

КОСМОНАВТИКА И РАКЕТОСТРОЕНИЕ

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ
ДИСТАНЦИОННОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ
В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ
КАРТИРОВАНИИ



ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

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



ФИЗМАТЛИТ®
2014

УДК 550.8.028

ББК 2.6.3

Г 50

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. Можжев

© ФИЗМАТЛИТ, 2014

ISBN 978-5-9221-1533-9

© Коллектив авторов, 2014

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 зондирований	65
2.1. Методы обработки мультиспектральных данных	65
2.1.1. Методы улучшения мультиспектральных изображений	65
2.1.2. Процедуры обработки мультиспектральных данных	68
2.2. Методы обработки гиперспектральных данных	78
2.2.1. Определение параметров и предварительная обработка	78
2.2.2. Спектры и спектральные библиотеки	87
2.2.3. Процедуры обработки гиперспектральных данных	89
2.2.4. Экспертная система обработки гиперспектральных данных	98

Глава 3. Пример использования гиперспектральных данных	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 Hyperspec	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 гиперспектральных 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГИС	географическая информационная система
ДЗ	дистанционное зондирование
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ИК	инфракрасный диапазон спектра
ИСЗ	искусственный спутник Земли
КА	космический аппарат
МДЗЗ	материалы дистанционного зондирования Земли
ПЗС	приборы с зарядовой связью
АС	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 Radiometer (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 (усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения)
AVIRIS	Airborne Visible and InfraRed Imaging Spectrometer (бортовой спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов)
BNP	Back-Propagation Network (сети с обратным распространением)
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager (компактный бортовой спектральный построитель изображений)

CCRS	Canada Centre for Remote Sensing (Канадский центр дистанционного 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 Колорадо, г. Боулдер)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (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)
DFP	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 визуализации изображений)
EO-1	Earth Observing-1 (наблюдение Земли-1)
EOS	Earth Observing System (система наблюдения Земли)
ERIM	Environmental Research Institute of Michigan (Экологический 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 Hypercubes (быстрый линейный атмосферный анализ на основе спектрального гиперкуба)
HITRAN	High Resolution Transmission Molecular Absorption Database (база данных молекулярной абсорбции высокого разрешения)
HRV	High Resolution Visible (аппаратура видимого диапазона высокого разрешения)
HRV-IR	High Resolution Visible-Infrared (аппаратура (сенсор) высокого разрешения видимого и инфракрасного диапазонов)
HYDICE	Аэросканер (назван по аббревиатуре проекта, в котором этот сканер был разработан: HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment — эксперимент по сбору цифровых гиперспектральных изображений)

HyMap	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
IHS	Intensity, Hue, Saturation (интенсивность, оттенок, насыщенность)
IRS	Indian Remote Sensing (индийский спутник для дистанционного зондирования)
ISDAS	Image Spatial Data Analysis (пространственный анализ данных)
ISIS	Integrated Software for Imagers and Spectrometers (интегрированное программное обеспечение для обработки спектральных изображений)
JPL	Jet Propulsion Laboratory (Лаборатория реактивного движения)
LAC	Local Area Coverage (местная зона покрытия)
LOWTRAN	Low Resolution Atmospheric Transmission Code (модель атмосферной коррекции низкого разрешения)
MEDIS	MEDium Resolution Imaging Spectrometer (спектрометр среднего разрешения)
MFF	Modified Flat Field (метод модифицированного плоского поля)
MNF	Minimum Noise Fraction (модифицированный PCA алгоритм)
MNF	Minimum Noise Fraction (процедура минимизации шума)
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (спектро-радиометр умеренного разрешения)
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model (модель атмосферной коррекции среднего разрешения)
MSFMA	Multiple Spectral Feature Mapping Algorithm (алгоритм многозонального картирования)
MSS	Multispectral Scanner System (мультиспектральная сканирующая система)
MTMF	Mixture-Tuned Matched Filtering (согласованная фильтрация для смешанной настройки)
Multi Spec	программный пакет для обработки мульти- и гиперспектральных снимков (по названию мультиспектрального спутника MultiSpec Satellite)
MW	MicroWave (микроволновый диапазон)
MWIR	Mid Wave InfraRed (средний инфракрасный диапазон)

NASA	National Aeronautic and Space Administration (Национальное аэрокосмическое агентство, США)
NIMS	Near Infrared Mapping Spectrometer (спектрометр ближнего инфракрасного диапазона)
NIR	Near InfraRed (ближний инфракрасный диапазон)
NMP	New Millennium Program (Программа нового тысячелетия)
NC	Natural Color (натуральный цвет)
OSP	Orthogonal Subspace Projection (ортогональное подпространство)
PCA	Principal Components Analysis (метод главных компонент)
PPI	Pixel Purity Index (индекс 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 углу)
SASI	Shortwave InfraRed Airborne Spectrographic Imager (коротковолновый инфракрасный спектрометр)
SCM	Spectral Correlation Mapper (картирование по спектральной корреляции)
SFSI	Short Wave InfraRed Full Spectrometer Imager (спектрометр ближнего инфракрасного диапазона)
SIPS	Satellite Image Processing System (система анализа гиперспектральных 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 дистанционных спектров
TIR	Thermal InfraRed (тепловой инфракрасный диапазон)
TM	Thematic Mapper (тематический картограф)
USGS	U.S. Geological Survey (Американская геологическая служба)
VNIR	Visible and Near-Infrared Range (видимый и ближний инфракрасный 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, HyMap 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-