

УДК: 528.855(235.222)

И. Д. ЗОЛЬНИКОВ*, **В. А. ЛЯМИНА***, **А. Ю. КОРОЛЮК****

*Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

**Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ГЕТЕРОГЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Представлена комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенного растительного покрова с использованием методов дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования. Выделение контуров растительности с помощью этих методов позволяет картографировать не только однородные, но и гетерогенные наземные экосистемы, а также вести мониторинг их динамики, поскольку изменения удельных площадей элементов территориальных единиц растительности и пограничных образований представляют собой чувствительные индикаторы изменений глобальных и региональных экологических факторов.

Ключевые слова: растительный покров, гетерогенность, территориальные единицы, дистанционное зондирование, геоинформационные технологии.

We present a comprehensive technology of mapping and monitoring the heterogeneous vegetation cover by the use of remote sensing and geoinformation-based modeling techniques. Identification of vegetation contours through the use of these techniques offers a means of mapping not only homogeneous but also heterogeneous terrestrial ecosystems as well as monitoring their dynamics, because changes in specific areas of elements of territorial vegetation units and border formations represent sensitive indicators of changes of global and regional ecological factors.

Keywords: vegetation cover, heterogeneity, territorial units, remote sensing, geoinformation technologies.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При проведении исследований природных систем какой-либо территории мы сталкиваемся с их пространственной неоднородностью. Существует широкий набор методов ее описания и анализа, в первую очередь в рамках картографических направлений отдельных наук. В картографировании ландшафтов, растительного и почвенного покрова разработан широкий арсенал методов изучения гетерогенных образований [1–4]. В последние десятилетия в изучении пространственной организации

© 2010 Зольников И. Д. (zol@uiggm.nsc.ru), Лямина В. А. (balandis@uiggm.nsc.ru), Королук А. Ю. (akorolyuk@rambler.ru)

экосистем всех уровней иерархии широко используются данные дистанционного зондирования (ДДЗ). В условиях роста объема и разнообразия космических снимков актуальна разработка методик их обработки. Поиск технологий и их реализация в виде стандартных процедур нужны для осуществления широких по территориальному охвату картографических работ и мониторинговых исследований, когда требуется набор апробированных методик, из которого исследователь выбирает наиболее адекватную для решения конкретной задачи.

Необходимость проведения поисковых работ методического плана возникла перед нами в процессе междисциплинарных исследований экосистем Южной Сибири, что было обусловлено двумя обстоятельствами. Первое из них — это комплексная и гетерогенная природа изучаемых объектов, наиболее рельефно проявляющаяся в топологических характеристиках (пространственно-структурная организация отдельных компонентов ландшафта, пространственная сопряженность между различными компонентами: почва—растительность, почва—четвертичные отложения и т. д.), которые могут быть выявлены и адекватно описаны в ходе картографических работ. Вторая определяется использованием на всех этапах космических снимков разного масштаба. В их интерпретации мы неизбежно сталкиваемся с необходимостью анализа рисунка, отражающего в первую очередь пространственную неоднородность почвенно-растительного покрова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактологическую основу работы представляют многоитерационные комплексные описания экосистем на эталонных полигонах Западной Сибири. Для проведения наземных исследований и сбора данных разработана унифицированная система многопараметрической характеристики экосистем. Используемое на первых этапах междисциплинарное описание [5, 6], составленное путем простого объединения результатов геолого-геоморфологических, почвенных и геоботанических наблюдений, оказалось не вполне пригодным для применения методов ГИС и ДЗ в связи со слишком узкой специализацией количественных характеристик и преобладанием качественных, в основном текстовых, комментариев. Требовалось выбрать параметры, наиболее существенные для характеристики компонентов экосистем и одновременно значимые для формирования спектральных особенностей космоснимков. Поэтому в результате унификации стандарта описания был определен набор индивидуально-индикационных, количественных и полуколичественных признаков, характеризующих типы экосистем [7].

Неотъемлемые свойства наземных экосистем — их иерархическая структурированность и гетерогенность. Эти свойства отчетливо проявляются на космических снимках различного пространственного разрешения: от мелкомасштабных (Modis) и среднемасштабных (Landsat, Aster, Spot) до крупномасштабных (Quick Bird). Ведущую роль в формировании изображения космического снимка играет растительный покров, формирующий на цифровых изображениях смесь спектральных откликов различной яркости, что в рамках автоматической обработки ДДЗ не позволяет решать задачу стандартными методиками разграничения анализируемой площади по классам однородных полей, представленных пикселями с однотипными спектрами. Это нередко приводит к тому, что картографирование растительности проводится вручную путем векторной оцифровки по растровым подложкам — цифровым моделям рельефа и космоснимкам.

Ручная оцифровка вносит значительную долю субъективности в картографические материалы, создаваемые на основе ДДЗ. Вместе с тем, именно гетерогенные природные системы и пограничные биотопы наиболее чувствительны к региональным и глобальным изменениям факторов природной среды. В свою очередь, эти изменения могут фиксироваться на космических снимках различного пространственного разрешения и оцениваться, фактически, в оперативном режиме. В связи с этим очевидны фундаментальное значение и прикладная ценность комплексных технологий картографирования и мониторинга растительности и экосистем методами ГИС и ДЗ.

Разработка и апробация комплексной технологии проводились на протяжении нескольких лет на различных полигонах юга Сибири, включая территории Западно-Сибирской равнины и Алтае-Саянской горной области. Рассмотрим реализацию полученной технологии на примере эталонного полигона «Касмалинский бор», который представляет сложный комплекс сосновых лесов и травяных ландшафтов юго-западной части Алтайского края (на стыке Угловского, Михайловского и Волчихинского районов). Ленточные боры степной зоны юга Обь-Иртышского междуречья — уникальное природное явление [8]. Они занимают древние ложбины стока, формируя серию вытянутых в северо-восточном направлении лент, характеризуются оригинальной флорой и имеют сложную пространственную структуру почвенно-растительного покрова, что делает их привлекательными для анализа пространственной неоднородности на разных иерархических уровнях [9].

Существуют разные подходы к анализу пространственно неоднородных выделов. Наиболее распространены различные методы классификации снимков [10, 11]. Гетерогенные выделы нередко картографируются с использованием методов текстурного анализа [12]. Для применения метода спектрального несмешивания необходимо иметь спектральные кривые чистых объектов, что зачастую невозможно. Есть подходы к анализу динамики и прогнозированию изменений ландшафтного покрова с использованием детерминированных и стохастических моделей [13], а также с использованием интеллектуальной ГИС [14]. Известны работы, в которых применяются анализ сеточных моделей и объектно-ориентированный подход для оценки влияния гетерогенных ландшафтов на пути миграции животных [15]. Имеются исследования вклада отдельных составных частей природных комплексов в спектральный отклик космических снимков [16].

Предлагаемая нами технология позволяет не только картографировать, но и оценивать вклад различных типов растительности (в зависимости от их процентного соотношения) в спектральные характеристики снимков. Кроме того, с ее использованием можно проводить моделирование изменений пространственной структуры растительного покрова.

Эта технология реализуется однотипно для космических снимков всего масштабного ряда и соответственно для всех уровней организации наземных экосистем. В качестве иллюстрации работ на полигоне приведем результаты анализа мультиспектральных космических снимков Quick Bird с разрешением 2 м. Исследования растительности по цифровым изображениям высокого пространственного разрешения обладают фактологической и методической новизной в отличие от работ среднего масштаба по снимкам Landsat и др., которые ведутся уже несколько десятилетий.

При проведении наземных геоботанических исследований основным объектом и одновременно таксономической единицей являлся элементарный выдел растительности, который отражается однотипным спектральным откликом на космоснимке. Выдел имеет внешние и внутренние свойства. Внешние отражаются в таких признаках, как геопривязка, размер, форма, ориентировка в пространстве, характер взаимоотношения со смежными растительными сообществами. Внутренние проявляются в признаках растительности, а также в связи с другими компонентами экосистем: рельефом, коренными породами, рыхлыми отложениями, почвами и др. Одной из основ дальнейшего анализа выступает первичная атрибутивная база данных, описывающая как внутренние, так и внешние свойства элементарных выделов, которые, различным образом комбинируясь в пространстве, образуют систему территориальных единиц растительности территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реализованную технологию можно представить в виде следующей последовательности. Начальный этап — натурное исследование экосистем полигона, в ходе которого выявляется и характеризуется набор растительных сообществ и их сочетаний, определяются связи между различными компонентами экосистем. На основании этого производится выбор эталонных участков для комплексного описания геолого-геоморфологического строения, почв и растительности по унифицированному стандарту. Особое внимание уделяется индикаторным признакам, играющим ключевую роль в формировании спектральных характеристик космоснимка.

По результатам полевых описаний составляются комплексные базы геоданных. Уже на этой стадии исследований наличие баз геоданных с характеристикой разных уровней иерархии позволяет перейти от качественного описания экосистем к геоинформационному их моделированию на основе количественных и полуколичественных признаков [6]. Базы дополняются спектральными библиотеками, полученными в результате изучения спектрального отклика ландшафтов на космоснимках выбранного пространственного разрешения и созданными по комплексно описанным в поле контурам.

Таким образом, контур растительности представляет собой метрическую, а комплексное описание — семантическую составляющую базы геоданных, которая оформлена в векторном формате ГИС (в нашем случае — ArcGIS). Как правило, исследования на ключевых полигонах ведутся на протяжении нескольких лет, что позволяет ревизовать комплексные описания, уточнить и пополнить спектральные библиотеки. Многоитерационность исследований дает возможность неоднократно верифицировать как базы геоданных, так и спектральные библиотеки, составляемые по контурам.

На следующем этапе оценивается степень внутренней однородности элементарных выделов растительности по всем каналам снимка. В случае гомогенности они должны обладать унимодальным распределением яркостных характеристик во всех диапазонах спектра. Если в каком-нибудь канале обнаруживается полимодальное распределение значений, то очевидно, что в спектральном домене обособляется более чем один объект, и такой выдел вряд ли можно считать элементарным. Нередко

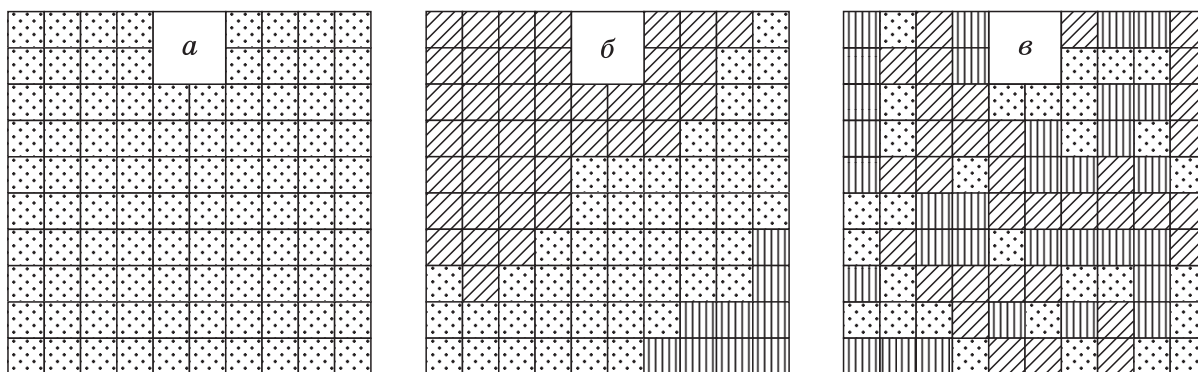


Рис. 1. Типы пространственного распределения в предварительных классификациях.

a — однородное, *б* — зональное, *в* — однородно-смешанное.

на участке, описанном как однородный, при анализе спектров выделяются несколько типов объектов, сходных по типу литологического субстрата, почвенному покрову и составу растительности, но различающихся по другим признакам (степень проективного покрытия растительности, мозаичность ценогической структуры сообществ, антропогенная трансформация и др.).

В подобных случаях вычлняются новые типы элементарных выделов, и их характеристики вносятся в базу геоданных. Кроме того, анализируются и выбраковываются аномальные значения, связанные с попаданием в эталонные пиксели сопредельных участков, занятых другими фитоценозами, а также с узко локальными феноменами. Особое внимание уделяется пространственному распределению пикселей в предварительных результатах управляемых классификаций на основе обучения по эталонным выборкам.

На космоснимке (рис. 1) зафиксированы: однородное пространственное распределение элементарного выдела (в подобных случаях коррекция обычно не требуется); распад элементарного выдела на две выборки по зональному принципу (в данном случае целесообразно разделение элементарного выдела на несколько); равномерное однородное смешение разных выборок (что скорее всего свидетельствует о необходимости объединения их в один структурно однородный выдел). На основании анализа сходства и различия объектов в спектральном и пространственном доменах мы уточняем классификацию элементарных выделов растительности.

По результатам этого этапа исследований формируются «спектральные портреты» растительности изучаемого района. Уточненная классификация с учетом сходства и различия спектральных характеристик оформляется в виде спектральной библиотеки полигона, сопряженной с комплексной базой геоданных. Она представляет набор геоинформационных моделей эталонных выделов растительности исследуемой территории. При помощи этих моделей мы можем анализировать факторы, определяющие их обособление в виде автономных природных обстановок, что позволяет составлять классификационные таблицы эталонных объектов с показом целевых признаков, по которым отличаются те или иные объекты.

Следующий этап — управляемая классификация с обучением по эталонным выборкам. Обработка изображений может проводиться пошагово с использованием масок в несколько итераций. Так, отдельно классифицируются леса и травяные фитоценозы. Результаты классификации безлесных территорий по снимку Quick Bird показывают значительную гетерогенность их пространственного распределения. Похожая методика создания карт лесных территорий на основе данных космической съемки (Landsat TM) предлагается И. В. Даниловой [17].

Для исключения чрезмерно мелких объектов и выделения крупных областей строятся плотностные схемы для каждого типа элементарных выделов растительности (рис. 2). Шаг сетки в каждом конкретном случае определяется пространственным разрешением обрабатываемого космического снимка, а радиус скользящего окна подбирается эмпирически в соответствии с функциональным масштабом карты. Для участка плотностные сетки строились с шагом 2,5 м и радиусом окна 25 м (см. рис. 2).

На очередном этапе каждому пикселю присваиваются значения полученных плотностей, нормированные на сумму значений плотностей в каждом пикселе. Таким образом, любой из них получает характеристику в виде процентного соотношения плотностей элементарных выделов. После этого выделяются типы сочетаний ранга микрокомбинаций растительности [3]. На полигоне «Касмалинский

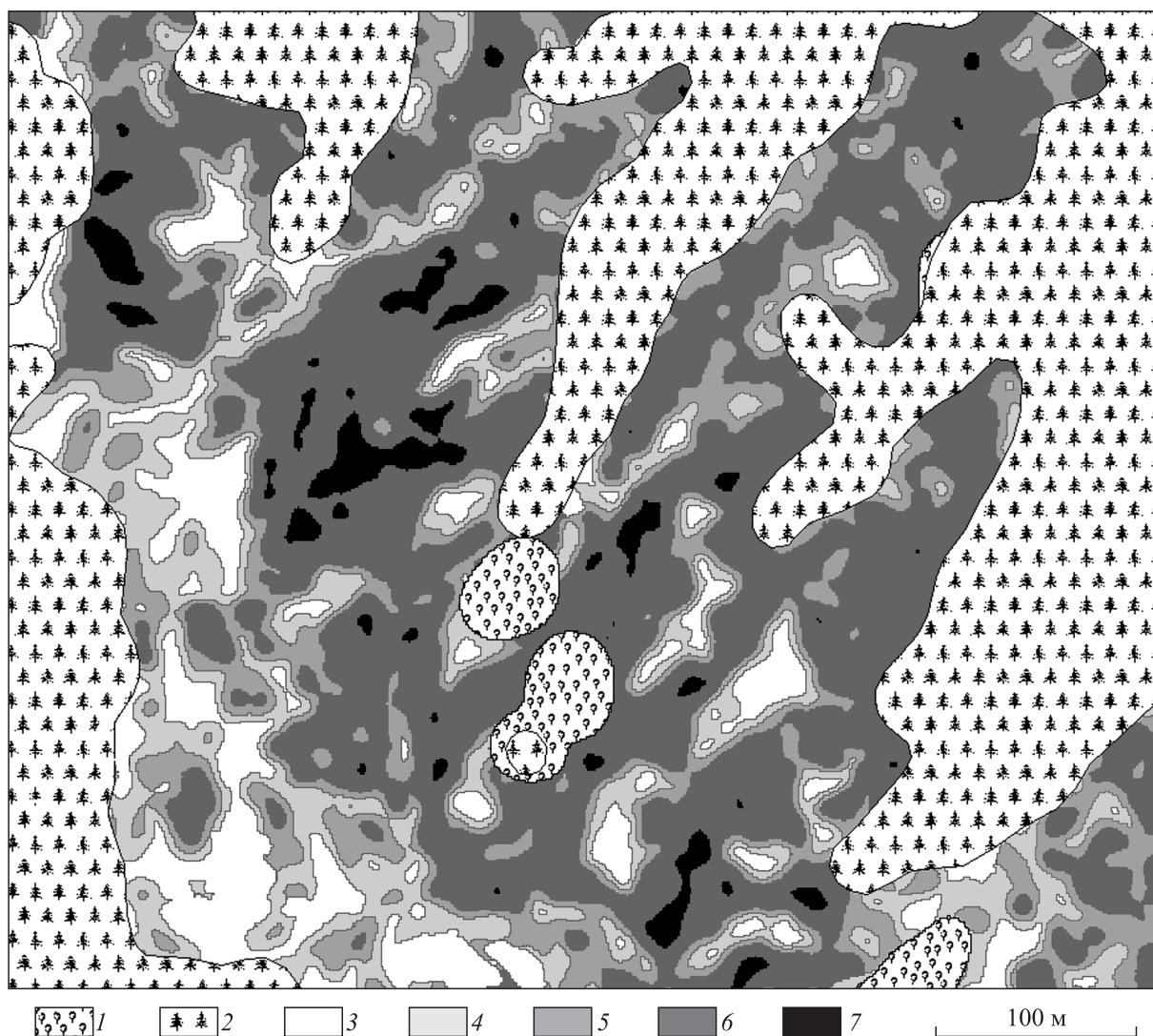


Рис. 2. Плотностная схема, отражающая процентное содержание осоково-злаковых солончаковых лугов в гетерогенном растительном покрове.

1 — заболоченные березовые леса; 2 — сосновые леса; луга, %: 3 — 0–5, 4 — 5–15, 5 — 15–30, 6 — 30–70, 7 — 70–100.

бор» наиболее распространенные типы растительных сообществ — солончаковые луга, менее распространены первичные песчаные степи, остальные (солонцеватые степи, вторичные песчаные степи, кустарники и болота) не занимают больших площадей. Вклад солончаковых лугов в безлесные территории не превышает 60 %, а в большинстве случаев составляет 30 %. Наиболее часто встречаемое сочетание представляет собой комбинацию песчаных степей и солончаковых лугов в соотношении 30 к 70 %. Следующим, но значительно менее распространенным, является сочетание болот и кустарников в соотношении 30 к 70 %. Солонцеватые степи не формируют крупных контуров и чаще всего встречаются в сочетании с песчаными степями и солончаковыми лугами.

Полученная схема гомо- и гетерогенных выделов растительности насчитывает многие десятки статистически обоснованных сочетаний, которые могут объединяться в группы, подгруппы и надгруппы по генетическим деревьям родственных связей и показываться с разной степенью генерализации в зависимости от задач исследования.

Разработанные технологии апробированы на территории ключевых полигонов с использованием снимков Quick Bird, Landsat и Modis, а также проанализированы возможности применения снимков для анализа и картографирования пространственно-структурной организации растительности и экосистем на локальном, местном и региональном уровнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная технология позволяет анализировать растительный покров со сложной пространственной организацией методами ГИС и ДЗ. Она базируется на использовании баз геоданных, в которые входят унифицированные по междисциплинарному стандарту геолого-геоморфологические, почвенные и геоботанические характеристики наземных экосистем. Комплексная технология включает обработку космоснимков разного пространственного разрешения методами управляемых классификаций, а также плотностной анализ территориальных неоднородностей с использованием сеточных моделей (с применением программных пакетов ENVI и ArcGIS).

Выделение контуров растительности на основе обработки космоснимков и геоинформационного моделирования позволяет картографировать не только гомогенные, но и гетерогенные образования и вести мониторинг их динамики, поскольку изменения удельных площадей элементов территориальных единиц растительности и пограничных образований представляют собой чувствительные индикаторы изменений глобальных и региональных экологических факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (08–04–00055) и Интеграционного проекта СО РАН (№ 11.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 319 с.
2. Фридланд В. М. Структура почвенного покрова. — М.: Мысль, 1972. — 423 с.
3. Грибова С. А., Исаченко Т. И. Картирование растительности в съемочных масштабах // Полевая геоботаника. — Л., 1972. — Т. 4. — С. 137–331.
4. Сочава В. Б. Растительный покров на тематических картах. — Новосибирск: Наука, 1979. — 189 с.
5. Айриянц А. А., Борисенко А. С., Добрецов Н. Н. и др. Опыт создания баз данных и метаданных Алтайского экорегиона // Геоинформатика. — 2003. — № 4. — С. 13–19.
6. Добрецов Н. Н., Зольников И. Д., Королюк А. Ю. и др. Разработка системы комплексного описания полигонов для интерпретации данных космической съемки // Сиб. экол. журн. — 2005. — № 6. — С. 1031–1038.
7. Зольников И. Д., Смоленцева Е. Н., Королюк А. Ю. и др. Многопараметрические базы геоданных для картографирования и мониторинга наземных экосистем Чуйской долины Горного Алтая // Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее. Материалы Междунар. конференции (22–26 сентября 2008 г., Горно-Алтайск). — Горно-Алтайск, 2008. — С. 67–72.
8. Ленточные боры Прииртышья // Труды Лаборатории лесоведения. — М., 1962. — Т. 4. — 224 с.
9. Королюк А. Ю., Смоленцев Б. А., Егорова А. В. и др. К характеристике почвенно-растительного покрова лугово-степных ложбин в ленточных борах юга Алтайского края // Ботанические исследования Сибири и Казахстана. — Кемерово, 2007. — Вып. 17. — С. 89–99.
10. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учеб. пособие. — М.: Логос, 2001. — 264 с.
11. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988. — 349 с.
12. Burnett C., Blaschke T. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis // Ecol. Modelling. — 2003. — Vol. 168. — P. 233–249.
13. Tischendorf L. Modelling individual movements in heterogeneous landscapes: potentials of a new approach // Ecol. Modelling. — 1997. — Vol. 103. — P. 33–42.
14. Замятин А. В., Михайлов П. В., Кабрал Р. Современные средства для решения задач анализа динамики и прогнозирования изменений ландшафтного покрова // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2006. — Т. 309, № 7. — С. 80–86.
15. Hay G. J., Dube P., Bouchard A., Marceau D. J. A scale-space primer for exploring and quantifying complex Landscapes // Landscapes Ecol. Modelling. — 2002. — Vol. 153. — P. 27–49.
16. Владимиров И. Н., Попова А. К. Моделирование пространственно-временной динамики лесных ресурсов с использованием интеллектуальной ГИС // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 1. — С. 26–31.
17. Данилова И. В. Методика составления карт лесных территорий на основе данных космической съемки (на примере Красноярского края) // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 4. — С. 140–146.

Поступила в редакцию 29 июня 2009 г.