

А. Б. БАЙБАТША¹, А. А. ПОЦЕЛУЕВ², Ю. С. АНАНЬЕВ²

¹ Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы;

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск)

МЕТОДИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИХ СТРУКТУР

(Представлена академиком НАН РК М. Бакеновым)

Аннотация

Дистанционное зондирование Земли из космоса имеет большие перспективы для выявления скрытых под кайнозойскими образованиями рудоконтролирующих структур. Это становится возможным на основе разработанной методики дешифрирования и геологической интерпретации космических снимков.

Ключевые слова: космоснимок, дешифрирование, геологическая интерпретация, рудоконтролирующие структуры

Тірек сөздер: ғарыштүсірім, риясыздау, геологиялық бажайлау, рудабақылаушы құрылымдар.

Keywords: space image, interpretation, geological interpretation, ore-controlling structure.

Введение. В целях дешифрирования космогеологических структур использовались мультиспектральные космические снимки Landsat ETM+ (7 каналов в видимой, ближней ИК и тепловой области спектра) среднего пространственного разрешения (14,25-90 м) и цифровая модель рельефа (данные SRTM - Shuttle radar topographic mission, февраль 2000 г).

Съемки выполнены ранней весной, при угнетенном растительном покрове, что соответствует основным требованиям к материалам такого характера. Точность пространственной привязки соответствует масштабу выполняемых работ.

Исходными данными для выполнения работ явились:

– архивные материалы мультиспектральной космической съемки Landsat, Съемка выполнена 27.04.2001 г. Спектральные диапазоны каналов: PAN – 520-900 нм, 1 - 450 -

515 нм, 2 – 525 - 605 нм, 3 – 630 - 690 нм, 4 - 750 – 900 нм, 5 - 1550 – 1750 нм, 6 - 10400 – 12500 нм, 7 - 2090 – 2350 нм. Пространственное разрешение снимков составляет 14,25 м для PAN канала, 30 м для 1, 2, 3, 4, 5 и 7 каналов и 60 м для 6 канала (рис. 1). Архивные материалы Landsat взяты на сайте университета штата Мариленд (США): <http://glcfapp.glcg.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>;



Рисунок 1 – Спектральные характеристики космической системы Landsat

– цифровая модель рельефа (пространственное разрешение 90 м) взята на сайте: <http://glcfapp.glcg.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>.

При обработке исходной информации использованы лицензионное программное обеспечение Erdas Imagine, ArcGIS.

В результате проведенных исследований получены:

– компонент дистанционной основы космоструктурной схемы участка. Композит по материалам космической съемки Landsat (спектральный диапазон 500-900 нм), масштаба 1:200000;

– компонент дистанционной основы космоструктурной схемы участка. Композит по материалам космической съемки Landsat (спектральные зоны 750-900, 630-690, 450-520 нм), масштаба 1:200000;

– компонент дистанционной основы космоструктурной схемы участка. Композит по материалам космической съемки Landsat (спектральные зоны 2090-2230, 1550-1750, 530-610 нм), масштаба 1:200000;

– космоструктурная схема участка, масштаба 1:200000.

Методика дешифрирования и разработанная на ее основе технологическая схема обработки и анализа изображения включала в себя три основных этапа:

1) первичная обработка (геометрическая привязка, синтез цветных изображений из моноканальных растров);

2) тематическая обработка - создание необходимого набора тематических растров путем классификации (автономной и по набору выделенных эталонов), вегетативных индексов, методов фильтрации с применением различных алгоритмов и др.;

3) анализ исходных и тематических материалов совместно с цифровой моделью рельефа.

Обработка и подготовка изображений и цифровой модели рельефа

Обработка данных дистанционного зондирования для целей геологического дешифрирования разделена на два основных блока операций. Первый блок – технологический. Он предназначен для корректировки и улучшения спутниковых данных, и по существу, является универсальным, независимым от задач дальнейшей интерпретации.

Второй блок обработки служит непосредственно целям геологического дешифрирования. В связи с этим, основной смысл процедур второго блока обработки сводится к выявлению особенностей земной поверхности, имеющих прямую или косвенную геологическую природу.

«Технологический» блок традиционно включает в себя следующие виды преобразований:

- 1) геометрическая коррекция спутниковых изображений;
- 2) радиометрическая калибровка снимков;
- 3) коррекция влияния атмосферы;
- 4) восстановление пропущенных пикселей;
- 5) контрастирование;
- 6) фильтрация;
- 7) перекалибровка мультиспектрального изображения в более высокое пространственное разрешение.

Геометрическая коррекция спутниковых данных включает в себя:

- 1) устранение искажений;
- 2) географическую привязку.

Ни один из космических снимков точно не отображает поверхность Земли. Все снимки несут на себе комплекс геометрических искажений. Существует несколько причин таких искажений. Основными причинами являются кривизна поверхности Земли и неровности рельефа. Однако они проявляются, как правило, совместно. Кроме того, следует отметить, что для разных типов космических снимков комбинация этих причин различна.

Геометрические искажения снимков, вызванные кривизной поверхности Земли, получаются в результате того, что точки сканируемой местности не лежат в одной плоскости и наблюдение ведется не в надире, а под углом к поверхности земли. Поэтому при удалении от центральной линии сканирования (где съемка ведется в надире) искажение формы и размера объектов увеличивается.

Неровности рельефа вызывают те же искажения, что и кривизна поверхности земли, но задача устранения их сложнее, по причине того, что формы рельефа сложнее, чем форма Земли. Поскольку космические съемки делают с большой высоты, то влияние форм рельефа незначительно, поэтому данный тип искажений учитывают лишь для горных областей. Процедура устранения геометрических искажений, вызванных неровностями рельефа, называется орторектификацией.

Географическая привязка заключается в задании пиксельной матрицы снимка реальных прямоугольных координат с последующей трансформацией.

Радиометрическая калибровка снимков. Снимки, первоначально получаемые со спутников, записаны в виде так называемых «цифровых значений» яркости. Данные в таком формате нельзя сопоставлять с данными других съемок. Задача радиометрической калибровки заключается в приведении этих значений в общепринятые физические единицы.

Коррекция влияния атмосферы. При прохождении через атмосферу электромагнитные волны частично поглощаются и рассеиваются, причиной поглощения и рассеивания являются: озон, водяной пар (облачность), углекислый газ, кислород, метан, пыль, дым. К настоящему времени разработаны математические методы устранения этих погрешностей с учетом состояния атмосферы, времени года и метеорологических данных.

Восстановление пропущенных пикселей. «Пропущенные пиксели» возникают во время съемки (неисправна съемочная аппаратура) или в момент передачи данных. Такие явления могут стать помехой при последующей тематической обработке снимка. Пропущенные пиксели восстанавливаются путем интерполяции значения соседних пикселей.

Контрастирование. Контраст изображения – это разность между максимальными и минимальными значениями яркости. Слабый контраст – наиболее распространенный дефект изображений. Существует несколько методов повышения контраста путем цифровой обработки. Операция повышения контрастности снимка может быть использована при визуальном дешифрировании снимков. Наиболее популярные методы повышения контраста – линейное растягивание, нормализация и выравнивание гистограммы изображения и др.

При линейном растягивании гистограммы всем значениям яркости присваиваются новые значения с целью – охватить весь возможный интервал изменения яркости.

Под нормализацией гистограммы понимается растягивание наиболее интенсивного ее участка на весь интервал.

В процессе выравнивания гистограммы (эквализация) производится изменение значений яркости пикселей таким образом, чтобы для каждого уровня яркости было одинаковое или близкое количество пикселей.

Фильтрация – это матричное преобразование, которое позволяет усилить полезный сигнал с одной стороны и ослабить или полностью устранить случайные помехи.

Чаще всего фильтрации осуществляются в скользящем окне. При таком преобразовании пересчитываются значения яркости всех пикселей изображения. Когда данный пиксел является центральным в окне, которое «движется» по снимку, ему дается новое значение, которое является функцией от значений окружающих его в окне пикселей. Размер окна может быть, например 3x3, 5x5 или 7x7 пикселей. Наиболее простые способы – фильтрация низкочастотным, высокочастотным и статистическими фильтрами.

Перекалибровка мультиспектрального изображения в более высокое пространственное разрешение проводится с целью получения мультиспектрального изображения с более высоким пространственным разрешением. При осуществлении этой процедуры используются пиксельные матрицы PAN канала КС той же, либо другой космической системы. Необходимо сразу отметить, что использовать полученные таким образом мультиспектральные изображения для последующей обработки не рекомендуется, так как

в ходе выполнения процедуры несколько меняются спектральные характеристики снимка. Результаты такой обработки чаще используют для визуального дешифрирования.

После завершения работ по корректировке и улучшению спутниковых данных, осуществляется **второй блок** обработки, который сводится к выявлению особенностей земной поверхности, имеющих прямую или косвенную зависимость от геологической среды. К основным процедурам этого этапа относят:

- 1) создание мультиспектрального изображения из моноканальных растров;
- 2) расчет спектральных индексов;
- 3) анализ главных компонент;
- 4) спектральное разделение;
- 5) классификации;
- 6) совместная обработка изображений и данных о рельефе местности.

Создание мультиспектрального изображения. Операторы и поставщики космоматериалов представляют данные в виде поканальных наблюдений. Такое моноканальное изображение можно визуализировать в оттенках серого, либо в псевдоцветах. При этом на мониторе, отображается информация полученная в одном спектральном канале.

Лучше воспринимается не черно-белое, а цветное изображение. Цветное изображение на мониторе можно получить, отобразив три моноканала космического снимка в палитре RGB (рис. 2). Очевидно, что в снимке с 6 каналами можно получить 20 различных комбинаций.

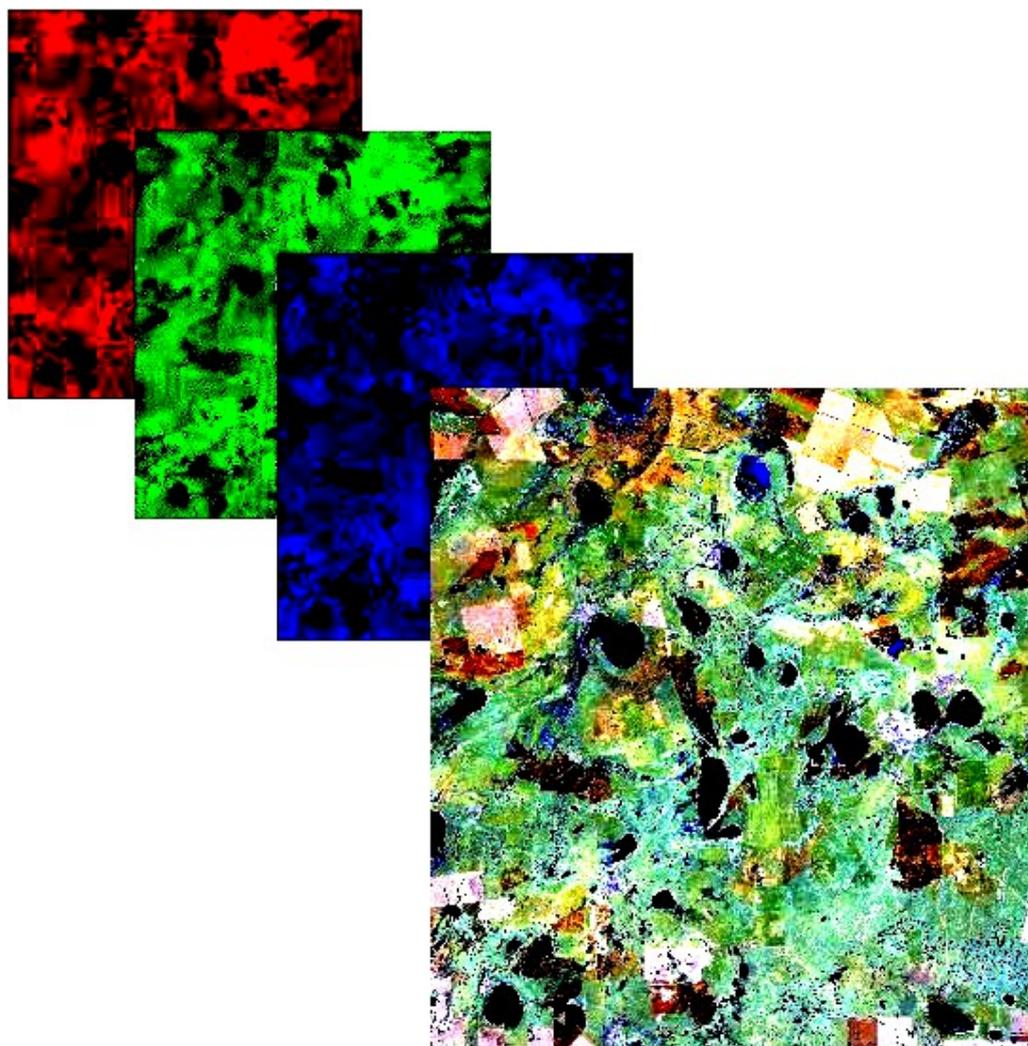


Рисунок 2 – Создание мультиспектрального изображения

Расчет спектральных индексов. Для получения индексного изображения, значение яркости каждого пиксела вычисляется путем применения алгебраических операций над значениями яркости этого пиксела из разных спектральных каналов снимка. При таком подходе важны не абсолютные значения в различных спектральных зонах, а их отношения. Прямые и косвенные признаки геологических образований традиционно выявляют в следующих индексах: вегетационный, нормализованный вегетационный, инфракрасный/красный, железо-оксидный, глинистые минералы, железистые минералы, гидротермальные минералы, минеральные композиции и др. (рис. 3).

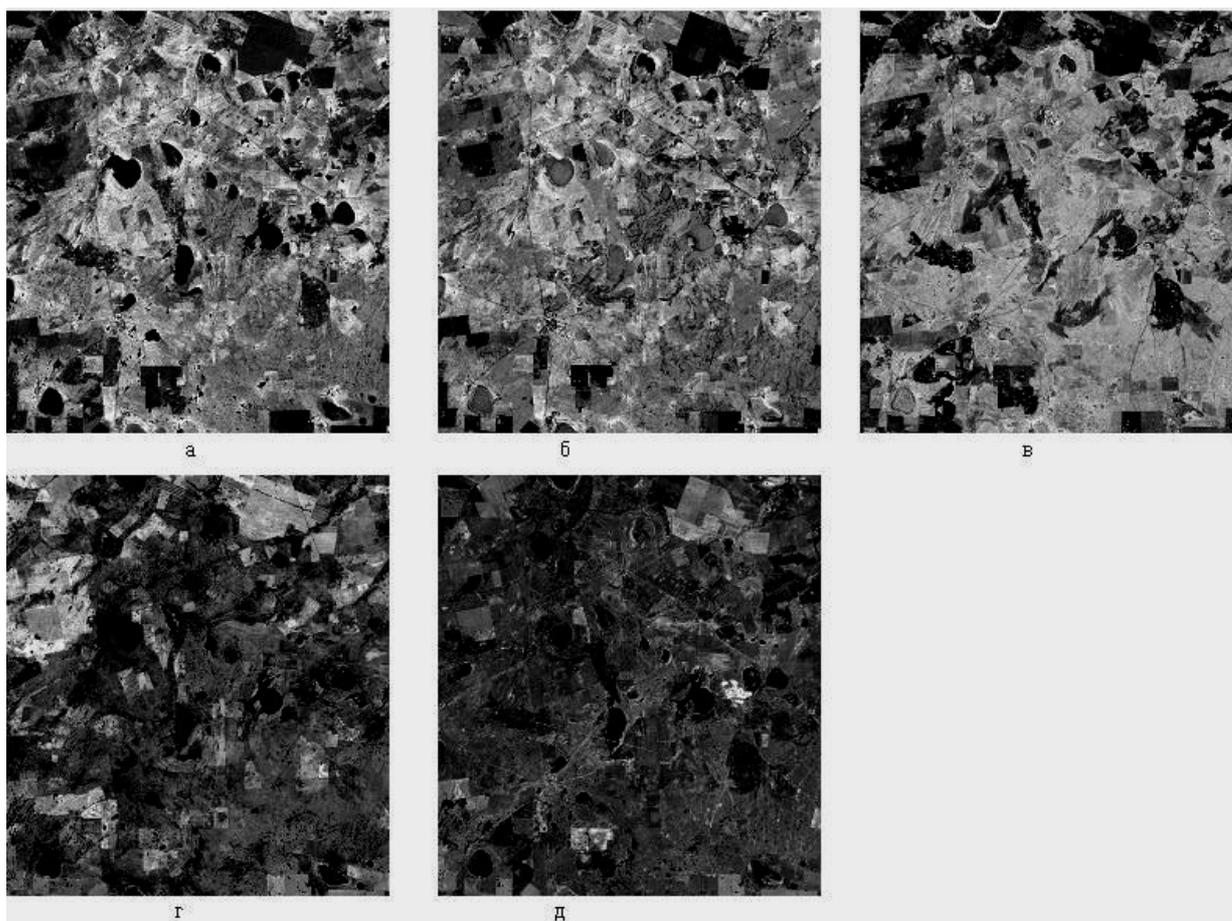


Рисунок 3 – Информативные спектральные индексы: а – IR/R; б – вегетационный;
в – глинистые минералы; г – железистые минералы; д – оксиды железа

Анализ главных компонент. Это метод анализа многоспектральных коррелированных данных. Понятие коррелированные данные означает, что при возрастании значения яркости пикселей в одном спектральном канале изменяются значения яркости и в других спектральных каналах. Подобная корреляция может возникать по ряду причин, например, при относительно низкой отражательной способности растительного покрова в видимой части спектра, что приводит к схожести спектральных образов объектов во всех диапазонах регистрации видимого излучения.

Топографические особенности рельефа также могут вызывать корреляции между диапазонами. Уровень затенения при съемках в гористой местности, или при съемке на закате или восходе солнца, можно считать одинаковым во всех диапазонах регистрации отраженного солнечного излучения.

Такая корреляция приводит к избыточности информации, из-за чего анализ данных в исходных спектральных диапазонах становится неэффективным. Для преодоления этой избыточности и применяют метод главных компонент.

Результатом преобразования снимков методом главных компонент является устранение корреляционной зависимости между исходными многомерными данными при одновременном сжатии большей части дисперсии полного изображения. Полученные в результате некоррелированные многослойные изображения принято нумеровать в порядке убывания дисперсии (рис. 4). Другими словами, если снимок содержит шесть спектральных каналов, можно создать цветное изображение из трех главных компонент,

поскольку в типичном многозональном изображении, обычно, первые две, три или четыре компоненты способны описать, практически, всю изменчивость спектральных характеристик. Остальные компоненты чаще всего обусловлены шумовым воздействием. Исключая эти компоненты, можно уменьшить объем данных без заметной потери информации.

Спектральное разделение. Один пиксел снимка может отображать от нескольких до тысяч квадратных метров поверхности Земли, и содержать информацию не об одном объекте, а о группе объектов, которые расположены на соответствующей территории.

Метод спектрального разделения применяют для распознавания на снимках объектов, размер которых меньше размера пиксела. Суть метода состоит в следующем: смешанные спектры анализируют, сравнивая их с известными чистыми спектрами, например, из спектральных библиотек чистых материалов. Происходит количественная оценка соотношения данного известного (чистого) спектра и примесей в спектре каждого пиксела. После выполнения такой оценки может быть получено изображение, раскрашенное так, что цвет пиксела будет означать, какой компонент преобладает в спектре этого пиксела.

Классификации – это компьютерное дешифрирование снимков или процесс автоматизированного разделения пикселов снимка на группы (классы), которые соответствуют разнотипным объектам. Существует два основных подхода к проведению классификации – неуправляемая и управляемая.

Суть неуправляемой классификации сводится к автоматическому разделению пикселов изображения на заданное число классов на основе статистических показателей распределения яркостей. Такой способ классификации применяют в случае если:

- заранее неизвестно какие объекты есть на снимке,
- на снимке большое количество объектов (более 30) со сложными границами.

Сложность такого способа заключается в последующей интерпретации выделенных классов.

Наиболее распространенные методы классификации без обучения – ISODATA и К-средних. ISODATA это классификация, которая основана на кластерном анализе. К одному классу относятся пикселы, значения яркости которых наиболее близки в пространстве спектральных признаков. Метод классификации К-средних отличается от метода ISODATA тем, что требует изначального задания некоторого количества средних значений для формирования начальных классов, следовательно, этот способ используют тогда, когда объекты на снимке достаточно хорошо различаются.

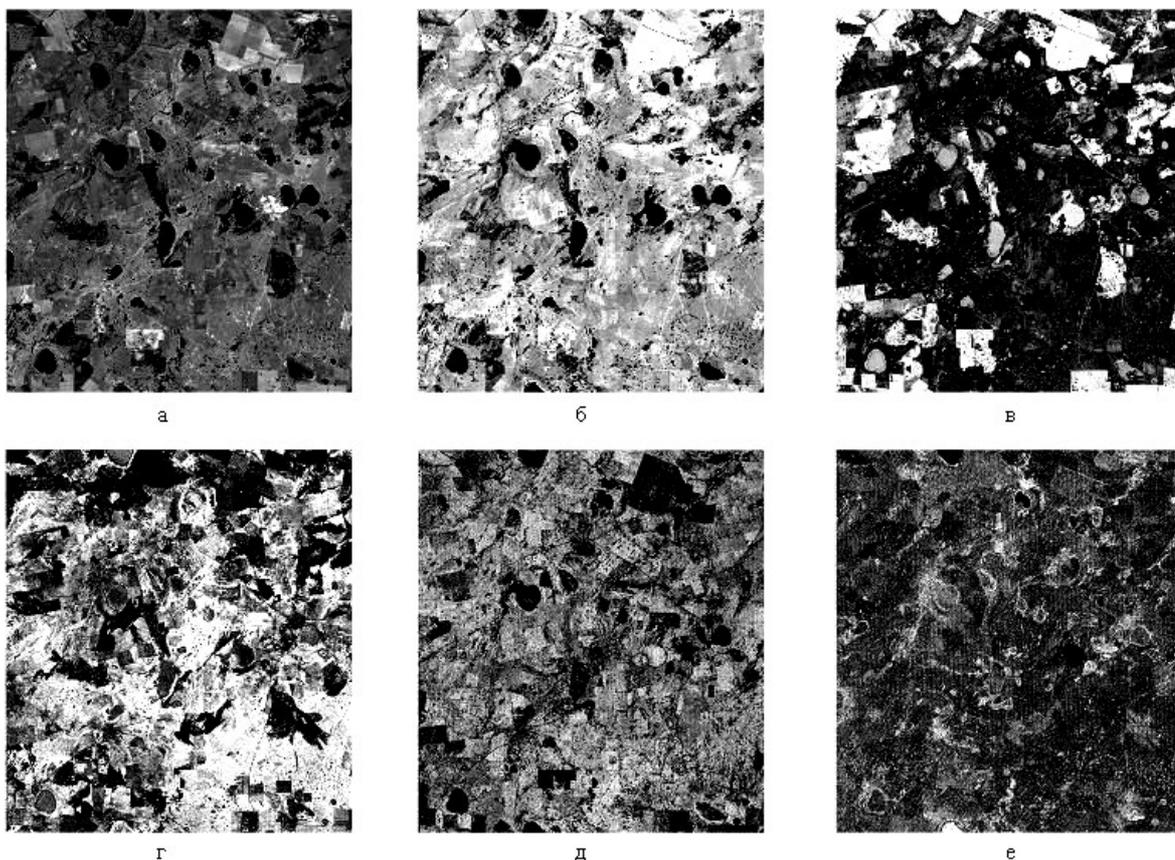


Рисунок 4 – Главные компоненты: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6

Управляемая классификация сводится к разделению пикселей изображения на основе заранее определенных эталонных объектов, либо по спектральным библиотекам.

Классификация по эталонам проводится в следующем порядке:

- 1) определение элементов классификации (определение объектов для дешифрирования);
- 2) выделение эталонов (выделение на классифицируемом снимке областей соответствующим тем или иным элементам классификации);
- 3) оценка качества эталонов (оценка характера распределения значений яркости этих эталонных объектов);
- 4) выбор способа классификации;
- 5) классификация с последующей оценкой качества полученного результата.

В приведенной технологической цепочке наиболее сложным моментом является выбор способа классификации. Наиболее распространенными способами разделения пикселей на группы по эталонам являются: способ минимального расстояния, способ параллелепипедов, способ максимального правдоподобия, способ расстояния Махаланобиса, способ спектрального угла. Каждый из приведенных выше способов классификации имеют свои особенности, достоинства, недостатки и области применения (табл. 1)

Таблица 1 - Предпочтительные области применения статистических классификаторов

Способ классификации	Области применения
Минимального расстояния	Классификация объектов, значения яркости которых пересекаются
Параллелепипедов	Классификация объектов, значения яркости которых не пересекаются
Максимального	Классификация объектов, у которых области значений

правдоподобия	яркости разных классов в пространстве признаков перекрываются и имеют сложную (или вытянутую) форму.
Расстояния Махаланобиса	Этот способ является более точным, по сравнению со способом минимального расстояния, поскольку учитывает распределение значений яркости обучающих выборок.
Спектрального угла	Классификация объектов, которые имеют схожие значения яркости

Достаточно перспективным является использование управляемой классификации по спектральным библиотекам. Спектральные библиотеки представляют собой наборы графиков-кривых спектральной отражательной способности объектов, полученные многоканальными спектрометрами в лабораторных или полевых условиях.

Использование данных спектральных библиотек в качестве эталонов при проведении спектрального анализа для выявления объектов на конкретном снимке требует соблюдения ряда обязательных требований:

1) одинаковые единицы измерения. Поскольку спектральные библиотеки содержат информацию о значениях коэффициентов отражения на поверхности земли, выражаемых, как правило, в долях единицы, яркости пикселей должны быть приведены к такому же виду. То есть должен быть выполнен пересчет яркостей пикселей в коэффициент отражения (значения 0-1) и устранено влияние атмосферы;

2) одинаковый спектральный диапазон и разрешение данных. Спектральный диапазон и разрешение библиотек соответствуют характеристикам спектрометра. Спектральный диапазон большинства библиотек спектров от 0,2-0,4 до 14-25 микрон с разрешением от 1 до нескольких нанометров. То есть, в библиотеке может содержаться несколько сотен, а то и тысяч точек для построения одной кривой. Спектральное разрешение многозональных съемочных систем не сопоставимо с такими данными.

Не смотря, на кажущуюся привлекательность, метод обладает очевидным недостатком – реальные спектры отражения горных пород во многом зависят от большого числа факторов – минерального состава, степени выветрелости, наличия и качества растительности, солнечной экспозиции, степени обводненности, пространственного и радиометрического разрешения космической системы и многого другого.

Совместная обработка изображений и данных о рельефе местности включает в себя в виде основных разделов драпировку трехмерной модели местности первичными или производными изображениями, а также собственно обработку цифровой модели рельефа различными методами (например, текстурная фильтрация, направленное дифференцирование). Поскольку значительный объем дешифровочных признаков связан в той или иной мере с особенностями рельефа местности, постольку изучение этой составляющей всего блока информации является очень важным. Кроме того, изучаемые площади в ряде случаев достаточно интенсивно «зашумлены» объектами антропогенного характера: урбанизированные территории, сельхозугодия и т.п., что делает практически невозможным распознавание проявлений геологических процессов на изображениях, однако нередко следы этих процессов сохраняются в рельефе.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования «Фундаментальные исследования в области естественных наук», № 747.МОН.ГФ.12.7

ЛИТЕРАТУРА

1 Аэрокосмические методы геологических исследований /Под. Ред. А.В. Перцова. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.

- 2 Байбатша А.Б. Модели месторождений цветных металлов. Алматы, 2012. 448 с.
- 3 Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Том 2. Металлогения. Алматы, 2002. 272 с.
- 4 Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебное пособие для вузов. М.: Аспект-Пресс, 2004. 184 с.
- 5 Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г. Дистанционные методы геологических исследований, прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых: учебное пособие для вузов. Томск, 2011. 304 с.

REFERENCES

- 1 Space methods of geological researches / Under Edition of A.V.Pertsova. SPb.: VSEGEI, 2000. 316 p.
- 2 Baibatsha A.B. Models of fields of non-ferrous metals. Almaty, 2012. 448 p.
- 3 Deep structure and mineral resources of Kazakhstan. Volume 2. Metalgenius. Almaty, 2002. 272 p.
- 4 Labutina I.A. Deshifirovaniye of space pictures: manual for higher education institutions. M: Aspekt-Press, 2004. 184 p.
- 5 Poceluyev A. A. Ananyev Yu.S. Zhitkov V. G. Remote methods of geological researches, forecasting and searches of mineral deposits: manual for higher education institutions. Tomsk, 2011. 304 p.

Резюме

А.Б. Байбатша¹, Поцелуев А.А.², Ананьев Ю.С.²

(¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы қ.,

²Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск қ.)

ЖАСЫРЫН КЕНБАҚЫЛАУШЫ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫ АНЫҚТАУ ҮШІН ҒАРЫШ ТҮСІРІМІН ГЕОЛОГИЯЛЫҚ РИЯСЫЗДАУ ӘДІСТЕМЕСІ

Жерді қашықтан ғарыштан зондылаудың кайнозой жаралымдары астындағы жасырын рудабақылаушы құрылымдарды анықтау үшін болашағы зор. Оның ғарыш түсірімдерін риясыздау және геологиялық бажайлау әдістемесі негізінде мүмкін екендігі көрінеді.

Тірек сөздер: ғарыштүсірім, риясыздау, геологиялық бажайлау, рудабақылаушы құрылымдар

Summary

A. B. Baibatsha¹, A. A. Pochuyev², Yu. S. Ananyev²

(¹Kazakh National Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty,

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk)

METHOD OF GEOLOGICAL INTERPRETATION OF SATELLITE IMAGES TO DETECT HIDDEN ORE-CONTROLLING STRUCTURES

Remote sensing from space has great potential to detect hidden ore-controlling structures under the Cenozoic formations. This is possible on the basis of the developed methods of interpretation and geological interpretation of satellite images.

Keywords: space image, interpretation, geological interpretation, ore-controlling structure.

Поступила 02.10.2013 г.