

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДСИСТЕМА «СЕГМЕНТ»
КАК СРЕДСТВО АНАЛИЗА ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© Б.С. Бусыгин, С.Л. Никулин, Е.П. Зацепин, Е.Л. Сергеева, 2008

Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина

The structure, functional possibilities, and technological scheme of geoinformation subsystem SEGMENT included in specialized GIS RAPID are described. The subsystem is designed to conduct processing, interpretation and lineament analysis of aerospace data. SEGMENT ensures the possibility to carry out joint exploration of satellite images and heterogeneous geodata of different levels.

Введение. В настоящее время роль данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в различных областях человеческой деятельности стремительно возрастает. Это связано со значительным повышением уровня развития аппаратных средств, особенно гиперспектральных, тепловых, радиолокационных и других сканеров, устанавливаемых на аппаратах авиационного и космического базирования. Параллельно наблюдается и стремительное развитие компьютерных систем обработки аэрокосмической информации, ориентированных на решение практических задач недр- и природопользования преимущественно методами обработки и классификации геоизображений.

Вместе с тем постоянный рост сложности решаемых задач приводит к необходимости использования, наряду с материалами аэрокосмических съемок, широкого спектра картографических и цифровых геологических, геофизических, экологических, геохимических, метеорологических и других геоданных. Совместное использование материалов, имеющих различные физическую природу, формы представления и полученных на разных уровнях наблюдений (космос, воздух, земная поверхность и акватории, скважины), предполагает создание специализированных геоинформационных систем (ГИС) их интегрированного анализа, что, в свою очередь, влечет необходимость разработки соответствующих алгоритмических, программных и технологических средств.

Постановка задачи. Обработка и интерпретация материалов аэрокосмических съемок практически полностью основываются на применении специализированных ГИС, которые можно условно подразделить на три класса. Первый представляют коммерческие ГИС, такие как ArcGIS, ArcCAD, MapInfo и др., имеющие развитый инструментарий пространственного анализа. Второй класс включает в себя специализированные сис-

темы обработки аэрокосмоснимков, наиболее известными представителями которых являются Erdas Imagine (фирма Leica Geosystems), ErMapper (Earth Resource Mapping Pty), eCognition (Definiens Imaging) и др. [1] Третий класс систем составляют небольшие пакеты, ориентированные на решение определенного круга тематических задач, например поддержку навигации, выполнение линеаментного анализа и др. [2, 3].

Необходимость совместного использования разнородных и разноуровневых материалов делает остроактуальной проблему разработки специализированных средств их интегрированного анализа, базирующихся на различных математических методах (распознавание образов, пространственный анализ, геостатистика, вычислительная геометрия, линеаментный анализ и тренд-анализ и др.). При этом, как правило, необходимо использовать все многообразие методов и алгоритмов в рамках единой технологической схемы, обеспечивающей совместную обработку комплекса разнородных данных, заданных в векторной, растровой и сеточной формах.

Упомянутые выше системы удовлетворяют последнему условию лишь частично. Универсальные ГИС обычно представляют собой наборы инструментов (нередко весьма мощные), оперирующих с данными какого-то одного типа, и зачастую не соответствуют требованиям интегрированного анализа. Специализированные системы обработки спутниковой информации базируются в основном на методах обработки и анализа изображений, представленных в растровой форме, и располагают достаточно скромными возможностями анализа геоданных, имеющих векторную и сеточную формы. Специализированные тематические пакеты обычно оснащены математическим аппаратом, эффективным в пределах конкретной предметной области, что существенно ограничивает возмож-

ность их применения при решении нестандартных или межотраслевых задач.

Цель настоящей работы – описание структуры, функциональных возможностей и технологической схемы специализированной ГИС СЕГМЕНТ, объединяющей возможности обработки материалов ДЗЗ со средствами интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных в рамках единого технологического процесса [4].

Общие сведения. На кафедре ГИС Национального горного университета создана технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых данных, позволяющая решать широкий круг задач [4–7]. Технология реализована в рамках специализированной ГИС РАПИД (распознавание, автоматизированное прогнозирование, интерпретация данных) – универсального инструмента прогнозирования и принятия решений при постановке прогнозно-поисковых задач, экологическом районировании территорий, мониторинге и прогнозе чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и др.

В функциональном плане технология базируется на методах распознавания образов, обработки изображений, геостатистики, пространственного анализа и реализует принцип многовариантного решения задач посредством имитационного моделирования и проведения вычислительных экспериментов. Основное внимание уделяется установлению прямых связей между пространственными закономерностями расположения изучаемых объектов и явлениями и особенностями описывающих их данных – физических полей, геологических схем и карт, аэрокосмических снимков, морфологических и ландшафтных особенностей рельефа и др.

В рамках ГИС РАПИД создана специальная подсистема СЕГМЕНТ, обеспечивающая предобработку космических снимков, их сегментацию, выделение линейных, дуговых и кольцевых структур, а также анализ линеаментных сетей. Поскольку подсистема СЕГМЕНТ интегрирована в среду ГИС РАПИД, пользователь имеет возможность использовать результаты работы подсистемы в многочисленных процедурах классификации, распознавания, ранжирования природных и техногенных объектов. Это обстоятельство значительно расширяет круг задач, решаемых подсистемой СЕГМЕНТ и делает ее мощным средством анализа данных ДЗЗ.

Подсистема СЕГМЕНТ, будучи неотъемлемой частью ГИС РАПИД, включает в себя модули (рис. 1):

- предварительной обработки и фильтрации аэрокосмических снимков;
- сегментации изображений;
- автоматического выделения линейных, кольцевых и дуговых элементов изображений;

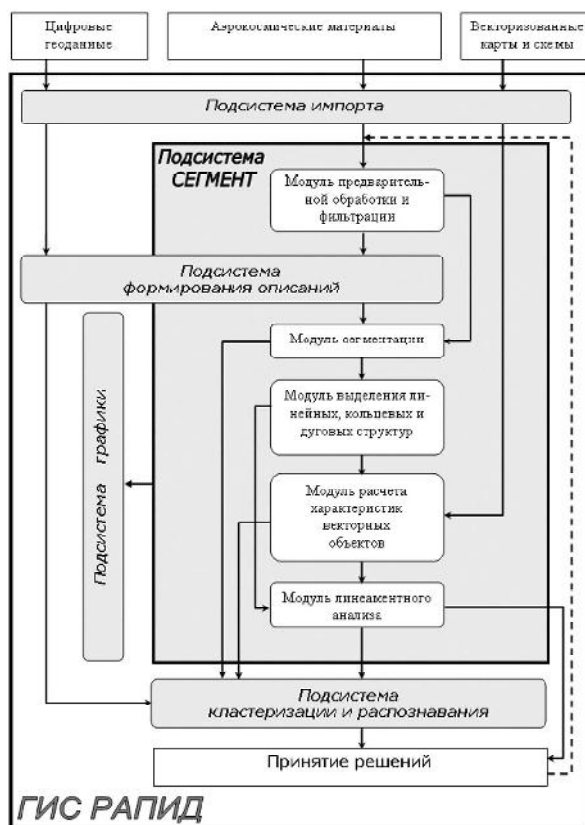


Рис. 1. Структурная схема подсистемы СЕГМЕНТ

- расчета характеристик векторных объектов;
- линеаментного анализа.

Технология работы в подсистеме СЕГМЕНТ.

Основным типом данных, подаваемых на вход подсистемы, являются растровые изображения любых типов (панхроматические, мульти- и гиперспектральные в различных диапазонах спектра). Снимки импортируются соответствующим модулем ГИС РАПИД, поддерживающим форматы ERDAS Lan, GRD, BIL, BIP, BSQ, BMP, JPG, TIFF, GeoTIFF и др., и преобразовываются в сеточный формат, при котором растровые данные соотносятся с узлами регулярной сети. Каждый канал хранится в отдельном сеточном картографическом слое ГИС РАПИД. Модуль импорта обеспечивает также ввод оцифрованных карт и схем различного тематического содержания, хранящихся в векторных форматах SHP, MIF, SVG, DXF, WMF, EMF и др.

Технология работы в подсистеме СЕГМЕНТ сводится к следующему.

1. Импортированные аэрокосмические снимки подаются на вход модуля *предварительной обработки и фильтрации*. Модуль предназначен для улучшения качества изображений, устранения помех, подготовки снимков к последующему анализу и обеспечивает выполнение следующих процедур:
 - контрастирования;
 - изменения яркостного диапазона;

- эквализации гистограмм;
- соляризации;
- инверсии;
- фильтрации с масками (Превитта, Собеля, Кирша, высокочастотными, резкостными и др.);
- фильтрации медианным и гауссовским фильтром;
- нерезкого маскирования;
- выделения границ яркости;
- заполнения пропусков в данных;
- прореживания сетей;
- бинаризации цветных изображений и др.

2. Обработанные данные подаются на вход подсистемы формирования описаний, являющейся частью ГИС РАПИД. Ее назначение – создание совокупности картографических слоев (признаков), описывающих территорию и подчеркивающих определенные черты изображений. Для создания новых слоев изображения подвергаются различным трансформациям в пределах вложенных окрестностей – дифференциальным, текстурным, гистограммным, морфологическим, корреляционным, фрактальным и др. Как свидетельствует опыт авторов и других исследователей, использование получаемого вектора описаний вместо исходных снимков (или наряду с ними) при решении задач прогнозирования и мониторинга зачастую позволяет добиться лучших результатов [7].

Отдельно следует отметить алгоритмы создания трансформант-описаний, применение которых особенно эффективно при работе с аэрофотоснимками. В ГИС РАПИД в рамках подсистемы СЕГМЕНТ реализован ряд алгоритмов для работы с геоизображениями в пространственной и частотной областях. Так, создание описаний текстуры снимков в пространственной области основывается на применении оператора позиционирования, который представляет собой правило расположения пар пикселей, участвующих в вычислениях. Реализовано два подхода: первый основан на расчете оценок функции вариограммы [8]; второй – на вычислении характеристик яркостных матриц смежности (матриц совместного появления (МСП) уровней яркости) [9, 10]. Элементы таких матриц – оценки вероятностей совместного появления на фрагменте изображения пар пикселей с определенными уровнями яркости. На основании значений МСП реализован расчет свыше 20 трансформант-описаний [11], среди них – коэффициент корреляции строк и столбцов МСП, их энтропия, дисперсия, контраст, инверсный момент разности, дифференциальная дисперсия, максимальная вероятность, несколько информационных мер корреляции и др. Указанные характеристики во многих случаях подчеркивают такие особенности изображения, которые слабо проявлены на исходных снимках.

Обработка изображений в частотной области основана на анализе спектра изображения и определении соответствующей ему фрактальной размерности [12]. В результате расчета ее значений в скользящей окрестности заданного размера на выходном изображении наблюдаются отчетливые переходы между относительно однородными по яркости участками исходного изображения, что позволяет выявлять особенности структурной организации изображения.

Полученные трансформанты-описания могут использоваться как самостоятельно при визуальном анализе соответствующих карт, так и в качестве входных данных для подсистемы кластеризации и распознавания, а также модуля сегментации.

3. Назначение модуля сегментации – разделение изучаемой площади на отдельные зоны в соответствии с некоторым критерием, оценивающим либо однородность значений яркости изображения, либо их разрывность. СЕГМЕНТ обеспечивает выполнение сегментации тремя методами – выращивания областей, текстурно-гармоническим и контурного анализа.

Метод выращивания областей состоит в предварительном выборе множества точек (пикселей) изображения, играющих роль «центров кристаллизации», на которые наращиваются области, близкие по яркостным свойствам к центру кристаллизации. Критерием близости служит соответствие статистических оценок (среднего и среднеквадратического отклонения значений яркости) наращиваемых областей соответствующим статистическим оценкам центра кристаллизации.

Текстурно-гармоническая сегментация предназначена для нахождения границ между областями изображения на основе анализа их текстуры с использованием разложения изображения в ряд Фурье. В процессе вычислений используются операции морфологической обработки, предназначенные для работы со связными компонентами – подмножествами элементов бинарного изображения, получаемого средствами модуля предварительной обработки и фильтрации. Результаты работы методов выращивания областей и текстурно-гармонической сегментации используются для непосредственного анализа, а также служат исходными данными для работы подсистемы кластеризации и распознавания.

Сегментация методом контурного анализа позволяет автоматически выделять границы между однородными по яркости областями изображения на основе изучения разрывности значений с применением масочных операторов [9].

4. Исходные данные для модуля выделения линейных, кольцевых и дуговых элементов – границы областей яркости, построенные методом контурного анализа в модуле сегментации. Указанные эле-

менты имеют большое значение при решении геологических и геоэкологических задач, а также прогнозировании чрезвычайных ситуаций (в частности, землетрясений, оползневых явлений и др.).

Алгоритмы выделения линейных, кольцевых и дуговых элементов изображения построены на модифицированных преобразованиях Хафа (вероятностном и случайном), которые базируются на учете геометрических связей между элементами изображения [9].

Преобразование Хафа позволяет находить на бинарном изображении плоские кривые, заданные параметрически. Семейство кривых на плоскости описывается параметрическим уравнением: $F(a_1, a_2, \dots, a_n, x, y)$, где F – некоторая функция; a_1, a_2, \dots, a_n – параметры семейства кривых; x, y – координаты на плоскости. Параметры семейства кривых образуют фазовое пространство, каждая точка которого (конкретное значение параметров a_1, a_2, \dots, a_n) соответствует некоторой кривой. Ввиду дискретности цифрового представления входных данных (изображения) требуется перевод непрерывного фазового пространства в дискретное. Для этого в фазовом пространстве вводится сетка, разбивающая его на ячейки, каждая из которых соответствует набору кривых с близкими значениями параметров. Каждой ячейке фазового пространства ставится в соответствие число, указывающее количество «точек интереса» на изображении, принадлежащих хотя бы к одной из кривых, соответствующих данной ячейке. Анализ значений ячеек позволяет найти на изображении кривые, на которых лежит наибольшее количество «точек интереса».

Вероятностное преобразование Хафа заключается в том, что для нахождения кривых достаточно выполнить преобразование только для части «точек интереса», что способствует снижению вычислительных затрат. Случайное преобразование Хафа состоит в построении кривых по случайно выбранным «точкам интереса». Выходное изображение содержит кривые, образованные максимальным числом «точек интереса». Подсистема СЕГМЕНТ использует модифицированный вариант преобразований Хафа, позволяющий лучше учитывать специфику отображения геологических структур на аэрокосмоснимках. В частности, для повышения надежности выделения структур, не обладающих четкими границами, подсчет «точек интереса» ведется не вдоль кривых толщиной в один пиксель, а вдоль полос толщиной n пикселей, где число n подбирается пользователем эмпирически.

Выделенные линейные, дуговые и кольцевые элементы представляют самостоятельный интерес, а также могут использоваться для расчета характеристик векторных объектов и линеаментного анализа.

5. *Модуль расчета характеристик векторных объектов* служит двум основным целям: а) преобразованию векторных объектов в сеточную форму представления для дальнейшего использования в модуле кластеризации и распознавания совместно с исходными снимками и их трансформантами-описаниями; б) расчету характеристик линеаментной сети, несущих полезную информацию о геологических особенностях изучаемой территории, зачастую недоступную при визуальном анализе.

На вход модуля могут подаваться как выделенные линейные, кольцевые и дуговые элементы, так и отдельные картографические слои, полученные путем векторизации разнообразных карт и схем.

В модуле реализовано несколько групп алгоритмов. Первая позволяет рассчитывать в скользящей окрестности разнообразные характеристики одного векторного картографического слоя, в том числе:

- количество элементов;
- суммарную длину линейных и дуговых элементов;
- плотность элементов, выраженную числом элементов на единицу площади (пиксель изображения), общей длиной элементов на единицу площади либо количеством точек пересечений элементов одного типа на единицу площади;
- показатель пересекаемости элементов, выраженный отношением количества пересечений к числу элементов;
- преобладающий азимут простираения линейных элементов (линеаментов);
- дисперсию распределения значений длин линейных элементов;
- статистические характеристики роз-диаграмм линейных элементов, попавших внутрь скользящей окрестности;
- расстояния от узлов сети до ближайшего векторного объекта и другие характеристики.

Вторая группа алгоритмов предназначена для совместного анализа нескольких векторных слоев с целью изучения их пространственных взаимосвязей. Рассчитываемые при этом характеристики [5,13] (например, количество пересечений линейных и дуговых элементов в пределах скользящей окрестности, соотношения плотностей разноориентированных линеаментов или показатели анизотропии и дисперсии линеаментной сети [14]) несут разнообразную информацию о структурно-тектонических особенностях территории, которая может использоваться в геологических, геодинамических, гидрогеологических, геофизических, ландшафтных и других исследованиях.

Третья группа алгоритмов дает возможность получать топологические характеристики площадных векторных объектов, такие как соседство, связность, пересечение и т.п., отражающие наиболее общие свойства территории.

Результаты работы модуля могут использоваться подсистемой кластеризации и распознавания, а также модулем линейного анализа.

6. *Модуль линейного анализа* предназначен для обработки и интерпретации результатов работы модулей 4, 5. В состав модуля включены инструментальные средства, позволяющие:

- отбирать для дальнейшего анализа линейные элементы в зависимости от их длины или азимута;
- выполнять генерализацию сети линейных элементов;
- сортировать кольцевые (дуговые) элементы в зависимости от их радиуса или степени сжатия;
- находить точки пересечения линейных элементов двух или более направлений, узлы пересечения линейных элементов и кольцевых (дуговых структур) и т.п.;
- вычислять сеточные характеристики, отражающие плотности найденных точек пересечения;
- строить розы-диаграммы и гистограммы линейных элементов как для всей изучаемой территории, так и для ее отдельных частей;
- определять степень проявленности и периодичность чередования линейных элементов путем построения и анализа соответствующих графиков.

Использование перечисленных инструментов позволяет эффективно решать задачи, связанные с изучением структурно-тектонического строения земной коры.

Технология интегрированного анализа геоданных с помощью подсистемы СЕГМЕНТ. Осуществляется в среде ГИС РАПИД и включает в себя, в частности, выделение комплексных аномалий, расчет некоррелированных слоев-признаков методами ортогонализации (главных компонент, Грамма-Шмидта), вычисление различных норм корреляционных и ковариационных матриц, формируемых для нескольких слоев, выполнение корреляционного, кластерного, факторного, регрессионного анализов, тренд-анализа и т. д.

При решении задач прогноза объектов, явлений и ситуаций значительную роль играют методы распознавания образов. Технология распознавания в ГИС РАПИД основана на выполнении нескольких последовательных процедур: создания обучающей выборки, оптимизации пространства описаний [15], непосредственно распознавания и оценки его качества.

Процедура распознавания выполняется с использованием одного или нескольких методов модуля кластеризации и распознавания. Их эффективность зависит от характера решаемой задачи, структуры обучающей выборки и пространства описаний. Для расширения возможностей вычислительных экспериментов в ГИС РАПИД реализованы различные детерминистские, статистические, логические и нейросетевые методы (рис. 2).

Детерминистские методы используют различные «расстояния» между исследуемыми и эталон-

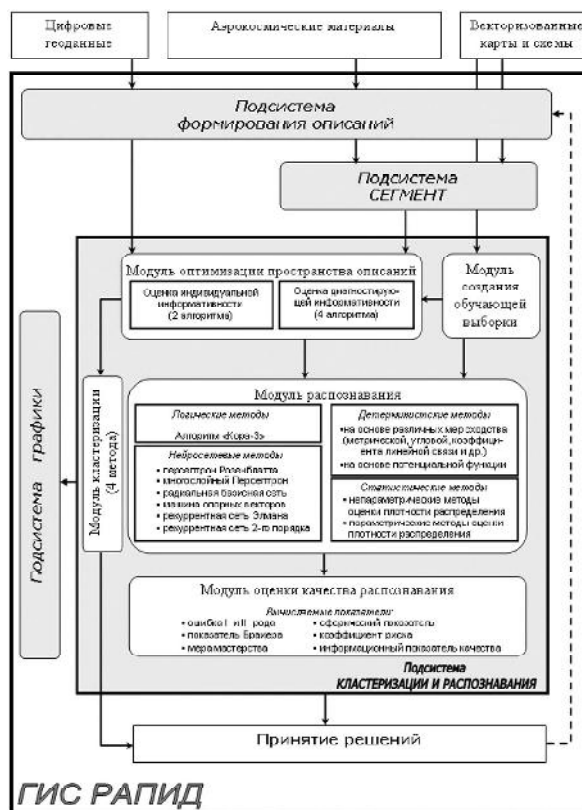


Рис. 2. Структурная схема подсистемы кластеризации и распознавания

ными объектами из обучающей выборки в многомерном признаковом пространстве, по которым проводится процедура ранжирования путем оценки сходства исследуемых объектов с эталонными классами. Распознавание выполняется после введения порога разделения классов. В ГИС РАПИД детерминистские методы реализованы на основе различных метрик и функций (сходства, близости, подобия, потенциальной и др. [7, 16]).

Статистические методы [17, 18] используют параметрические и непараметрические оценки плотности распределения объектов в классах. В параметрических методах вид плотности распределения полагается заданным с точностью до вектора неизвестных параметров. Суть непараметрической оценки состоит в том, что плотность распределения в некоторой области вблизи рассматриваемого объекта предполагается постоянной или близкой к ней. Эту область определяет вид функции ядра и мера сходства. Распознавание проводится на основании максимума байесовской решающей функции. Статистические методы представлены алгоритмами параметрической оценки плотности для нормального распределения и непараметрической оценки методом парзеновского окна.

Логические методы основаны на применении бинарных данных. После предварительного преобразования исходных данных в бинарную фор-

му подбирается набор конъюнкций с последующим их подсчетом на эталонных объектах каждого класса. Каждая конъюнкция рассматривается как новый признак. В сложных ситуациях имеется возможность работы непосредственно с комбинациями исходных признаков. Все исследуемые объекты относятся к соответствующим классам путем определения максимального количества признаков класса. В ГИС РАПИД логические методы представлены модифицированной версией алгоритма «Кора-3» [19].

Нейросетевые методы [20, 21] представлены следующими алгоритмами:

- перцептрон Розенблатта, применяется для решения задач распознавания в случаях с линейно-разделимыми классами;
- многослойный перцептрон, позволяет устанавливать нелинейные зависимости между входными векторами признаков и выходными значениями классов;
- радиальная базисная нейронная сеть, использует радиальные базисные функции и функции ядра;
- машина опорных векторов, решает задачу распознавания путем построения оптимальной гиперплоскости в многомерном пространстве признаков;
- рекуррентные нейронные сети (сеть Элмана и рекуррентная сеть второго порядка), содержат структурные обратные связи, что позволяет качественнее проводить обучение сети, оптимизируя результаты распознавания (рис. 2).

На заключительном этапе обработки данных выполняется оценка качества распознавания путем расчета основных показателей качества и статистик, отражающих степень «уверенности» распознающего алгоритма при выполнении классификации. Показатели (ошибки первого и второго рода, коэффициент риска поисков, показатель Брайера, информационный, сферический показатели и др. [7]) рассчитываются, как правило, по контрольной выборке – объектам заданных классов, не участвовавших в процессе обучения.

Результаты расчетов, которые с помощью подсистемы визуализации ГИС РАПИД могут быть представлены в виде разнообразных карт (растровых, градиентных, изолиний, освещенности и др.), 3D поверхностей, таблиц, диаграмм, графиков, являются основой для принятия интерпретатором обоснованных решений относительно направлений дальнейших исследований, прогноза чрезвычайных ситуаций, уровня экологических или экономических рисков и т.п.

Заключение. Опыт практического применения подсистемы СЕГМЕНТ в различных сферах (геологии, экологии, для оценки и прогноза чрезвычайных ситуаций, в недропользовании) позволяет утверждать следующее:

- подсистема СЕГМЕНТ реализует разнообразный спектр методов обработки, анализа и интерпретации материалов аэрокосмосъемок, что дает возможность решать широкий круг задач различных предметных областей на общих методических принципах;
- интеграция подсистемы СЕГМЕНТ в среду ГИС РАПИД обеспечивает технологию эффективного интегрированного анализа разнородных и разноуровневых данных;
- совместное использование аэрокосмических материалов и данных наземных геологических, экологических, геофизических и других наблюдений позволяет существенно увеличить степень извлечения полезной информации и тем самым повысить достоверность получаемых результатов.

1. *Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации* // Электрон. ресурс. URL: <http://www.gisa.ru/>
2. *Zlatopolsky A.A. Texture orientation description of remote sensing data using LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis)* // Computers & Geosciences. – 1997. – 23, № 1. – P. 45–62.
3. *Загубный Д.Г.* Новая программа обработки векторных и растровых дистанционных материалов для ГИС // Исследование Земли из космоса. – 2004. – № 5. – С. 21–27.
4. *Пивняк Г.Г., Бусыгин Б.С., Никулин С.Л.* ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных // Доп. НАН України. – 2007. – № 6. – С. 121–128.
5. *Бусыгин Б.С., Никулин С.Л., Залесский В.В.* Компьютерная технология поисков золота на юго-западном склоне Украинского щита // Наука та інновації. – 2006. – № 3. – С. 80–91.
6. *Бусыгин Б.С., Никулин С.Л., Бойко В.А.* Геоинформационная система РАПИД как средство мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций // 36. наук. праць СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2006. – Вип. 4(20). – С. 204–216.
7. *Бусыгин Б.С., Мирошниченко Л.В.* Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 168 с.
8. *Chica-Olmo M., Abarca-Hernandez F.* Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification // Computers & Geosciences. – 2000. – 26, N 4. – P. 373–383.
9. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
10. *Андреев Г.А., Базарский О.В., Глауберман А.С. и др.* Анализ и синтез случайных пространственных текстур // Зарубеж. радиоэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 3–33.
11. *Харалик Р.М.* Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. – 1979. – 67, № 5. – С. 98–120.
12. *Потапов А.А.* Фракталы в дистанционном зондировании // Успехи совр. радиоэлектроники. – 2000. – № 6. – С. 3–65.
13. *Бусыгин Б.С., Никулин С.Л., Бойко В.А.* ГИС-технология поисков золота в Западном Узбекистане // Геоинформатика. – 2006. – № 1. – С. 44–49.

14. Кукушкин Д.А., Ян Г.Х. Некоторые вопросы методики анализа линеаментов (по данным дешифрирования космических снимков) // Исследование Земли из космоса. — 1983. — № 1. — С. 51–56.
15. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. — М.: Статистика, 1974. — 240 с.
16. Бусыгин Б.С., Зацепин Е.П. Статистический и детерминистский подход в задаче оценки перспективности территорий // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту. — 2006. — № 3. — С. 99–105.
17. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. Pattern classification. — 2ed. — Wiley, 2000. — 612 с.
18. Bow S.-T. Pattern recognition and image preprocessing. — New York: Marcel Dekker, 2002.
19. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. — М.: Недра, 1987. — 261 с.
20. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. — 2-е изд.: Пер. с англ. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.
21. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 507 с.

Поступила в редакцию 05.03.2008 г.