



УДК 528.8:58.002

Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова.

КОМАРОВА

Анна Федоровна

Гринпис России, anna.komarova@greenpeace.org

ЖУРАВЛЕВА

Илона Вячеславовна

Гринпис России, ilona.zhuravleva@greenpeace.org

ЯБЛОКОВ

Василий Михайлович

Гринпис России, vasily.yablokov@greenpeace.org

Ключевые слова:

космические снимки
картографирование
растительные сообщества
методика исследований

Аннотация: Показаны возможности использования мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли для целей изучения растительного покрова. В статье рассмотрено использование открытых данных видимого и инфракрасного диапазонов. Представлены возможные пути бесплатного получения космических снимков разного разрешения, их характеристики и область применения. Изложены основные методы анализа космических снимков. Информация конкретизирована литературными данными, а также на примере проектов, выполненных в Гринпис России.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. В. Майлс

Рецензент: А. А. Коросов

Получена: 04 марта 2016 года

Подписана к печати: 05 апреля 2016 года

Введение

Анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – перспективный метод изучения растительного покрова (Хе et al., 2008; Номолова et al., 2013). Космические снимки отличаются от всех других пространственных данных (топографических карт, лесоустроительных карт и др.) разнообразием информации, которую можно получить на их основе, большей доступностью и актуальностью за счет регулярности обновления. Они незаменимы как

основа для экстраполяции данных в региональных и глобальных исследованиях, а также в случаях, когда необходимо проследить изменение свойств растительного покрова во времени (Расказов, Галаганова, 2014), в мониторинговых исследованиях и при анализе угроз (Пузаченко и др., 2011; Климина, Остроухов, 2011; Gavier-Pizarro et al., 2012; Nagendra et al., 2013; Petrou et al., 2015; Chen et al., 2015; Turner et al., 2015; Buchanan et al., 2015). Как следствие, в по-

следние годы появляется все больше исследований растительного покрова и его отдельных свойств на основе данных дистанционного зондирования (Барталев, Лупян, 2013). Космические снимки заняли свое законное место в изучении лесных сообществ (McRoberts et al., 2010; Banskota et al., 2014 и мн. др.), широко применяются для изучения водной и околородной растительности (Silva et al., 2008 и др.), растительного покрова болот (Ozesmi, Bauer, 2002; Krankina et al., 2008; Klemas, 2011; Антипин, Токарев, 2012; Gallant, 2015), высокогорий и тундр (Stow et al., 2004). Активно развиваются методы оценки биологического разнообразия (Gould, 2000; Turner et al., 2003; Gillespie et al., 2008; Исаев, Черненькова, 2009; Rocchini et al., 2010; Черненькова и др., 2012; Kuenzer et al., 2014; Leitão et al., 2015; Rocchini et al., 2015a; Turner et al., 2015) и распространения отдельных видов, как правило, редких (Елсаков и др., 2010; Parviainen et al., 2013; Ханов, Пшегусов, 2014; Cord et al., 2014 и др.) или инвазивных (Huang, Asner, 2009; Bradley, 2014; Rocchini et al., 2015b и др.) с привлечением ДЗЗ. Экскурс в историю использования дистанционных методов в изучении растительного покрова и частичный обзор отечественных работ в этой области приведены в статье Т. А. Поповой и И. А. Бычковой (Попова, Бычкова, 2011). Предложена общая схема организации мониторинга природных объектов с использованием ДЗЗ (Пузаченко и др., 2008).

Вместе с тем, на наш взгляд, в среде специалистов-биологов возможности анализа космических снимков до сих пор используются недостаточно. Вероятно, это связано с недостатком обобщенной информации об этом инструменте и примерах его использования, а также отсутствием понятного алгоритма, как выбрать данные для решения конкретной задачи; какие методы и программное обеспечение могут оказаться полезными. В данной статье показано, где можно бесплатно получить космические снимки и консультацию по их использованию и какое программное обеспечение можно использовать для решения различных задач.

Статья дает представление о способах анализа данных дистанционного зондирования для изучения растительного покрова, основанное на литературных источниках и опыте проведения ряда исследова-

тельских проектов с использованием ДЗЗ в лесном и ГИС-отделах Гринпис России, на кафедре геоботаники биологического факультета и на географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова.

Цель статьи – представить обзор наиболее часто используемых для картографирования и мониторинга данных дистанционного зондирования. Рассмотрены именно открытые данные, при выборе методов для рассмотрения отдавалось предпочтение тем из них, алгоритмы которых реализованы в программных пакетах, доступных для получения некоммерческими или научными организациями на безвозмездной основе. Отдельный раздел статьи посвящен методам оценки точности полученного с помощью ДЗЗ результата, что особенно важно при исследовании растительных сообществ.

Безусловно, количество и разнообразие данных дистанционного зондирования и методов их анализа невозможно полностью рассмотреть в одной статье; кроме того, статья предназначена именно для знакомства с данными и методами ДЗЗ в применении к исследованию растительного покрова. Поэтому за пределами обсуждения остались данные низкого разрешения, гиперспектральные данные, имеющие очень высокую стоимость, радарные данные, использование которых сейчас набирает популярность, но пока все-таки уже, чем данных в оптическом диапазоне; не рассмотрены вопросы радиометрической и геометрической (в широком смысле этих терминов) коррекции изображений, очень кратко освещен вопрос спектральных преобразований, не рассматриваются методы автоматизированного анализа изображений, относящиеся к сегментации, т. к. они реже применяются в изучении естественных сообществ и больше используются как метод картографирования антропогенных объектов. Эти вопросы, так же как и большинство обсуждаемых методов, в общем виде подробно рассмотрены в основных учебниках по дистанционному зондированию (Книжников и др., 2004; Чандра, Гош, 2008; Лурье, 2010; Шовенгердт и др., 2010 и мн. др.).

Основные задачи, решаемые с помощью данных дистанционного зондирования

В зарубежной литературе существует ряд обзоров, отражающих использование

данных дистанционного зондирования для решения различных задач в области инвентаризации, мониторинга и охраны растительных сообществ (Xie et al., 2008; Nagendra et al., 2013; Homolova et al., 2013; Kuenzer et al., 2014; Petrou et al., 2015 и др.). В отношении изучения растительного покрова выделим группы задач, в решении которых может существенно помочь использование космических снимков:

1. Инвентаризация растительного покрова, то есть получение первичной информации о его составе и структуре. Это может быть как собственно картографирование в узком смысле (создание карт), так и получение информации о распространении единиц растительного покрова разного масштаба – от формаций до отдельных видов (последнее, как правило, возможно при использовании снимков высокого разрешения (табл. 1) или методами индикационного картографирования – с использованием технологий моделирования распространения видов – Species Distribution Modelling).
2. Количественная оценка, то есть получение метрик, численно отражающих требуемый параметр, на основе спектральных индексов (Kuenzer et al., 2014). С помощью космических снимков можно оценить большое число параметров: биологическое разнообразие, биомассу, сомкнутость крон, фотосинтетическую активность, индекс LAI и даже содержание некоторых элементов, например азота (Homolova et al., 2013).
3. Моделирование и прогнозирование распределения отдельных элементов растительного покрова, изменения границ сообществ и т. д. В этих процессах данные дистанционного зондирования могут выступать как количественные или качественные входные данные или как основа для экстраполяции результатов моделирования.
4. Оценка и картографирование параметров среды (например, влажности почв; водоемов или болот – как мест обитания определенных видов или типов растительности), антропогенного влияния (дороги, вырубки и другие нарушения, влияющие на распределение элементов растительного покрова), угроз.
5. Оценка пространственного распределения характеристик растительного покрова (связности/фрагментированности территории, климатических/производных сообществ), выявление коридоров, пригодных для местообитаний редких видов, и т. п. (Petrou et al., 2015).
6. Мониторинг и оценка изменений характеристик, выявленных методами в пунктах 1–5. Это особенно удобно делать с использованием космических снимков, т. к. каждый космический снимок регистрирует состояние местности на определенный, четко известный момент. За счет этого можно оценивать как нарушения растительного покрова (например, выявлять вырубки), так и сезонную изменчивость сообществ, фенологические константы, выявлять сукцессии или изменение условий местообитания во времени.
7. Совместный ГИС-анализ данных дистанционного зондирования и других данных (например, параметров рельефа, гидросети и т. п.) открывает возможности статистического анализа закономерностей распределения растительного покрова, т. к. на основе космических снимков (в отличие от точечных полевых данных) можно получить пространственно непрерывные данные о встречаемости, например, растительного сообщества.

Нельзя также не упомянуть об удобстве использования ДЗЗ как базового слоя при планировании полевых исследований

или для визуализации результатов исследований.

С другой стороны, важно подчеркнуть тот факт, что методы ДЗЗ имеют ряд ограничений в применении. Так, в работе Nomolova et al. (2013) приведены конкретные примеры задач, которые нельзя решить с помощью обсуждаемых в нашей статье типов космических снимков (например, классификация жизненных форм или определение высоты растений требуют методов активного сканирования; нет данных о достоверном определении соотношения С3/С4-фотосинтеза или содержания фосфора).

В целом в применении к изучению растительного покрова ДЗЗ и ГИС являются лишь одним из методов (зачастую очень мощным, но тем не менее дополнительным). Во многих ситуациях строго необходимы полевые исследования, и именно

они несут первичную информацию, а данные дистанционного зондирования выступают как основа для экстраполяции полевых данных и анализа пространственного распределения характеристик растительных сообществ. Особенно это актуально для нелесных районов, где прямое использование ДЗЗ осложнено большей однородностью растительного покрова, менее четкими границами и небольшим размером элементов (как показано ниже, до сих пор для изучения нелесных сообществ ДЗЗ используются не так широко; тем не менее быстро совершенствуются методы, применимые именно к изучению нелесных сообществ).

В табл. 1 приведены ссылки на работы, посвященные изучению разных элементов растительного покрова с помощью данных дистанционного зондирования.

Таблица 1. Примеры использования данных дистанционного зондирования Земли для изучения растительных сообществ

Объект исследования	Используемые космические снимки				комбинирование снимков разного разрешения
	низкого разрешения (MODIS и др.)	среднего разрешения (Landsat)	среднего разрешения (SPOT, Aster и др.)	высокого разрешения (выше 10 QuickBird, RapidEye, Worldview и др.)	
Картографирование растительности в целом	Барталев др., 2011	и Гаврилюк, Ершов 2012; Дубовик, Якутин 2012; Черосов и др., 2012; Шарикалов, Якутин 2014; Rodriguez-Galiano, Chica-Rivas 2014; Rapinel et al., 2015; Wang et al., 2015	Хворостухин, Кликунов, 2013	Rapinel et al., 2014	et
Леса: древостой	Жарко, Барталев, 2014	и Liu et al., 2008; Архипова, 2013; Karlson et al., 2015			Isaacson et al., 2012
Леса: подчиненные ярусы, биоразнообразие	Tuanmu et al., 2010; Пономарёв и др., 2011	Townsend, Walsh, 2001; Ермаков и др., 2012			

Таблица 1. Продолжение

Используемые космические снимки					
Высокогорные и арктические сообщества	Nilsen et al., 2013; Wang et al., 2015	Barrachina et al., 2015; Chen et al., 2015	Reese et al., 2014	Murray et al., 2010; Polychronaki et al., 2015	Stow et al., 2004; Laurin et al., 2013
Луговые, степные, пустынные сообщества	Schaffrath et al., 2011	Ткачук, 2012; Шабанов и др., 2014; Владимиров и др., 2014; Мячина, 2014; Fassnacht et al., 2015	Hou et al., 2014	Buck et al., 2015; Schuster et al., 2015	Lehnert et al., 2015; Möckel, 2015
Водная и прибрежно-водная растительность				Onojeghuo, Blackburn, 2011; Попова, Бычкова, 2012; White-side, Bartolo, 2015	
Биологическое разнообразие растений (в целом)		Parviainen et al., 2009		Viedma et al., 2012; Camathias et al., 2013; Dalmayne et al., 2013	Rocchini, 2007
Распространение отдельных видов растений (как правило, редких или инвазивных)		Peterson, 2005; Bradley, Mustard, 2006; Gavier-Pizarro et al., 2012; Resasco et al., 2007; Wilfong et al., 2009; Johnston et al., 2012; Somodi et al., 2012		Pouteau et al., 2012; Vanselow, Samimi, 2014	Fuller, 2005; Shouse et al., 2013; Odindi et al., 2014

Оригинальные методы исследований

Проект, подразумевающий использование данных дистанционного зондирования, состоит из нескольких последовательных этапов. Минимальный их набор включает выбор и получение данных дистанционного зондирования (сравнительная характеристика открытых данных приведена в табл. 2), выбор метода анализа ДЗЗ и оценку точности полученного результата. В данном разделе последовательно обсуждается каждый из этапов. В конце раздела эти этапы проиллюстрированы на примере трех проектов, имеющих разный географический охват и исполь-

зующих разные методы анализа космических снимков.

Космические снимки разного разрешения и пути их получения

По пространственному разрешению космические снимки условно делят на несколько групп. Снимки сверхнизкого разрешения (до 1 км) имеют наибольший охват и наименьший период съемки. Такие снимки редко применяются для изучения растительных сообществ.

Низкое разрешение

Снимки низкого разрешения (например, снимки Terra MODIS и Aqua MODIS) ограничено применимы для изучения растительности. Снимки MODIS используют для

Таблица 2. Сравнительная характеристика данных дистанционного зондирования, применимых для изучения растительных сообществ (информация касается данных, находящихся в свободном доступе)

Данные дистанционного зондирования	Пространственное разрешение (видимая и ближняя ИК-части спектра, м)	Размер сцены (км)	Частота съемки (номинальная/примерная частота появления свежих данных в сети Интернет)	Возможность работы со спектральными каналами
Terra/Aqua MODIS	250–1000	2000	2 раза в сутки/мозаики – 1 раз в сутки	При заказе исходных данных
Landsat ETM+, OLI	30	185	16 дней/до 2–3 месяцев	Да (при заказе исходных данных)
Sentinel 2A	10, 20	600	5 дней	Да
TerraLook (на основе снимков Terra Aster)	15	60	1–2 раза в год	Нет
Снимки высокого разрешения	0.7–10 м	Несколько км	В среднем 1 раз в год	Нет

обзорных исследований растительных сообществ в широком географическом охвате (на глобальном и национальном уровнях), для оценки состояния растительности в связи с катастрофическими явлениями (пожары, засуха) или крупномасштабными изменениями (сплошные рубки в северных лесных регионах). В результате получают низкодетальные карты, отражающие общую тенденцию изменения растительности, либо общая схема расположения и достаточно грубые оценки площади объектов. Рабочий масштаб карт (т. е. масштаб карты, на которой объекты будут представлены корректно), полученных по данным MODIS, – порядка 1:1000000.

Среднее разрешение

Наиболее распространенный пример снимков среднего разрешения – снимки серии спутников Landsat. Программа Landsat существует уже более 40 лет, первый спутник серии был запущен в июле 1972 года (Short, 2011). В настоящий момент действуют два спутника серии: Landsat-8 (съемку в видимом и ближнем ИК-диапазонах ведет сенсор OLI) и Landsat-7 (ETM+); второй сенсор не вполне исправен – снимки содержат регуляр-

ные полосы, где данные отсутствуют. С 2008 года все исходные данные, в том числе архивные данные спутников Landsat (сенсоры MSS, TM), доступны бесплатно, в частности на сайте Геологической службы США. Все данные начиная с 1982 г. совместимы между собой без дополнительной обработки.

Снимки Landsat OLI имеют 9 спектральных каналов, 7 из которых: в синем, зеленом и красном диапазонах видимой части спектра, ближний и два средних инфракрасных канала (30 м), а также панхроматический канал (15 м) – практически совпадают с каналами сенсоров Landsat 7 и Landsat 5. Для изучения растительных сообществ обычно используют комбинацию двух инфракрасных и красного канала (синтез 6:5:4 для снимков Landsat 8); для дифференциации лесных и нелесных территорий может быть полезен также зеленый канал. Синий канал очень чувствителен к помехам в атмосфере и малоинформативен с точки зрения изучения растительных сообществ (Shmitt, Ruppert, 1996).

Снимки Landsat широко используются в исследованиях лесного покрова (Курбанов и др., 2013; Курбанов и др.,

2014; Vanskota et al., 2014 и мн. др.), где их ценность не представляет сомнений, а также для моделирования пространственного распределения отдельных видов (Schmidt et al., 2008; Cord, Rödder, 2011; Ханов, Пшегусов, 2014). На наш взгляд, они наиболее широко применимы и для исследований растительных сообществ вообще на локальном и региональном уровне, и для экстраполяции данных отдельных наземных наблюдений (Price et al., 2002 и др.; также см. табл. 1).

Эти снимки свободно доступны в исходном виде, что позволяет проводить на их основе разные виды исследований: от визуального дешифрирования отдельных интересующих объектов до математических операций с растром и автоматизированной классификации с целью представления разных классов объектов или степени выраженности той или иной характеристики. Несмотря на кажущееся слишком грубым по сравнению с более детальными снимками разрешение, снимки Landsat позволяют получить хороший результат за счет возможности использования спектральных характеристик объектов (Cohen, Spies, 1992). При этом разрешение 30 м не значит, что минимальный размер объектов – 900 квадратных метров: можно дешифрировать и значительно меньшие объекты, если они вносят заметный вклад в изменение яркости пикселя (Колесникова, Черепанов, 2009). Важным преимуществом снимков Landsat является высокое временное разрешение (16 дней) и достаточно большой размер сцены (185 на 185 км).

Путем автоматизированной классификации с обучением, с помощью нейросетевого анализа и применения деревьев решений по снимкам Landsat можно выделять участки лесных сообществ, образованные разными видами деревьев, и определять степень их участия в древостое; путем математических операций с данными каналов ближней инфракрасной части спектра (например, индекса NDVI и аналогичных) разделять разные травяные сообщества на основе косвенного признака биомассы надземных вегетативных органов; дешифрировать типы, гранулометрический состав почв и многое другое.

Другой свободно распространяемый продукт среднего разрешения – коллекция изображений TerraLook (на основе снимков Aster, разрешение около 15 м/пиксель).

Они представляют собой синтезированное в естественных цветах изображение (инфракрасные каналы не используются). Изображения TerraLook хорошо подходят для верификации результатов, полученных по снимкам Landsat. Применение их как самостоятельных данных возможно только для визуализации или выявления нарушений с четкими границами (например, вырубок); информацию о составе растительных сообществ на основе снимков TerraLook Aster получить нельзя.

4 декабря 2015 года Европейское космическое агентство объявило об открытии данных со спутников Sentinel 2 Европейского космического агентства (пока доступны данные только с первого спутника Sentinel 2A, запущенного 25 июня 2015 года; запуск второго спутника Sentinel 2B запланирован на 2016 год). Эти данные выгодно отличаются от данных Landsat и спектральным (10 спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне против 5 у сенсора OLI Landsat 8), и временным (5 дней против 16), и пространственным (10 и 20 метров в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне против 5 у сенсора OLI Landsat 8) разрешением (Drusch et al., 2012; Turner et al., 2015). Ожидается, что снимки Sentinel 2 помогут значительно расширить возможности мониторинга растительного покрова (Hojas-Gascón et al., 2015).

Высокое и сверхвысокое разрешение

Снимки высокого (1–10 м) и сверхвысокого (менее 1 м) разрешения бесплатно доступны только посредством геопорталов, или, если для решения конкретной задачи необходимо ограниченное количество снимков, можно договориться о выполнении совместного научного или природоохранного проекта с компанией-оператором станций приема космических снимков, в нашей стране это прежде всего ИТЦ «СканЭкс» – коммерческая компания, предоставляющая полный комплекс услуг от приема до тематической обработки изображений Земли из космоса.

Полученные таким образом снимки выгодно отличаются от свободно распространяемых снимков Landsat разрешением и при этом позволяют применять методы автоматизированной обработки. Такой вариант получения данных дистанционного зондирования хорош, если площадь терри-

тории исследования мала (до нескольких квадратных километров), а научная задача выгодно подчеркивает возможности снимков высокого разрешения.

Снимки высокого разрешения малопригодны, если необходимо высокое временное разрешение съемки. В этом случае оптимальным решением могут оказаться снимки Landsat в сочетании с методами субпиксельного дешифрирования или декомпозиции спектральных смесей (Кравцова, 2012).

Кроме того, изображения, подготовленные на основе снимков высокого и сверхвысокого разрешения, выложены на геосервисах (Яндекс-карты, GoogleMaps, Космоснимки, Bing), а также в программе GoogleEarth. Все эти ресурсы имеют больший или меньший ряд инструментов, позволяющий пользователю создать свою карту на основе существующей подложки-мозаики из снимков высокого разрешения. Их нельзя использовать для автоматизированного анализа и дешифрирования растительности, но их, как правило, достаточно для планирования района исследований, подготовки карт для экспедиций, планирования маршрутов, а также для подготовки простейших карт для отчетов и иллюстраций. Важно помнить, что изображения геосервисов являются объектом авторского права и перед их использованием необходимо ознакомиться с лицензионным соглашением и разрешенным видом использования продуктов.

Методы обработки и анализа снимков

Обработка данных дистанционного зондирования включает в себя большое количество разных методов, но суть их сводится к получению на основе космического снимка карты, отражающей информацию об определенных, важных для исследователя объектах и явлениях. Этот процесс называется дешифрированием снимка. Важно понимать, что любая карта – результат генерализации, т. е. представляет собой только малую часть информации снимка (Лабутина, Балдина, 2011), но зато нужная информация выделена и подчеркнута. Поэтому процесс создания карты на основе космического снимка можно разделить на четыре этапа:

– определение целевых объектов и масштаба дешифрирования;

– выбор в соответствии с этим данных дистанционного зондирования с нужными характеристиками (в первую очередь – пространственным разрешением и необходимыми каналами спектра);

– собственно дешифрирование снимка;

– принятие решения о том, какие объекты (в зависимости от результата) и каким образом должны быть показаны на карте для того, чтобы информация хорошо читалась; создание понятной легенды.

Если в работе используют исходные данные дистанционного зондирования, дешифрированию снимка обычно предшествует первичная обработка. Она может включать в себя геометрическую и атмосферную коррекцию, а также другие операции в тех случаях, когда это необходимо (геометрическая коррекция – для горных территорий и в случае автоматизированного выявления изменений, когда разновременные снимки должны четко соответствовать друг другу, атмосферная коррекция – при работе в чувствительных к атмосферным искажениям спектральных диапазонах и т. д.).

Собственно дешифрирование может быть как визуальным с выделением контуров объектов по снимку вручную, так и автоматизированным. Визуальное дешифрирование требует длительной монотонной работы, но минимальной предварительной и последующей обработки; автоматизированное дешифрирование требует более высокой квалификации и незаменимо для больших территорий с однообразными выделяемыми объектами, а также в случае нечеткой границы объектов; ему сопутствует длительная предварительная подготовка и постобработка результатов. Автоматизированные методы дешифрирования снимков основаны на проведении математических операций с растрами (могут быть использованы как разные каналы одного снимка для расчета индексов, как, например, индекс NDVI, так и каналы снимков разного времени – для выявления изменений) и классификации снимков.

Во всех случаях для распознавания объектов необходимо обладать определенными знаниями об их представлении на снимке и закономерностях распределения. Лучше всего, если анализ дистанционных данных подкреплен результатами наземных исследований. В этом случае

полевые данные необходимо наложить на снимок и использовать их как реперные. Также может помочь использование топографической карты, материалов лесоустройства и других картографических продуктов.

Визуальное дешифрирование

Общие закономерности представления объектов на снимке помимо цвета, который определяется вариантом спектрального синтеза, относятся к размеру, форме, структуре поверхности объекта и их взаиморасположению (Чандра, Гош, 2008). Например, зная разрешение снимка, легко установить как характер объекта (на снимках разного разрешения всегда хорошо различаются линейные и площадные объекты), так и его размеры на местности. Антропогенные объекты обычно имеют правильные формы, четкие, ровные границы и регулярное расположение, в то время как для естественных объектов характерны неправильные, изогнутые линии и хаотическое расположение. Зернистая, неровная структура объекта говорит о неоднородности его составляющих, но при использовании этого параметра стоит учитывать пространственное разрешение снимка (Лурье, 2010).

Для визуального дешифрирования космический снимок выводят на экран

монитора в определенном цветовом синтезе, наиболее подходящем исходя из изучаемых объектов. Наиболее часто используемые варианты синтеза для снимков Landsat приведены в табл. 3. Для упрощения дешифрирования изменений (например, вырубок) часто применяется совмещение каналов снимков, полученных до и после изменений. По результатам визуального анализа можно подготовить картосхему, иллюстрирующую выявленные объекты. Для проведения пространственного анализа (в том числе оценки площадей) объекты необходимо либо оцифровать вручную, либо провести автоматизированную классификацию.

Операции со спектральными каналами

Вычисление спектральных индексов позволяет подчеркнуть разницу в отражении излучения в определенных частях спектра различными объектами (Vanpari, 1995; Лурье, 2010). Большинство индексов, используемых для изучения растительных сообществ, основаны на отличии спектрального профиля здоровой растительности от профиля угнетенной, а также любых других объектов, в т. ч. воды и почв (активно вегетирующие сообщества поглощают больше излучения

Таблица 3. Основные варианты синтеза спектральных каналов (по: Fox, 2015)

Общепринятое название синтеза	Каналы, представляемые цветами монитора			Пример (Landsat 8/OLI)	Назначение и преимущества синтеза
	Красным	Зеленым	Синим		
Естественные цвета	Видимый красный	Видимый зеленый	Видимый синий	4:3:2	Используется в геосервисах и для иллюстраций. Сцена выглядит естественно; множество вариаций цвета воды
Стандартные псевдоцвета	Ближний ИК	Видимый красный	Видимый зеленый	5:4:3	Популярен для дешифрирования растительности: она представлена множеством вариаций в оттенках красного цвета
«Зеленые» псевдоцвета	Коротковолновый ИК	Ближний ИК	Видимый красный	6:5:4	Особенно популярен в изучении лесных сообществ. Вегетирующая растительность отображается в привычных оттенках зеленого цвета и в то же время имеет хороший контраст с почвами и водой

в красной зоне спектра и отражают больше в ближней инфракрасной части по сравнению с остальными объектами; Tucker, 1979; Лурье, 2010). Чаще других используется индекс NDVI (Pettoirelli et al., 2005; Курбанов и др., 2013); как правило, он применяется для создания глобальных продуктов на основе снимков низкого и среднего разрешения (DeFries, Townshend, 1994; Beck et al., 2007), но может быть использован и на локальном уровне для оценки биоразнообразия (Levin et al., 2007) и моделирования распространения редких видов (Parviainen et al., 2013). Вместе с тем индекс NDVI является довольно грубым, особенно при высокой и низкой сомкнутости растительного покрова; в последнем случае он может быть заменен на индекс SAVI, учитывающий влияние почв (Шовенгердт, 2010).

Преобразования спектральных каналов применяют, чтобы извлечь из значений яркости численные данные, дающие наиболее подходящую для изучения конкретного объекта информацию, другими словами – подчеркнуть необходимую и удалить лишнюю информацию. Преобразование методом главных компонент позволяет выделить среди значений отражения в разных спектральных каналах наиболее значимые, уменьшить число анализируемых каналов практически без потери информации. В первой компоненте при этом максимально подчеркнут спектральный контраст, а вторая отражает границы смены контраста. Это может улучшить результаты как визуального дешифрирования, так и простых методов автоматизированной классификации, т. к. синтез трех главных компонент содержит больше информации, чем любые три исходных спектральных канала (Лурье, 2010; Шовенгердт, 2010).

Преобразование снимков методом Tasseled Cap («колпачок с кисточкой») также очень популярно среди исследователей растительности. Оно позволяет разложить значения спектральных каналов на три составляющих: яркости (подразумевается преимущественно яркость почв), «зелености» и влажности (почв и атмосферы), каждая из которых имеет принципиальное значение для дешифрирования (Книжников и др., 2004; Richards, Jia,

2006; Чандра, Гош, 2008; Pflugmacher et al., 2012; Курбанов и др., 2013).

Принципиальное отличие преобразований методом главных компонент и Tasseled Cap – в том, что первое зависит от исходного набора данных и универсально для всех объектов, а второе разработано специально для изучения почв и растительности и не зависит от разброса яркостей в исходных каналах (Книжников и др., 2004; Шовенгердт, 2010).

Для быстрой оценки площадей изменений (особенно для лесопокрываемых площадей), прошедших за определенный период на одной и той же территории, используют математические операции с каналами одного диапазона разновременных снимков (как правило, вычитают значения ближнего или коротковолнового инфракрасного канала более раннего снимка из значений того же канала более позднего снимка; также можно использовать деление; Чандра, Гош, 2008). В результирующем слое выделяются три группы пикселей: со значениями, близкими к нулю (соответствуют пикселям исходного снимка, яркость которых не изменилась, – изменений нет), положительными (яркость пикселей увеличилась, что соответствует вырубкам) либо отрицательными (яркость пикселей уменьшилась, что соответствует зарастанию территории). Используемые каналы должны быть корегистрированы; при математических операциях следует учитывать радиометрическое разрешение входных данных.

Автоматизированные методы классификации

Методы автоматизированной классификации по своей сути основаны на статистическом анализе и поиске закономерностей, где исходными данными является яркость пикселей снимка, соответствующих интересующим исследователя объектам на местности, или ее производные (например, значения вегетационных индексов или результаты преобразований). Проблема выбора метода классификации снимка в конкретном проекте аналогична проблеме выбора метода статистического анализа. Подробное рассмотрение всего набора методов автоматизированной классификации в рамках статьи не представляется возможным, поэтому

ниже мы лишь обозначим наиболее распространенные методы классификации.

Классификация может быть попиксельная (каждый пиксель относится к какому-то классу на основе эталонов) и объектно-ориентированная – сегментация (в этом случае снимок сначала делится на заданное напрямую или через степень округления количество сегментов, а затем дешифровщик определяет, какому объекту соответствует каждый сегмент). Как правило, попиксельную классификацию используют для установления закономерностей явлений, а также в случае дешифрирования объектов с нечеткими и переходными границами, а сегментацию – для создания карты и выделения прежде всего антропогенных объектов.

Попиксельная классификация, в свою очередь, может быть необучаемой (самый распространенный метод – ISODATA – заключается в кластеризации пикселей по яркости в разных каналах, после чего исследователь интерпретирует полученные классы) и обучаемой – программа относит каждый пиксель к тому или иному из эталонных классов в зависимости от близости его яркостных характеристик к характеристикам того или иного эталона. Если результат классификации неудовлетворителен, можно поправить эталоны и запустить классификацию еще раз; количество таких повторов может быть неограниченным. Очевидно, что точность обучаемой классификации выше, чем необучаемой. Необучаемую классификацию лучше применять в тех случаях, когда территория малоизвестна или для выявления крупных классов объектов (например, получение маски лесов), напротив, обучаемую классификацию лучше проводить в тех случаях, когда были проведены полевые исследования и необходима более детальная классификация (например, выделение лесных формаций). Обучаемая классификация очень чувствительна к качеству эталонов (Чандра, Гош, 2008): она приближается к идеальной, только если эталоны выделены очень точно и соответствие пикселей и эталонов взаимно однозначное (все варианты яркостей имеют свой эталон и пиксели с одинаковыми яркостными характеристиками не попадают в разные эталоны). Понятно, что при изучении расти-

тельных сообществ этого добиться невозможно, кроме того, эталоны рисуются на глаз, а глаз исследователя далеко не всегда различает яркости настолько же точно, насколько их различает программа. Поэтому если мы имеем дело со сложными объектами, даже обучаемая классификация не дает удовлетворительных результатов (много пикселей оказываются классифицированы неправильно и при генерализации границы объектов сильно искажаются).

Особое место среди алгоритмов попиксельной классификации занимают методы машинного обучения: классификация с использованием самоорганизующихся нейронных сетей, деревьев решений и опорных векторов. Отличие их от механизмов обучаемой классификации в принципиально другом математическом аппарате, а на практике это проявляется в том, что сначала на основе статистики всей области снимка (для нейронных сетей) или отдельных эталонов выстраивается алгоритм классификации (что минимизирует ошибку пользователя), а затем на основе полученных результатов на примерах алгоритма происходит классификация всех пикселей снимка.

Для классификации объектов с нечеткими границами наиболее подходят алгоритмы с использованием нейронных сетей. После классификации нейронная сеть, каждому из нейронов которой соответствуют определенные пиксели снимка, может быть откалибрована вручную или на основе эталонов или раскрашена по градиенту признака. Таким образом, нейросетевой анализ является самым точным, но вместе с тем и самым требовательным к количеству точек исходных данных методом анализа, подходящим для изучения растительных сообществ. Его рекомендуют использовать в том числе в случаях, когда закономерности сложны и классы объектов не могут быть выявлены до начала классификации (как это необходимо при классификации с обучением) (Савельев, 2004).

Деревья решений (Decision Trees; Xu et al., 2005; Potapov et al., 2015) – метод, позволяющий не только классифицировать данные, но и, в отличие от нейронных сетей, где все правила классификации остаются внутри «черного ящика»,

точно указать, какие показатели использованы для разделения на классы. Суть работы метода очень похожа на определение видов по дихотомическим ключам. Построение «ключа» классификации проводится на тренировочных данных, затем по этому «ключу» классифицируются все пиксели снимка. Усовершенствованным вариантом этого метода являются ансамбли деревьев решений, или «случайные леса» (Random Forest; Шипунов и др., 2012).

Также достаточно популярен метод опорных векторов (Support Vector Machines), основанный на вычислении гиперплоскости, разделяющей классы в многомерном пространстве признаков; однако, согласно ряду оценок, он уступает в точности ансамблям деревьев решений (Шипунов и др., 2012; Rodriguez-Galiano, Chica-Rivas, 2014).

Оценка точности результата

Оценка точности (валидация) результирующего слоя является очень важным этапом в дешифрировании космических снимков (Stehman, Czaplewski, 1998; Fassnacht et al., 2006). Технически задача оценки точности подразделяется на два вопроса: с какими данными сравнивать полученный результат и каким образом оценить соответствие (т. е. какой метод выбрать для сравнения)?

Сравнение полученного результата с другими существующими данными проводится в рамках обсуждения и является обязательной общепринятой практикой, но по ряду причин этого обычно недостаточно для того, чтобы оценить качество полученного слоя. Чаще всего данных на ту же территорию, с которыми можно было бы корректно сравнить результат, просто не существует. Нередко один или оба набора представлены номинальными или ранговыми данными, и сопоставить их между собой можно лишь условно. Наконец, даже если это возможно, с помощью такого сравнения нельзя оценить именно качество результата, потому что полученная оценка расхождения включает в себя не только собственно ошибку проверяемого результата, но может быть обусловлена также ошибкой проверочных данных и расхождениями в методиках.

Поэтому для проверки результата, как правило, используют данные, анало-

гичные исходным. Общепринятый прием при использовании методов автоматизированной классификации или машинного обучения – разделение обучающей выборки на две части, большая из которых (обычно 70–80 % пикселей или тренировочных участков) используется для обучения алгоритма, а меньшая (20–30 %) – для проверки результата. В комплексных исследованиях бывает целесообразно собирать данные для тренировок и валидации отдельно (например, если слой (карта) – лишь один из результатов, тренировочные точки могут нести значительно большую информационную нагрузку, чем валидационные).

Проверочные данные должны быть распределены по территории исследования по возможности равномерно. Если проверяемый результат имеет широкий географический охват, собрать данные для проверки в поле может быть проблематично; в этом случае не вполне корректно и использование части обучающей выборки. Решением в этом случае может стать проверка результата в узлах регулярной сетки. Данные для проверки (истинные значения в узлах сетки) могут быть определены по имеющимся дополнительным данным или также дистанционными методами, но по принципиально другим снимкам (например, большего пространственного или временного разрешения).

Таким образом, для валидации результата дешифрирования могут быть использованы часть обучающей выборки, специально собранные полевые данные или значения в узлах регулярной сетки, полученные на основе имеющихся дополнительных данных или данных дистанционного зондирования другого типа.

Метрики, используемые для количественной оценки точности, зависят от типа проверяемых данных. Для категориальных данных хорошо подходит стандартный метод – матрица ошибок (Книжников и др., 2004; Чандра, Гош, 2008; Малышева, 2012). Общая точность результата вычисляется как отношение правильно классифицированных элементов к общему их числу, но сама по себе не является достаточно информативной, т. к. важное значение имеет распределение ошибок (Fassnacht et al., 2006). Для каждого клас-

са результата может быть вычислена так называемая ошибка пользователя (*user's accuracy*), которая вычисляется как отношение совпавшего с проверочными данными количества элементов к общему количеству элементов данного класса. Эта ошибка позволяет оценить количество пропусков, т. е. понять, насколько полно в данном классе результата представлены соответствующие ему объекты. Другой тип ошибки, ошибка классификатора (*producer's accuracy*), вычисляется для каждого класса проверочных данных как отношение совпавшего с результатом количества элементов к общему количеству элементов проверочного класса. Эта ошибка позволяет оценить количество ошибочно присоединенных к данному классу элементов (Книжников и др., 2004; Чандра, Гош, 2008).

В случае, если количество элементов в разных классах сильно различается, общая точность результата, вычисленная с помощью матрицы соответствий, может быть завышена. В этом случае рекомендуется использовать коэффициент каппа (Foody, 2002; Книжников и др., 2004; Чандра, Гош, 2008).

Для континуальных данных в качестве меры точности результата можно использовать регрессию (Joshi et al., 2006; Sexton et al., 2013) или стандартную ошибку (Hansen et al., 2005).

Чуть более сложен вопрос оценки результата в широко распространенном случае, когда информация имеет континуальную природу, но в результирующем слое организована в виде нескольких классов. В этом случае для оценки точности правомерно использовать матрицу соответствий, но точность может получиться заниженной из-за переходного характера границ между классами. С другой стороны, регрессия позволит лишь в общих чертах оценить степень соответствия результирующих и проверочных данных. Выходом может стать использование матрицы соответствия при нечетких границах классов (*fuzzy boundaries*). Алгоритм определения границ классов может быть различным, два примера построения подобного алгоритма детально описаны в статье Fassnacht et al. (2006).

Более подробно с общими принципами, методами оценки точности и ис-

пользуемыми метриками можно ознакомиться в специальных работах (Stehman, Czaplewski, 1998; Foody, 2002; Fassnacht et al., 2006; Чандра, Гош, 2008; Petrou et al., 2015 и др.).

Примеры проектов с использованием данных дистанционного зондирования

В данном разделе статьи кратко изложены примеры проектов, выполненных авторами в Лесном и ГИС-отделах Гринпис России, на кафедре геоботаники биологического факультета и на географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова. Приведены примеры проектов, выполненных методами визуального дешифрирования (1), классификации без обучения (2) и машинного обучения (методом нейросетевого анализа, 3).

1. Картографирование растительного покрова Долины реки Гейзерной (Яблоков, Завадская, 2013; Завадская, Яблоков, 2014).

Цель работы – создание карты растительности Долины реки Гейзерной в Кроноцком государственном заповеднике, отражающей как накопленный геоботанический материал, так и актуальное состояние флоры объекта. Растительный покров в долине представлен термофильными сообществами, видовой состав которых, как правило, существенно отличается от окружающих зональных сообществ и обладает высокой природоохранной ценностью и степенью эндемичности; его структура обладает высокой мозаичностью, обусловленной рядом факторов, ведущими из которых являются температура субстрата и расстояние от выхода термальных вод. В условиях изучаемой территории невозможно провести сплошную съемку, которая предполагает маршруты по выделенной сетке, покрывающей всю территорию (это связано с обилием опасных гидротермальных проявлений и привело бы к полному вытаптыванию крайне уязвимой к нагрузкам уникальной растительности Долины гейзеров). В связи с этим картографирование растительности проводилось на основе данных дистанционного зондирования в совокупности с материалами, полученными в ходе наиболее щадящих маршрутов полевых исследований.

Информационной основой работ стали геоботанические исследования Долины реки Гейзерной в 2011–2014 гг., а также ранее составлявшие картографические материалы. Исследования осуществлялись методом комплексной ординации и включали наблюдения на пяти эколого-географических трансектах, наилучшим образом отражающих разнообразие ландшафтной структуры исследуемого участка. В состав наблюдений на комплексных профилях входили выделение растительных сообществ, измерение их протяженности, геоботаническое описание сообществ с выявлением флористического состава травяно-кустарничкового яруса, определением общего проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, а также проективных покрытий каждого вида сосудистых растений. Сообщества определялись на основе учета их физиономического облика и описывались в естественных границах.

Одновременно с наблюдениями на комплексных профилях для полосы трансект шириной 5 м составлялись схемы растительного покрова исследуемого участка. Кроме трансект геоботанические описания проводились на всех репрезентативных участках территории, доступных по сети настильных троп.

В результате выполнения полевых работ были получены данные о пространственной структуре (схемы растительного покрова 5 трансект в масштабе 1:400) и единицах растительного покрова (более 400 полных геоботанических описаний и более 700 кратких геоботанических и ландшафтных бланков).

Дешифрирование проводилось на основе космических снимков GeoEye и материалов аэрофотосъемки в сочетании с экстраполяцией материалов полевых исследований.

Работа проводилась над снимками при масштабе 1:500, т. к. масштаб создаваемой карты был 1:1000. Именно в этом масштабе соблюдался компромисс в учете значимых наименьших контуров и генерализации сложных границ термальных сообществ.

Дешифрировали снимки в программной среде ArcGIS. В первую очередь на карту были нанесены четко выделен-

ные антропогенные и наиболее очевидные природные объекты (водоемы, грязевые котлы, селевые потоки, термальные выходы без растительности). Следующим этапом было дешифрирование самой растительности. Наиболее распознаваемой была древесная растительность: березняки, ивняки, ольховники. Достаточно однозначно выделялась зональная растительность, луга, высокотравье. Переходные участки (от зональных к интразональным термальным сообществам) были сложными для дешифрирования. С помощью описаний были выделены микропоясные термальные участки сообществ. Атрибутирование контуров проводилось на основе материалов геоботанических исследований. Те контуры, атрибуты которых невозможно было экстраполировать по известным участкам, остались без атрибутивной информации; в ряде случаев теневые участки снимка не позволили выделить границы и соответственно определить их принадлежность. По результатам предварительного дешифрирования было выделено более 800 контуров, из которых атрибутировано только 60 %.

Для проверки и уточнения выделенных контуров на этапе валидации использовалась программа Collector for ArcGIS. Работа с ней осуществлялась непосредственно в поле. Были выделены не отмеченные ранее контуры и уточнены границы существующих, добавлены описания растительных сообществ (более 200). С помощью фотографий-вложений и дополнительных материалов были определены неизвестные ранее виды.

В конечном итоге было выделено 478 контуров. Классификационная принадлежность единиц растительного покрова для зонально-поясных сообществ приведена по Нешатаевой (2009); термофильные сообщества дифференцированы по Липшицу (1936) и Трассу (1963).

В результате на карте были выделены следующие классы объектов:

- инфраструктура;
- водные объекты;
- термальные грязевые воронки;
- незадернованные участки термальных полей;
- незадернованные поверхности на месте аккумуляции наносов оползней и селевых потоков;

пионерные сообщества на месте аккумуляции наносов оползней и селевых потоков;

зонально-поясные сообщества; сообщества, близкие по структуре к зонально-поясным;

сообщества факультативных термофилов;

сообщества облигатно-факультативных термофилов;

сообщества облигатных термофилов.

Общее количество выделенных растительных сообществ — 34 (рис. 1).

Карта растительности Долины реки Гейзерной является своеобразной точкой

отсчета для проведения последующих работ по мониторингу на данном объекте, а также обладает мощным индикационным потенциалом, позволяющим на основе пространственного анализа составлять производные карты других компонентов природно-территориального комплекса на основе их закономерной связи.

Работы выполнены при поддержке РФФИ (проекты №№ 13-05-00870, 15-04-03818) и РНФ 15-17-30009 (картографический аспект исследования).

2. Карта лесов центра и севера европейской России (Ярошенко и др., 2008).

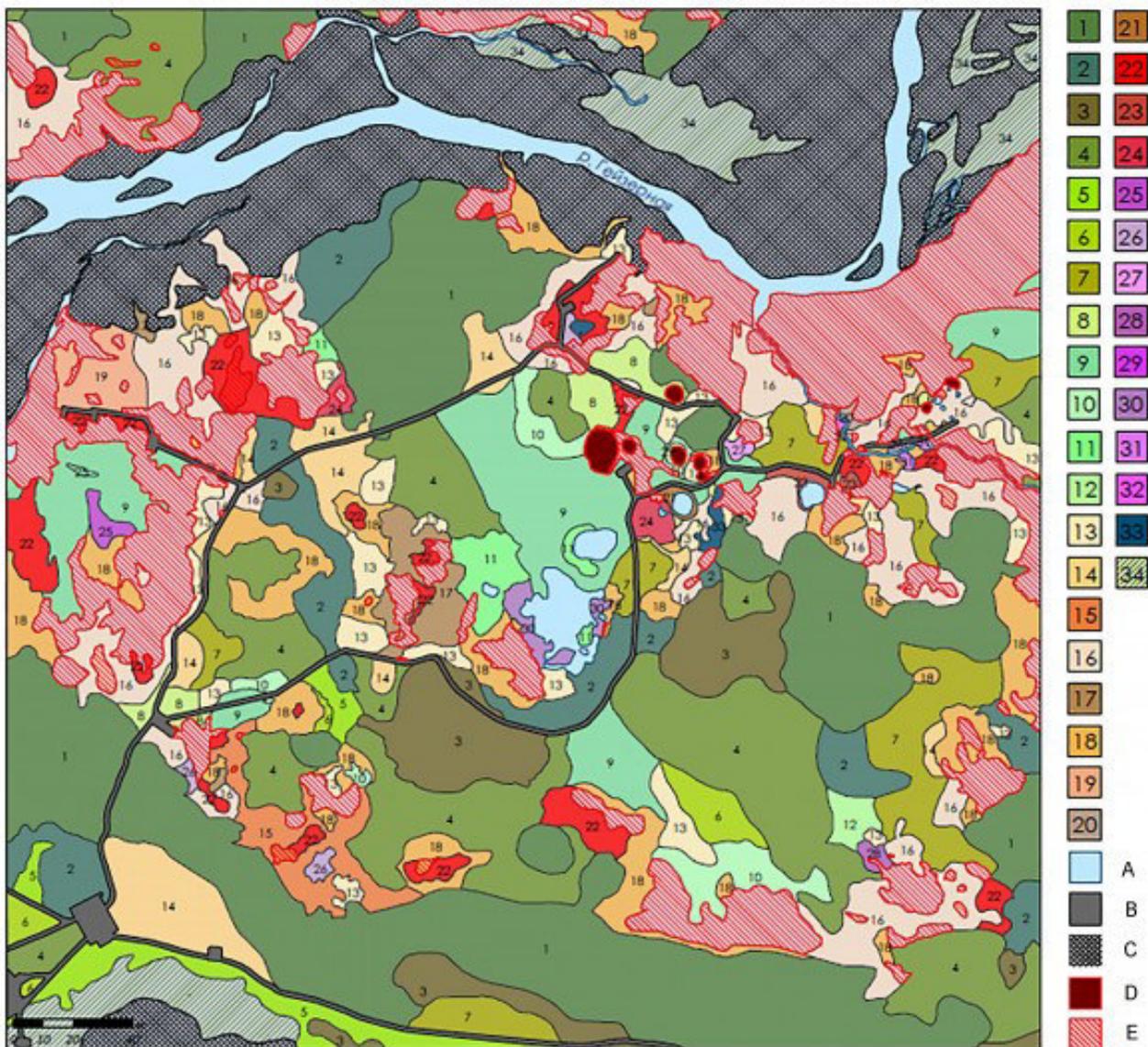


Рис. 1. Растительность Долины р. Гейзерной:

1 – каменистоберезняк разнотравный, 2 – ивняк шеломайниковый, 3 – сообщества ольхового стланика, 4 – крупнотравно-шеломайниковые луговые сообщества, 5 – высокотравные луговые сообщества с преобладанием лабазника и бодяка, 6 – высокотравные луговые сообщества с преобладанием вол-

жанки, 7 – высокотравные луговые сообщества с преобладанием крестовника, 8 – разнотравные луговые сообщества с преобладанием герани и василистника, 9 – монодоминантные сообщества вейника, 10 – сообщества с преобладанием вейника и орляка, 11 – сообщества с преобладанием вейника и полыни, 12 – сообщества с преобладанием вейника и таволги, 13 – сообщества с преобладанием орляка, 14 – сообщества с преобладанием василистника, 15 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием полыни и василистника, 16 – микропоясные термальные сообщества мхов с преобладанием полыни и лапчатки, 17 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием мхов и лапчатки, 18 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием мхов и полыни, 19 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием полыни и полевицы, 20 – сообщества с преобладанием полевицы и вейника, 21 – сообщества болотницы и вейника на переувлажненных местообитаниях, 22 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием мхов и фимбристилиса, 23 – микропоясные термальные сообщества мхов с преобладанием фимбристилиса и зюзника, 24 – микропоясные термальные сообщества мхов с преобладанием фимбристилиса и полевицы, 25 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием мхов и полевицы, 26 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием мхов и полевицы, 27 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием зюзника, 28 – микропоясные термальные сообщества с преобладанием зюзника и полевицы, 29 – монодоминантные сообщества болотницы на переувлажненных местообитаниях, 30 – сообщества болотницы и вейника на переувлажненных местообитаниях, 31 – сообщества болотницы и полевицы на переувлажненных местообитаниях, 32 – сообщества болотницы и череды на переувлажненных местообитаниях, 33 – лишайниковые сообщества, 34 – пионерные сообщества на месте аккумуляции наносов оползней и селевых потоков. А – водные объекты, В – объекты экскурсионной инфраструктуры, С – незадернованные поверхности на месте аккумуляции наносов оползней и селевых потоков, D – термальные грязевые воронки, E – термальные участки, лишенные растительного покрова

Fig. 1. Vegetation of the Geyzernaya valley

Информация об актуальном состоянии лесов востребована как в практике лесного хозяйства (до сих пор распространено мнение о богатстве запасов леса в России, поскольку обычно не принимается во внимание истощительность методов, используемых при ведении лесозаготовок, в результате которых старовозрастные хвойные леса заменяются на малоценные мелколиственные), так и в целях планирования научных исследований, т. к. в результате интенсивного использования лесов и неправильного лесовосстановления повсеместно происходит замена коренных типов леса на производные, биогеоценозов – на менее разнообразные и устойчивые (Потапов и др., 2004). Целью проекта было получить актуальную карту лесов, отражающую преобладающие породы, и оценить изменения в лесном покрове за 1990–2005 годы. Поскольку состояние лесов быстро изменяется, данные дистанционного зондирования являются незаменимым источником информации. Применение автоматизированной классификации и математических операций дает возможность проанализировать лесной покров большой территории с относительно небольшими затратами времени, а визуальная постпроверка позволяет добиться хорошей точности.

В работе были использованы снимки Landsat TM и ETM+ за 1990–2000 гг. в синтезе 5:4:3 (разрешение 30 м) для оценки нарушенности сообществ, а также следующие наборы геоданных: карты преобладающих типов пород: леса России (Барталев и др.,

2004), Land Cover map of Northern Eurasia (Bartalev et al., 2003); слой ценных природных территорий – малонарушенных лесов европейской России. Территории с увеличением отражательной способности были выявлены путем математических операций, затем к ним применили автоматизированную классификацию без обучения (ISODATA) для создания маски лесопокрываемой площади (рис. 2). То есть на первоначальном этапе были выявлены территории, где произошли значительные изменения, а затем выделены те из них, которые произошли в лесах. Результаты автоматизированной классификации проходили визуальную постобработку.

Изменения в лесном покрове за 2000–2005 гг. были выявлены с помощью алгоритмов создания и тренингов дерева решений в классификации в Университете Мэриленда (Potarov et al., 2011).

В результате получена карта центра и севера европейской России, отражающая деление лесов по преобладающей породе и освоенности, распространение молодняков разного возраста и малонарушенных лесных территорий. Карта является относительно мелкомасштабным продуктом, при этом для отдельных территорий может быть проведен аналогичный анализ в более крупном масштабе

3. Уточнение данных об ареале пихтоельников Северо-Западного Кавказа и степени сомкнутости темнохвойных (Комарова и др., 2010; Комарова, 2012).

Выделение лесов высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ) – один из инструментов, способствующих сохранению ценных лесных сообществ (Аксенов и др., 2006). Пихтовые леса Северо-Западного Кавказа представляют собой уникальные растительные сообщества (указаны в каче-

стве редких сообществ на уровне союза *Rhododendrono pontici-Fagion orientalis* (в том числе подсоюз *Abieti-Fagenion orientali*) и союза *Vaccinio-Fagion orientalis* (Red Data Book, 1997), с ними связано большое число редких растений, включенных в Красные

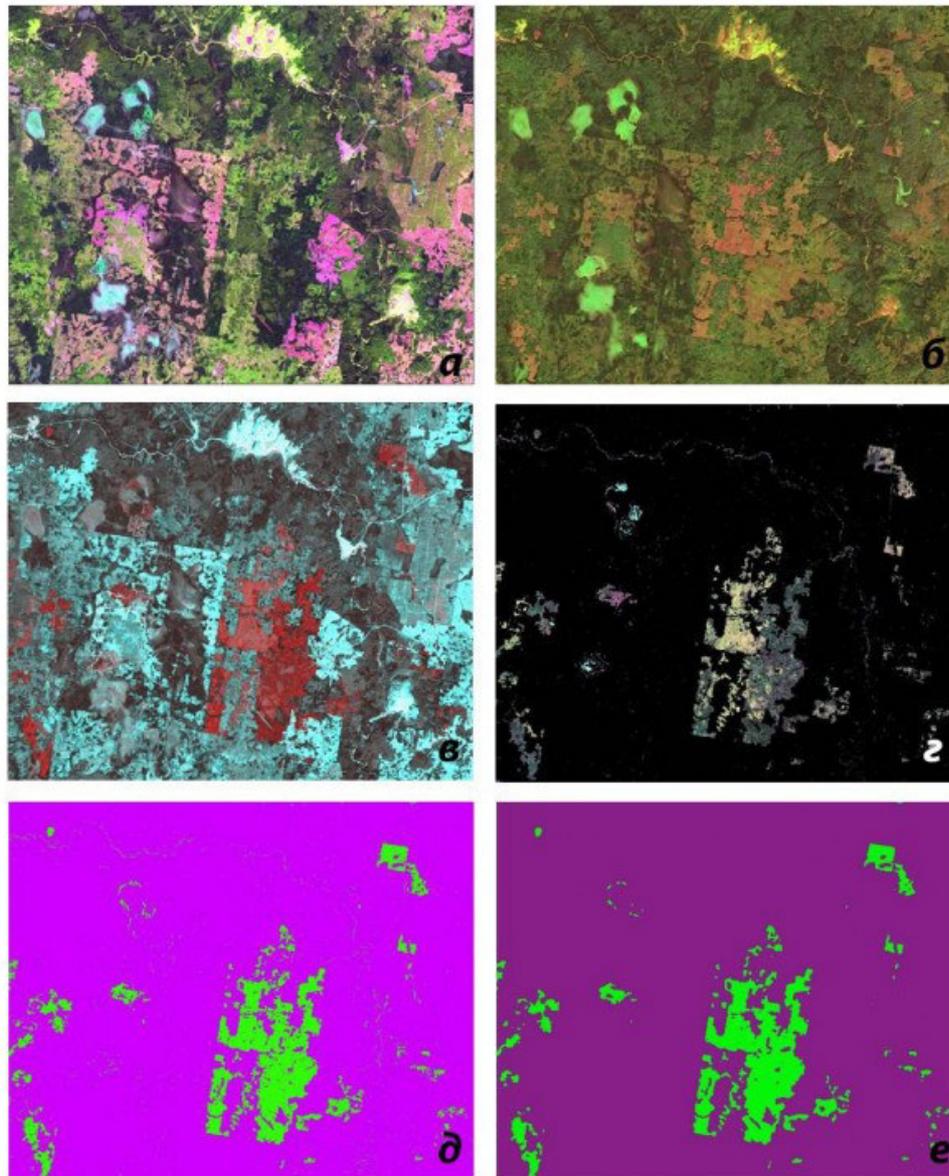


Рис. 2. Процесс получения карты лесов европейской части России: а, б – исходные космические снимки Landsat до и после нарушения, в – изменение в лесном покрове на синтезированном изображении, г – результат вычитания каналов, д – результат классификации, е – контур изменений после генерализации (огрубления)

Fig. 2. Map of the forests in the European part of Russia: the workflow: а, б – Landsat images before and after deforestation, в – forest cover change on the composite image, г – the result of channels' subtraction, д – the result of the classification, е – the result after generalization

книги России и регионов. Процесс выделения ЛВПЦ с технической точки зрения был разделен на две задачи: выделение наиболее ценных участков по полевым и гербарным данным и получение карты лесов с

доминированием *Abies nordmanniana*. Для решения второй задачи необходимо привлечение данных дистанционного зондирования, для того чтобы обеспечить выделение пихтовых лесов на всей территории

по однообразным критериям и экстраполировать данные полевых исследований. Метод самообучающихся нейронных сетей и иерархический подход вкупе с увеличением количества входных данных для обучения классификатора и валидацией по специально собранным полевым данным может улучшить качество дешифрирования темнохвойных лесов и позволить извлечь из космических снимков еще более детальную информацию о состоянии сомкнутости темнохвойных (кавказской пихты *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach и восточной ели *Picea orientalis* (L.) Link.).

Территория исследования – южные районы Краснодарского края, Адыгеи и Карачаево-Черкесии. Карта распространения темнохвойных лесов (рис. 3) создана с помощью автоматизированной классификации методом самообучающихся нейронных сетей под предварительно полученной методом ISODATA маской лесов в программе ScanEx ImageProcessor по снимкам Landsat TM (разрешение 30 м; в качестве опорных были выбраны пиксели, соответствующие

геоботаническим описаниям; количество эталонных участков на каждую сцену составило около 200), а затем верифицирована по продукту TerraLook Aster (15 м), снимкам разрешением 0.6–15 м, доступным в программе GoogleEarth, и зимним снимкам Landsat ETM+ в узлах регулярной сетки 2 на 2 км (4856 контрольных точек). Для получения данных о сомкнутости темнохвойных в пологе древостоя в четырех градациях (пихты/ели нет; возможное участие; участие 20–40 %; преобладание темнохвойных (участие более 40 %)) использованы отдельные 2, 3, 4 и 5-спектральные каналы снимки Landsat TM (разрешение 30 м). Источником эталонов стали 224 детальных геоботанических описания. Результат автоматизированной классификации под маской лесов методом самообучающихся нейронных сетей в программе ScanEx ImageProcessor был автоматически откалиброван по точкам геоботанических описаний. Полученная карта верифицирована по 167 точкам кратких маршрутных описаний.

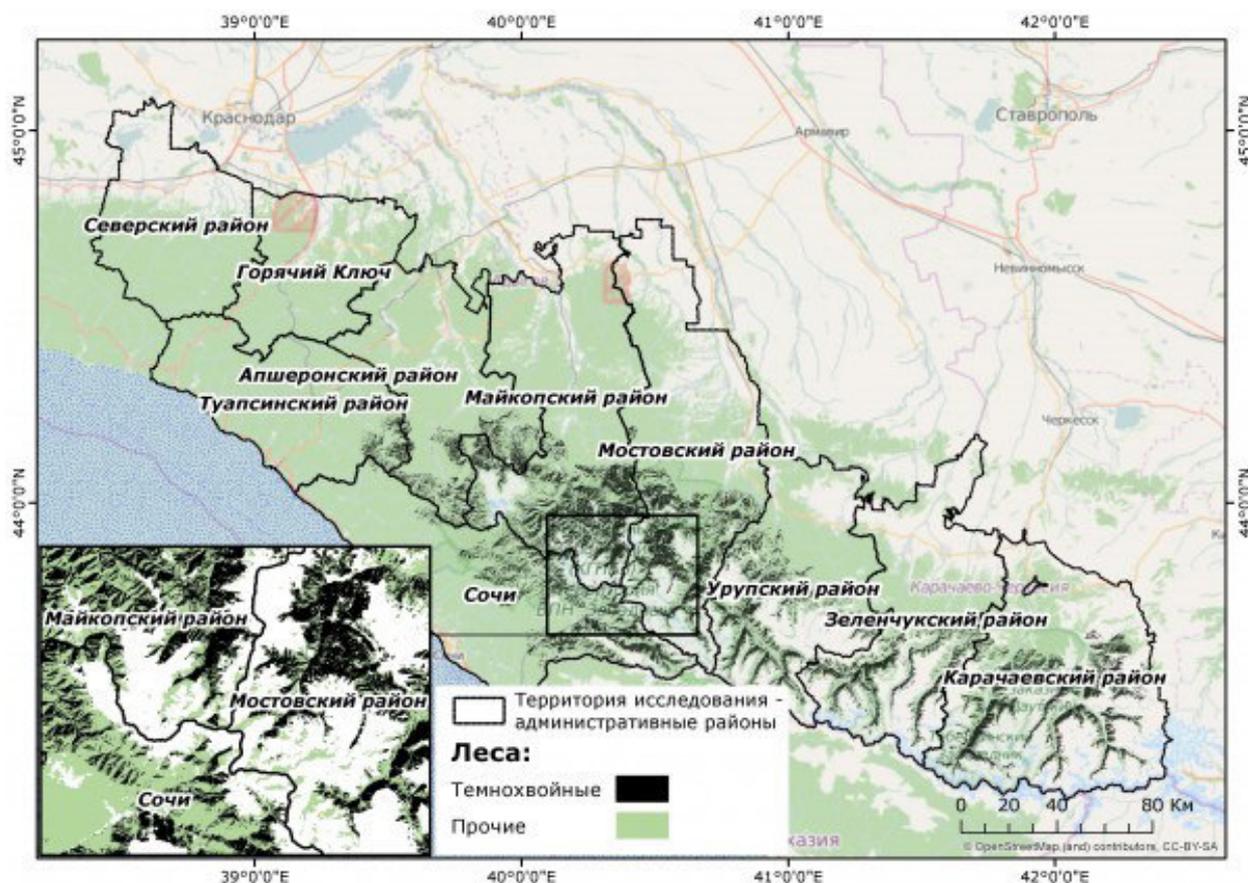


Рис. 3. Темнохвойные леса российской части Северо-Западного Кавказа
Fig. 3. Dark-coniferous forests in the Russian part of the North-West Caucasus

Слой темнохвойных лесов (таких, где пихта или, редко, ель преобладают в полог над другими породами) успешно верифицирован (точность 95.9 %, коэффициент каппа Коэна, позволяющий учесть отличие полученного распределения значений матрицы ошибок от случайного (Малышева, 2012), – 0.81), их площадь в трех регионах Северо-Западного Кавказа составила всего 236.9 тыс. га (или 12.2 % от всех лесов). Данные о сомкнутости пихты и ели, верифицированные по маршрутным описаниям, показали меньшую точность: 84.1 % в нечетких границах классов (Fassnacht et al., 2006), каппа Коэна 0.6, – но также приемлемы. При этом два результирующих массива данных, полученных независимо, хорошо соотносятся между собой.

Заключение или выводы

Обработка данных дистанционного зондирования Земли – актуальный и важный метод биологических исследований. При выборе типа данных и программы для их обработки следует руководствоваться принципом «от простого к сложному»: если не стоит задачи изучить много разных программ и методов дистанционного зондирования (что, конечно, может быть очень полезно, но предполагает для начала ознакомление со специальной литературой), стоит сначала узнать, могут ли более простая программа и данные глубокой обработки выполнить требования исследователя. Уже самые простые программы открывают большие возможности для планирования исследований.

Если же необходимо использовать данные дистанционного зондирования не только как подложку, но и как источник данных, приведенные выше примеры проектов и методов исследований помогут сориентироваться и определить, какие именно космические снимки, какое программное обеспечение и какие методы работы необходимо выбрать для решения поставленной задачи.

Ниже приведены простые алгоритмы для выбора данных и программы для исследования.

Для выбора космического снимка нужно определить необходимые характеристики данных, ответив на следующие вопросы:

– Каков размер объектов, которые нужно обнаружить на снимке?

– Как часто должны обновляться данные? Когда, по Вашему предположению, возникли объекты/явления, которые необходимо обнаружить?

– Насколько глобально распространён объект изучения? Какой должен быть размер сцены?

– Каковы необходимые спектральные диапазоны? Нужна ли возможность использовать спектральные каналы по отдельности? Нужны ли инфракрасные каналы? Планируете ли Вы использовать индексы вегетации, математические операции с каналами или классификацию?

Как выбрать программу для работы?

– Посмотреть, сопоставить снимки с собственными векторными данными, визуальное дешифрирование и оцифровка объектов с четкими границами – GoogleEarth, SAS-планета;

– Необходимость работы со спектральными каналами, визуальное дешифрирование и оцифровка объектов со сложными границами, создание картосхем, простейшая классификация (автоматизированное выделение объектов с четкими границами) – ArcGIS, QuantumGIS;

– Сложная классификация (автоматизированное выделение объектов с размытыми границами), извлечение скрытой информации, применение алгоритмов DataMining – ScanEx Image Processor, QuantumGIS+GDAL, PCI Geomatica, ENVI.

Дистанционное зондирование – мощный инструмент, который позволяет, с одной стороны, облегчить работу, а с другой – получить информацию, которую другим путем получить практически невозможно. Конечно, этот метод имеет разную эффективность в отношении к разным объектам исследования. Космические снимки незаменимы в мониторинговых исследованиях и для глобальных оценок; они очень эффективны при изучении лесных сообществ, что подтверждается огромным количеством исследований. Применение этого метода при изучении нелесных сообществ или отдельных видов несколько сложнее (и, как следствие, в этих областях ДЗЗ используется не так широко), но и тут космические снимки дают много полезной информации, и с увеличением доступности и разнообразия методов обработки проекты с использованием ДЗЗ в этих областях встречаются все чаще.

Есть все основания предположить, что количество научных работ с использованием серьезных методов обработки ДЗЗ также будет постепенно увеличиваться, потому что именно в пограничной между био-

логическими науками и анализом ДЗЗ области еще могут быть сделаны интересные открытия закономерностей состава и функционирования биологических систем на уровне организмов и сообществ.

Библиография

- Аксенов Д. Е., Дубинин М. Ю., Карпачевский М. Л., Ликсакова Н., Скворцов В., Смирнов Д., Яницкая Т. Выделение лесов высокой природоохранной ценности в Приморском крае. Категории, важные для сохранения растительного покрова. Владивосток; М., 2006. 186 с.
- Антипин В. К., Токарев П. Н. Структурная организация и картирование болот национального парка «Водлозерский» // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. № 1–6. С. 1584–1586.
- Архипова М. В. Анализ современного состояния широколиственных лесов среднерусской возвышенности с использованием космических снимков Landsat // Фундаментальные исследования. 2013. № 11–6. С. 1181–1185.
- Барталев С. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Потапов П. В., Турубанова С. А., Ярошенко А. Ю. Леса России: преобладающие группы древесных пород и сомкнутость древесного полога: Карта масштаба 1:14 000 000. М., 2004. URL:<http://forestforum.ru/info/pictures/rusmap.pdf> (дата обращения: 27.03.2016).
- Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Барталев С. А., Лупян Е. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Исследования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–217.
- Владимиров И. Н., Софронов А. П., Сороковой А. А., Кобылкин Д. В., Фролов А. А. Структура растительного покрова западной части Верхнеангарской котловины // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 44–53.
- Гаврилюк Е. А., Ершов Д. В. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.
- Дубовик Д. С., Якутин М. В. Динамика экосистем Улуг-Хемской котловины Республики Тыва по данным дистанционного зондирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 3. С. 56–60.
- Елсаков В. В., Володин В. В., Чадин И. Ф., Паршина Е. И., Марущак И. О. Спутниковый мониторинг в оценке ресурсов аконита высокого на Приполярном Урале // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. № 1–4. С. 1123–1129.
- Ермаков Н. Б., Полякова М. А., Черникова Т. С. Картографирование лесной растительности в горах Алтае-Саянской горной области // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Биология, клиническая медицина. 2012. Т. 10.2. С. 24–30.
- Жарко В. О., Барталев С. А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 159–170.
- Завадская А. В., Яблоков В. М. Эколого-географические основы рекреационного использования термальных экосистем (на примере долины р. Гейзерной) // Труды Кроноцкого государственного природного заповедника. Воронеж, 2014. Вып. 3. С. 190–208.
- Исаев А. С., Черненко Т. В. Мониторинг биоразнообразия лесов: подходы и результаты // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2009. С. 60–62.
- Климина Е. М., Остроухов А. В. Анализ динамики нарушенности темнохвойных лесов Северного Сихоте-Алиня на основе использования спутниковых данных // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1–4. С. 996–1000.
- Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. Н. Аэрокосмические методы географических исследований. М., 2004. 336 с.
- Колесникова О. Н., Черепанов А. С. Возможности ПК ENVI для обработки мультиспектральных и гиперспектральных данных // Геоматика. 2009. № 3. С. 24–27.
- Комарова А. Ф. Создание карты участия пихты *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach в древостое методом нейронных сетей // Ломоносов-2012: Тез. докл. М., 2012. С. 294–295.

- Комарова А. Ф., Куксина Н. В., Бобровский М. В., Плотников М. П. Леса высокой природоохранной ценности в зоне распространения лесов из пихты кавказской *Abies nordmanniana* (Stev.) Sprach. (Краснодарский край, Республика Адыгея) // Вестник Российского университета дружбы народов. 2010. № 5. С. 56–61.
- Кравцова В. И. Методические подходы в аэрокосмических исследованиях динамики северной границы леса // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 133–139.
- Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1. С. 18–32.
- Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Незамаев С. А., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 3 (19). С. 72–82.
- Лабутина И. А., Балдина Е. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. М., 2011. 88 с.
- Липшиц С. Ю. К познанию флоры и растительности горячих источников Камчатки // Бюлл. МОИП. Отд. Биол. 1936. Т. 45. № 2. С. 143–158.
- Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: Учебник. М., 2010. 424 с.
- Малышева Н. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М., 2012. 154 с.
- Мячина К. В. Дистанционный мониторинг растительного покрова на участке естественной степи в Оренбургской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. № 5. С. 178–181.
- Нешатаева В. Ю. Растительность полуострова Камчатка. М., 2009. 537 с.
- Пономарёв Е. И., Исмаилова Д. М., Назимова Д. И. Спутниковый мониторинг горных лесных экосистем Саян // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2011. № 4(1). С. 75–85.
- Попова Т. А., Бычкова И. А. Дистанционные методы в изучении растительного покрова // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. СПб., 2011. Т. 1. С. 404–408.
- Попова Т. А., Бычкова И. А. Заращение водоемов на Северо-Западе России воздушно-водной и водной растительностью в различных экологических условиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1(6). С. 1515–1518.
- Потапов П. В., Ярошенко А. Ю., Турубанова С. А. Малонарушенные лесные территории севера Европейской России // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность: В 2 кн. М.: Наука, 2004. С. 146–153.
- Пузаченко М. Ю., Котлов И. П., Черненькова Т. В. Технологическая схема мониторинга природных объектов с использованием ДДЗ и ГИС-технологий // Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы. М., 2008. С. 347–355.
- Пузаченко М. Ю., Черненькова Т. В., Басова Е. В. Природно-антропогенная вариабельность растительного покрова центральной части Мурманской области и ее картографическое отображение // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. СПб., 2011. Т. 1. С. 408–411.
- Рассказов А. А., Галаганова Л. А. Использование данных Landsat для оценки динамики изменений растительного покрова на территории Мещеры // Научные труды Института непрерывного профессионального образования. 2014. № 3. С. 236–239.
- Савельев А. А. Биохорологическое разнообразие и моделирование пространственной структуры растительного покрова (геоинформационный подход): Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Казань, 2004. 244 с.
- Слабухина С. В. Изучение морфологической структуры микроландшафтов Васюганского болотного комплекса на основе дешифрирования космических снимков // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 388. С. 253–256.
- Ткачук Т. Е. Многолетняя динамика растительности Даурского заповедника по данным спутникового зондирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1(5). С. 1391–1394.
- Трасс Х. Х. О растительности окрестностей горячих ключей и гейзеров долины реки Гейзерной полуострова Камчатки // Исследование природы Дальнего Востока. Таллин, 1963. С. 112–146.
- Финиченко Е. Н., Дмитриев В. В. Моделирование вегетационных параметров водно-болотной растительности западносибирского региона на основе базы метеоданных и данных

- радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 239–245.
- Ханов З. М., Пшегусов Р. Х. Опыт использования пространственного анализа и моделирования распространения избранных видов лишайников Центрального Кавказа (на примере Кабардино-Балкарской Республики) // Лихенология в России: актуальные проблемы и перспективы исследований. СПб., 2014. С. 221–230.
- Хворостухин Д. П., Кликунов А. А. Применение ГИС, данных дистанционного зондирования Земли и преобразования Tasseled cap для изучения современной растительности ландшафтов региона // Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер.: Науки о Земле. 2013. Т. 13. Вып. 2. С. 40–42.
- Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М., 2008. 312 с.
- Черненко Т. В., Левицкая Н. Н., Козлов Д. Н., Тихонова Е. В., Огуреева Г. Н., Пестерова О. А. Оценка состояния и динамики биоразнообразия лесов Московской области с использованием наземных и дистанционных методов // Разнообразие и динамика лесных экосистем России: В 2 кн. М., 2012. Кн. 1. С. 316–370.
- Черосов М. М., Аммосова Е. В., Троева Е. И. К корректировке контуров мелкомасштабной карты растительности северо-востока Якутии (опыт применения ГИС-технологий и анализа карты) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1–6. С. 1656–1659.
- Шабанов Д. И., Иолин М. М., Борзова А. С., Агошкова Е. В. Использование ГИС-технологий и методов ДЗЗ при анализе пространственного распределения опустынивания на территории Северного Прикаспия // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 11. Естеств. науки. 2014. № 4 (10). С. 48–56.
- Шарикалов А. Г., Якутин М. В. Анализ состояния таежных экосистем с использованием методики автоматизированного дешифрирования // Известия Алтайского государственного университета. 2014. № 3. С. 123–127.
- Шипунов А. Б., Балдин Е. М., Волкова П. А., Коробейников А. И., Назарова С. А., Петров С. В., Суфиянов В. Г. Наглядная статистика. Используем R! . М., 2012. 298 с.
- Шовенгердт Р. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М., 2010. 560 с.
- Яблоков В. М., Завадская А. В. Геоинформационное моделирование температурного поля гидротермальных систем (на примере долины р. Гейзерной) // Геодезия и картография. 2013. № 3. С. 24–31.
- Ярошенко А. Ю., Добрынин Д. А., Егоров А. В., Журавлева И. В., Маниша А. Е., Потапов П. В., Турубанова С. А., Хакимулин Е. В. Леса центра и севера Европейской России: Карта масштаба 1:4500000. М., 2008. URL:http://forestforum.ru/info/map_for_print.pdf (дата обращения: 27.03.2016).
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R. A review of vegetation indices // Rem. Sens. Reviews. 1995. Vol. 13: 1–2. P. 95–120.
- Banskota A., Kayastha N., Falkowski M., Wulder M. A., Froese R. E., White J. C. Forest monitoring using Landsat time-series data: A review // Canadian Journal of Rem. Sens. 2014. Vol. 40. № 5. P. 362–384. DOI:10.1080/07038992.2014.987376.
- Barrachina M., Cristóbal J., Tulla A. F. Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing // Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf. 2015. Vol. 38. P. 184–192. DOI: 10.1016/j.jag.2014.12.002.
- Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Int. J. of Rem. Sens. 2003. Vol. 24(9). P. 1977–1982.
- Beck P. S. A., Jönsson P., Høgda K.-A., Karlsen S. R., Eklundh L., Skidmore A. K. A ground-validated NDVI dataset for monitoring vegetation dynamics and mapping phenology in Fennoscandia and the Kola peninsula // Int. J. of Rem. Sens. 2007. Vol. 28:19. P. 4311–4330. DOI: 10.1080/01431160701241936.
- Bradley B. A., Mustard J. F. Characterizing the landscape dynamics of an invasive plant and risk of invasion using remote sensing // Ecological Applications. 2006. Vol. 16(3). P. 1132–1147. DOI: 10.1890/1051-0761(2006)0162.0.CO;2.
- Bradley B. A. Remote detection of invasive plants: a review of spectral, textural and phenological approaches // Biological Invasions. 2014. Vol. 16.7. P. 1411–1425. DOI: 10.1007/s10530-013-0578-9.
- Buchanan G. M., Brink A. B., Leidner A. K., Rose R., Wegmann M. Advancing terrestrial conservation through remote sensing // Ecological Informatics. 2015 (in press).

- Buck O., Millán V. E. G., Klink A., Pakzad K. Using information layers for mapping grassland habitat distribution at local to regional scales // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 37. P. 83–89. DOI: 10.1016/j.jag.2014.10.012.
- Camathias L., Bergamini A., Kuchler M., Stofer S., Baltensweiler A. High-resolution remote sensing data improves models of species richness // *Applied Vegetation Science*. 2013. Vol. 16.4. P. 539–551. DOI: 10.1111/avsc.12028.
- Chen Y., Dengsheng L., Geping L., Jingfeng H. Detection of vegetation abundance change in the alpine tree line using multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery // *Int. J. of Rem. Sens.* 2015. Vol. 36:18. P. 4683–4701. DOI: 10.1080/01431161.2015.1088675.
- Cohen W. B., Spies T. A. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery // *Rem. Sens. of Env.* 1992. № 41(1). P. 1–17. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90056-P.
- Cord A., Rödder D. Inclusion of habitat availability in species distribution models through multi-temporal remote sensing data? // *Ecological Applications*. 2011. Vol. 21(8). P. 3285–3298. DOI: 10.1890/11-0114.1.
- Cord A. F., Klein D., Mora F., Dech S. Comparing the suitability of classified land cover data and remote sensing variables for modeling distribution patterns of plants // *Ecological Modelling*. 2014. Vol. 272. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.09.011.
- Dalmayne J., Möckel T., Prentice H. C., Schmid B. C., Hall K. Assessment of fine-scale plant species beta diversity using WorldView-2 satellite spectral dissimilarity // *Ecological Informatics*. 2013. Vol. 18. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2013.05.004.
- Davranchea A., Lefebvre G., Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series // *Rem. Sens. of Env.* 2010. Vol. 114. Issue 3. P. 552–562. DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.009.
- DeFries R. S., Townshend J. R. G. NDVI-derived land cover classifications at a global scale // *Int. J. of Rem. Sens.* 1994. Vol. 15.17. P. 3567–3586. DOI: 10.1080/01431169408954345.
- Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services // *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 120. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
- Fassnacht F. E., Li L., Fritz A. Mapping degraded grassland on the Eastern Tibetan Plateau with multi-temporal Landsat 8 data—where do the severely degraded areas occur? // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 42. P. 115–127. DOI: 10.1016/j.jag.2015.06.005.
- Fassnacht K. S., Cohen W. B., Spies T. A. Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 222. № 1. P. 167–181. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.026.
- Foody G. M. Status of land cover classification accuracy assessment // *Rem. Sens. of Env.* 2002. Vol. 80.1. P. 185–201. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4.
- Fox L. *Essential Earth imaging for GIS*. California, 2015. 115 p.
- Fuller D. O. Remote detection of invasive *Melaleuca* trees (*Melaleuca quinquenervia*) in South Florida with multispectral IKONOS imagery // *Int. J. of Rem. Sens.* 2005. Vol. 26:5. P. 1057–1063. DOI: 10.1080/01430060512331314119.
- Gallant A. L. The Challenges of Remote Monitoring of Wetlands // *Rem. Sens.* 2015. Vol. 7(8). P. 10938–10950. DOI: 10.3390/rs70810938.
- Gavier-Pizarro G. I., Kuemmerle T., Hoyo L. E., Stewart S. I., Huebner C. D., Keuler N. S., Radeloff V. C. Monitoring the invasion of an exotic tree (*Ligustrum lucidum*) from 1983 to 2006 with Landsat TM/ETM+ satellite data and Support Vector Machines in Córdoba, Argentina // *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 122. P. 134–145. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.023.
- Gillespie T. W., Foody G. M., Rocchini D., Giorgi A. P., Saatchi S. Measuring and modelling biodiversity from space // *Progress in Physical Geography*. 2008. Vol. 32(2). P. 203–221. DOI: 10.1177/0309133308093606.
- Gould W. Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots // *Ecological applications*. 2000. Vol. 10. № 6. P. 1861–1870. DOI: 10.1890/1051-0761(2000)010%5B1861:RSOVPS%5D2.0.CO%3B2.
- Hansen M. C., Townshend J. R. G., DeFries R. S., Carroll M. Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales // *Int. J. of Rem. Sens.* 2005. Vol. 26. № 19. P. 4359–4380. DOI: 10.1080/01431160500113435.
- Hojas-Gascón L., Belward A., Eva H., Ceccherini G., Hagolle O., Garcia J., Cerutti P. Potential improvement for forest cover and forest degradation mapping with the forthcoming Sentinel-2 program // *Int. Archives of the Photogram., Rem. Sens. & Spatial Inf. Sciences*. 2015. P. 417–423.

- Homolova L., Malenovský Z., Clevers J. G., Garcia-Santos G., Schaepman M. E. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping // *Ecological Complexity*. 2013. Vol. 15. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.ecocom.2013.06.003.
- Hou X., Gao S., Niu Z., Xu Z. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data // *Int. J. of Rem. Sens.* 2014. Vol. 35:9. P. 3316–3330. DOI: 10.1080/01431161.2014.903437.
- Huang C., Asner G. P. Applications of Remote Sensing to Alien Invasive Plant Studies – Review // *Sensors*. 2009. Vol. 9(6). P. 4869–4889. DOI:10.3390/s90604869.
- Isaacson B. N., Serbin S. P., Townsend P. A. Detection of relative differences in phenology of forest species using Landsat and MODIS // *Landscape ecology*. 2012. Vol. 27. № 4. P. 529–543. DOI: 10.1007/s10980-012-9703-x.
- Johnston S. E., Henry M. C., Gorchoff D. L. Using Advanced Land Imager (ALI) and Landsat Thematic Mapper (TM) for the Detection of the Invasive Shrub *Lonicera maackii* in Southwestern Ohio Forests // *GIScience & Rem. Sens.* 2012. Vol. 49:3. P. 450–462. DOI: 10.2747/1548-1603.49.3.450.
- Joshi C., De Leeuw J., Skidmore A. K., Van Duren I. C., Van Oosten H. Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2006. Vol. 8(2). P. 84–95. DOI: 10.1016/j.jag.2005.08.004.
- Karlson M., Ostwald M., Reese H., Sanou J., Tankoano B., Mattsson E. Mapping Tree Canopy Cover and Aboveground Biomass in Sudano-Sahelian Woodlands Using Landsat 8 and Random Forest // *Rem. Sens.* 2015. Vol. 7(8). P. 10017–10041. DOI: 10.3390/rs70810017.
- Klemas V. Remote sensing of wetlands: case studies comparing practical techniques // *Journal of Coastal Research*. 2011. Vol. 27. № 3. P. 418–427. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00174.1.
- Krankina O. N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W. B., Nelson P., Baccini A. Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data // *Biogeosciences*. 2008. Vol. 5(6). P. 1809–1820. DOI: 10.5194/bg-5-1809-2008.
- Kuenzer C., Ottinger M., Wegmann M., Guo H., Wang C., Zhang J., Dech S., Wikelski M. Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks // *Int. J. of Rem. Sens.* 2014. Vol. 35:18. P. 6599–6647. DOI: 10.1080/01431161.2014.964349.
- Laba M., Downs R., Smith S., Welsh S., Neider C., White S., Richmond M., Philpot W., Baveye, P. Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National Estuarine Research Reserve using Quickbird satellite imagery // *Rem. Sens. of Env.* 2008. Vol. 112(1). P. 286–300. DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.003.
- Laurin G. V., Frate F. D., Pasolli L., Notarnicola C., Guerriero L., Valentini R. Discrimination of vegetation types in alpine sites with ALOS PALSAR-, RADARSAT-2-, and lidar-derived information // *Int. J. of Rem. Sens.* 2013. Vol. 34:19. P. 6898–6913. DOI: 10.1080/01431161.2013.810823.
- Lehnert L. W., Meyer H., Wang Y., Miehe G., Thies B., Reudenbach C., Bendix, J. Retrieval of grassland plant coverage on the Tibetan Plateau based on a multi-scale, multi-sensor and multi-method approach // *Rem. Sens. of Env.* 2015. Vol. 164. P. 197–207. DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.020.
- Leitão P. J., Schwieder M., Suess S., Catry I., Milton E. J., Moreira F., Osborne P. E., Pinto M.J., van der Linden S., Hostert P. Mapping beta diversity from space: Sparse generalised dissimilarity modelling (SGDM) for analysing high-dimensional data // *Methods Ecol. Evol.* 2015. Vol. 6. P. 764–771. DOI: 10.1111/2041-210X.12378.
- Levin N., Shmida A., Levanoni O., Tamari H., Kark S. Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices // *Diversity and Distributions*. 2007. Vol. 13(6). P. 692–703. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2007.00372.x.
- Liu W., Song C., Schroeder T. A., Cohen W. B. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data // *Int. J. of Rem. Sens.* 2008. Vol. 29:13. P. 3855–3872. DOI: 10.1080/01431160701840166.
- Margono B. A., Bwangoy J.-R. B., Potapov P. V., Hansen M. C. Mapping wetlands in Indonesia using Landsat and PALSAR data-sets and derived topographical indices // *Geo-spatial Information Science*. 2014. Vol. 17:1. P. 60–71. DOI: 10.1080/10095020.2014.898560.
- McRoberts R. E., Cohen W. B., Næsset E., Stehman S. V., Tomppo E.O. Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 25:4. P. 340–367. DOI: 10.1080/02827581.2010.497496.
- Möckel T. Hyperspectral and multispectral remote sensing for mapping grassland vegetation: PhD diss. Lund University, 2015. 41 p.
- Mozumder C., Tripathi N. K., Tipdecho T. Ecosystem evaluation (1989–2012) of Ramsar wetland Deepor Beel using satellite-derived indices // *Environmental monitoring and assessment*. 2014. Vol. 186. № 11. P. 7909–7927. DOI: 10.1007/s10661-014-3976-2.

- Mui A., He Y., Weng Q. An object-based approach to delineate wetlands across landscapes of varied disturbance with high spatial resolution satellite imagery // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Rem. Sens.* 2015. Vol. 109. P. 30–46. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.08.005.
- Murray H., Lucieer A., Williams R. Texture-based classification of sub-Antarctic vegetation communities on Heard Island // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2010. Vol. 12. № 3. P. 138–149. DOI: 10.1016/j.jag.2010.01.006.
- Nagendra H., Lucas R., Honrado J. P., Jongman R. H., Tarantino C., Adamo M., Mairota P. Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats // *Ecological Indicators.* 2013. Vol. 33. P. 45–59. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.09.014.
- Nilsen L., Arnesen G., Joly D., Malnes E. Spatial modelling of Arctic plant diversity // *Biodiversity.* 2013. Vol. 14:1. P. 67–78. DOI: 10.1080/14888386.2012.717008.
- Odindi J., Adam E., Ngubane Z., Mutanga O., Slotow R. Comparison between WorldView-2 and SPOT-5 images in mapping the bracken fern using the random forest algorithm // *Journal of Applied Rem. Sens.* 2014. Vol. 8(1). P. 083527-1 – 083527-16. DOI: 10.1117/1.JRS.8.083527.
- Onojeghuo A. O., Blackburn G. A. Mapping reedbed habitats using texture-based classification of QuickBird imagery // *Int. J. of Rem. Sens.* 2011. Vol. 32. № 23. P. 8121–8138. DOI: 10.1080/01431161.2010.532822.
- Ozesmi S. L., Bauer M. E. Satellite remote sensing of wetlands // *Wetlands ecology and management.* 2002. Vol. 10. № 5. P. 381–402. DOI: 10.1023/A:1020908432489.
- Parviainen M., Luoto M., Heikkinen R. K. The role of local and landscape level measures of greenness in modelling boreal plant species richness // *Ecological Modelling.* 2009. Vol. 220. № 20. P. 2690–2701. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.07.017.
- Parviainen M., Zimmermann N. E., Heikkinen R. K., Luoto M. Using unclassified continuous remote sensing data to improve distribution models of red-listed plant species // *Biodiversity and Conservation.* 2013. Vol. 22. P. 1731–1754. DOI: 10.1007/s10531-013-0509-1.
- Peterson E. B. Estimating cover of an invasive grass (*Bromus tectorum*) using tobit regression and phenology derived from two dates of Landsat ETM+ data // *Int. J. of Rem. Sens.* 2005. Vol. 26:12. P. 2491–2507. DOI: 10.1080/01431160500127815.
- Petrou Z. I., Manakos I., Stathaki T. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets // *Biodiversity and Conservation.* 2015. Vol. 24. № 10. P. 2333–2363. DOI: 10.1007/s10531-015-0947-z.
- Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker C. J., Stenseth N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // *Trends in Ecology and Evolution.* 2005. Vol. 20. P. 503–510. DOI: 10.1016/j.tree.2005.05.011.
- Petus C., Lewis M., White D. Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI // *Ecological Indicators.* 2013. Vol. 34. P. 41–52. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.04.009.
- Pflugmacher D., Cohen W. B., Kennedy R. E. Using Landsat-derived disturbance history (1972–2010) to predict current forest structure // *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 122. P. 146–165. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.025.
- Polychronaki A., Spindler N., Schmidt A., Stoinschek B., Zebisch M., Renner K., Sonnenschein R., Notarnicola C. Integrating RapidEye and ancillary data to map alpine habitats in South Tyrol // *Italy Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 37. P. 65–71. DOI: 10.1016/j.jag.2014.11.008.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M. C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Rem. Sens. of Env.* 2011. Vol. 115. № 2. P. 548–561.
- Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Rem. Sens. of Env.* 2015. Vol. 159. P. 28–43. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
- Pouteau R., Meyer J. Y., Taputuarai R., Stoll B. Support vector machines to map rare and endangered native plants in Pacific islands forests // *Ecological Informatics.* 2012. Vol. 9. P. 37–46. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2012.03.003.
- Price K. P., Guo X., Stiles J. M. Optimal Landsat TM band combinations and vegetation indices for discrimination of six grassland types in eastern Kansas // *Int. J. of Rem. Sens.* 2002. Vol. 23:23. P. 5031–5042. DOI: 10.1080/01431160210121764.
- Rapinel S., Clément B., Magnanon S., Sellin V., Hubert-Moy L. Identification and mapping of natural vegetation on a coastal site using a Worldview-2 satellite image // *Journal of environmental management.* 2014. Vol. 144. P. 236–246. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.05.027.

- Rapinel S., Bouzillé J. B., Oszwald J., Bonis A. Use of bi-Seasonal Landsat-8 Imagery for Mapping Marshland Plant Community Combinations at the Regional Scale // *Wetlands*. 2015. Vol. 35. Issue 6. P. 1043–1054. DOI: 10.1007/s13157-015-0693-8.
- Red Data Book of Plant Communities in the former USSR. Birmingham, 1997. 69 p.
- Reese H., Nyström M., Nordkvist K., Olsson H. Combining airborne laser scanning data and optical satellite data for classification of alpine vegetation // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2014. Vol. 27. P. 81–90. DOI: 10.1016/j.jag.2013.05.003.
- Resasco J., Hale A. N., Henry M. C., Gorchoff D. L. Detecting an invasive shrub in a deciduous forest understory using late-fall Landsat sensor imagery // *Int. J. Remote Sens.* 2007. Vol. 29. P. 3739–3745. DOI: 10.1080/01431160701373721.
- Richards J. A., Jia X. Remote sensing digital image analysis. An introduction. Berlin, 2006. 439 p.
- Rocchini D. Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem α -diversity by satellite imagery // *Rem. Sens. of Environ.* 2007. Vol. 111. P. 423–434. DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.018.
- Rocchini D., Balkenhol N., Carter G. A., Foody G. M., Gillespie T. W., He K. S., Kark S., Levin N., Lucas K., Luoto M., Nagendra H., Oldeland J., Ricotta C., Southworth J., Neteler M. Remotely sensed spectral heterogeneity as a proxy of species diversity: recent advances and open challenges // *Ecol. Inform.* 2010. Vol. 5. P. 318–329. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2010.06.001.
- Rocchini D., Andreo V., Förster M., Garzon-Lopez C. X., Gutierrez A. P., Gillespie T. H., Hauffe H. C., He K. S., Kleinschmit B., Mairota P., Marcantonio M., Metz M., Nagendra N., Pareeth S., Ponti L., Ricotta C., Rizzoli A., Schaab G., Zebisch M., Zorer R., Neteler M. Potential of remote sensing to predict species invasions. A modelling perspective // *Prog. Phys. Geogr.* 2015a. Vol. 39. P. 283–309.
- Rocchini D., Hernández-Stefanoni J. L., He K. S. Advancing species diversity estimate by remotely sensed proxies: a conceptual review // *Ecol. Inform.* 2015b. Vol. 25. P. 22–28. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2014.10.006.
- Rodriguez-Galiano V. F., Chica-Rivas M. Evaluation of different machine learning methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat images and Digital Terrain Models // *Int. J. of Digital Earth.* 2014. Vol. 7. № 6. P. 492–509. DOI: 10.1080/17538947.2012.748848.
- Schaffrath D., Barthold F. K., Bernhofer C. Spatiotemporal variability of grassland vegetation cover in a catchment in Inner Mongolia, China, derived from MODIS data products // *Plant and soil.* 2011. Vol. 340. №1–2. P. 181–198. DOI: 10.1007/s11104-010-0465-4.
- Schmidt M., König K., Müller J. V. Modelling species richness and life form composition in Sahelian Burkina Faso with remote sensing data // *Journal of Arid Environments.* 2008. Vol. 72. P. 1506–1517. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.015.
- Schuster C., Schmidt T., Conrad C., Kleinschmit B., Förster, M. Grassland habitat mapping by intra-annual time series analysis—Comparison of RapidEye and TerraSAR-X satellite data // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 34. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.jag.2014.06.004.
- Sexton J. O., Song X.-P., Feng M., Noojipady P., Anand A., Huang C., Kim D.-H., Collins K. M., Channan S., DiMiceli C., Townshend J. R. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error // *Int. J. of Digital Earth.* 2013. Vol. 6:5. P. 427–448. DOI: 10.1080/17538947.2013.786146.
- Shmitt U., Ruppert G. S. Forest classification of multitemporal mosaicked satellite images // *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing.* 1996. Vol. XXXI. Part B7. P. 602–605.
- Short N. M. The LANDSAT Tutorial Workbook: Basics of Satellite Remote Sensing. NASA Reference Publication 1078. NASA. 2011. URL:http://pdf20.termsbooks.org/pdf/the-landsat-tutorial-workbook-basics-of-satellite-remote-sensing-nasa-re_d7mnnv.pdf (дата обращения: 05.12.2015).
- Shouse M., Liang L., Fei S. Identification of understory invasive exotic plants with remote sensing in urban forests // *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2013. Vol. 21. P. 525–534. DOI: 10.1016/j.jag.2012.07.010.
- Silva T. S., Costa M. P., Melack J. M., Novo E. M. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications // *Env. Monit. and Assessment.* 2008. Vol. 140(1–3). P. 131–145. DOI: 10.1007/s10661-007-9855-3.
- Somodi I., Čarni A., Ribeiro D., Podobnikar T. Recognition of the invasive species *Robinia pseudacacia* from combined remote sensing and GIS sources // *Biological conservation.* 2012. Vol. 150(1). P. 59–67. DOI: 10.1016/j.biocon.2012.02.014.
- Stehman S. V., Czaplewski R. L. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles // *Rem. Sens. of Env.* 1998. Vol. 64. P. 331–344. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00010-8.
- Stow D. A., Hope A., McGuire D., Verbyla D., Gamon J., Huemmrich F., Houston S., Racine C., Sturm M., Tape K., Hinzman L., Yoshikawa K., Tweedie C., Noyle B., Silapaswan C., Douglas D., Griffith B., Jia

- G., Epstein H., Walker D., Daeschner S., Petersen A., Zhou L., Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems // *Rem. Sens. of Env.* 2004. Vol. 89(3). P. 281–308. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.018.
- Townsend P. A., Walsh S. J. Remote sensing of forested wetlands: application of multitemporal and multispectral satellite imagery to determine plant community composition and structure in southeastern USA // *Plant Ecology*. 2001. Vol. 157. № 2. P. 129–149. DOI: 10.1023/A:1013999513172.
- Tuanmu M. N., Viña A., Bearer S., Xu W., Ouyang Z., Zhang H., Liu, J. Mapping understory vegetation using phenological characteristics derived from remotely sensed data // *Rem. Sens. of Env.* 2010. Vol. 114(8). P. 1833–1844. DOI: 10.1016/j.rse.2010.03.008.
- Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Rem. Sens. of Env.* 1979. Vol. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Turner W., Spector S., Gardiner N., Fladerland M., Sterling E., Steininger M. Remote sensing for biodiversity science and conservation // *Trends Ecol. Evol.* 2003. Vol. 18. P. 306–314. DOI: 10.1016/S0169-5347(03)00070-3.
- Turner W., Rondinini C., Pettorelli N., Mora B., Leidner A. K., Szantoi Z., Buchanan G., Dech S., Dwyer J., Herold M., Koh L. P., Leimgruber P., Taubenboeck H., Wegmann M., Wikelski M., Woodcock, C. Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation // *Biological Conservation*. 2015. Vol. 182. P. 173–176. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.11.048.
- Vanselow K. A., Samimi C. Predictive mapping of dwarf shrub vegetation in an arid high mountain ecosystem using remote sensing and random forests // *Rem. Sens.* 2014. Vol. 6(7). P. 6709–6726. DOI: 10.3390/rs6076709.
- Viedma O., Torres I., Pérez B., Moreno J. M. Modeling plant species richness using reflectance and texture data derived from QuickBird in a recently burned area of Central Spain // *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 119. P. 208–221. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.024.
- Wang C., Guo H., Zhang L., Qiu Y., Sun Z., Liao J., Liu G., Zhang Y. Improved alpine grassland mapping in the Tibetan Plateau with MODIS time series: a phenology perspective // *Int. J. of Digital Earth*. 2015. Vol. 8. №2. P. 133–152. DOI: 10.1080/17538947.2013.860198.
- Wang Z. J., Jiao J. Y., Lei B., Su Y. An approach for detecting five typical vegetation types on the Chinese Loess Plateau using Landsat TM data // *Environmental monitoring and assessment*. 2015. Vol. 187(9). P. 1–16. DOI: 10.1007/s10661-015-4799-5.
- Whiteside T. G., Bartolo R. E. Mapping Aquatic Vegetation in a Tropical Wetland Using High Spatial Resolution Multispectral Satellite Imagery // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7(9). P. 11664–11694. DOI: 10.3390/rs70911664.
- Wilfong B. N., Gorchoff D. L., Henry M. C. Detecting an invasive shrub in deciduous forest understories using remote sensing // *Weed Science*. 2009. Vol. 57. № 5. P. 512–520. DOI: 10.1614/WS-09-012.1.
- Wright C., Gallant A. Improved wetland remote sensing in Yellowstone National Park using classification trees to combine TM imagery and ancillary environmental data // *Rem. Sens. of Env.* 2007. Vol. 107. № 4. P. 582–605. DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.019.
- Xie Y., Sha Z., Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review // *Journal of plant ecology*. 2008. Vol. 1. № 1. P. 9–23. DOI: 10.1093/jpe/rtm005.
- Xie Y., Zhang A., Welsh W. Mapping Wetlands and Phragmites Using Publically Available Remotely Sensed Images // *Photogram. Engineering & Rem. Sens.* 2015. Vol. 81. №. 1. P. 69–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.81.1.69>.
- Xu M., Watanachaturaporn P., Varshney P. K., Arora M. K. Decision tree regression for soft classification of remote sensing data // *Rem. Sens. of Env.* 2005. Vol. 97(3). P. 322–336. DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.008.
- Zhang Y., Lu D., Yang B., Sun C., Sun M. Coastal wetland vegetation classification with a Landsat Thematic Mapper image // *Int. J. of Rem. Sens.* 2011. Vol. 32:2. P. 545–561. DOI: 10.1080/01431160903475241.

Open-source multispectral remote sensing data for the investigation of plant communities

KOMAROVA Anna *Greenpeace Russia, ana.komarova@greenpeace.org*

ZHURAVLEVA Ilona *Greenpeace Russia, ilona.zhuravleva@greenpeace.org*

YABLOKOV Vasily *Greenpeace Russia, vasily.yablokov@greenpeace.org*

Keywords:

satellite images
mapping plant
communities methodology

Summary: In the article the possibilities of the multispectral remote sensing data to study the plant communities are shown. The usage of open-source data in visual and infrared spectral bands is considered. The possible ways to receive free satellite images in different resolutions, the main methods of their analysis as well as the characteristics and the area of application of these images are presented. The information is specified with the examples of the projects realized at the GIS-Lab and Forest Unit of Greenpeace Russia.

References

- Aksenov D. E. Dubinin M. Yu. Karpachevskiy M. L. Liksakova N. Skvorcov V. Smirnov D. Yanickaya T. Mapping high conservation value forests of Primorsky kray, Russian Far East. Categories important for preservation of flora and vegetation. Vladivostok; M., 2006. 186 p.
- Antipin V. K. Tokarev P. N. Structural organization and mapping the mires of the national park "Vodlozersky", *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2012. No. 1–6. C. 1584–1586. Arhipova M. V. The analysis of the actual state of deciduous forests in Central Russian upland using Landsat satellite images, *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. No. 11–6. C. 1181–1185. Bartalev S. A. Ershov D. V. Isaev A. S. Potapov P. V. Turubanova S. A. Yaroshenko A. Yu. Russia's Forests: Dominating Forest Types and Their Canopy Density: a map. M., 2004. URL: <http://forestforum.ru/info/pictures/rusmap.pdf> (data obrascheniya: 27.03.2016).
- Bartalev S. A. Egorov V. A. Ershov D. V. Isaev A. S. Lupyan E. A. Plotnikov D. E. Uvarov I. A. Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. T. 8. No. 4. C. 285–302. Bartalev S. A. Lupyan E. A. R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Science' Space Research Institute, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. T. 10. No. 1. C. 197–217.
- Vladimirov I. N. Sofronov A. P. Sorokovoy A. A. Kobylkin D. V. Frolov A. A. Vegetation structure of the west part of the Verkhneangarskaya hollow, *Geografiya i prirodnye resursy*. 2014. No. 2. P. 44–53.
- Gavrilyuk E. A. Ershov D. V. Methodology of processing of combined multiseasonal Landsat-TMs for mapping of Moscow region's terrestrial ecosystems, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2012. T. 9. No. 4. C. 15–23.
- Dubovik D. S. Yakutin M. V. The ecosystems dynamics in the Ulug-Hem depression of the Republic of Tuva according to remote sounding, *Interespo Geo-Sibir'*. 2012. No. 3. C. 56–60. 58.
- Elsakov V. V. Volodin V. V. Chadin I. F. Parshina E. I. Maruschak I. O. Satellite monitoring in the estimation of aconite high resources in subpolar Urals, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2010. No. 1–4. C. 1123–1129.
- Ermakov N. B. Polyakova M. A. Chernikova T. C. Geobotanical mapping of forests in the Altai-Sayanian mountain region, *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta*. Ser.: *Biologiya, klinicheskaya medicina*. 2012. T. 10.2. C. 24–30.
- Zharko V. O. Bartalev S. A. Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral-reflective seasonal changes, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. T. 11. No. 3. C. 159–170.
- Zavadskaya A. V. Yablokov V. M. Ecological and geographical basis for recreation usage of thermal ecosystem (on the example of the Gejzernaya valley), *Trudy Kronockogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika. Voronezh*, 2014. Vyp. 3. P. 190–208.

- Isaev A. S. Chernen'kova T. V. Forest biodiversity monitoring: approaches and results, Lesnye resursy taezhnoy zony Rossii: problemy lesopol'zovaniya i lesovosstanovleniya: Materialy Vserop. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem. Petrozavodsk, 2009. P. 60–62.
- Klimina E. M. Ostrouhov A. V. The analysis of dark-coniferous forests disturbance dynamics in Northern Sikhote-Alin on the basis of using the satellite data, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2011. T. 13. No. 1–4. P. 996–1000.
- Knizhnikov Yu. F. Kravcova V. I. Tutubalina O. N. Aerospace methods for geographical research. M., 2004. 336 p.
- Kolesnikova O. N. Cherepanov A. S. PK ENVI's opportunities for multispectral and hyperspectral data processing, Geomatika. 2009. No. 3. P. 24–27.
- Komarova A. F. Fir (*Abies nordmanniana* (Stev.) Spach) share of forest crown layer: mapping with neural network method, Lomonosov-2012: Tez. dokl. M., 2012. P. 294–295.
- Komarova A. F. Kuksina N. V. Bobrovskiy M. V. Plotnikov M. P. An example of fir High Conservation Value Forests identification in Krasnodar and Adygeya regions, Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. 2010. No. 5. P. 56–61.
- Kravcova V. I. Procedural approaches for space imagery-based research of northern timber-line dynamics, Geografiya i prirodnye resursy. 2012. No. 3. P. 133–139.
- Kurbanov E. A. Vorob'ev O. N. Gubaev A. V. Lezhnin S. A. Polevschikova Yu. A. Demisheva E. N. Four decades of forest research with the use of Landsat images, Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Lep. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2014. No. 1. P. 18–32.
- Kurbanov E. A. Vorob'ev O. N. Nezamaev S. A. Gubaev A. V. Lezhnin S. A. Polevschikova Yu. A. Thematic mapping and stratification of forests in Middle Zavolsgie by Landsat satellite images, Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Lep. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2013. No. 3 (19). P. 72–82.
- Labutina I. A. Baldina E. A. Remote sensing data for the monitoring of protected areas' ecosystems. M., 2011. 88 p.
- Lipshic S. Yu. On the flora and vegetation of Kamchatka hot springs, Byull. MOIP. Otd. Biol. 1936. T. 45. No. 2. P. 143–158.
- Lur'e I. K. Geoinformational mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of satellite images. M., 2010. 424 c.
- Malysheva N. V. Automated decoding of aerospace images of forests. M., 2012. 154 p.
- Myachina K. V. Remote monitoring of vegetation on the plot of natural steppe in the Orenburg region, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2014. No. 5. P. 178–181.
- Neshataeva V. Yu. Vegetation of Kamchatka peninsula. M., 2009. 537 p.
- Ismailova D. M. Nazimova D. I. Satellite monitoring of Sayanian mountain forests, Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya. 2011. No. 4(1). P. 75–85.
- Popova T. A. Bychkova I. A. Remote sensing methods for vegetation research, Otechestvennaya geobotanika: osnovnye vehi i perspektivy: Materialy Vserop. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem. SPb., 2011. T. 1. P. 404–408.
- Popova T. A. Bychkova I. A. Overgrowing the water reservoirs in the North-West of Russia in various ecological conditions, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. T. 14. No. 1(6). P. 1515–1518.
- Potapov P. V. Yaroshenko A. Yu. Turubanova S. A. Intact forest areas in the North of European Russia, Vostochnoevropeyskie lesa: istoriya v golocene i sovremennost': V 2 kn. M.: Nauka, 2004. P. 146–153.
- Puzachenko M. Yu. Kotlov I. P. Chernen'kova T. The technological scheme of monitoring natural objects using GIS and RS methods, Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii: metodologiya i metody. M., 2008. P. 347–355.
- Puzachenko M. Yu. Chernen'kova T. V. Basova E. V. Mapping of nature-anthropogenic variability of vegetation at the central part of Murmansk region, Otechestvennaya geobotanika: osnovnye vehi i perspektivy: Materialy Vserop. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem. SPb., 2011. T. 1. P. 408–411.
- Rasskazov A. A. Galaganova L. A. Landsat data for the assessment of dynamics and change in Meshchera vegetation, Nauchnye trudy Instituta nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya. 2014. No. 3. P. 236–239.
- Savel'ev A. A. Biochorological diversity and spatial modelling of vegetation (geoinformation approach). Kazan', 2004. 244 c.
- Slabuhina S. V. Studying the microlandscape of morphological structure of the Vasyugan peat by satellite images decoding, Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. No. 388. P. 253–256.

- Tkachuk T. E. Multi-year vegetation dynamics of Daurisky nature reserve according to remote-sensing data, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. T. 14. No. 1(5). P. 1391–1394.
- Trass H. H. On the vegetation of hot springs' surroundings in the Geyzernaya valley, Kamchatka peninsula, *Issledovanie prirody Dal'nego Vostoka*. Tallin, 1963. P. 112–146.
- Finichenko E. N. Dmitriev V. V. Simulation of vegetation parameters of wetlands vegetation of the West Siberian region by using satellite and ground data, *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. T. 8. No. 4. P. 239–245.
- Hanov Z. M. Pshegusov R. H. Spatial analysis and distribution modelling of some lichens in Central Caucasus, *Lihenologiya v Rossii: aktual'nye problemy i perspektivy issledovaniy*. SPb., 2014. P. 221–230.
- Hvorostuhin D. P. Klikunov A. A. Application of GIS, remote sensing and tasseled cap transformation for the study of modern landscape plants region, *Izvestiya Saratovskogo universiteta*. Nov. ser. Ser.: Nauki o Zemle. 2013. T. 13. Vyp. 2. P. 40–42.
- Chandra A. M. Gosh S. K. *Remote Sensing and GIS*. M., 2008. 312 c
- Chernen'kova T. V. Levickaya N. N. Kozlov D. N. Tihonova E. V. Ogureeva G. N. Pesterova O. A. Biodiversity assessment of Moscow region's forests by field and remote sensing methods, *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii: V 2 kn. M.*, 2012. Kn. 1. P. 316–370.
- Cherosov M. M. Ammosova E. V. Troeva E. I. On the correction of small-scale map contours of the vegetation in the north-eastern Yakutia (based on GIS methods and map analysis), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. T. 14. No. 1–6. P. 1656–1659.
- Shabanov D. I. Iolin M. M. Borzova A. S. Agoshkova E. V. Use of GIS and remote sensing for estimation of the desertification of Northern Caspian region, *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta*. Ser. 11. Estestv. nauki. 2014. No. 4 (10). P. 48–56.
- Sharikalov A. G. Yakutin M. V. The Analysis of Taiga Ecosystems Condition Applying Automatic Decoding Method, *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. No. 3. P. 123–127.
- Shipunov A. B. Baldin E. M. Volkova P. A. Korobeynikov A. I. Nazarova S. A. Petrov S. V. Sufiyarov V. G. *Pictorial statistic. Using R!*. M., 2012. 298 c.
- Shovengerdt R. *Remote sensing. Models and methods of image processing*. M., 2010. 560 p.
- Yablokov V. M. Zavadskaya A. V. Geoinformation modelling of temperature within geothermal systems (case study from the Geizernaya valley), *Geodeziya i kartografiya*. 2013. No. 3. P. 24–31.
- Yaroshenko A. Yu. Dobrynin D. A. Egorov A. V. Zhuravleva I. V. Manisha A. E. Potapov P. V. Turubanova S. A. Hakimulin E. V. *Forests of the Center and North of European Russia: a map*. M., 2008. URL: http://forestforum.ru/info/map_for_print.pdf (data obrascheniya: 27.03.2016).
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R. A review of vegetation indices, *Rem. Sens. Reviews*. 1995. Vol. 13: 1–2. P. 95–120.
- Banskota A., Kayastha N., Falkowski M., Wulder M. A., Froese R. E., White J. C. Forest monitoring using Landsat time-series data: A review, *Canadian Journal of Rem. Sens.* 2014. Vol. 40. No. 5. P. 362–384. DOI:10.1080/07038992.2014.987376.
- Barrachina M., Cristóbal J., Tulla A. F. Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 38. P. 184–192. DOI: 10.1016/j.jag.2014.12.002.
- Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *Int. J. of Rem. Sens.* 2003. Vol. 24(9). P. 1977–1982.
- Beck P. S. A., Jönsson P., Høgda K. A., Karlsen S. R., Eklundh L., Skidmore A. K. A ground-validated NDVI dataset for monitoring vegetation dynamics and mapping phenology in Fennoscandia and the Kola peninsula, *Int. J. of Rem. Sens.* 2007. Vol. 28:19. P. 4311–4330. DOI: 10.1080/01431160701241936.
- Bradley B. A. Mustard J. F. 1132:CTLDOA2.0.CO;2. Bradley B. A. Remote detection of invasive plants: a review of spectral, textural and phenological approaches, *Biological Invasions*. 2014. Vol. 16.7. P. 1411–1425. DOI: 10.1007/s10530-013-0578-9.
- Buchanan G. M., Brink A. B., Leidner A. K., Rose R., Wegmann M. Advancing terrestrial conservation through remote sensing, *Ecological Informatics*. 2015 (in press).
- Buck O., Millán V. E. G., Klink A., Pakzad K. Using information layers for mapping grassland habitat distribution at local to regional scales, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 37. P. 83–89. DOI: 10.1016/j.jag.2014.10.012.
- Camathias L., Bergamini A., Küchler M., Stofer S., Baltensweiler A. High-resolution remote sensing data improves models of species richness, *Applied Vegetation Science*. 2013. Vol. 16.4. P. 539–551. DOI: 10.1111/avsc.12028.
- Chen Y., Dengsheng L., Geping L., Jingfeng H. Detection of vegetation abundance change in the alpine tree line using multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery, *Int. J. of Rem. Sens.* 2015. Vol. 36:18. P. 4683–4701. DOI: 10.1080/01431161.2015.1088675.

- Cohen W. B., Spies T. A. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery, *Rem. Sens. of Env.* 1992. No. 41(1). P. 1–17. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90056-P.
- Cord A., Rödder D. Inclusion of habitat availability in species distribution models through multi-temporal remote sensing data?, *Ecological Applications*. 2011. Vol. 21(8). P. 3285–3298. DOI: 10.1890/11-0114.1.
- Cord A. F., Klein D., Mora F., Dech S. Comparing the suitability of classified land cover data and remote sensing variables for modeling distribution patterns of plants, *Ecological Modelling*. 2014. Vol. 272. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.09.011.
- Dalmayne J., Möckel T., Prentice H. C., Schmid B. C., Hall K. Assessment of fine-scale plant species beta diversity using WorldView-2 satellite spectral dissimilarity, *Ecological Informatics*. 2013. Vol. 18. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2013.05.004.
- Davranchea A., Lefebvre G., Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series, *Rem. Sens. of Env.* 2010. Vol. 114. Issue 3. P. 552–562. DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.009.
- DeFries R. S., Townshend J. R. G. NDVI-derived land cover classifications at a global scale, *Int. J. of Rem. Sens.* 1994. Vol. 15.17. P. 3567–3586. DOI: 10.1080/01431169408954345.
- Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services, *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 120. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
- Fassnacht F. E., Li L., Fritz A. Mapping degraded grassland on the Eastern Tibetan Plateau with multi-temporal Landsat 8 data—where do the severely degraded areas occur?, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 42. P. 115–127. DOI: 10.1016/j.jag.2015.06.005.
- Fassnacht K. S., Cohen W. B., Spies T. A. Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer, *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 222. No. 1. P. 167–181. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.026.
- Foody G. M. Status of land cover classification accuracy assessment, *Rem. Sens. of Env.* 2002. Vol. 80.1. P. 185–201. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4.
- Fox L. *Essential Earth imaging for GIS*. California, 2015. 115 p.
- Fuller D. O. Remote detection of invasive *Melaleuca* trees (*Melaleuca quinquenervia*) in South Florida with multispectral IKONOS imagery, *Int. J. of Rem. Sens.* 2005. Vol. 26:5. P. 1057–1063. DOI: 10.1080/01430060512331314119.
- Gallant A. L. The Challenges of Remote Monitoring of Wetlands, *Rem. Sens.* 2015. Vol. 7(8). P. 10938–10950. DOI: 10.3390/rs70810938.
- Gavier-Pizarro G. I., Kuemmerle T., Hoyo L. E., Stewart S. I., Huebner C. D., Keuler N. S., Radeloff V. C. Monitoring the invasion of an exotic tree (*Ligustrum lucidum*) from 1983 to 2006 with Landsat TM/ETM+ satellite data and Support Vector Machines in Córdoba, Argentina, *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 122. P. 134–145. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.023.
- Gillespie T. W., Foody G. M., Rocchini D., Giorgi A. P., Saatchi S. Measuring and modelling biodiversity from 62 space, *Progress in Physical Geography*. 2008. Vol. 32(2). P. 203–221. DOI: 10.1177/0309133308093606
- Gould W. Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots, *Ecological applications*. 2000. Vol. 10. No. 6. P. 1861–1870. DOI: 10.1890/1051-0761(2000)010%5B1861:RSOVPS%5D2.0.CO%3B2.
- Hansen M. C., Townshend J. R. G., DeFries R. S., Carroll M. Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales, *Int. J. of Rem. Sens.* 2005. Vol. 26. No. 19. P. 4359–4380. DOI:10.1080/01431160500113435.
- Hojas-Gascón L., Belward A., Eva H., Ceccherini G., Hagolle O., Garcia J., Cerutti P. Potential improvement for forest cover and forest degradation mapping with the forthcoming Sentinel-2 program, *Int. Archives of the Photogram., Rem. Sens. & Spatial Inf. Sciences*. 2015. P. 417–423.
- Homolova L., Malenovský Z., Clevers J. G., Garcia-Santos G., Schaepman M. E. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping, *Ecological Complexity*. 2013. Vol. 15. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.ecocom.2013.06.003.
- Hou X., Gao S., Niu Z., Xu Z. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data, *Int. J. of Rem. Sens.* 2014. Vol. 35:9. P. 3316–3330. DOI: 10.1080/01431161.2014.903437.
- Huang C., Asner G. P. Applications of Remote Sensing to Alien Invasive Plant Studies – Review, *Sensors*. 2009. Vol. 9(6). P. 4869–4889. DOI:10.3390/s90604869.
- Isaacson B. N., Serbin S. P., Townsend P. A. Detection of relative differences in phenology of forest species using Landsat and MODIS, *Landscape ecology*. 2012. Vol. 27. No. 4. P. 529–543. DOI: 10.1007/s10980-012-9703-x.

- Johnston S. E., Henry M. C., Gorchov D. L. Using Advanced Land Imager (ALI) and Landsat Thematic Mapper (TM) for the Detection of the Invasive Shrub *Lonicera maackii* in Southwestern Ohio Forests, *GIScience & Rem. Sens.* 2012. Vol. 49:3. P. 450–462. DOI: 10.2747/1548-1603.49.3.450.
- Joshi C., De Leeuw J., Skidmore A. K., Van Duren I. C., Van Oosten H. Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2006. Vol. 8(2). P. 84–95. DOI: 10.1016/j.jag.2005.08.004.
- Karlson M., Ostwald M., Reese H., Sanou J., Tankoano B., Mattsson E. Mapping Tree Canopy Cover and Aboveground Biomass in Sudano-Sahelian Woodlands Using Landsat 8 and Random Forest, *Rem. Sens.* 2015. Vol. 7(8). P. 10017–10041. DOI: 10.3390/rs70810017.
- Klemas V. Remote sensing of wetlands: case studies comparing practical techniques, *Journal of Coastal Research.* 2011. Vol. 27. No. 3. P. 418–427. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00174.1.
- Krankina O. N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W. B., Nelson P., Baccini A. Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data, *Biogeosciences.* 2008. Vol. 5(6). P. 1809–1820. DOI: 10.5194/bg-5-1809-2008.
- Kuenzer C., Ottinger M., Wegmann M., Guo H., Wang C., Zhang J., Dech S., Wikelski M. Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks, *Int. J. of Rem. Sens.* 2014. Vol. 35:18. P. 6599–6647. DOI: 10.1080/01431161.2014.964349.
- Laba M., Downs R., Smith S., Welsh S., Neider C., White S., Richmond M., Philpot W., Baveye, P. Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National Estuarine Research Reserve using Quickbird satellite imagery, *Rem. Sens. of Env.* 2008. Vol. 112(1). P. 286–300. DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.003.
- Laurin G. V., Frate F. D., Pasolli L., Notarnicola C., Guerriero L., Valentini R. Discrimination of vegetation types in alpine sites with ALOS PALSAR-, RADARSAT-2-, and lidar-derived information, *Int. J. of Rem. Sens.* 2013. Vol. 34:19. P. 6898–6913. DOI: 10.1080/01431161.2013.810823
- Lehnert L. W., Meyer H., Wang Y., Miehe G., Thies B., Reudenbach C., Bendix, J. Retrieval of grassland plant coverage on the Tibetan Plateau based on a multi-scale, multi-sensor and multi-method approach, *Rem. Sens. of Env.* 2015. Vol. 164. P. 197–207. DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.020.
- Leitão P. J., Schwieder M., Suess S., Catry I., Milton E. J., Moreira F., Osborne P. E., Pinto M.J., van der Linden S., Hostert P. Mapping beta diversity from space: Sparse generalised dissimilarity modelling (SGDM) for analysing high-dimensional data, *Methods Ecol. Evol.* 2015. Vol. 6. P. 764–771. DOI: 10.1111/2041-210X.12378.
- Levin N., Shmida A., Levanoni O., Tamari H., Kark S. Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices, *Diversity and Distributions.* 2007. Vol. 13(6). P. 692–703. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2007.00372.x.
- Liu W., Song C., Schroeder T. A., Cohen W. B. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data, *Int. J. of Rem. Sens.* 2008. Vol. 29:13. P. 3855–3872. DOI: 10.1080/01431160701840166.
- Margono B. A., Bwangoy J. R. B., Potapov P. V., Hansen M. C. Mapping wetlands in Indonesia using Landsat and PALSAR data-sets and derived topographical indices, *Geo-spatial Information Science.* 2014. Vol. 17:1. P. 60–71. DOI: 10.1080/10095020.2014.898560.
- McRoberts R. E., Cohen W. B., Næsset E., Stehman S. V., Tomppo E.O. Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products, *Scandinavian Journal of Forest Research.* 2010. Vol. 25:4. P. 340–367. DOI: 10.1080/02827581.2010.497496.
- Möckel T. Hyperspectral and multispectral remote sensing for mapping grassland vegetation: PhD diss. Lund University, 2015. 41 p.
- Mozumder C., Tripathi N. K., Tipdecho T. Ecosystem evaluation (1989–2012) of Ramsar wetland Deepor Beel using satellite-derived indices, *Environmental monitoring and assessment.* 2014. Vol. 186. No. 11. P. 7909–7927. DOI: 10.1007/s10661-014-3976-2.
- Mui A., He Y., Weng Q. An object-based approach to delineate wetlands across landscapes of varied disturbance with high spatial resolution satellite imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Rem. Sens.* 2015. Vol. 109. P. 30–46. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.08.005.
- Murray H., Lucieer A., Williams R. Texture-based classification of sub-Antarctic vegetation communities on Heard Island, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2010. Vol. 12. No. 3. P. 138–149. DOI: 10.1016/j.jag.2010.01.006.
- Nagendra H., Lucas R., Honrado J. P., Jongman R. H., Tarantino C., Adamo M., Mairota P. Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats, *Ecological Indicators.* 2013. Vol. 33. P. 45–59. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.09.014.
- Nilsen L., Arnesen G., Joly D., Malnes E. Spatial modelling of Arctic plant diversity, *Biodiversity.* 2013. Vol. 14:1. P. 67–78. DOI: 10.1080/14888386.2012.717008.

- Odindi J., Adam E., Ngubane Z., Mutanga O., Slotow R. Comparison between WorldView-2 and SPOT-5 images in mapping the bracken fern using the random forest algorithm, *Journal of Applied Rem. Sens.* 2014. Vol. 8(1). P. 083527-1 – 083527-16. DOI: 10.1117/1.JRS.8.083527.
- Onojeghuo A. O., Blackburn G. A. Mapping reedbed habitats using texture-based classification of Quick-Bird imagery, *Int. J. of Rem. Sens.* 2011. Vol. 32. No. 23. P. 8121–8138. DOI: 10.1080/01431161.2010.532822.
- Ozesmi S. L., Bauer M. E. Satellite remote sensing of wetlands, *Wetlands ecology and management.* 2002. Vol. 10. No. 5. P. 381–402. DOI: 10.1023/A:1020908432489.
- Parviainen M., Luoto M., Heikkinen R. K. The role of local and landscape level measures of greenness in modelling boreal plant species richness, *Ecological Modelling.* 2009. Vol. 220. No. 20. P. 2690–2701. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.07.017.
- Parviainen M., Zimmermann N. E., Heikkinen R. K., Luoto M. Using unclassified continuous remote sensing data to improve distribution models of red-listed plant species, *Biodiversity and Conservation.* 2013. Vol. 22. P. 1731–1754. DOI: 10.1007/s10531-013-0509-1.
- Peterson E. B. Estimating cover of an invasive grass (*Bromus tectorum*) using tobit regression and phenology derived from two dates of Landsat ETM+ data, *Int. J. of Rem. Sens.* 2005. Vol. 26:12. P. 2491–2507. DOI: 10.1080/01431160500127815.
- Petrou Z. I., Manakos I., Stathaki T. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets, *Biodiversity and Conservation.* 2015. Vol. 24. No. 10. P. 2333–2363. DOI: 10.1007/s10531-015-0947-z.
- Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J. M., Tucker C. J., Stenseth N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology and Evolution.* 2005. Vol. 20. P. 503–510. DOI: 10.1016/j.tree.2005.05.011.
- Petus C., Lewis M., White D. Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI, *Ecological Indicators.* 2013. Vol. 34. P. 41–52. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.04.009.
- Pflugmacher D., Cohen W. B., Kennedy R. E. Using Landsat-derived disturbance history (1972–2010) to predict current forest structure, *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 122. P. 146–165. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.025.
- Polychronaki A., Spindler N., Schmidt A., Stoinschek B., Zebisch M., Renner K., Sonnenschein R., Notarnicola C. Integrating RapidEye and ancillary data to map alpine habitats in South Tyrol, Italy *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 37. P. 65–71. DOI: 10.1016/j.jag.2014.11.008.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M. C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia, *Rem. Sens. of Env.* 2011. Vol. 115. No. 2. P. 548–561.
- Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Rem. Sens. of Env.* 2015. Vol. 159. P. 28–43. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
- Pouteau R., Meyer J. Y., Taputuarai R., Stoll B. Support vector machines to map rare and endangered native plants in Pacific islands forests, *Ecological Informatics.* 2012. Vol. 9. P. 37–46. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2012.03.003.
- Price K. P., Guo X., Stiles J. M. Optimal Landsat TM band combinations and vegetation indices for discrimination of six grassland types in eastern Kansas, *Int. J. of Rem. Sens.* 2002. Vol. 23:23. P. 5031–5042. DOI: 10.1080/01431160210121764.
- Rapinel S., Clément B., Magnanon S., Sellin V., Hubert-Moy L. Identification and mapping of natural vegetation on a coastal site using a Worldview-2 satellite image, *Journal of environmental management.* 2014. Vol. 144. P. 236–246. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.05.027.
- Rapinel S., Bouzillé J. B., Oszwald J., Bonis A. Use of bi-Seasonal Landsat-8 Imagery for Mapping Marshland Plant Community Combinations at the Regional Scale, *Wetlands.* 2015. Vol. 35. Issue 6. P. 1043–1054. DOI: 10.1007/s13157-015-0693-8.
- Red Data Book of Plant Communities in the former USSR. Birmingham, 1997. 69 p. Reese H., Nyström M., Nordkvist K., Olsson H. Combining airborne laser scanning data and optical satellite data for classification of alpine vegetation, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2014. Vol. 27. P. 81–90. DOI: 10.1016/j.jag.2013.05.003.
- Resasco J., Hale A. N., Henry M. C., Gorchoff D. L. Detecting an invasive shrub in a deciduous forest understory using late-fall Landsat sensor imagery, *Int. J. Remote Sens.* 2007. Vol. 29. P. 3739–3745. DOI: 10.1080/01431160701373721.
- Richards J. A., Jia X. Remote sensing digital image analysis. An introduction. Berlin, 2006. 439 p.
- Rocchini D. Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem α -diversity by satellite imagery, *Rem. Sens. of Environ.* 2007. Vol. 111. P. 423–434. DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.018.

- Rocchini D., Balkenhol N., Carter G. A., Foody G. M., Gillespie T. W., He K. S., Kark S., Levin N., Lucas K., Luoto M., Nagendra H., Oldeland J., Ricotta C., Southworth J., Neteler M. Remotely sensed spectral heterogeneity as a proxy of species diversity: recent advances and open challenges, *Ecol. Inform.* 2010. Vol. 5. P. 318–329. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2010.06.001.
- Rocchini D., Andreo V., Förster M., Garzon-Lopez C. X., Gutierrez A. P., Gillespie T. H., Hauffe H. C., He K. S., Kleinschmit B., Mairota P., Marcantonio M., Metz M., Nagendra N., Pareeth S., Ponti L., Ricotta C., Rizzoli A., Schaab G., Zebisch M., Zorer R., Neteler M. Potential of remote sensing to predict species invasions. A modelling perspective, *Prog. Phys. Geogr.* 2015a. Vol. 39. P. 283–309.
- Rocchini D., Hernández-Stefanoni J. L., He K. S. Advancing species diversity estimate by remotely sensed proxies: a conceptual review, *Ecol. Inform.* 2015b. Vol. 25. P. 22–28. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2014.10.006.
- Rodriguez-Galiano V. F., Chica-Rivas M. Evaluation of different machine learning methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat images and Digital Terrain Models, *Int. J. of Digital Earth.* 2014. Vol. 7. No. 6. P. 492–509. DOI: 10.1080/17538947.2012.748848.
- Schaffrath D., Barthold F. K., Bernhofer C. Spatiotemporal variability of grassland vegetation cover in a catchment in Inner Mongolia, China, derived from MODIS data products, *Plant and soil.* 2011. Vol. 340. No.1–2. P. 181–198. DOI: 10.1007/s11104-010-0465-4.
- Schmidt M., König K., Müller J. V. Modelling species richness and life form composition in Sahelian Burkina Faso with remote sensing data, *Journal of Arid Environments.* 2008. Vol. 72. P. 1506–1517. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.015.
- Schuster C., Schmidt T., Conrad C., Kleinschmit B., Förster, M. Grassland habitat mapping by intra-annual time series analysis—Comparison of RapidEye and TerraSAR-X satellite data, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2015. Vol. 34. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.jag.2014.06.004.
- Sexton J. O., Song X. P., Feng M., Noojipady P., Anand A., Huang C., Kim D. H., Collins K. M., Channan S., DiMiceli C., Townshend J. R. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error, *Int. J. of Digital Earth.* 2013. Vol. 6:5. P. 427–448. DOI: 10.1080/17538947.2013.786146.
- Shmitt U., Ruppert G. S. Forest classification of multitemporal mosaicked satellite images, *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing.* 1996. Vol. XXXI. Part B7. P. 602–605.
- Short N. M. The LANDSAT Tutorial Workbook: Basics of Satellite Remote Sensing. NASA Reference Publication 1078. NASA. 2011. URL: http://pdf20.termsbooks.org/pdf/the-landsat-tutorial-workbook-basics-of-satellite-remote-sensing-nasa-re_d7mnmv.pdf (data obrascheniya: 05.12.2015)
- Shouse M., Liang L., Fei S. Identification of understory invasive exotic plants with remote sensing in urban forests, *Int. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinf.* 2013. Vol. 21. P. 525–534. DOI: 10.1016/j.jag.2012.07.010.
- Silva T. S., Costa M. P., Melack J. M., Novo E. M. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications, *Env. Monit. and Assessment.* 2008. Vol. 140(1–3). P. 131–145. DOI: 10.1007/s10661-007-9855-3.
- Somodi I., Čarni A., Ribeiro D., Podobnikar T. Recognition of the invasive species *Robinia pseudacacia* from combined remote sensing and GIS sources, *Biological conservation.* 2012. Vol. 150(1). P. 59–67. DOI: 10.1016/j.biocon.2012.02.014.
- Stehman S. V., Czaplewski R. L. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles, *Rem. Sens. of Env.* 1998. Vol. 64. P. 331–344. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00010-8.
- Stow D. A., Hope A., McGuire D., Verbyla D., Gamon J., Huemmrich F., Houston S., Racine C., Sturm M., Tape K., Hinzman L., Yoshikawa K., Tweedie C., Noyle B., Silapaswan C., Douglas D., Griffith B., Jia G., Epstein H., Walker D., Daeschner S., Petersen A., Zhou L., Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems, *Rem. Sens. of Env.* 2004. Vol. 89(3). P. 281–308. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.018.
- Townsend P. A., Walsh S. J. Remote sensing of forested wetlands: application of multitemporal and multispectral satellite imagery to determine plant community composition and structure in southeastern USA, *Plant Ecology.* 2001. Vol. 157. No. 2. P. 129–149. DOI: 10.1023/A:1013999513172.
- Tuanmu M. N., Viña A., Bearer S., Xu W., Ouyang Z., Zhang H., Liu, J. Mapping understory vegetation using phenological characteristics derived from remotely sensed data, *Rem. Sens. of Env.* 2010. Vol. 114(8). P. 1833–1844. DOI: 10.1016/j.rse.2010.03.008.
- Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Rem. Sens. of Env.* 1979. Vol. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Turner W., Spector S., Gardiner N., Fladerland M., Sterling E., Steininger M. Remote sensing for biodiversity science and conservation, *Trends Ecol. Evol.* 2003. Vol. 18. P. 306–314. DOI: 10.1016/S0169-5347(03)00070-3.
- Turner W., Rondinini C., Pettorelli N., Mora B., Leidner A. K., Szantoi Z., Buchanan G., Dech S., Dwyer J., Herold M., Koh L. P., Leimgruber P., Taubenboeck H., Wegmann M., Wikelski M., Woodcock, C.

- Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation, *Biological Conservation*. 2015. Vol. 182. P. 173–176. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.11.048.
- Vanselow K. A., Samimi C. Predictive mapping of dwarf shrub vegetation in an arid high mountain ecosystem using remote sensing and random forests, *Rem. Sens.* 2014. Vol. 6(7). P. 6709–6726. DOI: 10.3390/rs6076709.
- Viedma O., Torres I., Pérez B., Moreno J. M. Modeling plant species richness using reflectance and texture data derived from QuickBird in a recently burned area of Central Spain, *Rem. Sens. of Env.* 2012. Vol. 119. P. 208–221. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.024.
- Wang C., Guo H., Zhang L., Qiu Y., Sun Z., Liao J., Liu G., Zhang Y. Improved alpine grassland mapping in the Tibetan Plateau with MODIS time series: a phenology perspective, *Int. J. of Digital Earth*. 2015. Vol. 8. No.2. P. 133–152. DOI: 10.1080/17538947.2013.860198.
- Wang Z. J., Jiao J. Y., Lei B., Su Y. An approach for detecting five typical vegetation types on the Chinese Loess Plateau using Landsat TM data, *Environmental monitoring and assessment*. 2015. Vol. 187(9). P. 1–16. DOI: 10.1007/s10661-015-4799-5.
- Whiteside T. G., Bartolo R. E. Mapping Aquatic Vegetation in a Tropical Wetland Using High Spatial Resolution Multispectral Satellite Imagery, *Remote Sens.* 2015. Vol. 7(9). P. 11664–11694. DOI: 10.3390/rs70911664.
- Wilfong B. N., Gorchov D. L., Henry M. C. Detecting an invasive shrub in deciduous forest understories using remote sensing, *Weed Science*. 2009. Vol. 57. No. 5. P. 512–520. DOI: 10.1614/WS-09-012.1.
- Wright C., Gallant A. Improved wetland remote sensing in Yellowstone National Park using classification trees to combine TM imagery and ancillary environmental data, *Rem. Sens. of Env.* 2007. Vol. 107. No. 4. P. 582–605. DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.019.
- Xie Y., Sha Z., Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review, *Journal of plant ecology*. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 9–23. DOI: 10.1093/jpe/rtm005.
- Xie Y., Zhang A., Welsh W. Mapping Wetlands and Phragmites Using Publically Available Remotely Sensed Images, *Photogram. Engineering & Rem. Sens.* 2015. Vol. 81. No. 1. P. 69–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.81.1.69>.
- Xu M., Watanachaturaporn P., Varshney P. K., Arora M. K. Decision tree regression for soft classification of remote sensing data, *Rem. Sens. of Env.* 2005. Vol. 97(3). P. 322–336. DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.008.
- Zhang Y., Lu D., Yang B., Sun C., Sun M. Coastal wetland vegetation classification with a Landsat Thematic Mapper image, *Int. J. of Rem. Sens.* 2011. Vol. 32:2. P. 545–561. DOI: 10.1080/01431160903475241