

**Астрофизические методы
исследования
Луны и малых небесных тел**

Бусарев В.В.

**ГАИШ,
Москва,
2009 г.**

Наземные астрофизические методы исследования твердых безатмосферных тел (ТБТ):

- фотометрический (вкл. поляриметрический) (0,35 – 2,50 мкм),
- спектрофотометрический (0,35 – 2,50 мкм),
- инфракрасный радиометрический (~ 5 – 100 мкм),
- миллиметровый пассивный (~ 1 мм – 1 см),
- радиолокационный (~3 – 13 см)

Особенности применения фотометрического и спектрофотометрический методов для изучения ТБТ

Это взаимодополняющие методы или разные «измерения» в пространстве свойств объекта:

- при ограничении диапазона спектра отражения объекта с помощью фотометрического метода мы изучаем в основном его альбедо, геометрическую форму и/или структуру поверхностного вещества; разновидностью фотометрического метода является поляриметрический метод;
- при использовании относительных (или нормированных) спектров отражения объекта мы исключаем влияние его геометрических характеристик и рассматриваем преимущественно его химико-минералогический состав

ФТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД : измерение альбедо и оценка размера малых ТБТ

- $m = m_0 + 5 \lg(r \Delta)$, при $\varphi = 0^\circ$ (1)

- У астероидов ГП фаз. угол $\varphi = 0^\circ \div 30^\circ$ и

$$m = m_0 + 5 \lg(r) + k \varphi, \quad (2)$$

- У АСЗ $\varphi = 0^\circ \div 120^\circ$ и

$$m_V = m_0 + 5 \lg(r) - 2.5 \lg[(1 - G) \Phi_1 + G \Phi_2], \quad (3)$$

где $\Phi_{1,2}$ — exp. ф-ции φ (Bowell et al., 1989)

- При $\varphi \approx 0^\circ$

$$\lg D = 3,129 - 0,5 \lg p_V - 0,2 m_0 \quad (4)$$

Поляриметрический метод

- Линейная поляризация отраженного от твердого тела света это

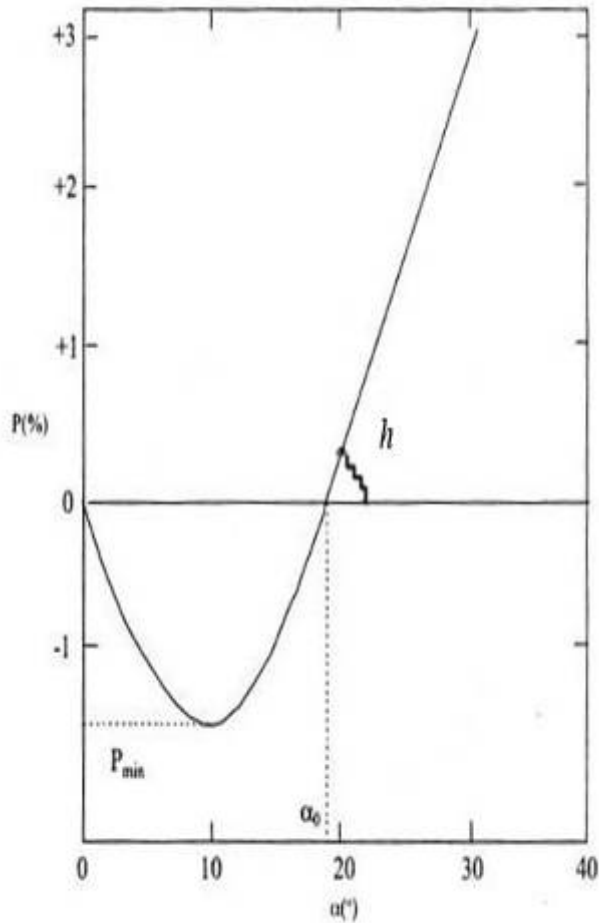
$$P = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2), \quad (5)$$

где I_1 и I_2 – это интенсивности колебаний световой волны перпендикулярно к плоскости зрения (I_1) и параллельно ей (I_2).

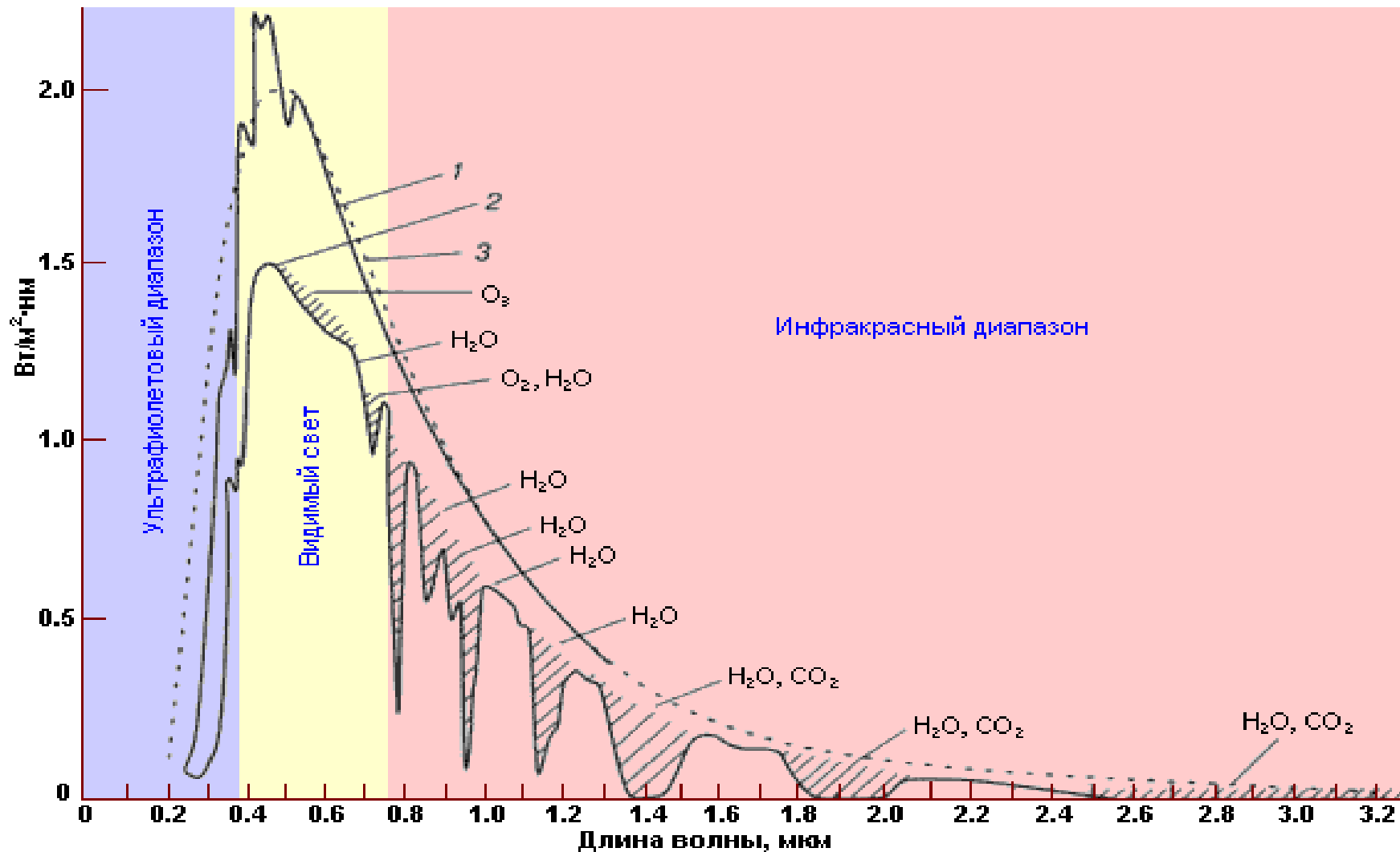
- Для полупрозрачного вещества

$$P = (P_s I_s + P_i \tau I_i)/(I_s + \tau I_i) \quad (6)$$

- Высокая корреляция h и p_v по лаб. данным (см. рисунок)



Спектрофотометрический метод (0,35 – 2,50 мкм)



Основные этапы

1)

$$\rho(\alpha, \lambda) = k E_*(\lambda) I(\lambda) \rho(\lambda)^{-\delta M} / E_0(\lambda) I_*(\lambda),$$

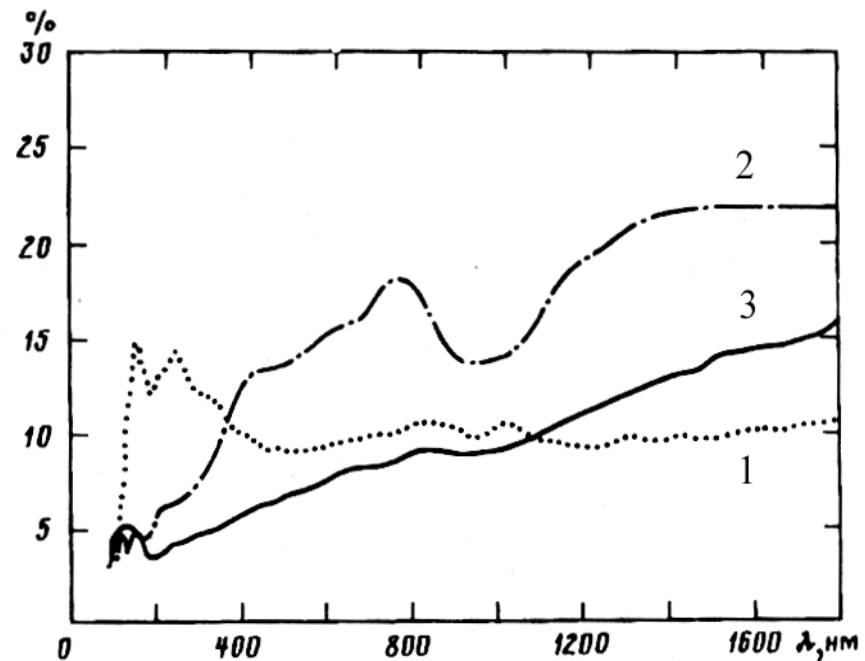
→ Получение спектров
отражения ТБТ

2) База спектральных
данных об образцах-
аналогах (метеориты,
лунные образцы,
земные породы,
минералы и др.)

→ Качественное
сравнение или
количественное
моделирование

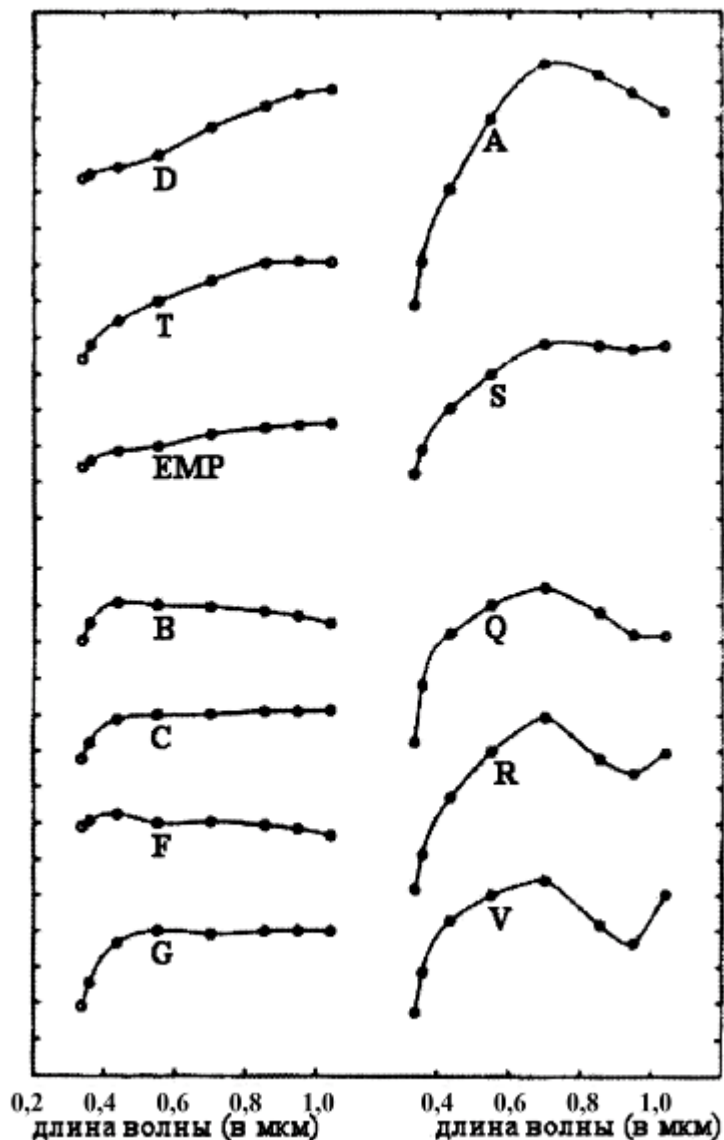
Интерпретация спектров отражения лунной поверхности морского типа

Характерной спектральной особенностью лунных морей является то, что они имеют не только низкое альbedo (в пределах 7-12%), но и голубоватый цвет. Такое свойство лунного морского грунта определяется комбинацией спектральных характеристик отдельных материалов, входящих в его состав. Темный цвет и голубоватая окраска лунных морей объясняется высоким содержанием (до 20%) в морских реголите и породах минерала ильменита (FeTiO_3).



- 1 – спектр отражения размельченного до порошка образца земного ильменита;
- 2 - спектр отражения размельченного до порошка образца морского базальта с места посадки «Аполлона-17»;
- 3 – лаб. спектр отражения образца зрелого лунного морского грунта (Wagner et al., 1987).

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ (ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ) КЛАССИФИКАЦИИ АСТЕРОИДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТАВА ИХ ВЕЩЕСТВА

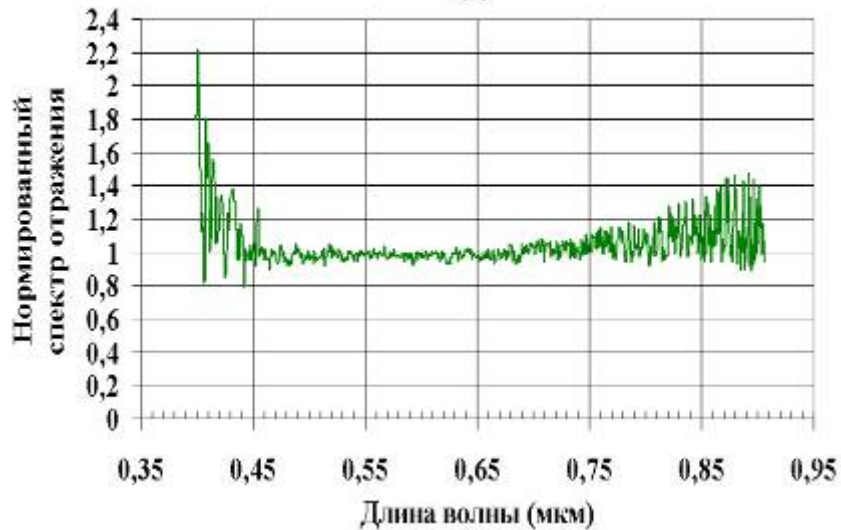


- Наиболее популярной является достаточно простая и физически обоснованная классификация астероидов Толена (Tholen, 1989), выполненная по результатам восьмицветного фотометрического обзора 589 астероидов (ECAS) (Zellner et al., 1985) охватывающих диапазон 0,3-1,1 мкм.
- В классификации Толена величины интенсивности полос поглощения с центрами у 0,2 и 1,0 мкм соответствуют двум главным компонентам из восьми используемых (по числу фотометрических полос), которые контролируют 95% различий между выделяемыми спектральными типами.
- Химико-минералогическое описание выделенных типов астероидов было сделано Гэффи и др., (Gaffey et al., 1989).

Примеры спектров отражения астероидов

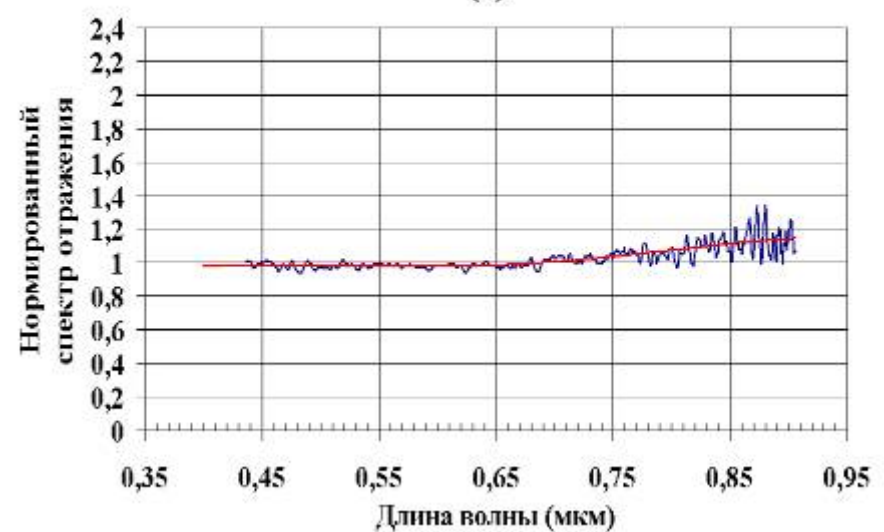
83 Беатриса

(а)



83 Беатриса

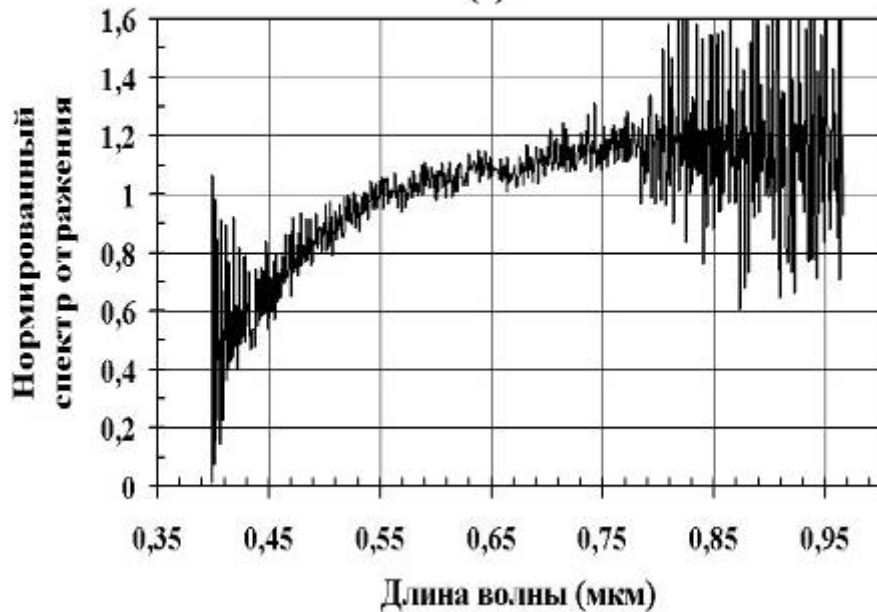
(б)



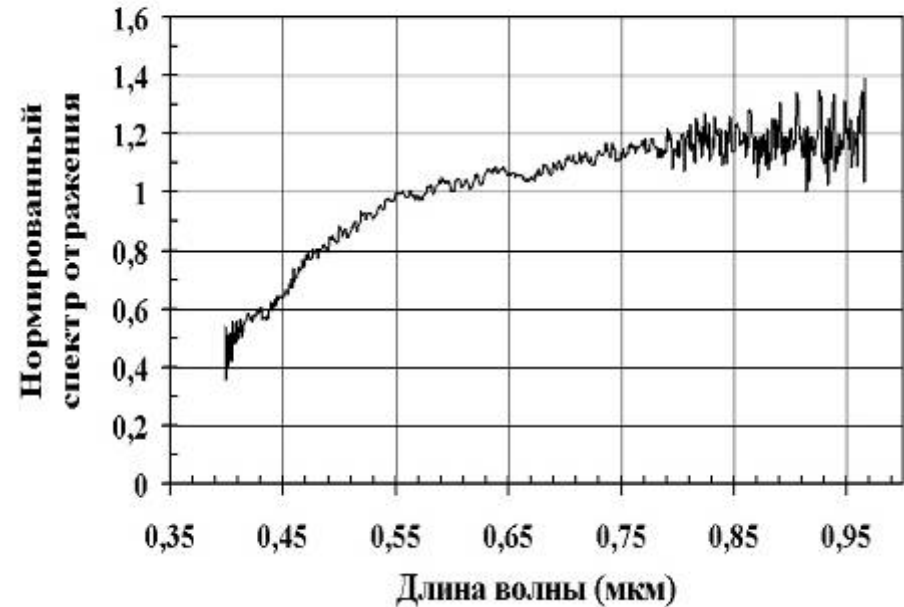
(а) Пример «зашумленного» спектра отражения 83 Беатрисы, полученного весной, при наличии в атмосфере водяного аэрозоля (1,25-м, апрель 2004 г., Крым). (б) Тот же спектр, но сглаженный методом «бегущего среднего» по 5 точкам и аппроксимированный полиномом 4-й степени (кривая изображена красным цветом).

Примеры спектров отражения астероидов

21 Лютеция
(а)



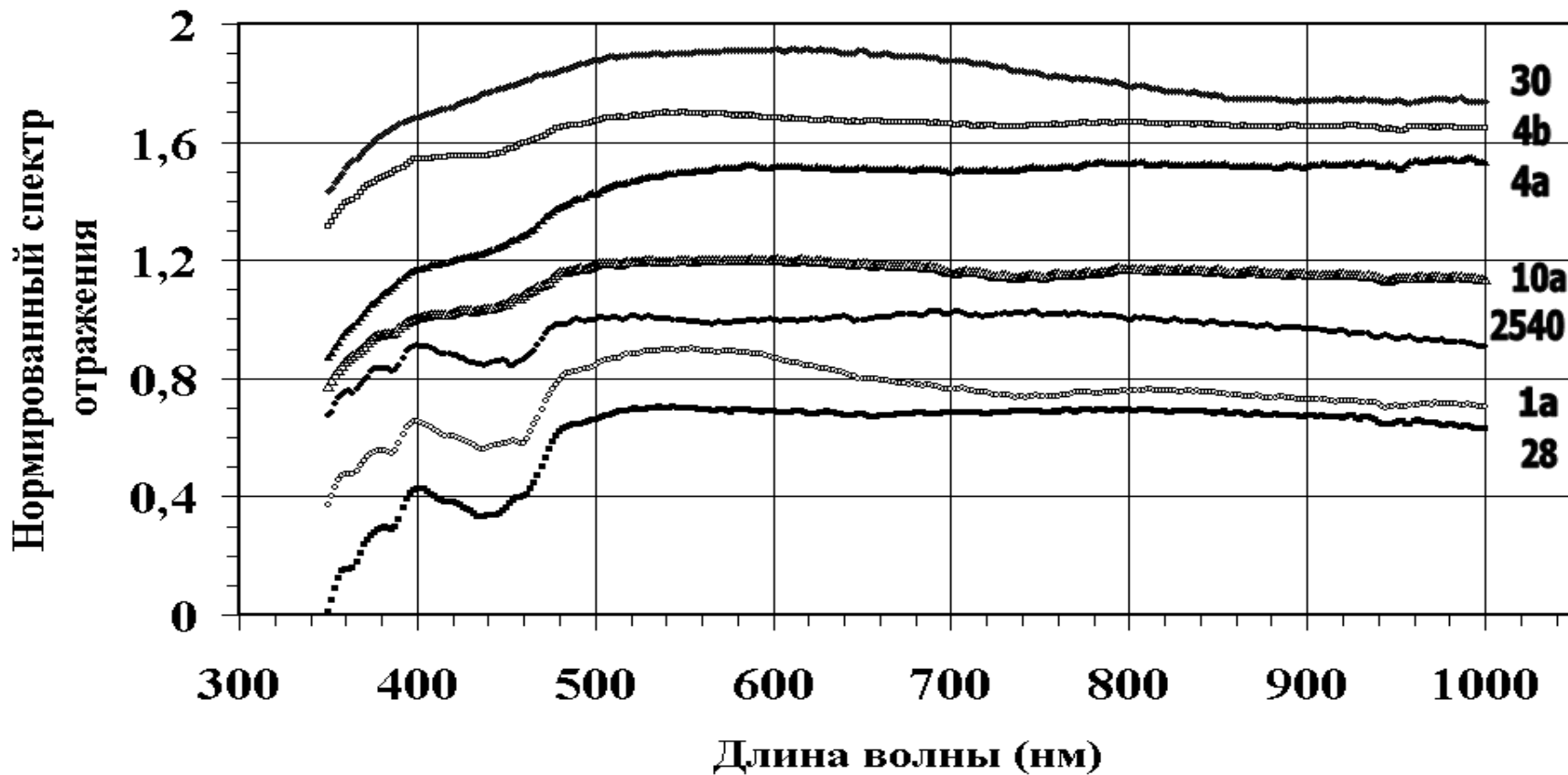
21 Лютеция
(б)



(а) Пример «зашумленного» спектра отражения 21 Лютеции, полученного при условиях тонкой облачности в виде «цирусов». (б) Тот же спектр, но сглаженный методом «бегущего среднего» по 5 точкам.

Использование данных об образцах-аналогах при интерпретации спектров отражения астероидов

Земные серпентины



Спектрально-частотный метод (СЧМ)

(Бусарев и др., 2007)

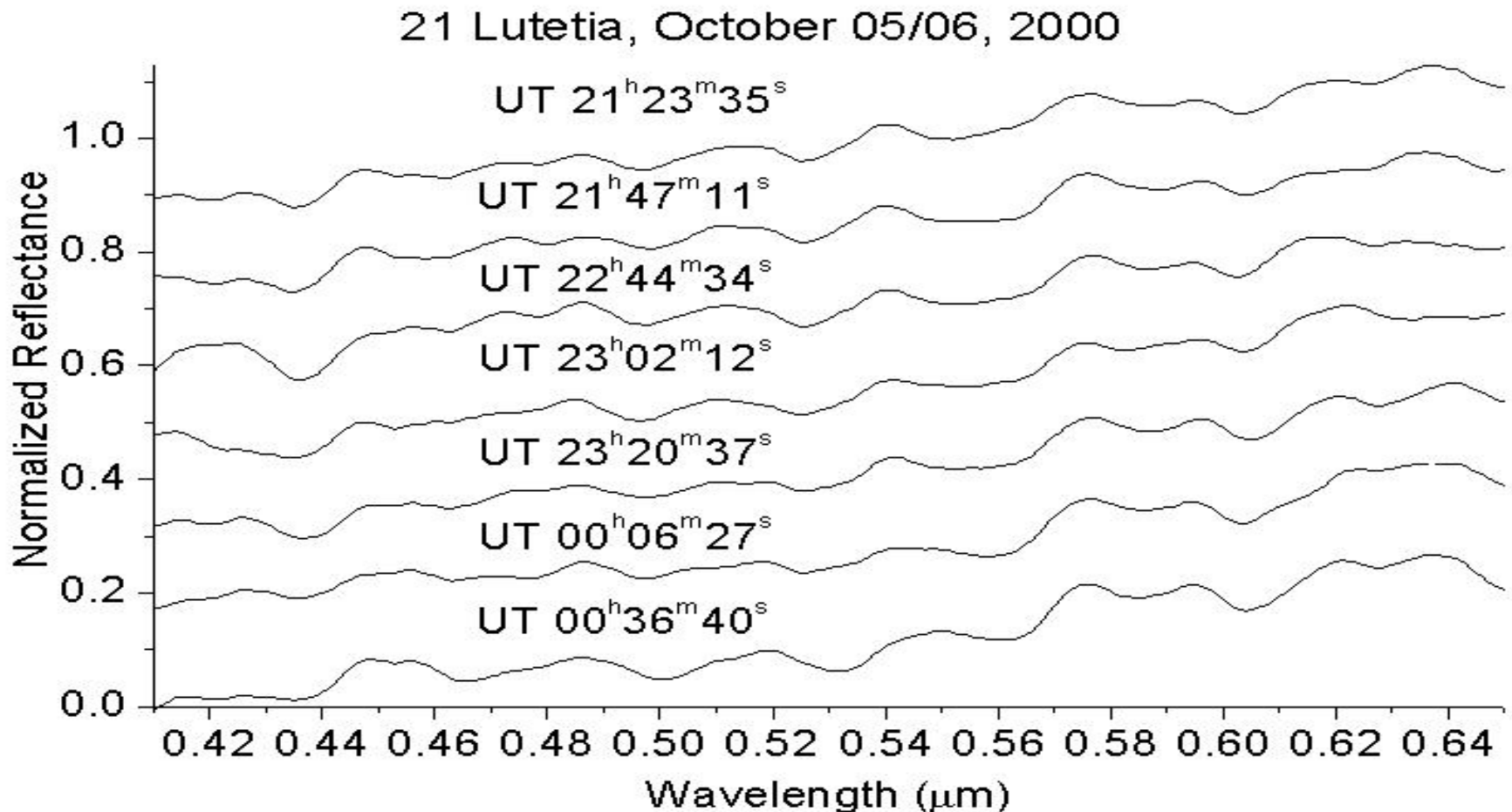
- СЧМ является объединением спектрального и частотного методов
- В спектрах отражения какого-либо одного астероида выбирается одна характерная спектральная деталь, например, – известная полоса поглощения
- Выполняется регистрация достаточно большого ряда спектров этого астероида, затем рассчитываются соответствующие спектры отражения, которые нормируются и по ним определяются значения эквивалентной ширины выбранной полосы поглощения
- Полученный ряд значений эквивалентной ширины данной полосы поглощения подвергается частотному анализу

Физический смысл СЧМ

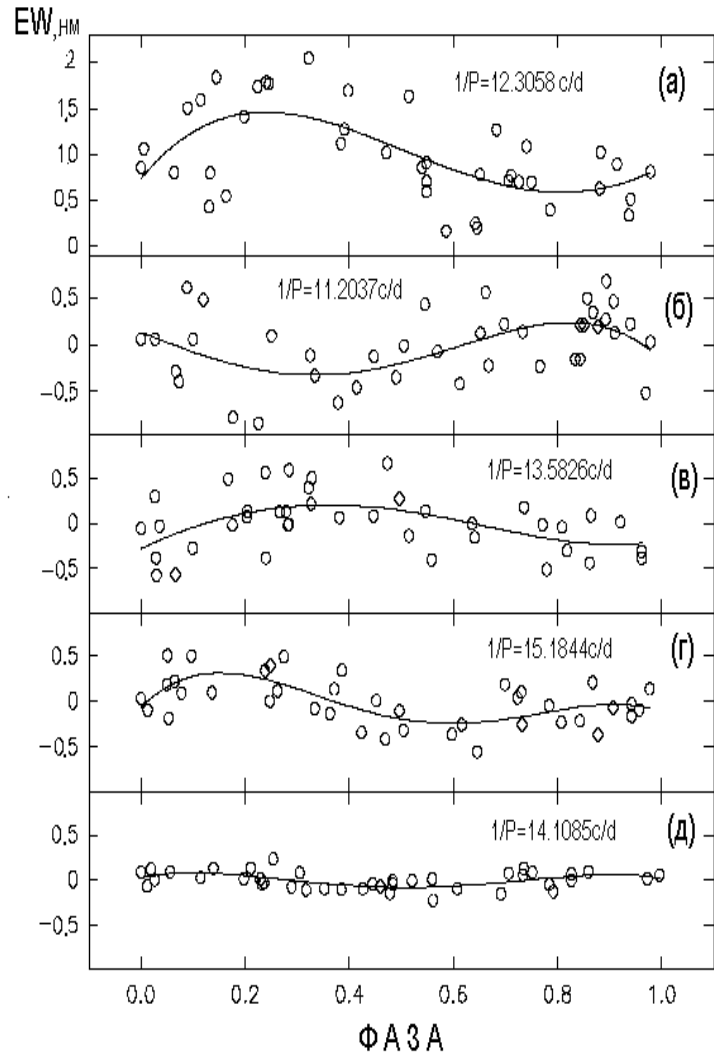
- Цель метода состоит в обнаружении на поверхности вращающегося астероида изменений деталей с определенным составом, характеризующих заданной полосой поглощения
- Определение частоты (или частот) спектральных изменений дает возможность оценить размеры и распределение на поверхности астероида спектральных пятен вещества, обладающего некоторыми физико-химическими особенностями
- Особенностью СЧМ является возможность обнаружения на поверхности астероида деталей с размерами меньше предела углового разрешения телескопа (т. к. пространственные вариации преобразуются во временную последовательность изменений яркости при вращении астероида)

Результаты СЧМ для 21 Лютеции

- Нами были рассчитаны величины эквивалентной ширины полосы поглощения у 0,44 мкм в 40 спектрах отражения Лютеции, полученных с августа по ноябрь 2000 г. на телескопе МТМ-500 (КрАО) с помощью бесщелевого спектрографа и телевизионного комплекса



21 Лютеция



- На рисунке показаны свертки (фазовые зависимости) величин эквивалентной ширины полосы поглощения Лютеция у 0,44 мкм (EW, нм) с несколькими из найденных периодов. Все графики имеют одинаковый масштаб по обеим осям. Кривые – полиномы 4-й степени.
- Частотный анализ ряда величин эквивалентной ширины полосы поглощения Лютеция у 0,44 мкм показал, что распределение гидросиликатов на астероиде имеет пятнистый характер, а размеры пятен составляют от 3 до 70 км для случая их экваториального расположения (при диаметре астероида около 100 км).
- Возможные варианты интерпретации результатов: (1) пятна гидросиликатов образовались в результате столкновений с астероидом более примитивных и более мелких тел; (2) сравнительно молодые ударные кратеры вскрывают вещество другого состава.

О перспективности применения ИК-методов

- На длинах волн более 5,0 мкм в излучении ТБТ преобладает ИК-компонента (Lebofsky, Spencer, 1989). Определяемое по ИК-данным радиометрическое альbedo астероида представляет собой болометрическое (всеволновое) альbedo Бонда. По нему можно оценить значения диаметра и геометрического альbedo астероида в видимом диапазоне, используя определенную тепловую модель.
- Особенно перспективно применение ИК-методов для астероидов, сближающихся с Землей, имеющих либо очень тонкий изолирующий слой реголита, либо не имеющих его вообще.

Спасибо за внимание!