

## Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор

А.А. Тронин, В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов

Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,  
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18  
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.edu

Спектральные методы в дистанционном зондировании, и, в первую очередь в геологии получили в последнее время широкое распространение. Разработано большое количество авиационной и спутниковой аппаратуры для многоспектральной и гиперспектральной съёмки. Физической основой для применения спектральной съёмки служат особенности спектров природных и антропогенных объектов на земной поверхности. Рассмотрены спектры минералов и горных пород, растительности, водных поверхностей, почв, антропогенных объектов в видимом, ближнем и тепловом ИК диапазонах. Анализ существующих алгоритмов картирования минералов-индикаторов геологических обстановок, перспективных на выявление месторождений полезных ископаемых по данным видеоспектральной и гиперспектральной съемок выявил широкие возможности применения современных математических методов для решения задачи распознавания минералов. Обзор опыта применения спутниковых спектральных методов показал высокую эффективность метода в следующих направлениях: геологическое картирование горных пород по литологическим разностям; картирование минералов-индикаторов геологических обстановок, перспективных на выявление месторождений полезных ископаемых; картирование современных гидротермальных проявлений.

**Ключевые слова:** спектральные методы, дистанционное зондирование, геология, поиск месторождений полезных ископаемых.

### Введение

Применение спектральных методов дистанционного зондирования (ДЗ) в геологии началось ещё в 70-80-х годах с появлением многоспектральных изображений земной поверхности. Развитие спектральных методов сильно сдерживалось неразвитостью технических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), особенно космических. В последнее десятилетие ситуация существенно изменилась, стали поступать данные многоканальных радиометров ASTER, MODIS, запущен исследовательский спутник EO-1 с гиперспектральным сканером Hyperion. К настоящему времени накоплен большой опыт лабораторных и авиационных измерений спектров минералов, горных пород, почв. Таким образом, подготовлены физические основы и техническая база для применения спектральных методов анализа в геологии. Спектральный анализ – физический метод определения состава вещества, основанный на получении и исследовании его спектров. Применение спектральных методов для геологических исследований развивается в нескольких направлениях: картирование горных пород, поиск рудных месторождений полезных ископаемых по гидротермальным изменениям, поиск месторождений углеводородов по низкотемпературным изменениям вмещающих пород, поиск месторождений нерудного сырья.

## Физические основы и аппаратура дистанционного зондирования

Выбор спектрального диапазона систем ДЗ определяется целью измерений, техническими возможностями и пропусканием атмосферы. Весь спектр электромагнитных (ЭМ) волн в ДЗ принято делить на несколько диапазонов (табл. 1). Это деление условное. Обычно, для каждого прибора указывается конкретный рабочий спектральный диапазон или частота.

Таблица 1. Диапазоны спектра ЭМ волн

Диапазон	Длина волны	Примечания
Гамма-лучи	0.1 фм – 1 пм	Используется в аэрогаммасъёмке, сильное поглощение атмосферы
Рентгеновский	1 пм – 1 нм	Сильное поглощение атмосферы
Ультрафиолетовый	1 – 400 нм	Используется главным образом в аэросъёмке
Видимый	400 – 750 нм	Отражённая солнечная радиация
Ближний инфракрасный (БИК)	750 нм – 2.5 мкм	Отражённая солнечная радиация
Тепловой инфракрасный (ТИК)	2.5 – 25 мкм	Собственное излучение Земли
СВЧ (Микроволновый)	25 мкм – 1 мм	Собственное излучение Земли
Радиоволновый	> 1мм	Отражённое излучение радара

Пропускание атмосферы накладывает ограничения на возможности ДЗ из космоса. В таблице 2 показаны основные окна прозрачности атмосферы. Основные окна прозрачности атмосферы имеют сложную структуру, и делятся на более узкие окна прозрачности. Как правило, спектральные каналы спектрометров используют не весь интервал окна пропускания атмосферы, а только его часть. Пропускание – обратная величина поглощению атмосферы. Обе величины выражаются либо в долях единицы, либо в процентах.

Таблица 2. Основные окна прозрачности атмосферы

№	Длина волны	Примечания
1	400 – 2500 нм	Видимый и ближний ИК диапазон, отражённая солнечная радиация
2	3.5 – 5 мкм	Первое окно ТИК диапазона, обнаружение высокотемпературных объектов
3	7 – 13 мкм	Второе окно ТИК диапазона, измерение температуры поверхности Земли
4	1 см – 15 м	Радиоволны

Системы ДЗ в оптическом и ИК диапазоне по спектральному разрешению делятся на многоспектральные сканеры, видеоспектрометры и профильные спектрометры. Многоспектральные сканеры используют относительно широкие спектральные диапазоны 10-1000 нм. Например, MODIS имеет 36 спектральных каналов от видимого до ИК-теплового диапазона. Радиометр ASTER имеет 14 спектральных каналов от видимого до ИК-теплового диапазона, причём его каналы подобраны специально для определения вещественного состава поверхности. При этом пространственное разрешение меняется от 250-1000 м для MODIS до 15-90 м у ASTER. Спектрометры с высоким спектральным разрешением регистрируют весь спектр излучения в некотором диапазоне. Например, спутниковый видеоспектрометр Hyperion имеет 220 спектральных каналов шириной 10-11 нм в диапазоне ЭМ волн 350-2580 нм. На том же спутнике EO-1 установлен имитатор радиометра ETM спутниковой системы Landsat – Advanced Land Imager (ALI) с расширенным

набором спектральных каналов и видеоспектрометр для атмосферной коррекции Linear Etalon Imaging Spectrometer Array (LEISA) Atmospheric Corrector (LAC), обеспечивающий атмосферную коррекцию данных приборов Hyperion и ALI. Технические характеристики основных спутниковых систем ДЗЗ проводящих спектральные измерения приведены в таблице 3, а авиационных в таблице 4.

Таблица 3. Основные технические характеристики спутниковых многоспектральных и гиперспектральных систем ДЗЗ

Спутниковая система	EOS	Landsat	EOS (Terra)	Hyperion	ALI
Сканер	MODIS	ETM	ASTER	EO-1	EO-1
Спектральные каналы:					
Видимый диапазон (400-750 нм)	10	3	2	220	4
БИК (750-2500 нм)	10	3	7		5
ТИК (2.5-25 мкм)	16	1	5	—	—
Дополнительный канал		Панхром <sup>1</sup>	БИК <sup>2</sup>	—	Панхром <sup>3</sup>
Разрешение на местности (Видимый/БИК/Тепловой диапазоны), м	250/500/ 1000 <sup>4</sup>	30/30/60	15/30/90	30	30/30
Ширина полосы обзора, км	2330	185	60	7.5	37
Число уровней квантования (Видимый/БИК/Тепловой диапазоны), бит	12/12/12	8/8/8 лучшие 8 из 9	8/8/12	12	12
Время пересечения экватора	10:30Terra 13:30 Aqua	10:00 Landsat-7	10:30	10:00	10:00

<sup>1</sup> Панхроматический канал с разрешением 15 м;

<sup>2</sup> Ближний ИК канал смотрит назад под углом 27.6 градуса с разрешением 15 м;

<sup>3</sup> Панхроматический канал с разрешением 10 м;

<sup>4</sup> 250 м (каналы 1-2), 500 м (каналы 3-7), 1000 м (каналы 8-36).

Таблица 4. Основные технические характеристики авиационных многоспектральных и гиперспектральных систем ДЗЗ

Спектральные каналы/	Сканер			
	MASTER <sup>1</sup>	SEBASS <sup>2</sup>	AVIRIS <sup>3</sup>	HyMAP <sup>4</sup>
Видимый диапазон и БИК (400-2500 нм)	25	—	224	128
Первое окно ТИК диапазона (3.5 – 5 мкм)	15	128	—	—
Второе окно ТИК диапазона (7-13 мкм)	10	128	—	—
Мгновенное поле зрения, мрад	2.5	1	1	2.5
Угол зрения, град	86	7.3	34	60

<sup>1</sup> MODIS/ASTER Airborne Simulator (<http://masterweb.jpl.nasa.gov/>);

<sup>2</sup> Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System, Aerospace Corporation (<http://www.aero.org>)

<sup>3</sup> Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (<http://aviris.jpl.nasa.gov/>)

<sup>4</sup> <http://www.hyvista.com>

## Спектральные свойства минералов, горных пород, природных объектов

Изучение спектральных свойств минералов и горных пород методами ДЗ основано на минералогических и петрографических исследованиях. В настоящее время минеральный и литологический состав земной коры известен достаточно хорошо. Более 92% земной коры по массе составляют силикаты – соли кремниевых кислот (рис. 1), поэтому их исследованию и предаётся такое большое внимание. В самом общем виде главные ди-

пазоны линий поглощения основных классов минералов представлены на рис. 2. Исходя из наличия технических средств и расположения спектральных линий поглощения основных минералов был сделан вывод, что на сегодняшний день для спектральных методов дистанционного зондирования в геологии наиболее целесообразно использовать спектро-радиометр ASTER.

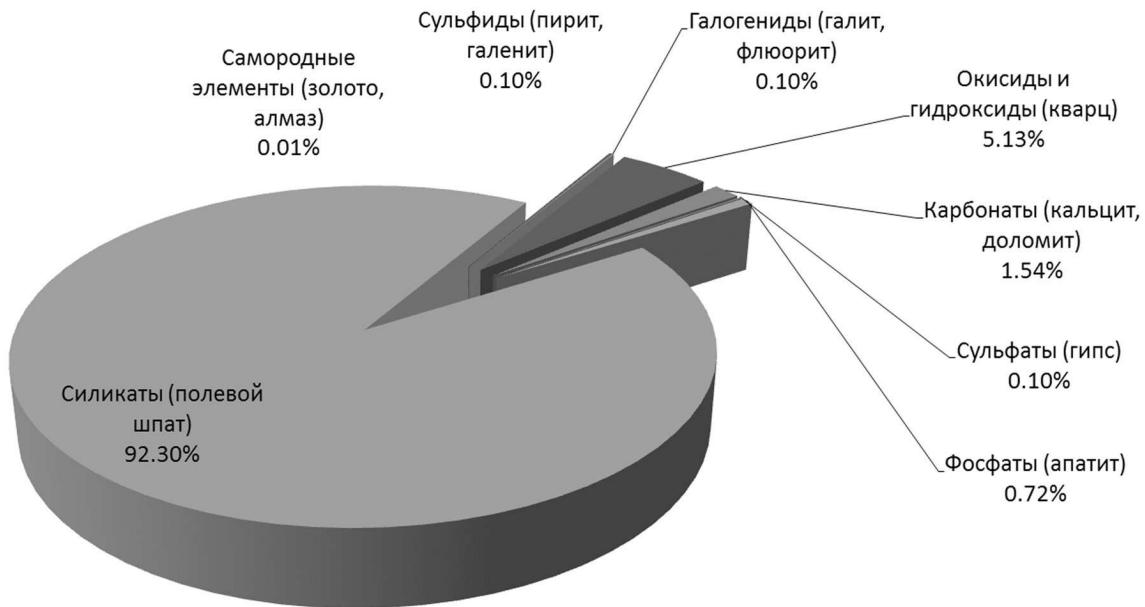


Рис. 1. Распространение основных классов минералов в земной коре по массе

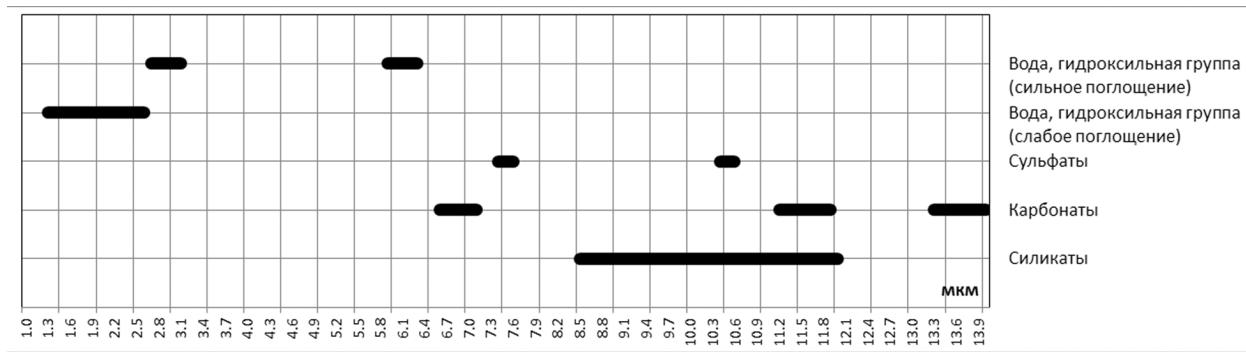


Рис. 2. Линии поглощения основных классов минералов и гидроксильных групп воды в минералах

### Видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра

Спектры горных пород отличаются большим разнообразием и определяются минеральным составом, типом кристаллической решётки минералов, размером зерен минералов. (Здесь и далее спектры построены по данным USGS Digital Spectral Library <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>). В видимом диапазоне спектра минералы различаются слабо. Значительно больше различий наблюдается в БИК диапазоне. Здесь многие группы минералов, такие как глины, карбонаты, сульфаты имеют отчётливые линии поглощения, регистрируемые современными средствами ДЗ.

Спектры горных пород отличаются меньшей контрастностью по сравнению со спектрами отдельных минералов. Для всех горных пород характерно увеличение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) от видимого диапазона к БИК. Большинство горных пород имеют погодий максимум в районе 2.0 – 2.7 мкм. В качестве примера на рис.3 приведены спектры некоторых минералов в БИК диапазоне.

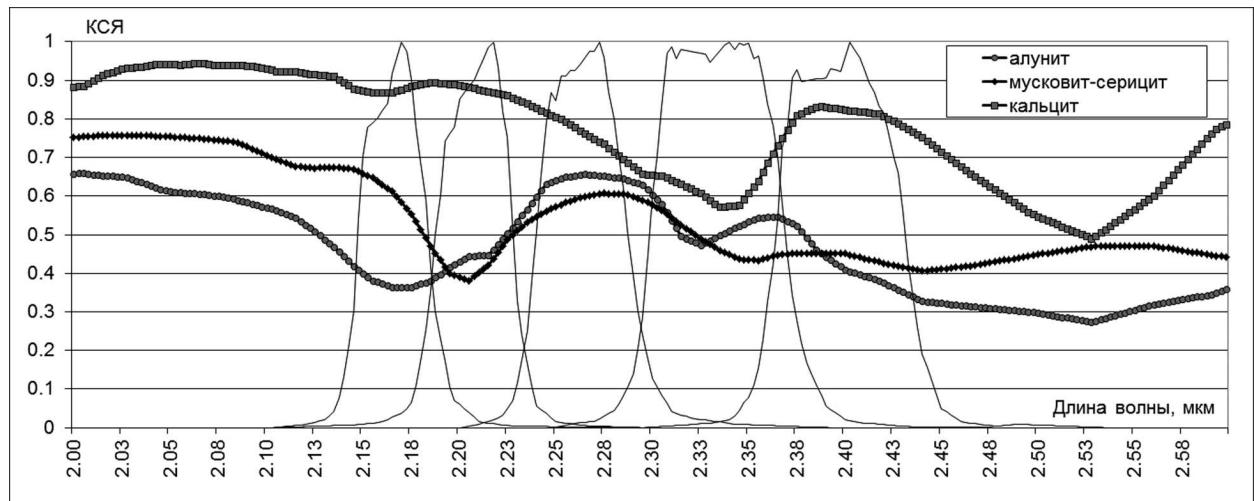


Рис. 3. КСЯ некоторых минералов в диапазоне 2.0-2.6 мкм: алюнит (сульфаты), мусковит-сертицит (слюды), кальцит (карбонаты). Тонкими линиями показаны спектральные функции пропускания каналов спектрорадиометра ASTER

Спектр нефти в видимом и БИК диапазоне не имеет особенностей. Он не имеет особенностей и его КСЯ не превышает 10%. Тем не менее, эти значения выше, чем у воды, что позволяет выделять нефть на водной поверхности при условии чистой воды без волнения. В реальных условиях, когда существует мутность воды и волнение, КСЯ нефти ниже, чем у воды в видимом диапазоне.

Спектральные свойства растительности зависят от свойств листьев, их плотности, ориентации в пространстве. Растительность сильно поглощает солнечное излучение в синей и красной областях спектра, имея локальный максимум в районе 0.55 мкм, который определяет зелёный цвет растений. В БИК диапазоне наблюдается резкое возрастание КСЯ растительности. Это объясняется особенностями спектра хлорофилла. Дальнейший ход спектральной кривой в область ИК-диапазона определяется наличием свободной воды в растениях. Современные средства ДЗ позволяют по спектральным характеристикам опознавать различные виды растительности, например: хвойные и лиственные породы деревьев. Если растение испытывает стресс, его спектральные свойства изменяются. При стрессе растительности (химическом или водном) наблюдается рост КСЯ в видимом и БИК диапазонах.

В сравнении с другими объектами на земной поверхности, вода отражает очень мало радиации, не более 10%. На длинах волн более 1.2 мкм происходит полное поглощение всей радиации. В видимом диапазоне КСЯ воды определяется мутностью воды, концентрацией водорослей и растворённого органического вещества. При анализе КСЯ водной поверхности следует обратить особое внимание на угол зрения датчика, а также зенитный и азимутальный углы Солнца. Необходимо также учесть отражение от дна на мелководьях.

Лёд, как и вода обладает очень низким КСЯ во всём диапазоне. Снег, напротив, имеет КСЯ, доходящий до 100% в видимой части спектра. В БИК диапазоне КСЯ снега сильно зависит от гранулометрического состава: чем меньше частицы, тем выше КСЯ. В реальных условиях, при смешении льда и снега наблюдаются высокие вариации КСЯ.

Спектр почв зависит от многих факторов: концентрации органики, цвета субстрата, влажности почвы, наличия карбонатов и окислов железа. Спектры почв имеют минимумы в районе 1.45 и 1.95 мкм из-за поглощения воды. В видимом диапазоне КСЯ почв выше, чем КСЯ растительности. В БИК диапазоне наблюдается инверсия спектров. На этом спектральном свойстве почв и растительности построены вегетационные индексы, предназначенные для картирования растительности.

Антропогенные объекты обладают самыми разнообразными спектральными свойствами. Чаще всего антропогенные объекты приближаются к спектрам горных пород, так как в основе большинства строительных материалов лежат песок, щебень, известняк, глины и т.д.

### *Инфракрасный тепловой диапазон спектра*

ИК-спектрометрия хорошо известный метод, применяемый в лабораторных условиях для минералогического анализа. Множество минералов имеют спектральные особенности в ТИК области спектра. Эти особенности позволяют идентифицировать минералы, например, такие породообразующие минералы как силикаты, сульфаты, карбонаты. Спектрорадиометр ASTER, установленный на спутнике Тетта специально предназначен для картирования горных пород. Имеющиеся в ТИК диапазоне спектральные особенности силикатов, карбонатов и сульфатов позволяют идентифицировать их на фоне остальных минеральных агрегатов, не имеющих таких особенностей, например, глинистых поверхностей.

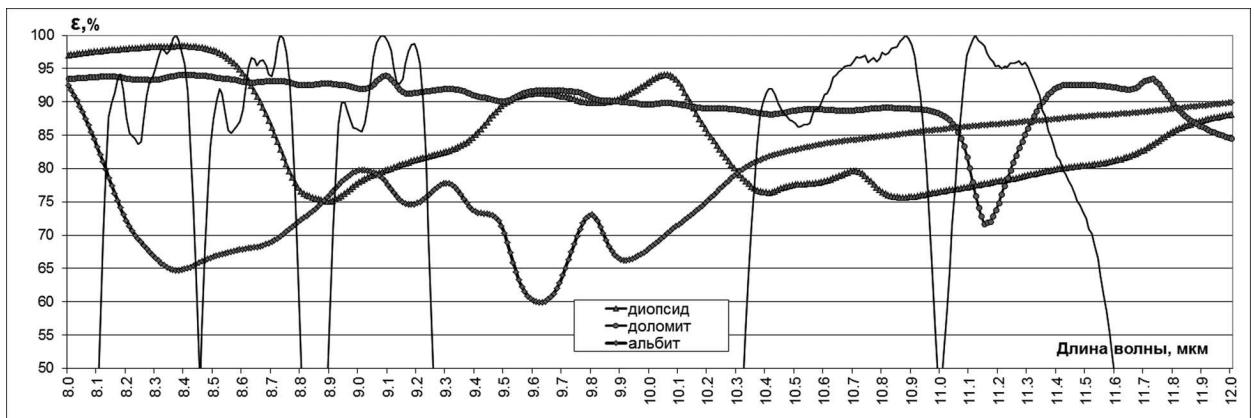
ИК-спектрометрия позволяет идентифицировать некоторые минералы индикаторы-геологических обстановок, перспективных на выявление месторождений полезных ископаемых (Плюснина, 1967). Например, в местах просачиваний углеводородов на земную поверхность обнаружаются сульфаты и самородная сера. Для сравнения приведены спектры важнейших минералов осадочных пород: кальцита, кварца, галита на фоне которых обычно наблюдаются гипергенные изменения.

Спектры ряда минералов также обладают характерными особенностями, позволяющими разделить их при ИК-спектрометрии. Минералы, составляющие глины не имеют спектральных особенностей в ТИК диапазоне спектра. Коэффициенты излучения их имеют высокие значения – более 95%.

Спектры горных пород определяются спектрами минералов, составляющих породы. Содержащие кальцит горные породы имеют выраженный минимум в диапазоне 11.0-11.5 мкм. Кварцсодержащие осадочные и метаморфические горные породы имеют спектральные особенности в диапазоне 8.1-9.4 мкм. Магматические горные породы имеют высокие коэффициенты излучения. Основные различия спектров основных и кислых пород определяются наличием или отсутствием кварца и слюд в горных породах. Чем более кислая порода, тем более контрастно выражен силикатный минимум в первых трех тепловых каналах спектрорадиометра ASTER. В качестве примера на рис. 4 приведены спектры некоторых минералов в ТИК диапазоне.

Нефть в ИК тепловом диапазоне не имеет специфических черт. Для сравнения приведён спектр воды. Во всём диапазоне ТИК коэффициент излучения воды выше, чем у нефти. Такое соотношение спектров является основой для обнаружения нефти на водной поверхности.

Для зелёной растительности характерны высокие коэффициенты излучения во всём диапазоне. Это объясняется наличием воды в зелёной растительности. Как только растительность начинает терять воду, высыхать, коэффициент излучения падает. Разделение типов растительности в ИК-тепловом диапазоне затруднено. В тоже время, на основе ИК-спектрометрии надежно обнаруживается водный стресс растительности.



*Рис. 4. Коэффициенты излучения некоторых минералов в диапазоне 8-12 мкм: диопсид (пироксены), доломит (карбонаты), альбит (полевые шпаты). Тонкими линиями показаны спектральные функции пропускания каналов спектрорадиометра ASTER*

Спектр воды не имеет особенностей в ИК тепловом диапазоне, независимо от агрегатного состояния. Лёд по спектральным свойствам практически не отличается от воды.

Спектры почв в ТИК диапазоне определяются наличием минералов, обладающих спектральными особенностями. Коэффициент излучения почв определяется также влажностью почв.

Спектры антропогенных объектов весьма разнообразны. Кирпич и бетон имеют высокие коэффициенты излучения, металлические поверхности имеют низкие коэффициенты. Антропогенные объекты, содержащие углеводороды, имеют спектры, близкие к спектрам нефти.

## Картирование горных пород

Для картирования литологического состава горных пород с использованием спектральной информации тепловых каналов радиометра ASTER были предложены несколько простых индексов: карбонатный индекс (CI), кварцевый (QI) и мафический (MI) индексы (Ninomiya et al., 2005). В результате исследований было выполнено геологическое картирование на участках с различным составом горных пород: район горы Юшишан (Yushishan) в горах Бейшан (Beishan), на северо-западе провинции Ганьсу, Китай (рис. 5), в районе горы Фиттон (Fitton), Южная Австралия (протерозойские метаморфические породы, прорваные кислыми интрузиями) и сегменте Ксигазе (Xigaze) офиолитового пояса Ярлинг Зангбо (Yarlung Zangbo), южный Тибет, Китай.

Другой пример использования данных ASTER и AVIRIS для геологического карттирования связан с исследованием состава горных пород в районе Маунтайн Пасс (Mountain Pass), Калифорния, США (Rowan et al., 2003). В районе работ представлен широкий спектр пород от известняков и доломитов до гранитоидов, карбонатитов и вулканических пород. Спектральные методы были направлены на выявление абсорбционных линий минералов, связанных с группами CO<sub>3</sub>, Al—O—H и Mg—O—H. Для построения литологических карт использовался индекс спектральной чистоты пикселя (pixel-purity index (PPI)). Другой пример использования данных AVIRIS связан с картированием горных пород в районе Боди/Gfhfvfeyn (Bodie/Paramount), Калифорния, США (Crosta et al., 1998). В этом районе развиты золото-серебряные месторождения, связанные с гидротермальными изменениями в комплексе вулканических пород миоценового возраста: дациты, андезиты, риолитовые лавы. Для выделения метаморфизованных пород применялся спектральный угловой метод, были выделены комплексы монтмориллонита, каолинита, мусковита, железа (ярозит, гётит, гематит).

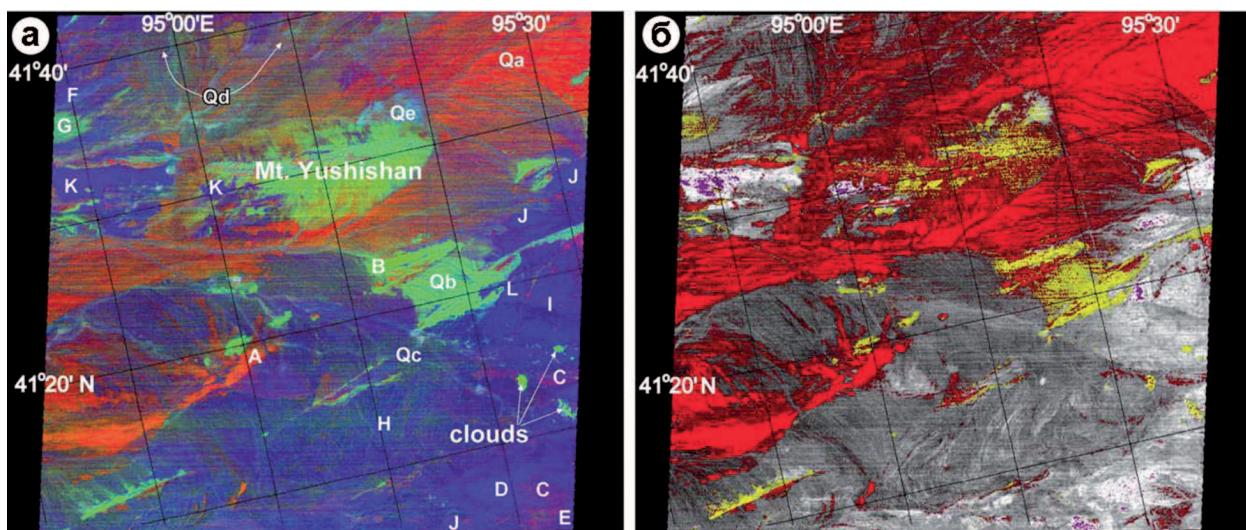


Рис. 5. Применение спектральных данных радиометра ASTER для литологического картирования района горы Юшиган, провинция Ганьсу, Китай. (а) цветовой композит индексов: QI-красный, CI-зелёный и MI-синий; (б) результаты интерпретации: красный цвет, кварциты ( $QI>1.05$ ); тёмно-красный, окварцованные породы ( $QI>1.03$ ); жёлтый, карбонаты ( $CI>1.045$ ); тёмно-жёлтый, вероятные карбонаты ( $CI>1.035$ ); малиновый, ультраосновные породы ( $MI>0.92$ ) (Ninomiya et al., 2005)

В Неваде была продемонстрирована высокая эффективность картирования горных пород по материалам, полученным съемочной аппаратурой SEBASS, работающей в ТИК диапазоне спектра (Vaughan et al., 2003). Был выделен комплекс пород, имеющие в своем составе кварц, глинистые минералы, ярозит, алюнит, сульфаты и другие. Для выделения горных пород использовались методы классификации.

Были предприняты попытки количественного подхода к определению SiO<sub>2</sub> в горных породах. Исследования были проведены в Хиллер Маутейнс (Hiller Mountains), Невада, США и Виргенес-Ла Реформа (Virgenes-La Reforma), Байя Калифорния Сур (Baja California Sur), Мексика (Hook et al., 2005). В результате работ по спектральным данным были построены карты количественного содержания SiO<sub>2</sub> в горных породах.

Показана возможность количественного определения концентраций светлых слюд в зеленокаменном поясе Пилбара (Pilbara), Западная Австралия (Ruitenbeek et

al., 2006). Для восстановления концентраций минералов использовались спектральные отношения.

Видимый и БИК диапазоны ASTER могут быть использованы для картирования оphiолитовых поясов, как было показано на примере Пакистана (Khan, Mahmood, 2008). Показана возможность картирования широкого круга горных пород оphiолитового комплекса: базальтов, габбро, диабазов, дунитов, серпентинитов. Для разделения горных пород применялся ряд индексов: каолинитовый, алюнитовый, кальцитовый и OH-индекс изменённых пород.

Данные спектрометра НуМАР в видимом и БИК диапазоне были успешно использованы для картирования комплекса ультраосновных пород внедрённых в протерозойские гнейсы и амфиболиты в Австралии (Rowan et al., 2004). Для разделения горных пород использовались методы классификации. Также данные НуМАР были успешно использованы при картировании карбонатитового комплекса в Гренландии (Bedini, 2009).

В штате Невада (США) с использованием спектральных методов была показана возможность картирования нового вида минералов и горных пород, содержащих аммоний, (Baugh et al., 1998). В полевых шпатах катион  $\text{NH}_4^+$  заменяет  $\text{K}^+$ , образуя аммониевый полевой шпат баддингтонит. Он образуется в зонах гидротермального изменения, связанных с золоторудными месторождениями. Была обнаружена линейная корреляция между концентрацией баддингтонита и глубиной линии поглощения на длине волны 2.12 мкм.

## Поиск рудных месторождений

Одним из наиболее распространённых объектов для исследований являются медно-порфировые месторождения, которые обладают ярко выраженной закономерно меняющейся зоной гидротермальных изменений. Такого рода работы были выполнены для района Серебряного пояса, Аризона, США (Abrams et al., 1985), Коллахуази (Collahuasi), Северное Чили (Sabins, 1997) и некоторых других (Spatz, Wilson, 1994). В результате исследования были выделены пропилитовая, аргиллитовая и филлитовая зоны метаморфизма.

Кварцево-жильные эпимеральные месторождения золота были исследованы в горном округе Голдфилд (Goldfield), Невада, США (Sabins, 1999). К. Ватсон (Watson et al., 1990) использовал спектральные данные TIMS в тепловом диапазоне для изучения гидротермальных месторождений золота несогласия Carlin в Неваде, США. Месторождения золота различного генезиса: горячих источников, скарновые, эпимеральные жильные, типа бонanza, гранитная и порфиритовая минерализации, и осадочного типа были исследованы в округе Santa Teresa, Сонора, Мексика с использованием данных спутника Landsat (Bennett et al., 1993). Данные радиометра ASTER были использованы для поиска измененных горных пород в Шоколадных горах (Калифорния, США) для локализации золоторудных проявлений в кварц-биотитовых гнейсах и мусковитовых сланцах докембрийского фундамента (Zhang et al., 2007).

В Аргентине выполнен анализ изменений горных пород в зоне медно-молибденовых порфировых месторождения Инфиернильо (Infiernillo), Аргентина (Tommaso, Rubinstein, 2007). Внутренняя зона изменения характеризуется калиевым метаморфизмом, на который были наложены интенсивные процессы серицитизации. Внешняя зона представляет собой обширный район окварцевания (рис. 6).

Железорудное месторождение Чадермалу (Chadermalu), Иран было обследовано с помощью спектральных методов. Месторождение представляет собой систему линз магнетитового или магнетит-апатитового (типа Кируна) состава. Месторождение находится в докембрийских породах (граниты, метаморфические сланцы, мраморы) и приурочено к палеокальдере Кух-э-Сорх (Kuh-e-Sorkh) с комплексом вулканических пород. Имеются зоны как натриевого, так и калиевого метаморфизма, связанных с оруденением. В самой верхней части залежи вмещающие породы переработаны кварцевым метаморфизмом (Moghtaderi et al., 2007).

В Испании в старом рудном районе (золото, серебро, свинец) проведены комплексные геохимические и спектрометрические работы по изучению спектральных свойств почв в связи с концентрациями таких элементов, как свинец, цинк, мышьяк (Choe et al., 2008). По данным спектрометра НуМАР и результатов геохимических анализов выявлены корреляции некоторых спектральных отношений с содержаниями тяжёлых металлов.

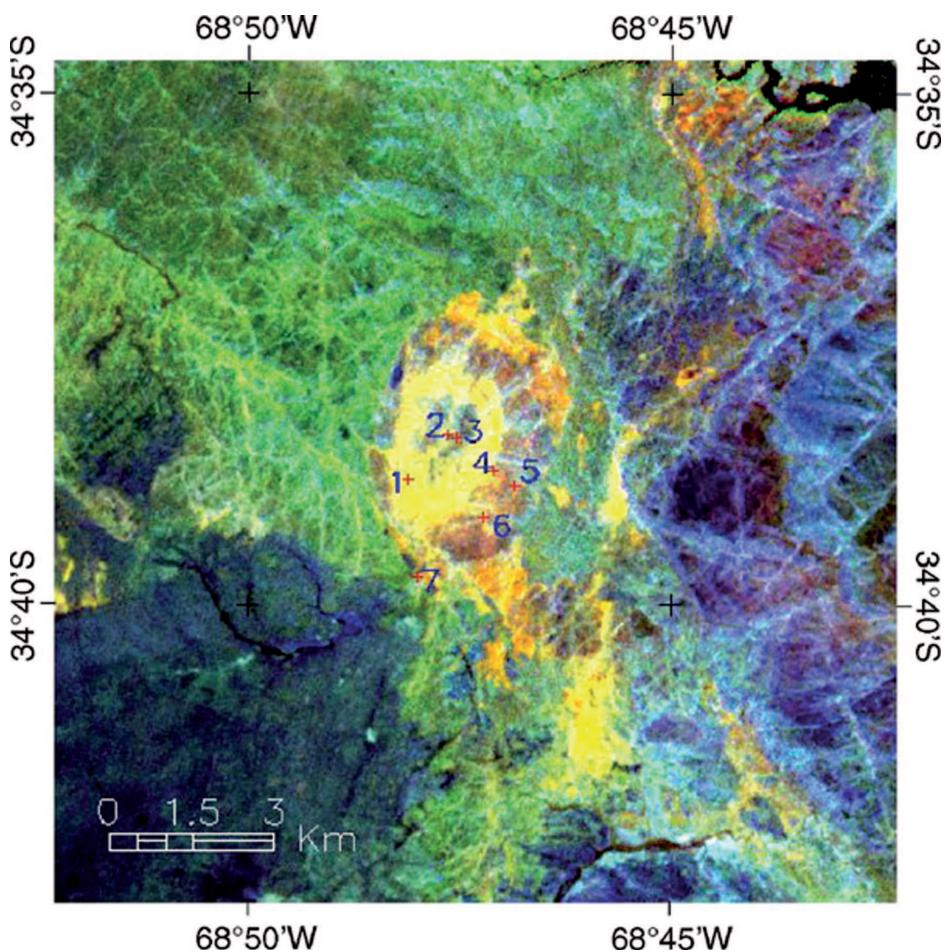


Рис. 6. Результаты спектрального анализа данных ASTER для медно-молибденовых порфировых месторождения Инфиернило, Аргентина. Цветами закодированы соотношения каналов 4/6 (R), 4/7 (G), 3/1 (B). Зелёному цвету отвечает пассивная периферия месторождений, синему цвету соответствуют вулканиты, изменённые породы вокруг месторождения показаны жёлтым и коричневым (Tommaso, Rubinstein, 2007)

Данные Landsat ETM были использованы для картирования зон изменения при поисках урановых месторождений несогласия в Северной Австралии (Rajesh, 2008). Для выявления зон изменённых горных пород использовался метод главных компонентов.

## **Поиск месторождений углеводородов, нерудного сырья и другие направления спектральных методов в геологии**

В результате работ по исследованию просачиваний углеводородов в Лиссабонской долине (Юта, США) были обнаружены высокие концентрации глинистых минералов, дефицит гематита, повышенные содержания кальцита и значительные изменения полевых шпатов в зонах изменений (Petrovic et al., 2008). Эти зоны были приурочены к участкам просачиваний углеводородов по региональному разлому. Для выделения перспективных участков использовался метод главных компонентов.

Схожие исследования, но с большим объёмом полевых работ, направленные на поиск высоких концентраций глинистых минералов, кальцита и кварца были выполнены в Китае (Xu et al., 2008).

Месторождения бора были изучены на примере соляных озёр в районе Салар де Юни (Salar de Uyuni), Боливия (Sabins, 1999). Эти исследования были продолжены в районе боливийско-чилийской границы, вулканическом районе, потенциально рудоносном на бораты (Hubbard, Crowley, 2005).

Результаты спектральных исследований прибором НуМАР были применены для картирования проявлений каолина, связанного с метаморфизмом гранитного массива Санкт Аустелл (St. Austell), Корнуолл, Великобритания (Ellis, Scott, 2004). Для анализа данных использовался метод максимального сходства с известными спектрами минералов. Были построены литологические карты массива с участками выходов гранитов и глин, а среди глинистых минералов были выделены каолинит, монтмориллонит, мусковит, лепидолит.

Современные поверхностные гидротермы характеризуются проявлением низкотемпературного метаморфизма, который фиксируется дистанционными спектральными методами. С помощью систем MASTER и SEBASS были выполнены работы в окрестностях гидротермального месторождения Стимбот Спрингс (Steamboat Springs), Невада, США (Vaughan et al., 2005). Выявлены участки окварцевания (опалы, кварц, альбит) и высоких концентраций глинистых минералов и слюд (каолинит, монтмориллонит, мусковит).

Там же, в Неваде, результаты съёмки НуМАР и AVIRIS были использованы для картирования отложений горячих источников, туфов, сульфатов (Kratt et al., 2006, Nash et al., 2004). Аналогичные результаты, но с использованием данных тепловых каналов ASTER и других спектрометров были получены для Йеллоустонского национального парка, США (Hellman, Ramsey, 2004).

Из необычных примеров применения спектрометрии в геологии можно упомянуть спектроскопию кернов (<http://www.specim.fi/>), а также лазерную флюoresценцию при поиске углеводородов на водной поверхности (Patsayeva, 2001). Интересные работы по прямому определению просачиваний метана над водной поверхностью были выполнены в Калифорнии с помощью спектрометра AVIRIS (Roberts, 2010).

## **Заключение**

В результате обзора опыта применения дистанционных методов при спектральных исследованиях в геологии можно сделать следующие выводы:

1) Технические средства ДЗ позволяют решать широкий круг геологических задач: геологическое (литологическое) картирование, поиски месторождений полезных ископаемых.

2) Предъявляются высокие требования к калибровке, атмосферной коррекции данных, то есть к качеству решения обратной геофизической задачи.

3) Существенные ограничения на применение метода накладываются со стороны расительности, режима освещённости и температуры поверхности.

## Литература

1. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры силикатов. М.: Изд. МГУ, 1967. 187 с.
2. Abrams M.J., Brown D. Silver Bell, Arizona, porphyry copper test site // The Joint NASA-Geosat test case study, Section 4, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, 1985. 73 p.
3. Baugh W. M., Kruse F. A., Atkinson Jr. W. W. Quantitative Geochemical Mapping of Ammonium Minerals in the Southern Cedar Mountains, Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // Remote Sensing of Environment, 1998, Vol. 65. 3. P. 292-308.
4. Bedini E. Mapping lithology of the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland, using HyMap imaging spectrometer data // Remote Sensing of Environment, 2009. Vol. 113. 6. P. 1208-1219.
5. Bennett S.A., Atkinson W.W., Kruse F.A. Use of thematic mapper imagery to identify mineralization in the Santa Teresa District, Sonora, Mexico // Int. Geol. Rev., 1993. 35. P. 1009– 1029.
6. Choe E., van der Meer F., van Ruitenbeek F., van der Werff H., de Smeth B., Kim K.W. Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain // Remote Sensing of Environment, 2008. Vol. 112. 7. P. 3222-3233.
7. Crosta A. P., Sabine C., Taranik J. V. Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, Using AVIRIS Hyperspectral Data // Remote Sensing of Environment, 1998, Vol. 65. 3. P. 309-319.
8. Ellis R. J., Scott P. W. Evaluation ofhyperspectral remote sensing as a means of environmental monitoring in the St. Austell China clay (kaolin) region, Cornwall, UK // Remote Sensing of Environment, 2004. Vol. 93. 1-2. P. 118-130.
9. Hellman M. J., Ramsey M. S. Analysis of hot springs and associated deposits in Yellowstone National Park using ASTER and AVIRIS remote sensing // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004. Vol. 135. 1-2. P. 195-219.
10. Hook S. J., Dmochowski J. E., Howard K. A., Rowan L. C., Karlstrom K. E., Stock J. M. Mapping variations in weight percent silica measured from multispectral thermal infrared imagery--Examples from the Hiller Mountains, Nevada, USA and Tres Virgenes-La Reforma, Baja California Sur, Mexico // Remote Sensing of Environment, 2005. Vol. 95. 3. P. 273-289.
11. Hubbard E., Crowley J.K. Mineral mapping on the Chilean–Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions // Remote Sensing of Environment, 2005. Vol. 99. 1-2. P. 173-186.
12. Khan S. D., Mahmood K. The application of remote sensing techniques to the study of ophiolites // Earth-Science Reviews, 2008. Vol. 89. 3-4. P. 135-143.
13. Kratt C., Calvin W., Coolbaugh M. Geothermal exploration with Hymap hyperspectral data at Brady-Desert Peak, Nevada // Remote Sensing of Environment, 2006. Vol. 104. 3. P. 313-324.
14. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran // Journal of Asian Earth Sciences, 2007. Vol. 30. 2. P. 238-252.
15. Nash G. D., Johnson G. W., Johnson S. Hyperspectral detection of geothermal system-related soil mineralogy anomalies in Dixie Valley, Nevada: a tool for exploration // Geothermics, 2004. Vol. 33. 6. P. 695-711.

16. *Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T. J.* Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared 'radiance-at-sensor' data // *Remote Sensing of Environment*, 2005. Vol. 99. 1-2. P. 127-139.
17. *Patsayeva S., Varlamov V., Yuzhakov V., Barbini R., Fantoni R., Frassanito C., Palucci A.* Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface // *EARSeL eProceedings*, 2001. №. 1. P. 106-114.
18. *Petrovic A., Khan S.D., Chafetz H.S.* Remote detection and geochemical studies for finding hydrocarbon-induced alterations in Lisbon Valley, Utah // *Marine and Petroleum Geology*, 2008. Vol. 25. 8. P. 696-705.
19. *Rajesh H.M.* Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using Landsat ETM+ // *Ore Geology Reviews*, 2008. Vol. 33. 3-4. P. 382-396.
20. *Roberts D. A., Bradley E. S., Cheung R., Leifer I., Dennison Ph. E., Margolis J. S.* Mapping methane emissions from a marine geological seep source using imaging spectrometry // *Remote Sensing of Environment*, 2010. Vol. 114. 3. P. 592-606.
21. *Rowan L. C., Mars J. C.* Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // *Remote Sensing of Environment*, 2003. Vol. 84. 3. P. 350-366.
22. *Rowan L. C., Simpson C. J., Mars J. C.* Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia // *Remote Sensing of Environment*, 2004. Vol. 91. 3-4. P. 419-431.
23. *Ruitenbeek van F. J.A., Debbia P., van der Meer F. D., Cudahy T., van der Meijde M., Hale M.* Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios // *Remote Sensing of Environment*, 2006. Vol. 102. 3-4. P. 211-222.
24. *Sabins F.F.* *Remote Sensing – Principles and Interpretation*, 3rd edn. // W.H. Freeman, New York, NY, 1997. 494 p.
25. *Sabins F. F.* Remote sensing for mineral exploration // *Ore Geology Reviews*, 1999. 14. P. 157–183.
26. *Spatz D.M., Wilson R.T.* Exploration remote sensing for porphyry copper deposits, western America Cordillera // *Proceedings Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*. Environmental Research Institute of Michigan, 1994. Ann Arbor, MI. P. 1227–1240.
27. *Tommaso I.D., Rubinstein N. N.* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews*, 2007. Vol. 32. 1-2. P. 275-290.
28. *Vaughan R. G., Calvin W. M., Taranik J. V.* SEBASS hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping // *Remote Sensing of Environment*, 2003. Vol. 85. 1. P. 48-63.
29. *Vaughan R. G., Hook S. J., Calvin W. M., Taranik J. V.* Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images // *Remote Sensing of Environment*, 2005. Vol. 99. 1-2. P. 140-158.
30. *Watson K., Kruse F.A., Hummer-Miller S.* Thermal infrared exploration in the Carlin trend, northern Nevada // *Geophysics*, 1990. Vol. 55. P. 70–79.
31. *Xu D.Q., Ni G.Q., Jiang L.L., Shen Yu.T., Li T., Ge Sh.L., Shu X.B.* Exploring for natural gas using reflectance spectra of surface soils // *Advances in Space Research*, 2008. Vol. 41. 11. P. 1800-1817.
32. *Zhang X., Pazner M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007. Vol. 62. 4. P. 271-282.

# **Spectral remote sensing for mineral exploration. A review**

**A.A. Tronin, V.I. Gorny, S.G. Krutsuk, I.Sh. Latypov**

*Institution of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for  
Ecological Safety RAS  
197110, Saint-Petersburg, Korpusnaya st., 18  
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.edu*

Spectral methods in remote sensing and geology became widespread nowadays. A lot of multispectral and hyperspectral devices were designed for airborne and satellite survey. Physical base of spectral methods application in geology is spectral signatures of minerals and other substances on the Earth surface. Spectral signatures of minerals, soils, anthropogenic objects are considered both visible-near infrared and thermal infrared range of electromagnetic spectrum. Analysis of mathematical methods of minerals-indicator separation discovers high potential of multispectral and hyperspectral for mineral exploration. The review of multispectral and hyperspectral applications in geology indicates the following directions of remote sensing methods development: lithological mapping, ore mineral exploration, hydrocarbon exploration, hydrothermal alteration mapping and some others.

**Keywords:** spectral methods, remote sensing, geology, mineral exploration.