология» РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, [geoinforisk@mail.ru](mailto:geoinforisk@mail.ru)

**Афанасьев Алексей Викторович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [afanasyev-av@yandex.ru](mailto:afanasyev-av@yandex.ru)

Поступила в редакцию 14.10.2019.

Принята к публикации 17.01.2020.

## METHODS AND TECHNOLOGIES FOR FOREST VEGETATION AEROSPACE MONITORING INTERPRETATION

V.G. Akovetsky<sup>1</sup>, A.V. Afanasyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gubkin Oil and Gas University (NRU) Gubkina, 65, Leninsky av., 119991, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

geoinforisk@mail.ru

A new two-level technology for integrated forest monitoring is proposed. Here, at the first level, local zoning of fire hazard areas, forest protection zoning by means of classification indices from multizone space images is carried out. At the second level, observations of the selected areas are carried out through high-resolution detailed images obtained by unmanned aerial vehicles. The application of the proposed technology makes it possible in most cases to replace the survey from ground-based stations with the survey from unmanned aerial vehicles, which significantly increases the performance, accuracy and reliability of monitoring.

**Keywords:** remote sensing, aerospace monitoring, spectral index, geo-information environment, geographic information system

**Suggested citation:** Akovetsky V.G., Afanasyev A.V. *Metody i tekhnologii interpretatsii aerokosmicheskikh monitoringovykh nablyudenykh lesnoy rastitel'nosti* [Methods and technologies for forest vegetation aerospace monitoring interpretation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 29–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-29-36

### References

- [1] Ryazantseva N.E., Akovetsky V.G., Zubaliy A.M., Burnikova Yu.N., Gaykovich B.A., Zanin V.Yu., Shokina O.I. *Metody ekologicheskikh issledovaniy* [Environmental research methods]. Moscow: INFRA-M, 2019, 474 p.
- [2] Khamedov V.A., Mazurov B.T. *Razrabotka metodicheskikh voprosov sozdaniya sistemy sputnikovogo monitoringa sostoyaniya lesnykh ekosistem v usloviyakh vozdeystviya neftegazovogo kompleksa territorii Zapadnoy Sibiri* [Development of methodological issues of creating a satellite monitoring system for the state of forest ecosystems under the influence of the oil and gas complex in Western Siberia]. *Vestnik SGUGiT*, 2015, iss. 3 (31), pp. 16–31.
- [3] Mazurov B.T., Avrunev E.I., Khamedov V.A. *Operativnyy monitoring lesnykh zemel' severnykh regionov na osnove ispol'zovaniya opticheskikh i radarnykh kosmicheskikh snimkov* [Operational monitoring of forest lands in the northern regions based on the use of optical and radar satellite images]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2017, v. 14, no. 4, pp. 103–111.
- [4] Bakhtinova E.V., Sokolov A.Yu., Nikol'skiy D.B., Kantemirov Yu.I. *Poluavtomaticheskoe vyavlenie vyrubok lesa na mul'tivremennykh radarnykh i radarno-opticheskikh tsvetnykh kompozitakh* [Semi-automatic detection of deforestation on multi-time radar and radar-optical color composites]. *Geomatika*, 2012, no. 1, pp. 52–55.
- [5] Khamedov V.A. *Monitoring sostoyaniya lesnykh ekosistem v usloviyakh vozdeystviya neftegazovogo kompleksa* [Monitoring the state of forest ecosystems under the influence of the oil and gas complex]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings], 2013, v. 2, pp. 265–267.
- [6] Khamedov V.A. *Sravnienie metodov obnaruzheniya lesnykh garey po opticheskim i radiolokatsionnym snimkam* [Comparison of methods for detecting forest burns by optical and radar images]. *Vestnik SGUGiT*, 2016, iss. 3 (35), pp. 43–54.
- [7] Khamedov V.A., Mazurov B.T. *Otsenka tochnosti opredeleniya ploshchadey lesnykh rubok s ispol'zovaniem snimkov s rossiyskogo kosmicheskogo apparata «Resurs-P» № 1* [Evaluation of the accuracy of determining the area of forest felling using images from the Russian spacecraft Resource-P No. 1]. *Vestnik SGUGiT*, 2015, iss. 4 (32), pp. 42–50.
- [8] Bryksin V.M., Evtuyushkin A.V., Ereemeev A.V., Makeeva M.A., Khamedov V.A. *Avtomatizirovannaya sistema sputnikovogo monitoringa pozharnoy obstanovki v tekhnologicheskikh koridorakh truboprovodov i lesakh KhMAO* [Automated system for satellite monitoring of the fire situation in the technological corridors of pipelines and forests of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2009, v. 22, no. 1, pp. 90–95.
- [9] Kopylov V.N., Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A. *Geoinformatsionnaya tekhnologiya otsenki posledstviy lesnykh pozharov s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Geoinformation technology for assessing the consequences of forest fires using remote sensing data]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 2006, no. 1, pp. 56–61.
- [10] Kopylov V.N., Khamedov V.A. *Informatsionnaya tekhnologiya operativnogo obnaruzheniya lesnykh pozharov* [Information technology for operational detection of forest fires] *Materialy nauch.-prakt. seminarov «Problemy prirodnoy bezopasnosti Yugry: monitoring i prognozirovaniye ekstremal'nykh gidrometeorologicheskikh yavleniy i lesnykh pozharov»* [Materials scientific.-practical. Seminar «Problems of Natural Security of Ugra: Monitoring and Forecasting of Extreme Hydrometeorological Phenomena and Forest Fire»] Khanty-Mansiysk, June 9–10, 2008. Khanty-Mansiysk: OJSC «Information and Publishing Center», 2008, pp. 18–23.
- [11] Akovetsky V.G. *Aerokosmicheskyy monitoring mestorozhdeniy nefiti i gaza* [Aerospace monitoring of oil and gas fields]. Moscow: Nedra Business Center, 2008, 454 p.
- [12] Ukrainskiy P.A. *Dinamika spektral'nykh svoystv zarastayushchikh travyanykh garey* [Dynamics of the spectral properties of overgrown grass burns]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2013, v. 10, no. 4, pp. 229–238.
- [13] Zanter K. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016, 106 p.
- [14] Coeurdevey L., Soubirane J. *SPOT 6/7 Imagery. User Guide*, 2013, July 8, 120 p.
- [15] Coeurdevey L., Gabriel-Robez C., Pléiades Imagery. *User Guide*, 2012, October 18, 118 p.

- [16] Kurbanov E.A. *Reshenie voprosov kosmicheskogo monitoringa lesnykh garey v kompleksnykh paketakh ENVI i ArcGIS* [The solution of issues of space monitoring of forest burns in integrated packages ENVI and ArcGIS]. *Geomatika*, 2012, no. 4, pp. 82–92.
- [17] Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N. *Pyatiletniy opyt operativnogo kosmicheskogo monitoringa pozharov v Kazakhstane* [Five-year experience of operational space-based fire monitoring in Kazakhstan]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2007, v. 1, pp. 103–110.
- [18] Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. *Issledovanie vozmozhnostey otsenki sostoyaniya povrezhdennykh pozharami lesov po dannym mnogosppektral'nykh sputnikovykh izmereniy* [Investigation of the possibilities of assessing the state of forests damaged by fires according to multispectral satellite measurements]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2010, v. 7, no. 3, pp. 215–225.
- [19] Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1974, v. 1, pp. 48–62.
- [20] Key C.H., Benson N. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 1–51.
- [21] Chuvieco E., Pilar M.M., Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-nearinfrared spectral domain for burned land discrimination. *Remote Sensing of Environment*, 2002, v. 112, pp. 2381–2396.

## Authors' information

**Akovetskiy Viktor Gennad'evich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department «Geoecology» of the National University of Oil and Gas «Gubkin University», [geoinforisk@mail.ru](mailto:geoinforisk@mail.ru)

**Afanas'ev Aleksey Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [afanasyev-av@yandex.ru](mailto:afanasyev-av@yandex.ru)

Received 14.10.2019.

Accepted for publication 17.01.2020.