ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

Под научной редакцией доктора технических наук, профессора Г.Г. Райкунова



Авторский коллектив: Райкунов Г.Г., Щербаков В.Л., Турченко С.И., Брусничкина Н.А.

Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 136 с. — ISBN 978-5-9221-1533-9.

Книга посвящена применению мульти- и гиперспектрального зондирования Земли для решения задач геологического картирования. Рассматриваются современные методы обработки и анализа данных гиперспектрального дистанционного зондирования земной поверхности из космоса. Изложены преимущества гиперспектральных данных по сравнению с другими материалами дистанционного зондирования применительно к задаче идентификации минералов, что позволяет составлять первичные тематические карты исследуемой территории. Описана экспертная система обработки гиперспектральных данных. Приведены примеры решения конкретных геологических задач. Сравниваются возможности аэро- (AVIRIS) и космической гиперспектральной (Hyperion) аппаратуры. Показана необходимость и перспективность использования гиперспектральных материалов для решения широкого круга природоресурсных задач при условии разработки более совершенных алгоритмов и поисков новых подходов к созданию специализированного программного обеспечения для интерпретации гиперспектральных изображений.

Книга представляет интерес для специалистов, использующих материалы дистанционного зондирования Земли, аспирантов и студентов геолого-географического профиля.

Главный редактор: А.Ф. Морозов Редакционная коллегия: А.Ф. Карпузов, Б.Н. Можаев

© ФИЗМАТЛИТ, 2014

© Коллектив авторов, 2014

ISBN 978-5-9221-1533-9

оглавление

Предисловие	5
Список сокращений	7
Введение	11
Глава 1. Материалы дистанционных зондирований	14
1.1. Общие характеристики систем ДЗЗ	14
1.1.1. Характеристики электромагнитного поля	14
1.1.2. Электромагнитное поле и атмосфера	16
1.1.3. Электромагнитные свойства горных пород	19
1.1.4. Общие характеристики систем ДЗЗ	22
1.1.5. Общие характеристики сенсоров	25
1.2. Мульти- и гиперспектральные данные	26
1.2.1. Мультиспектральные системы	32
1.2.2. Гиперспектральные системы	50
1.2.3. Обработка гиперспектральных данных	58
Глава 2. Методы обработки данных дистанционных зонди-	65
ровании	00
2.1. Методы обработки мультиспектральных данных	65
2.1.1. Методы улучшения мультиспектральных изображе- ний	65
2.1.2. Процедуры обработки мультиспектральных данных	68
2.2. Методы обработки гиперспектральных данных	78
2.2.1. Определение параметров и предварительная обра- ботка	78
2.2.2. Спектры и спектральные библиотеки	87
2.2.3. Процедуры обработки гиперспектральных данных	89
2.2.4. Экспертная система обработки гиперспектраль- ных данных	98

4

Глава 3. Пример использования гиперспектральных дан-	
ных	107
3.1. Обработка гиперспектральных данных района Cuprite	
(Nevada, USA)	107
3.2. Картирование на основе данных AVIRIS	111
3.3. Картирование на основе данных Hyperion	117
Заключение	127
Список литературы	129

предисловие

Настоящая работа является аналитическим обзором, в котором рассматриваются современные методы анализа результатов гиперспектрального дистанционного зондирования поверхности Земли, применяемые для решения задач геологического картирования. Обзор написан большей частью на основе зарубежных источников, однако авторы надеются, что смогут привлечь интерес геологов к новой гиперспектральной аппаратуре, установленной на отечественных космических аппаратах «Ресурс-П» и «Зонд-ПП».

Мультиспектральные дистанционные методы стали привычным инструментом при исследовании минеральных запасов, а в последнее время осознаны преимущества использования гиперспектральных дистанционных методов исследования перспективных площадей. Гиперспектральные методы позволяют непосредственно идентифицировать большинство минералов на основании их спектральных свойств и, таким образом, составлять первичные тематические карты исследуемой территории. На более современных стадиях геологических исследований методы анализа мультиспектральных и гиперспектральных изображений позволяют интегрировать и анализировать все собранные данные для выбора перспективных площадей или прогнозирования месторождений.

Обзор состоит из введения, трех глав и заключения. Во введении изложены преимущества гиперспектральных данных по сравнению с другими материалами дистанционного зондирования Земли для анализа минеральных спектров и идентификации минералов. В первой главе даются краткие сведения, необходимые для понимания материала обзора: приводятся общие сведения о взаимодействии электромагнитных полей с атмосферой и горными породами, рассматриваются основные характеристики систем дистанционного зондирования Земли. Во второй главе приведен обзор существующих методов обработки гиперспектральных данных: рассматриваются предварительная обработка дистанционных материалов, спектральные библиотеки, необходимые для обработки гиперспектральных данных, приведены примеры основных методов обработки. В качестве интегрального средства обработки описывается экспертная система обработки гиперспектральных данных. В третьей главе рассматривается пример решения содержательной геологической задачи на основе данных дистанционной спектроскопии. Пример позволяет оценить общие возможности гиперспектальных методов и сравнить реальные возможности существующей аэро- (AVIRIS) и космической (Hyperion) аппаратуры. В заключении обзора делается вывод о том, что гиперспектральная аппаратура и методы анализа гиперспектральных данных в состоянии идентифицировать большое количество минералов на основе их абсорбционных свойств, но требуют создания более совершенных алгоритмов и новых подходов к разработке специализированного программного обеспечения, используемого для визуализации, анализа, обработки и интерпретации гиперспектральных изображений.

Рассмотренные в обзоре особенности применения гиперспектральных методов при исследовании минеральных ресурсов и примеры обработки гиперспектральных снимков представляют интерес для научных работников, аспирантов, студентов высших учебных заведений и других специалистов, занимающихся анализом результатов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Авторы выражают искреннюю признательность начальнику отдела 1031 ЦНИИмаш, д.ф.-м.н. Александру Витальевичу Карелину за доброжелательные замечания по содержанию аналитического обзора и начальнику Головного отдела научно-технической информации ЦНИИмаш, к. воен. н. Владимиру Николаевичу Дубровскому за ценные рекомендации и помощь в подготовке рукописи к изданию.

6

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГИС	географическая информационная система
ДЗ	дистанционное зондирование
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ИК	инфракрасный диапазон спектра
ИСЗ	искусственный спутник Земли
KA	космический аппарат
МДЗЗ	материалы дистанционного зондирования Земли
ПЗС	приборы с зарядовой связью
AC	Atmospheric Corrector (атмосферный корректор)
ACORN	Atmospheric CORrection Now (модель атмосферной коррекции)
AFGL	U.S. Air Force Geophysics Laboratory (Геофизическая лаборатория военно-воздушных сил США)
AIG	Eastman Kodak/Research Systems RSI (исследовательские подразделения Истман Кодак)
AIS	Airborne Imaging Spectrometer (бортовой авиационный спектрометр)
ALI	Advanced Land Imager (усовершенствованный построитель изображений земной поверхности)
ARIES	Australian Resource Information and Environment Satellite (австралийский информационный спутник защиты окружающей среды)
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Ra- diometer (усовершенствованный космический радиометр на термоэмиссии и отражении)
ATC	Atmospheric Transmission Codes (модели прозрачности атмосферы)
ATCOR	ATmospheric CORrection (модель атмосферной коррекции)
ATREM	ATmosphere REMoval (модель атмосферной коррекции)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (усовершенство-
	ванный радиометр очень высокого разрешения)
AVIRIS	Airborne Visible and InfraRed Imaging Spectrometer (борто- вой спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов)
BNP	Back-Propagation Network (сети с обратным распростра- нением)
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager (компактный бортовой спектральный построитель изображений)

8	Список сокращений
CCRS	Canada Centre for Remote Sensing (Канадский центр дис- танционного зондирования)
CEM	Constrained Energy Minimization (минимизация с ограничениями)
CIR	Color InfraRed (цветной инфракрасный диапазон)
CSES	Center for the Study of Earth from Space University of Colorado (Центр изучения Земли Университета Колора- по, г. Боуддер)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Orga- nization (Содружество по научным и промышленным исследованиям)
CSWIR	Color SWIR (цветной коротковолновый инфракрасный диапазон)
CV	Cube Visualization (программа куб визуализации)
DEM	Digital Elevation Model (цифровая модель рельефа)
DFF	Distributed Flat Field (метод распределенного плоского поля)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Немецкий аэрокосмический центр)
EL	Empirical Line Method (метод эмпирической линии)
ENVI	Environment for Visualizing Images (средства для визуа- лизации изображений)
EO-1	Earth Observing-1 (наблюдение Земли-1)
EOS	Earth Observing System (система наблюдения Земли)
ERIM	Environmental Research Institute of Michigan (Экологи- ческий научно-исследовательский центр, Мичиган)
ESA	European Space Agency (Европейское космическое агентство)
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus (усовершенствованный тематический картограф)
FF	Flat Field (метод плоского поля)
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hy- percubes (быстрый линейный атмосферный анализ на ос-
HITRAN	High Resolution Transmission Molecular Absorption Database (база данных молекулярной абсорбции высоко- го разрешения)
HRV	High Resolution Visible (аппаратура видимого диапазона высокого разрешения)
HRV-IR	High Resolution Visible–Infared (аппаратура (сенсор) вы- сокого разрешения видимого и инфракрасного диапазо- нов)
HYDICE	Аэросканер (назван по аббревиатуре проекта, в кото- ром этот сканер был разработан: HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment — эксперимент по сбору цифровых гиперспектральных изображений)

НуМар	Hyperspectral scanner (гиперспектральный сканер)				
Hyperion	Гиперспектральная съемочная система				
IARR	Internal Average Relative Reflectance (метод внутренней средней относительной отраженной яркости)				
IGLLC	Imaging and Geophysics LLC (обработка изображений и геофизических данных)				
IKONOS	спутник с аппаратурой высокого разрешения				
INS	Intensity Hue Saturation (интенсириость оттенок насы-				
1110	шенность)				
IRS	Indian Remote Sensing (индийский спутник для дистан-				
ISDAS	ционного зондирования) Image Special Deta Analysis (прострементомичий очетие				
ISDAS	ппаде Эрапаг Data Anarysis (пространственный анализ				
2121	Integrated Software for Imagers and Spectrometers (up				
1010	тегрированное программное обеспечение для обработки				
IDI	Let Dropulsion Laboratory (Паборатория реактивного				
51 L	лвижения)				
LAC	Local Area Coverage (местная зона покрытия)				
LAU	Low Resolution Atmospheric Transmission Code (MOTERL				
LOWIKAN	атмосферной коррекции низкого разрешения)				
MEDIS	MEDium Desolution Imaging Spectrometer (спектрометр				
MEDIS	спелнего разрешения)				
MFF	Modified Flat Field (Metor Monutuunopauhoro плоского				
1,11 1	поля)				
MNF	Minimum Noise Fraction (молифицированный РСА				
1,11,1	алгоритм)				
MNF	Minimum Noise Fraction (процедура минимизации				
1,11,1	шума)				
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (спектро-				
INODIO	ралиометр умеренного разрешения)				
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmit-				
	tance Model (модель атмосферной коррекции среднего				
	разрешения)				
MSFMA	Multiple Spectral Feature Mapping Algorithm (алгоритм				
	многозонального картирования)				
MSS	Multispectral Scanner System (мультиспектральная ска-				
	нирующая система)				
MTMF	Mixture-Tuned Matched Filtering (согласованная филь-				
	трация для смешанной настройки)				
Multi Spec	программный пакет для обработки мульти- и гиперспек-				
1	тральных снимков (по названию мультиспектрального				
	спутника MultiSpec Satellite)				
MW	MicroWave (микроволновый диапазон)				
MWIR	Mid Wave InfraRed (средний инфракрасный диапазон)				

10	Список сокращений
NASA	National Aeronautic and Space Administration (Нацио- нальное аэрокосмическое агентство США)
NIMS	Near Infrared Mapping Spectrometer (спектрометр ближ-
NID	него инфракрасного диапазона) Neer InfreDed (ближний инфракрасний лиспесси)
NMD	New Millonnium Drogram (Программа исрова тисячата)
NC	Inn) Natural Color (натуральный цвет)
OSP	Orthogonal Subspace Projection (OptoroHanshoe Dompo-
001	странство)
PCA	Principal Components Analysis (метод главных компо-
1 011	нент)
PPI	Pixel Purity Index (инлекс чистоты пикселей)
QuickBird	Спутник Квикбёрд
RGB	Red, Green, Blue (красный, зеленый, синий)
RSI	Research Systems Inc. (исследовательские системы)
SAM	Spectral Angle Mapper (картирование по спектральному
SASI	Shortwave InfraRed Airborne Spectrographic Imager (ко-
SCM	ротковолновый инфракрасный спектрометр) Spectral Correlation Mapper (картирование по спектраль-
5011	ной корреляции)
SESI	Short Wave InfraRed Full Spectrometer Imager (спектро-
01 01	метр ближнего инфракрасного лиапазона)
SIPS	Satellite Image Processing System (система анализа ги-
011 0	перспектральных изображений)
SNR	Signal-to-Noise Relation (отношение сигнал/шум)
SPAM	SPectral Analysis Manager (программный пакет для
	спектрального анализа «Менеджер»)
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre (французский
	спутник для наблюдений за поверхностью Земли)
SPOT-HRV	Программа SPOT с аппаратурой видимого диапазона
	высокого разрешения HRV
SWIR	Short Wave Infra Red (коротковолновый инфракрасный
	диапазон)
Tetracorder	экспертная система для анализа и идентификации ди-
	станционных спектров
TIR	Thermal InfraRed (тепловой инфракрасный диапазон)
TM	Thematic Mapper (тематический картограф)
USGS	U.S. Geological Survey (Американская геологическая
VNUD	служба)
VNIR	Visible and Near-Infrared Range (видимый и ближний
	инфракрасныи диапазон)

введение

Информативность данных, которые получает дистанционный сенсор, определяется набором его спектральных каналов. Ранние сенсоры имели несколько спектральных каналов (7 каналов Landsat) и могли получать только ограниченное количество спектральной информации. Гиперспектральные сенсоры (дистанционные спектрометры) получают изображение во многих (очень узких) каналах, расположенных в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах спектра. Такие системы обычно имеют 200–400 каналов данных, которые позволяют получить эффективный непрерывный спектр яркости для каждого пикселя сцены. Таким образом, гиперспектральные сенсоры получают данные с высоким спектральным разрешением, что позволяет им проводить идентификацию минералов, в то время как гораздо более широкие каналы Landsat имеют низкое разрешение и не могут различать минеральные спектры.

Большинство гиперспектральных удаленных съемок все еще используют аэросканеры — такие как CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer), SFSI (SWIR Full Spectrometer Imager), аэросканер HYDICE, названный по аббревиатуре проекта, в рамках которого это сканер был разработан (HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment), Probe-1, НуМар и др. К космическим сенсорам относятся Hyperion и ARIES-1, названный по имени спутника, на котором он был установлен (Australian Resource Information and Environment Satellite — Австралийский информационный спутник защиты окружающей среды). Для обработки как аэро-, так и космических гиперспектральных данных необходимы стандартные спектры отраженной яркости минералов, на основании которых спектральные данные могут быть классифицированы. Измеренные лабораторными спектрометрами различных типов, с различным спектральным разрешением такие спектры хранятся в специальных спектральных библиотеках, доступных в цифровой форме [15].

В настоящее время используется большое количество различных методов для выделения информации из изображений с высоким спектральным разрешением, но все они придерживаются одного подхода. Сначала данные, полученные с дистанционного спектрометра, корректируют для приведения к истинной отраженной яркости. Затем проводят один из количественных тестов для определения степени корреляции спектра изображения (полученного от неизвестных материалов) с библиотечными спектрами известных материалов. Эти спектры могут быть получены разными способами — измерены в поле, получены в лаборатории или выделены из данных анализируемого изображения в тех пространственных точках, где состав материалов известен. Результат интерпретации изображения обычно представлен в виде карты распределения минералов, которая относит каждому пикселю минерал, условная вероятность появления которого в данной точке максимальна. Большинство методов анализа, разработанных специально для гиперспектральных данных, проводит корректный, хотя и ограниченный, анализ и для мультиспектральных данных.

Все имеющиеся методы анализа могут быть разделены на две непересекающиеся группы — «пиксельные» и «субпиксельные». Пиксельные методы предполагают, что каждый пиксель состоит из единственного чистого материала. Для идентификации материала проводится сравнение спектра яркости каждого пикселя анализируемого изображения с набором лабораторных спектров. Затем полученные результаты обрабатываются классификатором, который позволяет определить, к какому из спектров вероятнее всего должен быть отнесен анализируемый пиксель. В качестве классификатора применяется один из стандартных управляемых классификаторов (использующих критерии минимальной дистанции или максимума правдоподобия) или специально разработанные для анализа гиперспектральных данных процедуры, такие как алгоритм SAM (Spectral Angle Mapper), картирование по спектральному углу. Алгоритм SAM вычисляет (в многомерном пространстве значений спектров) минимальный угол между вектором анализируемого пикселя и вектором каждого лабораторного спектра. Выход SAM дает количественную оценку тех абсорбционных свойств анализируемого пикселя, которые относятся к анализируемым минералам. Другие подходы сравнения спектра пикселя и лабораторных спектров используют определение спектральных свойств. Для этого может использоваться, например, метод нейронных сетей BNP (Back-Propagation Network, сеть с обратным распространением), который позволяет анализировать все пиксели одновременно [43].

Субпиксельные методы анализа предполагают, что пиксель образуется излучением нескольких материалов и спектр отра-

женной яркости любого пикселя можно представить как результат линейной комбинации спектров всех компонентов. На основании этих предположений субпиксельные методы вычисляют вероятное соотношение компонентов в каждом пикселе анализируемого изображения. Для вычислений берут такие методы, как линейное спектральное разделение и фильтр по эталонам. Субпиксельные методы широко применяются для обработки гиперспектральных данных [44]. В качестве примера их использования можно привести обработку демонстрационных данных AVIRIS по району Cuprite (Nevada, USA), где эти методы использовались в экспертной системе Tricorder [16]. Существует большое количество других работ, демонстрирующих использование аппаратуры и применение методов обработки гиперспектральных данных [34].

Глава 1

МАТЕРИАЛЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

1.1. Общие характеристики систем ДЗЗ

1.1.1. Характеристики электромагнитного поля

В природе электромагнитная энергия генерируется во многих физических процессах, включая изменения энергетических уровней электронов, ускорение электрических зарядов, тепловое движение атомов и молекул и т.д. [24]. Электромагнитное излучение Солнца, прежде чем достичь земной поверхности, проходит через атмосферу. Часть излучения, которое отражается земной поверхностью, позволяет делать фотографии земной поверхности и получать иные дистанционные изображения. Другая часть солнечного излучения поглощается поверхностью Земли и затем распространяется уже как собственное излучение Земли. Эта часть энергии также может быть использована для получения дистанционных изображений, хотя последние будут отличаться от изображений, полученных на основе отраженного излучения. Наконец, искусственное излучение, которое генерируется, например, радарами, также применяется для получения дистанционных изображений.

Основные диапазоны электромагнитного спектра, обычно используемые в ДЗЗ, приведены в табл. 1.1. Оптический спектр 0,3–15 мкм определяет длины волн, которые могут преломляться и отражаться линзами и зеркалами. Отраженный спектр 0,38–3 мкм — часть солнечного спектра, которая может непосредственно использоваться для ДЗЗ. Хотя видимый спектр 0,38–0,72 мкм только малая часть всего спектра, он играет большую роль для ДЗЗ. За видимым красным цветом идет инфракрасный (ИК) регион 0,72–15 мкм, протяженность которого очень велика по сравнению с видимым регионом. Ближний ИК-диапазон расположен непосредственно за видимым диапазоном. Излучение в ближнем ИК-диапазоне ведет себя в отношении оптических систем так же, как излучение видимого спектра, поэтому оптическое оборудование, спроектированное для видимого диапазона, может использоваться для ближнего ИК-диапазона. Свойства излучения дальнего ИК-диапазона принципиально отличаются от видимого и ближнего ИК-диапазонов. Излучение ближнего ИК-диапазона — это солнечное излучение, отраженное от земной поверхности, излучение дальнего ИК эмитируется Землей и поэтому часто называется тепловой или термальной энергией. Самая короткая длина волны в микроволновом диапазоне — 1 мм — совпадает с дальним ИК-диапазоном, наибольшая длина волны микроволнового диапазона граничит с диапазоном волн коротковолновых радиостанций.

Длина волны	Спектральный диапазон (канал)		
0,3-0,4 мкм	Ультрафиолетовый (UV)		
0,4-0,7 мкм	Видимый (V)		
0,7-1,1 мкм	Ближний инфракрасный (NIR)		
1,1–1,35; 1,4–1,8; 2–2,5 мкм	Коротковолновый инфракрасный (SWIR)		
3-4; 4,5-5 мкм	Средний инфракрасный (MWIR)		
8-9,5; 10-14 мкм	Тепловой инфракрасный (TIR)		
15,0 мкм-1,0 мм	Дальний инфракрасный (FIR)		
1,0 мм-1,0 м	Микроволновый (Microwave)		

Таблица 1.1. Рабочие длины волн, обычно используемые для ДЗЗ

Все объекты эмитируют собственное электромагнитное излучение; кроме того, объекты могут отражать излучение, которое эмитируется другими объектами. Измеряя собственное или отраженное излучение объекта и понимая, как это излучение проходит через земную атмосферу и взаимодействует с поверхностью Земли, можно определить многие важные свойства земной поверхности — растительности, почв или горных пород. Интерпретация дистанционных изображений зависит от правильного понимания принципов распространения электромагнитного излучения и его взаимодействия с поверхностью и атмосферой. Поведение электромагнитного излучения в видимом диапазоне, которое формирует небольшую, но очень важную часть всего электромагнитного спектра, является интуитивно наиболее понятным. Части электромагнитного спектра, которые лежат вне видимого диапазона, требуют специального рассмотрения, поскольку поведение излучения в этих диапазонах может существенно отличаться от поведения видимого излучения.

1.1.2. Электромагнитное поле и атмосфера

Излучение, которое используется для получения каждого дистанционного снимка, проходит через земную атмосферу [24]. Если детектор излучения расположен на борту низколетящего самолета, влияние атмосферы на качество снимка может быть минимальным. Напротив, энергия, которая попадает на сенсор, находящийся на борту ИСЗ, проходит через всю земную атмосферу. В этом случае атмосферные эффекты могут иметь существенное влияние на качество снимка. Чтобы уменьшить это влияние, практика ДЗЗ требует учета взаимодействия электромагнитной энергии с атмосферой. Прохождение излучения через атмосферу сопровождается целым рядом физических процессов, на качество снимка, в первую очередь, влияют рассеяние, поглощение и преломление (рефракция).

Рассеяние объясняется наличием трех классов атмосферных частиц: большие нерегулярные частицы, такие как атмосферная пыль, дым и т. д., для которых характерны большая доля прямого рассеяния и малая обратного рассеяния; мелкие симметричные частицы и большие атмосферные молекулы, которые создают примерно одинаковое прямое и обратное рассеяние; капли воды, которые создают очень сильное прямое рассеяние и небольшое обратное. Причина неселективного рассеяния — частицы, которые гораздо больше, чем длина волны рассеиваемого излучения. Для излучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах такими частицами могут быть водяные капли или частицы пыли.

Рассеяние — причина того, что атмосфера имеет свою собственную яркость, т.е. в видимой части спектра тени не черные, а темные. Объекты в тени видны, т.к. солнечные лучи рассеиваются на мелких частицах. Эффекты рассеяния создают также атмосферную перспективу, когда удаленные объекты представляются в более мягких цветах по сравнению с яркими цветами переднего плана. Составляющими наблюдаемого излучения, достигающего сенсора, являются: составляющая, отраженная от земной поверхности; излучение, рассеянное атмосферой непосредственно на сенсор, и диффузное излучение, которое отражается от земной поверхности и рассеивается в атмосфере перед тем, как попасть на сенсор.

Рефракция — это отклонение светового луча от прямого направления, которое приводит к искажению изображения. Рефракция проявляется, если предмет рассматривать через стекло или прозрачную воду. Рефракция также проявляется в атмосфере, когда свет проходит через атмосферные слои, прозрачность, влажность или температура которых меняется, поскольку эти вариации влияют на плотность атмосферного воздуха, которая, в свою очередь, является причиной отклонения световых лучей, когда они попадают на границу слоя с другой плотностью.

Абсорбция происходит в случае, если атмосфера поглощает энергию излучения, проходящего через атмосферу (и затем излучает ее снова на более низкой частоте). Абсорбция солнечного излучения в атмосфере почти полностью обусловлена взаимодействием излучения с озоном (O_3), кислородом (O_2), углекислым газом (CO_2) и парами воды (H_2O). Озон образуется при взаимодействии ультрафиолетового излучения с молекулами кислорода в стратосфере на высоте 20–30 км. Хотя естественная концентрация озона очень низка, он играет важную роль в энергетическом балансе Земли. Поглощение коротковолнового излучения с высокой энергией в ультрафиолетовом диапазоне (длина волны меньше 2,4 мкм) препятствует его передаче в нижние слои атмосферы.

Углекислый газ присутствует в низких концентрациях в основном в нижних слоях атмосферы. Исключая локальные вариации, вызванные вулканическими извержениями и деятельностью человека, распределение углекислого газа в атмосфере более или менее постоянно. Углекислый газ активно поглощает излучение среднего и дальнего ИК-спектра. В наибольшей степени абсорбция проявляется в области 13–17,5 мкм среднего ИК-диапазона. Наконец, водяной пар присутствует в нижних слоях атмосферы (до высоты 100 км), но его концентрация зависит от места на поверхности Земли и времени. Его влияние практически неощутимо в пустынном сухом климате, но существенно во влажном гумидном. Две наиболее важные области абсорбции — это 5,5–7 мкм и больше 27 мкм, в которых абсорбция может достигать 80 %, если атмосфера содержит достаточное количество водяного пара.

Таким образом, земная атмосфера не является полностью прозрачной, абсорбция атмосферных газов создает препятствия для распространения излучения с определенными длинами волн.

² Г.Г. Райкунов, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина

Приведенные в табл. 1.2 длины волн, которые сравнительно мало поддаются абсорбции, принято называть атмосферными «окнами». Эти длины волн, очевидно, имеют большое значение для ДЗ, поскольку только они могут использоваться для формирования дистанционных изображений. Существуют другие, более узкие окна, которые не приведены в таблице.

Таблица	1.2.	Основные	атмосферные	«окна»,	пропускающие	солнечное	ИЗ-
			лучен	ие			

Диапазон излучения	Основные атмосферные окна
Ультрафиолетовый и видимый	0,30-0,75 мкм; 0,77-0,91 мкм
Ближний инфракрасный	1,55–1,75 мкм; 2,05–2,4 мкм
Дальний инфракрасный	3,5-4,1 мкм
Тепловой инфракрасный	8,0-9,2 мкм; 10,2-12,4 мкм
Микроволновый	7,5-11,5 мм; более 20,0 мм

Для относительно коротких длин волн видимого и ближнего ИК-диапазона (менее 4 мкм) излучение (осредненные значения для всей Земли) взаимодействует с атмосферой следующим образом: поглощается озоном — 3 %; отражается от облаков — 25 %; поглощается пылью и газами — 19 %; поглощается земной поверхностью — 45 %; отражается от поверхности Земли — 8%. Максимум энергии Солнца, температура поверхности которого составляет 6000 К, приходится на длину волны примерно 0,5 мкм. Максимум собственного излучения Земли находится около 10 мкм, в тепловом ИК-диапазоне. Собственное излучение Земли взаимодействует с атмосферой следующим образом: нагретый у поверхности Земли теплый воздух поднимется в верхние слои атмосферы — 6 %; потери из-за испарения влаги в почве, водоемах и растительности – 14 %; излучается в атмосферу — 80 %. Поскольку излучение дальнего ИК-диапазона активно поглощается атмосферными газами, большая часть отраженной энергии (временно) задерживается атмосферой. Из общего количества только около 9% излучения проходит через атмосферные окна 8-13 мкм, другая часть снова возвращается на Землю, повышая таким образом ее температуру. Интерес для ДЗЗ представляет энергия, которая проходит через

18

атмосферные окна, поскольку только несущее ее излучение содержит полезную информацию о радиометрических свойствах земной поверхности.

В зависимости от длины волны используемого излучения в ДЗЗ традиционно применяется один из трех типов аппаратуры. Первый тип регистрирует солнечное излучение, отраженное от земной поверхности, обычно применяется излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Таким образом могут быть получены данные о большинстве радиометрических параметров земной поверхности. Второй тип аппаратуры регистрирует собственное (эмитируемое) излучение Земли. Поскольку эмитируемое излучение полностью находится в дальнем инфракрасном диапазоне, необходимы специальные сенсоры для регистрации такого «пассивного» излучения; в этом диапазоне могут быть получены данные о тепловых свойствах земной поверхности, растительности, геотермальных источниках энергии, искусственных объектах, лесных пожарах и т. д. Наконец, третий тип аппаратуры генерирует собственное излучение и регистрирует отражение этого излучения от земной поверхности. Такие «активные» сенсоры не зависят от солнечного или собственного излучения Земли. Радары и лидары, находясь на борту самолета или спутника, посылают к поверхности Земли собственное излучение, а затем регистрируют его отражение в форме изображения.

1.1.3. Электромагнитные свойства горных пород

Основой применения МДЗЗ в геолого-прогнозных исследованиях является изучение взаимодействия электромагнитного излучения с минералами и горными породами, образующими поверхность Земли. В этом разделе приводятся некоторые общие результаты по распространенным типам пород и почв для основных диапазонов длин волн — видимого и ближнего инфракрасного (0,4–2,5 мкм) и теплового (8–14 мкм) [23].

Поскольку породы состоят из минералов, спектры пород можно интерпретировать на основе спектров входящих в них минералов. Минералы, в свою очередь, представлены различными пропорциями составляющих их элементов, молекулы которых связаны разными типами межатомных связей. Электронные переходы внутри атомов требуют гораздо больших затрат энергии, чем колебания самих молекул, поэтому первые характеризуются короткими длинами волн, соответствующими видимому диапазону, в то время как для последних характерны колебания большей длины волны, соответствующие инфракрасному диапазону. В общем случае существует определенное перекрытие между диапазонами излучения характерного для этих двух фундаментальных физических процессов.

Наиболее частыми компонентами пород и минералов, которые их составляют, являются кремний и алюминий вместе с железом, магнием, кальцием, натрием и калием, соотношения которых варьируются в широких пределах. Атомы кислорода, кремния и алюминия имеют электронные оболочки, энергетические уровни которых таковы, что переходы между ними производят малый эффект (или вообще не эффективны) для видимого или ближнего инфракрасного диапазона. Здесь спектры минералов подавляются эффектами некоторых менее характерных ионов и спектрами молекулярных структур, в которые они связаны.

Характерные энергетические уровни изолированных элементов изменяются, когда они соседствуют в минералах, поскольку изменяются валентные состояния их ионов, типы связей и их взаимодействия с другими ионами. Для многих металлов могут существовать ионы с различными валентностями — железо, медь, никель, хром, кобальт, марганец, ванадий, титан и скандий демонстрируют электронные переходы в широком диапазоне спектра. Поскольку железо встречается гораздо чаще прочих металлов, его эффект является наиболее общим и наиболее заметным.

Спектры отражения железосодержащих минералов определяются переходами электронов в ионах железа (Fe²⁺). Влияние ионов железа в разных диапазонах связано с различиями в симметрии, степени искажений кристаллической решетки и относительным положением ионов железа в различных минералах. Уменьшение отражения указывает на поглощение энергии, происходящее в разных частях спектра, причиной которого являются переходы электронов в отдельных ионах.

Другой тип электронных переходов связан с присутствием в ионах металлов электронов, которые имеют энергию, достаточную для того, чтобы не быть прикрепленными к одному определенному иону и поэтому могут перемещаться от одного иона к другому. Это свойство объясняет высокую электронную проводимость металлов. Такие переходы, связанные с переносом зарядов, могут возникать в минералах. Они также индуцируются электронами с энергиями в узком спектральном диапазоне около 0,9 мкм, приводя в этом диапазоне к уменьшению отражательной способности.

Наиболее общие эффекты переноса зарядов связаны с миграцией электронов между атомами железа и кислорода, что проявляется в виде Fe–O-перехода, соответствующего длинам волн короче 0,55 мкм. Этот эффект переноса заряда является общим для всех железосодержащих минералов и отвечает за уменьшение их отражающей способности в синей части спектра. Наибольший эффект заметен для оксидов железа и служит объяснением того, почему содержащие их минералы и породы часто являются желтыми, оранжевыми или красными.

Для видимой и ближней инфракрасной частей спектра наиболее важные колебательные переходы в минералах ассоциируются с ионами гидроксила (OH⁻) или молекулами воды, которые или связаны в минеральной структуре, или представлены во флюидных включениях. Молекула воды имеет три основных колебательных перехода, которые определяются присутствием H–O–H-связей. Это объясняет спектральные минимумы в диапазонах 3,11 и 2,9 мкм, а также спад после 6,08 мкм. Из-за интерференции гармоник эти минимумы проявляются как уменьшение отражательной способности на длинах волн 1,9; 1,4; 1,14 и 0,94 мкм. Эти характерные спектры являются диагностирующими для определения присутствия воды в минералах.

Многие силикаты содержат ионы гидроксила, для которых существует только один основной переход в диапазоне 2,7 мкм. Он может формировать гармоники в комбинации с другими основными переходами, наиболее важными из которых являются основные переходы Mg-OH и Al-OH, которые продуцируют участки поглощения в спектре около 2,3 и 2,2 мкм соответственно. Такие участки присутствуют в спектрах минералов, образующих слюды и глины. Аналогичные длины волн характерны для колебательных переходов и гармоник карбонатных минералов. Они являются производными C-O связи иона CO_3^{2-} . Участки поглощения продуцируются на длинах волн около 1,9; 2,0; 2,16; 2,35 и 2,55 мкм.

Минимум в спектре для кварца для длин волн 8–9 мкм возникает благодаря связи Si–O. Аналогичные минимумы наблюдаются и у других силикатов. Наиболее важной характеристикой этой части спектра является то, что участки, соответствующие главному минимуму, сдвигаются в соответствии с типом структуры силиката. Кроме того, существует характерный пик на краю минимума, соответствующий короткой длине волны. Частичное объяснение этого — то, что в различных силикатах SiO₄ атом кислорода связывается несколькими способами. Важным является сдвиг коротковолнового пика и главного минимума в сторону более длинных волн, что соответствует переходу от фельзических минералов к мафическим.

В этих областях спектра различные колебательные переходы в породах, не относящихся к силикатам, продуцируют спектры, отличные от силикатных пород. Наиболее важные из отличий обусловлены карбонатами и оксидами железа, спектры которых настолько различаются, что даже небольшие количества этих минералов в преимущественно силикатных породах радикально меняют спектр последних. Действительно, известняки и железистые минералы легко различимы между собой и отличаются от силикатов в этой части спектра.

1.1.4. Общие характеристики систем ДЗЗ

Аппаратура ДЗЗ, используемая для получения данных, сконструирована для той или иной цели и должна удовлетворять ряду требований к ее параметрам. Основными параметрами обычно являются следующие [3]:

- пространственное разрешение (т.е. разрешение на местности);
- радиометрическое разрешение (т.е. число градаций яркости);
- количество спектральных каналов;
- периодичность обзора (период повторений съемки);
- ширина спектральной области съемки;
- ширина полосы обзора бортового прибора.

Возможности и особенности функционирования систем ДЗЗ определяются носителями съемочной аппаратуры, собственно аппаратурой ДЗЗ, бортовыми средствами передачи данных по радиоканалу и наземными комплексами приема информации и передачи ее потребителям.

Носители съемочной аппаратуры определяют такие характеристики ДЗЗ как высота съемки и периодичность обзора. Для космических съемок обычно используются два основных типа спутников: геостационарные и полярноорбитальные. Геостационарные спутники постоянно обеспечивают обзор одной и той же части Земли, сохраняя неизменное положение относительно определенной точки на экваторе на расстоянии примерно 36 тыс. км от Земли. Зона обзора со спутника на геостационарной орбите ограничивается широтным районом примерно 50°СШ–50°ЮШ. Полярноорбитальные спутники находятся на орбите высотой около 1000 км, плоскость орбиты примерно перпендикулярна плоскости вращения Земли. Такие спутники оказываются над заданным районом наблюдения каждый раз через определенный период времени, продолжительность которого зависит от ширины полосы обзора спутника. Если движение такого спутника по орбите не синхронизировано с вращением Земли, спутник может оказаться над одним и тем же районом, когда солнце будет находиться на разной высоте над горизонтом. Поскольку сопоставление данных, полученных при различных условиях солнечного освещения, оказывается затруднительным, полярноорбитальные спутники часто выводятся на солнечносинхронные орбиты, на которых движение спутника по орбите синхронизировано с вращением Земли, а поворот плоскости орбиты — с вращением Земли вокруг Солнца. Для солнечносинхронных орбит угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце остается примерно постоянным, и съемка каждого района наблюдения будет осуществляться в одно и то же местное время. Многие системы ДЗЗ, включая Landsat, AVHRR и SPOT – французский спутник (Satellite Pour l'Observation de la Terre), выведены на солнечно-синхронные орбиты.

Одной из важнейших характеристик спутниковых систем, работающих на полярных орбитах, является периодичность съемки одних и тех же областей земной поверхности. Для аппаратуры с фиксированным направлением оси съемки (в надир) период повторяемости съемки зависит только от параметров орбиты. Если на орбите находится несколько подобных систем (как в случае Landsat TM), частоту съемки можно увеличить. Некоторые ИСЗ оснащены управляемой оптической системой, ось съемки которой может смещаться в сторону от трассы спутника, благодаря чему такие спутники могут вести съемку одного и того же участка с соседних витков. Например, для аппаратуры SPOT этот угол составляет ±26° от надира. Другие ИСЗ могут отклонять ось съемки и вдоль трассы спутника. Используя эту возможность, аппаратура высокого разрешения Ikonos и QuickBird позволяет получать стереопару снимков с интервалом в несколько минут, хотя период повторяемости съемки у этих спутников составляет 1-3 сут.

Поскольку один датчик не позволяет провести все необходимые измерения, для научных исследований используются наборы данных, полученных от разных систем ДЗЗ. Одним из способов получения таких наборов является использование группировки спутников, которые должны вращаться по одной и той же орбите с небольшим отставанием друг от друга. Примером такой группировки являются спутники NASA: Lansat-7, EO-1 (1 мин задержки), Terra (15 мин) и аргентинский спутник SAC-C (30 мин). Благодаря небольшому временному интервалу между съемками удается минимизировать влияние временны́х изменений (особенно в атмосфере) и существенно упростить анализ данных (хотя для сохранения группировки необходимо постоянно проводить коррекцию спутниковых орбит).

Установленная на спутнике съемочная аппаратура ДЗЗ работает в четырех основных диапазонах [3]: ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и микроволновом (таблица 1.1), поскольку только в этих областях спектра земная атмосфера прозрачна для электромагнитных волн. В видимом диапазоне датчики (фотоэлементы, матрицы приборов с зарядовой связью и т.п.) регистрируют отраженное от земной поверхности и прошедшее через атмосферу солнечное излучение; в инфракрасном диапазоне преобладает собственное тепловое излучение поверхности Земли; в микроволновом диапазоне используют собственное излучение планеты либо отраженные сигналы собственных источников облучения, установленных на борту ИСЗ. Возможности аппаратуры дистанционного зондирования в различных спектральных диапазонах существенно различаются. Съемки в оптическом диапазоне дают привычные для наблюдателя цветные изображения с высоким пространственным разрешением, которые синтезируются из нескольких монохроматических снимков. Инфракрасная съемка, если она проведена в темное время суток, дает температурные аномалии поверхности. Результаты зондирования в микроволновом диапазоне обычно не зависят от погоды и облачного покрова.

Важнейшими характеристиками формируемого изображения являются пространственная и радиометрическая (температурная) разрешающие способности съемочной аппаратуры. Пространственное разрешение можно представить как физический размер участка на поверхности Земли, соответствующий одному пикселю сенсора. Радиометрическая разрешающая способность определяется шириной динамического диапазона используемого датчика, то есть количеством уровней яркости, которое способен записать датчик. Так, для аппаратуры AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer — усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения), применяемой на спутниках серии NOAA, пространственное разрешение (физический размер одного пикселя на поверхности Земли) составляет около 1 км, а радиометрический диапазон соответствует 1024 уровням яркости.

Пространственное и радиометрическое разрешение аппаратуры вместе с шириной полосы, в которой проводится съемка, скоростью спутника и общим числом монохроматических каналов определяют скорость передаваемого на Землю информационного потока, который может быть большим и достигать десятков и сотен Мбит/с. В свою очередь, необходимая для передачи этого информационного потока ширина полосы пропускания радиоканала зависит от энергетических характеристик передающего (бортового) комплекса. Пропускная способность канала связи возрастает с увеличением мощности бортового передатчика, диаметра приемной антенны наземного комплекса и с уменьшением расстояния до ИСЗ.

1.1.5. Общие характеристики сенсоров

Основные спектральные диапазоны, которые применяются в ДЗЗ, перечислены в табл. 1.1. Атмосфера в этих диапазонах полностью или частично прозрачна для электромагнитного излучения, поэтому именно для этих диапазонов разработаны эффективные сенсоры (датчики). Вне окон прозрачности излучение поглощается различными составляющими атмосферы, такими как пары воды и двуокись углерода. Микроволновые датчики и радары способны регистрировать излучение через облака, туман и дождь [24].

При пассивном методе ДЗ измеряется отраженное солнечное излучение и собственное излучение земной поверхности. В видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной частях спектра (0,4–3 мкм) преобладает отраженное солнечное излучение. Средневолновая зона является переходной. При длине волны, большей 5 мкм, доминирует собственное тепловое излучение Земли. Собственное излучение можно регистрировать и в микроволновом диапазоне.

При активном методе ДЗ применяются искусственные источники излучения, которые позволяют получить информацию о поверхности Земли и атмосфере. В микроволновом диапазоне используется технология радаров с синтезированной апертурой, для которой генерируется сканирующее излучение и затем регистрируется излучение, отраженное от земной поверхности. Пространственное распределение параметров восстанавливается по амплитуде и фазе отраженного сигнала.

Большинство оптических систем ДЗЗ являются мультиспектральными, т.е. они могут получать изображения в нескольких диапазонах спектра. Такие снимки содержат гораздо больше информации о спектральных свойствах объектов, чем снимки в одном узком диапазоне или панхроматические снимки, которые регистрируют сигнал, соответствующий нескольким спектральным диапазонам. Часто используют комбинации снимков, полученных в разных спектральных диапазонах различными съемочными системами. Данные, полученные в видимой части спектра, могут комбинироваться с тепловыми данными или данными радарной съемки, гиперспектральные данные могут комбинироваться с данными аэрофотосъемки и т. д.

Для каждого типа сканирующей системы полный угол сканирования поперек маршрута съемки называется углом обзора, а соответствующее расстояние на поверхности Земли — шириной полосы охвата. Изображение земной поверхности формируется датчиком в результате регистрации отраженного солнечного излучения и преобразуется в целочисленное значение, которое сохраняется как значение определенного пикселя изображения. Данные хранятся в двоичной форме, поэтому чем больше максимальное значение, которое может храниться, тем точнее дискретный сигнал аппроксимирует исходный непрерывный сигнал и тем выше радиометрическая разрешающая способность детектора. Например, в датчиках SPOT и TM для хранения данных каждого пикселя отводится 8 бит, в датчиках AVHRR — 10, а в мультиспектральных датчиках, таких как MODIS, — 12 бит на пиксель.

Расположение диапазонов съемки в спектре определяется окнами поглощения атмосферы и спектральными характеристиками отражения объектов исследования. Если датчик предназначен для съемки земной поверхности или поверхности океана, его спектральный диапазон должен находиться вне атмосферных окон поглощения. Если задача состоит в изучении атмосферы, то некоторые каналы съемки должны быть выбраны именно в пределах поглощающих диапазонов. Примером аппаратуры, предназначенной для исследования земной поверхности, океана и атмосферы, является MODIS, многочисленные датчики которой ведут съемку во многих спектральных диапазонах.

1.2. Мульти- и гиперспектральные данные

Современная эра исследования Земли из космоса началась 1 июля 1972 г., когда спутник Landsat 1, оснащенный сенсором MSS (Multispectral Scanner System — Мультиспектральная сканирующая система), был выведен на околоземную орбиту. Сенсор имел 4 спектральных канала, каждый шириной около 100 нм, разрешение около 80 м, большую площадь обзора с размерами 185×185 км, повторяемость данных каждые 18 дней и, что особенно важно, поставлял данные непосредственно в цифровой форме. Тогда же, в начале 70-х гг. прошлого века, усилиями организаций, таких как National Aeronautic and Space Administration (NASA — Национальное аэрокосмическое агентство, США), Jet Propulsion Laboratory (JPL — Лаборатория реактивного движения, США), U.S. Geological Survey (USGS — Американская геологическая служба), Environmental Research Institute of Michigan (ERIM — Экологический научно-иследовательский центр, Мичиган, США), были заложены физические модели и разработаны основанные на них методы обработки мультиспектральных данных, которые развиваются и совершенствуются сегодня [31].

С 1972 г. были запущены четыре сенсора MSS (Multispectral Scanner System — мультиспектральная сканирующая система) серии Landsat, два ТМ (Thematic Mapper — тематический картограф) и ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus — усовершенствованный тематический картограф), пять систем высокого разрешения SPOT, система высокого разрешения AVHRR, несколько систем низкого разрешения EOS (Earth Observing System система наблюдения Земли) Тегга и Aqua и большое количество других аэро- и космических систем. В настоящее время большое количество стран, включая Канаду, Индию, Израиль, Аргентину, Бразилию, Японию, Китай, Южную Корею, Тайвань, и ряд космические агентств, таких как ESA (European Space Agency — Европейское космическое агентство), располагают собственными космическими системами. Все действующие сегодня сенсоры имеют, по крайней мере, 4-8 каналов в разных диапазонах спектра и, таким образом, являются мультиспектральными системами.

Распределение каналов мультиспектральных сенсоров по частотным диапазонам связано с «окнами» прозрачности в атмосфере. В табл. 1.1 приведены основные спектральные области (и их сокращенные обозначения), используемые для мультиспектральных исследований. Границы атмосферных «окон» в некоторой степени условны и варьируются в различных источниках [5]. Гиперспектральные сенсоры обычно покрывают один непрерывный диапазон (например, 0,4–2,5 мкм) большим количеством (например, 242) узких спектральных каналов.

Сенсоры, которые принято называть гиперспектральными, имеют сотни спектральных каналов и сравнительно высокое пространственное разрешение. Наиболее перспективные аэросенсоры AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer — бортовой спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов) и HyMap (Hyperspectral scanner — гиперспектральный сканер) имеют спектральные каналы шириной около 10 нм в частотном диапазоне 400–2400 нм и пространственное разрешение 10–30 м. Сенсор Нурегіоп (гиперспектральная съемочная система), выведенный на орбиту по программе NASA EO-1, имеет близкие спектральные характеристики и пространственное разрешение 30 м. Другие действующие спектрометры, такие как MEDIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer — спектрометр среднего разрешения) или MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer — спектрометр умеренного разрешения), имеют меньшее количество спектральных каналов.

Примеры изображений, полученных со сканеров Hyperion и Landsat ETM+, приведены на рис. 1.1. Для визуализации первичных мульти- и гиперспектральных данных традиционно используют комбинации некоторых выделенных каналов. Если не преследуются специальные цели, для видимого (V), ближнего инфракрасного (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазонов принято использовать комбинации каналов в «естественных цветах», которые имеют следующие условные сокращения: NC (Natural Color), CIR (Color IR) и CSWIR (Color SWIR). Эти комбинации приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Комбинации каналов в «естественных цветах», традиционно используемые для визуализации мульти- и гиперспектральных данных: NC (Natural Color), CIR (Color IR), CSWIR (Color SWIR)

Сенсор	Сенсор NC CIR		CSWIR	
AVIRIS	30:20:9	45:30:20	204 : 150 : 93	
Hyperion	30:21:10	43:30:21	204 : 150 : 93	
TM, ETM+	3:2:1	4:3:2	5:4:3	

Комбинацию каналов NC иногда называют «true color», поскольку эта комбинация наиболее привычна для человека. Комбинация каналов CIR — это представление, которое было принято для традиционных цветных фотоизображений в инфракрасном диапазоне. Растительность на них представлялась красным цветом, поскольку она относительно хорошо отражает излучение в NIR. Специалисты, имеющие опыт интерпретации фотоотпечатков, продолжают использовать эту комбинацию каналов. Комбинация каналов CSWIR часто используется для SWIR-диапазона. Примеры изображений на рис. 1.1 (и рисунках, приведенных далее) основаны именно на этих комбинациях спектральных каналов.

Появление мультиспектральных сенсоров заставило по-другому взглянуть на обработку дистанционных данных. Традици-



Рис. 1.1. Фрагменты изображений, полученных со сканеров Hyperion и Landsat ETM+. Представлены традиционные комбинации каналов для видимого и ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного диапазонов: *a*) 30:21:10; *б*) 43:30:21; *в*) 204:150:93 для фрагмента Hyperion (Tonopah, Nevada) и *г*) 4:3:2 для фрагмента Landsat ETM+ (Nevada)

онный подход к интерпретации данных дистанционного зондирования ориентирован на визуализацию изображения и выделение пространственных отношений объектов, которое видит человек. Он возник на основе анализа аэрофотографий, на которых фотоинтерпретатор находил интересующие его объекты. Это могли быть военные объекты, границы раздела геологических структур или другие объекты, различающиеся по тону. Интерпретатор использовал увеличение фотографии или ее стереоизображение для того, чтобы перенести интересующие его объекты на карту. Сегодня общей целью этого подхода стало собственно создание карты определенного района по заданной тематике; компьютерные программы, разработанные на его основе, стали основой развития ГИС [7].

Сравнительно недавно возник новый подход к интерпретации, ориентированный непосредственно на данные. В этом случае специалиста интересуют не только пространственные отношения между объектами, видимые на изображении визуально, но, возможно, и другие отношения, которые могут быть извлечены из многомерных данных при помощи математической обработки. Если традиционный подход является в основном качественным, т. е. интерпретатор использует только сравнительные яркости объектов в пределах изображения, подход, ориентированный на данные, стремится оперировать с количественными, абсолютными значениями яркостей.

Используя математические модели, основанные на физике взаимодействия излучения с поверхностью Земли, специалист может получить гораздо более полную информацию об интересующих его объектах. В итоге там, где при традиционном подходе интерпретатор видит только границу раздела геологических структур и пород, новый подход, в принципе, позволяет определить их литологический состав. В то же время использование реальных физических моделей приводит к тому, что процедуры обработки данных становятся значительно более сложными. Так, становится необходимой тщательная абсолютная и относительная радиометрическая коррекция и калибровка сенсоров и регистрируемых ими яркостей.

Диапазоны спектральных областей, используемые при сканировании (табл. 1.2), являются относительно прозрачными атмосферными «окнами», через которые земная поверхность видна из космоса, поэтому излучение в этих диапазонах может эффективно регистрироваться. Между этими окнами излучение поглощается и рассеивается земной атмосферой. Например, водяной пар и углекислый газ «ответственны» за непрозрачность атмосферы в спектральных областях 2,5–3 мкм и 5–8 мкм. Спектр солнечного излучения за пределами атмосферы и на уровне моря приведен на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Примерный спектр солнечного излучения за пределами атмосферы и на уровне моря [26]

Другим важным фактором является учет собственного излучения, эмитируемого земной поверхностью. Если V, NIR и SWIR диапазоны считаются областями, которые используют только отраженное излучение, поскольку для них поток энергии излучения, отраженной от земной поверхности, намного превышает энергию, эмитируемую земными объектами и атмосферой, то MWIR (Mid Wave InfraRed — средний инфракрасный диапазон) является переходной зоной от отраженного к эмитируемому тепловому излучению. Для TIR диапазона, если длина волны регистрируемого излучения больше 5 мкм, эмитируемое тепловое излучение превышает поток излучения, отраженного от земной поверхности, поэтому обработки данных в этом диапазоне имеют ярко выраженную специфику.

Поскольку интенсивность отраженного и эмитированного излучения в различных спектральных диапазонах для различных материалов различна, мы можем сравнить спектры известных материалов со спектрами исследуемых объектов. Во многих случаях такая идентификация возможна, но существует ряд ограничений, главными из которых являются следующие:

- широкие естественные вариации спектров природных материалов;
- низкое спектральное разрешение большинства спектральных систем;
- изменение спектрального состава излучения при прохождении его через атмосферу.

Спектр любого материала зависит от условий, в которых производится измерение. Спектр минерала не только меняется от образца к образцу, но и зависит, например, от его влажности. Таким образом, невозможно точно воспроизвести определение спектра в лабораторных условиях. Но даже если определять спектры образцов в поле, спектр, полученный аэро- или космическим сканером, зависит от состояния атмосферы, положения каждого участка съемки по отношению к сканеру (топография участка) и калибровки самого сенсора, который принимает и записывает оптическое излучение.

Таким образом, даже используя модели, базирующиеся на физике взаимодействия излучения с поверхностью Земли, обработка гиперспектральных данных во многом основывается на опыте интерпретатора, благодаря которому все же возможно получать корректные результаты для конкретных условий съемки.

1.2.1. Мультиспектральные системы

Наиболее часто для ДЗЗ используются видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра [24]. В этих диапазонах находится максимум солнечной энергии и, кроме того, аппаратура, которая может функционировать в этих диапазонах, легко доступна. Применяются электрооптические сенсоры, которые преобразуют излучение в электрический сигнал, или фотографические, которые регистрируют изображение с помощью химических процессов. Сенсоры измеряют интенсивность отраженной от изучаемой поверхности электромагнитной волны в различных частях спектра (и излучение, рассеянное атмосферой на пути к этой поверхности). Поскольку на отражение влияют физические свойства поверхности, такие как угол наклона, радиометрические и спектральные характеристики поверхности, можно оценить физические и, в некоторых случаях, химические свойства отражающей поверхности. Для этого применяются данные фотографических (панхром), мультиспектральных и гиперспектральных пассивных сенсоров, использующих естественное излучение. Данные, получаемые при помощи оптических систем, имеют высокое пространственное разрешение и используются при решении большого числа геологических задач, таких как геологическое картирование, поиски полезных ископаемых и углеводородов. Однако область применимости оптических датчиков несколько ограничена тем, что получение качественных оптических снимков возможно только на освещенной части земной поверхности в ясную, безоблачную погоду.

Фотосъемка — наиболее старый из ныне существующих методов ДЗЗ. Несмотря на то, что множество новых методов стали использоваться с 1858 года, когда было сделано первое фото, аэрофотография все еще имеет много областей применения. Фотография использует видимую и ближнюю инфракрасную области спектра для того, чтобы сформировать двумерное изображение целевой области.

В настоящее время продолжает использоваться широкий диапазон бортовых аэрокамер [5]. Типичная камера имеет формат 230×230 мм, фокусное расстояние 150 мм, пространственное разрешение 50 лин/мм. При высоте полета самолета около 3000 м такая камера имеет покрытие 4,6 км на 4,6 км и разрешение около 0,2 м. Это разрешение эквивалентно разрешению карты масштаба 1 : 500, а точность определения высоты составляет 3 м. Бортовая камера делает обычно до 500 снимков, которые могут быть проявлены сразу после завершения полета. Такие характеристики наряду с дешевизной использования позволяют применять бортовые камеры для решения многих задач.

Космические фотосъемки сопряжены с несколько большими трудностями. Сегодня фотокамеры широко используются только на космических станциях, где решен вопрос о передаче данных на землю. Когда для массовых съемок применялись фотосистемы, они также должны были возвращать отснятые фотоматериалы на землю. Сегодня для массовых съемок применяются электрооптические системы, которые передают данные на наземную станцию приема по радиоканалу.

Электрооптические системы преобразуют излучение от объектов наблюдения в электрический сигнал, который может быть усилен, передан как радиосигнал и обработан средствами вычислительной техники. По этой причине они широко применяются для массовых съемок с искусственных спутников Земли, причем большая часть аппаратуры используется для съемки одновременно в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. В отличие, например, от зондирующих систем, которые получают единичные замеры излучения, сенсоры получают двумерные изображения заданного района, которые имеют много общего с аэрофотографиями. Электрооптические

3 Г.Г. Райкунов, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина

системы широко используются как на аэро-, так и на космических платформах.

Для систем изучения природных ресурсов [3] в качестве основных датчиков дистанционного зондирования применяются оптические камеры, обеспечивающие высокое (менее 100 м) пространственное разрешение получаемых снимков в полосе обзора около 100 км. Можно выделить три основных типа оптических датчиков: телевизионные камеры, оптические камеры с механическим сканированием и оптико-электронные камеры на ПЗС (приборах с зарядовой связью).

Телевизионные системы работают в том же спектральном диапазоне (0,4–0,9 мкм), что и фотографические камеры. Системы такого типа применялись для проведения съемки с высоким пространственным разрешением преимущественно на первых ИСЗ типа Landsat-1. На современных космических аппаратах телевизионные камеры используются редко, в основном для получения изображений со средним разрешением (пример — российский модуль «Природа»).

Преимуществом оптических камер с механическим сканированием по сравнению с телевизионными датчиками является более широкий спектральный диапазон съемки: от ультрафиолетового до теплового инфракрасного (0,3–14 мкм). При этом развертка вдоль строки изображения обеспечивается механическим качающимся или вращающимся зеркалом, а в поперечном направлении — за счет движения спутника. Оптико-механические сканеры использовались, например, на Landsat-4,5 (аппаратура MSS, TM). Основной недостаток устройств такого типа наличие механического сканирующего зеркала, ограничивающего точность географической привязки получаемых изображений и снижающего долговечность и надежность устройства в целом.

В электрооптических камерах на ПЗС элементы с механическим сканированием не используются. Излучение попадает на датчики, которые генерируют электрический сигнал, зависящий от интенсивности излучения. В качестве датчиков обычно применяются полупроводниковые фотодиоды. При попадании фотона на фотодиод через фотодиод начинает протекать ток, который пропорционален интенсивности света. Чтобы получить изображение, необходимо соединить большое количество одноэлементных датчиков или сканировать цель одним датчиком. Когда используется первый вариант, создается набор из нескольких тысяч или более идентичных фотодиодных элементов. Устройства такого типа называют приборами с зарядовой связью (ПЗС). Каждый фотодиодный элемент заряжается до уровня, зависящего от освещенности элемента, затем заряды считываются и формируется изображение. ПЗС могут быть линейными или планарными (плоскими). Последние более компактны, более чувствительны и поэтому применяются чаще. Примером планарного ПЗС служит видикон, который используется в телевизионных камерах.

Когда ПЗС формирует изображение, необходимо время, чтобы определенное количество фотонов попало на датчик. Поскольку датчик находится в движении относительно цели, необходимо, чтобы изображение всегда оставалось резким. В планарном детекторе для этого может применяться пошаговое формирование изображения, когда для того, чтобы скомпенсировать движение платформы, передвигается весь детектор. Другим способом является использование сканирующей системы при неподвижном планарном датчике. Такой способ формирования изображения, называемый датчиком с постоянным сканированием, часто используется в спутниковых системах. Если применяется одноэлементный датчик, может использоваться линейный сканер, который сначала вращается для сканирования строки, а затем передвигается вперед. Такой способ применяется как в аэро-, так и в космических системах. Если датчик неподвижен относительно цели, как в геостационарных спутниках, применяется сканирование, которое обеспечивает построчный охват картинки. Такой метод называется циркулярным сканированием. Полное изображение видимой части Земли обычно получают за 20-50 мин.

Сенсоры видимого диапазона являются наиболее сложными, что связано с большим количеством детекторных элементов, спектральных каналов и оптической системой, которая должна обеспечить высокое разрешение получаемых изображений [24]. Однако существует важное обстоятельство, которое ограничивает возможности космических систем, но не связано со сложностью сенсоров. Рассмотрим, например, сенсор, имеющий 100 (8-битных) каналов, разрешение 25 м и ширину обзора 100 км. Спутник на круговой орбите имеет скорость 7,5 км/с, поэтому количество пикселей, которые должны обрабатываться за секунду, можно вычислить как произведение (100 000/25) × (7 500/25) × 100 = 1,2 × 108. Если каждый пиксель представлен единственным байтом, канал связи спутника должен передавать данные со скоростью примерно 1 Гбайт/с, что значительно превышает возможности существующих радиосистем (если не используется сжатие данных в радиоканале). Таким образом, совершенствование космических систем

35

видимого диапазона сдерживается скоростью передачи данных, а не сложностью инструментальных технологий.

Pecypc-ДK1

Космический комплекс «Ресурс-ДК1» разработан в соответствии с Федеральной космической программой России и выведен на орбиту 15 июня 2006 г. Космический аппарат позволяет получить высокодетальные мультиспектральные изображения земной поверхности с высокими измерительными свойствами: в панхроматическом диапазоне с разрешением не хуже 1 м и в трех узких спектральных диапазонах с разрешением 2–3 м в масштабе времени, близком к реальному. Ширина полосы земной поверхности, снимаемой за один пролет — 27 км. Параметры рабочей орбиты: наклонение орбиты 70°; высота орбиты 567 км; период обращения 94,02 мин. На первый квартал 2012 г. космический аппарат «Ресурс-ДК1» № 1 эксплуатируется уже более 5 лет и обеспечил съемку земной поверхности площадью более 72 млн км².

Канопус-В

Российский спутник дистанционного зондирования Земли запущен 22 июля 2012 г., 30 октября 2012 г. окончены летные испытания и КА принят в эксплуатацию. Спутник выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 510–540 км и наклонением 98°. При высоте 510 км ширина полосы обзора составляет более 20 км. Производительность съемки более 2 млн кв. км/сут. Периодичность съемки — 5 сут [4].

Режимы съемки. Панхроматический: спектральный диапазон 0,52–0,85 мкм; пространственное разрешение (в надире) 2,1 м. Мультиспектральный: спектральные диапазоны (мкм) 0,54–0,60 (зеленый); 0,63–0,69; 0,6–0,72 (красный); 0,75–0,86 (ближний ИК). Пространственное разрешение (в надире) — 10,5 м.

Landsat MSS

Landsat-1 (Landsat Multispectral Scanner) — спутник с мультиспектральной сканирующей системой, первоначально называвшийся ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite One) — первый гражданский спутник дистанционного зондирования Земли. Он был выведен NASA (US National Aeronautics and Space Administration) на орбиту (высотой около 919 км) 23 июня 1972 г. и успешно использовался до января 1978 г. Второй спутник Landsat-2 был выведен на орбиту в январе 1975 г., Landsat-3,
-4 и -5 последовали в 1978, 1982 и 1984 гг. соответственно. Landsat-6 был потерян во время запуска. Последний из спутников серии, Landsat-7, был запущен 15 апреля 1999 г.

Landsat-2 и -3 имели орбиты, аналогичные Landsat-1, но более поздние спутники этой серии располагались на более низких орбитах — 705 км и имели немного измененное наклонение 98,2° (против 99,09° для Landsat-1, -2 и -3). Параметры орбит всех спутников таковы, что имеющаяся на их борту аппаратура может получать снимки земной поверхности в пределах широт 82°N и 82°S. Обзору программы Landsat посвящен специальный выпуск журнала «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing» (Vol. 63, №7, 1997).

Landsat 1–5 несли аппаратуру MSS (Multispectral Scanner), которая, несмотря на то что больше не используется, заслуживает особого упоминания, поскольку существуют большие архивы снимков MSS. MSS имел 4 канала: два канала в видимом зеленом и красном участках спектра (0,5–0,6 мкм и 0,6–0,7 мкм) и два канала в ближнем инфракрасном диапазоне (0,7–0,8 мкм и 0,8–1,1 мкм) соответственно (табл. 1.4).

Канал	Длина волны, мкм
1, Green	0,50-0,60
2, Red	0,60-0,70
3, Red, NIR	0,70-0,80
4, NIR	0,80-1,10

Таблица 1.4. Характеристики каналов аппаратуры Landsat MSS

Эти каналы имели номера 4–7 для Landsat 1–3, так как последние два спутника имели дополнительную аппаратуру — RBV (Return Beam Vidicon), которая обеспечивала каналы 1–3. RBV — аппаратура телевизионного типа, она продуцировала мгновенное изображение сцены на цветочувствительной трубке, а затем сканировала это изображение. Landsat 4–5 не использовали RBV, поэтому MSS каналы получили номера 1–4. Поскольку спутники Landsat 4–5 имели более низкую орбиту по сравнению с Landsat 1–3, оптика MSS была изменена ширина полосы обзора составила 185 км, а размеры пикселя — 79 м на 57 м (соответственно по направлению и перпендикулярно направлению полета).

Аппаратура MSS представляет собой электромагнитный сканер, использующий осциллирующее зеркало, которое отражает полученное изображение на линейку из 6 детекторов (свою для каждого канала), которая регистрирует яркость сцены как 6 последовательно сканируемых линий. Аналоговые сигналы с детекторов дискретизируются и преобразовываются в цифровую форму, после чего передаются на земные станции приема. Поскольку детекторы в процессе эксплуатации станции теряли чувствительность в разной степени, поздние MSS-снимки иногда имеют дефект «6-полос», который необходимо корректировать с помощью специальных методов предварительной обработки изображений.

Изображения, полученные Landsat MSS, собраны с июня 1972 г. по ноябрь 1997 г., когда было получено последнее изображение с MSS. Таким образом, архивы MSS содержат уникальные исторические записи, которые могут быть использованы для изучения изменений, происходящих со временем, таких как рост городов, деградация земель и лесов и др.

Landsat TM

ТМ (Thematic Mapper) — один из комплектов той аппаратуры для дистанционного зондирования, которая находилась на Landsat-4 и Landsat-5. Первый из спутников был снят с орбиты в августе 1993 г. (запущен 16 июля 1982 г.) после выхода из строя системы передачи данных на наземные станции. Второй спутник продолжает работу на орбите, хотя в настоящее время он используется только в режиме непосредственной передачи данных.

Подобно MSS, TM использует фиксированный набор детекторов для каждого канала и осциллирующее зеркало. TM имеет 16 (вместо 6 для MSS) детекторов на канал (исключая тепловой инфракрасный канал), причем сканирование происходит как в прямом, так и в обратном направлениях. Он имеет 7 (по сравнению с 4 для MSS) каналов, перекрывающих видимый, ближний и средний инфракрасный, а также и тепловой инфракрасный диапазоны. Пространственное разрешение TM — 30 м. Тепловой канал использует 4 детектора и имеет пространственное разрешение 120 м. Данные квантуются в диапазон значений 0–255. Таким образом, по спектральному и радиометрическому разрешению TM существенно превосходит MSS.

Аппаратура ТМ имеет следующие каналы (табл. 1.5):

 каналы 1-3 перекрывают видимый диапазон (0,45– 0,52 мкм, 0,52–0,60 мкм и 0,63–0,70 мкм), представляя видимый сине-зеленый, зеленый и красный участки спектра;

- канал 4 находится в ближнем инфракрасном диапазоне (0,75–0,90 мкм);
- каналы 5 и 7 перекрывают средний инфракрасный диапазон (1,55–1,75 мкм, 2,08–2,35 мкм);
- канал 6 находится в тепловом инфракрасном диапазоне (10,4-12,5 мкм).

Номер канала	Длина волны, мкм	Разрешение, м
1, Blue	0,45-0,52	30
2, Green	0,52 - 0,60	30
3, Red	$0,\!63 - \!0,\!69$	30
4, NIR	0,76-0,90	30
5, MIR	1,55-1,75	30
6, TIR	10,40-12,50	120
7, MIR	2,08-2,35	30

Таблица 1.5. Характеристики каналов аппаратуры Landsat TM

Такая «нерегулярная» нумерация каналов — результат того, что канал 2,08–2,35 мкм был добавлен позднее.

Данные с ТМ (размещается на Landsat-4 и Landsat-5) и ETM+, который размещается на Landsat-7, передаются через сеть наземных принимающих станций. Европейские станции расположены возле Fucino (Италия) и Кігипа (Швеция). Данные также передаются через систему спутников TDRS (US Tracking and Data Relay Satellites — американская система спутников слежения и ретрансляции данных), которые находятся на геостационарных орбитах. По крайней мере, один из спутников, входящих в TDRS, всегда находится в поле зрения спутников Landsat-4, -5 и -7. TDRS передает данные на наземную станцию в White Sands (Нью-Мексико), откуда они, при помощи специального коммуникационного спутника DOMSAT, передаются для обработки в Norman (США). Данные ТМ могут быть также переданы на другие приемные станции, расположенные по всему миру. Landsat-5 продолжает поставлять данные на наземные станции приема на протяжении почти 20 лет после того, как он был запущен.

ETM+

Мультиспектральная система сканирующего типа ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) [33], установленная на Landsat, базируется на спутнике Landsat-7, запущенном в апреле 1999 г. По сравнению со своей предшественницей — системой ТМ (Thematic Mapper), которая использовалась на ранних спутниках серии, новая система получила дополнительный панхроматический канал и большее пространственное разрешение для теплового канала. Характеристики сенсора суммированы в табл. 1.6.

Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Пространствен- ное разре- шение, м	Динамиче- ский диапазон, бит
1	0,45-0,52	30	8
2	0,53-0,61	30	8
3	0,63-0,69	30	8
4	0,78-0,90	30	8
5	1,55-1,75	30	8
6	10,40-12,50	60	8
7	2,09-2,35	30	8
8	0,52-0,90	15	8

Таблица 1.6. Основные характеристики сенсора ЕТМ+

Landsat-7 выведен на солнечно-синхронную орбиту с высотой 707 км, наклонением 98,2° и полосой охвата 185 км. Это позволяет спутнику завершать полный цикл сбора данных за 16 дней (233 орбиты), проходя над каждой точкой орбиты примерно в 10 ч 00 мин местного времени. Данные на наземные станции передаются в два потока, суммарная скорость передачи около 150 Мб/с. Первичная станция приема EROS Data Center (EDC) находится в Sioux Falls, Южная Дакота. Изображения могут быть приняты EDC в реальном времени (т.е. непосредственно с сенсоров, без промежуточной записи) или получены с полупроводникового записывающего устройства емкостью 380 Гбит (100 сцен). Поскольку данные для передачи делятся на два потока, один поток может сбрасывать данные реального времени, в то время как другой будет сбрасывать данные с записывающего устройства, или оба потока могут одновременно сбрасывать данные с записывающего устройства. Изображения могут также быть приняты сетью международных приемных станций IGS (International Ground Station Network – Международная сеть наземных приемных станций).

40

Оптика ЕТМ+ аналогична оптике, которая использовалась в ТМ (Thematic Mapper). Сканирующее зеркало перемещает поле зрения оптической системы перпендикулярно траектории движения спутника. Поле сканирования делится на 16 линий растра (32 для панхроматического канала), которые соответствуют массиву из 16 детекторов на спектральный канал (32 детектора для панхроматического канала). Всего существует 6 массивов по 16 детекторов, каждый из которых имеет свой оптический фильтр для выделения излучения своего узкого спектрального канала. Тепловой инфракрасный канал имеет 7-элементный массив. Таким образом, при каждом сканировании 16 строк изображения записываются в каналах, отвечающих видимому и инфракрасному региону, 32 строки изображения записываются в панхроматическом канале и 7 строк — в тепловом инфракрасном канале. Это соответствует полосе, которая имеет ширину $16 \times 30 = 480$ м.

SPOT HRV

Спутник SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre французский спутник для наблюдения поверхности Земли) с аппаратурой HRV (High Resolution Visible – аппаратура высокого разрешения видимого диапазона) работает по программе правительства Франции, Бельгии и Швеции. SPOT управляется FSA (French Space Agency – французское космическое агенство) из центра CNES (Centre National d'Etudes Spatiales — Национальный центр космических исследований Франции), расположенного в Тузузе (Франция). SPOT-1 был запущен 22 февраля 1986 г. и все еще номинально используется. Аппаратура SPOT-1, получившая название HRV (High Resolution Visible), имеет возможность проводить измерения в 3 каналах (0,50-0,59 мкм, 0,61-0,68 мкм и 0,79-0,89 мкм) при пространственном разрешении 20 м или в единственном панхроматическом канале (0,51-0,73 мкм) с пространственным разрешением 10 м. Все каналы дискретизируются в значения 0-255.

Подобно Landsat MSS и TM, аппаратура HRV не использует сканирующее зеркало. Вместо этого детекторы используют линейный массив CCD (ПЗС — приборы с зарядовой связью) таким образом, что пиксели всей сканируемой линии отображаются одновременно. Поскольку движущиеся части в HRV отсутствуют, предполагаемое время жизни системы может быть существенно больше, чем у электромеханических сканеров, размещенных на Landsats 1–7 (хотя все сенсоры Landsats существенно превысили запланированное для них время жизни). Более важно, что все пиксели на сканируемой линии получают данные одновременно, а не последовательно, поэтому каждый индивидуальный ССD-детектор экспонируется более длительное время и, следовательно, каждый пиксель может собрать большее количество фотонов, чем пиксель на электромеханическом сканере (подобном ETM+). Это увеличивает среднее время выдержки, благодаря чему величина сигнала оценивается более аккуратно и изображения HRV имеют более высокое отношение сигнал.

SPOT запущен на солнечно-синхронную орбиту с высотой 832 км, углом наклона 98,7° и периодом 101,5 мин. Угол зрения сенсора HRV составляет 4,13°, а ширина полосы сканирования — 60 км. Одновременно поддерживаются два идентичных HRV инструмента, и если они работают одновременно, общая ширина полосы сканирования достигает 117 км (существует 3-километровая полоса перекрытия, когда оба сенсора направлены в надир).

Период повторения орбиты составляет 26 дней, однако потенциально система имеет более высокие характеристики повторяемости, поскольку наведением сенсоров можно управлять. Сенсор может перемещаться с шагом $0,6^{\circ}$ с максимальным отклонением $\pm 27^{\circ}$ от надира. Это позволяет сенсору собирать данные внутри полосы 475 км с любой стороны от надира. Помимо улучшения характеристик повторяемости сенсора, набор изображений данной области, имеющих наклон, обеспечивает возможность построения цифровой модели местности DEM (Digital Elevation Model). Однако использование отличных от надира точек съемки имеет проблемы, источником которых являются расхождение величин яркости, полученных под разными углами.

Спутник SPOT-1 был демонтирован в конце 1990 г. после успешного запуска SPOT-2 в январе 1990 г. Спутник SPOT-3 был запущен в сентябре 1993 г. Все спутники имели идентичный набор аппаратуры, но для SPOT-3 были откорректированы некоторые ошибки, имевшиеся в оборудовании. В настоящее время SPOT-1 и SPOT-2 выведены из эксплуатации, а 24 марта 1998 г. был успешно запущен SPOT-4. Аппаратура HRV для него была расширена с тем, чтобы обеспечить добавочный канал 20-метрового разрешения в среднем инфракрасном диапазоне (1,58–1,75 мкм). Кроме того, была размещена новая аппаратура, получившая название HRV-IR (High Resolution Visible–Infared сенсор высокого разрешения в видимом и инфракрасном диапазонах). Этот сенсор может быть использован в мультиспектральном режиме (названном X), режиме панхром (названном M) или может использоваться комбинация X и М. Спутник SPOT-4 имеет бортовое устройство записи на магнитную ленту, которое обеспечивает возможность записи и хранения 20 сцен перед тем, как данные будут сброшены на наземную станцию. В мае 2002 г. был запущен SPOT-5. Он несет новый вариант аппаратуры HRG (High Resolution Geometric), новую стереоскопическую аппаратуру HRS (High Resolution Stereoscopic) и аппаратуру Vegetation-2. Возможности новой аппаратуры, включающей расширенный панхроматический канал и 4-канальный мультиспектральный сканер, сведены в табл. 1.7.

Пространственное разрешение HRG 10 м (20 м в коротковолновом инфракрасном SWIR-диапазоне). Панхроматические изображения могут быть получены с пространственным разрешением 5 или 2,5 м (по сравнению с разрешением 10 м для SPOT 1–4). Аппаратура HRS ведет одновременную съемку в двух каналах, под двумя разными углами. Первое изображение имеет наклон в 20° от надира вперед по линии полета, второе изображение наклонено под тем же углом в противоположную сторону. Пространственное разрешение HRS 10 м, а его угол обзора 8°.

Каналы	Диапазон, мкм	Пространственное разрешение			
Капалы		HRG	Vegetation-2	HRS	
Р	0,49-0,69	2,5 или 5		10	
B0	0,43-0,47		1 000		
B1	0,50-0,59	10			
B2	0,61-0,68	10	1 000		
B3	0,79-0,89	10	1 000		
SWIR	1,58-1,75	20	1 000		

Таблица 1.7. Спектральные каналы и пространственное разрешение SPOT-5

Аппаратура HRV спутников SPOT 1–4 получала стереоизображения в 2 стадии. Чтобы получить первое изображение, сенсор HRV наводился в одну или другую сторону от траектории движения спутника. Чтобы получить второе изображение того же участка, съемка проводилась с другой орбиты, снова используя возможности наведения аппаратуры. Недостатки этого двухстадийного подхода состоят в том, что условия видимости поверхности и сама поверхность могут изменяться в период между датами получения первого и второго изображений, создавая определенные проблемы при обработке изображений и понижая качество цифровой модели рельефа, которая строится на основе стереопары.

Аппаратура HRS получает 2 изображения под разными углами одновременно. ASTER сенсор (см. далее) использует другую систему для получения стереопары: одновременно получается 2 изображения, одно из которых направлено в надир, а другое в сторону, противоположную движению спутника. Относительная (внутри изображения) точность оценки высот, проводимая по HRS стереопарам, составляет 5–10 м, а абсолютная (сравниваемая с наземными наблюдениями) точность составляет 10–15 м. Это дает возможность составления DEM-моделей для карт масштаба от 1 : 50 000.

Аппаратура HRG получает панхроматические изображения с разрешением 2,5 или 5 м. Физическое разрешение сенсора 5 м, но разрешение 2,5 м получается при помощи техники предварительной обработки изображения, которую компания SPOT Image называет «Supermode». Поскольку HRG имеет 2 CCD-сенсора, в этом режиме каждый из них получает одно и то же изображение, которые смещены относительно друг друга на половину пикселя в вертикальном и горизонтальном направлениях. Новое изображение с разрешением 2,5 м получается из этих изображений и их интерполяций с последующей фильтрацией.

SPOT VGT

Спутники SPOT-4 и SPOT-5 несут новый сенсор VGT (Vegetation-2), который использует те же диапазоны наблюдения, что и HRV-IR, за исключением того, что ширина полосы его наблюдения составляет 2 250 км, соответствуя углу зрения 101°, а величина пикселя в надире составляет 1 км. Этот режим наблюдения называется «direct» (или «regional»). «Recording» (или «word-wide») режим продуцирует данные со средним размером пикселя около 4 км. В этом режиме VGT позволяет съемку земной поверхности между широтами 60°N и 40°S.

Период повторяемости орбит, равный 14 дням, дает возможность ежедневно покрывать съемкой районы, расположенные севернее 35°N, в то время как экваториальные области могут быть покрыты съемкой только раз в несколько дней. Комбинация VGT и HRV-IR-сенсоров на одной платформе позволяет получать одновременно данные с существенно различным пространственным разрешением. Таким образом, данные VGT дополняют данные, получаемые NOAA AVHRR, которые широко используются для получения глобальных массивов данных, покрывающих Землю в целом. Аппаратура VGT имеет некоторые преимущества для приложений, изучающих поверхность суши. Обладая тремя спектральными каналами в оптическом диапазоне и одним в инфракрасной части спектра, VGT имеет возможности, сравнимые с аппаратурой MODIS, которая устанавливается на спутниках Terra и Aqua.

SPOT-5 — вероятно, последний спутник в этой серии, окончание его миссии планировалось на конец 2007 г. Разработки в области малых спутников и сенсоров с малым весом показали, что сейчас гораздо выгоднее использовать легкие спутники — такие как TopSat (который разрабатывается консорциумом компаний Великобритании совместно с Министерством обороны и Британским национальным космическим центром). Запуск этого спутника планировался в 2004 году. Сканирующая аппаратура TopSat может получать панхроматические изображения с пространственным разрешением 2,5 м и 3-канальное мультиспектральное изображение с пространственным разрешением 5 м и шириной полосы съемки 15 км. Программу разработки малых спутников «Pleiades» проводят правительства Франции и Италии, правительства других стран также планируют осуществить аналогичные программы.

ASTER

Разработанная в Японии аппаратура ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer — усовершенствованный космический радиометр на термоэмиссии и отражении) — это один из сенсоров, которым оснащен американский спутник Terra. Мультиспектральный сенсор ASTER получает данные с высоким разрешением в 3-х диапазонах, причем для каждого диапазона используется отдельный радиометр. Помимо этого ASTER имеет средства стереоскопирования изображений. Спектральные диапазоны, в которых сканируются изображения, принадлежат видимому и ближнему инфракрасному диапазону (VNIR), коротковолновому инфракрасному (SWIR) и тепловому инфракрасному (TIR). Их характеристики приведены в табл. 1.8. Изображения, объединенные в три спектральных диапазона, различаются по величине их пространственного разрешения. Для сенсора VNIR пространственное разрешение равно 15 м, для SWIR — 30 м и для сенсора теплового инфракрасного диапазона TIR — 90 м. Номера каналов, спектральные диапазоны, абсолютные погрешности 14 каналов ASTER приведены в табл. 1.9.

Аппаратура ASTER имеет некоторые интересные особенности. Пространственное разрешение VNIR выше, чем у Landsat ETM+ и у SPOT HRV-сенсоров. Подобно HRV-сенсору, сенсор ASTER может быть направлен в сторону от траектории движения спутника. Радиометр VNIR может отклоняться в пределах $\pm 24^{\circ}$ от точки надира. Другие два радиометра могут отклоняться от надира в пределах $\pm 8,55^{\circ}$. Включение нескольких каналов одновременно в SWIR- и TIR-диапазоны делает ASTER уникальным инструментом — наличие множества каналов в двух спектральных диапазонах может оказаться очень полезным при геологических исследованиях.

Спект- ральная область	Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Точность	Откло- нение, °
	1	0,52-0,60		
	2	0,63-0,69		
VNIR	3N	0,78-0,86	$\pm4\%$	± 24
	3B	0,78-0,86		
	4	1,600-1,700		
	5	2,145-2,185		
	6	2,185-2,225		
SWIR	7	2,235-2,285	$\pm4\%$	$\pm 8,55$
	8	2,295-2,365		
	9	2,360-2,430		
	11	8,475-8,825	±3 K (200-240 K)	
	12	8,925-9,275	±2 K (240-270 K)	
TIR	13	10,25-10,95	±1 K (270-340 K)	
	14	10,95-11,65	±2 K (340-380 K)	

Таблица 1.8. Спектральные и пространственные характеристики каналов сенсора ASTER

ASTER имеет два канала, покрывающие диапазон 0,78– 0,85 мкм. Один имеет номер 3N, другой 3B. Канал 3N направлен вертикально вниз, в то время как канал 3B направлен против направления движения спутника под углом 27,6°. Изображения в этих двух каналах, принадлежащих к ближней инфракрасной области спектра, могут быть использованы для получения стереопар. На основе стереопар могут быть получены цифровые модели рельефа, которые поставляются как SDP DEM-продукт

46

(Standard Data Product Digital Elevation Model — стандартизованные данные, цифровая модель рельефа). Результаты реальных тестов показывают, что абсолютная ошибка высот находится в пределах ± 12 -30 м, обеспечивая при помощи специальных корреляционных процедур точность взаимной привязки двух снимков в пределах $\pm 0,5$ -1 пиксель.

Данные, поставляемые ASTER, доступны на разных уровнях обработки. Так называемый уровень 0 представляет собой необработанные данные с полным разрешением. Уровень 1А эквивалентен уровню 0, но дополнительно включает служебные данные (радиометрия и коэффициенты геометрической коррекции). Радиометрическая и геометрическая коррекция проделаны для данных уровня 1В, которые поставляются в форме условных отсчетов. Эти отсчеты могут быть конвертированы в форму кажущейся яркости путем использования набора постоянных коэффициентов, рассчитанных для каждого канала. Уровни 2–4 включают стандартные ASTER-продукты — такие, как DEMмодели, построенные на основе 3N/3B-стереопар; данные, характеризующие температуру и яркость поверхности, и изображения, построенные с помощью дополнительных обработок — таких, как декорреляция искажений снимков.

MODIS

Аппаратура MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) позволяет производить наблюдения в широком диапазоне длин волн. MODIS был первым спектрометром космического базирования, который использовался на спутниках серий TERRA-EOS и AUQVA, запущенных в 1998 и 2002 гг. соответственно.

Совместное применение двух спутников позволяет проводить суточные измерения вариаций яркости земной поверхности, океана и атмосферы. MODIS — это традиционный радиометр, использующий сканирующее зеркало и проводящий измерения в 36 спектральных каналах в интервале от 0,405 до 14,835 мкм. Каналы 1–36 используются на дневном участке орбиты, каналы 20–36 на ночном участке. Пространственное разрешение каналов 1 и 2 составляет 250 м, каналы 3–7 имеют разрешение 500 м, каналы 8–36 — 1 км (в надире).

Характеристики аппаратуры MODIS: спектральный диапазон для 36 каналов — 0,405–14,385 мкм, радиометрическое разрешение 12 бит, пространственное разрешение 1–1,5 км. Диапазон каналов MODIS приведен в табл. 1.10. Ширина полосы обзора MODIS составляет 2330 км, поэтому период наблюдений

Подсистема	Канал	Спектральный диапазон, мкм	Пространствен- ное разрешение, м	Динамиче- ский диапазон, бит
	1	0,52-0,60		
	2	0,63-0,69		
VNIR	3N	0,78-0,86	15	8
	3B	0,78-0,86		
	4	1,60-1,70		
	5	2,145-2,185		
	6	2,185-2,225		
SWIR	7	2,235-2,285	30	8
	8	2,295-2,365		
	9	2,360-2,430		
	10	8,125-8,475		
	11	8,475-8,825		
TID	12	8,925-9,275	00	10
IIK	13	10,25-10,95	90	12
	14	10,95-11,65		

Таблица 1.9. Характеристики каналов ASTER

за каждой точкой земной поверхности не превышает двух дней. Данные MODIS передаются через спутник-ретранслятор TDRS (США) и обрабатываются в центре GSFC (US Goddard Space Flight Centre). После введения поправок данные MODIS распространяются GSFC в стандартной форме. Вместе с ними в GSFC могут быть получены производные данные, использующиеся в широком диапазоне приложений.

IKONOS

Использование технологий, когда-то разработанных для военных целей, позволило ряду американских коммерческих компаний запустить и эксплуатировать собственные спутники. IKONOS был первым таким спутником, имеющим аппаратуру высокого разрешения, который был успешно запущен US Space Imaging Corp. Спутник несет единственный сенсор, который получает либо панхроматическое изображение с пространственным разрешением 1 м или лучше, либо мультиспектральное изображение обычно с 4 спектральными каналами и пространственным разрешением 4 м.

Канал	Разре- шение, м	Диапазон, мкм	Канал	Разре- шение, м	Диапазон, мкм
1	250	0,620-0,670	19	1 000	0,915-0,965
2	250	0,841-0,876	20	1 000	3,660-3,840
3	500	0,459-0,479	21	1 000	3,929-3,989
4	500	0,545 - 0,565	22	1 000	3,929-3,989
5	500	1,230-1,250	23	1 000	4,020-4,080
6	500	1,628-1,652	24	1 000	4,433-1,498
7	500	2,105-2,155	25	1 000	4,482-4,549
8	1 000	0,405-0,420	26	1 000	1,360-1,390
9	1 000	0,438-0,448	27	1 000	6,535-6,895
10	1 000	0,483-0,493	28	1 000	7,175-7,475
11	1 000	0,526 - 0,536	29	1 000	8,400-8,700
12	1 000	0,546 - 0,556	30	1 000	9,580-9,880
13	1 000	0,662 - 0,672	31	1 000	10,780-11,280
14	1 000	0,673-0,683	32	1 000	11,770-12,270
15	1 000	0,743-0,753	33	1 000	13,185-13,485
16	1 000	0,862-0,877	34	1 000	13,485-13,785
17	1 000	0,890-0,920	35	1 000	13,785-14,085
18	1 000	0,931-0,941	36	1 000	14,085-14,385

Таблица 1.10. Диапазон каналов аппаратуры MODIS

Сенсоры могут быть направлены как вдоль, так и поперек траектории движения спутника. При этом для отклонения от надира до 26° сохраняется приемлемое пространственное разрешение. Панхроматические снимки покрывают диапазон 0,45–0,90 мкм, в то время как 4 мультиспектральных канала чувствительны в диапазонах синего (0,45–0,53 мкм), зеленого (0,52–0,61 мкм), красного (0,64–0,72 мкм) и ближнего инфракрасного (0,77–0,88 мкм) участков диапазона.

ІКОNOS имеет близкую к круговой солнечно-синхронную полярную орбиту с номинальной высотой 681 км и углом наклона 98,1°. Данные IKONOS квантуются, используя 11-битные значения отсчетов (0–2047). Они доступны в различных формах от имеющих только стандартные системные и геометрические коррекции до стерео- и DEM-моделей. Точность корректированных изображений позволяет строить карты масштаба 1 : 2 400.

4 Г.Г. Райкунов, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина

Благодаря высокой разрешающей способности изображений IKONOS, они могут, в некоторой степени, заменить высотные аэрофотографии. Однако возможность отклонения сенсора от надира подразумевает процедуры геометрической коррекции, использующие специальные знания по фотограмметрии, более сложные, чем те, которые применяются для коррекции снимков среднего и низкого разрешения (таких, как Landsat ETM+ или NOAA AVHRR).

QuickBird

Спутник QuickBird был выведен на орбиту в октябре 2001 г., он разработан и эксплуатируется American Digital Globe Company. Подобно IKONOS, он располагает сенсором для получения панхроматических изображений с пространственным разрешением в интервале между 0,61-0,73 м и мультиспектральным сенсором с разрешением 2,44-2,88 м, в зависимости от угла наклона сенсора (отклонение сенсора от надира может составлять до 25°). Сенсор может быть наклонен как вдоль, так и поперек траектории полета спутника для того, чтобы получать стереоизображения и гарантировать возможность пересъемки любого участка в течение 1-3 дней.

Изображения QuickBird доступны в нескольких формах: основной (только системная коррекция), стандартной (геометрическая коррекция для картографической проекции) и орторектифицированной (ortorectification). Последняя является формой геометрической коррекции, которая учитывает рельеф местности.

1.2.2. Гиперспектральные системы

Своим возникновением гиперспектральные технологии обязаны появлению двумерных массивов оптических детекторов в конце 70-х гг. прошлого века [11]. Одной из первых систем, с помощью которой были получены гиперспектральные изображения земной поверхности, был авиационный спектрометр AIS (Airborne Imaging Spectrometer), разработанный в 1982 г. NASA. Тогда впервые были использованы термины «дистанционная спектрометрия» и «гиперспектральное изображение», которые сегодня получили широкое распространение.

Гиперспектральные системы позволяют исследовать связи между спектральными и пространственными характеристиками земной поверхности. Лабораторные и полевые исследования показывают, что использование спектральных каналов шириной 5–20 нм в оптическом диапазоне 0,4–2,5 мкм позволяет изучить большинство характеристик отраженных спектров земной поверхности, которые определяются электронными свойствами отражающих материалов (см. главу 1), т.е. позволяют различать или во многих случаях идентифицировать состав поверхностных объектов, таких как горные породы или почвы.

Спектральное изображение — это несколько изображений, каждое из которых относится к одному из заданного набора диапазонов спектра [11]. Каждый пиксель спектрального изображения можно представить как вектор, определяющий яркость одной пространственной точки для каждого диапазона. Простейшая спектральная (мультиспектральная) система ДЗ — это цветная цифровая камера, которая записывает три изображения в красном, зеленом и синем диапазоне, из которых затем можно создать цветной композит.

Гиперспектральная система отличается от мультиспектральной тремя главными характеристиками. Во-первых, изображения мультиспектральной системы имеют от трех до десяти спектральных диапазонов, в то время как гиперспектральная система должна иметь сотни диапазонов. Во-вторых, мультиспектральные системы обычно имеют спектральное разрешение (вычисляемое как отношение значения центральной длины волны интервала и ширины спектрального интервала) порядка 10, в то время как гиперспектральные системы, как правило, имеют спектральное разрешение порядка 100. В-третьих, в то время как мультиспектральные системы часто имеют широкие и нерегулярно распределенные спектральные диапазоны, для гиперспектральных систем последние занимают непрерывную область и регулярно распределены, что позволяет построить непрерывный спектр для каждого пикселя. Гиперспектральные данные можно представить как «гиперкуб», который содержит на лицевой стороне изображение каждого пикселя и представление спектра каждого пикселя на боковых сторонах куба.

Регистрация сигнала в гиперспектральных системах подчиняется физическим ограничениям, уже упомянутым для видимого/ближнего ИК-диапазона. Разница в терминологии состоит в том, что используется понятие спектральной яркости, т. е. яркости для каждого спектрального канала. Как и для измерений в одном спектральном диапазоне, спектральная яркость, измеряемая дистанционным инструментом, будет отличаться как от спектральной яркости Солнца (источника излучения), так и от спектральной яркости изучаемой сцены, и зависеть от яркости Солнца, взаимного расположения сенсора и сцены. Кроме того, имеет значение путь, по которому регистрируемое излучение проходит в атмосфере.

Основной параметр, который используется в дистанционной спектрометрии для описания свойств земной поверхности, — это спектральный коэффициент отражения. Различия между материалами поверхности или состоянием материалов могут быть описаны с помощью значений этого параметра и объясняются электронными резонансами материалов. Важная концепция поверхностного отражения — понятие «спектральной сигнатуры», которая ассоциирует с каждым материалом определенный спектр отражения. Это понятие широко используется в лабораторной спектрометрии, где базисным является тот факт, что чистые материалы имеют спектры поглощения, которые определяются их химическим составом. Поскольку дистанционная спектрометрия имеет дело со спектрами, которые были получены для смеси самых разных материалов и к тому же искажены при прохождении излучения через атмосферу, связь материала с его спектром не однозначна и может использоваться только как теоретическая основа спектральных дистанционных методов.

Различные особенности ДЗЗ ведут к изменению или даже потере многих важных характеристик дистанционных спектров. Например, коэффициент отражения зависит от угла между нормалью к поверхности и направлением падения солнечного излучения и угла между нормалью и направлением на детектор. Поскольку для дистанционных измерений невозможно определить точную ориентацию поверхности, эта зависимость становится источником неопределенности для изучаемого дистанционного спектра. Эта и многие другие причины изменений спектров изучаемых материалов часто не позволяют сделать однозначные заключения об исследуемых материалах.

Отраженное излучение, воспринимаемое гиперспектральным сенсором, проходит через атмосферу, которая изменяет форму и величину исследуемого спектра в соответствии с величинами рассеяния и поглощения существующих в атмосфере газов и твердых частиц. Рассеянное солнечное излучение и собственная эмиссия атмосферы также регистрируются сенсором. В определенных условиях эти помехи могут доминировать над спектром исследуемого материала. В этих случаях гиперспектральные данные должны подвергаться специальной корректировке для уменьшения влияния атмосферы.

Из-за вариаций пространственного преломления в атмосфере и наличия в ней твердых частиц и аэрозолей излучение, измеряемое для данной элементарной поверхности (пикселя), может включать аномальное излучение, отраженное от соседних областей, и излучение, рассеянное атмосферой. Источники такого аномального излучения в некоторых случаях, например, в сильно задымленной атмосфере, могут располагаться за сотни метров от целевой области.

Другой важный эффект, который делает обработку гиперспектральных данных неоднозначной, — это смешивание излучения, пришедшего от разных материалов, представленных в области, соответствующей данному пикселю. Как упоминалось ранее, для типичного пространственного разрешения дистанционного спектрометра почти всегда существует несколько материалов, представленных в области, соответствующей одному пикселю. Это могут быть несколько разных объектов или поверхность будет состоять из нескольких смешанных материалов — любая гиперспектральная система будет анализировать только смеси различных материалов.

Для дистанционной спектрометрии обычно предполагается, что яркости, отвечающие различным материалам, комбинируются линейно. Даже если это не так, часто — это приемлемое предположение, которое может помочь оценить имеющееся соотношение существующих компонент. Однако в некоторых случаях использование линейного приближения становится неприемлемым. Это может случиться, если существуют трехмерные пространственные структуры, внутри которых излучение, прежде чем попасть на сенсор, претерпевает множественные отражения. Это происходит, например, когда излучение проходит через слой растительности. В таких случаях материалы не могут быть разделены без знания реального соотношения между компонентами.

Центральной частью гиперспектральной системы является собственно сенсор, преобразующий оптические яркости земной поверхности в цифровой массив, который формирует гиперкуб [11]. Для пространственного сканирования сенсор через свою оптическую систему должен получить изображение цели. Затем для каждой области спектра изображение должно быть упорядочено в двумерный массив пикселей. Современные аэрои спутниковые системы делают это, используя четыре различных способа.

Первые сенсоры не требовали массива детекторов, они имели единственный детектор, на который изображение каждого пикселя очередной строки изображения фокусировалось при помощи вращающегося зеркала. Следующие строки изображения формировались, используя поступательное перемещение платформы сенсора. На аэроплатформах применение этого способа приводило к трудностям при изменении ориентации платформы относительно Земли.

Этот тип сенсора можно усовершенствовать, если использовать несколько детекторов, ориентированных поперек направления движения платформы. В таком сенсоре вращающееся зеркало позволяет одновременно получить несколько пикселей для последовательных строк. Этот способ позволяет увеличить время экспозиции пропорционально количеству детекторов и тем самым улучшить значение отношения сигнал/шум.

Сенсоры, появившиеся несколько позднее, не требуют использования вращающегося зеркала, поскольку в фокусе оптической системы расположена линейка детекторов, соответствующая целой строке изображения и, таким образом, очередная строка изображения будет сканирована одновременно, а последовательность сканирования строк обеспечивается поступательным движением платформы. Соответственно время экспозиции и значение отношения сигнал/шум возрастают еще больше.

Последний тип сенсора не требует ни вращающегося зеркала, ни поступательного перемещения платформы, поскольку используется двумерный массив детекторов, на каждый из которых запись производится одновременно. Это дает возможность производить съемку со стационарных платформ, таких как геосинхронные спутники. Для аэроплатформ такой тип детектора гораздо менее чувствителен к нестабильности платформы. Недостатки этого типа сенсора определяются его высокой стоимостью и необходимостью проводить калибровку и коррекцию неоднородности массива детекторов.

Ключевой характеристикой, которая отличает гиперспектральные изображения от изображений других типов, является высокое спектральное разрешение. Используются различные типы призм, дифракционных решеток, интерферометров и более сложные фильтры, каждый из которых применим для определенных типов пространственного сканирования.

Для преобразования электромагнитного излучения в электрический сигнал применяется несколько типов детекторов в зависимости от длины волны: Si для длин волн 0,3–1,0 мкм; InGaAs для 0,8–1,7 мкм; InSb для 0,3–5,5 мкм; HgCdTe для 0,7–15 мкм; Si:As для 2,5–25 мкм. Поскольку для более длинных волн с меньшей энергией преобразование менее эффективно, для микроволнового диапазона требуется охлаждение детекторов до температуры 77 К (InSb, HgCdTe) и даже 10 К (Si:As). Цена кремниевых детекторов сейчас значительно ниже, чем цена детекторов для микроволнового диапазона. Кроме того, большой вес и необходимость охлаждения ведут к высокой стоимости эксплуатации таких детекторов. Как результат — коммерческие гиперспектральные системы, которые становятся доступными на аэроплатформах, обычно используют спектральный диапазон кремниевых детекторов, а длинноволновые детекторы применяются преимущественно в программах с государственным финансированием.

«Pecypc-П»

«Ресурс-П» (от «перспективный») — российский космический аппарат дистанционного зондирования Земли, созданный для замены КА «Ресурс-ДК1», должен быть запущен в 2013 г. Имеет возможности объектовой и маршрутной съемок. Возможна стереосъемка маршрутов размером 115 км; съемка площадок до 100 \times 300 км. Спутник обеспечивает высокодетальную съемку земной поверхности с разрешением 70 см в монохроматическом режиме и не хуже 3–4 м в пяти спектральных полосах. Ширина полосы земной поверхности, снимаемой за один пролет — 38 км.

На аппарате установлено два комплекса широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры: высокого разрешения (ШМСА-ВР) и среднего разрешения (ШМСА-СР). При их использовании обеспечиваются характеристики (ШМСА-ВР и ШМСА-СР соответственно): разрешение в монохроматическом режиме: 12 м, 60 м; разрешение в 5 спектральных диапазонах: 23,8 м, 120 м; ширина полосы захвата 97 км, 441 км. Производительность КА оценивается в 1 млн км² в сут.

«Ресурс-П» имеет комплекс гиперспектральных наблюдений в 96-255 интервалах (длина волны 0,4-1,1 мкм) с разрешением 25-30 м в полосе 25 км. Аппаратура (ГСА-РП) была создана Красногорским заводом в 2012 г. Для ГСА-РП Красногорским заводом совместно со специалистами ВКА им. А. Ф. Можайского и ИФА им. А. М. Обухова РАН разработаны методики и алгоритмы ПМО, в которых предусмотрены возможности адаптации параметров режима съемки к условиям съемки и обработка гиперспектральной информации принимаемой аппаратурой [1].

МКА-ФКИ (ПН1)

Российский космический аппарат МКА-ФКИ («Зонд-ПП») был выведен на орбиту 22 июля 2012 г. «Зонд-ПП» — первый аппарат из серии малых КА, на базе которого планируется изготавливать линейку малоразмерных космических аппаратов. Спутник создан на базе платформы «Карат» [6].

На борту этого аппарата проходит летную квалификацию новая отечественная разработка — гиперспектрометр ГСК, имеющий 150 спектральных каналов. Подтвержденные характеристики гиперспектрометра позволят решать ряд геологических задач дистанционного зондирования Земли.

AVIRIS

AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer — бортовой спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов) был разработан NASA в 1983 г. Он был первым гиперспектральным сенсором, каналы которого перекрывали спектральные диапазоны от видимого до коротковолнового инфракрасного. Плановые полеты начались в начале 1987 г., но AVIRIS продолжал постоянно модифицироваться и улучшаться. Съемкой AVIRIS покрыта территория Соединенных Штатов, Канады и Европы.

Сегодня AVIRIS, безусловно, лучший из существующих гиперспектральных инструментов. Это уникальный оптический сенсор, который получает калиброванные изображения, записывая спектральную яркость в 224 непрерывных спектральных каналах в спектральном диапазоне 400–2450 нм. AVIRIS используется на четырех аэроплатформах (NASA's ER-2 Jet, Twin Otter International's turboprop, Scaled Composites' Proteus, NASA's WB-57), которые имеют разные характеристики: ER-2 летает на высоте около 20 км со скоростью 730 км/ч, Twin Otter на высоте 4 км со скоростью 130 км/ч.

CASI/SASI

Разработка CASI (Airborne Spectrographic Imager — компактный бортовой спектральный построитель изображений) была закончена канадской коммерческой компанией ITRES (коммерческая компания по разработке, производству и продаже бортовых гиперспектральных и телевизионных систем) в 1989 г. Сенсор использовался не только для коммерческих проектов, но и для научно-исследовательских работ. Модифицированная система CASI-3 была разработана в 2002 г. Основные характеристики: 288 каналов шириной 2,2 нм, 400–1050 нм спектральный диапазон, 14-битный сигнал с отношением сигнал/шум 480 : 1. Поскольку CASI работали только в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, ITRES разработала в 2002 г. SASI (Shortwave Infrared Airborne Spectrographic Imager — коротковолновый инфракрасный бортовой спектральный построитель изображений), который использовался совместно с CASI. Характеристики: 160 каналов, 850-2450 нм спектральный диапазон, 14 бит.

Hyperion

В 1996 г. NASA начало новую программу NMP (New Millennium Program — Программа нового тысячелетия); первым спутником, запущенным в рамках этой программы, стал EO-1 (Earth Observing-1). Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту (с наклонением 98,7° и высотой 705 км) в ноябре 2000 г. EO-1 движется по той же орбите, что и Landsat-7 с отставанием от него на 1 минуту, что позволяет поддерживать одинаковые условия съемки [11].

На EO-1 установлены сенсоры трех разных типов: Advanced Land Imager (ALI — усовершенствованный построитель изображений земной поверхности), Hyperion (Гиперспектральная съемочная система) и Linear Etalin Imaging Spectral Array Atmospheric Corrector (LEISA LAC — Атмосферный спектральный корректор на основе линейных эталонных массивов). Два последних являются гиперспектральными сенсорами, которые ведут съемку в узких смежных диапазонах спектра, обеспечивая высокое разрешение. Основные спектральные и пространственные характеристики систем приведены в табл. 1.11.

Система Hyperion относится к новому классу съемочной аппаратуры, предназначенной для комплексного изучения земной поверхности. Высокий уровень рабочих характеристик достигается благодаря механизму точной калибровки, который был разработан для аппаратуры LEWIS HIS (Hyperspectral Imaging Instrument — Гиперспектральный построитель изображений Левиса).

Нурегіоп является гиперспектральной съемочной системой с 224 каналами, которые покрывают пространственный диапазон 0,4–2,5 мкм и обеспечивают пространственное разрешение 30 м. Каждый снимок охватывает территорию 7,5 на 100 км. В состав системы входят следующие компоненты:

- оптическая система, высокое значение отношений сигнал/шум в которой достигается за счет использования двух независимых спектрометров;
- линейка сенсоров в фокальной плоскости системы, созданная на основе аппаратуры, разработанной для программы LEWIS HIS, обеспечивает независимую съемку в SWIR и NIR-диапазонах;
- криогенная система охлаждения, идентичная той, которая использовалась для программы LEWIS HIS.

Папалат	EO-1			
параметры	ALI	Hyperion	AC	
Спектральный диапазон, мкм	0,4-2,4	0,4-2,4	0,9-1,6	
Пространственное разрешение, м	30	30	250	
Ширина полосы обзора, км	36	7,6	185	
Спектральное разрешение, нм	переменное	10	6	
Тип спектрального покрытия	дискретное	непрерывное	непрерывное	
Разрешение панхроматического канала, м	10	_	_	
Общее количество каналов	10	220	256	

Таблица 1.11. Основные спектральные и пространственные характеристики сенсоров спутника ЕО-1

1.2.3. Обработка гиперспектральных данных

Программное обеспечение обработки гиперспектральных изображений играет ключевую роль в применении новых дистанционных технологий. Особенности гиперспектральных данных требуют новых подходов к разработке программного обеспечения, используемого для визуализации, анализа, обработки и интерпретации гиперспектральных изображений. Хотя дистанционная спектроскопия является объединением двух технологий — спектроскопии и методов дистанционных исследований, эта технология, по сути, использует свои уникальные приемы, отличающиеся как от методов спектроскопии, так и от методов дистанционных исследований. Из-за своих уникальных спектральных и пространственных свойств гиперспектральные данные не могут быть обработаны с помощью программного обеспечения, которое применяется для спектроскопии или дистанционных исследований. Поэтому для обработки гиперспектральных данных некоторые существующие программные системы, разработанные для обработки мультиспектральных данных, были расширены, кроме того, были разработаны специальные программные пакеты для работы с гиперспектральными данными.

В целом программное обеспечение для визуализации и интерпретации данных дистанционной спектроскопии разрабатывается уже более 20 лет. Первые гиперспектральные авиационные сенсоры, разработанные NASA в Лаборатории реак-

58

тивного движения (JPL), начали поставлять данные в начале 80-х гг. прошлого века, но существующие в то время программные пакеты не могли обработать нужное количество спектральных каналов, чтобы интерпретировать спектральную информацию. Таким образом, с самого начала использования гиперспектральных данных было ясно, что необходимо разрабатывать специализированное программное обеспечение. История дистанционной спектроскопии демонстрирует тесную взаимную связь разработчиков аппаратуры и программного обеспечения, которая стимулировала улучшение одного из продуктов, когда другой достигал определенного успеха. Далее в хронологическом порядке обсуждаются следующие программные пакеты, которые явились важными этапами в развитии программного обеспечения обработки гиперспектральных данных [10]: SPAM (JPL), ISIS (USGS Flagstaff), Tetracorder (USGS Denver), SIPS (CU/CSES), MULTISPEČ (Purdue), ENVI (BSC/AIG/RSI), ISDAS (CCRS). Хотя этот перечень далеко не исчерпывает список программного обеспечения для обработки данных дистанционной спектроскопии, он иллюстрирует разнообразие разработанных программных пакетов и дает общее представление о направлениях их развития.

SPAM

Один из первых пакетов для анализа гиперспектральных данных SPAM (SPectral Analysis Manager) был разработан NASA JPL в 1983 г. на основе программы визуализации для процессора Motorola 68 000 рабочей станции Sun-1 Microsystems. По сравнению с более поздними пакетами функциональность SPAM была далеко не полной. Пакет поддерживал только 8-битные данные, командный интерфейс и ограниченный набор операций с изображениями.

Для того чтобы мультиспектральный анализ вообще стал возможен на такой аппаратуре, использовалась эффективная концепция бинарного кодирования спектра изображений. Каждый спектральный канал кодировался значениями 1 или 0, в зависимости от того, было ли значение канала больше или меньше значения спектрального среднего. Этот подход не только работал значительно быстрее, но и был гораздо менее чувствителен, чем другие подходы к критическим вариациям альбедо. Можно было сопоставить два спектра, просто сложив их битовые строки и затем сравнив сумму несовпадающих битов с порогом, определенным пользователем. Поскольку объем памяти был ограничен, важно, что кодирование одного 32-канального спектра занимало только 4 байта памяти. Бинарное кодирование, кроме прямого сравнения спектров, позволяло выполнять автоматическую кластеризацию, сравнение со спектрами из спектральных библиотек и оценку однородности пространственных областей.

Другими революционными функциями SPAM были фильтрации для сглаживания спектров и вычисление определенных пользователем арифметических выражений для пространственной и частотной областей. Полученные спектры можно было визуализировать на дисплее или принтере. Наконец, SPAM поддерживал спектральную идентификацию не только для лабораторных спектров, но и для пользовательских библиотек, которые позволяли вводить пользовательские спектры и сохранять спектры, полученные SPAM.

SPAM не использовался после середины 80-х гг. прошлого века, хотя делались попытки его модификации для обработки данных AVIRIS. Другие пакеты обработки гиперспектральных данных быстро стали более популярны, но часть кода, написанного для SPAM, все еще используется в некоторых проектах NASA.

ISIS

Разработка ISIS 2.0 (Integrated Software for Imagers and Spectrometers — Интегрированное программное обеспечение для обработки спектральных изображений) была начата Центром геологической службы США в 1989 г. Хотя первоначально ISIS использовалось только для обработки данных спектрометра NIMS (Near Infrared Mapping Spectrometer) космического аппарата Galileo Jupiter, пакет разрабатывался как пакет общего назначения и затем применялся NASA в ряде проектов, в частности для обработки данных AVIRIS. Широкое распространение получила версия ISIS 2.1, после того как версия ISIS 2.0 была перенесена на Unix в 1993 г. В настоящее время пакет поддерживается PC/Linux, Sun/Solaris и Mac/OS X. В последние годы была разработана версия ISIS 3.0, которая является полностью переработанной версией пакета, использующей новые форматы файлов и новый интерфейс пользователя.

Версии ISIS 2.1 и 3.0 включают возможность выполнения команд на уровне операционной системы или на уровне скриптового языка, в качестве которого обычно используется PERL. Интерактивная программа визуализации CV (Cube Visualization — Программа визуализации «Куб»), входящая в пакет, реализована на базе языка IDL. Интерактивные возможности программы включают такие функции, как визуализация выбранных пространственно-пространственных или пространственно-спектральных срезов куба; анимации, визуализирующие различные срезы куба; возможность визуализации одновременно нескольких изображений; отображения координат курсора и соответствующих ему значений пикселей изображения; увеличения изображений; построения спектров в выбранных пространственных областях; построение пространственных профилей и т. д.

SIPS

Разработка SIPS (Spectral Image Processing System) — системы анализа гиперспектральных изображений — была начата CSES (Center for the Study of Earth from Space, University of Colorado, Boulder, US — Центр изучения Земли из космоса Университета Колорадо, Боулдер, США) в 1990 г. Система строилась на основе разрабатываемых в UC-Boulder (University of Colorado, Boulder) методов анализа спектров высокого разрешения, которые позднее были интегрированы во многие программные пакеты, такие как SPAM и ISIS. Программное обеспечение SIPS разрабатывалось по заказу NASA для обработки данных системы AVIRIS, но оказалось во многом универсальным и часто использовалось для обработки других данных. Программное обеспечение SIPS свободно распространяется и используется более чем в 200 организациях по всему миру.

Tetracorder

На протяжении более двух десятилетий Центр геологической службы США разрабатывал программную систему, которая позволяет обрабатывать гиперспектральные данные на основе подхода, обычно используемого в спектроскопии. Программный пакет, получивший название Tetracorder, является экспертной системой, которая использует для анализа дистанционного спектра большой набор различных методов. Результаты применения разных алгоритмов интерпретации спектра сравниваются между собой, чтобы выбрать лучший результат, который затем представляется как результат работы системы. Анализируемый спектр делится на диагностические регионы, и алгоритмы проходят обучение на различных регионах спектра. Это позволяет анализировать и идентифицировать спектральные свойства многих материалов, несмотря на то, что они обычно смешаны друг с другом. Результаты Tetracorder по идентификации дистанционных спектров являются уникальными, их качество до сегодняшнего дня превосходит качество результатов интерпретации

всех имеющихся систем обработки гиперспектральных данных (примеры обработки данных при помощи Tetracorder 3.3 приведены далее). Особенно впечатляют возможности Tetracorder, когда он используется для идентификации дистанционных спектров сложных материалов. Tetracorder одновременно может картировать широкий диапазон материалов, составляющих сложную естественную среду: минералы в различных геологических условиях, растительность (включая определение вида и возраста), воду (включая имеющиеся загрязнения) и т. д.

Система применяет большой набор экспертных знаний по спектральной идентификации материалов. Экспертные правила, используемые в системе, реализованы в виде дерева решений. Каждое правило может запустить определенные алгоритмы спектрального анализа, включая алгоритмы учета взаимного влияния сложных компонентов. Дополнительные экспертные правила и алгоритмы могут быть запущены на основании первых полученных результатов; решения о пересмотре заключений могут приниматься до окончания анализа несколько раз. Процесс принятия решений позволяет системе сравнить результаты по каждому спектру и каждому пикселю изображения. Этот процесс принятия решений не использует заданные пользователем пороги для анализа различий между материалами. В действительности пороги, необходимые для идентификации материалов, меняются от пикселя к пикселю из-за вариаций кристаллической структуры минералов и большого количества представленных компонентов, имеющихся загрязнений и по многим другим причинам.

MultiSpec

MultiSpec — свободно распространяемое математическое обеспечение для анализа мультиспектральных и гиперспектральных данных. Пакет широко используется для обработки данных, подобных LANDSAT TM, SPOT, MODIS, ASTER, IKONOS, Quickbird, ALI, Hyperion и AVIRIS. MultiSpec реализован для персональных компьютеров под управлением Apple Macintosh версий OS 7.1 — OS X и MS Windows. Версия для Windows поддерживает большинство возможностей, имеющихся в версии Macintosh.

MultiSpec начал разрабатываться как система анализа мультиспектральных изображений LARSYS, которая была одной из первых систем для обработки мультиспектральных изображений, созданных в 60-е гг. прошлого века. В 1988 г. она была перенесена на Apple Macintosh для того, чтобы получить легкую в использовании систему, которая позволяла бы исследователям использовать технику мультиспектральной обработки дистанционных данных.

ENVI

ENVI (The Environment for Visualizing Imagery) — коммерческая система для обработки дистанционных данных, которая первоначально разрабатывалась как средство для анализа гиперспектральных данных специалистами UC (University of Colorado, Boulder). Прототип оригинальной системы был разработан компаниями BSC (Better Solutions Consulting) и AIG (Analytical Imaging and Geophysics — Анализ изображений и географических данных). Конечным пользователям система поставлялась по лицензии RSI (Research Systems Inc.), затем Eastman Kodak Commercial — коммерческая компания, всемирно известный производитель фототехники, штат Нью-Йорк, США и ITT Industries — американская корпорация по производству оборудования для аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности. Первая версия ENVI поступила пользователям в феврале 1994 г.

Основное направление разработки ENVI — визуализация, обработка, интерпретация и анализ гиперспектральных данных. Используя ENVI, можно представить гиперспектральное изображение в виде куба данных или визуализировать его спектральные профили, но кроме этого ENVI включает другие, более мощные средства визуализации, основанные на *n*-мерных диаграммах данных в спектральном пространстве. Модули Effort Spectral Polishing, Pixel Purity Index, n-Dimensional Visualizer и Mixture Tuned Matched Filtering являются уникальными инструментами для дистанционной спектроскопии. Сегодня ENVI безусловно наиболее мощный и широко используемый коммерческий пакет для обработки гиперспектральных данных.

ISDAS

ISDAS — пакет программ для пространственного анализа данных, развивался на основе ранней версии программного пакета, разрабатываемого с 1995 г. в CCRS (Canada Centre for Remote Sensing) для анализа дистанционных гиперспектральных данных. Система разрабатывалась с учетом следующих требований: программной среды, позволяющей быструю обработку алгоритмов; модульной структуры, позволяющей легко добавлять новые инструменты или заменять существующие; возможностей обработки данных любых гиперспектральных аэро- и космических

сенсоров, регистрирующих данные в видимом, ближнем инфракрасном (VNIR) и коротковолновом (SWIR) диапазонах. Усилиями компаний PCI Geomatics и Vexcel Canada была выпущена коммерческая версия ISDAS. Затем компания PCI перенесла многие инструменты, разработанные для ISDAS, в систему общего назначения Geomatica, а Vexcel, используя ISDAS, разработал систему для быстрого анализа изображений, основанную на применении параллельных процессоров для целей геологического картирования.

АЭРОКОСМОС

Для обработки больших объемов гиперспектральных аэрокосмических данных российским НИИ «АЭРОКОСМОС» [2] создан развитый программный комплекс, который состоит из следующих программных средств:

- программ распознавания по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям объектов различных типов на основе анализа их качественных и количественных характеристик;
- комплекса программ, проводящего совместную многопараметрическую обработку гиперспектральной информации, получаемой с космических и воздушных средств;
- программ распознавания типов объектов путем решения обратных задач ДЗЗ;
- программ для выявления и распознавания типов малоразмерных объектов на основе анализа отдельных областей;
- дополнительного программного обеспечения для повышения степени автоматизации на различных этапах обработки гиперспектральной информации.

Программный комплекс реализован для операционной системы LINUX. При этом обеспечено решение сложных задач распараллеливания вычислений для обеспечения вычислений на супер-ЭВМ терафлопсного класса.

Несмотря на то, что обработка гиперспектральных дистанционных данных использует специализированное программное обеспечение, которое разрабатывается и постоянно улучшается уже более 20 лет, большая часть информации из гиперспектральных дистанционных изображений часто не может быть извлечена. Необходима разработка новых более совершенных алгоритмов и нового программного обеспечения для обработки гиперспектральных данных.

Глава 2

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

2.1. Методы обработки мультиспектральных данных

Раздел содержит описание основных методов обработки мультиспектральных данных, позволяющих получить информацию о литологическом составе и типах горных пород.

2.1.1. Методы улучшения мультиспектральных изображений

Для задач геологии и географии методы улучшения изображений позволяют не только облегчить интерпретацию изображений, но и повысить ее качество. Эти методы часто используются вместо более сложных методов классификации для изучения или определения локальных областей/объектов или выделения из изображения полезной информации. К методам улучшения изображений относятся методы радиометрической и геометрической коррекции данных; радиометрического, пространственного и спектрального улучшения; мультиспектральной обработки изображений; Фурьеанализ и другие методы, позволяющие повысить качество интерпретации [35]. В настоящем разделе рассматриваются способы улучшения мультиспектральных изображений.

Обработка исходных изображений

Хотя каждое новое поколение сенсоров делает качество получаемых данных гораздо выше предыдущих, определенные аномальные искажения все-таки присутствуют на снимках. Это особенно характерно для старых сенсоров, с помощью которых накоплены самые большие библиотеки снимков. Кроме того, на снимках всегда присутствуют искажения, связанные с кривизной Земли и ее вращением относительно несущей аппаратуру платформы. Обычно эти аномалии в той или иной мере могут быть исправлены с помощью специальной обработки.

В общем случае различают два типа коррекции данных: радиометрическую и геометрическую. Радиометрическая коррекция направлена на устранение тех искажений снимка, которые

⁵ Г.Г. Райкунов, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина

не связаны со сканируемой сценой. Обычно сюда относятся следующие дефекты: различная чувствительность и неисправности используемых сенсоров, топографические искажения и атмосферные дефекты изображения. Геометрическая коррекция связана с относительными ошибками в определении положения различных пикселей снимка. Эти ошибки обычно идут от дефектов геометрии сенсоров и применения упрощенных геометрических моделей земной поверхности при калибровке сенсоров.

Радиометрические методы улучшения изображений

Все алгоритмы радиометрических методов для вычисления корректированных значений яркости в конкретном канале используют значения пикселей только в этом канале. Поэтому радиометрические улучшения для мультиспектральных данных можно рассматривать как независимые преобразования данных для каждого из каналов.

Увеличение контрастности изображения во всех диапазонах гистограммы путем изменения яркости пикселей невозможно, т. к. расширяя один диапазон гистограммы, мы, тем самым, сужаем другие диапазоны. Если данные сенсора, перенесенные на цифровые носители информации, не занимают на них полного диапазона, можно сделать все изображение более контрастным, просто «выравнивая» его гистограмму. Обычно алгоритмы «выравнивания» используют для этого нелинейную функцию преобразования, которая перераспределяет значения яркости пикселей так, чтобы в каждом эквивалентном по длине интервале гистограммы находилось приблизительно равное их количество.

Пространственные методы улучшения изображений

Алгоритмы, применяющиеся для пространственного улучшения изображений, используют имеющиеся значения пространственных отношений яркости пикселей, т. е. для вычисления значения конкретного пикселя они применяют его значение и значения яркости окружающих его пикселей.

Один из часто применяемых методов пространственного улучшения — повышение контрастности изображения. Поскольку повышение контрастности одновременно влияет на другие характеристики изображения, на практике используются различные алгоритмы, которые различаются степенью искажения изображений.

Большая группа алгоритмов основана на фильтрации изображений. Фильтрация математически может быть представле-

на как единый алгоритм конволюции (свертки) двух матриц, представляющих ядро и изображение. Ядро конволюции — это матрица коэффициентов, которые используются для вычислений. Конволюция — процесс вычисления взвешенного среднего квадратной матрицы, центром которой последовательно является каждая точка в изображении.

Разные типы ядер позволяют определить фильтрации различных типов. Например, ядра с нулевой суммой подчеркивают области изображений, которые имеют различные уровни яркости. Действительно, конволюция ядра с нулевой суммой с разными областями даст разные значения: область, в которой все значения эквивалентны, даст нулевое значение; область с преобладающими низкими пространственными частотами даст низкое значение; область, в которой преобладают высокие частоты, даст высокое значение.

Кроме того, конволюция с ядрами с нулевой суммой будет увеличивать высокие и уменьшать низкие значения и, таким образом, выделять те области изображения, на которых имеются резкие границы. В результате выходное изображение будет в основном состоять только из нулей и единиц. Могут быть использованы симметричные ядра для определения любых границ или асимметричные, для определения границ, ориентированных в определенном направлении.

Другие типы ядер обеспечивают построение фильтров высоких частот (пропускающих только высокие частоты) и низких частот (пропускающих только низкие частоты). Фильтры высоких частот усиливают высокие частоты, тем самым ослабляя низкие. Фильтры низких частот, наоборот, сглаживают изображение, подавляя высокие частоты.

Для решения определенных задач используются фильтры, имеющие специальные ядра. Например, нелинейный оператор Собеля (Sobel) основан на вычислении первых разностей. Этот оператор усиливает в основном локальные (ограниченные размерами окна), а не региональные границы. Поэтому увеличение размеров окна приводит к относительному увеличению количества региональной информации относительно локальной. Преимуществом оператора Собеля является то, что он не подавляет региональных границ.

Спектральные методы улучшения изображений

Спектральная техника для улучшения изображения использует несколько спектральных каналов одновременно. Например, можно получить одно трехканальное RGB-изображение, комбинируя информацию более чем трех спектральных каналов. Часто спектральная техника используется для представления на снимке какой-нибудь невизуальной информации или комбинирования невизуальной информации с визуальной в стандартных RGB, цветах, т.е. в привычной для человека форме.

2.1.2. Процедуры обработки мультиспектральных данных

Методы улучшения изображений реализованы во всех основных пакетах обработки дистанционных данных. В ERDAS Imagine процедуры улучшения изображений включены в модуль Image Interpreter — интерпретатор изображений [41]. В настоящем разделе приведен ряд примеров обработки авторами настоящего обзора мультиспектральных данных на основе процедур, имеющихся в ERDAS Imagine Image Interpreter. Обработка произведена авторами настоящей книги.

Выравнивание гистограммы (Histogram Equalization)

Процедура Histogram Equalization, реализованная в Imagine Image Interpreter, позволяет увеличить контрастность изображений. Ее применение оправдано для изображений, которые полностью не покрывают имеющийся динамический диапазон. Это характерно для исходных данных, полученных со всех без исключения сенсоров. На рис. 2.1 показан фрагмент изображения канала 4 Landsat ETM+ и результат его преобразования процедурой Histogram Equalization.

Крисп-фильтрация (Crisp Filtering)

Процедура Crisp Filtering, реализованная в Imagine Image Interpreter, увеличивает контрастность изображения, не искажая при этом основных отношений между каналами снимка. Поэтому именно эта процедура обычно используется, если на снимке присутствуют нерезкие области из-за слишком быстрого движения сенсора, атмосферной дымки или, возможно, малого разрешения сенсора.

Алгоритм Крисп-фильтрации включает следующие шаги:

- для мультиспектрального исходного изображения вычисляются главные компоненты (PC);
- первая главная компонента (PC-1) подвергается фильтрации при помощи конволюционного фильтра;
- результат фильтрации снова преобразуется в мультиспектральное изображение в RGB представлении.



Рис. 2.1. Пример использования процедуры Histogram Equalization: *a*) фрагмент изображения снимка, полученного четвертым каналом сенсора Landsat ETM+; *б*) результат преобразования изображения процедурой Histogram Equalization

Логика алгоритма состоит в следующем: поскольку считается, что PC-1 передает основные соотношения яркости изображения, а главные компоненты более высоких порядков представляют случайный «шум», повышение контрастности только PC-1, а затем реконструирование изображения на его основе должно восстановить оригинальное изображение. Поэтому, хотя контрастность изображения возрастет, основные соотношения между каналами будут сохранены.

В качестве примера на рис. 2.2 приведен фрагмент снимка Landsat ETM+ и тот же фрагмент снимка после применения процедуры Крисп-фильтрации.

Метод главных компонент

Анализ главных компонент (PCA — Principal Components Analysis) часто используется как метод снижения размерности избыточных данных. Поскольку мультиспектральные данные в различных каналах сильно коррелированны (т.е. по определению избыточны), их размерность всегда может быть уменьшена,



Рис. 2.2. Фрагмент снимка Landsat ETM+ (Nevada) (a); тот же фрагмент снимка после применения процедуры Крисп-фильтрации (б)

т. е. данные могут быть представлены меньшим числом каналов. Данные, представляющие каждую из главных компонент, не коррелированны, поэтому часто их легче обрабатывать и интерпретировать, чем исходные данные.

На рис. 2.3 приведено разложение фрагмента шести каналов (1–5 и 7) изображения Landsat ETM+ на 3 главные компоненты процедурой Principal Component, реализованной в Imagine Image Interpreter. На рис. 2.3, *а* приведено исходное изображение; на рис. 2.3, *б* композит, составленный из трех главных компонент.

Некоррелированное выравнивание (Decorrelation Stretch)

Каналы мультиспектральных данных сильно коррелированы между собой. Используя метод главных компонент, можно построить набор некоррелированных главных компонент (каналов). Название реализованной в Imagine Image Interpreter процедуры Decorrelation Stretch говорит о процедуре выравнивания некоррелированных данных.

Действительно, для набора мультиспектральных каналов процедура Decorrelation Stretch вычисляет заданное количество главных ортогональных компонент. Затем каждая главная компонента, полученная из входного изображения, подвергается процедуре выравнивания его гистограммы. Выходное изображение с выровненной гистограммой получается из выровненных главных компонент путем использования обратного преобразования.

На рис. 2.4 представлен композит из 3 выровненных главных компонент. Использовался фрагмент изображения Landsat ETM+.

Тасселед Кап (Tasseled Cap)

Процедура Tasseled Cap реализована в модуле Imagine Image Interpreter. В мультиспектральных снимках каждый пиксель может быть представлен в N-мерном пространстве, размерность которого должна быть равна количеству каналов. При этом плотность распределения яркости изображения будет определяться спектральными особенностями поглощения/отражения различных участков сцены. О структуре плотности такого распределения иногда говорят как о структуре данных изображения.

Из-за корреляции между каналами структура данных изображения будет представлена как гиперэллипсоид. При этом оси главных компонент структуры данных не совпадут с осями, определенными в *N*-мерном пространстве, а будут связаны с максимумами гистограммы поглощения/отражения сцены.



Рис. 2.3. Разложение шести каналов (1–5 и 7) фрагмента изображения Landsat ETM+ (Nevada) на 3 главные компоненты процедурой Principal Component: *a*) исходное изображение фрагмента; *б*) композит фрагмента, составленный из главных компонент


б

Рис. 2.4. Использование процедуры Decorrelation Stretch: *a*) фрагмент изображения Landsat ETM+ (Nevada); *б*) результат применения процедуры

Метод Tasseled Cap использует 6 каналов (1–5 и 7) данных Landsat TM и ETM+. Процедура преобразования Tasseled Cap, реализованная в ERDAS, для «нормального» изображения дает следующее трехмерное представление данных:

- «яркость» степень отражения почвенного слоя, которая рассчитывается как взвешенное среднее 1–5 и 7 каналов Landsat;
- «интенсивность зеленого» живая «зеленая» растительность, рассчитывается как взвешенная сумма отношений 4/3 и 7/5 каналов (преобладает первый компонент);
- «влажность» «влажность» растительности, рассчитывается как взвешенное отношение 7/5 и 4/3 каналов.

Веса, которые используются для расчетов, зависят от применяемого сенсора, но, однажды определенные, они пригодны для любой сцены, сканированной этим сенсором. Метод Tasseled Cap реализован процедурой Tasseled Cap модуля Image Interpreter и обеспечивает корректные коэффициенты для аппаратуры TM4, TM5 и ETM+.

На рис. 2.5 приведен фрагмент изображения Landsat ETM+ и результат его обработки процедурой Tasseled Cap, реализованной в Imagine Image Interpreter. Каналы обработанного Tasseled Cap изображения соответствуют: красный — «яркости»; зеленый — «интенсивности зеленого»; синий — «влажности».

Мультиспектральные индексы (Multispectral Indices)

Индексы — это производные изображения, в которых значение конкретного пикселя представляется как арифметическая функция от значений соответствующего пикселя в разных каналах исходного изображения. Обычно функции построения индексов вычисляются довольно просто: канал Х/канал Y (частное от деления) или, например, канал Х – канал Y (разность).

Отношения каналов, обычно использующиеся в индексах, часто строятся так, чтобы моделировать отношение поглощение/ отражение для различных материалов на земной поверхности тех, которые интересуют исследователя. Отношение поглощение/отражение материалов зависит от свойств молекулярных связей материала, таким образом, теоретически индексы дают информацию о химическом составе материалов. Для геологических целей разработан ряд индексов, которые основаны на свойствах поглощение/отражение минералов и горных пород.

Индексы используются для анализа состава горных пород, т. к. они позволяют выявить небольшие различия, которые отражаются на снимках для пород разного состава. Во многих



Рис. 2.5. Результат обработки изображения процедурой Tasseled Cap: *a*) фрагмент изображения Landsat ETM+ (Nevada); *б*) результат его обработки процедурой Tasseled Cap (красный канал соответствует «яркости», зеленый — «зелени»; синий — «влажности»)

случаях такие различия могли бы остаться незамеченными на исходных мультиспектральных снимках. Определенные комбинации Landsat TM каналов традиционно используются для интерпретации минеральных типов пород. Например, высокое отношение канал 5/канал 4 считается индикатором железистых минералов.

В закрытых районах полезными могут быть индексы, применяющиеся для анализа растительности, поскольку такой анализ часто дает полезную информацию для геологического дешифрирования. Так, для определения плотности растительности часто используют Vegetation Index, (соответствие номеров IR и R каналов основных сенсоров приведено в табл. 2.1).

Та	блица	2.1.	Номера	крас	сного	(R) и	инс	фракрасного	(IR)	канал	ов 🕽	для	сенсо-
	ров, и	споль	зующие	ся в	форм	улах	для	построения	осно	вных	инд	ексс)B

Тип сенсора	IR-канал	R-канал		
Landsat MSS	7	5		
SPOT XS	3	2		
Landsat TM	4	3		
NOAA AVHRR	2	1		

Модуль Image Interpreter позволяет рассчитать следующие индексы для снимков Landsat MSS/TM/ETM+:

- IR/R;
- $(IR/R)^{1/2};$
- Vegetation Index индекс растительности = IR R;
- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI нормализованный индекс растительности) = (IR-R)/(IR+R);
- Transformed NDVI (TNDVI трансформированный индекс растительности) = ((IR – R)/(IR + R) + 0,5)^{1/2};
- Iron Oxide окись железа = ТМ 3/1;
- Clay Minerals глинистые минералы = TM 5/7;
- Ferrous Minerals железистые минералы = TM 5/4;
- Mineral Composite (индекс-композит для геотермально измененных пород) = TM 5/7, 5/4, 3/1;
- Hydrothermal Composite (индекс-композит, включающий 3 канала, соответствующих окислам железа, глинистых и железистых минералов) = TM 5/7, 3/1, 4/3.

В качестве примера на рис. 2.6 приведены индексы, построенные для фрагмента изображения Landsat ETM+ процедурой Indices: композитный индекс Mineral Composite и композитный индекс Hydrothermal Composite.





Рис. 2.6. Минеральные индексы, построенные процедурой Indices для фрагмента изображения Landsat ETM+ (Nevada): *a*) индекс Mineral Composite; *б*) индекс Hydrothermal Composite

Индекс Mineral Composite включает три канала, каждый из которых соответствует одному из индексов, характеризующих минеральный состав: индекс Clay Minerals, характеризующий глинистые минералы, индекс Ferrous Minerals, характеризующий железистые минералы и индекс Iron Oxide, характеризующий окислы железа.

Индекс Hydrothermal Composite — индекс-композит, разработанный для маркирования гидротермально-измененных пород. Его структура подобна индексу Mineral Composite и включает следующие индексы/отношения: Clay Minerals, Iron Oxide и отношение каналов 4/3 (которое не имеет названия).

2.2. Методы обработки гиперспектральных данных

Модуль Imagine Spectral Analysis пакета ERDAS позволяет пользователю обрабатывать изображения, полученные гиперспектральными сенсорами, такими как Hyperion и AVIRIS. Для этого в Imagine Spectral Analysis реализован ряд специализированных процедур обработки гиперспектральных данных, которые доступны пользователю через графические интерфейсы ERDAS. Кроме того, в модуль включен набор функций предварительной обработки, специально предназначенных для обработки гиперспектральных данных [41].

Функциональность Imagine Spectral Analysis распадается на две части — предварительную обработку и решение аналитических задач. Предварительная обработка включает проверку корректности данных и ряд функций, необходимых для проведения анализа изображения. Аналитическая часть выполняет решение содержательных задач и визуализацию выходных изображений.

2.2.1. Определение параметров и предварительная обработка

Информация о сенсоре

Информация о стандартных сенсорах, таких как AVIRIS или Нурегіоп (например, спектральные диапазоны каналов сенсора), необходима каждому алгоритму, если он использует данные, которые не являются частью изображения. Модуль Imagine Spectral Analysis хранит информацию о стандартных сенсорах и позволяет при необходимости корректировать это описание. Если для анализа применяются только данные исходного изображения, например, решается задача поиска целевого материала, спектр которого получен из изображения, информация о диапазонах не используется. Если же спектр целевого материала взят, например, из спектральной библиотеки, библиотечный спектр должен быть преобразован так, чтобы использовать те спектральные диапазоны, которые соответствуют спектральным диапазонам сенсора, т.е. в этом случае информация о сенсоре необходима.

Удаляемые каналы

Поскольку на качество сигнала, записываемого сенсором, влияют многие факторы, качество записи изображения обычно изменяется от канала к каналу. Качество изображения канала зависит от состояния канала сенсора (которое определяет уровень шума), поглощения и рассеяния сигнала атмосферой (различное в каждом канале) и т. д. Каналы с низким качеством записи должны быть исключены из обработки, т. к. они не только увеличивают время, необходимое для обработки изображения, но и значительно снижают качество полученного результата.

Модуль Imagine Spectral Analysis содержит процедуру предварительной обработки, которая в диалоге с аналитиком позволяет быстро оценить качество каждого канала анализируемого изображения и маркировать «плохие» каналы, которые будут исключены. Пример оценки качества каналов приведен на рис. 2.7, *a*, иллюстрирующем диалог Imagine Spectral Analysis со спектром фрагмента снимка Hyperion для оценки качества каналов. Каналы с плохим качеством изображения отмечены цветом.

Многие из каналов, представленных на анализируемом изображении, могут не содержать полезной информации об интересующих аналитика материалах. Такие каналы также должны быть исключены из обработки. Эта функция аналогична исключению «плохих» каналов и позволяет сократить время обработки и улучшить качество результата.

Используемые каналы

Модуль Imagine Spectral Analysis включает процедуру предварительной обработки данных, которая позволяет пользователю просмотреть спектры поглощения анализируемых материалов. Области, где анализируемые материалы не имеют характерных



Рис. 2.7. *а*) Диалог Imagine Spectral Analysis со спектром фрагмента снимка Hyperion (Tonopah, Nevada) для оценки качества каналов — каналы с плохим качеством изображения отмечены цветом; *б*) диалог Imagine Spectral Analysis для определения используемых каналов — интервал спектра, который не будет использоваться, отмечен цветом

спектральных свойств, обычно исключаются из дальнейшей обработки. На рис. 2.7, *б* приведен диалог Imagine Spectral Analysis для определения используемых каналов. Интервал спектра, который не будет использован, отмечен цветом.

Атмосферная коррекция

Гиперспектральные изображения должны быть подвергнуты атмосферной коррекции для исключения влияния атмосферы. Атмосферная коррекция становится обязательной, когда необходимо сравнивать спектры анализируемых изображений со спектрами из спектральных библиотек или сравнивать спектры, относящиеся к различным сценам. Для изображений без атмосферной коррекции обработка не должна выходить за пределы анализируемой сцены [26].

Целью атмосферной коррекции является корректировка эффектов поглощения и рассеяния излучения в земной атмосфере. Относительные значения яркости излучения, зафиксированные сенсором, должны быть преобразованы в значения абсолютной отраженной яркости объектов земной поверхности. При этом предполагается, что сенсорная коррекция, преобразующая значения сенсорного сигнала в значения относительной яркости, была уже сделана при получении сигнала на приемной станции или предварительно приведена модулем Imagine Importer при импорте изображения.

Все используемые процедуры атмосферной коррекции можно разделить на две группы — атмосферное моделирование и эмпирические моделирование. ERDAS включает средства атмосферной коррекции, которые используют только эмпирическое моделирование. Модуль Imagine Importer (импортер изображений) позволяет выбрать следующие эмпирические методы:

- метод модифицированного плоского поля MFF (Modified Flat Field Method);
- метод эмпирической линии EL (Empirical Line Method);
- метод средней внутренней отраженной яркости IARR (Internal Average Relative Reflectance Method).

Модуль Imagine Spectral Analysis может быть расширен включением других методов атмосферной коррекции, в том числе использующих атмосферное моделирование. Процедуры, реализующие эти методы, представлены в специализированных коммерческих пакетах атмосферной коррекции. Процедуры атмосферной коррекции, входящие в Imagine Spectral Analysis, могут использоваться для обработки не только гиперспектральных, но и мультиспектральных изображений.

Модуль Imagine Spectral Analysis последовательно проводит коррекцию каждого канала анализируемого изображения. Метод IARR использует только данные, содержащиеся в изображении канала. Методам MFF и EL необходима дополнительная информация о корректируемой сцене, которую аналитик должен представить до проведения коррекции.

Атмосферное моделирование

Атмосферное моделирование использует физические модели атмосферы, которые учитывают количественный состав атмосферы, путь прохождения сигнала через атмосферу, локальное время (необходимое для определения положения Солнца над горизонтом) и другие параметры. На основе таких моделей рассчитываются вероятные эффекты атмосферного поглощения и рассеяния. Модели атмосферного моделирования, которые принято называть моделями прозрачности атмосферы ATC (Atmospheric Transmission Codes), успешно применяются уже длительное время.

6 Г.Г.Райкунов, В.Л.Щербаков, С.И.Турченко, Н.А.Брусничкина

Программы атмосферного моделирования разработаны многими исследовательскими и коммерческими организациями. Первые программы, созданные AFGL (U.S. Air Force Geophysics Laboratory — Геофизическая лаборатория BBC США), сейчас широко используются, это:

- LOWTRAN (Low Resolution Atmospheric Transmission Code модуль атмосферной коррекции низкого разрешения);
- MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model — модель атмосферной коррекции среднего разрешения);
- HITRAN (High Resolution Transmission Molecular Absorption Database база данных молекулярной абсорбции высокого разрешения).

Фактором, сдерживающим применение этих программ, является необходимость определения целого ряда параметров, которые должны описывать состав атмосферы, геометрию фиксируемого сенсором излучения и т.п.

Последнее привело к разработке ряда программ, которые позволили упростить процесс атмосферного моделирования. Такие программы также используют АТС-модели, но пытаются самостоятельно оценить некоторые необходимые параметры, основываясь на данных анализируемой сцены. Наибольшую известность получили следующие программы:

- ATREM (ATmosphere REMoval модель атмосферной коррекции), разработанная CSES для коррекции данных AVIRIS;
- ATCOR (ATmospheric CORrection), разработанная DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Немецкий аэрокосмический центр);
- ACORN (Atmospheric CORrection Now), программа, разработанная на основе MODTRAN 4;
- FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes — быстрый линейный анализ атмосферы на основе спектрального гиперкуба), разработанная AFGL.

К сожалению, коррекция, основанная на атмосферной модели, не может учесть многих особенностей, которые вносятся реальными атмосферными условиями. Использование эмпирических методов, основанных на использовании данных дополнительных наземных наблюдений, часто дает лучшие результаты. Если эти методы применяются после проведения атмосферной корректировки, на базе методов атмосферного моделирования, атмосферные искажения могут быть практически устранены.

Эмпирическое моделирование

Второй подход к атмосферной коррекции основывается на использовании спектральных замеров в контрольных точках, проведенных без влияния атмосферных искажений. Обычно используются одна или более контрольных точек, выбранных в пределах анализируемой сцены. Контрольная точка — это пиксель (или набор пикселей), идентифицированный на изображении, для которого аналитик имеет неискаженный полевой или лабораторный спектр.

Лучший способ получения спектра в контрольной точке прямое измерение его непосредственно в полевых условиях при помощи полевого спектрометра. Альтернативный способ — использование спектральной библиотеки, из которой может быть выбран аппроксимирующий спектр, если известен состав материала в контрольной точке. После того как контрольные точки в пределах сцены идентифицированы, спектры, соответствующие этим точкам, используются для атмосферной коррекции всего изображения.

Использование контрольных точек имеет определенные ограничения. Из-за большого объема данных пиксели гиперспектрального изображения относительно больших размеров: 10– 30 метров. Поэтому на яркость отдельного пикселя влияет большое количество составляющих его материалов. Это значительно затрудняет использование спектра контрольной точки. Поэтому в некоторых случаях в качестве контрольных точек применяются искусственные объекты, такие как крыши зданий или однородные участки сельскохозяйственных полей, если они попадают в пределы сцены. Если таких объектов нет, для контрольных точек используются сравнительно однородные участки, спектры которых априорно известны.

Модуль Imagine Spectral Analysis включает следующие эмпирические методы:

- метод внутренней средней относительной отраженной яркости IARR (Internal Average Relative Reflectance);
- метод эмпирической линии EL (Empirical Line);
- метод плоского поля FF (Flat Field);
- метод модифицированного плоского поля MFF (Modified Flat Field).

Метод IARR используется в том случае, если нет априорных данных о контрольных точках сцены. Аналитик ничего не знает о составе поверхности исследуемого района и поэтому не может воспользоваться спектральной библиотекой или спектрами других сцен. Этот метод вычисляет относительную отраженную яркость как отношение каждого спектра к среднему спектру, рассчитанному для всей сцены.

Метод FFM имеет несколько вариантов. В его первоначальном варианте требовалось в пределах сцены выбрать область, которая была бы топографически и спектрально плоской. Для такой области результирующий спектр зависел бы только от рассеяния и поглощения излучения атмосферой и спектрального состава солнечного излучения. К сожалению, в большинстве сцен такую плоскую область обнаружить трудно или даже невозможно.

Более новая модификация метода получила название метода распределенного плоского поля DFF (Distributed Flat Field). Метод DFF аппроксимирует плоскую область, позволяя аналитику выбрать несвязные участки на изображении, и затем вычисляет необходимый корректирующий спектр путем осреднения всех выбранных областей. Относительная отраженная яркость для каждого выходного спектра вычисляется как частное от деления исходного спектра каждого пикселя на корректирующий спектр.

Другая модификация метода, получившая название MFF (Modified Flat Field), требует, чтобы аналитик знал материал плоского поля и имел библиотечный спектр этого материала. Должны быть представлены спектры для всех выбранных пикселей плоского поля; лучший результат будет получен, если представленные спектры — это полевые спектры реальных материалов, соответствующих выбранным пикселям.

Каждый входной спектр делится на осредненный спектр плоского поля и умножается на осредненный реальный спектр. Таким образом имеющиеся в изображении атмосферные эффекты корректируются. Если имеются данные о реальных спектрах контрольных точек, использование метода MFF становится более предпочтительным.

В методе EL берется несколько контрольных точек. Это позволяет улучшить результат, используя имеющуюся статистику. Для каждого канала изображения строится линия регрессии, которая затем применяется для корректировки входных данных. Практически аналитик выбирает две или более области в пределах сцены, для которых определены материалы и лабораторные спектры которых доступны в одной из спектральных библиотек. В методе EL необходимо, чтобы контрольные точки были выбраны из областей с высоким и низким альбедо. В заключение приведем пример снимка AVIRIS (Cuprite, Nevada, USA), для которого проведена атмосферная коррекция. На рис. 2.8 приведен снимок AVIRIS (*a*), спектр снимка, полученный до (б) и после (в) проведения атмосферной коррекции.



Измеренная



Рис. 2.8. Пример проведения атмосферной коррекции для снимка AVIRIS (Cuprite, Nevada): *a*) снимок AVIRIS; *б*) спектр неоткорректированного снимка; *в*) спектр снимка после проведения атмосферной коррекции

Уменьшение уровня шума

При анализе изображения всегда желательно уменьшить уровень шума или, более точно, максимизировать отношение сигнал/шум (S/N). Это особенно важно, если анализируемый материал имеет характерные линии поглощения в каналах, сигнал в которых ослаблен сильным атмосферным поглощением. В таких случаях предварительное преобразование изображения при помощи процедуры, реализующей метод главных компонент PC (Principal Components), обычно позволяет увеличить отношение сигнал/шум [26].

Как правило, разные каналы гиперспектрального изображения имеют разные значения S/N. В этом случае стандартное использование метода главных компонент обычно неэффективно. Для работы с гиперспектральными изображениями был разработан модифицированный PC-алгоритм, который получил название MNF (Minimum Noise Fraction).

С помощью MNF-преобразования может быть получено множество главных компонент анализируемого изображения, которые упорядочены в порядке уменьшения уровня сигнала.



Рис. 2.9. Выходные результаты процедуры «определение аномалий» для фрагмента снимка Hyperion (Tonopah, Nevada — снимок приведен на рис. 2.11) при использовании MNF и без него: *а*) аномалия, полученная с использованием MNF-преобразования; *б*) аномалия, полученная без использования MNF-преобразования

Для обработки используются только главные компоненты с максимальным уровнем сигнала. Таким образом MNF позволяет сжать информацию, представляющую изображение, в небольшое количество каналов.

В Imagine Spectral Analysis MNF реализован как один из методов предварительной обработки. Этот метод позволяет пользователю оценить уровень шума в каждом канале и определить параметры, необходимые для использования MNF при обработке изображения.

На рис. 2.9 приведены выходные результаты процедуры «определение аномалий» (см. далее) для фрагмента снимка Hyperion (Tonopah, Nevada, USA), показанного на рис. 2.11, при использовании предварительного MNF-преобразования снимка и без него: *а*) аномалия, полученная с помощью MNF; *б*) аномалия, полученная, без MNF-преобразования. В случае, когда MNF-преобразование использовалось, выделена аномалия, соответствующая одному из имеющихся на снимке литологических типов пород. В случае, когда процедура проведена без использования MNF, аномалия не имеет литологической интерпретации.

2.2.2. Спектры и спектральные библиотеки

Большинство алгоритмов обработки спектральных данных основано на сравнении спектров изображения с лабораторными спектрами. Для этого все алгоритмы используют ряд базисных упрощающих предположений. На основе одного из таких предположений построена модель линейного смешивания. В модели предполагается, что яркость каждого пикселя изображения может быть представлена как линейная комбинация яркостей, составляющих пиксель чистых компонент [26].

Фактически линейное смешивание предполагает, что каждый луч при отражении взаимодействует только с одним материалом. Однако во многих случаях отражение луча от многих материалов не только возможно, но и очень вероятно. Например, множественные отражения являются правилом при наличии на земной поверхности растительности.

Другим базисным предположением является предположение о небольшом конечном наборе компонент, из которого состоят все материалы сцены, и независимости размещения компонент друг от друга. На практике это предположение, как правило, не выполняется. Когда набор компонент меняется внутри сцены, реальные спектры пикселей не соответствуют условиям используемой модели. В этом случае сравнение спектров заданных компонент и реальных спектров приводит к появлению ошибок. Кроме того, предположение о том, что компоненты являются независимыми, также не соответствует действительности.

Выбор компонент природных систем труден из-за чрезвычайной изменчивости природных материалов. Например, для спектрального анализа геологических тел нужно было бы использовать чистые минералы для спектров компонент, но чистые минералы редко встречаются в природе. Замещения катионов и/или анионов в минералах, образование минеральных рядов сложного состава являются общим правилом для природных материалов. Даже для образцов минералов с идентичным составом их спектр будет отличаться в зависимости от степени кристаллизации каждого образца и других факторов, таких как степень выветривания или присутствие в образцах воды. По этой причине спектральные библиотеки, USGS, Jet Propulsion Laboratories (JPL), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) содержат спектры минералов разной степени кристаллизации.

В связи с большой вариативностью спектральные алгоритмы, которые обладают высокой чувствительностью к особенностям целевого спектра, часто становятся неэффективными. Необходимо соблюдать большую осторожность при выборе набора компонент для спектрального анализа. Компоненты, со спектрами которых производится сравнение, должны быть выбраны так, чтобы их распределения были унимодальны и хорошо отделимыми друг от друга. Лучше, если для анализа будет выбран как можно более простой набор компонент.

В последнее десятилетие были сделаны значительные усилия, чтобы собрать базы данных спектров известных материалов, которые принято называть «спектральными библиотеками». Эти библиотеки включают спектры искусственных материалов, чистых и природных минералов, спектры различных видов растений и различные смешанные спектры. В библиотеки объединены лабораторные спектры, полученные спектрометрами в контролируемых лабораторных условиях, спектры, полученные полевыми спектрометрами в полевых условиях, и спектры дистанционных изображений.

Некоторые спектральные библиотеки включены в модуль Imagine Spectral Analysis. Библиотеки спектров минералов USGS и JPL содержат спектры «стандартных образцов» минералов, измеренные в лабораторных условиях для VIS-диапазона и диапазонов от NIR до SWIR. Выражение «стандартные образцы» означает, что состав всех минеральных образцов точно известен, хотя это также справедливо не для всех случаев. Эти библиотеки могут быть использованы совместно с библиотекой ASTER, которая содержит спектры, измеренные преимущественно в MWIR-диапазоне.

На рис. 2.10 приведены лабораторные спектры некоторых минералов: *а*) баддингтонит; *б*) каолинит; *в*) доломит; *г*) алунит из библиотеки USGS.

2.2.3. Процедуры обработки гиперспектральных данных

Модуль Imagine Spectral Analysis включает ряд аналитических содержательных процедур. Каждая процедура — это набор описанных выше функций, выполняемых в определенной последовательности, для решения определенной содержательной задачи. Поддерживаются следующие аналитические процедуры: определение аномалий, определение цели, картирование материалов, идентификация материалов [41].

Каждая процедура использует один из алгоритмов сравнения спектров:

- проекция в ортогональное подпространство OSP (Orthogonal Subspace Projection);
- минимизация с ограничениями CEM (Constrained Energy Minimization);
- картирование по спектральному углу SAM (Spectral Angle Mapper);
- картирование по спектральной корреляции SCM (Spectral Correlation Mapper).

Алгоритм OSP (Orthogonal Subspace Projection — ортогональное подпространство) редуцирует размерность данных, подавляя спектры материалов фона и усиливая целевой спектр. Этот метод предполагает, что материал целевого спектра может быть представлен в очень низких концентрациях. Техника OSP полезна для определения искусственных объектов на фоне естественной среды. При использовании OSP часто нет необходимости корректировать записанные сенсором яркости в значения яркости земных объектов, поскольку алгоритм может оперировать с некорректируемыми значениями яркости.

Это делает необязательной атмосферную коррекцию, поэтому задачи, которые используют OSP, — «определение аномалий» и «определение цели» — могут не включать шаг атмосферной коррекции. Для «определения цели» в этом случае целевой спектр будет взят из изображения, для которого проводится анализ. Если источником целевого спектра является спектральная





90

библиотека или другое изображение, данные должны быть подвергнуты атмосферной коррекции.

Алгоритм CEM (Constrained Energy Minimization — минимизация с ограничениями) максимизирует целевой спектр и подавляет неизвестные спектры, составляющие фон. Но этот алгоритм (в отличие от OSP) не предполагает, что материал, соответствующий целевому спектру, встречается в очень малых концентрациях. Таким образом, если используется CEM-алгоритм, целевой материал может быть материалом, который широко распространен в пределах анализируемой сцены.

Алгоритм SAM (Spectral Angle Mapper — картирование по спектральному углу) при сравнении спектров использует «угол» между ними. Каждый спектр рассматривается как вектор в N-мерном пространстве, где N соответствует количеству каналов в изображении. Поскольку SAM выдает результат сравнения как косинус угла между векторами, результат сравнения меняется в интервале между 0 и 1 (1 представляет максимально возможное совпадение).

Использование SAM позволяет производить сравнения гораздо быстрее. Отраженные спектры могут быть лабораторными спектрами, спектрами, измеренными в поле, или спектрами, взятыми из анализируемого изображения. Этот метод предполагает, что анализируемое изображение было калибровано в отраженные яркости. Эта техника учитывает направление векторов, но не учитывает их длину, что делает этот алгоритм нечувствительным к вариациям яркости, которые определяются, например, топографией.

Алгоритм SCM (Spectral Correlation Mapper — картирование по спектральной корреляции) является модификацией SAM подхода, в котором данные нормализованы на средние значения спектров. Этот метод имеет ряд преимуществ перед SAM. Например, он предполагает, что положительные и отрицательные корреляции (сравнения векторов) эквивалентны, что не выполняется для SCM.

Определение аномалий

Процедура «определение аномалий» идентифицирует участки гиперспектрального изображения, которые могут содержать материалы с аномальными спектрами. Пользователь получает ответ на вопрос: есть ли что-нибудь необычное в анализируемой сцене? Это могут быть, например, искусственные материалы, которые присутствуют на снимке, или выход гидротермальных пород в сланцевой толще. Если в дальнейшем будет необходимо установить, из каких материалов состоит выделенная аномалия, может быть использована задача «идентификация материалов».

Для решения задачи используется метод OSP, который редуцирует размерность данных, переводя их в ортогональное пространство меньшей размерности. Это позволяет подавить помехи и таким образом повысить значимость целевого спектра. Метод дает возможность выделить очень низкие концентрации материалов, которые могут иметь субпиксельные пространственные размеры.

Поскольку процедура не использует спектральные библиотеки, выполнение атмосферной коррекции становится необязательным, что упрощает определение аномальных значений. Эта процедура может применяться на ранних стадиях исследования, когда априорная информация еще не собрана.

На рис. 2.11 представлены результаты обработки фрагмента снимка Hyperion (Топораh, Nevada) для определения аномальных значений. Можно видеть, что выделенные цветом максимальные значения аномалии, по-видимому, совпадают с одной из литологических разновидностей пород, представленных на снимке. Определение аномалий основано на применении неуправляемой классификации, т. е. используются только данные, имеющиеся на снимке, без априорной информации о материалах сцены. Возможность простой геологической интерпретации результата неуправляемой классификации свидетельствует о высоком потенциале гиперспектральных данных для литологической интерпретации минералов.

Определение цели

Эта процедура позволяет определить участки изображения, на которых присутствует материал, определенный аналитиком как целевой. Пользователь может выбрать OSP, CEM, SAM или SCM методы.

Спектр, соответствующий целевому материалу, может быть выбран из спектральной библиотеки, такой как USGS, JPL или ASTER, содержащей спектры известных материалов. Целевой спектр может также быть спектром, который соответствует спектру заданного участка изображения. Примером использования процедуры может служить поиск участков, спектр которых соответствует спектру заданного минерального типа.

Если целевой спектр был выбран из анализируемого изображения, атмосферная коррекция становится необязательной. Если же целевой спектр выбирается из одной из спектральных библиотек или был взят из другого изображения, исследуемое изоб-



Рис. 2.11. Спектральная аномалия, выделенная для фрагмента снимка Hyperion (Tonopah, Nevada): *a*) фрагмент снимка Hyperion, представленный каналами 204 : 150 : 93; *б*) выделенная спектральная аномалия (цветом отмечены максимальные аномальные значения)

ражение должно быть откорректировано, чтобы соответствовать отраженным яркостям объектов.

На рис. 2.12 представлены результаты обработки фрагмента снимка Hyperion (Tonopah, Nevada) для двух целевых материалов, взятых из спектральной библиотеки USGS: алунит GDS82 Na82 и ярозит GDS24 Na. Цветом выделены площади, соответствующие максимальным значениям аномалий.

Картирование материалов

С помощью этой процедуры можно определить область распространения специфицированного материала или материалов, используя их спектры (которые должен указать пользователь). Могут быть выбраны СЕМ, SAM или SCM методы. Для каждого материала выход представлен полутоновым (grayscale) изображением, каждый пиксель которого дает вероятную величину (которая соответствует части пикселя, занятого целевым материалом) содержания материала в соответствующем пикселе входного изображения. В качестве материалов для поиска могут быть заданы, например, спектры минералов или растительности



Рис. 2.12. Результаты обработки фрагмента снимка Hyperion (Tonopah, Nevada) процедурой «определение цели» для целевых спектров: алунит GDS82 Na82 (*a*) и ярозит GDS24 Na (*b*). На результирующих изображениях цветом выделены площади, соответствующие максимальным значениям аномалий для алунита GDS82 Na82 (*b*) и ярозита GDS24 Na (*c*)

определенного типа, которые могут быть широко распространены в пределах сцены.

Этот алгоритм предназначен для определения широко распространенных материалов, встречающихся, возможно, в субпиксельных концентрациях. Поэтому картирование может не обнаружить материал с очень низкими концентрациями. Типичными материалами, для обнаружения которых используется картирование, являются определенные типы минералов или редкая растительность.

В качестве примера процедура «картирование материалов» была применена к фрагменту снимка Hyperion (Tonopah, Nevada). В процедуру была введена информация, характеризующая сенсор, проведен контроль качества каналов, для уменьшения уровня шума был выбран метод IARR. Процедура атмосферной коррекции не проводилась.

В пределах фрагмента были выбраны три контрольные точки, соответствующие трем вероятным литологическим типам пород, которые можно различить на снимке. Для выбранных контрольных точек была проведена процедура картирования. На рис. 2.13 представлен фрагмент снимка Hyperion (*a*) и 3 канала изображения (δ -*г*), полученного в результате проведения процедуры.

В качестве другого примера процедура «картирование материалов» была применена к снимку AVIRIS. Для снимка, подвергнутого атмосферной коррекции, в качестве эталонов были выбраны спектры минералов алунит, монтмориллонит и каолин (несколько близких спектров для каждого из минералов) из библиотеки USGS. Для картирования использовались каналы AVIRIS в спектральном диапазоне 2,0–2,40 мкм. На рис. 2.14 (Cuprite, Nevada) представлены результаты выполнения процедуры: *a*) снимок AVIRIS; *б*) композит, полученный из изображений, соответствующих вероятным областям распространения целевых минералов: красный канал — алунит, зеленый — монтмориллонит; синий каолин.

Идентификация материалов

Эта процедура логически противоположна процедуре «определение цели» или «картирование материалов». Вместо того чтобы выбрать целевой материал из библиотеки и определять с помощью программы площади в сцене, где представлен этот материал, пользователь отмечает точку или площадь на изображении и программа, на основе списка потенциальных спектров, определяет, какие материалы могут быть там представлены



б



Рис. 2.13. Результаты применения процедуры «картирование материалов»: a) фрагмент снимка Hyperion (Tonopah, Nevada); б-г) 3 канала выходного изображения, полученного в результате проведения процедуры. В качестве спектров для сравнения использовались спектры, взятые из анализируемого изображения



а



Рис. 2.14. Результаты использования процедуры «картирование материалов»: *a*) снимок AVIRIS (Cuprite, Nevada); *б*) композит, полученный из изображений, соответствующих вероятным областям распространения целевых минералов: красный канал — алунит, зеленый — монтмориллонит; синий — каолин. В качестве эталонов использовались спектры алунит, монтмориллонит и каолин из библиотеки USGS

7 Г.Г. Райкунов, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина

наиболее вероятно. В этой процедуре могут быть использованы SAM или SCM методы.

Для снимка AVIRIS, из предыдущего раздела для процедуры «картирование материалов», указав заданную точку, можно определить, какие материалы могут быть в ней представлены.

2.2.4. Экспертная система обработки гиперспектральных данных

Дистанционная спектроскопия — инструмент, который применяется для спектральной идентификации и построения пространственных карт материалов на основе характерных химических связей веществ. По сравнению с анализом традиционных МДЗ спектральный анализ требует применения значительно более изощренных средств и должен использовать автоматизированные системы обработки данных на основе математических методов. Программный пакет Tetracorder [21] — экспертная система, предназначенная для управления идентификацией материалов и построением пространственных карт по анализу результатов дистанционной спектроскопии. Для идентификации материалов Tetracorder использует большой набор рабочих алгоритмов, которыми он управляет при помощи экспертных правил, построенных на основе знаний экспертов по проведению спектральной идентификации. Некоторые решения о том, какие алгоритмы будут применяться, принимаются ЭС на основе априорной информации, но большая часть решений принимается непосредственно в процессе проведения спектрального анализа. Если встречаются новые материалы, которые ранее не анализировались ЭС, эксперты расширяют набор правил Tetracorder таким образом, чтобы он был полным и непротиворечивым. Полная система, включая исходный код, командные файлы и спектральные лаборатории, доступна на http://speclab.cr.usgs.gov.

Tetracorder применяется для идентификации самых разных материалов — минералов, растительности, льда, снега, воды и т. д. Результаты интерпретации спектров используются для геологического картирования, мониторинга экологических нарушений, наблюдения за эрозией почв, гидротермальной минерализацией и многих других процессов, происходящих на поверхности Земли. Анализ, проводимый Tetracorder, используется также для изучения других планет, включая атмосферу, поверхность океана и суши. Таким образом, Tetracorder в состоянии обработать данные по планетарной системе в целом.

Для изучения процессов, протекающих на Земле, строятся целевые карты различного содержания. Геологические карты могут включать распределения геологических формаций, почв, минералов, разломов, зон минерализации, строительных материалов и т. д. Карты экосистем отражают различные факторы среды обитания, растительных видов, карты состояния растительности, береговых зон и т.д. Приложения, связанные с окружающей средой, обычно требуют картирования дренажа окисленных вод, нефтяных или других токсичных разливов и утечек, картирования мест возникновения потенциальных лесных пожаров, определения качества воды и т. д. Карты геологических опасностей содержат оценки территорий, опасных во время возможных вулканических извержений, оползней и других геологических катастроф. Карты землепользования демонстрируют влияние антропоморфных факторов на экосистемы, таких, например, как влияние выгула скота на состояние пастбищ и др. Карты глобальных изменений включают альбедо поверхности Земли (как функцию времени), карты типов растительного покрова и их общего распределения, а также распределение льда и снега. Tetracorder в состоянии обеспечить обработку данных и получение необходимых карт для каждой из перечисленных областей.

Описание Tetracorder

Традиционная спектроскопия обычно используется в лабораториях для идентификации твердых, жидких и газообразных материалов. Во многих дисциплинах, от астрономии до химии, формы спектров применяют для определения поглощательных свойств материалов, определяющих химические связи. Методы дистанционного зондирования длительное время применяются для изучения Земли и других планет, но до 90-х годов дистанционное зондирование проводилось мультиспектральными сенсорами, которые не получали непрерывного спектра изображений. Новое поколение гиперспектральных сенсоров, которое используется сегодня, получает непрерывный спектр в определенном спектральном регионе. Таким образом, объединение изображения и спектроскопии способствовало созданию новой дисциплины — дистанционной спектроскопии (imaging spectroscopy). Дистанционный спектрометр получает данные высокого спектрального и пространственного разрешения, что позволяет идентифицировать материал каждого пикселя изображения и таким образом картировать материалы для всего изображения.

Анализ мультиспектральных изображений основан на статистической обработке всех каналов удаленного изображения (или большого участка изображения) одним методом. Для гиперспектральных изображений количество спектральных каналов возрастает в 10–100 раз. Такое разнообразие данных обычно не позволяет применять полученные статистические результаты ко всему изображению (всем его каналам) — результаты обработки становятся привязанными к конкретным сценам, для которых спектры всех каналов сравнительно однородны. Хотя методы, используемые для цифровой обработки сигналов, могут успешно применяться для выделения таких однородных в спектральном отношении областей, этот подход требует, чтобы для каждой выделенной области имелись свои образцы библиотечных спектров. К сожалению, геологические исследования (и многие другие, например, биологические), как правило, не располагают таким количеством лабораторных образцов.

Это обстоятельство приводит к тому, что Tetracorder вынужден использовать методы обработки данных, которые независимо обрабатывают каждый гиперспектральный канал, т.е. каждый спектр изучается независимо от сотен других спектров изображения. К счастью, этот подход достаточно эффективен — он позволяет обрабатывать гиперспектральные изображения, объемы которых значительно превосходят объемы мультиспектральных изображений. Для каждого канала Tetracorder идентифицирует материалы при помощи сравнения дистанционных спектров с большой библиотекой спектров известных материалов, затем, для получения общего заключения, выводы по каждому каналу должны быть интегрированы. Для повышения надежности результатов и увеличения производительности Tetracorder применяет ряд специальных подходов, которые не используются в традиционных исследованиях.

Чтобы повысить надежность результатов, для сравнения спектров используются только те спектральные свойства (характерные части дистанционного спектра), о которых точно известно, что по ним возможно идентифицировать конкретный библиотечный материал (или несколько близких материалов). Поскольку каждое спектральное свойство — результат взаимодействия фотонов определенной энергии с атомами и электронами определенной химической структуры, природа поглощения уникальна для этой химической структуры и фотоны других энергий не поглощаются. Это дает возможность выделить для каждого вещества «активные» и «неактивные» спектральные регионы. Поскольку для каждого материала процессы фотонной абсорбции различных типов проходят в разных областях спектра, Tetracorder проводит раздельный анализ спектра для каждого типа абсорбции (электронной и колебательной). Это позволяет идентифицировать многие компоненты сложных материалов без их совместного анализа.

Представление о диагностических спектральных свойствах является центральной концепцией Tetracorder. Диагностические свойства уникальны для каждого материала по форме и типу поглощения и находятся в строго определенных частях спектра. Части спектра между диагностическими свойствами содержат сравнительно мало информации для идентификации материала.

Так как естественные сцены обычно содержат смесь многих материалов, очень важно, что концепция диагностических свойств позволяет анализировать композитные материалы, для которых результат не может быть получен простым сравнением их спектров. Выбор диагностических свойств основывается на специальных экспертных знаниях специалистов по спектроскопии, геологии и биологии.

Поскольку сравниваются только диагностические свойства материалов, каждое сравнение дистанционного и библиотечного спектров дает информацию только об ограниченном наборе материалов. Например, диагностические спектральные свойства оксидов железа находятся в видимом диапазоне, в то время как диагностические свойства глинистых минералов расположены в диапазоне 2-2,5 мкм (см. гл. 1). Кроме того, пренебрегая частями спектра, которые не связаны с химическим составом изучаемого материала и поэтому не включают диагностических свойств, можно значительно уменьшить «шум», который вносят эти области спектра. Присутствие в спектре нескольких материалов искажает их диагностические свойства, но для многих важных практических случаев диагностические свойства разных материалов мало влияют друг на друга.

Степень сходства между дистанционным и библиотечным спектрами (вычисляемая методом наименьших квадратов) обычно слишком мала, чтобы провести надежное определение неизвестного спектра непосредственно. Хотя диагностические спектральные свойства различных материалов часто попадают в разные области спектра, достаточно большая библиотека содержит многие материалы, которые химически и спектрально похожи. Более того, материалы могут быть спектрально похожи, но химически различны (например, карбонаты, многие органические материалы и некоторые OH-содержащие минералы имеют близкие области абсорбции около 2,3 мкм). Хотя спектры таких материалов не идентичны, вариации спектра делают невозможным введение постоянных порогов для разделения их диагностических свойств, которые обеспечивают высокую вероятность идентификации материалов и одновременно низкую вероятность ошибки.

Пороги при сравнении каждого исследуемого материала должны изменяться в зависимости от того, со спектром какого библиотечного материала он сравнивается. Для решения этой проблемы Tetracorder использует следующий подход: дистанционный спектр количественно сравнивается со всеми спектрами библиотеки, которые содержат сходные диагностические свойства. Для каждого из этих библиотечных спектров определенный набор параметров сравнивается с аналогичными параметрами дистанционного спектра. Материал, библиотечный спектр которого наиболее сходен с дистанционным спектром, выбирается в качестве одного из целевых материалов.

Возможность ложной идентификации спектра и, следовательно, целевого материала, сохраняется в случае, если разные материалы имеют диагностические спектральные свойства в пределах одного региона и формы спектров случайно похожи. Алгоритм сравнения использует спектры, прошедшие процедуру нормализации. Случайные совпадения, которые приводят к неоднозначности идентификации, часто являются следствием изменения формы спектра после нормализации. Но даже если формы спектров похожи в диагностическом регионе, они будут отличаться в других областях спектра. Tetracorder уменьшает случайную неоднозначность идентификации материала, используя дополнительную спектральную информацию. Этот подход применяется также для исключения неоднозначности в идентификации минеральных рядов, которые имеют похожие формы спектров в диагностическом диапазоне, но различные формы спектров в других лиапазонах.

Все же, в некоторых случаях, Tetracorder должен оставить заключение по идентификации материала неопределенным. Это может случиться, например, когда качество интерпретируемого спектра не позволяет начать идентификацию ни по одному из библиотечных материалов. В других случаях ограничения, применяемые для разрешения неоднозначности результата, не позволяют идентифицировать ни один из материалов. В этих случаях на основе экспертных правил Tetracorder делается вывод, что анализируемый спектр не совпадает ни с одним из спектров, имеющихся в библиотеке.

Описанный подход подразумевает, что данная библиотека спектров является полной и исключает неоднозначность. Для многих областей, в которых использовалась библиотека, она действительно является полной, поскольку в библиотеку добавлялись спектры всех материалов, которые были найдены в полевых спектральных тестах. Все же Tetracorder не может полностью разрешить неоднозначность, свойственную спектроскопии. В тех случаях, когда мнения экспертов расходятся, Tetracorder также получает неоднозначное заключение, поскольку он пытается разрешить встречающиеся неоднозначности теми же методами, которыми пользуются спектроскописты. Например, полемика вокруг того, представлены ли некоторые области поверхности Европы (спутника Юпитера) гидратами или продуктами радиолитических реакций, не может быть решена только в рамках дистанционного подхода [21].

Применение Tetracorder

Первоначально ЭС Tetracorder была разработана для обработки данных дистанционной спектроскопии, которые были получены в рамках программ NASA, таких как EOS HIRS (Earth Observing System - система наблюдений Земли HIRS) и других. Затем для анализа стали доступны значительно большие по объему данные, полученные по программе JPL Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Эти данные были использованы для тестирования ЭС, поскольку результаты их интерпретации могли быть проверены. Сегодня AVIRIS наиболее производительный и широкодоступный спектрометр, используемый для дистанционного зондирования Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Спектральное разрешение около 10 нм и отношение сигнал/шум, превышающее 500 для большинства длин волн, позволяет AVIRIS получать данные, которые идеально подходят для анализа индивидуальных спектров. Атмосферная коррекция данных AVIRIS хорошо разработана, эффективна и регулярно используется для всех наборов данных. Применяя эти данные, Tetracorder может игнорировать атмосферные эффекты (исключая спектры, в которых уровень отраженного сигнала очень низок), что упрощает интерпретацию и значительно расширяет диапазон использования системы.

В следующей главе в качестве примеров заключений, полученных при помощи Tetracorder, приводятся данные AVIRIS 1995 г. для района Cuprite Mining District (Nevada, USA). Для обработки этих данных Tetracorder анализировал 254 спектральные категории, из которых заданному порогу соответствовали более 70. Для каждой из этих категорий были выделены одна или несколько пространственных групп пикселей. Литологические схемы железосодержащих и глинистых минералов, слюд и сульфатов для участка Cuprite (Nevada), построенные экспертной системой Tetracorder 3.3 на основе данных AVIRIS 1995 г., приведены в [19]. Некоторые из этих групп соответствовали растительности, но большинство — минералам со сложным характером распределения. На этом участке Tetracorder также выделил встречающиеся типы растительности и распределение воды в листьях растений. Некоторые минералы, появившиеся на картах только в отдельных пикселях, не показаны, но специально сделанные снимки AVIRIS более высокого разрешения подтвердили присутствие этих небольших выходов. Полевыми работами было заверено присутствие всех минералов, за исключением пирофиллита — Tetracorder ошибочно идентифицировал пирофиллит в тех случаях, когда алунит встречался в сочетании с растительностью.

Проведенный Tetracorder анализ показывает, что область Cuprite сложена двумя гидротермальными центрами, которые формировались независимо друг от друга. Состав зон западного центра изменяется от мусковита (серицита) во внешних зонах к каолиниту, Na-алуниту (через К-алунит) во внутренних. Восточный центр имеет аналогичные внешние зоны от (Na-K)алунита, через К-алунит, с центральной шапкой, сложенной кислыми породами (кремнеземом). Западный центр глубоко эродирован, поэтому верхние слои гидротермальной системы, которые должны быть представлены шапкой кислых пород, замещаются более глубокими горизонтами. Некоторые минералы, представленные в восточном центре, сформированы на самых верхних горизонтах гидротермальной системы, вдали от источника тепла и поэтому принадлежат к более низкотемпературным формациям по сравнению с минералами, представленными в западном центре.

Присутствие некоторых минералов и их положения в минеральных сериях (например, высокое, вместо низкого, содержание Al-мусковитов, Na-алуниты вместо K-алунитов, диккиты и т. д.) в определенных горизонтах гидротермальных центров существенно ограничивают условия их формирования, что позволило сделать вывод о независимом формировании гидротермальных центров. Без проведения дистанционной спектрометрии этот вывод потребовал бы проведения большого количества лабораторных анализов. Минеральная схема района Cuprite [19], построенная на основе данных дистанционной спектрометрии, содержит много дополнительной информации, например, на ее основе можно выделить границы разрывных нарушений, которые не показаны на существующих геологических картах. Маловероятно, что сложные взаимоотношения, которые были построены на основе дистанционной спектроскопии, можно было бы выделить даже на основе подробных карт, построенных на основе полевых данных.

Схемы, подобные схеме, построенной для района Cuprite, не отображают геологические формации, однако могут быть использованы и для картирования геологических формаций или для более подробного деления геологических единиц; они особенно важны, если наблюдаются постепенные изменения минералогического состава. Таким образом, ЭС Tetracorder, обеспечивая обработку данных дистанционной спектрометрии, дает полевым геологам принципиально новый инструмент, который позволяет им сосредоточиться только на наиболее интересных участках и, таким образом, получить гораздо более полную интерпретацию. В целом минеральное картирование по сравнению с традиционными методами позволяет исследовать большие районы за существенно меньшее время.

Развитие Tetracorder

ЭС Tetracorder применяет для идентификации материалов подход, который в основном имитирует работу опытного спектрометриста, но делает это на более высоком уровне, используя количественные процедуры, что позволяет достичь высокого качества интерпретации. В то же время имеются очевидные направления, требующие дальнейшего изучения и развития для улучшения работы системы [21]. Одним из таких направлений является обоснование выбора количественных параметров для идентификации каждого материала. Значения таких параметров могут быть проверены в лабораторных условиях путем создания искусственных смесей или путем анализа естественных материалов и смесей.

Другим направлением исследований является повышение устойчивости результатов, получаемых Tetracorder. Когда сенсор пролетает над одним и тем же участком земной поверхности с минимальными изменениями параметров спектральной выборки, по́лосы спектра и пространственного разрешения, так же как идентифицируемые материалы, обязательно должны оставаться теми же. Если сенсор пролетает над геологически различными регионами, в которых существуют одни и те же минералы, эти минералы также должны быть идентифицированы одинаково. К сожалению, эти условия часто не выполняются некоторыми идентифицирующими алгоритмами, которые используют статистический подход. Tetracorder, применяя большой набор экспертных правил, должен давать более устойчивые интерпретации, которые не будут зависеть от условий съемки.

ЭС Tetracorder принимает корректные решения при интерпретации спектров благодаря тому, что для него разработан надежный набор экспертных правил, которые используют около 250 ссылочных спектров для идентификации минералов, растительности, воды, льда и снега, природных и искусственных материалов. В будущем предполагается применять гораздо больше (несколько тысяч) ссылочных библиотечных спектров. Это позволит увеличить качество спектральных интерпретаций Tetracorder для самых разных поверхностных условий, включая поверхности других планет. В последнее время Tetracorder был расширен нечеткой логикой (которая заменила жесткую пороговую логику), было добавлено большее количество новых алгоритмов (включая алгоритмы для анализа сложных материалов). Для интерпретации спектров, полученных с космических аппаратов и телескопов, добавлено большое количество новых правил, учитывающих отсутствующие на земной поверхности температуры и давления. Новые правила были использованы, например, для обработки данных, полученных с различных космических аппаратов, таких как Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer, Galileo NIMS и Cassini VIMS.

Глава З

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1. Обработка гиперспектральных данных района Cuprite (Nevada, USA)

Гиперспектральные сканеры применяются уже более 20 лет, из них наиболее успешным до сих пор остается разработанный NASA сенсор AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer), а данные, полученные им для района Cuprite (Cuprite Mining District, Nevada) и обработанные в JPL AVIRIS (JPL-NASA, Pasadena, California) и лаборатории Spectroscopy Group (U.S. Geological Survey, Denver, Colorado) в 1990–1995 гг., остаются наиболее наглядным примером использования данных дистанционной спектрометрии [40].

Район Сuprite расположен в юго-западной части штата Невада (США) и хорошо исследован (золото и медь добывались в этом районе более века). Поэтому район является очень удачным для оценки возможностей дистанционной спектроскопии в целях разведки полезных ископаемых. Благодаря широкому развитию гидротермальных изменений и других видов поверхностной минерализации район особенно удобен для проведения исследований по использованию гиперспектральных данных. Гидротермальные изменения затрагивают здесь несколько типов вулканических третичных отложений, представляя большое разнообразие гидротермальных минералов.

Результаты и возможности литологического картирования района Cuprite на основе данных дистанционной спектроскопии AVIRIS, полученных в 1993–1995 гг., опубликованы в ряде работ [19, 20, 22]. Геологическая схема района и схема гидротермально-измененных пород района приведены в [17]. Обе схемы были разработаны на основе комбинации данных Landsat TM и полевых материалов [9] и затем модифицированы [27]. Восточная часть района сложена гидротермально измененными вулканическими породами и включает интенсивно окварцованные зоны, окруженные менее измененными опализированными и аргилитизированными породами. Западная состоит из гидротермально измененных вулканических пород, кембрийских алевритов и известняков. Она также включает окварцованные, опализированные и аргилитизированные зоны. Измененные алевриты преобладают в гидротермально измененных породах северной части, известняки — в южной части района Cuprite Hills.

Для района характерны разнообразные вариации вещественного состава минералов, которые могут обнаруживаться при изучении их дистанционных спектров. Например, изменяется степень кристаллизации каолинита; монтмориллониты представлены членами ряда Na-Ca-монтмориллонитов, алуниты — членами ряда Na-K-алунитов. Постоянно встречаются в пределах района каолинит с бедной кристаллизацией или галлуазит (являющиеся результатом выветривания), но ближе к гидротермально измененным зонам степень кристаллизации каолинита постепенно возрастает. Каолинит с высокой степенью кристаллизации встречается только вне алунитовых зон [15].

В районе Cuprite [8] были выделены два центра гидротермальных изменений — восточный и западный. Описаны гидротермальные изменения, которые затрагивают третичные вулканические породы в восточной зоне и кембрийские метаосадочные породы в западной зоне. Задача более поздних исследований [40] заключалась в определении того, развивались эти позднемиоценовые гидротермальные зоны независимо или были сформированы одновременно, при образовании дизъюнктивного нарушения (листрического типа). Оба гидротермальных центра могли быть сформированы из единственного выводного вулканического канала в процессе опускания восточного блока, которое переместило остывающую верхнюю часть гидротермальной системы к востоку по отношению к ее более высокотемпературной нижней части.

Ответ на этот вопрос с большой степенью достоверности был получен путем исследования минералов, состав которых зависит от палеотемператур формирования гидротермальных центров. Для оценки палеотемператур [39] применялась дистанционная спектроскопия и имеющиеся данные по району исследования (работа содержит геологические карты района, данные изотопного анализа и заверочного бурения). Для изучения глубинного строения использовались геоэлектрические разрезы, построенные методом измерения сопротивления на постоянном токе [39], которые позволили восстановить строение разрезов. В [39] приведена также заключительная схема гидротермальных изменений двух гидротермальных центров, построенная по данным AVIRIS, по-
лученным в 1995 г. Сканер был установлен на борту самолета NASA ER-2, сканирование проводилось с высоты 20 км.

Для оценки палеотемператур в обоих центрах гидротермальных изменений были использованы литологические карты района, построенные для спектров поглощения железосодержащих минералов, глин, сульфатов, карбонатов, слюд и силикатов. Обработка данных проводилась с помощью экспертной системы Tricorder, используемой USGS с 1988 г. [12]. Результаты литологической интерпретации данных AVIRIS позволяют утверждать, что западный гидротермальный центр не содержит интенсивно окварцованного ядра. Ядро центра сложено пропилитизированными породами с низким содержанием каолинита и мусковита. Ядро западного центра окружено зоной высокотемпературных алунитов. Центр глубоко эродирован, при этом вскрыты высокотемпературные каолинитовые полиморфные диккиты и зоны, богатые пиритом.

В южной части западной гидротермальной зоны, в непосредственной близости от кварц-диоритовых даек, мусковиты постепенно обогащаются алюминием. Вероятно, эти изменения состава мусковитов коррелируются с увеличением палеотемператур около интрузивных тел. Для восточного центра данные дистанционной спектрометрии указывают на наличие интенсивно окварцованной зоны, окруженной зоной алунитов, температура формирования которых менялась от высокой до средней. Пропилитовое ядро для восточного центра (по крайней мере, для имеющегося уровня эрозионного среза) не установлено. Центры имеют развитые каолинитовые зоны, обедненные диккитом и содержащие незначительные объемы ярозита. Все эти выводы, проведенные на основе данных AVIRIS, полностью согласуются с полевыми исследованиями, проведенными для района Cuprite, в том числе с полевыми исследованиями обнажений, проведенными для верхней части гидротермальной системы [39].

Обломочная формация кембрийских филлитовидных сланцев, измененных до алунитов, была эродирована и переотложена из западного гидротермального центра в конгломераты горизонта Stonewall Flat Tuff (Spearhead) в восточном гидротермальном центре. Очевидно, западный гидротермальный центр после формирования был поднят и эродирован. Эрозия горизонта туфов Stonewall Flat Tuff и подстилающих его конгломератов продолжалась из зоны аргиллитов в зону алунитов и зону окварцевания восточного центра. Данные изотопного K-Ar-метода указывают на то, что вся гидротермальная активность охватывает, по крайней мере, 1,4 млн лет в западном гидротермальном центре, но имеет гораздо меньшую продолжительность в восточном гидротермальном центре.

Кварцевые лавовые интрузивы (латиты) были вскрыты шестью скважинами из девяти в понижении между гидротермальными центрами [39]. Вариации глубины фундамента, вскрытые скважинами, указывают на существование здесь сложного блокового дизъюнктивного нарушения. Общий восточный сброс, ориентированный с севера на юг и ограниченный восточной окраиной западного центра, составляет около 400 м. Геоэлектрический профиль позволяет утверждать, что утолщенный (до 170 м) слой конгломератов перекрывает опрокинутый сброс третичных вулканических пород западного падения. Большая зона низкого сопротивления под восточным центром, вероятно, является северным продолжением латитовой кварцевой дайки источником гидротермальных флюидов, посредством которых и были сформированы центры гидротермальных изменений.

Большинство геологических и геофизических свидетельств, приведенных в [39], согласуются с вариантом самостоятельного развития двух центров гидротермальной активности района, которые являются результатом активности близко расположенного вулканического центра Stonewall Mountain. Часть избыточного ярозита в западном центре маркирует положение окисленного пирита, появившегося на начальной стадии минерализации. Недостаток Си-сульфидных минералов на следующей стадии развития гидротермальной системы может объяснить, например, отсутствие золота в западном центре.

В целом проведенные исследования позволяют сделать вывод, что западный центр был глубоко вскрыт эрозией (это соответствует высоким значениям зафиксированных здесь палеотемператур). Восточный центр был вскрыт незначительно (что соответствует более низким палеотемпературам), очень близко к первоначальной палеоповерхности. Эти заключения были сделаны [39] по дистанционным данным на основании идентификации минеральных ассоциаций, соответствующих различным палеотемпературным режимам в гидротермальных центрах.

Таким образом, дистанционная спектроскопия предоставляет уникальные возможности для исследования минерального состава пород, поскольку позволяет определять вариации минерального состава (и, следовательно, давления и температуры) и химические градиенты с обзорностью и детальностью, которые никогда не были доступны ранее. Вместе с выборочными полевыми геохимическими исследованиями методы дистанционной спектроскопии могут обеспечить картирование этих параметров в больших объемах буквально в течение нескольких часов. Перспективы для приложений, которые здесь открываются, поистине безграничны. В [22] представлены трехмерные схемы района Cuprite, полученные на основе модели рельефа и результатов анализа гиперспектральных снимков AVIRIS экспертной системой Tetracorder 3.3 для железосодержащих минералов, глинистых минералов, слюд и сульфатов.

Основываясь на изучении поверхностных гидротермальных изменений как основных факторов, определяющих возможности оценки рудных месторождений, можно сделать вывод, что район Cuprite предоставляет уникальные возможности не только для демонстрации возможностей гиперспектральных методов наблюдений, но и для дистанционных исследований в целом. Вероятно, дистанционная спектрометрия будет основной технологией будущих программ исследований рудных месторождений. Основным инструментом исследования должны стать космические системы, возможности которых потенциально шире возможностей систем с аэросенсорами.

3.2. Картирование на основе данных AVIRIS

За последнее десятилетие инструменты и методы анализа, используемые в дистанционной спектрометрии, были значительно усовершенствованы. В работе [19] описывается развитие аппаратуры AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer), которое было осуществлено NASA/JPL в период с 1990 по 1995 гг., исследуется качество данных (определяемое отношением сигнал/шум) и рассматривается эволюция методов анализа данных на примере района Cuprite. Детальное изучение этого района одновременно на основе данных AVIRIS и проведенных полевых наблюдений позволило глубже понять проблемы дистанционного литологического картирования и значительно усовершенствовать аппаратуру и программное обеспечение анализа данных. По мере того как аппаратура совершенствовалась, съемки района проводились каждый год. Пустынный климат Cuprite обеспечил стабильные условия съемки, что позволило сравнивать сенсоры и методы, используемые для обработки данных в разные годы.

Геология района Cuprite хорошо изучена [39], что позволило разработать стратегию оценки данных, ориентированную на результаты картирования. Кроме того, авторы работы имели значительный опыт использования аппаратуры AVIRIS в других районах. Ими были систематизированы и объединены в библиотеку лабораторные спектры минералов, разработаны методы спектроскопии аморфных (некристаллических) минеральных типов, растительности, смешанных минеральных типов. Этот опыт был использован для усовершенствования методов спектральной идентификации, способных работать в наиболее сложных геологических ситуациях. Отмечается, что в целом улучшить степень детализации карты позволили два фактора — совершенствование качества аппаратуры, которое характеризуется уровнем отношения сигнал/шум, и использование новых методов обработки данных. В работе [39] проведен анализ влияния каждого из этих факторов на результаты картирования.

Сравнение уровня шума проводилось на данных AVIRIS 1990, 1993 и 1995 гг. Для каждого набора данных строились два типа карт распространения минералов. Карты первого типа включали минералы, спектры которых демонстрируют электронную абсорбцию, что обычно проявляется в диапазонах от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного (около 1 мкм) и типична для железосодержащих минералов. Второй тип карт показывал распространение минералов, спектры которых демонстрируют колебательное поглощение. Такое поглощение проявляется в ближнем инфракрасном диапазоне, где основные диагностические свойства спектра сосредоточены в диапазоне 2–2,5 мкм. Эти карты включают в свой состав минералы глин, других слоистых силикатов, карбонаты и сульфаты.

Для района Cuprite Mining District на основании использования данных AVIRIS и алгоритма MSFMA (Multiple Spectral Feature Mapping Algorithm) были построены литологические карты распространения 18 основных минеральных типов района [14]. Район, расположенный в юго-западной Неваде (см. выше), включает два центра гидротермально измененных пород: гидротермальные изменения в восточном центре затрагивают третичные вулканические вмещающие породы, в западном центре кембрийские метаосадочные вмещающие породы. На литологических картах центры гидротермальных изменений состоят из несколько зон. В западном центре зоны меняются (от периферии к центру) от серицита до галлуазита-диккита, каолинита и Na-алунита через промежуточные зоны, включающие К-алунит с галлуазитом. Зональность восточного центра изменяется от галлуазита до каолинита через алунит и К-алунит с центральным ядром, включающим гейзерит (siliceous sinter).

Для картирования на основе материалов AVIRIS минеральные типы этого района были разделены на подклассы. Например, группа каолинита была разделена на подклассы, включающие

112

смешанные кристаллы каолинита (высокой степени кристаллизации), алунита и монтмориллонита и различающиеся содержаниями ярозита, гетита, гематита, и минералы, содержащие группу аммония. Затем на основе построенных литологических карт в поле было отобрано более 60 образцов, представляющих каждый из выделенных подклассов минералов. Для предварительной идентификации образцов в поле использовались полевые спектрометры типа PIMA II. Для внутренних частей образцов и (отдельно) для их внешних частей, подвергнутых естественному выветриванию, был использован спектральный анализ в лабораторных условиях (применялся спектрометр Nicolet 740). Во всех случаях минералогия внутренних и внешних частей образцов после проведения лабораторных анализов была отнесена к одному спектральному типу. Для того чтобы окончательно решить вопрос о достоверности спектральной идентификации, 27 полевых образцов 17-ти минеральных типов были проанализированы с помощью методов дифракционного рентгеновского анализа в работе [36].

По данным 1990 г., отношение сигнал/шум для района Cuprite оценивалось примерно как 150 в видимом и 80 в диапазоне 2,2 мкм. По данным 1993 г., это отношение увеличилось до 600 в видимом и примерно до 140 в диапазоне 2,2 мкм. В 1995 г., когда был использован новый детектор, отношение сигнал/шум для района Cuprite достигло 800 в видимом диапазоне и примерно 360 в диапазоне 2,2 мкм. В работах [37, 38] авторы показали, что для методов обработки, которые используют форму спектров, возможность разделения близких минеральных типов в общем пропорциональна отношению сигнал/шум. Таким образом, увеличение отношения сигнал/шум для аппаратуры AVIRIS непосредственно ведет к улучшению качества карт и дает возможность получать обоснованные результаты даже в условиях очень сложной литологии.

В целом аппаратура и программное обеспечение обработки данных AVIRIS претерпели три крупных этапа усовершенствований в 1990, 1993 и 1995 гг.

Данные AVIRIS 1990 г. По мере того как отношение сигнал/шум для AVIRIS улучшалось, авторы совершенствовали метод, который они назвали Tricorder. В работах [12, 14] проведен анализ данных AVIRIS 1990 г. Для анализа использовалось программное обеспечение Tricorder 1.0, с помощью которого можно было одновременно картировать около 30 минеральных типов, но обработка разных спектральных регионов требовала отдельных

8 Г.Г.Райкунов, В.Л.Щербаков, С.И.Турченко, Н.А.Брусничкина

прогонов программы. Кроме того, алгоритм анализировал кратные спектральные линии без учета ограничений непрерывности, и важная дополнительная информация (такая как относительные высоты и углы наклона отражающей поверхности) не использовалась. Для этой ранней версии программы применялась целевая калибровка, для проведения которой требовался учет атмосферного поглощения как функции высоты, что также существенно усложняло анализ. Оценка результатов 1990 г. была проведена при помощи полевых исследований и рентгеновских лабораторных анализов образцов, отобранных при полевых наблюдениях [36].

В результате исследований 1990 г. [15] были нанесены на карты 10 типов филлосиликатов (слоистых силикатов), карбонаты, железосодержашие оксиды и сульфаты (гетит, гематит и ярозит). Карты района, построенные для части спектра, обусловленного колебательным поглощением, ясно показывают восточный и западный центры гидротермальных изменений и их характерные концентрические зоны. По этим данным, западный центр состоит из алунитовой внутренней зоны, окруженной зоной каолинита, которая, в свою очередь, окружена мусковитовой (или серицитовой) зоной. Восточный центр показывает только внутреннюю алунитовую зону, окруженную зоной каолинита. Карты, построенные для части спектра, обусловленной электронным поглощением, показывают восточный центр очень светлым из-за железосодержащих минералов с богатым гематитовым ореолом, охватывающим светлую область. Западный центр включает некоторое количество ярозита и гетита, указывающее на то, что эрозия вскрыла глубокий (богатый пиритом) уровень погребенной гидротермальной системы.

Данные AVIRIS 1993 г. В 1993 г. была разработана версия Tricorder 2.3, которая имела возможность картировать одновременно около 120 материалов, но обработка различных спектральных регионов все еще требовала множества прогонов программы. Для анализа использовались кратные спектральные линии, простые ограничения непрерывности спектра, впервые был применен анализ сложных материалов. Была закончена разработка обширных спектральных библиотек, содержащих спектры большинства минералов. Процедура калибровки была улучшена включением комбинации моделей атмосферной коррекции на основе отражения-передачи и моделей наземных целей, что позволило получить для AVIRIS почти лабораторное качество анализа отраженных спектров поверхности. Оценка качества интерпретации спектров 1993 г. продолжалась на основе полевых исследований при помощи переносных полевых спектрометров и проведения анализа отобранных полевых образцов методами рентгеновского дифракционного анализа.

Tricorder 2.3 одновременно картировал присутствие различных железосодержащих минералов, включая разновидности гематита разной степени кристаллизации и нескольких различных минералов железа, включающих Fe²⁺ (в основном хлоритов и мусковитов). Карты, построенные для части спектра, обусловленной колебательным поглощением, включают 16 минеральных типов, в том числе минеральные ряды алунита и мусковита. Содержательная часть картирования также была значительно улучшена, например, было показано, что большинство минеральных рядов, как и предполагалось, встречается в конусах выноса аллювиальных отложений.

Данные AVIRIS 1995 г. В 1995 г. отношение сигнал/шум для AVIRIS было доведено до уровня, который соответствует уровню многих лабораторных спектрометров. Использование калиброванных данных позволило увидеть сложные спектры, которые раньше были неразличимы из-за шума. Кроме того, усовершенствования программного обеспечения позволили проводить более тонкий анализ, отвечающий новым техническим возможностям [18]. Tricorder 3.3 имел возможность картировать сотни минералов, включая одновременный анализ спектров твердых материалов, жидкостей и газов. Анализ всех спектральных регионов также проводился одновременно, включая анализ множественных спектральных линий. Для анализа использовались алгоритмы, которые учитывали различные виды ограничений. Tricorder превратился в экспертную систему, которая применяла методы искусственного интеллекта и могла принимать решения, анализируя индивидуальные особенности каждого спектра. Алгоритмы Tricorder включали использование «неспектральных» признаков и могли использовать опыт, накопленный при проведении предыдущих анализов. Спектральные библиотеки были расширены спектрами аморфных материалов, новых природных материалов, растительности, снега, воды и некоторых искусственных материалов. Tricorder 3.3 применял образцы спектров многих минеральных рядов. Для получения спектров наземных целей в поле были использованы новые, более точные спектрометры. Как и раньше, для оценки качества данных в 1995 г. использовались лабораторные анализы, но их количество на этом этапе было сокращено.

Результаты картирования по данным 1995 г. показали удивительное качество картирования сложных эталонных объектов. Из примерно 160 имеющихся классов материалов были нанесены на карты 70! Карты, построенные на основе спектров электронного поглощения, содержали 16 классов оксидов железа, Fe²⁺-содержащих минералов и Fe²⁺-минералов, подвергнутых выветриванию. Карты, построенные для части спектра, обусловленного колебательным поглощением, содержали 25 классов, показывая значительно улучшенное разделение минеральных рядов алунитов, мусковитов и их смесей с каолинитами и смектитами. Обе карты вместе показывали 36 классов минералов. Дополнительные карты были необходимы для того, чтобы показывать минералы, которые были представлены только в небольших пятнах или имели низкую концентрацию, а также для картирования разных типов растительности, поскольку эти данные не были представлены на первых двух картах из-за их сложности.

В работе [19] приведена карта распространения минералов, построенная на основе анализа спектров электронного поглощения в минералах, общем для Fe²⁺- и Fe³⁺-содержащих минералов интервале 0,4-1,2 мкм. Каждый минерал имеет специфическую кристаллическую структуру, но небольшие отличия в образцах смещают полосы поглощения в регистрируемых спектрах образцов, даже если эти полосы обусловлены только одним ионом (таким как Fe²⁺). Таким образом, могут быть выявлены специфические минералогические различия. Фактически спектры поглощения настолько чувствительны, что небольшие изменения химии минералов дают ощутимые изменения линии поглощения, что позволяет картировать и минеральные ряды, и замещения в минеральных рядах. Положение полос спектров электронного поглощения строго определено, небольшое смещение линий наблюдается, если минеральная структура включает крупные кристаллы (это называется сатурацией). Таким образом, в определенных условиях может быть определен даже размер кристаллов. К сожалению, линии электронного поглощения обычно широкие и поэтому иногда трудно определить минералы с похожими спектрами. Например, некоторые Fe²⁺-содержащие минералы имеют в этом диапазоне аналогичные линии электронного поглошения.

В работе [19] приведена литологическая схема глинистых минералов, слюд и сульфатов для участка Cuprite, построенная экспертной системой Tetracorder 3.3 на основе данных о распределении минералов, полученных AVIRIS в 1995 г. Схема составлена

116

по результатам анализа линий спектра, обусловленного колебательным поглощением в минералах (в интервале 2-2,5 мкм), в которых присутствуют ионы OH⁻, CO₃⁻ и минералы, содержащие SO₄⁻. Каждый минерал имеет специфическую кристаллическую структуру, но небольшие отличия в образцах смещают полосы поглощения в регистрируемых спектрах, даже если эти полосы обусловлены только одним ионом (в этом случае, например, OH⁻). Таким образом могут быть выявлены специфические минералогические различия. Спектры поглощения настолько чувствительны, что небольшие изменения химического состава минералов дают ощутимые изменения линии поглощения, поэтому могут быть определены минеральные ряды или замещения в минералах. Например, высокие, средние и низкие содержания алюминия в мусковитах или замещение калия натрием в алунитах.

Таким образом, специалисты NASA за эти несколько лет значительно улучшили отношение сигнал/шум для аппаратуры AVIRIS, одновременно были разработаны новые средства анализа данных. Все это дало возможность построить сложные карты распределения минералов с высокой уверенностью в правильности результатов. Увеличение возможностей AVIRIS позволило изучить удивительную сложность минералогии района Cuprite детальность схем, полученных на основе данных дистанционной спектроскопии по району Cuprite, значительно превосходит детальность опубликованных карт, кроме того, дистанционные схемы обладают гораздо большей информацией, чем та, которая представлена на традиционных геологических картах. Авторы работы [22] отмечают необходимость разработки новых методов анализа гиперспектральных данных, которые могли бы использовать эту информацию.

3.3. Картирование на основе данных Hyperion

Гиперспектральные данные на аэроносителях были доступны для исследователей с начала 80-х гг. прошлого века и широко использовались для геологических приложений. Запуск спутника NASA EO-1 с сенсором Hyperion в ноябре 2000 г. был началом использования гиперспектральных данных, полученных с околоземной орбиты. Сенсор Hyperion покрывает спектральный диапазон 0,4–2,5 мкм, имеет 242 спектральных канала, спектральное разрешение около 10 нм и пространственное разрешение примерно 30 м. Многие организации, такие как IGLLC (Imaging and Geophysics LLC — Лаборатория по обработке и анализу гиперспектральных изображений и геофизических данных) и CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization — Содружество по научным и промышленным исследованиям), проводили специализированные исследования в разных регионах по оценке возможности использования Нурегіоп для геологического картирования [29].

Первоначальные результаты для нескольких районов, в которых гиперспектральная съемка была заверена подробными наземными исследованиями, показали, что данные Hyperion могут быть использованы для получения полезной геологической (в первую очередь, литологической) информации. Картируемые минералы на контрольных участках включали карбонаты, хлорит, эпидот, каолинит, алунит, баддингтонит, мусковит, гидротермальные силикаты, цеолиты и др. Данные Hyperion, собранные в оптимальных условиях — летний сезон, яркие (хорошо видимые) цели — показали, что аппаратура Hyperion соответствует заявленным проектным спецификациям и может быть использована для решения литологических задач. Например, на контрольных участках были не только правильно классифицированы сходные породы, состоящие, например, из кальцита и доломита, но и зафиксированы отличия минеральных рядов в слюдах, обусловленные замещениями в минеральных рядах.

Проведенное сравнение аэроданных AVIRIS с данными Hyperion [29] позволило сделать вывод, что Hyperion и AVIRIS в целом обеспечивают аналогичную информацию об основных минералах. Главное ограничение Hyperion состоит в невозможности различить тонкие детали спектра в неоптимальных условиях сбора данных — зимний сезон, темные (плохо видимые) цели. Причиной этого является сравнительно низкое отношение сигнал/шум для аппаратуры Нурегіоп (обычно обозначаемое как SNR — Signal-to-Noise Relation). Приведенные примеры демонстрируют уровень полезной информации, которая может быть извлечена из данных Hyperion. Они демонстрируют также возможности Hyperion как средства гиперспектрального картирования минералов для тех областей, которые по каким-либо причинам недоступны аэросенсорам. Анализ съемок тестовых районов позволяет дать рекомендации о том, какие улучшения необходимы космическим сенсорам, чтобы достичь уровня минералогического картирования, который возможен с помощью аэросенсоров, подобных AVIRIS.

В силу ряда причин для получения дистанционной информации о большинстве минералов на земной поверхности должен

118

использоваться спектральный диапазон 0,4-2,5 мкм. Особенно важным является интервал 2,0–2,5 мкм ближнего инфракрасного диапазона (SWIR), который включает основные спектральные свойства гидроксилсодержащих минералов, сульфатов и карбонатов, которые характерны для многих типов горных пород и многих типов гидротермальных изменений. В этом диапазоне спектрально различимы такие минералы, как каолинит, алунит, мусковит, пирофиллит и др., что необходимо для геологического исследования территории. Запуск ЕО-1 продемонстрировал, что большинство этих возможностей может быть использовано и на спутниковой аппаратуре. В работе [29] возможности аппаратуры Hyperion сравниваются с возможностями аэросенсоров. Главный критерий оценки качества дистанционной аппаратуры отношение сигнал/шум (SNR) — оценивался для «зимних» данных Hyperion для района Cuprite (Nevada) и для «летних» данных для района Death Valley (California).

Гиперспектральные сенсоры обеспечивают сбор уникальных дистанционных данных, которые невозможно получить другим способом. Современные аэросенсоры, доступные уже на протяжении более 20 лет, обеспечивают высокое пространственное разрешение (2–20 м), прекрасное спектральное разрешение (10–20 нм) и имеют великолепное отношение сигнал/шум (около 500 : 1). Примером такой аппаратуры является сенсор AVIRIS, разработанный NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory). Сенсор имеет 224 канала со спектральным разрешением около 10 нм в диапазоне 0,4–2,5 мкм и используется как исследовательский инструмент на борту самолета NASA ER-2 с высоты 20 км, что позволят получать снимки с разрешением 20 м при 10,5 км ширине полосы съемки. С 1998 г. AVIRIS также используется на самолете Twin Otter, позволяя с высоты 2–4 км получать снимки 2–4-метрового пространственного разрешения.

Запуск сенсора Нурегіоп на борту NASA EO-1 в ноябре 2000 г. позволил использовать возможности минералогического картирования из космоса. Нурегіоп имеет диапазон 0,4–2,5 мкм, 242 спектральных канала приблизительно 10 нм спектрального разрешения и 30-метровое пространственное разрешение с орбиты 705 км. Данные Нурегіоп хранятся как 8-битные значения для каждого из 242 спектральных каналов в полосе шириной 7,5 км, перпендикулярной траектории движения спутника. Система имеет 2 спектрометра: один для диапазонов видимый и ближний инфракрасный (VNIR) (приблизительно 0,4–1,0 мкм), другой для SWIR-диапазона (приблизительно 0,9–2,5 мкм). Данные калибруются по яркости, используя наземные и орбитальные измерения. Основные сравнительные характеристики аппаратуры AVIRIS and Hyperion приведены в табл. 3.1.

Тип сенсора	Количество спектраль- ных каналов	Спектраль- ное разре- шение, нм	Про- стран- ственное разреше- ние, м	Ширина полосы съемки, км	Отноше- ние сигнал/ шум
AVIRIS (высота 20 км)	224	10	20	12	$\sim 500:1$
Нурег- ion (ор- бита 705 км)	242	10	30	7,5	$\sim 50:1$

Таблица 3.1. Сравнительные характеристики сенсоров AVIRIS и Hyperion

С первых запусков сенсора качество гиперспектральных данных оценивалось на материалах, собранных по району Cuprite, расположенному примерно в 200 км на северо-запад от Лас-Вегаса (Невада). В геологическом отношении район является относительно ненарушенной деятельностью человека кислосульфатной гидротермальной системой в вулканических вмещающих породах. Хорошая обнаженность района демонстрирует гидротермально измененные минералы, состоящие в основном из каолинита, алунита и гидротермального кварца. Геология района и гидротермальные изменения были детально описаны в работе [9]. В работе [39] дается подробное геологическое заключение по району, приводится генерализованная геологическая карта и детальные литологические карты, построенные по данным AVIRIS (см. выше).

Качество данных дистанционной системы напрямую зависит от уровня системного шума (SNR). Это отношение описывает общую радиометрическую характеристику любой съемочной системы [5]. Системный шум в основном зависит от того, как сенсор был спроектирован: важными являются такие характеристики, как производительность/чувствительность детектора, пространственное/спектральное разрешение и характеристики шумов системной электроники, поэтому внутренний уровень шума для данного типа сенсоров обычно фиксирован. Однако во время приема данных на SNR влияют такие внешние факторы, как зенитный угол высоты солнца над горизонтом, ослабление и рассеяние сигнала в атмосфере и другие факторы, которые действуют на сигнал еще до того, как он поступит на сенсор.

Общий метод оценки SNR для дистанционных данных метод, использующий среднее/стандартное отклонение [29]. Этот подход требует определить на снимке спектрально однородную тестовую область, вычислить среднее значение спектра для этой области и определить стандартное отклонение для среднего спектра. Значение SNR вычисляется, принимая в качестве отраженного значения 50-процентное значение амплитуды сигнала. Значение SNR, вычисленное с использованием этого метода, может быть получено непосредственно из данных. Однако этот метод может вести к завышенным значениям SNR. Для ярких целей их SNR могут быть переоценены, если тестовая область недостаточно однородна (или оценка высокой SNR приведет к разделению предполагаемой однородной области на множество подобластей и выбору новой, более однородной области). Другой метод оценки, также дающий завышенное значение SNR прямой анализ данных «темного» сигнала, уровень которого может рассматриваться как уровень «инструментального шума», однако прямое определение возможно не всегда.

Анализ Hyperion-сцен, проведенный в работе [29] для разных тестовых районов, показал, что вычисленные значения SNR в SWIR диапазоне значительно выше летом и ниже зимой. Значения SNR, вычисленные для данных Hyperion по району Death Valley за июль 2001 г. (примерно 60 : 1), существенно выше, чем значения SNR по району Cuprite за март 2001 г. (примерно 25 : 1). Это напрямую относится к качеству картирования минералов, поскольку более низкое значение SNR приводит к выделению меньшего количества деталей.

Для обработки данных тестовых участков [29] использовались методы анализа гиперспектральных данных, разработанные AIG (сейчас Eastman Kodak/Research Systems RSI — исследовательское отделение «Eastman Kodak»), которые позволяют получать результаты, применяя минимум субъективных факторов. Эти подходы реализованы и документированы в ENVI (Environment for Visualizing Images), программной системе, первоначально разработанной AIG. Использованная методика анализа данных включает следующие шаги, которые последовательно применялись для обработки тестовых участков для данных как Hyperion, так и AVIRIS:

- обработка первичных данных (в соответствии с существующими требованиями);
- атмосферная коррекция;

- линейная трансформация отраженных данных для минимизации шума и определения размерности данных;
- локализация пикселей с максимально чистым спектром;
- выделение и автоматическая идентификация составляющих пиксель компонентов спектров;
- пространственное картирование и относительная оценка погрешности для компонентов, присутствующих на изображении.

Обработка первичных данных. Обычно процедуры предварительной обработки данных применяются к данным до проведения атмосферной коррекции. В случае обработки данных Нурегіоп для тестовых районов полученные данные уже прошли предобработку. Тем не менее, данные имели вертикальные полосы (видимые в первичных данных некоторых каналов, которые становились еще более заметными, когда использовалась линейная трансформация данных). Такие полосы характерны для данных, полученных сенсорами, использующими технологию матрицы ячеек (pushbroom), например, для сенсора Hyperion AIS (Airborne Imaging Spectrometer). Другими причинами появления полос могут быть нелинейность детекторов сенсора, смещение детекторов спектрометра относительно фокальной плоскости, температурные эффекты и т. д.

Удаление полос (дестрипинг) для данных Нурегіоп проводилось на основе использования специально разработанной программы, аналогичной программе, написанной для оригинального дистанционного спектрометра (Hyperion AIS). Этот подход корректирует каждую колонку изображения (во всех каналах), основываясь на вычисленном смещении относительно среднего сцены. Реализация включала вычисления среднего спектра (242 канала) для каждого из 256 детекторов Hyperion, которые определяли общий спектр сцены. Каждая колонка спектра затем вычиталась из общего спектра для того, чтобы определить смещение, которое было добавлено к каждому пикселю в соответствующей колонке. Каждый пиксель в каждой колонке данных (определяющих яркость) был затем откорректирован, используя вычисленное смещение.

Атмосферная коррекция. Использовался коммерческий программный пакет ACORN (Atmospheric CORrection Now), который основан на расширенной модели и использует лицензированную технологию MODTRAN-4 для вычисления значений отраженной яркости (reflectance) без наземных измерений [29]. Соответствующие параметры модели (например, высота сенсора), дата (например, дата, время, сезон, атмосферная модель) и положение (например, широта/долгота, средняя высота) задавались для каждого набора данных Hyperion и AVIRIS.

Анализ данных. Для тестовых данных использовались методы гиперспектрального анализа, реализованные в программном пакете ENVI. Применялись следующие процедуры ENVI: спектральное сглаживание; редукция спектральных данных на основе метода MNF (Minimum Noise Fraction); пространственная редукция, использующая PPI (Pixel Purity Index); визуализация данных для определения компонент изображения; идентификация компонент изображения, использующая их отраженные спектры (при помощи Spectral Analyst), и процедуры картирования минералов, которые использовали одновременно SAM (Spectral Angle Mapper) и MTMF (Mixture-Tuned Matched Filtering).

Геометрическая коррекция. Заключительным шагом анализа обычно является представление результатов в картографической проекции. В случае обработки тестовых данных Нурегіоп для уменьшения количества геометрических искажений данные Нурегіоп были трансформированы непосредственно на карту, построенную по данным AVIRIS. Трансформация (resampling) проводилась при помощи указания контрольных точек, с применением полиномиальной трансформации первого порядка и интерполяции по методу «ближайшего соседа». Были использованы около 20 контрольных точек, и остаточная погрешность оказалась на уровне 2 пикселей целевого изображения.

Для обработки тестовых данных Hyperion были выбраны каналы в спектральном диапазоне 2,0-2,4 мкм. Эти каналы были предварительно трансформированы, используя MNF-преобразование. Высокие собственные значения MNF преобразования, как правило, соответствуют высокой информативности преобразованных данных. Результат MNF-трансформации указывает на то, что для обоих участков данные AVIRIS содержат существенно больше информации, чем данные Hyperion, хотя последние покрывают аналогичные пространственную и спектральную области. Реальная размерность данных определялась путем сравнения графиков двух наборов собственных значений, определенных на основе MNF-анализа для каждого набора данных. Для данных района Cuprite размерность данных AVIRIS оказалась около 20, в то время как данные Hyperion для района Cuprite получили размерность около 6. Для данных района Death Valley размерности данных соответствовали примерно 20 и 7.

Для каждого набора данных верхние каналы MNF (количество которых примерно соответствует размерности), содержащие большую часть спектральной информации, были использованы для определения наиболее вероятных компонент. Для этого применялась процедура PPI (Pixel Purity Index) и визуализация в виде многомерных графиков рассеяния (D-анализ). Найденные компоненты и подмножества этих компонент (в случае AVIRIS) были использованы для последующей классификации и других обработок. Для создания карт был использован спектральный метод сравнения MTMF, с помощью которого была показана распространенность найденных компонент (минералов). Результаты анализа представлялись как полутоновые изображения, которые обеспечивают оценку средней распространенности минерала, или как цветные изображения компонент, которые показывают вероятный набор материалов, определенный для каждого пикселя. Литологические карты района Cuprite (Nevada) по данным AVIRIS и Hyperion приведены в [29]. Для анализа данных применялся метод MTMF.

Сравнение карт распределения минералов AVIRIS и Hyperion для района Cuprite показывает, что Hyperion в целом идентифицирует аналогичные минералы и продуцирует аналогичные AVIRIS карты распределения минералов. Однако низкие значения SNR аппаратуры Hyperion влияют на возможности определения части характеристик спектра и, как следствие, на идентификацию индивидуальных минералов. Например, спектр баддингтонита, построенный по данным Hyperion, имеет неясную форму в области около 2,11 мкм, которая, однако, хорошо различима на спектре, построенном по данным AVIRIS. Причиной этого может быть разница в величине пикселя (пространственном разрешении) — 30 м для Hyperion против приблизительно 16 м для AVIRIS. Большая величина пикселя — также причина большего смешивания данных. Для данных Hyperion относительно редко встречающиеся минералы, такие как баддингтонит, по этой причине заметно подавлены.

Другие ограничения Hyperion также связаны с низкими значениями SNR, что приводит к невозможности разделения некоторых минеральных рядов. Неразличимы, например, вариации, причиной которых является замещение К на Na в алунитах и замещение Al на Fe в слюдах. При значениях SNR менее чем 50:1 становится невозможным определить разницу в кристаллической структуре (например, каолиниты и диккиты). В целом анализ, проведенный в исследованиях [29], показывает, что данные Hyperion не позволяют выделять детали на том же уровне минералогической информации, как данные AVIRIS. Другие исследователи, используя данные AVIRIS (см. выше), демонстрируют распространенность в районе Cuprite некоторых минералов, которые не идентифицированы по данным Hyperion за март 2001 г. Но основные типы минералов идентифицируются и AVIRIS и Hyperion, и если рассматривать только интервал SWIR, данные Hyperion достаточно информативны.

Сравнение карт, построенных на основе данных Hyperion и AVIRIS для района Cuprite, в целом демонстрируют близкие результаты. Однако детализированное сравнение результатов картирования показывает, что соответствие не так велико. Многие пиксели, отнесенные к определенному классу по данным AVIRIS, не попадают в этот класс по данным Hyperion (иногда более 60% несовпадений по некоторым минералам). Случаи пропуска объясняются разницей в SNR между двумя множествами данных — некоторые спектральные характеристики, которые присутствуют в данных AVIRIS, находятся ниже уровня детектирования в Hyperion.

Дискриминантный анализ для района Cuprite, проведенный в работе [29], показывает, насколько точное картирование возможно в тех случаях, когда нужные минералы идентифицируются аппаратурой Hyperion. Неклассифицированные области при сравнении были исключены из рассмотрения, а классы алунита и каолинит-диккит объединены в одну группу. Карты минералов по данным AVIRIS с объединенными таким образом классами соответствуют приблизительно 76-процентному соответствию между Hyperion и AVIRIS (с коэффициентом $\varkappa = 0,67$).

Результаты обработки тестовых данных по районам Cuprite и Death Valley показали [29], что данные Hyperion в диапазоне SWIR (2,0-2,4 мкм) в целом могут быть использованы для получения полезной минералогической информации, поскольку Hyperion обеспечивает возможность картирования основных минеральных типов. Минералы, идентифицированные Hyperion, включают кальцит, доломит, каолинит, алунит, баддингтонит, мусковит (три разновидности), гидротермальные силикаты и цеолиты. Однако получить нужную информацию для Hyperion было труднее, чем для AVIRIS, поскольку отношение сигнал/шум для данных Hyperion значительно ниже. Это приводит к тому, что размерность данных по сравнению с AVIRIS также значительно ниже и, таким образом, меньшее количество минеральных типов и их разновидностей может быть идентифицировано. Дополнительный анализ ошибок показал, что для данных Нуреrion во многих случаях идентификация минералов невозможна.

Кроме того, Hyperion часто неверно идентифицировал похожие минералы, которые можно было разделить по данным AVIRIS.

Анализ данных Hyperion еще раз демонстрирует важность высокого отношения сигнал/шум для гиперспектральных сенсоров. Данные по Cuprite представляют «зимние» данные Hyperion (зимняя сцена, низкий зенитный угол Солнца), для которых отношение сигнал/шум для SWIR-диапазона составляло приблизительно 25:1. Эти данные позволяют уверенно картировать только основные минеральные типы, идентификация минералов с похожими сигнатурами часто бывает ошибочна. Данные по второму тестовому участку Death Valley были получены в оптимальных для Hyperion условиях (летняя сцена, высокий зенитный угол Солнца), и поэтому отношение сигнал/шум для них было более высоким, приблизительно 60 : 1. Эти данные позволили идентифицировать минералы района более детально, включая такие вариации состава, как некоторые переходы внутри минеральных рядов, однако большая часть этих возможностей ограничена уровнем отношения сигнал/шум. Объединение нескольких основных минеральных типов данных AVIRIS (как это было сделано для района Cuprite) увеличивает качество соответствия между AVIRIS и Hyperion для участка Death Valley до 94%.

В качестве демонстрации возможностей литологического картирования результаты интерпретации данных Нурегіоп выглядят удовлетворительно. Работа [29] отмечает значительное улучшение качества идентификации минералов благодаря использованию «летних» данных Нурегіоп. Это позволяет осуществлять идентификацию тонких минеральных отличий, таких как между кальцитом и доломитом или внутри типовой изменчивости в минералах, причиной которой являются молекулярные замещения. К сожалению, «зимние» данные Нурегіоп, собранные в неоптимальных условиях, позволяют распознать только наиболее часто встречающиеся минералы и основные минеральные разности. Таким образом, очень важно, чтобы проектируемые гиперспектральные спутниковые сенсоры имели существенно более высокий, чем Нурегіоп, уровень отношения сигнал/шум [29], значение которого должно быть, по крайней мере, 100 : 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерпретация дистанционных изображений различного вида является важным источником информации, касающейся геологического строения района исследований, типа и состава пород, минеральных ресурсов, ландшафтов и т.д. В последнее время все более широкое применение для решения геологических задач получают мультиспектральные и гиперспектральные МДЗ и методы их обработки.

Мультиспектральные дистанционные методы становятся хорошим инструментом при исследовании минеральных запасов, когда формации первичных или вторичных процессов минерализации проявляются в виде поверхностных спектральных аномалий. Гиперспектральные дистанционные методы позволяют непосредственно идентифицировать большое количество минералов на основании их абсорбционных свойств и таким образом составлять подробные тематические карты исследуемых территорий.

При обработке гиперспектральных данных традиционный качественный подход к интерпретации МДЗ, ориентированный на визуализацию изображения и выделение объектов, которые видит интерпретатор, используя только сравнительные яркости объектов в пределах изображения, сменился новым подходом, ориентированным на автоматическую обработку данных. Такой подход стремится оперировать количественными, абсолютными значениями яркостей. При обработке гиперспектральных дистанционных данных используется специализированное программное обеспечение. Особенности гиперспектральных данных требуют новых подходов к разработке более совершенных алгоритмов и нового специализированного программного обеспечения, применяемого для визуализации, анализа, обработки и интерпретации гиперспектральных изображений.

Применение компьютерных систем для геологических исследований в основном базируется на использовании математических методов. Для этого применяются процедуры количественного анализа данных на базе вероятностно-статистических методов и методов распознавания образов, которые обладают рядом несомненных достоинств: упорядочивают процедуру исследования, ограничивают субъективизм, присущий традиционным геологическим процедурам, позволяют учесть большой фактический материал. Однако этому подходу присущи и очевидные недостатки. Прежде всего, количественные методы являются формальными и не учитывают содержательных особенностей исследуемых данных. С другой стороны, часто без внимания остаются имеющиеся принципиальные ограничения математических моделей. Эти недостатки могут быть исключены при применении в геологических исследованиях технологий экспертных систем, позволяющих представить в виде компьютерных программ и использовать те знания, которыми обладает и пользуется опытный геолог. Методы экспертных систем моделируют процесс решения задач человеком и предоставляют возможность для сбора, хранения и использования знаний экспертов-геологов, позволяют накапливать не только общие знания, но и индивидуальный опыт экспертов и затем применять их для решения различных практических задач, связанных с геологическим картированием.

Список литературы

- Архипов С.А., Ляхов А.Ю., Тарасов А.П. Работы ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования // Сб. тезисов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 17–18 января 2013 г. С. 25–30.
- Бондур В. Г. Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений // Сб. тезисов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 17–18 января 2013 г. С. 14–18.
- Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Издательство «А и Б», 1997. — 296 с.
- 4. Горбунов А.В., Слободской И.Н. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» // Геоматика. 2010. № 1. С. 30–33.
- 5. *Рис У*. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. — 346 с.
- 6. Хайлов М.Н., Заичко В.А. Гиперспектральная съемка перспективы использования в интересах решения социально-экономических задач // Сб. тезисов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 17–18 января 2013 г. С. 10–11.
- 7. *Чандра А.М., Гош С.К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. — М.: Техносфера. 2008. — 328 с.
- Abrams M.J., Ashley R.P., Rowan L.C., Goetz A.F.H., Kahle A.B. Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada using aircraft scanner images for the spectral region 0,46–2,36 μ // Geology, 5, 1977. P.713–718.
- Abrams M.J., Ashley R.P. Alteration mapping using multispectral images — Cuprite Mining District, Esmeralda County, Nevada: U.S. // Geological Survey Open File Report, 1980. P. 80–367.
- 9 Г.Г.Райкунов, В.Л.Щербаков, С.И.Турченко, Н.А.Брусничкина

- Boardman J. W., Biehl L.L., Clark R.N., Kruse F.A., Mazer A.S., Torson J. Development and Implementation of Software Systems for Imaging Spectroscopy // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006 / IGARSS 2006. Denver, CO. P. 1969–1973.
- 11. Hyperspectral Data Exploitation: Theory and Applications / Chang, Chein-I (Ed.) Wiley, 2007. 440 p.
- 12. Clark R.N., Gallagher A.J., Swayze G.A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra // Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication 90–54, 1990. P. 176–186.
- Clark R. N., King T. V. V., Klejwa M., Swayze G., Vergo N. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals // Journal of Geophysical Research. 1990. V.95. P. 12653-12680.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A., Gorelick N., Kruse F. Mapping with Imaging Spectrometer Data Using the Complete Band Shape Least-Squares Algorithm Simultaneously Fit to Multiple Spectral Features from Multiple Materials // Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication 91–28. 1991. P. 2–3.
- Clark R.N., Swayze G.A., Gallagher A. Mapping Minerals with Imaging Spectroscopy // U.S. Geological Survey, Office of Mineral Resources Bulletin 2039. 1993. P. 141–150.
- Clark R. N., Swayze G. A., Lilo K. E., Kokaly R. F., Sutley S. J., Dalton J. B., McDougal R. R., Gent C. A. Imaging Spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracoder and expert systems // Journal of Geophysical Research. 1993. V. 108(E12). P. 5131.
- Clark R.N., Swayze G.A., Gallagher A., King T. V. V., Calvin W. M. The US Geological Survey Digital Spectral Library, Version 1: 0,2 to 3,0 mm // US Geological Survey Open File Report 93-592, 1993.
- 18. Clark R. N., Swayze G. A. Mapping Minerals, Amorphous Materials, Environmental Materials, Vegetation, Water, Ice and Snow, and Other Materials: The USGS Tricorder Algorithm // Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science

Workshop, 1995 January 23–26, R.O. / Green R.O. (Ed.), JPL Publication 95-1. 1995. P. 39–40.

- Clark R. N., Swayze G. A. Evolution in Imaging Spectroscopy Analysis and Sensor Signal-to-Noise: An Examination of How Far We Have Come // Summaries of the Sixth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, CA, 1996, March 4–8. V. 1: AVIRIS Workshop / Green R. O. (ed.).
- Clark R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in Manual of Remote Sensing // Remote Sensing for the Earth Sciences, V.3 / A. N. Rencz (Ed.). — New York: John Wiley and Sons. 1999. P. 3–58.
- 21. Clark R.N., Swayze G.A., Livo K.E., Kokaly R.F., Sutley S.J., Dalton J.B., McDougal R.R., Gent C.A. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems // J. Geophys. Res., 108(E12), 5131. December, 2003. P.5-44.
- 22. Clark R.N., Boardman J., Mustard J., Kruse F., Ong C., Pieters C., Swayze G. Mineral Mapping and Applications of Imaging Spectroscopy: in Proceedings // IGARSS 2006, 31 July – 4 August, Denver, Colorado. 2006.
- 23. *Drury S.A.* Image interpretation in geology. London: Allen & Unwin. 1987.
- Elachi C., Jakob J. van Zyl. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. (2-nd ed.). 2006: John Wiley & Sons Inc. 559 p.
- 25. *De Smith M.J.*, *Goodchild M.F.*, *Longley P.A.* Geospatial Analysis. A comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools (2d Edition). Splint. 2007.
- Field Guide, ERDAS IMAGINE Leica Geosystems Geospatial Imaging. 2005. 674 p.
- 27. Hook S.J. The combined use of multispectral remotely sensed data from the short wave infrared (SWIR) and thermal infrared (TIR) for lithological mapping and mineral exploration // Fifth Australasian Remote Sensing Conference, Proc., Oct., 1990. V. 1. P. 371-380.
- Krishnamurthy J. The evaluation of digitally enhanced Indian Remote Sensing Satellite (IRS) data for lithological and structure mapping // International Journal of Remote Sensing. 1997. V. 18. P. 3409–3437.
- 29. Kruse F.A., Boardman J.W., Huntington J.F. Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral

131

Mapping // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, June 2003. V. 41, № 6. P. 1388–1400.

- 30. Kruse F.A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low altitude AVIRIS data of Boulder, Colorado // Proc. of the 2004 AVIRIS Earth Science and Applications Workshop. 31 March – 2 April 2004.
- Landgrebe D. The Evolution of Landsat Data Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. V. LXIII, № 7. July 1997. P. 859–867.
- Manual of Remote Sensing, Volumes I, II / Ed. Robert N. Colwell — American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. 1983. 2440 p.
- 33. Parkinson C.L., Ward A., King M.D. Earth Science Reference Handbook – NASA. – Washington, D.C. 2006. 291 p.
- Rajesh H. M. Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping // An overview. J. of Mineralogical and Petrological Sciences. 2004. V. 99. P. 83–103.
- 35. *Schowengerdt R.A.* Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing (Third Edition). Elsevier. 2007. 515 p.
- 36. Swayze G.A., Clark R.N., Sutley S., Gallagher A. Ground-Truthing AVIRIS Mineral Mapping at Cuprite, Nevada // Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, V. 1: AVIRIS Workshop / JPL Publication 92-14. 1992. P. 47-49.
- 37. Swayze G.A., Clark R.N. Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: evaluating the effects of signal to noise and spectral resolution using the Tricorder Algorithm // Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, January 23–26 / Green R.O. (ed.), – JPL Publication 95-1. 1995. P. 157–158.
- 38. Swayze G.A., Clark R.N., Goetz A., Gorelick N. Spectral Identification of Surface Materials using Imaging Spectrometer Data: Evaluating the Effects of Detector Sampling, Bandpass, and Signal to Noise Ratio using the Tricorder Algorithm, 1996 (in preparation).
- 39. Swayze G.A. The hydrothermal and structural history of the Cuprite Mining District, Southwestern Nevada: An integrated geological and geophysical approach // Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Boulder, Colorado, 399 p. / Available from University Microfilms Inc. — Ann Arbor, Michigan, USA (313) Catalogue no. 9725795.

- 40. Swayze G.A., Clark R.N., Goetz A.F.H., Livo K.E., Sutley S.S. Using imaging spectroscopy to better understand the hydrothermal and tectonic history of the Cuprite Mining District, Nevada // Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop, January 12–16, 1998 / Green R.O. (ed.), JPL Publication 97–21. V. 1. 1998. P. 383–384.
- 41. Tour Guides, ERDAS IMAGINE Leica Geosystems Geospatial Imaging. 2005. 704 p.
- 42. *Vincent R. K. Jr.* Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing: Prentice Hall. 1997. 370 p.
- 43. Yang H., Van der Meer F., Bakker W., Tan Z.J. A backpropagation neural network for mineralogical mapping from AVIRIS data // International Journal of Remote Sensing. V. 20. 1999. P. 90-110.
- 44. Zeng Y., Schaepman M.E., Wu B., Clevers J.G.P.W., Bregt A.K. Using linear spectral unmixing of high spatial resolution and hyperspectral data for geometric-optical modelling // Proc. of the 10th International Symposium on Physical Measurements and Spectral Signatures in Remote Sensing (ISPMSRS'07), Davos, 12–14 March 2007.

Научное издание

РАЙКУНОВ Геннадий Геннадьевич ЩЕРБАКОВ Владимир Леонидович ТУРЧЕНКО Станислав Иванович БРУСНИЧКИНА Наталия Алексеевна

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

Редактор В.Е. Рокотян Оригинал-макет: Д.П. Вакуленко Оформление переплета: Д.Б. Белуха

Подписано в печать 03.03.2014. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 9,35. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература» МАИК «Наука/Интерпериодика» 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90 E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru; http://www.fml.ru

Отпечатано с электронных носителей издательства в ГУП Чувашской Республики «ИПК «Чувашия», Мининформполитики Чувашии, 428019 г. Чебоксары, пр-т И. Яковлева, 13

