

А. В. ПУЗАНОВ*, **Ю. М. ЦИМБАЛЕЙ***, **И. А. АЛЕКСЕЕВ****,
Н. М. КОВАЛЕВСКАЯ*, **Т. А. ПЛУТАЛОВА***

* Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия, puzanov@iwep.ru, zimbur@iwep.ru, nelleyk@mail.ru, denisova_tg@mail.ru

** Благовещенский государственный педагогический университет, 675000, Благовещенск, ул. Ленина, 104, Россия, igoralex20071@mail.ru

ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ КОСМОДРОМА «ВОСТОЧНЫЙ»)

Представлен новый способ составления карт растительного покрова на основе двухэтапной технологии: предварительная оценка состояния растительности и классификация с обучением при одновременном использовании цифровой картоосновы (GlobCover, 2009) и мультиспектральных данных высокого пространственного разрешения (Alos, Rapideye). Рассмотрены характерные особенности спектрального отражения растительности и вегетационные индексы для анализа жизнеспособности растительности. Проведены структуризация растительных сообществ исследуемой территории и привязка типовых выделов к классам GlobCover, принятым за основу. Изучены возможности многомерной классификации спектральных данных на основе данных высокого пространственного разрешения в контексте изучаемой территории и классов GlobCover. Получены карты растительного покрова на основе обучающих выборок и максимально правдоподобной классификации. Исследована динамика растительности (2009–2012) на отдельных участках территории строящихся объектов космодрома «Восточный». В том числе сделаны уточнения, связанные с развитием инфраструктуры, сведением древесной растительности и др. Предложен новый метод получения карт растительности на основе использования глобальной цифровой космокартографической основы и снимков высокого пространственного разрешения для искомым локальных участков.

Ключевые слова: *стресс растительности, вегетационные индексы, типизация растительных комплексов, глобальная космокартографическая основа, снимки высокого разрешения, мультиспектральная классификация.*

A. V. PUZANOV*, **YU. M. TSIMBALEI***, **I. A. ALEKSEEV****,
N. M. KOVALEVSKAYA*, **T. A. PLUTALOVA***

* Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul, 665038, Russia, puzanov@iwep.ru, zimbur@iwep.ru, nelleyk@mail.ru, denisova_tg@mail.ru

** Blagoveshchensk State Pedagogical University, ul. Lenina, 104, Blagoveshchensk, 675000, Russia, igoralex20071@mail.ru

REMOTE SENSING STUDY OF VEGETATION COVER DURING CONSTRUCTION WORK (A CASE STUDY OF THE TERRITORY OF VOSTOCHNYI COSMODROME)

A new technique for compiling vegetation maps on the basis of two-stage technology is presented. It includes a preliminary assessment of the state of vegetation, and a classification with training samples with the simultaneous use of the digital basemap (GlobCover, 2009) and multispectral images of very high spatial resolution (Alos and Rapideye). We examine the specific features of spectral reflection of vegetation and the vegetation indices for the analysis of vegetation viability. We developed the structuring of plant communities of the study area and the referencing of standard types to the GlobCover classes used as the basis. The possibilities of a multispectral classification have been studied on the basis of very high resolution images in the context of the study territory and the GlobCover classes. Land cover maps are obtained on the basis of training samples and the most plausible classification. The vegetation dynamics (2009–2012) has been investigated for some areas of Vostochnyi Cosmodrome occupied by facilities under construction. Specifically, updates were made concerning infrastructure development, the devastation of woody vegetation, etc. A new method of obtaining vegetation maps is proposed, based on using a global digital basemap and high spatial resolution images for the desired local areas.

Keywords: *vegetation stress, vegetation indices, types of vegetation community, global digital basemap, remote sensing basemap, high-resolution images, multispectral classification.*

© 2018 Пузанов А. В., ЦимбалеЙ Ю. М., Алексеев И. А.,
Ковалевская Н. М., Плуталова Т. А.

ВВЕДЕНИЕ

Из всех компонентов экосистемы растительный покров одним из первых реагирует на изменения окружающей среды. Вместе с тем, согласно данным многочисленных исследований, антропогенные нагрузки, вызывающие стресс и снижение жизнеспособности растительности, влияют на спектральные характеристики растительного покрова, что может быть использовано в качестве индикатора интенсивности внешнего воздействия на природную среду [1, 2].

Возрастающие возможности регулярного спутникового мониторинга земной поверхности и доступность данных дистанционного зондирования (ДДЗ) способствуют развитию новых технологий картографирования растительности. Прежде всего это касается ДДЗ, полученных в оптическом диапазоне длин волн с низким пространственным разрешением (ПР): Envisat-MERIS [3], ПР до 300 м, Terra/Aqua-MODIS [4] и SPOT-Vegetation [5], ПР до 1000 м.

На их основе создан ряд информационных продуктов как глобального, так и регионального уровня [6, 7], которые могут служить космокартографическими основами для проведения более детального картографирования растительности с использованием локальных данных высокого пространственного разрешения.

Отклик растительности на внешние воздействия фиксируется в дистанционных материалах, что позволяет использовать разновременные съемки для мониторинга состояния природной среды, в том числе и в процессе строительства масштабных объектов.

Цель представленной работы — анализ данных дистанционного зондирования земной поверхности и использование вегетационного спектрального анализа для качественной оценки уровня антропогенной нагрузки на природную среду, а также применение многомерной классификации данных высокого пространственного разрешения для мониторинга и количественного анализа изменений состояния растительного покрова как индикатора антропогенной нагрузки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования представляет собой территорию района существующих и строящихся объектов наземной инфраструктуры космодрома «Восточный» общей площадью около 209 км², приуроченную к восточной части Амурско-Зейской равнины в междуречьи рек Амура и Зеи, сложенной аллювиальными галечниками, песками и суглинками с прослоями и линзами глин поймы и надпойменных террас р. Зея. Абсолютные высоты 166–272 м. Модельный участок детальных исследований площадью около 6 км² находится в западном борту долины Зеи. Рельеф холмисто-увалистый, сильно расчлененный долинами ее притоков Большой Пёры и Оры и впадающих в них более мелких водотоков, текущих в многочисленных долинообразных понижениях, подвергающихся заболачиванию [8–10].

Климат региона резко континентальный с чертами муссонности умеренного климатического пояса, что определяет его гумидность и локализацию в пределах области остепненных смешанных лесов бореальной зоны [8–10]. Территория космодрома находится в пределах подзоны хвойно-широколиственных (смешанных), подтаежных (суббореальных) и южнотаяжных лесов лесной зоны [8–10] и относится к Амурской провинции хвойно-широколиственных лесов. Основу растительности составляют приуроченные к более возвышенным участкам территории светлохвойно-широколиственно-мелколиственные леса с разнообразным травяным покровом и высоким уровнем антропогенных преобразований на бурых лесных почвах, подбурях, лугово-бурых почвах, агроземах, урбаноземах и скелетизированно-субстратных комплексах.

В физико-географическом отношении Амурско-Зейская равнина расположена в пределах Амурско-Зейской провинции Амурско-Сахалинской физико-географической страны [11, 12] и приурочена к Амурско-Суннэнь-Хэцзянскому массиву [13].

Для изучения состояния естественной растительности территории космодрома использовались спектральные методы дистанционного зондирования и многомерная классификация с обучением в применении к оптическим снимкам высокого ПР, полученным на основе съемочных спутниковых аппаратов Alos (10 м) и Rapideye (5 м).

Исследование проводилось в два этапа. На предварительном этапе использовались спектральные методы дистанционного зондирования и расчет вегетационных индексов с учетом уникальной особенности съемочной аппаратуры спутника Rapideye — наличия в составе полного набора каналов крайнего красного канала: синий (B), 440–510 нм; зеленый (G), 520–590 нм; красный (R), 630–690 нм; крайний красный (RE), 690–730 нм; ближний инфракрасный (NIR), 760–850 нм. Это позволило

провести предварительный анализ состояния территории и установить относительное понижение жизнеспособности растительного покрова на отдельных участках.

На втором этапе проводилась многомерная классификация снимков Alos и Rapideye, в результате которой были получены детальные карты растительности исследуемых участков. Поскольку в качестве картографической основы для анализа и обработки использовалось глобальное растровое покрытие GlobCover с классификатором LCCS (Land Cover Classification System) сельскохозяйственного и продовольственного управления ООН [14], классы искомым объектов также соответствуют LCCS-классификатору.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ

Отражение и поглощение растительностью падающих солнечных лучей зависят от длины волны света. Спектр здоровых зеленых листьев соответствует диапазону излучения 400–1000 нм [15].

В интервале длин волн 400–700 нм световой поток поглощается хлорофиллом, составляющим большую часть пигмента листа и обеспечивающим процесс фотосинтеза. Хлорофилл поглощает солнечные лучи синей (440–510 нм) и красной (630–690 нм) частей спектра. Отражение солнечных лучей в зеленой части спектра обуславливает зеленый цвет здоровой листовой и небольшой максимум в соответствующем диапазоне (520–590 нм).

В ближнем инфракрасном (БИК, 760–850 нм) диапазоне отражательная способность растительности определяется внутренней клеточной структурой мягкой ткани листа. В этом интервале отражение солнечной энергии наиболее сильно, его величина составляет от 30 до 70 % падающего потока излучения в зависимости от вида растительности.

Крайний красный диапазон расположен между красным и БИК-диапазонами. Он охватывает часть спектра, где отражательная способность зеленой растительности резко возрастает при переходе от красного к БИК-диапазону независимо от вида растительности [16].

Эти характерные особенности спектрального отражения позволяют использовать космические снимки для оценки состояния растительности на основе вычисления спектральных соотношений в элементах растров, получивших общепринятое название «вегетационные индексы». В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются эмпирическим путем, исходя из целей исследований и особенностей спектральной отражательной способности растительности.

Наиболее известный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), или нормализованный разностный индекс растительности, вычисляется по следующей формуле [17–19]:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R), \quad (1)$$

где NIR — коэффициент отражения в БИК-спектральной зоне, R — в красной.

Для зеленой растительности NDVI обычно принимает положительные значения, но не позволяет проводить четкое различие между здоровой и поврежденной растительностью.

Для анализа жизнеспособности растительности более эффективен индекс NRGDVI (Normalized Red Green Difference Vegetation Index), подробно исследованный в [16]:

$$NRGDVI = (R - G)/(R + G), \quad (2)$$

где R — коэффициент отражения в красной спектральной зоне, G — в зеленой.

Численное граничное значение между жизнеспособным и нежизнеспособным состояниями растительного покрова представляет собой $NRGDVI = 0$. Для здоровой зеленой растительности NRGDVI принимает отрицательные значения, для поврежденной — положительные.

Другой индекс, эффективный для анализа состояния растительности, связан с коэффициентом отражения в крайнем красном диапазоне. Поскольку световые лучи интенсивно поглощаются хлорофиллом в красном диапазоне и сильно отражаются структурой листа в БИК-диапазоне, одновременные изменения содержания хлорофилла и структуры листа влияют на коэффициент отражения в крайнем красном диапазоне. Таким образом, он особенно важен для определения состояния растительности и используется для расчета индекса NDVIRE (Normalized Difference Vegetation Index Red Edge), чувствительного к изменениям содержания хлорофилла и структуры листа [20]:

$$NDVIRE = (NIR - RE)/(NIR + RE), \quad (3)$$

где NIR — коэффициент отражения в БИК-спектральной зоне, RE — в крайней красной.

Для зеленой растительности NDVIRE принимает положительные значения от 0,2 до 0,9: чем больше зеленая фитомасса, тем выше индекс.

Для оценки экологического состояния территории при масштабировании может быть использовано любое количество уровней градаций, соответствующее битовой системе кодирования полутоновых оттенков; при этом целесообразно одинаковое масштабирование вычисляемых параметров в разновременных ДДЗ для оценки динамики изменений растительного покрова. Нами были использованы 16 уровней, что соответствует шагу повреждения растительности в 6,25 % (рис. 1). Каждому уровню, привязанному к определенному участку цветовой гаммы на шкале интенсивности, соответствует определенный процент повреждения, что позволяет считать такие оценки не только качественными, но, в определенной степени, и полуколичественными.

КОСМОКАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Глобальное растровое покрытие GlobCover, полученное на основе мозаик космоснимков спектрометра MERIS/EnviSat (300 м), может служить картографической основой для последующей детализации на основе использования многоспектральных снимков высокого ПРО. Ее результатами стали карты отдельных территорий, созданные на основе покрытия GlobCover с помощью методов локаль-

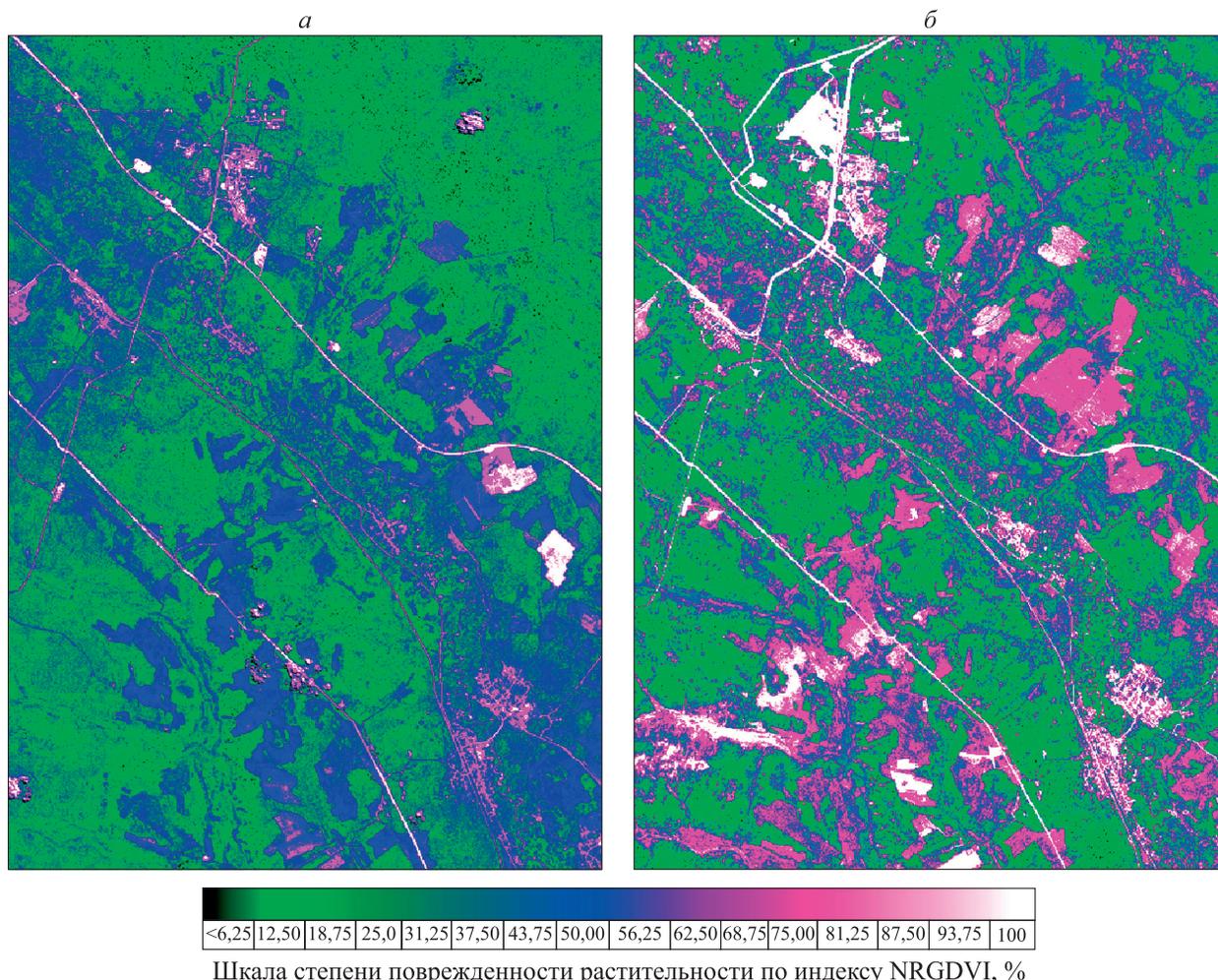


Рис. 1. Сравнительный дистанционный анализ степени поврежденности растительности.

a — NRGDVI — карта степени поврежденности растительности по состоянию на 16.08.2011 (м-б 1:170 000);
б — NRGDVI — карта степени поврежденности растительности по состоянию на 26.08.2012 (м-б 1:170 000).

Таблица 1

Классы LCCS (Land Cover Classifications System) с идентификаторами (ID) на основе GlobCover

ID	Описание	Цвет
11	Пойменные или орошаемые пахотные угодья	
14	Богарные пахотные угодья	
20	Мозаичное размещение: пахотные земли (50–70 %)/естественная растительность (луга, кустарники, лес) (20–50 %)	
30	Естественная растительность (лесолуга, кустарники, лес) с мозаичным размещением (50–70 %) / пахотные земли (20–50 %)	
40	Проективное покрытие >15 % широколиственных вечнозеленых и / или полулиственных лесов (>5 м)	
50	Проективное покрытие >40 % широколиственных листопадных лесов (>5 м)	
60	Проективное покрытие 15–40 % широколиственных листопадных лесов (>5 м)	
70	Проективное покрытие >40 % хвойных вечнозеленых лесов (>5 м)	
90	Светлохвойные вечнозеленые (сосна) леса (h > 5 м) с проективным покрытием 15–40 %	
100	Смешанные широколиственные (дуб монгольский) и светлохвойные (сосна обыкновенная, лиственница даурская) леса (h > 5 м) с проективным покрытием >15 %	
110	Мозаичное размещение: лес/кустарники (50–70 %)/луга (20–50 %)	
120	Мозаичное размещение: луга (50–70 %)/лес/кустарники (20–50 %)	
130	Проективное покрытие >15 % кустарников (<5 м)	
140	Лесолуга с общим проективным покрытием >15 %	
150	Редкая (редкоlesia) растительность (деревья, кустарники, лесолуга) с общим проективным покрытием <15 %	
160	Проективное покрытие >40 % регулярно затопляемых лиственных лесов — пресная вода	
170	Проективное покрытие >40 % регулярно затопляемых широколиственных полулиственных и/или вечнозеленых лесов — соленая вода	
180	Лесолуга, кустарники, деревья на регулярно затопляемых или переувлажненных почвах с проективным покрытием >15 %	
190	Селитебные и прилегающие к ним территории (застройка >50 %)	
200	Участки без растительности («голое пятно»)	
210	Водные объекты	
220	Вечные снега и льды	

Примечание. Жирным шрифтом выделены классы, идентифицированные на изучаемом объекте.

ной адаптивности [7, 21, 22]. Достоинство такого подхода — более высокий уровень точности последующей классификации, выполняемой для отдельной искомой территории.

В табл. 1 представлен перечень классов LCCS, использованных в GlobCover. Применительно к искомой территории исследования описание растительного покрова соответствует классам с идентификаторами ID = 30, 90, 100, 140, 150, 180, 190, 210 (в таблице выделены жирным шрифтом), которые были детально изучены и охарактеризованы в следующем разделе.

Обзор алгоритмов классификации типов земного покрова по спутниковым данным позволяет сделать заключение, что многомерный параметрический подход наилучшим образом соответствует требованиям локальной адаптивности [22, 23]. В его основу положено формирование для определенной территории пространственно-распределенного набора спектральных сигнатур эталонных объектов с известной принадлежностью к одному из заданных классов. Алгоритм классификации исходит из предположения нормального распределения признаков распознавания, оценки параметров которого формируют сигнатуры классов. Сигнатура каждого класса включает в себя параметры вектора средних значений и ковариационной матрицы признаков. В качестве источников данных для формирования обучающей выборки использованы картооснова GlobCover и данные наземных обследований.

Для получения точной обучающей выборки использовался итерационный метод, включающий параметрическую классификацию на основе максимума правдоподобия (МП) в среде ERDAS IMAGINE и внесение исправлений в обучающую выборку на каждой последующей МП-итерации. Исправление обучающей выборки на основе знаний экспертов о местности стало существенной частью

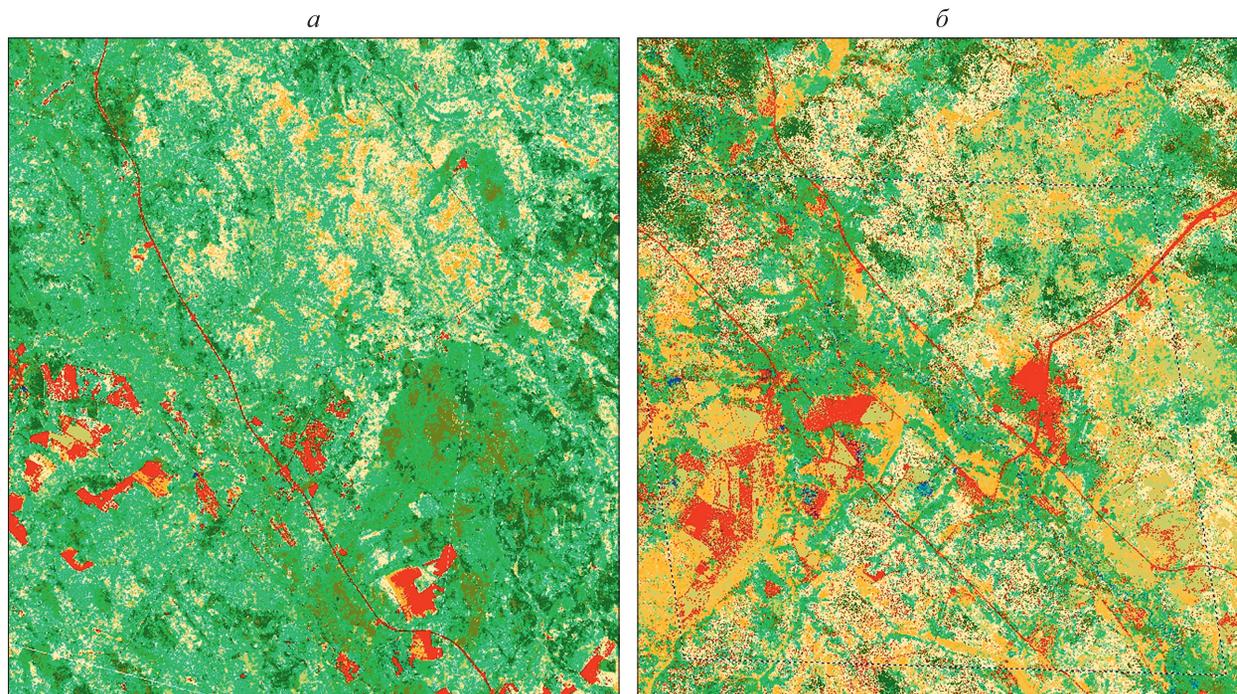


Рис. 2. Космокарты растительного покрова (м-б 1:250 000) по данным Alos (10 м, 29.05.2009) (а) и Rapideye (5 м, 30.07.2012) (б).

Цветовое обозначение классов растительности см. табл. 1.

процесса классификации. На основе описанной технологии были получены серии космокарт классов растительности промышленно-эксплуатационного комплекса (ПЭК) «Космодром «Восточный»» (см. табл. 1): Alos — карта растительности территории космодрома «Восточный», отражающая пространственное распределение основных типов (классов) растительности территории (по состоянию на 2009 г. в соответствии с годом съемки) (рис. 2, а), и Rapideye — по состоянию на 2011–2012 гг. в соответствии с годами съемки (см. рис. 2, б).

Для обеспечения спутникового мониторинга растительного покрова территории как индикатора уровня антропогенной нагрузки на природную среду, меняющейся по мере продвижения строительства космодрома от фонового уровня (2009 г.) до начала (2012 г.) и продолжения строительства, использовался анализ погодичной (2009–2012 гг.) динамики спектрально-отражательных свойств различных типов растительности.

Таким образом, на основе классификации с обучением в многомерном пространстве спектральных признаков, полученных по данным спутников высокого ПРО Rapideye и Alos, были созданы детальные рабочие карты растительного покрова изучаемой территории на фиксированный временной срез, соответствующий времени космосъемки. Количественная оценка динамики искомых классов опиралась на подсчет изменения площадей занятых ими поверхностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали исследования, оба использованных вегетационных индекса (как NRGDVI, так и NDVIRE) фиксируют заметные изменения состояния растительности территории ко времени съемок 2011 и 2012 гг. (см. рис. 1).

На рис. 1 представлен результат анализа состояния растительности той же территории на основе расчета NRGDVI-уровней поврежденности: август 2011 г. (см. рис. 1, а) по сравнению с августом 2012 г. (см. рис. 1, б). Высокие значения NRGDVI соответствуют розово-белым полутонам и указывают на то, что растительность испытывает большие нагрузки повреждения.

Таким образом, на этом шаге исследования были зафиксированы качественные изменения растительного компонента экосистемы.

Важнейшим шагом количественных исследований было изучение и структуризация растительных сообществ модельного участка и привязка типовых выделов к принятым за основу классам системы GlobCover (см. табл. 1).

1. ID = 30. Естественная растительность (лесолуга, кустарники, лес) с мозаичным размещением (50–70 %) пахотных земель (20–50 %) занимает незначительные по площади участки в пределах площадок мезоводоразделов и днищ сухих долин. Лесолуга формируются сочетанием лиственницы даурской (*Larix gmelinii*), берез плосколистной (*Betula platyphylla*) и даурской (*B. dahurica*), нескольких видов ив (*Salix*) и осок (*Carex*). В структуре естественной лесной растительности равнозначно представлены чистые лиственничники, сосняки, дубняки, смешанные светлехвойно (лиственница, сосна (*Pinus*))-широколиственно-кустарниковые и лесолуговые (ольха (*Alnus*), ивы) сообщества.

2. ID = 90. Светлехвойные лесные сообщества образованы светлехвойно (сосна)-мелколиственно-широколиственно-кустарниковыми ($h > 5$ м), мелко-лиственно-кустарниковыми лесными, рудеральными кустарниковыми ассоциациями с проективным покрытием 15–40 %. При этом доля чистых сосняков (без участия лиственницы даурской) составляет менее 30 % от всей совокупности лесных сообществ названного типа, а постпирогенных комплексов — превышает 50 %.

3. ID = 100. Смешанные широколиственные и светлехвойные леса ($h > 5$ м) с проективным покрытием >15 % представлены сочетанием типичных смешанных (лиственница, сосна, дуб монгольский (*Quercus mongolica*), береза даурская) лесных, смешанных (сосна, дуб монгольский, береза плосколистная, леспедеца двуцветная (*Lespedeza bicolor*)) лесных постпирогенных с доминированием березы плосколистной, посттехногенных (сосна, дуб монгольский, береза плосколистная, ива Миябе (*Salix miyabeana* Seemen) и nipпонская (*S. nipponica* Franch. Et Savar.)) сообществ.

4. ID = 140. Лесолуга с общим проективным покрытием >15 % в пределах территории ПЭК оконтуривают смешанные леса, занимая окраинные участки (преимущественно денудационные и оплывные склоны, наклоненные до 25° площадки) мезоводораздельных поверхностей, распространяясь также на наиболее сухие возвышенные участки площадок днищ долин. Лесолуга образованы сочетанием отдельно произрастающих растений лиственницы даурской, сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), зарослями ольхи, ив Миябе и скрытой (*Salix abscondita*), березы плосколистной, леспедецы двуцветной, рододендрона даурского (*Phododendron dauricum*), голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum*), багульника (*Ledum*), разнотравья и осок.

5. ID = 150. Разреженная растительность (так называемые редколесья), с проективным покрытием менее 15 %. Нижний и средний ее ярусы образованы луговой растительностью с вкраплением отдельных деревьев и кустарников или их групп. Среди редколесий доминируют постпирогенные ассоциации березы плосколистной и дуба монгольского, а также леспедецы двуцветной и осок. Кроме того, сильно разреженные (отдельно произрастающие) группы сосны обыкновенной и лиственницы даурской создают систему сообществ с фоном, образованным леспедецевыми, рододендроновыми или багульниковыми ассоциациями.

6. ID = 180. Лесолуга, кустарники, деревья на регулярно затапливаемых или переувлажненных почвах (вода пресная, солоноватая или соленая) с проективным покрытием >15 % занимают наиболее пониженные, котловинообразные участки в пределах площадок днищ долин, в том числе и сухих (так называемых падей). Они образованы либо разреженными группами и отдельно стоящими растениями лиственницы даурской, березы плосколистной с багульником, рододендроном даурским в подлеске, либо ивами, ольхой и багульником, осоками и мхами (сфагнум (*Sphagnum*), кукушкин лен (*Polytrichum*)) в нижнем ярусе.

7. ID = 190. Антропогенные объекты (объекты линейной и площадной инфраструктуры) и антропогенно преобразованные (селитебные) территории (с застройкой более 50 %).

8. ID = 210. Водные объекты занимают незначительные по площади участки и служат реперными для дешифрирования и интерпретации изображений на космоснимках.

Сравнительный анализ полученных космокарт классов растительности показывает, что на территории космодрома в период с 2009 по 2012 г. зафиксированы следующие изменения (табл. 2, рис. 3). Наибольшая нагрузка пришлась на классы светлехвойных (ID = 90) и смешанных лесов (ID = 100) с сокращением их площадей в 6 и 1,7 раза соответственно. Основная причина — пирогенез, первоочередное выгорание светлехвойных пород деревьев и развитие постпирогенных мелколиственных сообществ, в связи с чем масштаб деградации первых более высок. К тому же «выпадение» светлехвойных пород деревьев ведет к переходу соответствующих участков из класса хвойной с ID = 90 в класс смешанной растительности (ID = 100). Помимо этого, площади класса смешанной растительности увеличиваются и за счет происходящих процессов начала восстановления ландшафтно-биоценоtiche-

Таблица 2

Антропогенные изменения структуры растительного покрова модельного участка космодрома «Восточный»

ID	Описание классов	Площадь классов, %		Степень измененности, раз
		2009 г.	2012 г.	
30	Естественная растительность (лесолуга, кустарники, лес) с мозаичным размещением (50–70 %)/пахотные земли (20–50 %)	5,7	17,3	+3
90	Светлохвойные вечнозеленые (сосна) леса ($h > 5$ м) с проективным покрытием 15–40 %	12,5	2,1	–6
100	Смешанные широколиственные (дуб монгольский) и светлохвойные (сосна обыкновенная, лиственница даурская) леса ($h > 5$ м) с проективным покрытием >15 %	12,5	7,2	–1,7
140	Лесолуга с общим проективным покрытием >15 %			
150	Редкая (редколесья) растительность (деревья, кустарники, лесолуга) с общим проективным покрытием <15 %			
180	Лесолуга, кустарники, деревья на регулярно затопляемых или переувлажненных почвах с проективным покрытием >15 %			
190	Селитебные и прилегающие к ним территории (застройка >50 %)	1,9	13,7	
210	Водные объекты	0	0,7	

Примечание. Жирным шрифтом выделены классы LCCS с наиболее заметными изменениями площадей: «+» — с увеличением, «–» — с уменьшением.

ской структуры [10], хотя за рассматриваемый короткий промежуток времени изменения не столь существенны. Другой фактор воздействия — это освоение занимаемых данными сообществами наиболее благоприятных местоположений для развития инфраструктуры объекта.

За счет деградации лесных сообществ в 3–3,5 раза возросли площади естественных классов (ID = 30) антропогенно осваиваемых (распашка) и чисто лесолуговых (ID = 140) комплексов.

Выявлено, что за период 2009–2012 гг. на модельном участке произошло резкое (в 7,2 раза) увеличение количества антропогенных объектов (селитебных территорий и объектов инфраструктуры) и занимаемой ими площади. Класс редколесий (ID = 180), занимающий значительную часть анализируемой территории (23–25 %), остался практически незатронутым в площадном отношении.

Что касается класса переувлажненных участков, то его площадную динамику следует отнести на счет естественной увлажненности сезона и года. На участках с достаточным и избыточным естественным увлажнением от года к году наблюдаются заметные колебания площадей, занятых кустарниковой и, особенно, луговой растительностью. В частности, в 2011 г. отмечалось подтопление поймы, и на него приходилась максимальная площадь класса растительности на переувлажненных участках. В то же время в 2012 г. зафиксирована обратная ситуация — небольшое количество осадков привело к сокращению площади данного класса растительности.

Таким образом, за период 2009–2012 гг. на космоснимках территории космодрома отразились качественные и количественные изменения структуры растительного покрова, а рассмотренная методика анализа ДДЗ позволила связать их с уровнем и характером антропогенной нагрузки.

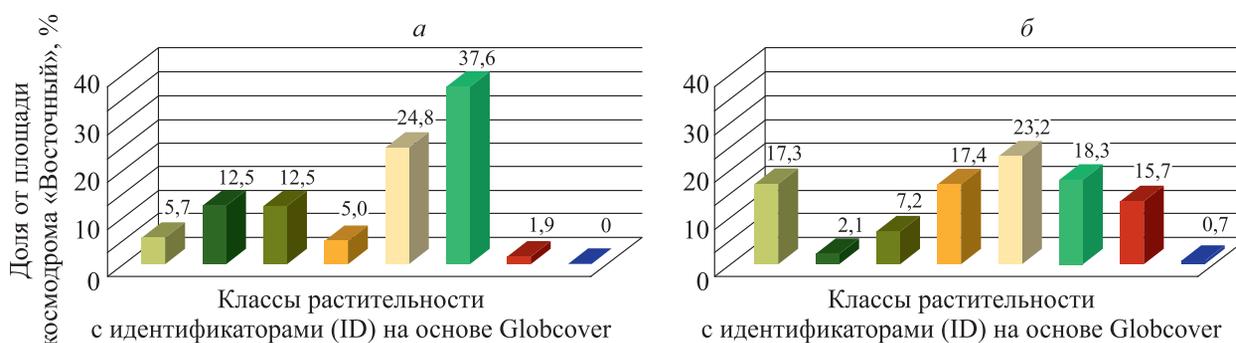


Рис. 3. Результат классификации типовых выделов (см. табл. 1) по данным Alos (29.05.2009) (а) и Rapideye (30.07.2012) (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционное изучение характера и интенсивности изменений растительного покрова в районах крупномасштабного строительства представляет собой эффективное средство экологического мониторинга и контроля за уровнем воздействия на природную среду.

Проведенные исследования продемонстрировали эффективность использования специальных вегетационных индексов на предварительном этапе качественной оценки состояния растительности и многомерной спектральной классификации для выделения отдельных классов растительного покрова на основе использования глобальной картографической основы (GlobCover) и оптических данных высокого пространственного разрешения (Rapideye, Alos) при количественной оценке уровня воздействия на окружающую среду.

Перспективы дальнейшего более эффективного развития детального экологического картографирования растительности видятся в использовании возможностей новой спутниковой группировки Sentinel, позволяющей получать данные, отражающие динамику растительности, с беспрецедентным сочетанием спектрального (Sentinel-1, 2, 3), пространственного (Sentinel-2) и временного (Sentinel-3) разрешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nielsen A. A., Conradsen K., Simpson J. J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: new approaches to change detection studies // *Remote Sensing of Environment*. — 1998. — Vol. 64, N 1. — P. 1–19.
2. Astola H., Bounsaythip C., Ahola J., Hämäläinen T., Parmes E., Sirro L., Veikkanen B. Highforest — Forest parameter estimation from high resolution remote sensing data // *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remot Sensing XXth Congress*. — 2004. — Vol. 35, part B. — P. 335–341.
3. Envisat-MERIS [Электронный ресурс]. — <https://earth.esa.int/web/guest/data-access/online-archives> (дата обращения 24.06.2016).
4. Terra/Aqua-MODIS [Электронный ресурс]. — <http://lpdaac.usgs.gov> (дата обращения 24.06.2016).
5. SPOT-Vegetation [Электронный ресурс]. — <http://www.vgt.vito.be/index.html> (дата обращения 24.06.2016).
6. Баргалева 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.
7. Moysiadis A., Perakis K. European land cover mapping systems for the natural and urban environment // *FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN*. — 2014. — N 23, 11 A. — P. 2814–2818.
8. Алексеев И. А. Ландшафтное районирование и комплексная оценка ландшафтов южной части Амурско-Зейского междуречья: научное издание. — Благовещенск: Изд-во Благовещ. пед. ун-та, 2005. — 185 с.
9. Алексеев И. А. Основы качественной оценки ландшафтных выделов (на примере территории юга Амурско-Зейского междуречья). — Благовещенск: Изд-во Благовещ. пед. ун-та, 2006. — 148 с.
10. Научно-технический отчет «Ландшафтно-экологический анализ (включая материалы сезонных экспедиционных исследований) эталонных мониторинговых площадок территории позиционного района объектов космодрома и сопредельных территорий» в рамках НИР «Восток-Экомониторинг» подпрограммы «Создание обеспечивающей инфраструктуры космодрома «Восточный»» федеральной целевой программы «Развитие российских космодромов на 2006–2015 годы» // *Фондовые материалы Благовещ. пед. ун-та и Ин-та водных и эколог. проблем СО РАН*. — 2012. — 212 с.
11. Сочава В. Б. Опыт деления Дальнего Востока на физико-географические области и провинции // *Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока*. — 1962. — Вып. 1. — С. 23–33.
12. Раковская Э. М., Давыдова М. И. *Физическая география России*. — М.: Владос, 2001. — 288 с.
13. *Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий*. М-б 1:2 500 000. Объяснительная записка / Л. И. Красный, А. С. Вольский, И. А. Васильев, Пэн-Юньбяо. — СПб.; Благовещенск; Харбин: Санкт-Петербург. картограф. фабрика Всерос. науч.-исслед. геолог. ин-та, 1999. — 135 с.
14. Gregorio A. D. Land Cover Classification System (LCCS), version 2: Classification Concepts and User Manual // *Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2016* [Электронный ресурс]. — <http://www.fao.org/131a-i5232e.pdf> (дата обращения 24.06.2016).
15. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. — М.: Мир, 1988. — 343 с.
16. Motohka T., Nasahara K. N., Oguma H., Tsuchida S. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology // *Remote Sens.* — 2010. — N 2. — P. 2369–2387.
17. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*. — 1973. — Vol. 1. — P. 309–317.

18. Gallo Ji. L. K., Eidenshink J. C., Dwyer J. Agreement evaluation of AVHRR and MODIS 16-day composite NDVI data sets // International Journ. of Remote Sensing. — 2008. — N 29 (16). — P. 4839–4861.
19. Wang H. S., Lin H., Chen J. S., Chen F. L. Study on the relationship between sub-pixel percentage cover and multi-temporal NDVI // International Journ. of Remote Sensing. — 2012. — N 33 (17). — P. 5615–5628.
20. Eitel J. U. H., Vierling L. A., Litvak M. E., Long D. A., Schulthess U., Ager A. A., Krofcheck D. J., Stoscheck L. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland // Remote Sensing of Environment. — 2011. — Vol. 115, N 12. — P. 3640–3646.
21. ESA GlobCover Version 2.3 2009 300m resolution Land Cover Map [Электронный ресурс]. — <http://due.esrin.esa.int/page-globcover/> (дата обращения 24.06.2016).
22. Барталев С. А., Бурцев М. А., Лупян Е. А., Прошин А. А., Уваров И. А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: Изд-во Ин-та космич. исслед. РАН, 2005. — С. 131–139.
23. Ковалевская Н. М., Королюк А. Ю., Дрост Х. Дж., Григорас И., Булатов В. И., Кириллов В. В., Ротанова И. Н., Черных Д. В. Использование космической информации для картирования растительности (район оз. Чаны) // Сиб. экол. журн. — 2005. — Т. 12, № 2. — С. 215–220.

Поступила в редакцию 21 октября 2016 г.
