

УДК 523.3

Интерпретация колориметрических характеристик поверхности Луны на основе модели спектрального хода альbedo порошкообразных поверхностей

Ю. Г. Шкуратов

Модель спектральной зависимости альbedo твердых поверхностей космических тел используется для: 1) оценки спектральной зависимости мнимой части показателя преломления для лунной поверхности в целом; 2) интерпретации диаграммы альbedo — цвет диска Луны; 3) интерпретации «титановой» зависимости Маккорда — Дольфюса. В частности, показано, что разброс значений на диаграмме альbedo — цвет в основном обусловлен вариациями показателя цвета, который характеризует истинное поглощение, а двузначность «титановой» зависимости — уменьшением концентрации поглотителей в частицах светорассеивающего слоя при переходе от морского вещества к материковому.

INTERPRETATION OF COLORIMETRIC PROPERTIES OF THE MOON ON THE BASIS OF SPECTRAL ALBEDO MODEL FOR POWDERED SURFACES, by Shkuratov Yu. G. — The spectral albedo model is used for: 1) estimation of the spectral dependence of the imaginary refractive index of the Moon; 2) interpretation of the lunar albedo — colour diagram; 3) interpretation of the relationship between titanium content and colour-index of lunar soils. It is shown that the dispersion of the albedo — colour diagram is due to variations of the colour-index which characterizes true absorption.

Спектрофотометрические (колориметрические) измерения порошкообразной (зернистой) среды, например поверхности Луны или других твердых космических тел, несут информацию не только об оптических параметрах вещества, но и о параметрах дисперсности (структуры) этой среды. Важнейшие оптические параметры вещества частиц среды — величины n и k — действительная и мнимая части коэффициента преломления. Под параметрами дисперсности обычно понимают средний размер \bar{l} , дисперсию размеров частиц и характеристику пористости среды. В общем случае влияние всех этих параметров на спектральный ход альbedo неотделимо друг от друга. Однако при наличии некоторой априорной информации и подходящей теоретической модели светорассеяния в порошкообразных средах иногда удается оценить вклады различных факторов отдельно и выделить главные из них.

В [7] рассмотрена теоретическая модель спектрального хода альbedo порошкообразной среды и представлены результаты лабораторных измерений, подтверждающие эффективность этой модели*. Здесь мы сосредоточим внимание на использовании отменной модели применительно к спектрофотометрии и колориметрии поверхности Луны.

Оценка $n(\lambda) + ik(\lambda)$. В практике изучения оптических характеристик грунтов Луны или других космических тел часто необходимо знать усредненные оптические параметры вещества. Многочисленные лабораторные исследования образцов лунной поверхности (петрологические, минералого-геохимические) обычно не касались измерений n и k . Лишь иногда в работах по этим вопросам встречаются определения n при одной длине волны для некоторых экзотических частиц грунта, например стекол различной окраски [15]. Никаких данных о спектральной зависимости n и k в широком диапазоне длин волн применительно к лунному грунту обнаружить не удалось. Такие данные опубликованы в работах [12, 14] для трех образцов земного происхождения: базальта, стекла базальтового состава и обсидиана. Эти образцы можно рассматривать как некие геохимические аналоги лунного вещества. Путем совместного анализа этих данных и результатов измерений спектрального альbedo Луны, интерпретированных по модели

* В работе [7, формула (24)] выражение для N должно иметь вид $N = \{(1 - R_i) [1 + R_i(1 - A')^2 / (2A')]\}^{-1}$.

светорассеяния [7], мы попытались оценить зависимость $n(\lambda) + ik(\lambda)$ для поверхности Луны в целом.

На рис. 1, *a* приведена спектральная зависимость альbedo Луны, построенная по данным [2, 4, 8, 11, 13, 16], которые касаются исследований самой Луны и образцов лунного грунта. На графике хорошо видна депрессия в УФ-части спектра ($\lambda \approx 0.18$ мкм). Она связана с несколькими мощными механизмами поглощения — переносом заряда типа кислород — металл и переходами валентных электронов в зону проводимости. Длинноволновое крыло УФ-депрессии захватывает весь видимый диапазон спектра, простираясь почти до 4 мкм. На этом крыле имеются более слабые депрессии (около 1 и 2.2 мкм), обусловленные электронными переходами $d-d$ типа в

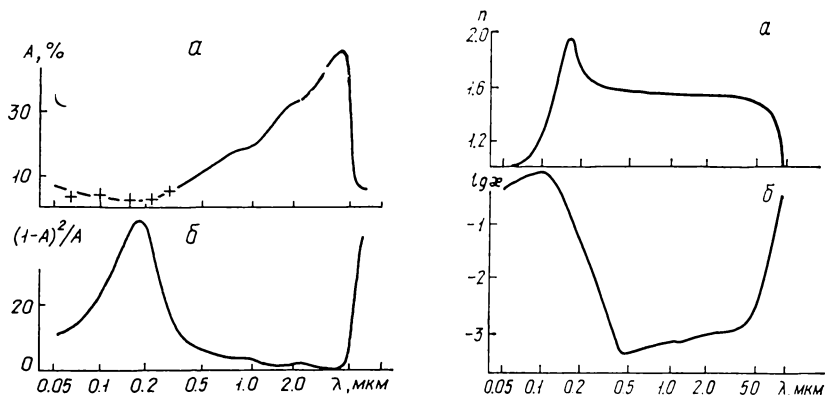


Рис. 1. Спектральное альbedo Луны: *a* — обычная шкала альbedo; *b* — функция Кубелки — Мунка. Крестиками обозначены вычисления по формуле (1) с использованием данных [8, 11, 13, 16]

Рис. 2. Спектральная зависимость оптических параметров Луны, построенная по данным лабораторных исследований аналогов грунта [12, 14] и согласованная с результатами измерений спектрального альbedo с помощью модели [7]

ионах F^{2+} , принадлежащих к минералам пироксенового и оливинового рядов. Для длин волн более 4 мкм альbedo Луны понижается, что в основном связано с «включением» колебательных степеней свободы ионных комплексов.

Рассмотрим более детально происхождение УФ-депрессии в спектре альbedo Луны. На первый взгляд представляется очевидным интерпретировать эту депрессию как обычную полосу поглощения. Например, применение формулы Кубелки — Мунка [3], которая связывает диффузное альbedo рассеивающей среды с объемными коэффициентами поглощения и рассеяния, казалось бы, не оставляет сомнений на этот счет (рис. 1, *b*). Но, если принять эту точку зрения, возникает проблема, как объяснить значительное увеличение прозрачности частиц лунного грунта в коротковолновой (вакуумной) УФ-области (в условиях, когда действуют очень сильные механизмы поглощения). Более адекватной представляется следующая интерпретация. В области спектра вблизи 0.2 мкм происходит перераспределение вкладов двух компонентов отраженного светового потока: внутреннего (рассеянного внутри частиц) и внешнего (однократно рассеянного поверхностью частиц). В видимой и ближней ИК-области спектра доминирует внутренний компонент, а в области $\lambda < 0.3$ мкм — внешний. Следовательно, модель светорассеяния [7] можно использовать применительно к лунному грунту только в области спектра приблизительно 0.3—6.0 мкм, причем при расчетах $\kappa(\lambda)$ в столь большом диапазоне необходимо применять априорную информацию о зависимости $n(\lambda)$. На рис. 2, *a* сведены данные работ [12, 14] о $n(\lambda)$ для земного базальта. При расчетах $\kappa(\lambda)$ по формулам модели [7] в диапазоне 0.3—6.0 мкм мы использовали зависимости $A(\lambda)$ и $n(\lambda)$, приведенные на рис. 1, *a* и 2, *a* соответственно. Для расширения спектрального диапазона взяты измерения $\kappa(\lambda)$ земного базальта [12, 14], которые стыковались с расчетными при среднем размере частиц 60 мкм. Это значение согласуется с известными оценками среднего размера частиц лунного грунта [5]. Сводные данные для $\kappa(\lambda)$ Луны приведены на рис. 2, *b*. В совокупности с зависимостью на рис. 2, *a* их можно рассматривать в первом приближении как модель опти-

ческих параметров вещества лунной поверхности. Независимым подтверждением применимости к Луне данных [12, 14] для области спектра 0.05—0.3 мкм являются результаты расчетов с их помощью величины альbedo при предположении, что оно формируется эффектами поверхностного отражения. Вычисления проведены по формуле

$$A_0 = [(n - 1)^2 + \kappa] / \{4 [(n + 1)^2 + \kappa]\}, \quad (1)$$

которую обычно используют [11] для оценки альbedo шероховатых поверхностей в коротковолновой УФ-области. Результаты приведены на рис. 1, а. Они хорошо укладываются на экспериментальной кривой.

Диаграмма альbedo — цвет. Диаграммы альbedo — цвет впервые стали использоваться в планетных исследованиях применительно к Луне для прогнозирования химико-минералогических и физических характеристик ее поверхности. Обзор таких иссле-

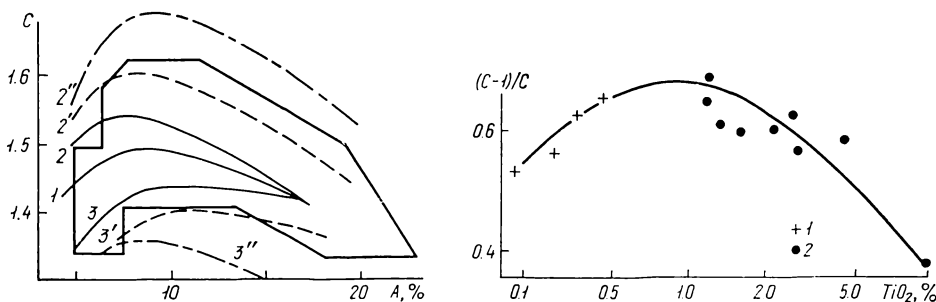


Рис. 3. Диаграммы альbedo (0.63 мкм) — цвет $C(0.63/0.42$ мкм). Выделенная область соответствует диаграмме для лунного диска, кривые — расчетные данные. Номера отсвечают следующим комбинациям параметров модели [7]: 1 — $n=1.55$, $\mu=0.5$, $k=1.25$; 2, 3 — соответственно μ равно 0.1 и 1; 2', 3' — n равно 1.4 и 1.7; 2'', 3'' — k равно 1.35 и 1.15

Рис. 4. «Титановая» зависимость Маккорда — Дольфуса: 1 — материковое вещество; 2 — морское вещество. Расчетные зависимости построены при следующих значениях параметров в формуле (2): $a=0.37$, $b=-0.10$. При расчете $C(0.65/0.23$ мкм) считалось, что $\mu=1$, $n(0.65$ мкм) = 1.55, $n(0.23$ мкм) = 1.65, $k=1$

дований дан в работе [1], в которой представлены также новые наблюдательные данные, касающиеся диаграммы альbedo (0.63 мкм) — цвет $C(0.63/0.42$ мкм) всего лунного диска.

С помощью формул модели [7] мы рассчитали семейство кривых $C(A)$, имитирующих диаграмму альbedo (0.63 мкм) — цвет $C(0.63/0.42$ мкм). Затем эти кривые совмещались с диаграммой альbedo — цвет Луны. Совмещенные теоретическая и экспериментальная диаграммы приведены на рис. 3. Видно, что расчетные кривые хорошо воспроизводят двузначность зависимости $C(A)$. Небольшие вариации параметров модели легко обеспечивают наблюдаемую ширину диаграммы по оси C и по оси A . В свете этих данных рассмотрим возможные причины разброса точек на экспериментальной диаграмме (вклад в этот разброс различных погрешностей измерений не учитываем). Величина n при небольшом интервале изменений (от 1.4 до 1.7, что свойственно силикатам) может порождать заметный разброс точек как по оси C , так и по оси A , причем меньшим n при заданном альbedo соответствует больший показатель цвета. Если учесть, что изменения n обычно сопутствуют сильным изменениям κ , то представляется маловероятным объяснение разброса точек вариациями n . Параметр пористости также заметно влияет на вид зависимости $C(A)$, но только при очень больших вариациях (от 0.1 до 1) и лишь в области малых значений A (менее 10 %). На лунной поверхности, структура которой в значительной мере гомогенизирована воздействием космогенных факторов, вряд ли следует ожидать заметных вариаций μ . Единственным параметром, для которого нет ограничений, является $k = \kappa(\lambda_2) / \kappa(\lambda_1)$. Это, как и $C(\lambda_1/\lambda_2)$, показатель цвета, но выраженный через истинное поглощение. Связь между C и k неоднозначна. Последнее означает, что цвет дисперсной среды только в первом приближении характеризует цвет вещества, из которого состоят частицы этой среды. Разброс значений C и A на лунной диаграмме, по-видимому, в первую очередь связан с разбросом значений $\kappa(\lambda_1)$ и $\kappa(\lambda_2)$ и, как следствие, с вариация-

ми параметра $k(\lambda_1/\lambda_2)$. Если этот вывод справедлив, то разбиение экспериментальной диаграммы $C(A)$ линиями $k = \text{const}$ с последующим отображением областей диаграммы, ограниченных этими линиями, в координатной плоскости исходного изображения — есть способ картографирования параметра k лунной поверхности.

«Титановая» зависимость Маккорда — Дольфюса. В лунном грунте в основном содержится четырехвалентный титан Ti^{4+} , который проявляется оптически путем механизма переноса заряда типа $O^{2-} \rightarrow Ti^{4+}$ и $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$. С этой точки зрения понятна эмпирическая зависимость между показателем цвета $C(0.56/0.40 \text{ мкм})$ и содержанием титана TiO_2 , которая обнаружилась [9] в образцах зрелого морского грунта. Эта зависимость дает увеличение содержания TiO_2 при уменьшении $C(0.56/0.40 \text{ мкм})$. В [10] показано, что корреляция $TiO_2 - C$ становится более выраженной при расширении спектрального диапазона (Дольфюс исследовал показатель цвета $C(0.65/0.23 \text{ мкм})$ и что для материковых грунтов эта корреляция также существует, но она носит обратный характер. Сводная «титановая» зависимость Маккорда — Дольфюса приведена на рис. 4, на котором хорошо видна двузначность связи $TiO_2 - C$. Качественное объяснение взаимосвязи $TiO_2 - C$ дано в [6]. Здесь на основе модели [7] будет представлена ее возможная количественная интерпретация.

Естественно полагать, что величина κ (или $\tau = 4\pi\bar{\kappa}/\lambda$) связана монотонной зависимостью с концентрацией Ti . Линейную связь (закон Бэра) здесь предполагать трудно, так как в случае лунного грунта мы имеем дело с большими концентрациями поглотителей. Предположим, что эту связь можно описать эмпирической формулой

$$\tau = a(TiO_2 [\%])^m + b. \quad (2)$$

Поскольку величины C и τ связаны двузначной зависимостью, то и связь $TiO_2 - C$ будет двузначной. При $a=0.37$, $b=-0.10$ и $m=1/3$ расчетная кривая наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными (рис. 4). Интересно отметить, что величина τ в этом случае оказалась пропорциональной не объемной, а линейной концентрации поглотителей ($m=1/3$). Итак, мы показали, что «титановая» зависимость Маккорда — Дольфюса может быть обусловлена не изменениями профиля полос $O^{2-} \rightarrow Ti^{4+}$ или $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$ (при расчете полагалось $k = \text{const}$), а значительно более грубым эффектом, связанным с уменьшением концентрации поглотителей в светорассеивающем слое при переходе от морского вещества Луны к материковому.

1. Бондаренко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Корниенко Ю. В. Диаграмма альbedo — цвет лунной поверхности // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.— 1, № 6.— С. 3—11.
2. Деметьев Б. В., Марков М. Н. Инфракрасное излучение и спектроскопия Луны и лунного грунта // Инфракрасное излучение в атмосфере Земли и в космосе.— М.: Наука, 1978.— С. 169—203.— (Тр. Физ. ин-та АН СССР; Т. 105).
3. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред.— Минск: Наука и техника, 1969.— 592 с.
4. Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б. Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел Солнечной системы // Космохимия Луны и планет / Ред. А. П. Виноградов.— М.: Наука, 1975.— С. 547—573.
5. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Николаева О. В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974 года.— М.: Ин-т геохимии и аналит. химии АН СССР, 1975.— 72 с.
6. Шкуратов Ю. Г. Цветовые различия и содержание химических элементов в грунтах лунной поверхности // Астрон. вестн.— 1982.— 16, № 2.— С. 69—76.
7. Шкуратов Ю. Г. Модель спектрального хода альbedo твердых поверхностей космических тел // Кинематика и физика небес. тел.— 1987.— 3, № 5.— С. 39—46.
8. Carver J. H., Horton B. H., McCoy D. G. et al. Comparison of lunar ultraviolet reflectivity with that of terrestrial rock samples // Moon.— 1975.— 12, N 1.— P. 91—100.
9. Charette M. P., McCord T. B., Pieters C., Adams J. B. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils // J. Geophys. Res.— 1974.— 79, N 2.— P. 1605—1613.
10. Dollfus A., Cailleux A., Hua C. T. Remote sensing of TiO_2 on planets and satellites // Lunar and Planetary Sci. Conf. (abstrs).— Houston: LPI/USRA press, 1979.— P. 303—305.
11. Henry R. C., Fastie W. G., Lucke R. L., Hapke B. W. A far-ultraviolet photometer for planetary surface analysis // Moon.— 1976.— 15, N 1.— P. 51—65.
12. Lamy P. L. Optical properties of silicates in the far ultraviolet // Icarus.— 1978.— 34, N 1.— P. 68—75.

13. McCord T. B., Clark R. N., Hawke B. R. et al. Moon: near-infrared spectral reflectance, a first good look // J. Geophys. Res.—1981.—86, N 6.— P. 10883—10892.
14. Pollack J. B., Toon O. B., Khare B. N. Optical properties of some terrestrial rocks and glasses // Icarus.—1973.—19, N 3.— P. 372—389.
15. Taylor S. R. Lunar science: the post-Apollo area.—New York: Acad. press, 1975.—361 p.
16. Wu H. H., Broadfoot A. L. The extreme ultraviolet albedos of the planet Mercury and of the Moon // J. Geophys. Res.—1977.—82, N 5.— P. 748—751.

Астрон. обсерватория
Харьков. ун-та им. А. М. Горького

Поступила в редакцию 17.03.87,
после доработки 01.06.87

РЕФЕРАТЫ ДЕПОНИРОВАННЫХ РУКОПИСЕЙ

УДК 523.32

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗРЕВАНИЯ И УДАРНОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЛУННОГО ГРУНТА / Евсюков Н. Н.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 8031-В87)

Показано, что полное созревание кристаллических лунных пород, соответствующее содержанию стекол более 70 %, достигается для реальной плотности кратеров и типичных скоростей ударов только при крутых распределениях кратеров по размерам (показатель степени более 3.3). Приведены примеры многослойной ударной структуры лунного грунта.

УДК 523.32.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗРЕВАНИЯ ГРУНТА НА БЕЗАТМОСФЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛАХ / Евсюков Н. Н.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; И 8032-В87)

Показано, что даже при оптимальных условиях созревания грунта путем его переплавления метеоритными ударами высокая степень зрелости, соответствующая содержанию стекол более 70 %, может быть достигнута лишь на космических телах диаметром более 50 км. При этом доля вещества, выброшенного метеоритным ударом и потерянного планетой, не превышает 15 % объема выброса. Толщина слоя, потерянного таким космическим телом за время порядка $4 \cdot 10^9$ лет, составляет примерно 1 м, для тел диаметром 1 км — около 10 м.