

Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский
научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор

*Тронин Андрей Аркадьевич
Горный Виктор Иванович*

тел: 7-812-230-79-34

факс: 7-812-235-43-61

E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

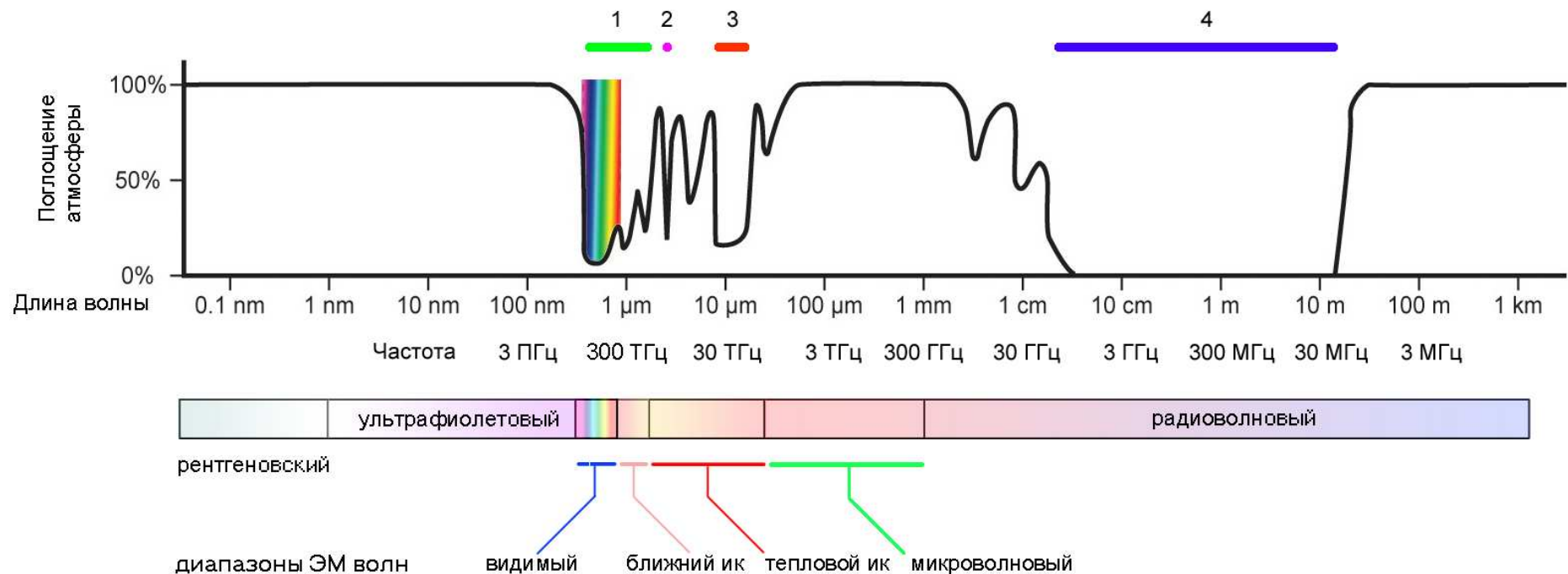
<http://www.ecosafety-spb.ru>

* Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии

Спектральный анализ - физический метод определения состава вещества, основанный на получении и исследовании его спектров.

- * Физические основы
- * Аппаратура
- * Методика обработки данных
- * Результаты

* Спектральное поглощение ЭМ излучения атмосферой Земли



* Видимый и БИК диапазоны спектра

Поглощение, пропускание и отражение веществом электромагнитного излучения на земной поверхности описывается уравнением баланса:

$$* I_a + I_t + I_r = I_s$$

где, I_a - плотность потока излучения, поглощённого поверхностью, $Вт/м^2$,

I_t - плотность потока преломленного поверхностью излучения, $Вт/м^2$,

I_r - плотность потока отражённого излучения (*radiance*), $Вт/м^2$,

I_s - плотность потока излучения, падающего на земную поверхность (*irradiance*), $Вт/м^2$.

Поглощенное и преломленное излучение удобно объединить в один член I_{at}

$$* I_{at} / I_s + I_r / I_s = 1$$

В безразмерной форме через коэффициенты поглощения и отражения:

$$* R_{at} + R_r = 1$$

где, R_{at} - коэффициент поглощения, R_r - коэффициент отражения.

Коэффициент отражения представляет собой отношение плотности потока отражённого излучения к плотности потока излучения, падающего на поверхность:

$$* R_r = I_r / I_s$$

Коэффициент отражения для всего спектрального диапазона излучения, достигающего земной поверхности называется альбедо. Коэффициент отражения для определённого спектрального интервала принято называть - КСЯ (*reflectance*).

Альбедо и КСЯ выражаются либо в долях единицы, либо в процентах.

* ИК-тепловой диапазон

ИК тепловой диапазон отличается от видимого и БИК диапазонов наличием собственного излучения земной поверхности. Уравнение баланса с учётом закона Кирхгофа для теплового диапазона может быть переписано в виде:

$$* I_{\varepsilon} + I_r = I_s$$

где,

I_{ε} - плотность потока собственного (теплового) излучения, $Вт/м^2$,

I_r - плотность потока отражённого излучения, $Вт/м^2$,

I_s - плотность потока падающего излучения, $Вт/м^2$.

$$* I_{\varepsilon} / I_s + I_r / I_s = 1$$

В уравнении I_{ε} / I_s является коэффициентом излучения поверхности ε , а I_r / I_s - коэффициентом отражения - a . Таким образом, закон Кирхгофа записывается в виде:

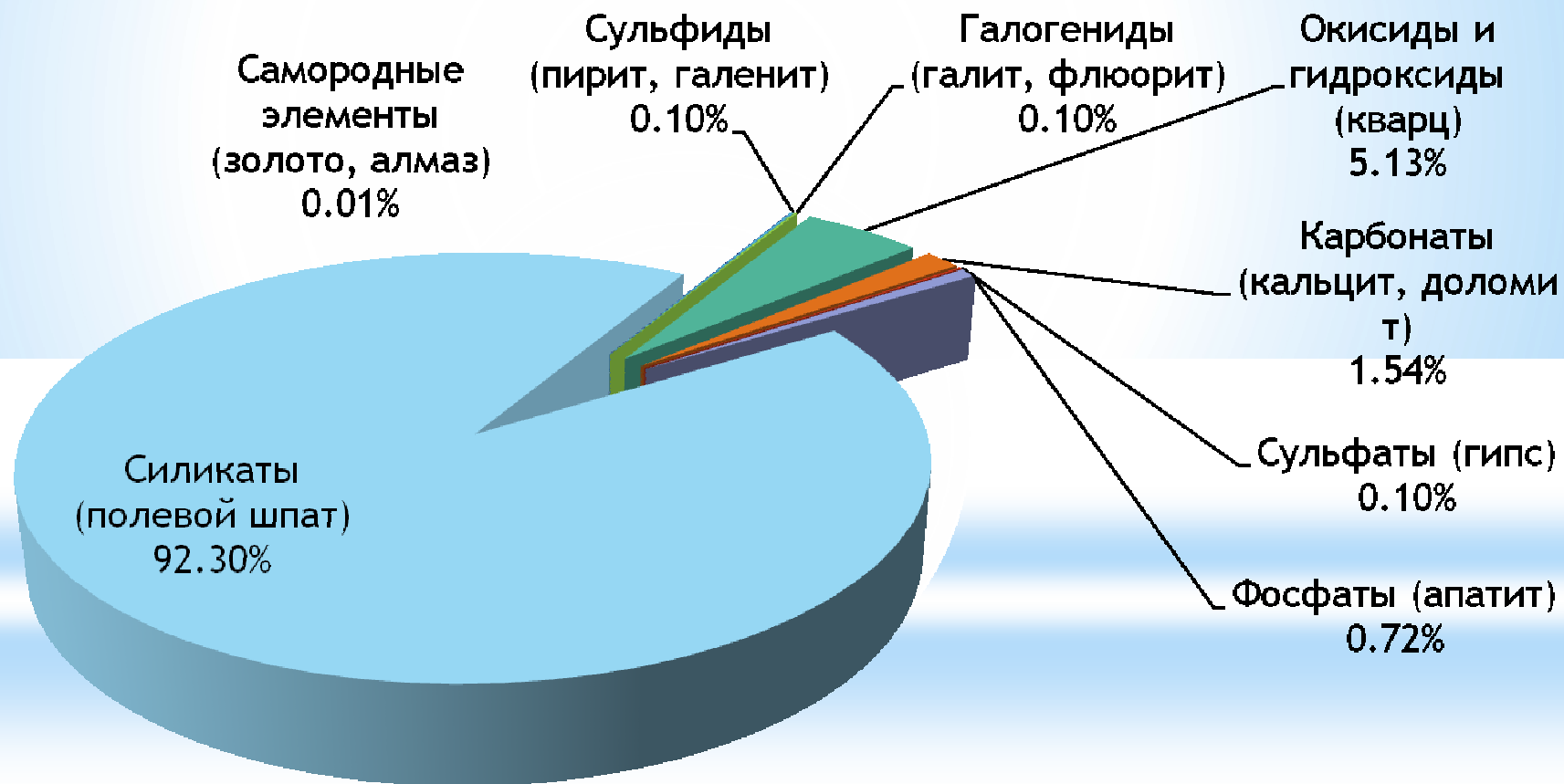
$$* a + \varepsilon = 1$$

где,

a - коэффициент отражения,

ε - коэффициент излучения (*emissivity*).

Распространение классов минералов в земной коре по массе

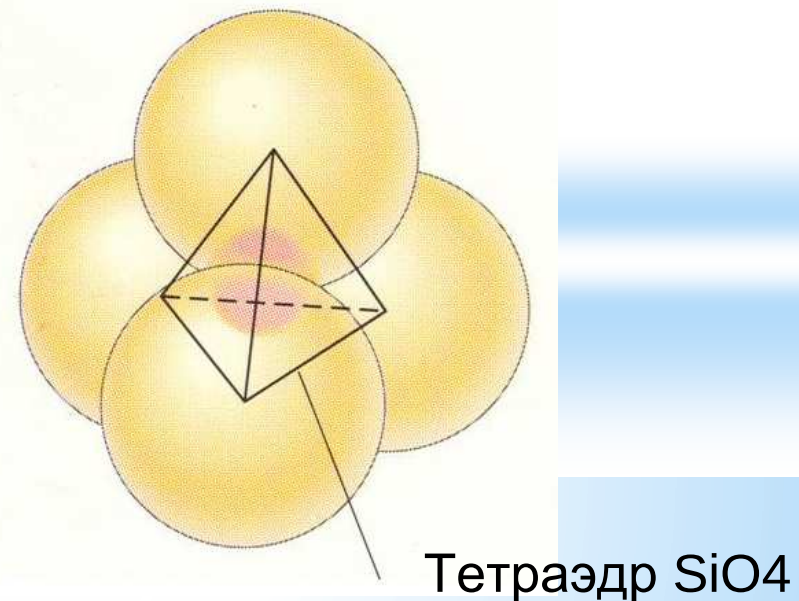
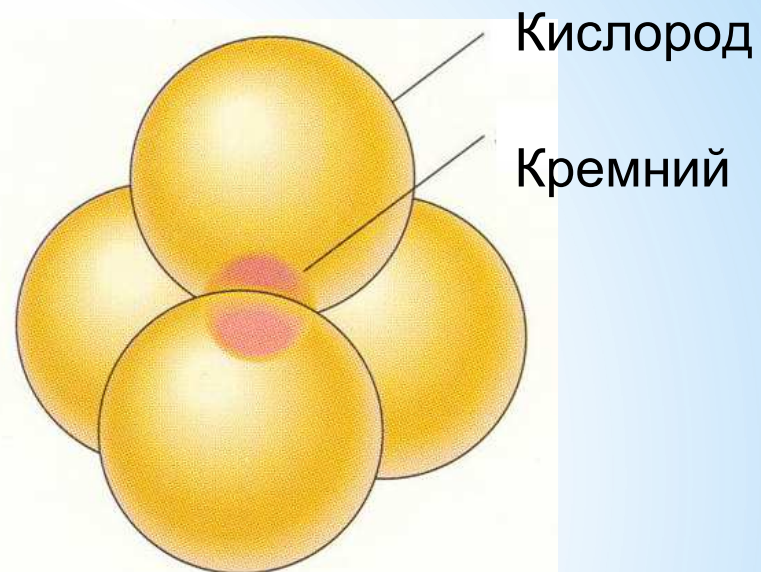


* Силикаты

СИЛИКАТЫ - соли кремниевых кислот



M_1M_2 – калий, натрий, кальций и др.



* Силикаты

* Островные силикаты



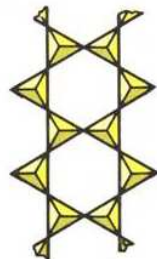
* Оливин, гранаты

* Цепочечные силикаты



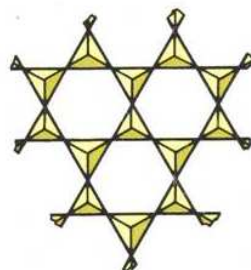
* Пироксены

* Ленточные силикаты



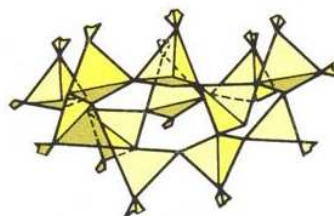
* Амфиболы

* Слоистые силикаты



* Тальк, серпентин, каолин, слюды, хлориты

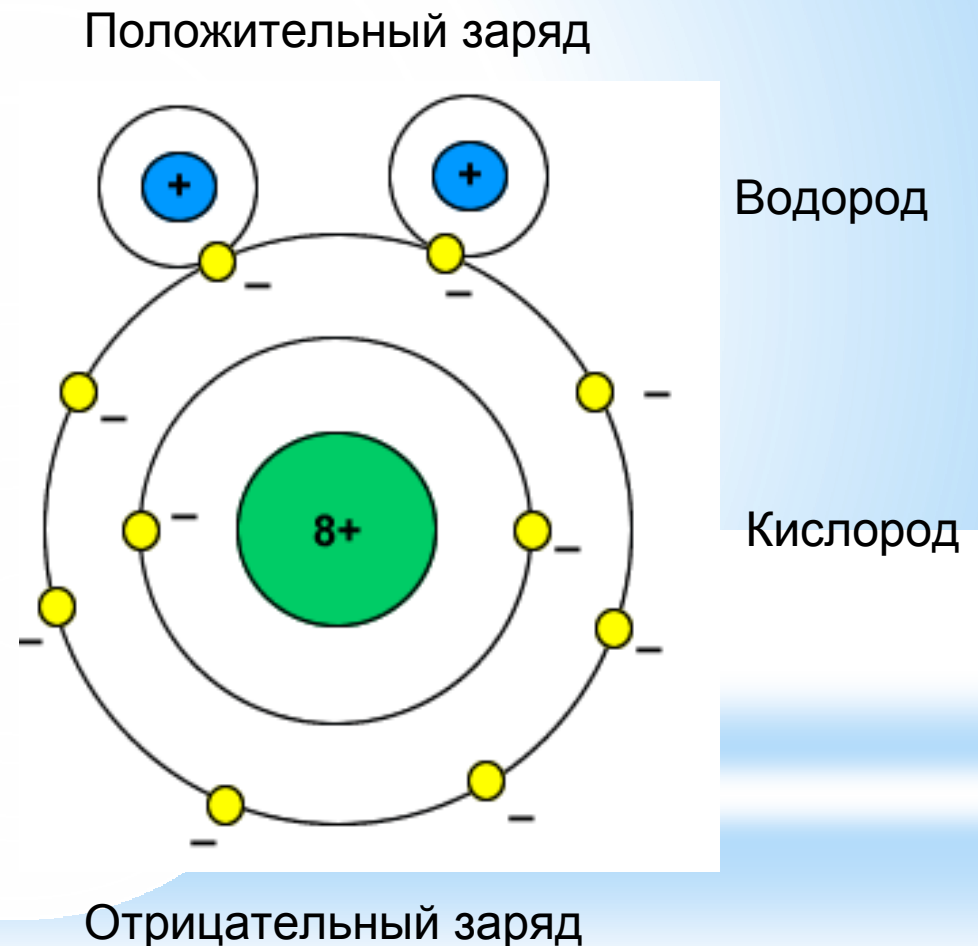
* Каркасные силикаты



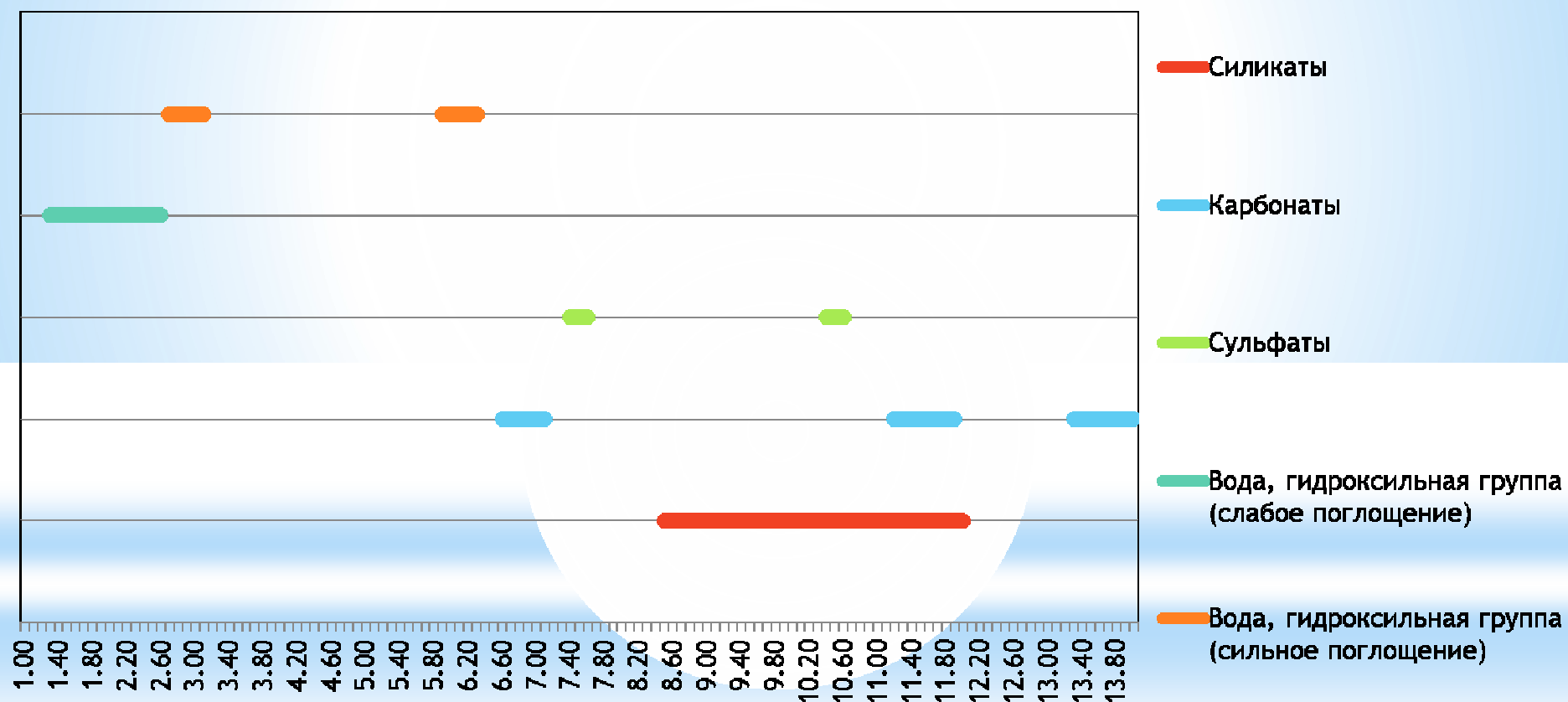
* Полевые шпаты, фельдшпатоиды (нефелин), (кварц)

* Вода

- * конституционная
- * кристаллизационная
- * вода твердых коллоидов
- * межплоскостная
- * межслоевая
- * гигроскопическая
- * физически связанная
- * химически связанная
- * цеолитная
- * адсорбционная



* Основные диапазоны линий поглощения минералов



* Основные технические характеристики спутниковых многоспектральных и гиперспектральных систем ДЗЗ

<i>Спутниковая система</i>	<i>EOS</i>	<i>Landsat</i>	<i>EOS (Terra)</i>	<i>Hyperion</i>	<i>ALI</i>
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 ¹	БИК ²	-	Панхром ³
Разрешение на местности (Видимый/БИК/ТИК), м	250/500/1000 ⁴	30/30/60	15/30/90	30	30/30
Ширина полосы обзора, км	2330	185	60	7.5	37
Число уровней квантования (Видимый/БИК/ТИК), бит	12/12/12	8/8/8 лучшие 8 из 9	8/8/12	12	12
Время пересечения экватора	10:30 Terra 13:30 Aqua	10:00 Landsat-7	10:30	10:00	10:00

¹ Панхроматический канал с разрешением 15 м;

² Ближний ИК канал смотрит назад под углом 27.6 градуса с разрешением 15 м;

³ Панхроматический канал с разрешением 10 м;

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

* Основные технические характеристики авиационных многоспектральных и гиперспектральных систем ДЗЗ

<i>Спектральные каналы</i>	<i>Сканер</i>			
	<i>MASTER¹</i>	<i>SEBASS²</i>	<i>AVIRIS³</i>	<i>HyMAP⁴</i>
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

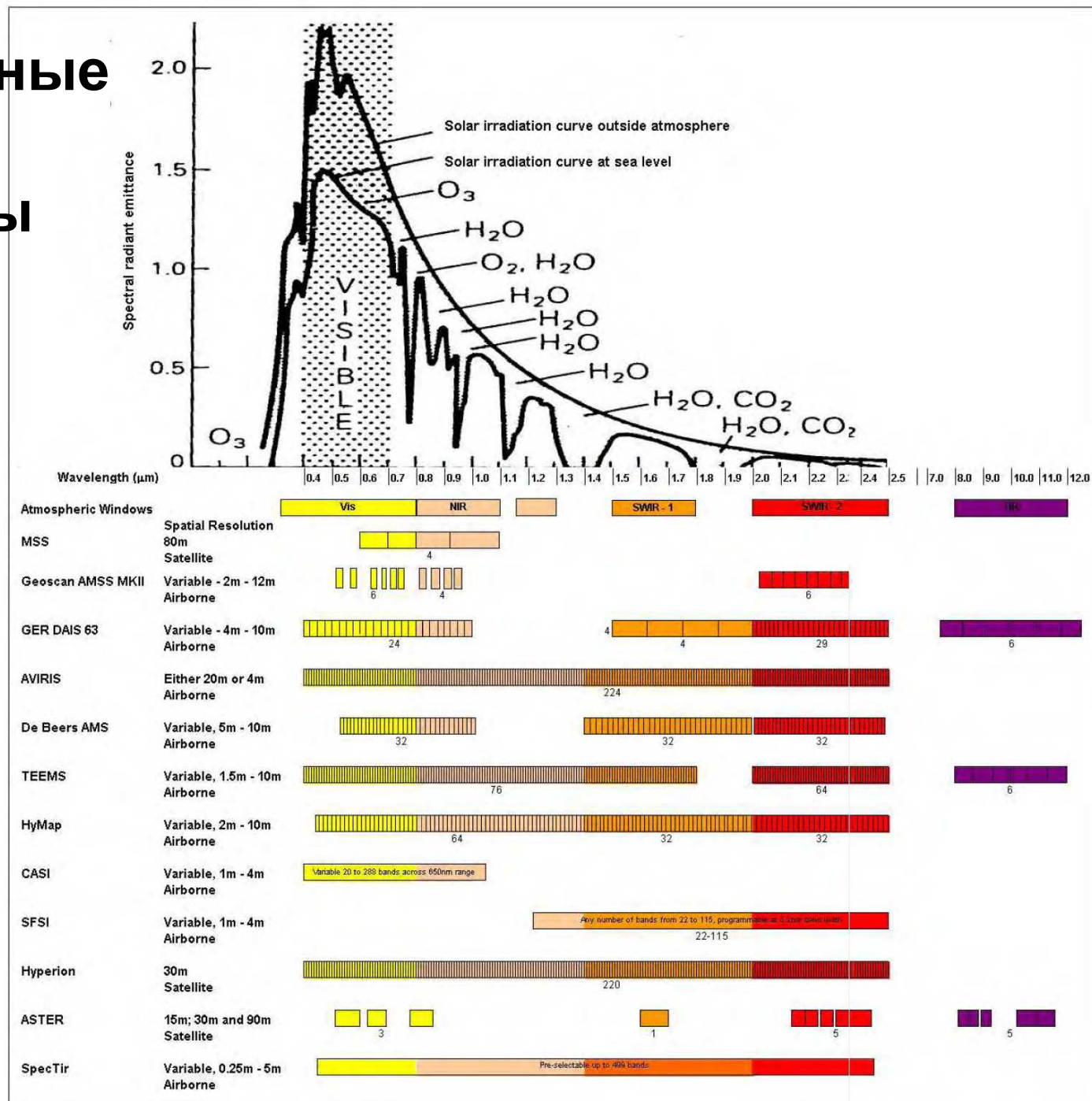
¹ MODIS/ASTER Airborne Simulator (<http://masterweb.jpl.nasa.gov>);

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

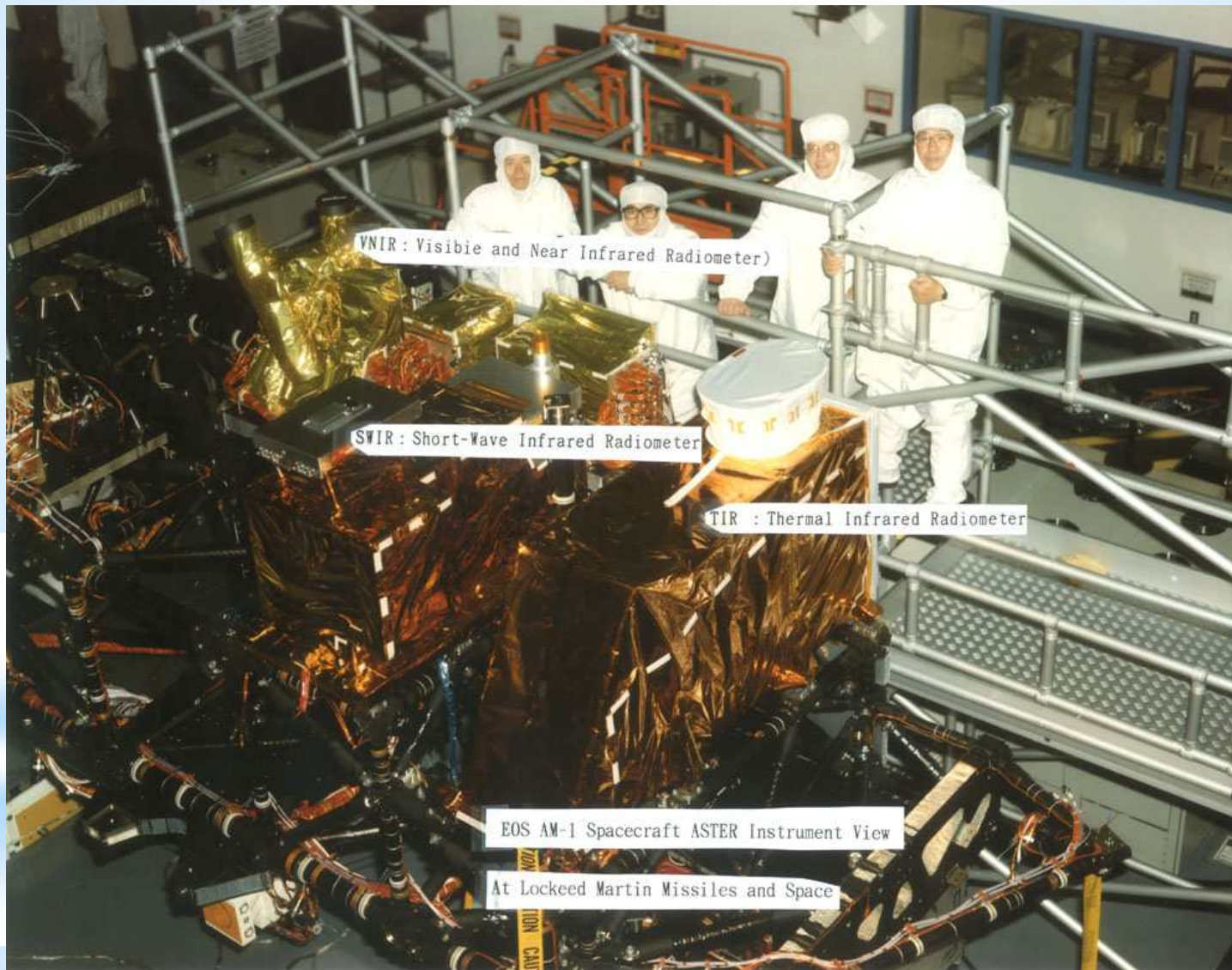
³ Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (<http://aviris.jpl.nasa.gov/>)

⁴ <http://www.hyvista.com>

* Спектральные каналы аппаратуры

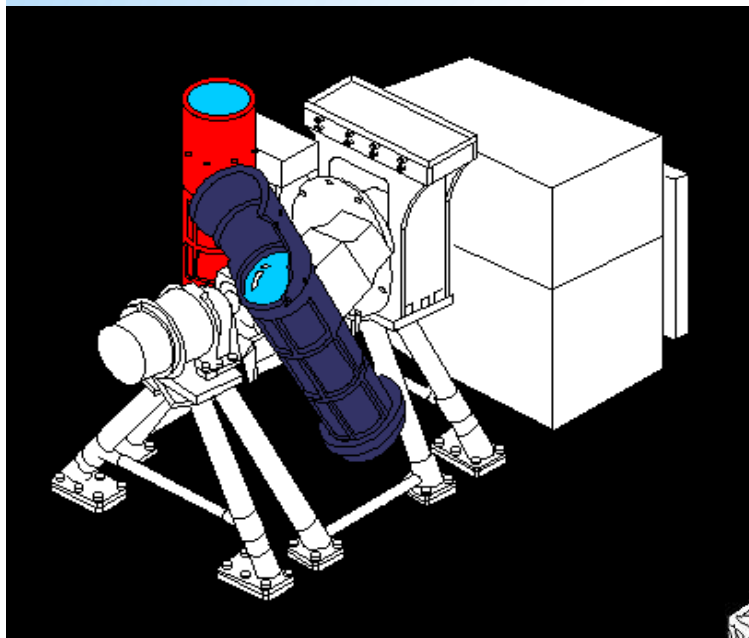


* ASTER

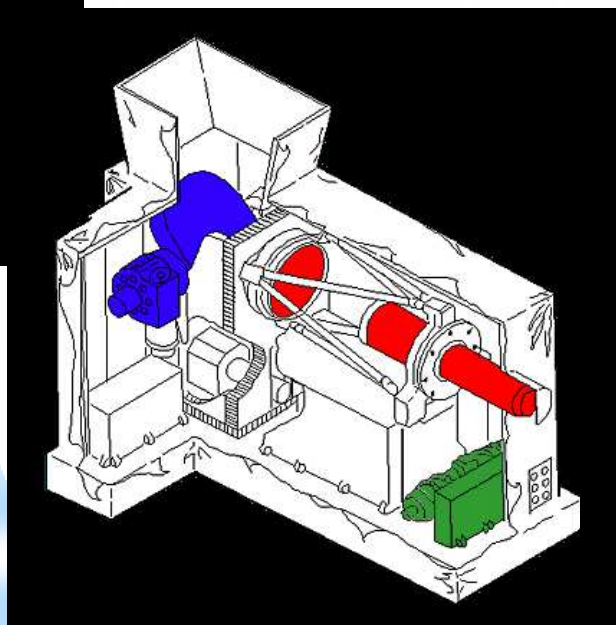


ASTER Instrument on EOS-AM1 Platform

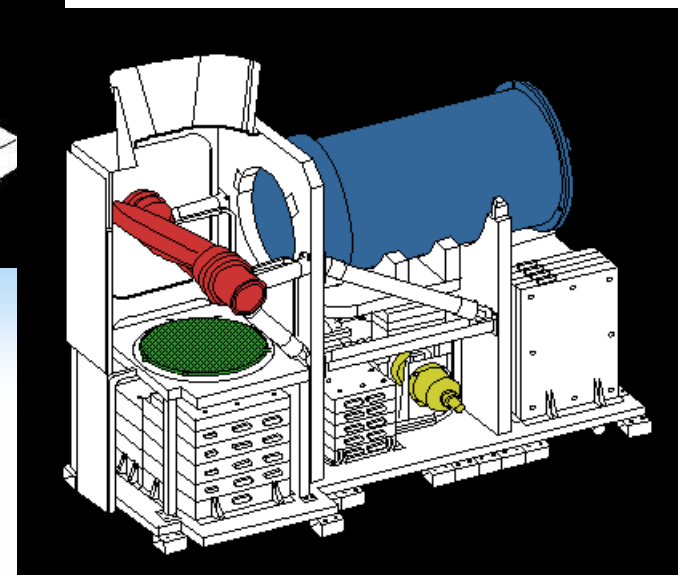
* ASTER



VNIR, каналы № 1-3,3В
0.52 - 0.86 мкм
NEC Corporation



SWIR, каналы № 4-9
1.60 - 2.43 мкм
Mitsubishi Electric Corp



TIR, каналы № 10-14
8.12 - 11.65 мкм
Fujitsu LTD

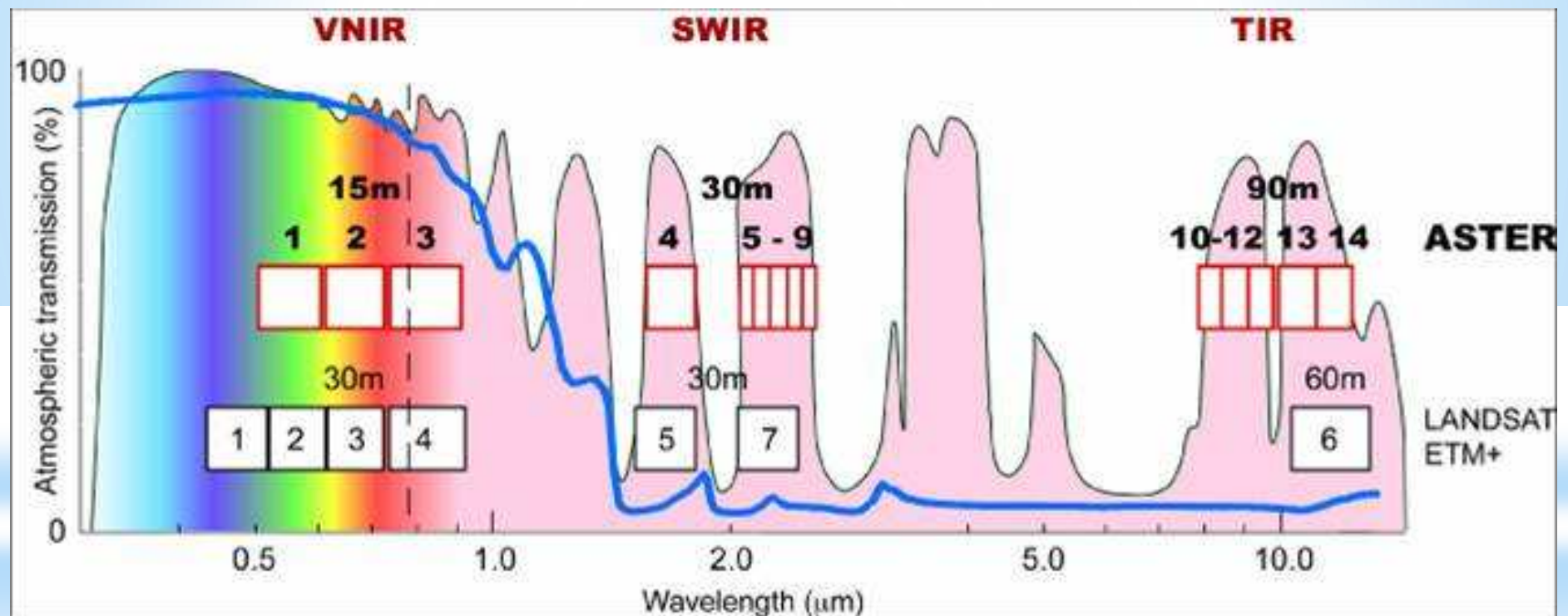
Электропитание
Hitachi LTD

* ASTER

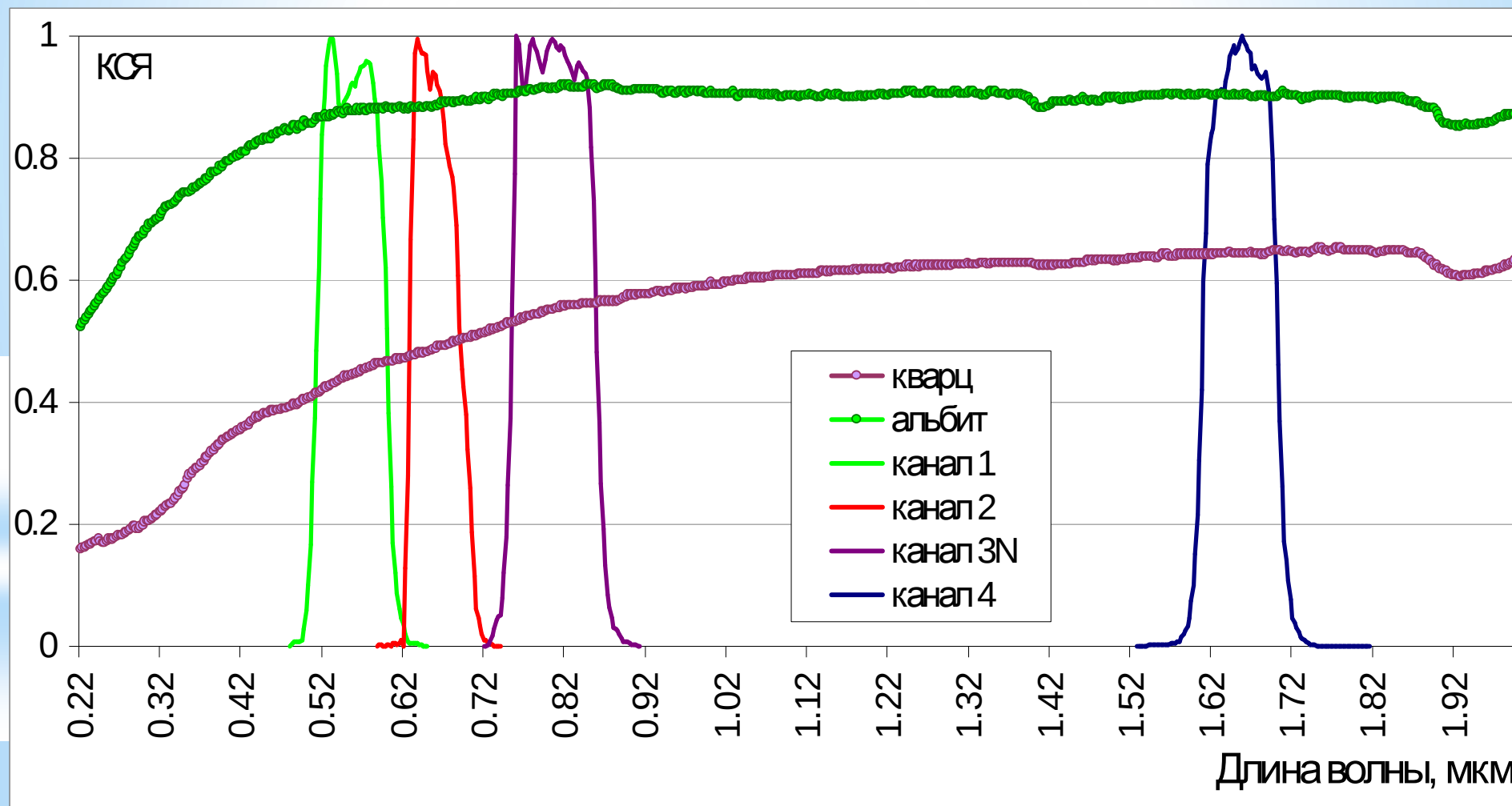
Вода, гидроксильная группа



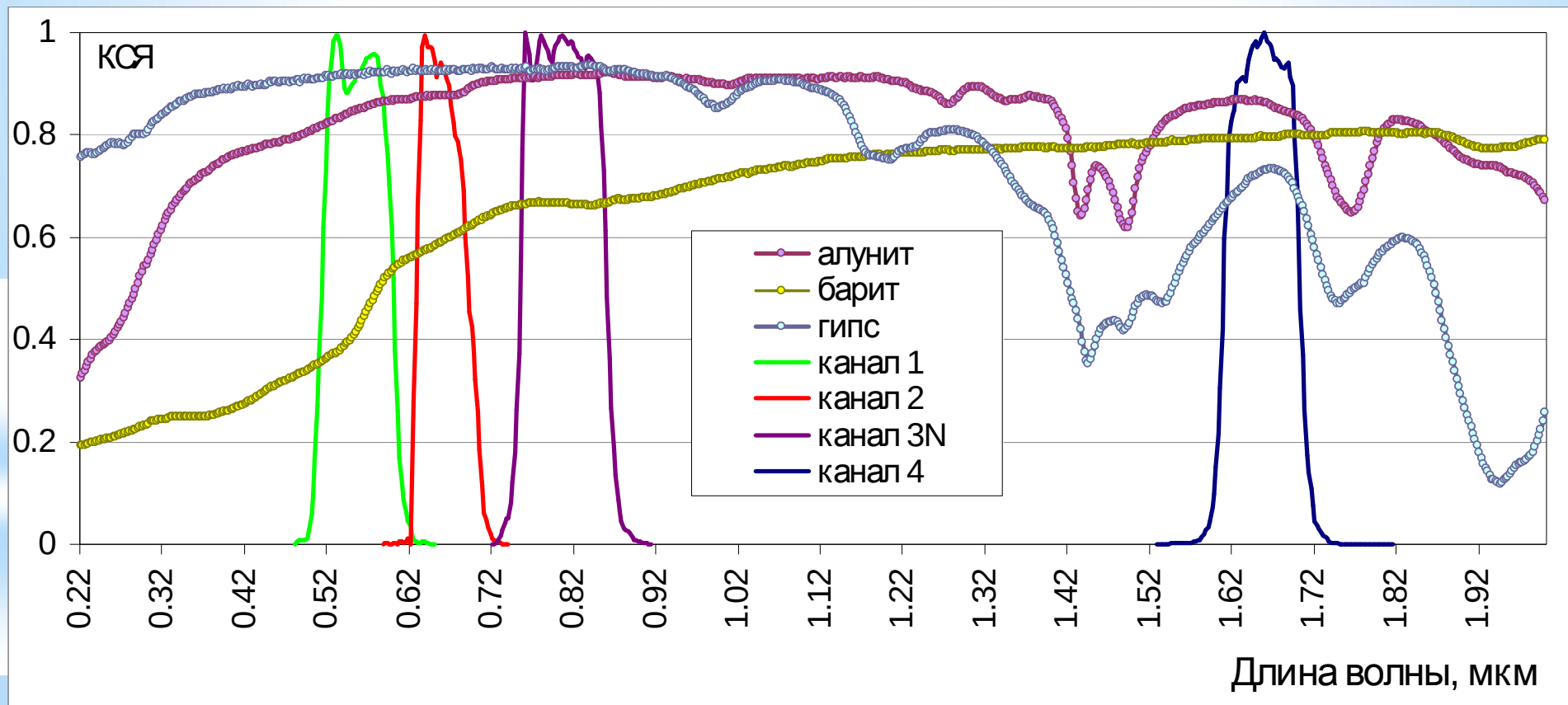
Силикаты, карбонаты, сульфаты



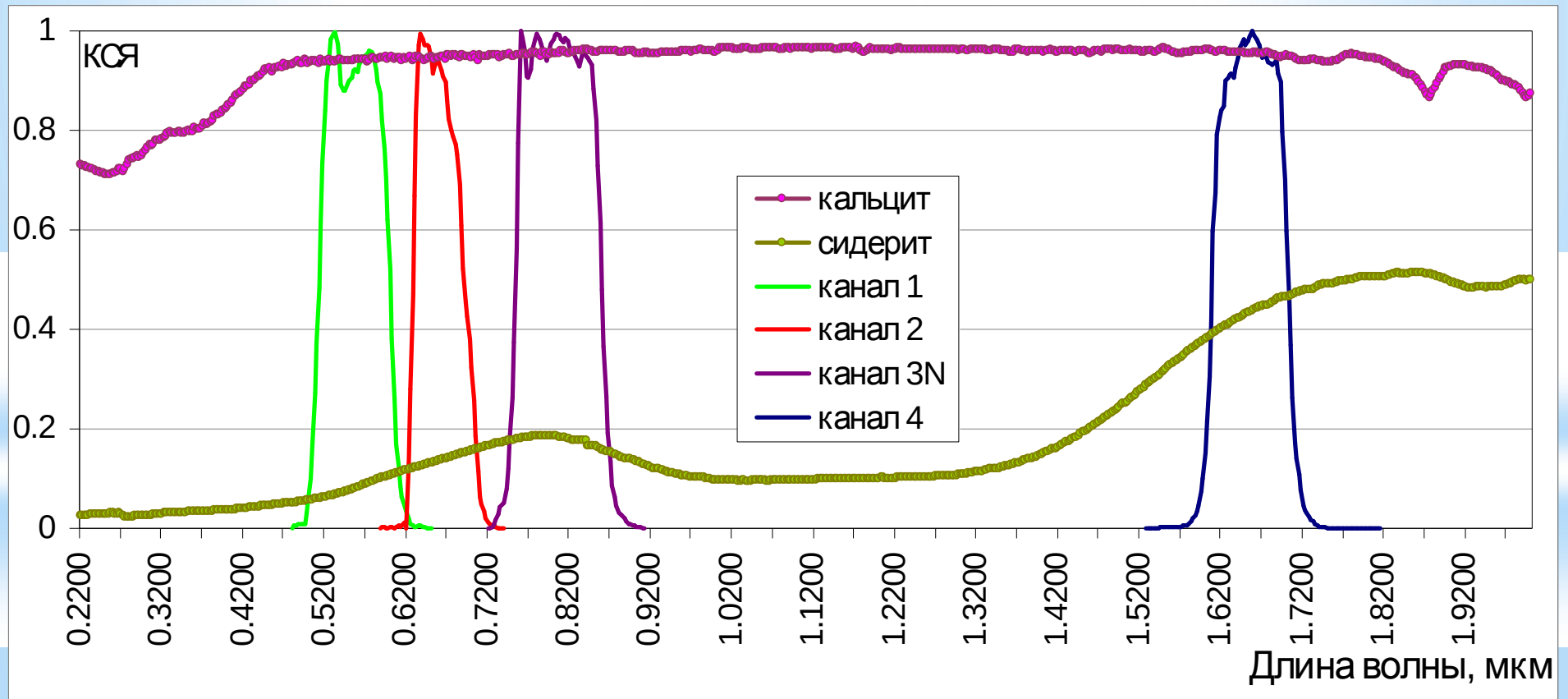
* Спектр кварца, полевого шпата и спектральные каналы радиометра ASTER



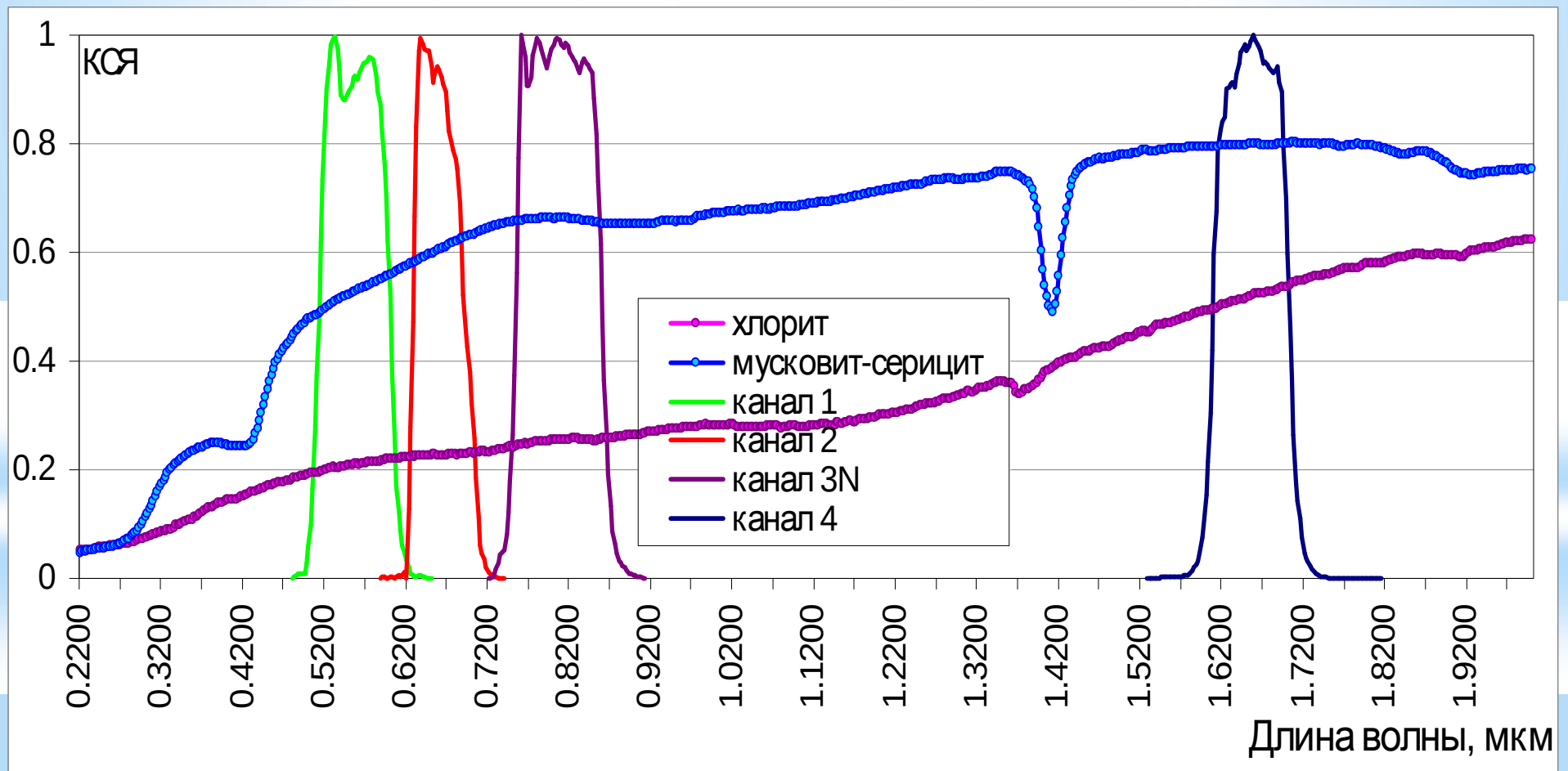
* Спектры сульфатов (алунит, барит, гипс) и спектральные каналы радиометра ASTER



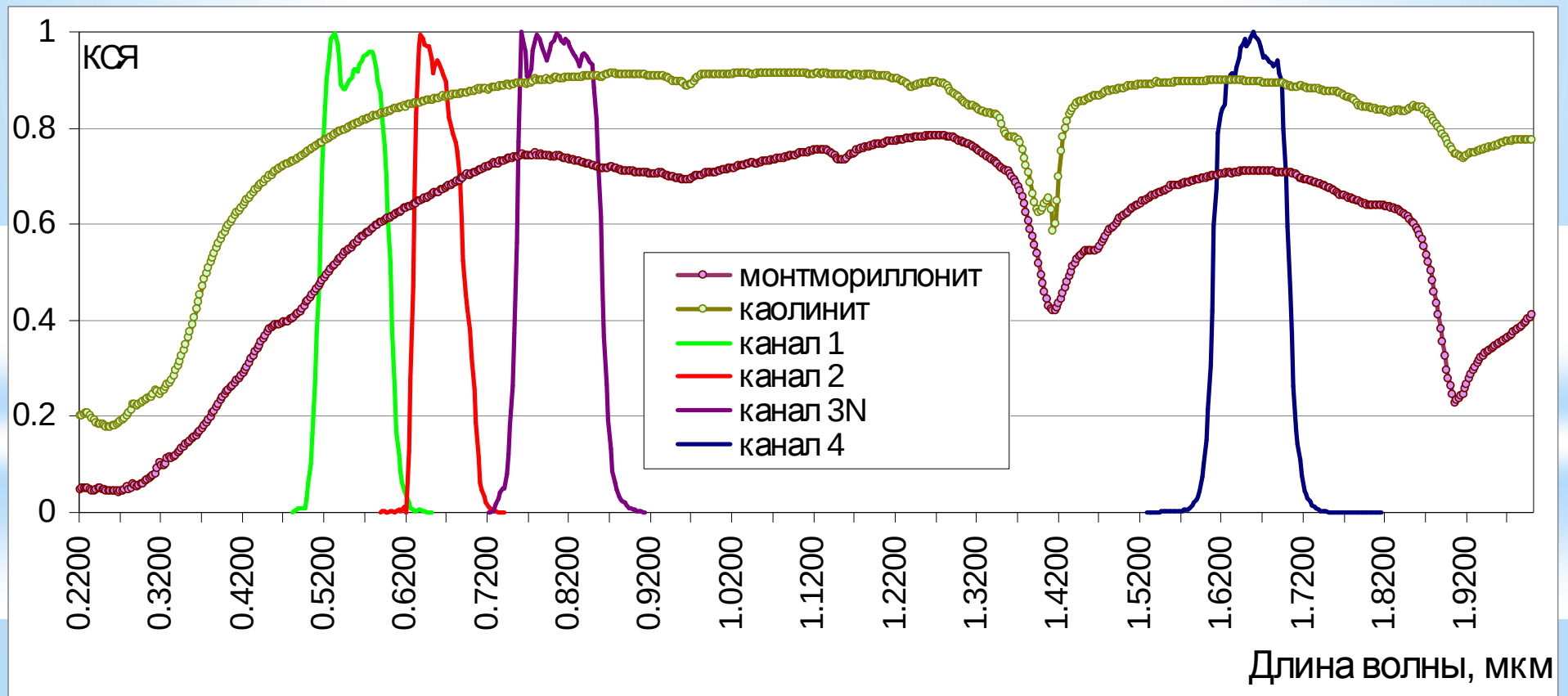
* Спектры карбонатов (кальцит, сидерит) и спектральные каналы радиометра ASTER



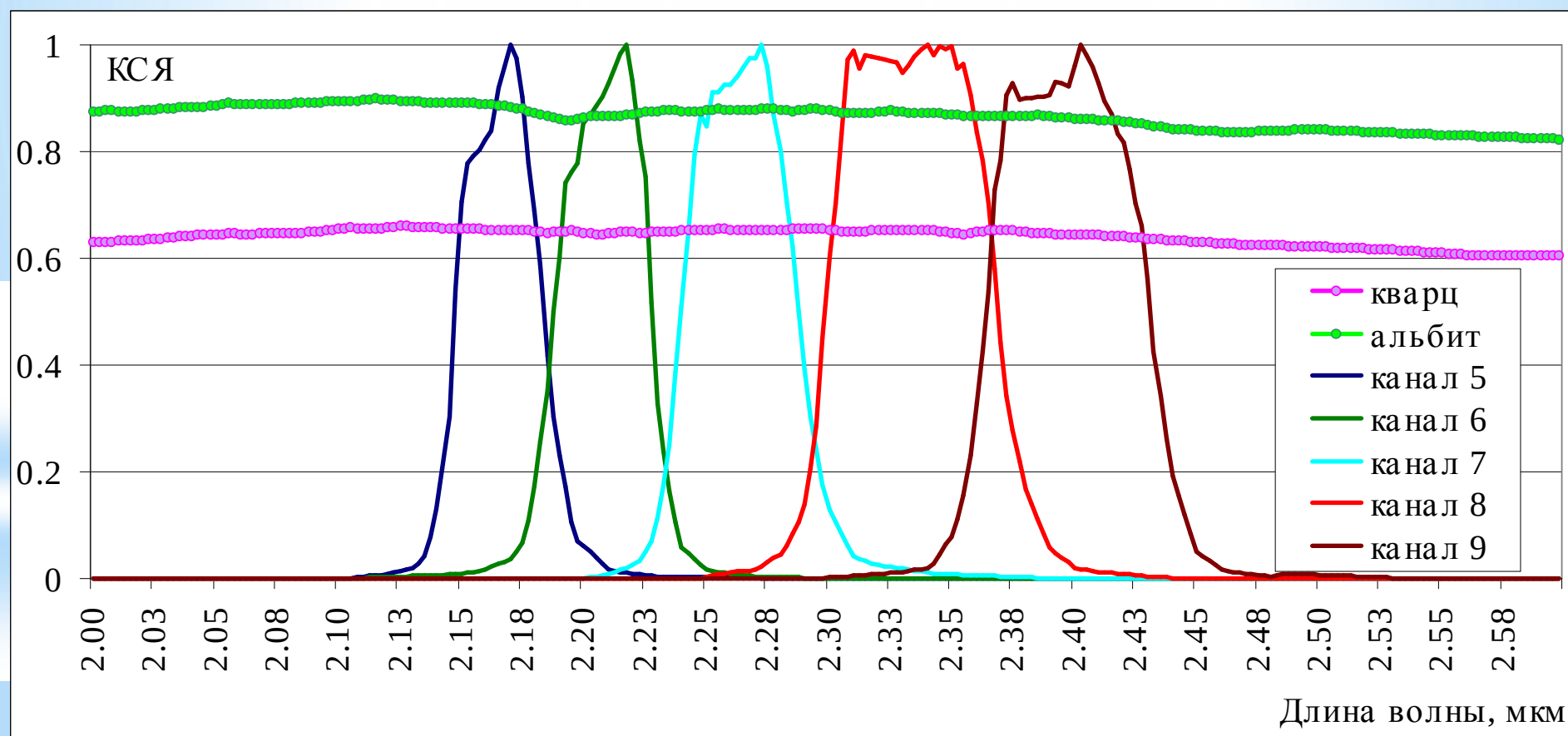
* Спектры мусковита-серицита и хлорита и спектральные каналы радиометра ASTER



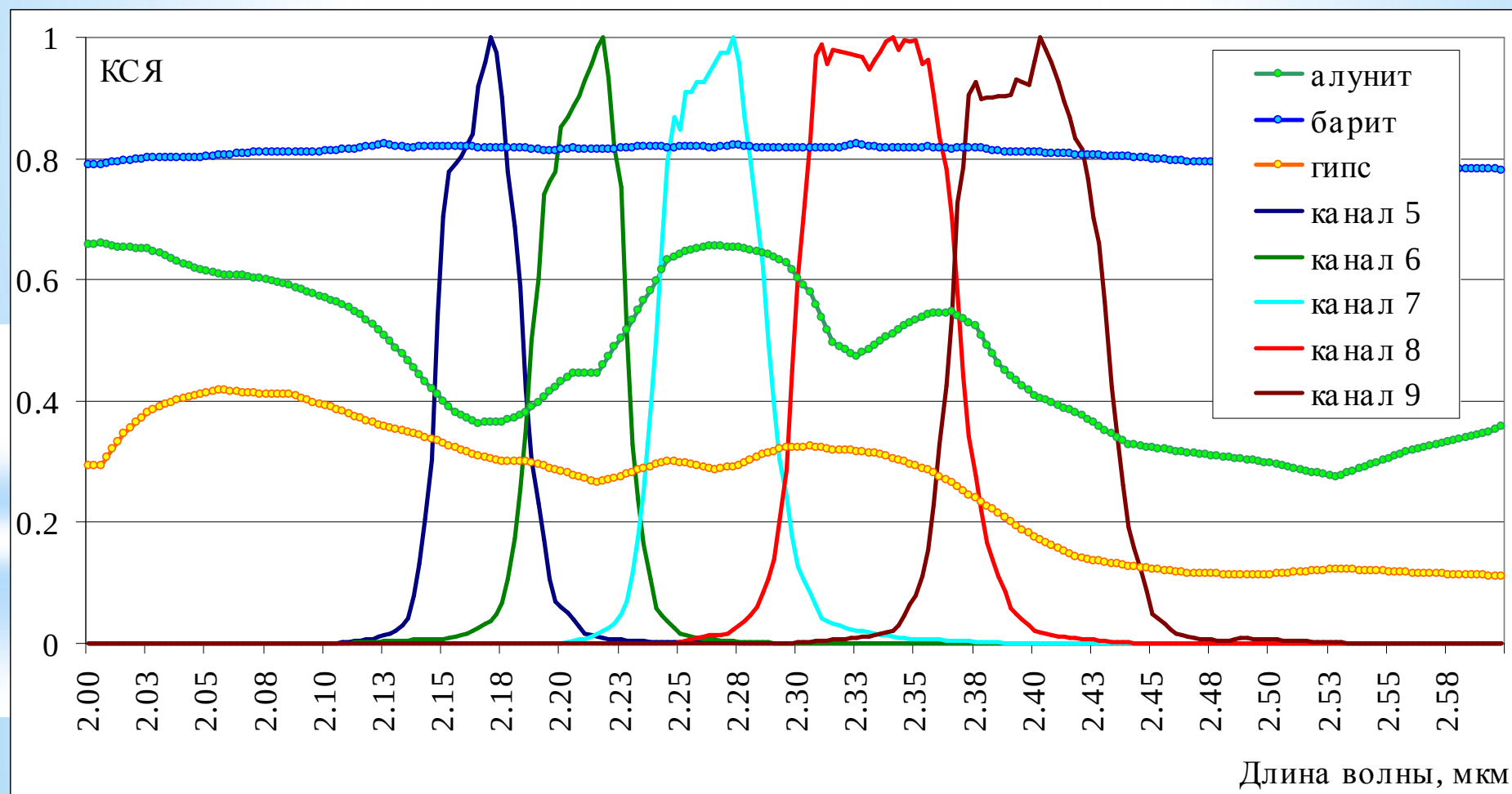
* Спектры глин (каолинит, монтмориillonит) и спектральные каналы радиометра ASTER



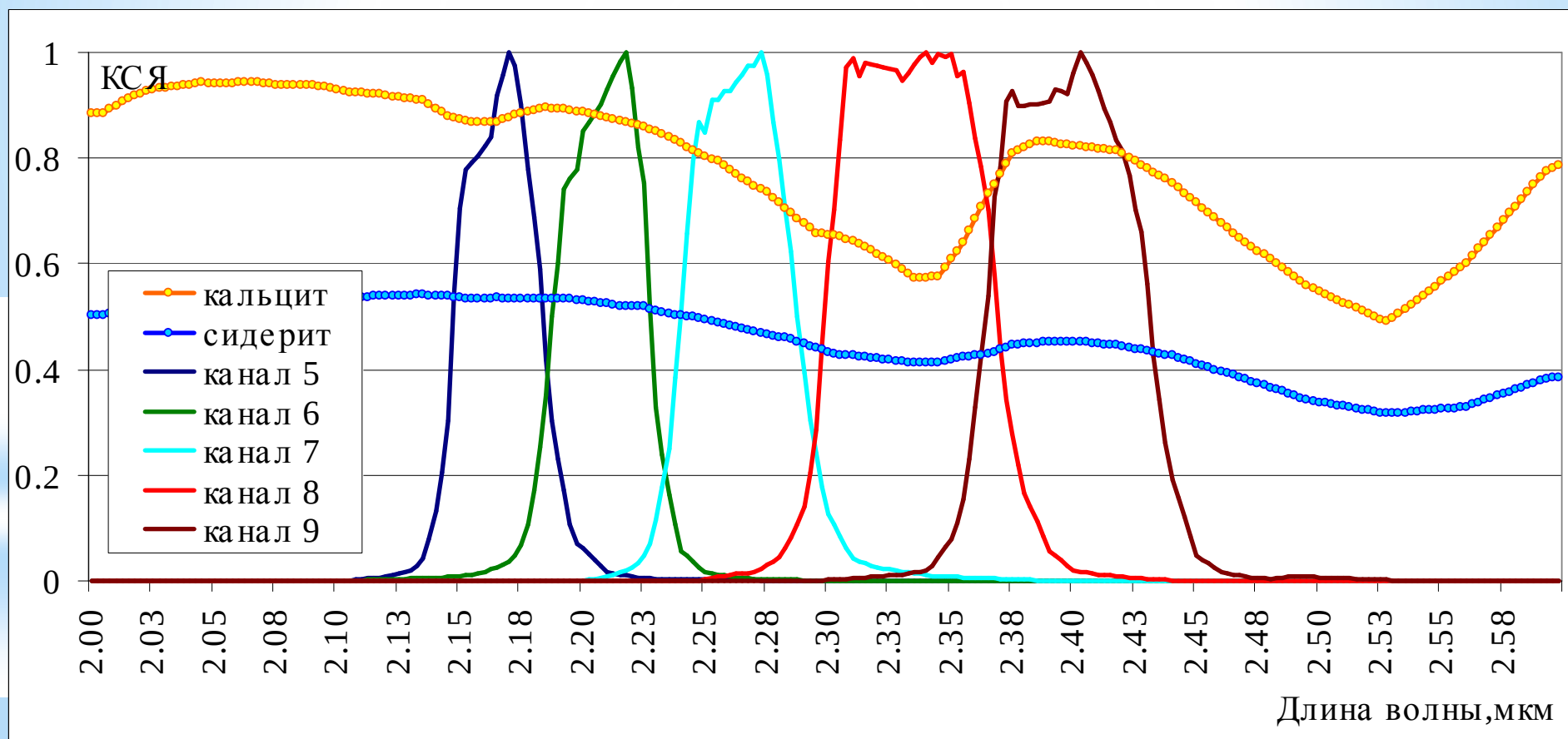
* Спектр кварца, полевого шпата и спектральные каналы радиометра ASTER



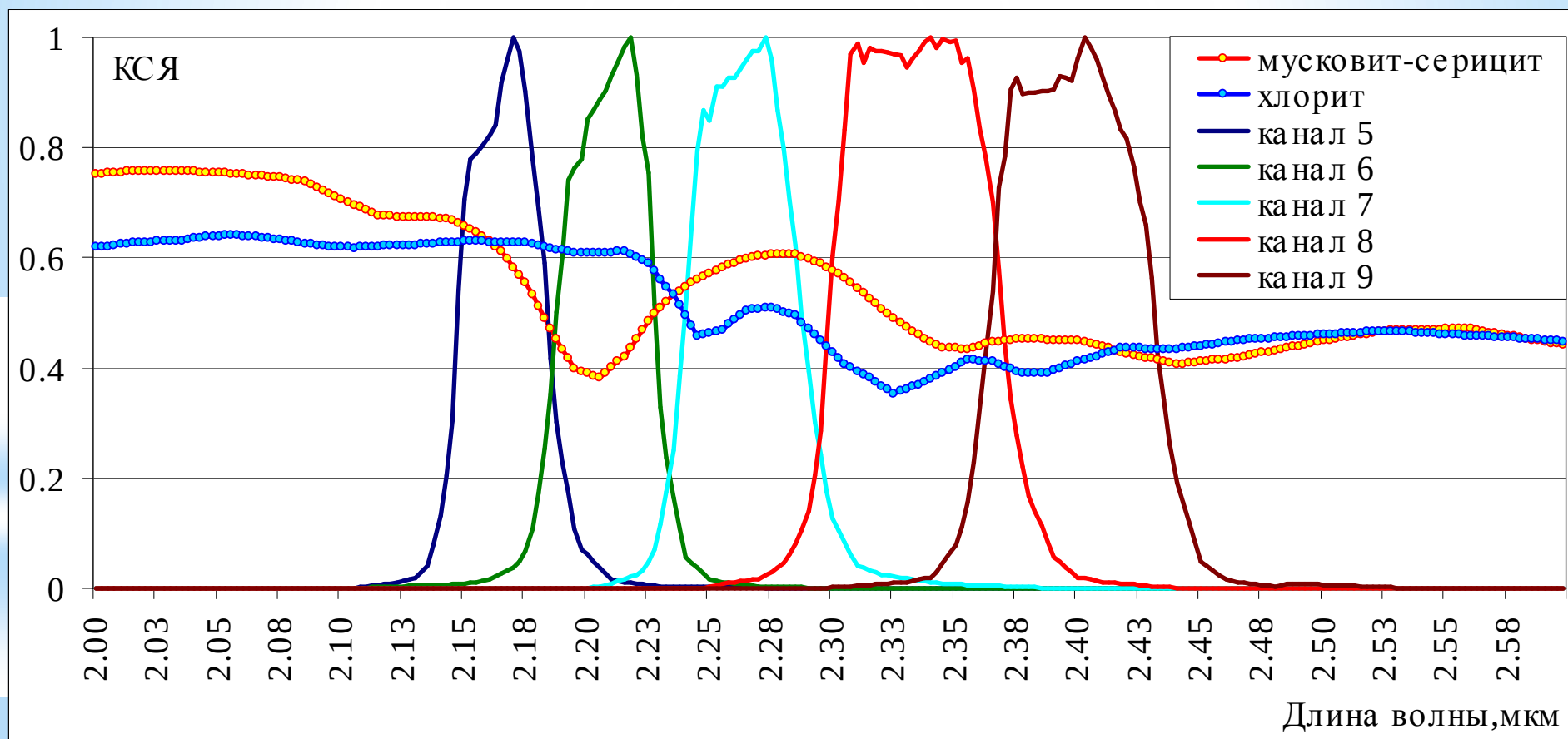
* Спектры сульфатов (алунит, барит, гипс) и спектральные каналы радиометра ASTER



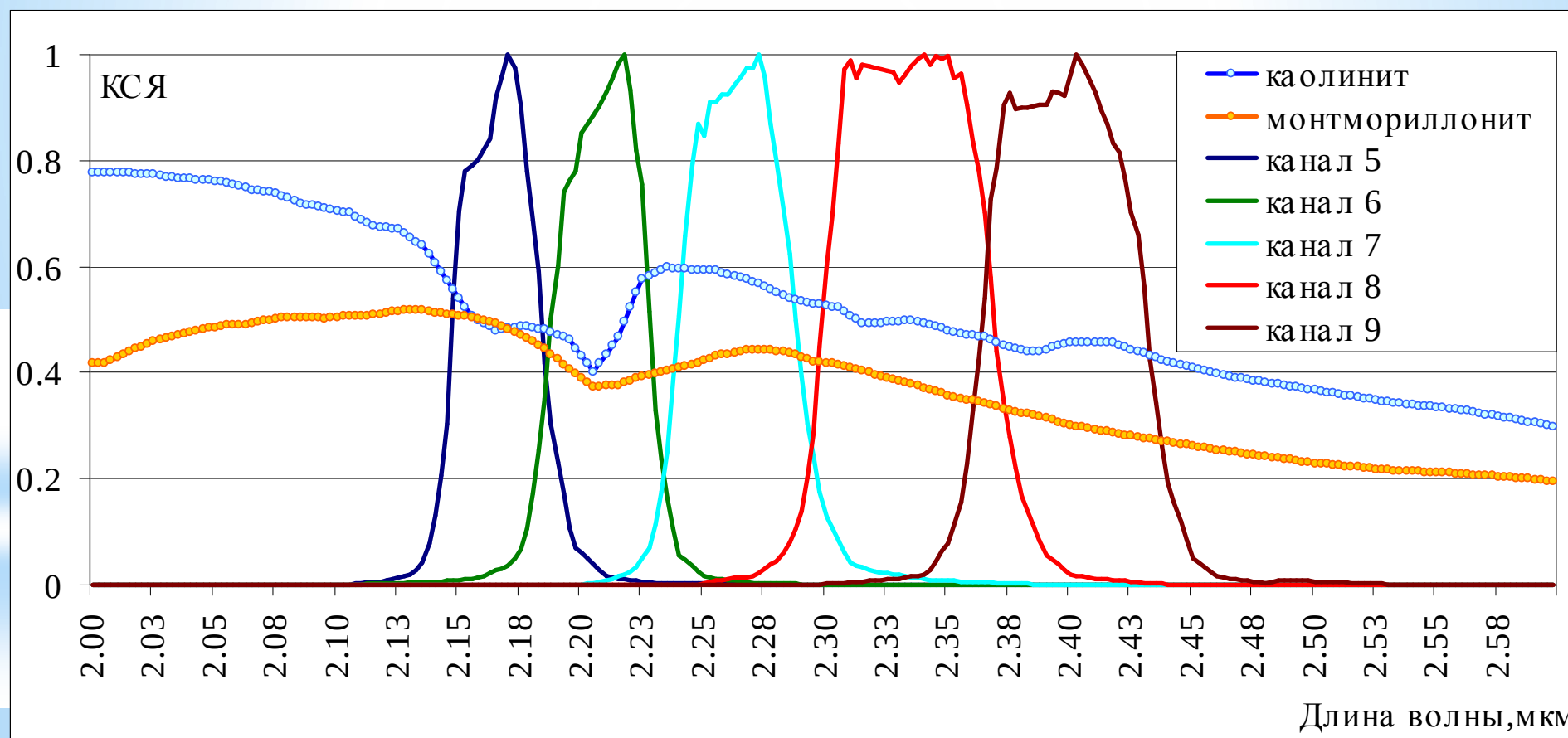
* Спектры карбонатов (кальцит, сидерит) и спектральные каналы радиометра ASTER



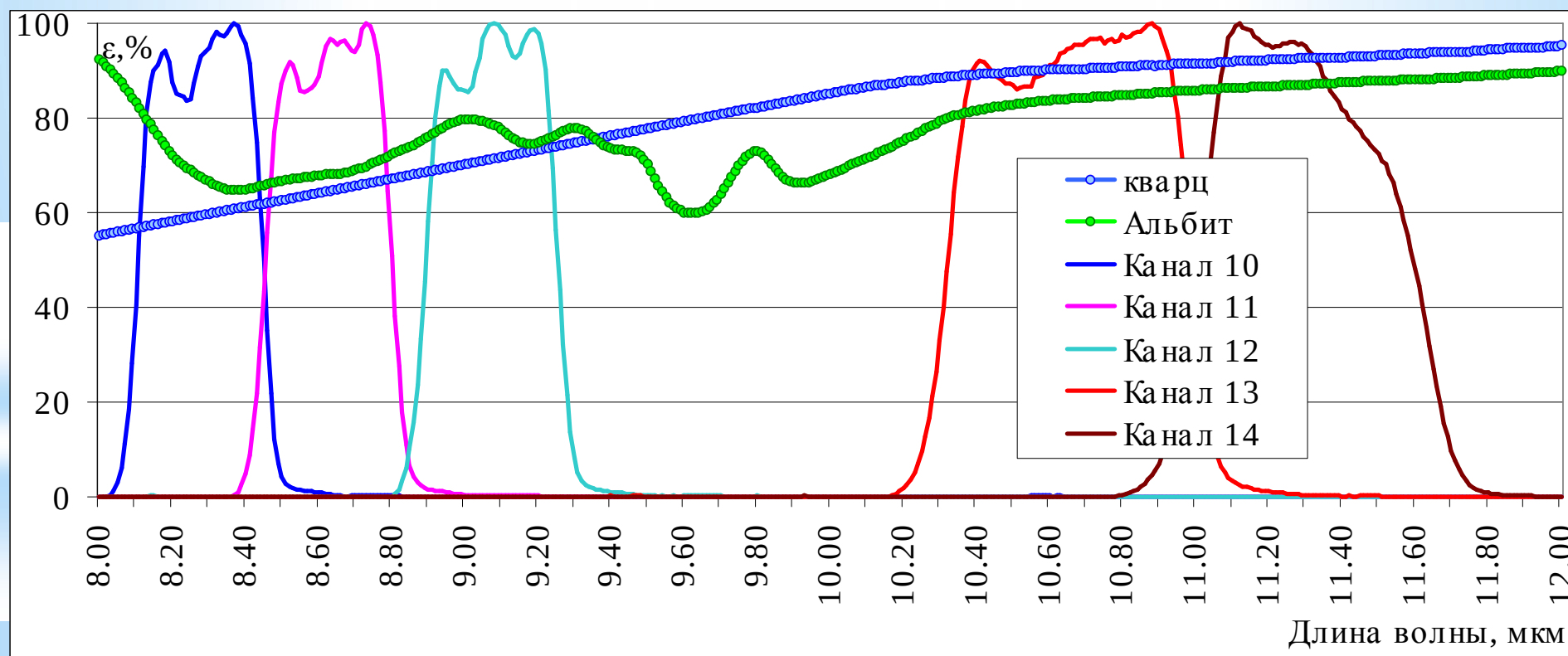
* Спектры мусковита-серицита и хлорита и спектральные каналы радиометра ASTER



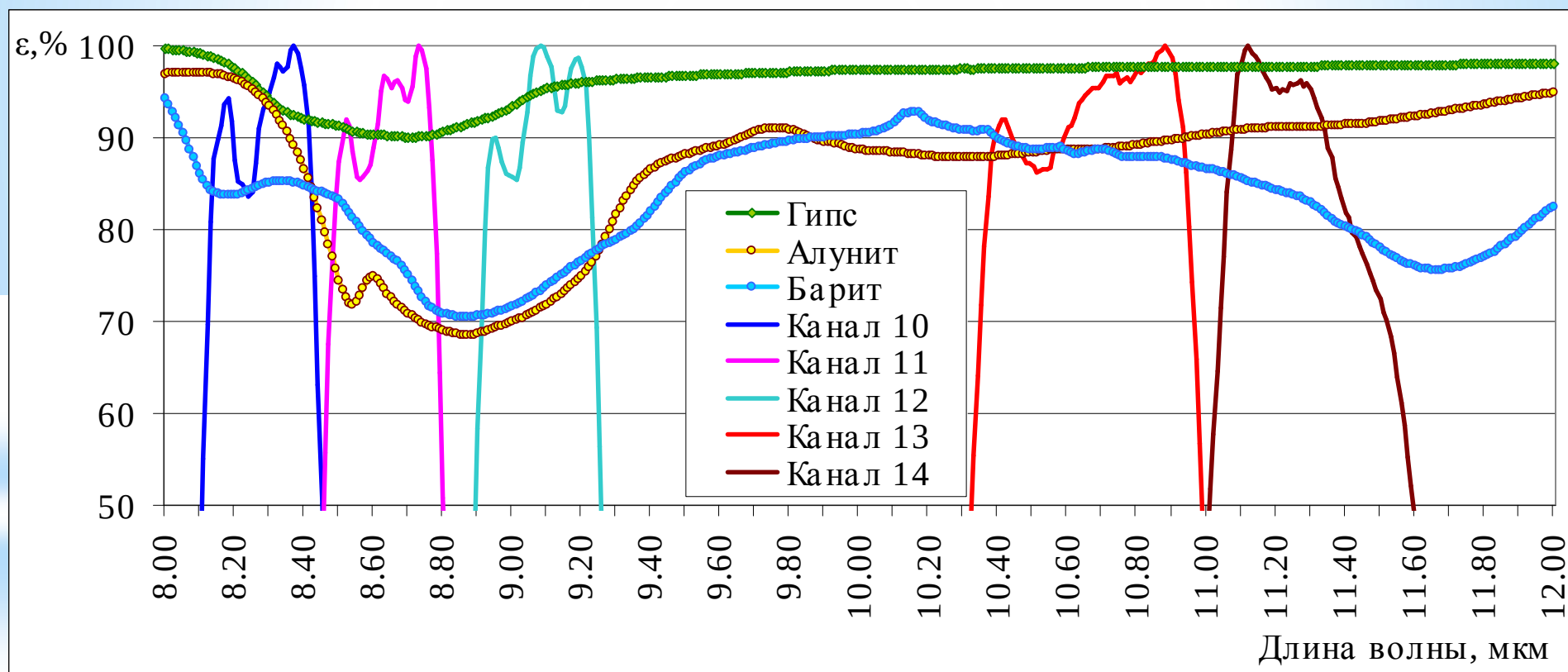
* Спектры глин (каолинит, монтмориillonит) и спектральные каналы радиометра ASTER



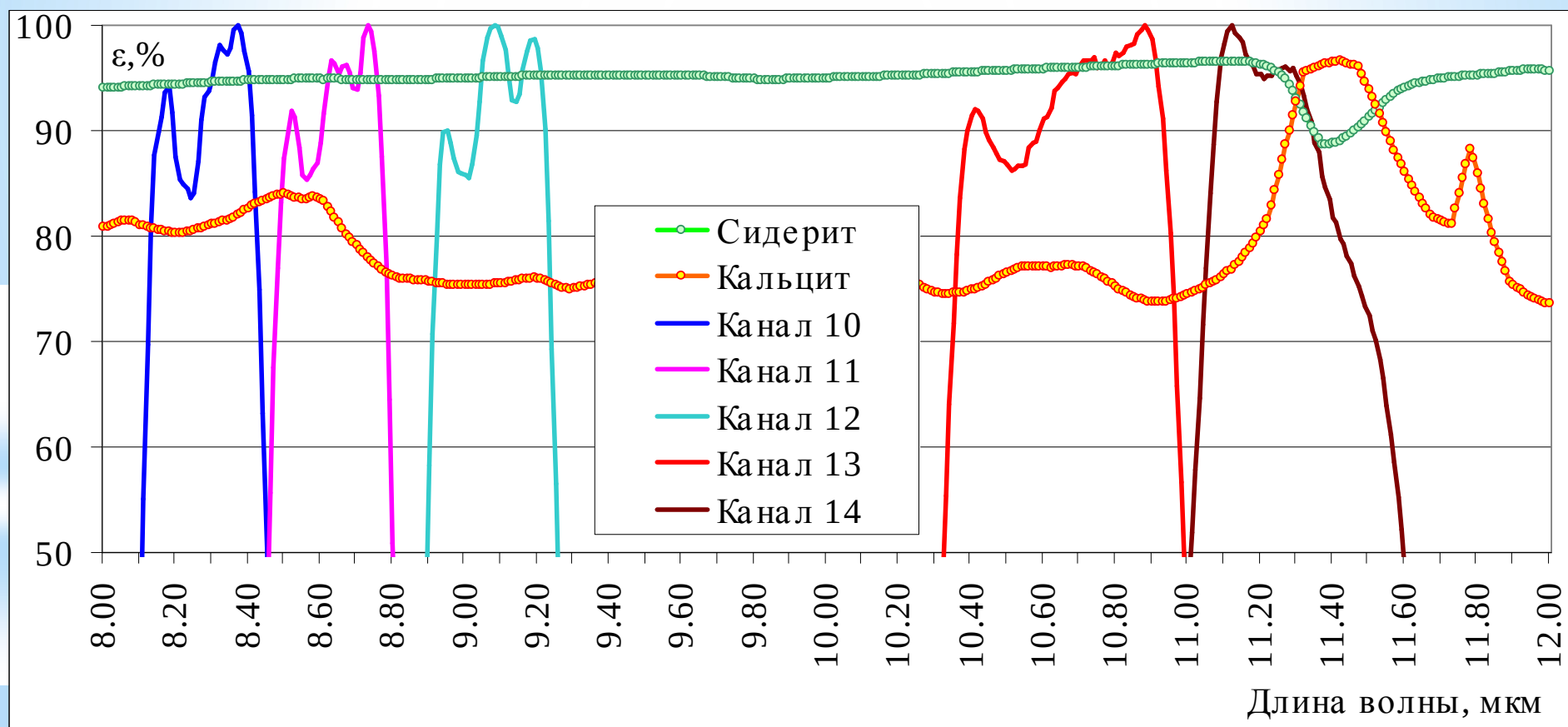
* Спектр кварца, полевого шпата и
спектральные каналы радиометра ASTER



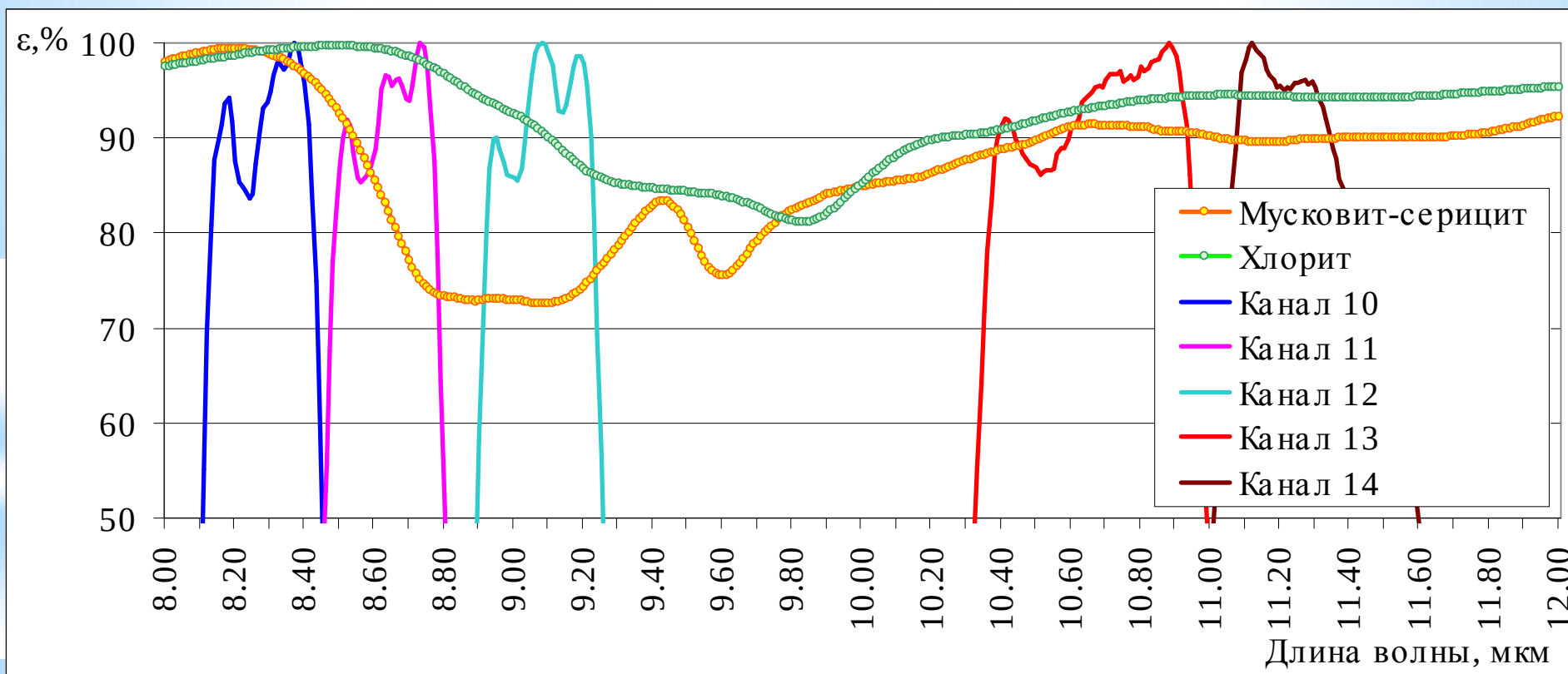
* Спектры сульфатов (алунит, барит, гипс) и спектральные каналы радиометра ASTER



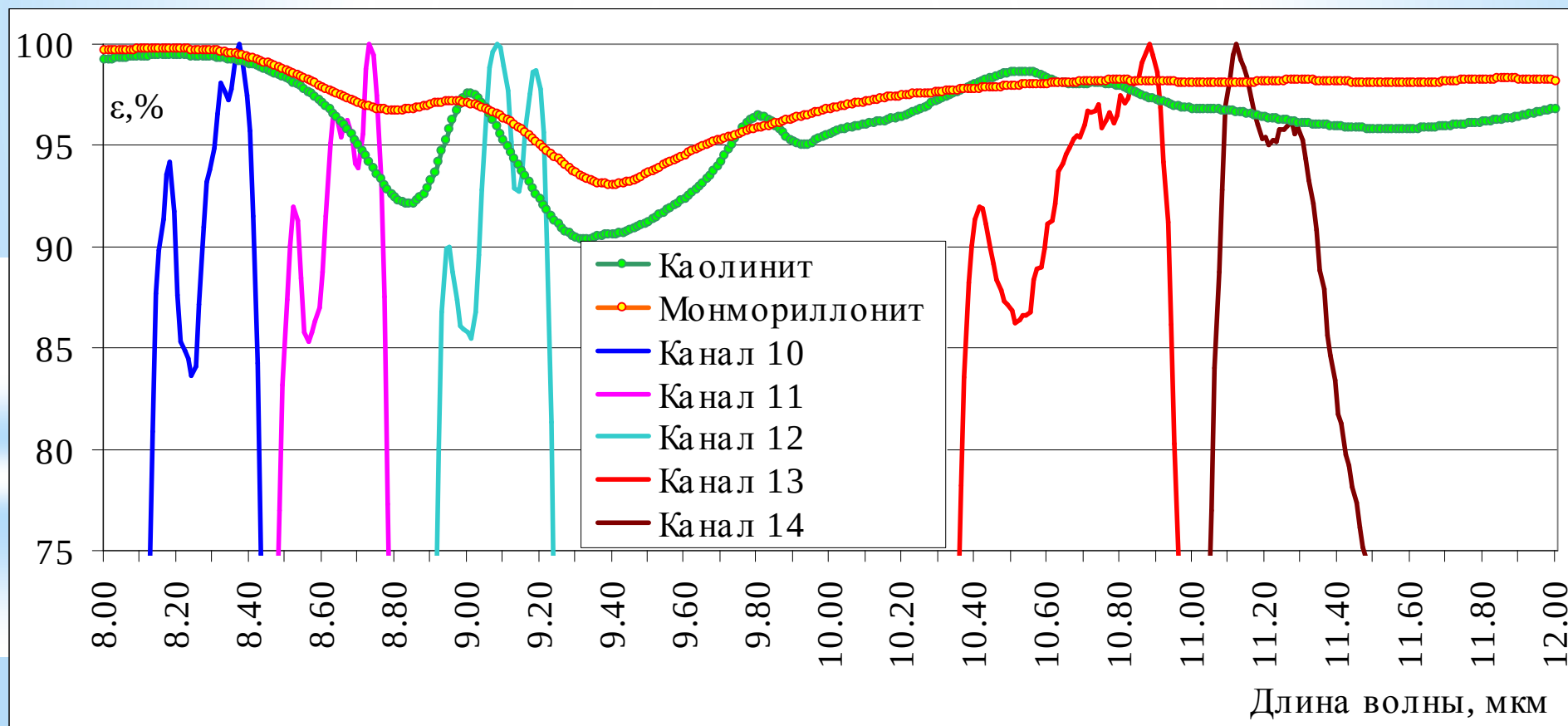
* Спектры карбонатов (кальцит, сидерит) и спектральные каналы радиометра ASTER



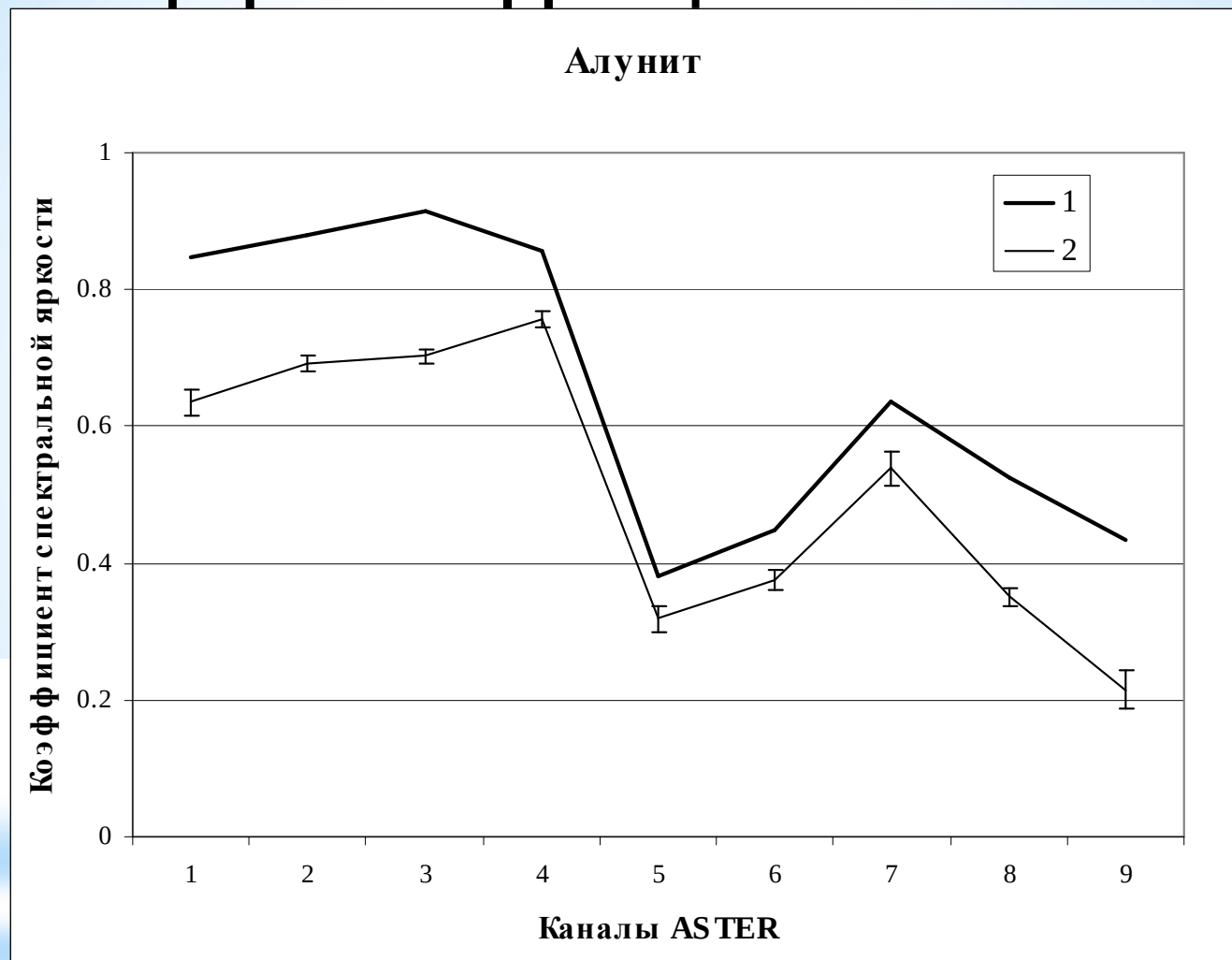
* Спектры мусковита-серицита и хлорита и спектральные каналы радиометра ASTER



* Спектры глин (каолинит, монтмориillonит) и спектральные каналы радиометра ASTER

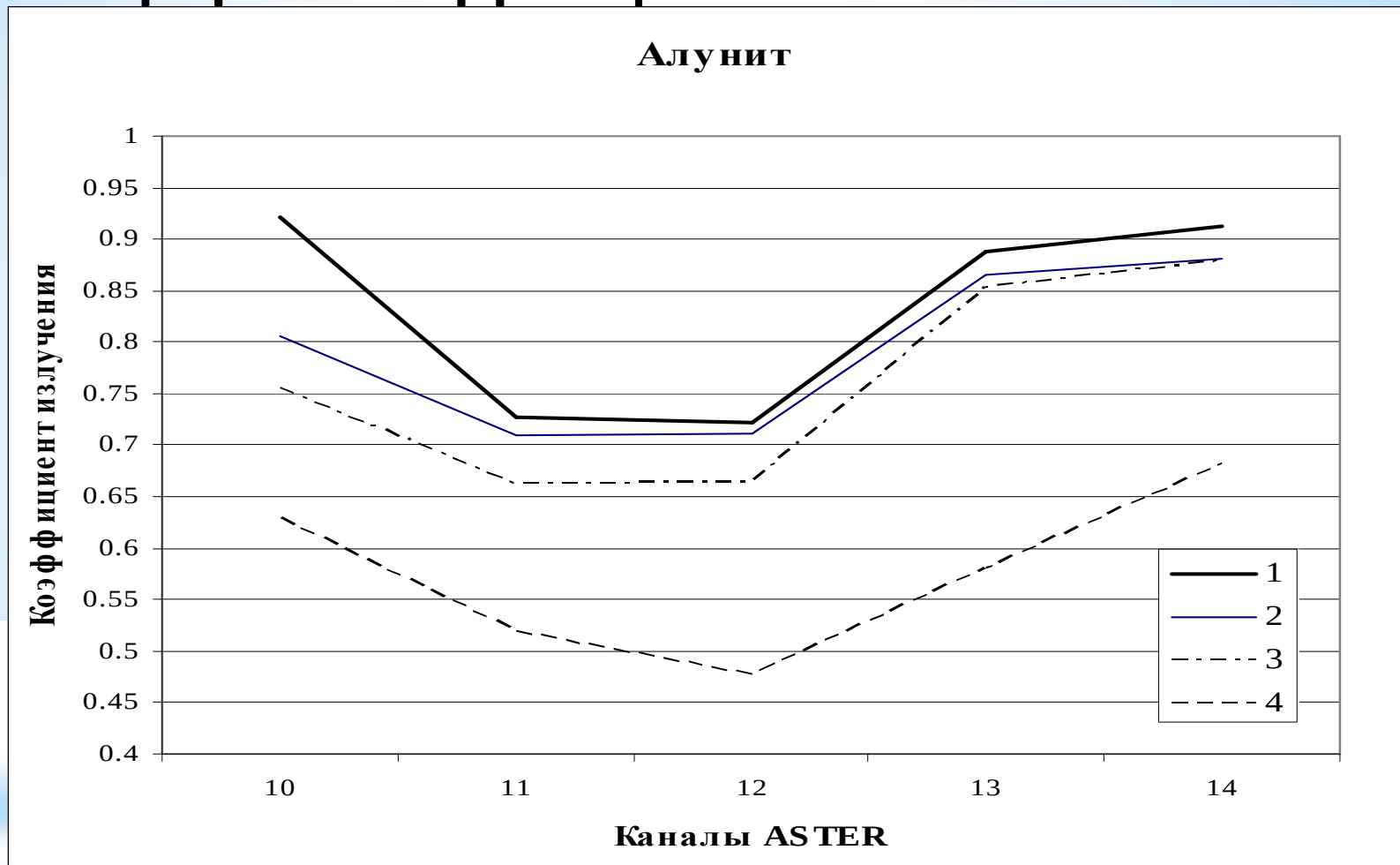


* Атмосферная коррекция



Спектр алунита по данным лабораторных измерений (1) и на верхней границе атмосферы (2) на основе атмосферной коррекции средствами 6SS для газовой модели стандартной летней атмосферы средних широт и различными моделями аэрозоля континентальной с оптической толщей 0.5 (0.55 мкм) (видимость 8.5 км). Доверительные интервалы в каналах ASTER показаны вертикальными отрезками

* Атмосферная коррекция



Спектр алунита по данным лабораторных измерений (1) и на верхней границе атмосферы при температуре поверхности 300K (2-4) на основе атмосферной коррекции средствами MODTRAN3 для газовой модели стандартной летней атмосферы средних широт. (2) – безаэрозольная атмосфера, (3) – наличие водного аэрозоля (4) – наличие крупнокапельного водного аэрозоля.

* Методы обработки многоспектральной информации

* Задача картирования минералов-индикаторов по данным спектрометрии состоит в определении минерального состава подстилающей поверхности по спектральным характеристикам этой поверхности:

* Вероятность существования минерала в данном месте.

* Степень сходства исследуемого участка поверхности с эталонным.

* Концентрация (доля) минерала в составе поверхностных образований на исследуемом участке.

* Методы картирования минералогического состава пород земной поверхности:

* Решение обратной геофизической задачи.

* Классификация изображений.

* Вычислении близости дистанционно измеренных спектров и лабораторных спектров

* Методы обработки многоспектральной информации

- * **Двоичное кодирование** (Задается преобразование исходного множества спектров, позволяющее значительно сократить размерность этого множества)
- * **Волновая характеристика** (Метод основан на анализе формы спектральной кривой исследуемого пикселя)
- * **Заполнение спектральными образцами** (Этот метод строит результирующее изображение на основе сравнения с лабораторными спектрами)
- * **Картирование спектрального угла** (Критерием сходства исследуемого спектра и лабораторного спектра минерала-индикатора считается угол между векторами)
- * **Спектральное разделение** (Спектр участка есть линейная комбинация спектров минералов, покрывающих рассматриваемую территорию с весами пропорциональными площадям, занимаемыми минеральными образованиями. Число минералов задано)
- * **Итеративное спектральное разделение** (Автоматическая выбор из библиотеки спектров минералов-индикаторов наилучших образцов удовлетворяющих результатам измерений)
- * **Условная минимизация энергии**
- * **Проекция на искомое подпространство** (Все лабораторные спектры разделяются на две группы - желательные и нежелательные. Нужно найти матрицу весовых коэффициентов к ним)
- * **Классификация**
- * **Спектральная кросс-корреляция** (Для каждого пикселя вычисляется набор кросс-коррелограмм с каждым из образцовых спектров)
- * **Обратная геофизическая задача** (Необходима функция, вычисляющая по минеральному составу участка его спектр)

*** применение спектральных методов для геологических исследований**

* картирование горных пород

* поиск рудных месторождений полезных
ископаемых по гидротермальным
изменениям

* поиск месторождений углеводородов по
низкотемпературным изменениям
вмещающих пород

* поиск месторождений нерудного сырья

* Картирование горных пород



Горы Атлас, Марокко

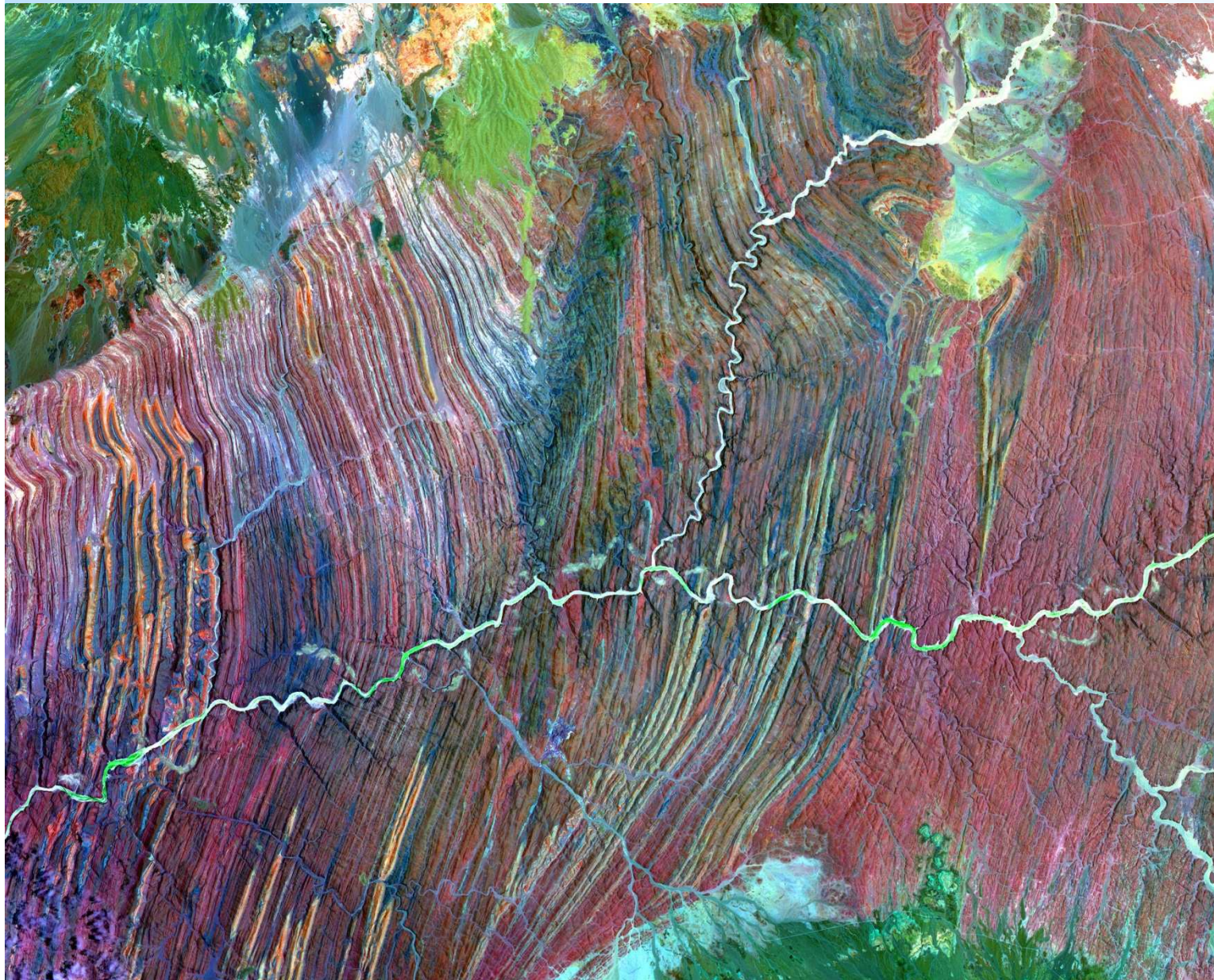
Складчатые структуры состоят из известняков, глинистых сланцев, гипса.

ASTER SWIR композит

Жёлтым цветом показаны известняки, оранжевым – песчаники, ярко-зелёным – гипс.

Фиолетовый и тёмно-зелёный – подстилающие граниты

* Картирование горных пород



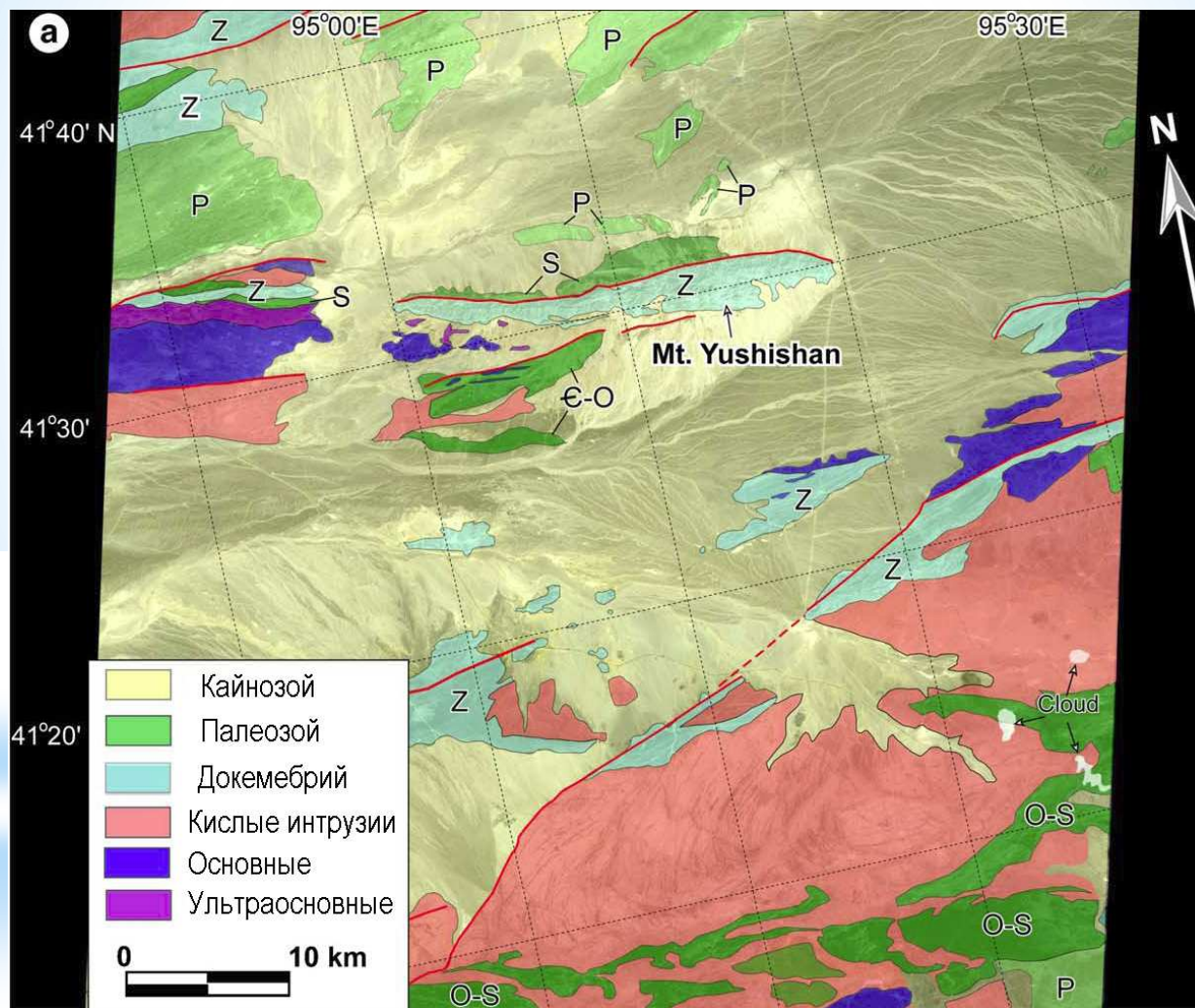
Долина р. Угаб,
Намибия

Тонкие
вертикальные
Пласты
известняков,
песчаников и
сланцев.

ASTER
R7G3B1
КОМПОЗИТ

* Картирование горных пород

Применение спектральных данных радиометра ASTER для литологического картирования района горы Yushishan, провинция Ганьсу, Китай.

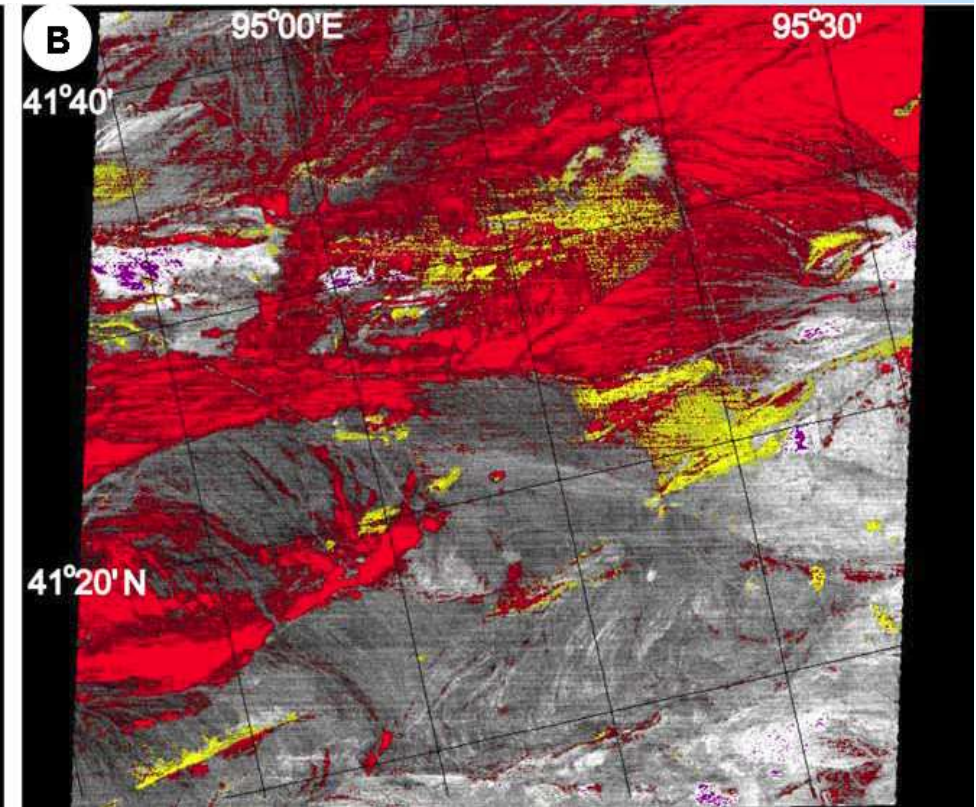
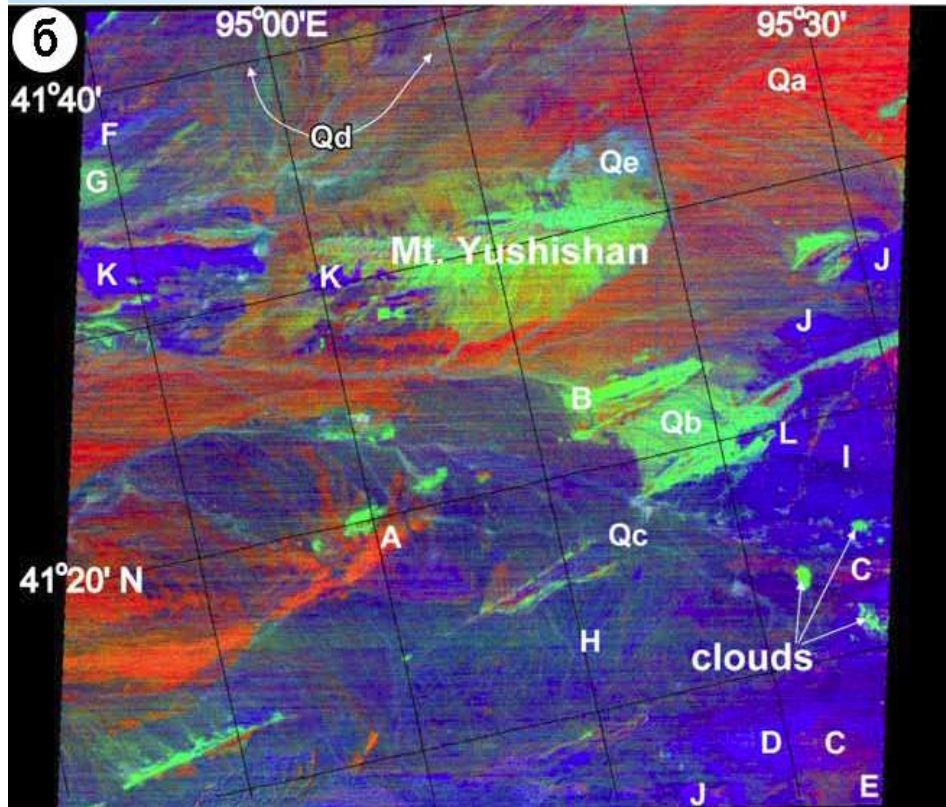


а) Геологическая карта района с наложенным изображением радиометра ASTER в видимом и БИК диапазонах. Обозначения пород на карте: Z – докембрийские; С–О – кембрий и ордовик; О–S - ордовик-силур; P – пермские.

[Ninomiya et al., 2005]

* Картирование горных пород

карбонатный индекс (CI), кварцевый (QI) и мафический (MI) индексы

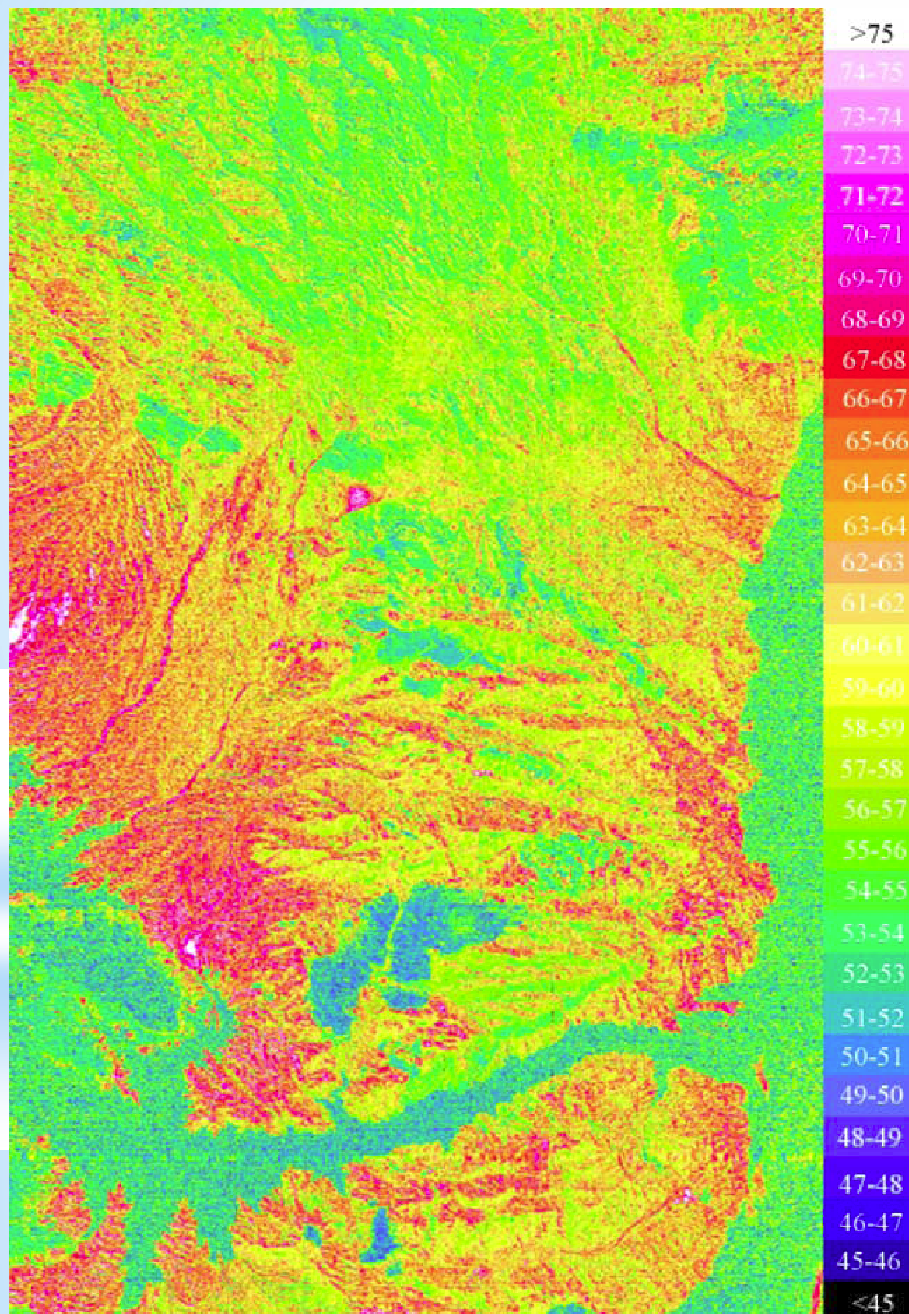


(б) цветовой композит индексов: QI-красный, CI-зелёный и MI-синий.

(в) 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]

* Картирование горных пород

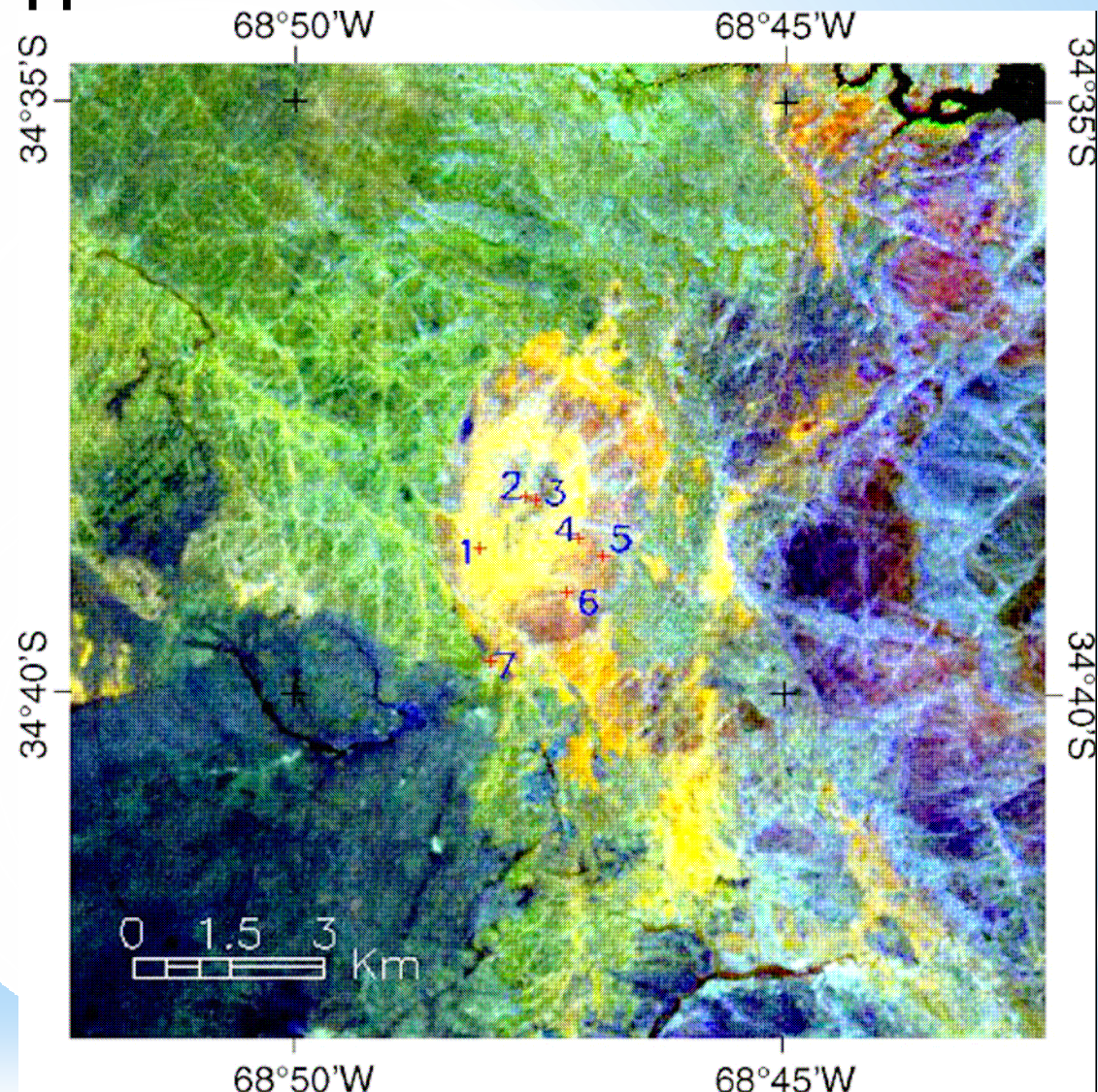


Содержание SiO₂ в горных породах в районе Hiller Mountains, Невада, США, по спектральным данным

* Рудные месторождения

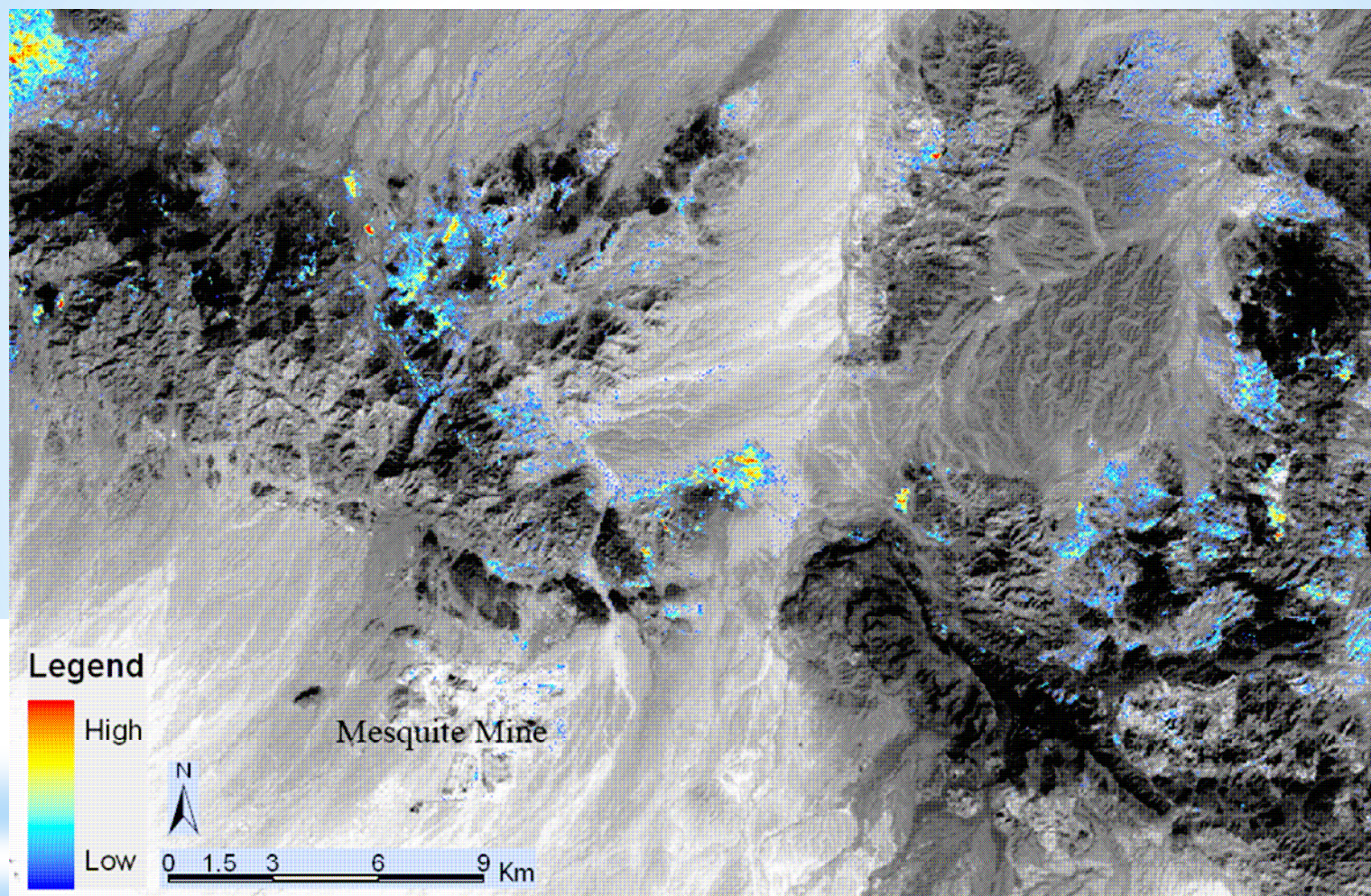
Медно-молибденовые порфировые месторождения Инфиернильо (Infiernillo), Аргентина.

Внутренняя зона изменения характеризуется калиевым метаморфизмом, на который были наложены интенсивные процессы серицитизации. Внешняя зона представляет собой обширный район окварцевания.



Цветами закодированы соотношения 4/6(R), 4/7(G), 3/1(B). Зелёному цвету отвечает пассивная периферия месторождений, синему - соответствуют вулканиты, изменённые породы вокруг месторождения показаны жёлтым и коричневым.

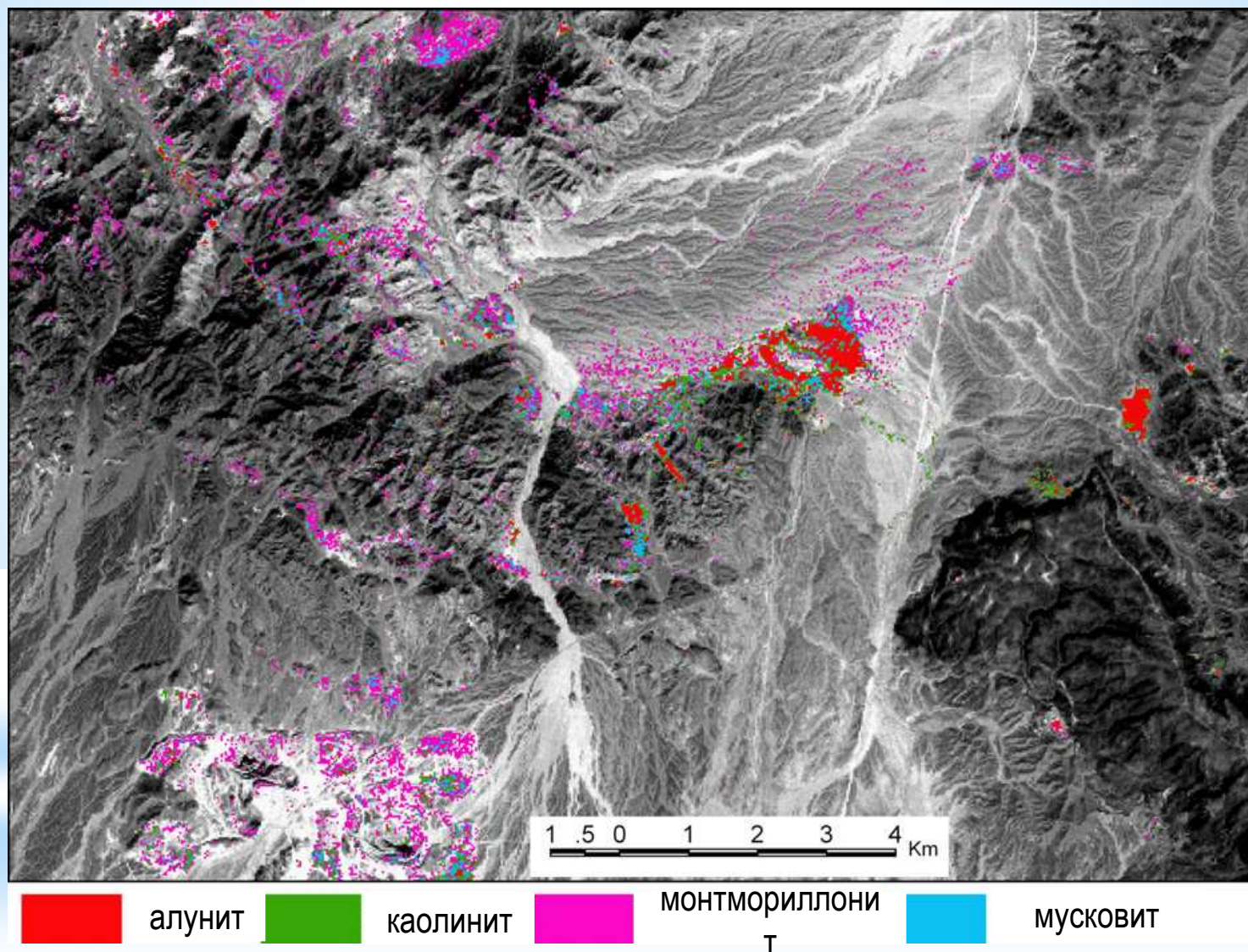
* Рудные месторождения



Картирование зон изменения в Шоколадных горах, Калифорния, США для локализации золоторудных проявлений в кварц-биотитовых гнейсах и мусковитовых сланцах докембрийского фундамента.

Использован метод главных компонент для определения вероятности степени изменения горных пород.

* Рудные месторождения



Картирование зон изменения в Шоколадных горах, Калифорния, США для локализации золоторудных проявлений.

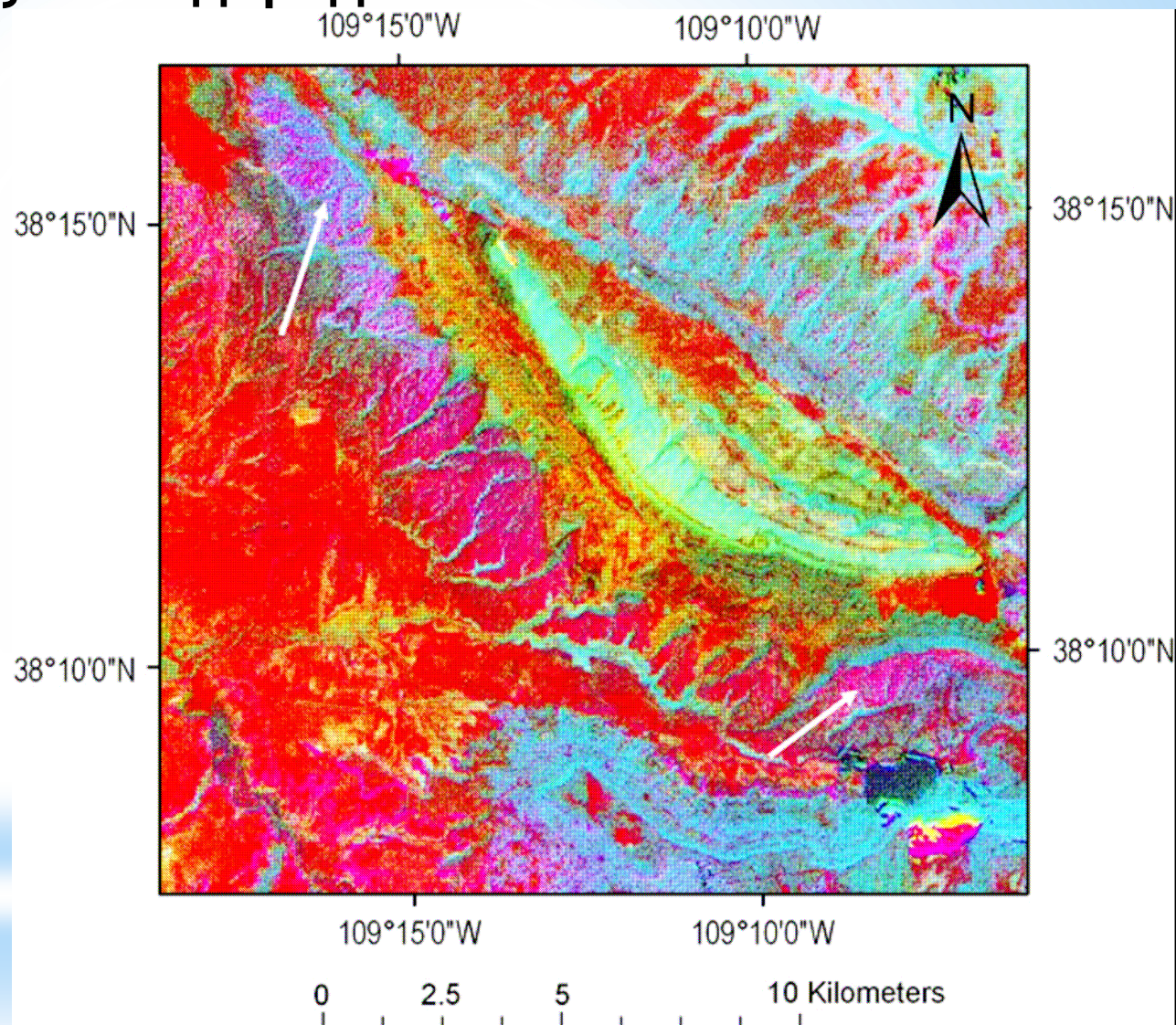
Метод минимизации энергетического функционала

[Zhang, 2007]

* Месторождения углеводородов

Стрелки показывают участки максимального метаморфизма горных пород, связанных с просачиванием углеводородов

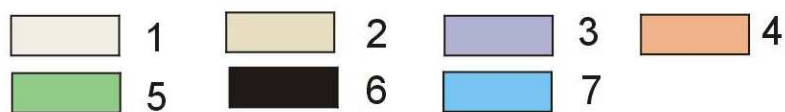
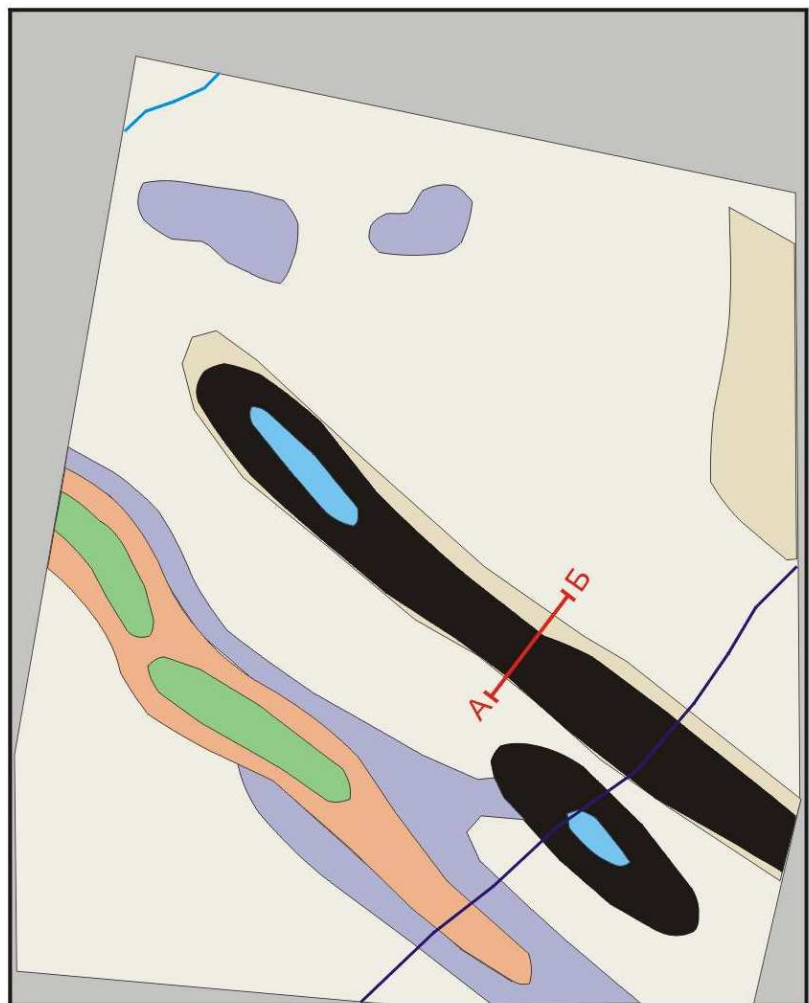
Районы изменённых горных пород кодированы малиновым цветом.



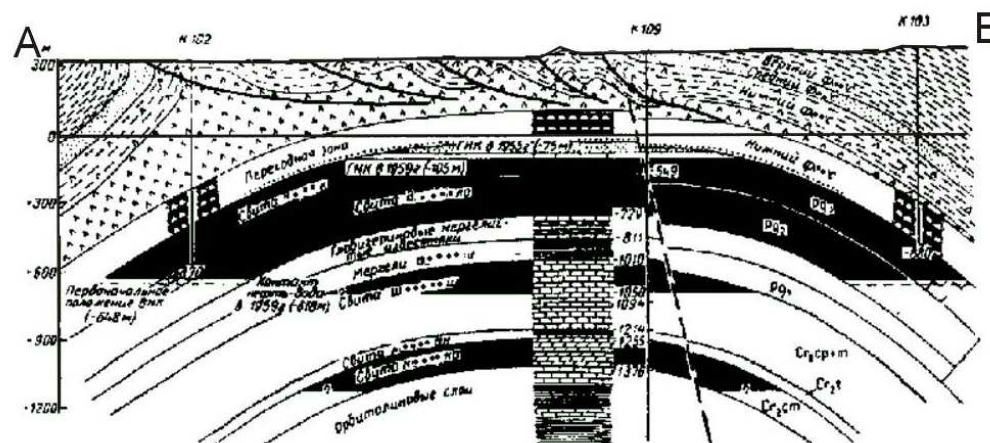
Просачивание углеводородов в Лиссабонской долине (Юта, США)

Высокие концентрации глинистых минералов, дефицит гематита, повышенные содержания кальцита и значительные изменения полевых шпатов в зонах изменений. Карта главных компонент БИК диапазона данных ASTER. [Petrovic, 2008]

* Месторождения углеводородов

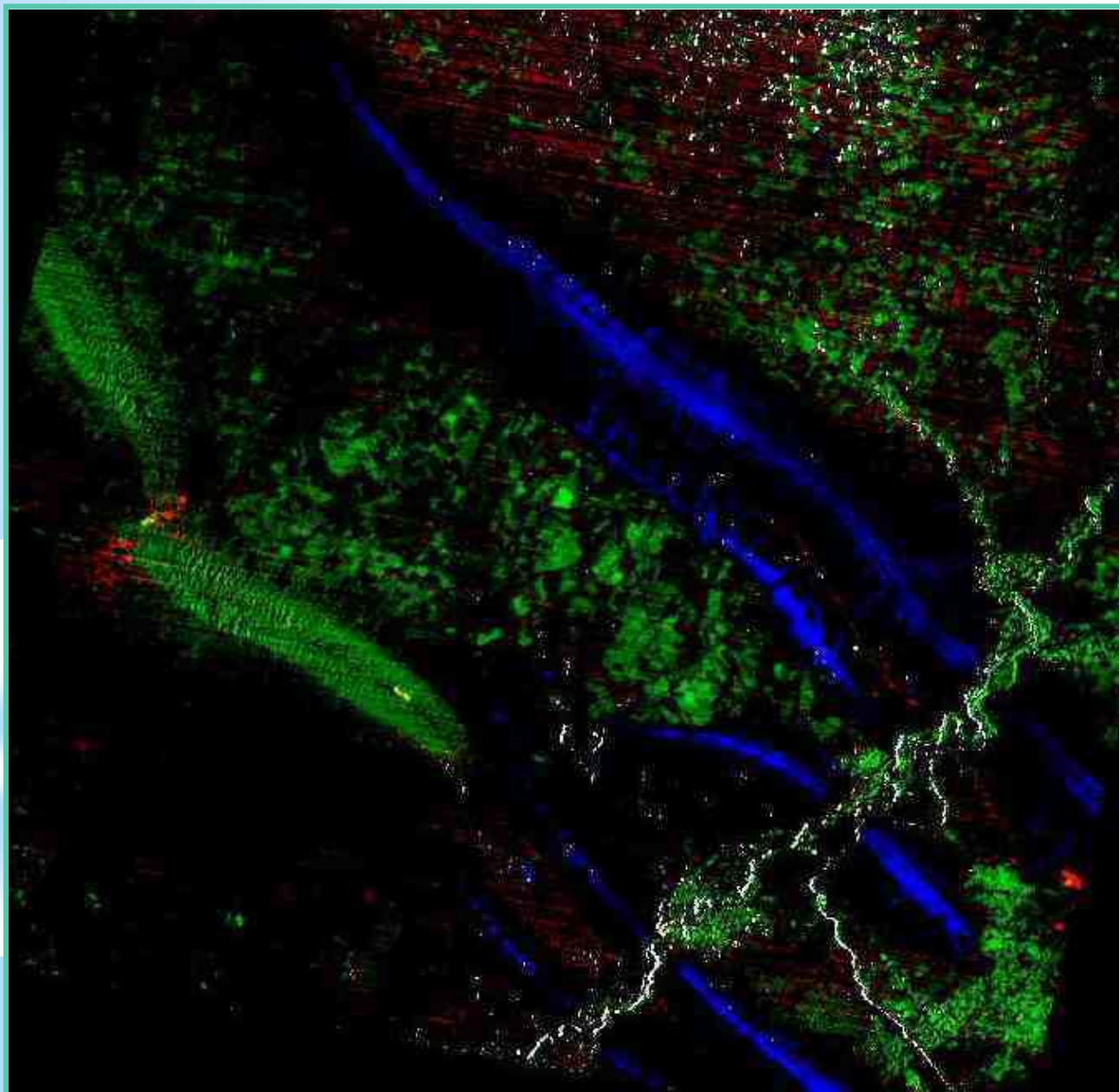


* Нефтяное поле Киркук (Ирак)



1. Аллювий
2. Свита Бахтиари
3. Красноцветные песчаники, глины
4. Ангидриты, известняки
5. Известняки оолитовые, органогенные
6. Нефть
7. Газ

* Месторождения углеводородов



* Нефтяное поле Киркук (Ирак)

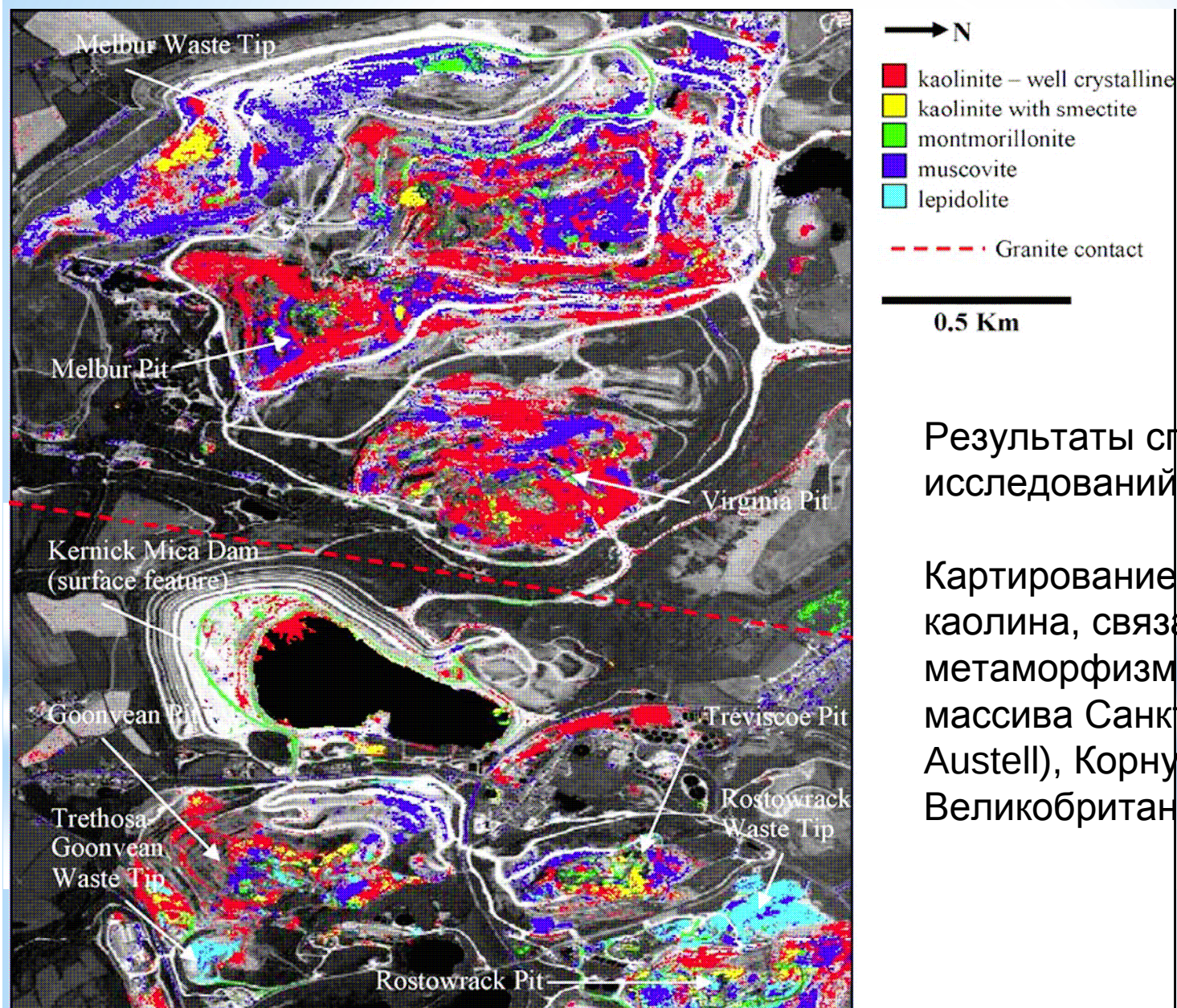
← RGB цветной композит
(ASTER)

→
- сульфаты;

→
- карбонаты;

→
- силикаты;

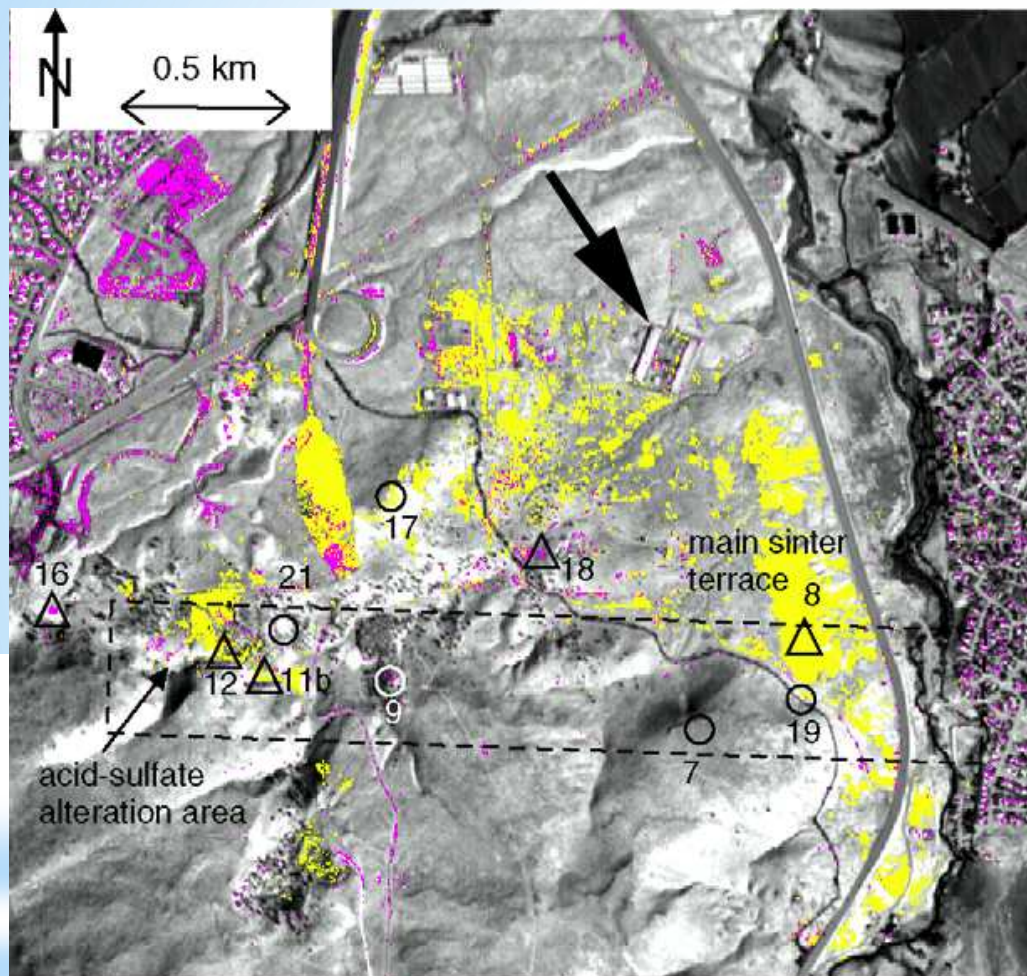
* Нерудные месторождения



Результаты спектральных исследований сканером HyMAP

Картирование проявлений каолина, связанного с метаморфизмом гранитного массива Санкт Аустелл (St. Austell), Корнуолл, Великобритания

* Гидротермальные проявления



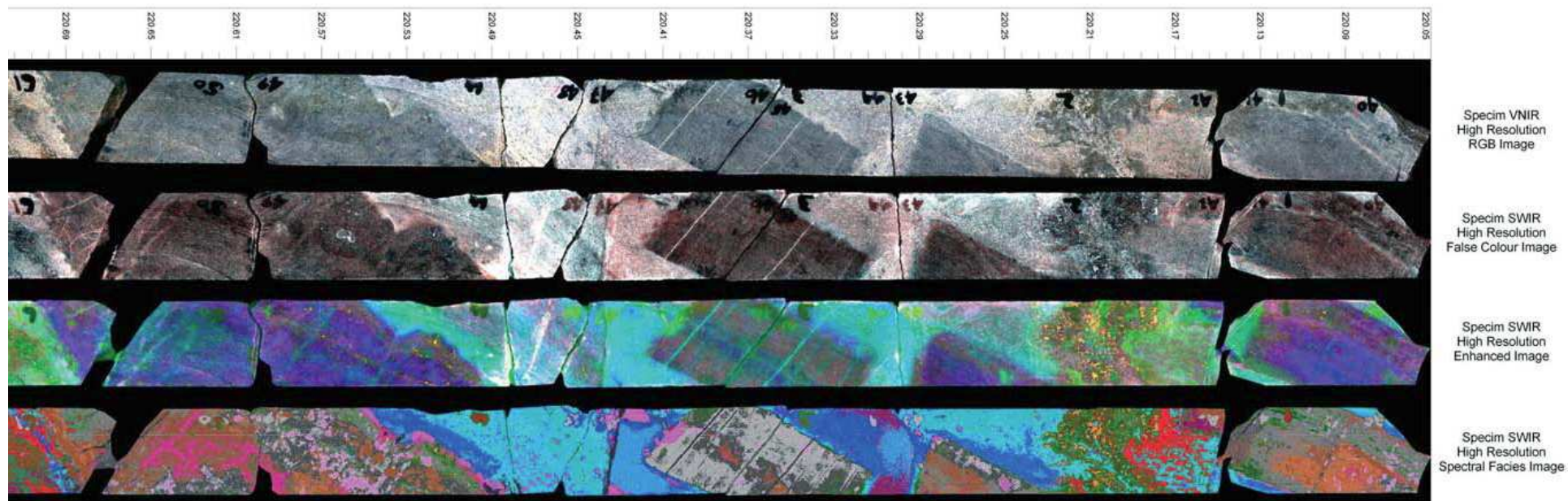
кварц, опалы, алунит, альбит

каолинит, монтмориллонит, мусковит

Зоны современных гидротермальных изменений на участке Steamboat Springs, Невада, США.

Треугольники и окружности показывают точки наземных наблюдений спектров. Крупная чёрная стрелка показывает геотермальную станцию

* Исследование керна



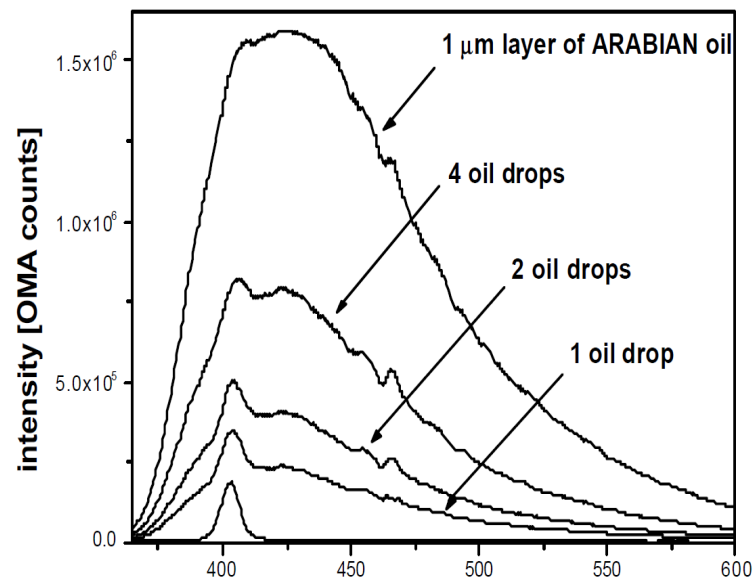
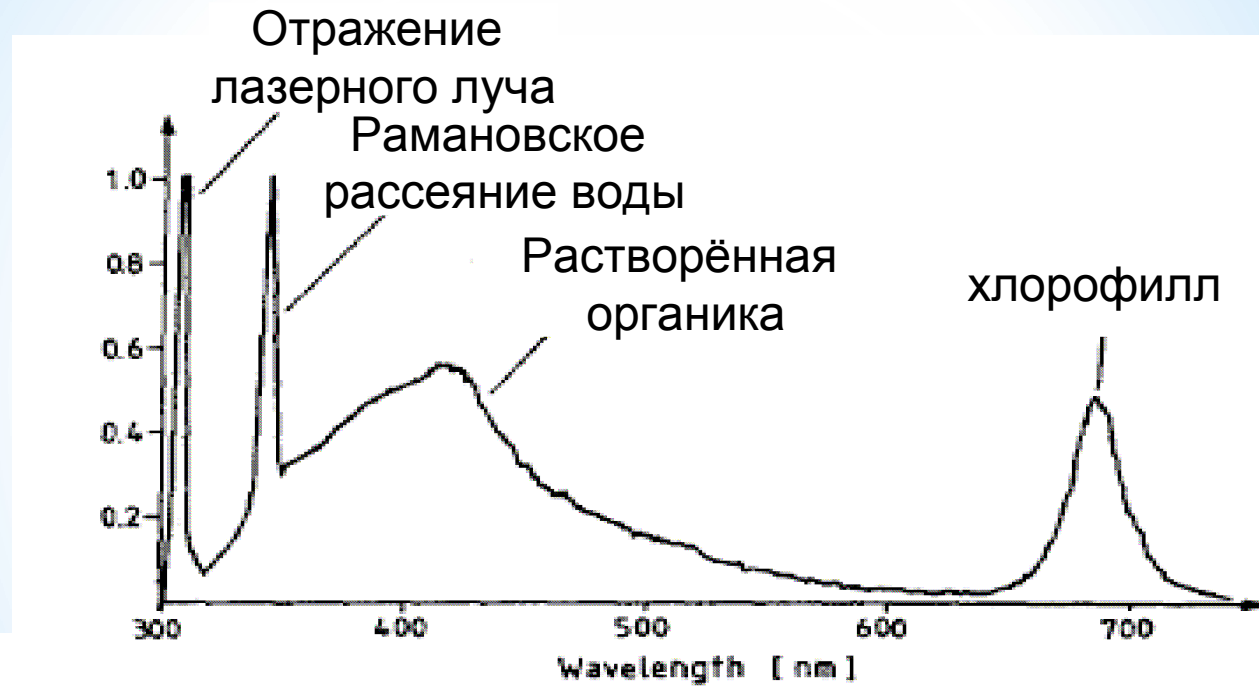
- сulfиды
- гранаты
- гранаты – пироксен- карбонаты
- кварц
- скаполит
- сульфаты

* Лазерная флюоресценция



Пузырьки газа на
водной поверхности

* Лазерная флюоресценция



* Ссылки

* Шишелова Т.И., Созинова Т.В., Коновалова А.Н. Практикум по спектроскопии. Вода в минералах: Учебное пособие. Издательство "Академия Естествознания", 2010 год

* И.И. Плюснина. Инфракрасные спектры силикатов. М.: Изд. МГУ, 1967, 190 с.

* **ASTER Spectral Library**

<http://speclib.jpl.nasa.gov/>

* **USGS Digital Spectral Library**

<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/>