

УДК 523.34-846-35-652

## Зависимость широтного распределения яркости по диску Луны от альbedo и рельефа

Л. А. Акимов, Ю. И. Великодский, В. В. Корохин

Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина  
61022, Харьков, ул. Сумская, 35

*Приводятся результаты измерения распределения яркости по диску Луны при разных углах фазы в синей и красной областях спектра, а также результаты лабораторных измерений распределения яркости образцов вдоль фотометрической широты. Показано, что для Луны уменьшение яркости с широтой формируется главным образом микро- и мезорельефом ее поверхности. Незначительное замедление этого уменьшения с длиной волны связано не столько с изменением альbedo, сколько с изменением диапазона размеров микрорельефа, влияющего на закон отражения света Луной.*

*ЗАЛЕЖНІСТЬ ШИРОТНОГО РОЗПОДІЛУ ЯСКРАВОСТІ ПО ДИСКУ МІСЯЦЯ ВІД АЛЬБЕДО ТА РЕЛЬЄФУ, Акімов Л. О., Великодський Ю. І., Корохін В. В. — Наведені результати вимірювання розподілу яскравості по диску Місяця при різних кутах фази у синій та червоній ділянках спектру, а також результати лабораторних вимірювань розподілу яскравості зразків уздовж фотометричної широти. Показано, що для Місяця зменшення яскравості з широтою формується переважно мікро- та мезорельефом її поверхні. Незначне сповільнення цього зменшення з довжиною хвилі пов'язано не стільки із зміною альbedo, скільки із зміною діапазону розмірів микрорельєфу, що впливає на закон відбиття світла Місяцем.*

*DEPENDENCE OF LATITUDE BRIGHTNESS DISTRIBUTION OVER THE LUNAR DISK ON ALBEDO AND RELIEF, by Akimov L. A., Velikodskiy Yu. I., and Korokhin V. V. — We present results of brightness distribution measurements of the lunar disk and laboratory samples at different phase angles in blue and red spectral bands. It is shown for the Moon that the brightness drop with photometric latitude is formed mainly by the micro and mesorelief of the lunar surface. A small decrease of this drop with wavelength is due not so much to an albedo variation as to changes in the microrrelief dimension range, which affects the reflection of light by the Moon.*

### ВВЕДЕНИЕ

Для исследования физических свойств и состава лунной поверхности необходимо знать закон рассеяния ею света. Рассмотрим поверхность

безатмосферного тела, покрытого реголитом, как достаточно пористую среду, состоящую из частиц различной формы и размера. Под частицей понимается любое сплошное образование, имеющее скачок показателя преломления на границе. Излучение, отраженное от такой поверхности, формируется как однократным, так и многократным рассеянием света на этих частицах. Рассеяние же на частицах зависит от коэффициента преломления, коэффициента поглощения и размера частиц. Из света, упавшего на частицу и достигшего ее границы при выходе из частицы, изымается часть, в некотором приближении пропорциональная произведению пути на коэффициент поглощения. Поэтому при постоянном коэффициенте преломления альbedo частиц может повышаться за счет увеличения прозрачности вещества и/или уменьшения размера частиц.

Альbedo поверхности, в свою очередь, зависит от альbedo частиц и от структуры поверхности. Обычно в структуре поверхности (в пределах разрешения изображения) выделяют два масштаба: масштаб реголитовой среды (микрорельеф) и масштаб случайного рельефа (мезорельеф). На уровне микрорельефа отражение света реголитом формируется пористым слоем его поверхности. В случае низкого альbedo частиц в отражении света поверхностью принимает участие только однократное рассеяние частицами слоя. Тогда видимое альbedo поверхности пропорционально альbedo частиц, а зависимость видимого альbedo от фотометрических координат можно описать формулой, полученной в работе [6] для однократного рассеяния, которая обобщает закон Ломмеля — Зеелигера путем учета теневого эффекта. Здесь в основном нас будет интересовать зависимость яркости от фотометрической широты, поэтому отметим, что в формуле [6], в отличие от закона Ломмеля — Зеелигера, широтная зависимость формально присутствует, однако является несущественной (по крайней мере в области фотометрических долгот  $\lambda < 80^\circ$  и углов фазы  $\alpha < 160^\circ$ , где обычно проводятся измерения [3]).

Для все больших альbedo частиц все больший вклад в отраженное поверхностью излучение будет вносить многократное рассеяние света на частицах поверхностного слоя. При этом распределение яркости по фотометрическим координатам может в предельном случае приближаться к закону Ламберта для ортотропной поверхности, для которого, в частности, яркость пропорциональна косинусу фотометрической широты. В работе [3] (по формулам работы [6], где наиболее квалифицированно учтен вклад многократного рассеяния в закон распределения яркости) был оценен этот вклад в широтную зависимость яркости Луны. Оказалось, что он не превышает 10—20 %, но уменьшение яркости к полюсам ускоряется с увеличением альbedo.

Описанные выше свойства характерны для ровной, не искаженной мезорельефом, поверхности реголитоподобного вещества. Однако на поверхности Луны и других безатмосферных тел мы имеем достаточно мощный мезорельеф, приводящий в первом приближении к усреднению функции распределения яркости для каждого участка поверхности по фотометрическим координатам [2]. Следствием этого является значительное изменение функции распределения яркости, особенно ее широтной составляющей. Так, например, в функции Хапке после учета подобным образом влияния мезорельефа [8] появилась составляющая, содержащая существенную широтную зависимость. Однако такой подход, основанный на усреднении фотометрической функции по координатам, не совсем корректен в случае поверхностей безатмосферных тел. Как правило, четкую границу между микро- и мезорельефом для них провести нельзя: эти поверхности имеют более сложную структуру, обладающую свойством самоподобия. Описать рассеяние света на такой поверхности удастся только с помощью принципов

инвариантности. Таким путем были получены закон распределения яркости Акимова [2] для предельно шероховатой поверхности и инвариантная функция рассеяния Шкуратова [9], содержащая линейную комбинацию законов Акимова и Ламберта. Отметим также, что функция закона Акимова была получена еще одним способом в работе [7] с помощью принципа масштабной инвариантности для самоподобной поверхности. Закон Акимова можно представить в виде [2]

$$\Psi(\alpha, \varphi, \lambda) = \cos \frac{\alpha}{2} \cdot (\cos \varphi)^{\alpha/(\pi - \alpha)} \operatorname{secl} \cos \left( \frac{\pi}{\pi - \alpha} (\lambda - \alpha/2) \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол фазы,  $\varphi$  и  $\lambda$  — фотометрические широта и долгота точки на поверхности,  $\Psi(\alpha, \varphi, \lambda)$  — распределение яркости относительно зеркальной точки на поверхности.

Указанные теоретические законы неплохо описывают распределение яркости по диску Луны, но все же для ряда задач обладают недостаточной точностью. В нашей предыдущей статье [3] исследовалась широтная зависимость яркости лунных материков в широком диапазоне углов фазы. Было показано, что для описания закона распределения яркости по диску Луны можно использовать эмпирическую формулу [2]

$$\Psi(\alpha, \varphi, \lambda) = \frac{\cos \alpha/2}{1 - \sin^{q+1} \alpha/2} \cos^q \varphi \operatorname{secl} \left[ \cos^{q+1} (\lambda - \alpha/2) - \sin^{q+1} \frac{\alpha}{2} \right], \quad (2)$$

где  $q$  — фактор гладкости, зависящий от угла фазы. Показано, что для материков в красной области спектра для исследуемых углов фазы (30—135°) величина  $q$  хорошо аппроксимируется выражением

$$q(\alpha) = \nu \cdot \alpha / (\pi - \alpha) \quad (3)$$

при  $\nu = 0.51$ .

Формула (2) описывает довольно широкий класс поверхностей. Ее можно применять и для поверхностей, не искаженных мезорельефом (в частности, при  $q(\alpha) = 1$  она обращается в закон Ламберта). В этом случае параметр  $q$  зависит от альбедо, и, по-видимому, при увеличении альбедо величина  $q$  увеличивается от нуля до единицы. При наличии же мезорельефа фактор гладкости  $q$  должен зависеть как от альбедо, так и от рельефа.

Для того чтобы изучить влияние альбедо и рельефа на фактор гладкости  $q$ , нами предпринято специальное исследование. Мы сравнили широтную зависимость материков в двух участках спектра, сравнили широтную зависимость морей и материков, а также провели индикатометрические измерения образцов.

#### НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА И ЕЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами получены и обработаны ПЗС-изображения Луны в красной ( $\lambda_{\text{эф}} = 0.75$  мкм) и голубой ( $\lambda_{\text{эф}} = 0.47$  мкм) областях спектра при  $\alpha = 105^\circ$ . Также были обработаны полученные ранее Л. А. Акимовым на телескопе АЗТ-8 фотографические изображения Луны в красной ( $\lambda_{\text{эф}} = 0.63$  мкм) и УФ-областях спектра ( $\lambda_{\text{эф}} = 0.38$  мкм) при  $\alpha = 142^\circ$ . Эти наблюдения позволяют судить о влиянии альбедо на широтную зависимость, поскольку в таком спектральном диапазоне альбедо материков изменяется в 1.5—1.6 раза.

Наблюдения проводились с помощью фотометрического комплекса на базе ПЗС-линейки [5] на 20-см рефракторе ХАО. Для обработки изображений использовался универсальный программный комплекс IRIS [4].

С целью отыскания влияния альбедо на широтную зависимость яркости мы исследовали для каждого угла фазы распределение с широтой показателя цвета  $S = I_{\text{кр}}/I_{\text{син}}$ , полученного делением одного изображения на другое.

На основе формулы (2) мы полагали, что зависимость показателя цвета от широты описывается формулой

$$C(\varphi) = C_0 \cos^{\Delta q} \varphi, \quad (4)$$

где  $C_0$  — показатель цвета на экваторе, а  $\Delta q$  — разность значений фактора гладкости для двух участков спектра, и отыскивали наиболее вероятное значение величины  $\Delta q$ . При этом использовался метод, который мы применяли для определения фактора гладкости  $q$  в работе [3] (описание см. ниже). Отличие здесь только в том, что вместо фазового отношения использовался показатель цвета, и в результате получился не сам фактор гладкости, а разность  $\Delta q$ . Ниже для оценки погрешностей приводятся средние квадратичные отклонения, полученные при усреднении величины  $\Delta q$  по долготам.

Мы получили, что для лунных материков при  $\alpha = 105^\circ$  показатель цвета  $C_1(0.75/0.47)$  существенно не изменяется с широтой ( $\Delta q = -0.03 \pm 0.02$ ), а при  $\alpha = 142^\circ$  показатель цвета  $C_2(0.63/0.38)$  увеличивается с увеличением фотометрической широты ( $\Delta q = -0.12 \pm 0.06$ ). То есть, уменьшение яркости к полюсам в УФ-области больше, чем в красной, хотя альbedo Луны, наоборот, в УФ-лучах меньше, и многократное рассеяние должно приводить к противоположному эффекту. Эти исследования проведены для материков восточного полушария — в основном это древний материковый щит.

Для сравнения поведения широтной зависимости яркости для морей и материков Луны нами использованы изображения западного полушария при углах фазы  $45^\circ$  и  $133^\circ$ , где обширные районы заняты океаном Бурь. Альbedo морей и материков тоже отличается в 1.5—1.6 раза, но океан Бурь гораздо моложе южного материкового щита, и альбедная зависимость распределения яркости по диску, скорее всего, будет мала по сравнению с влиянием рельефа, который значительно различается у морей и материков.

Были найдены значения фактора гладкости  $q$  для морей и материков при указанных углах фазы. При этом использовался метод, подробно описанный в работе [3]. Суть его заключается в следующем. Исследуемое изображение делилось на изображение Луны в фазе, близкой к полнолунию ( $\alpha = 2.6^\circ$ ), и затем распределение полученного отношения вдоль каждого фотометрического меридиана аппроксимировалось выражением

$$b(\varphi) = b_0 \cos^q \varphi, \quad (5)$$

где  $b_0$  — яркость на экваторе для данной долготы. Полученные в результате значения фактора гладкости  $q$  усреднялись затем по всем долготам.

Получены следующие значения фактора гладкости: для материков  $q = 0.11 \pm 0.07$  ( $\alpha = 45^\circ$ ) и  $1.51 \pm 0.04$  ( $\alpha = 133^\circ$ ); для морей  $q = -0.06 \pm 0.07$  ( $\alpha = 45^\circ$ ) и  $0.91 \pm 0.08$  ( $\alpha = 133^\circ$ ). В качестве погрешности здесь указаны средние квадратичные отклонения, полученные при усреднении по долготам. Значения  $q$  для материков в пределах указанной погрешности ложатся на кривую ( $q(\alpha)$ ), полученную в работе [3] и описываемую выражением (3) с  $\nu = 0.51$ . Для морей фактор гладкости оказался меньшим, хотя при небольших углах фазы ( $\alpha = 45^\circ$ ) разница порядка погрешности. Отрицательное значение  $q$  для морей при  $\alpha = 45^\circ$  не является существенным и связано с большей, чем у материков, неоднородностью поверхности морей по параметрам фазовой зависимости.

#### ИЗМЕРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Влияние альbedo и рельефа на широтную зависимость яркости нами было изучено и по индикатометрическим измерениям различных образцов. Прибор, с которым проводились измерения, описан в работе [1].

Образец 1 состоял из частиц окиси железа размером меньше 2 мкм (уже на таком размере частицы непрозрачны в голубой области спектра). Этот порошок насыпан через сито с определенной высоты. Частицы и конгломераты частиц свободно падают на поверхность и образуют сложный рельеф, близкий к тому, который мы имеем на Луне и безатмосферных телах Солнечной системы. Альbedo образца составляет 0.046 (для  $\lambda_{эф} = 0.48$  мкм) и 0.31 ( $\lambda_{эф} = 0.63$  мкм) при  $\alpha = 2^\circ$ , угле падения  $i = 32^\circ$  и угле отражения  $\varepsilon = 30^\circ$ , по отношению к стандартному экрану.

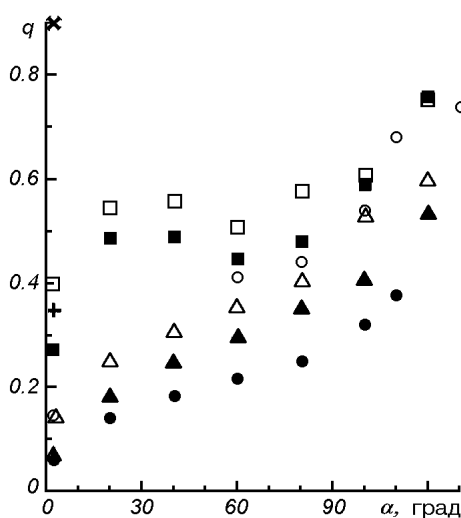
Образцы 2, 3 состояли из шлака, образующегося от сгорания угля. Это мелкие частицы, хорошо имитирующие лунный реголит по размерам, форме, цвету и происхождению (спекшиеся, остеклованные). Образец 2 получен путем свободного насыпания на подложку. Образец 3 после насыпания был примят стеклянной пластинкой, что приводит к значительному сглаживанию рельефа. Альbedo равно 0.14 в голубых лучах и 0.27 в красных (при  $\alpha = 2^\circ$ ,  $i = 32^\circ$ ,  $\varepsilon = 30^\circ$ , по отношению к стандартному экрану).

Образцы 4 и 5 состояли из окиси магния, используемого часто как аналог абсолютно белой поверхности. Альbedo его при  $i = 2.5^\circ$ ,  $\varepsilon = 0^\circ$  по отношению к стандартному экрану равно 1.1. Образец 4 сделан путем осаждения копоти от сгорания магния на плоскую пластинку. Образец 5 изготовлен следующим образом. Копоть окиси магния была спрессована, затем раздроблена на конгломераты размером от 0.5 мм и меньше. Эти конгломераты были свободно насыпаны на подложку. Тем самым формировался рельеф, подобный тому, который существует на Луне и других безатмосферных телах Солнечной системы.

Исследовалась зависимость видимого альbedo образцов от фотометрической широты (в диапазоне  $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ) для различных углов фазы ( $2^\circ$ — $130^\circ$ ). Полученные распределения яркости вдоль широты аппроксимировались выражением (5), в результате чего получались значения фактора гладкости  $q$  для каждого угла фазы. Эти значения представлены на рисунке. Видно, что в целом полученные зависимости  $q(\alpha)$  являются возрастающими, как и в случае поверхности Луны. Однако при  $\alpha = 0$  они не равны нулю, в то время как для Луны при  $\alpha = 0$  яркость не зависит от фотометрических координат. В красной области спектра фактор гладкости больше, чем в голубой: для шлака (образцы 2, 3) — на 0.05—0.07, для окиси железа (образец 1) — на 0.2—0.3. Для шлака эта разница явно не зависит от угла фазы, для окиси железа из-за малого количества точек подобный вывод сделать трудно.

Также видно, что у «шероховатого» образца шлака (образец 2) фактор гладкости  $q$  меньше, чем у «гладкого» (образец 3), особенно при  $\alpha < 60^\circ$  (разница 0.15—0.3). То же наблюдается и для окиси магния: у «гладкого» образца  $q = 0.9$  (при  $\alpha = 2^\circ$ ), а у «шероховатого»  $q = 0.35$ .

Зависимость фактора гладкости от угла фазы (светлые значки и крестики — красный фильтр, темные — синий; образцы: 1 — кружки, 2 — треугольники, 3 — квадраты, 4 — крестик, 5 — прямой крестик)



Комментируя рисунок, отметим также, что наблюдаемый на всех последовательностях точек «завал» при  $\alpha < 20^\circ$ , по-видимому, объясняется оппозиционным эффектом. Он вносит в фотометрическую функцию существенную добавку, не зависящую от фотометрической широты, и тем самым уменьшает величину  $q$ . Для Луны подобного практически не наблюдается: как уже говорилось, ее яркость в полнолуние не зависит от фотометрической широты.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерения образцов действительно показывают увеличение фактора гладкости  $q$  с альбедо, как и должно быть для ровных (в масштабе мезорельефа) поверхностей. Это видно из поднятия кривых  $q(\alpha)$  при переходе из голубой в красную область спектра (образцы 1—3). При этом зависимость  $q$  от угла фазы для ровных поверхностей, по-видимому, является незначительной. Действительно, в нашем примере с «приглаженным» образцом шлака получилось значение  $q \approx 0.56$  без существенного фазового хода.

Для лунных материков увеличения фактора гладкости с альбедо не обнаружено, наоборот, наблюдается небольшое его уменьшение, т. е. при достаточно мощном мезорельефе влияние альбедо становится очень слабым. Сравнивая кривые  $q(\alpha)$  для «гладких» и «шероховатых» поверхностей (образцы 2—5), мы видим, что при увеличении шероховатости постоянная составляющая функции  $q(\alpha)$  резко уменьшается, но зато появляется составляющая, увеличивающаяся с углом фазы. Для лунных материков [3], имеющих, видимо, значительно большую степень переработки поверхностного вещества, при  $\alpha = 0$  фактор гладкости вообще равен нулю, а наклон кривой  $q(\alpha)$  еще больше, чем для образцов. То есть остается только составляющая, растущая с углом фазы, которую можно описать выражением (3) с  $\nu = 0.51$ . Наконец, для предельно шероховатой поверхности, описываемой теоретическим законом Акимова (1),  $\nu$  достигает значения, равного единице.

Если предположить, что фазовая зависимость фактора гладкости без учета оппозиционного эффекта описывается выражением типа

$$q(\alpha) = q_0 + \nu\alpha/(\pi - \alpha), \quad (6)$$

где  $q_0$  и  $\nu$  — некоторые параметры, то величина  $\nu$  является характеристикой в основном рельефа поверхности, а  $q_0$  зависит и от рельефа, и от альбедо. При достаточно сложном рельефе, как на Луне, параметр  $q_0$  обращается в ноль, и закон распределения яркости по диску является функцией только параметра рельефа  $\nu$ .

Этим можно объяснить тот факт, что фактор гладкости лунных материков практически не зависит от длины волны, тогда как альбедо зависит существенно. Более того, в УФ-области спектра фактор гладкости оказался даже несколько больше, чем в красной. Очевидно, в формировании широтного распределения яркости Луны участвуют масштабы рельефа, вплоть до сравнимых с длиной волны.

Различия альбедо между морями и материками, очевидно, тоже вносят весьма незначительный вклад в широтную зависимость их яркости, а меньшее значение фактора гладкости для морей объясняется преимущественно тем, что степень переработки морского материала экзогенными процессами значительно меньше, чем материкового.

1. Акимов Л. А. Исследование закона отражения света лунной поверхностью: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Харьков, 1988.—206 с.—Машинопись.
2. Акимов Л. А. Отражение света Луной. I // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 1.—С. 3—10.

3. Акимов Л. А., Великодский Ю. И., Корохин В. В. Зависимость яркости лунных материков от фотометрической широты // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 4.—С. 304—309.
4. Белецкий С. А., Корохин В. В., Великодский Ю. И. Система <IRIS> как инструмент исследователя // Применение персональных компьютеров в научных исследованиях и учебном процессе: Материалы 3-й конф. — Харьков, 1998.—С. 25.
5. Корохин В. В., Акимов Л. А., Марченко Г. П., Стародубцева О. М. Наблюдения Юпитера, Луны и Солнца с помощью линейного ПЗС-приемника // Астрон. вестник.—1993.—27, № 3.—С. 56—64.
6. Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические свойства поверхностного слоя Луны // Астрон. журн.—1971.—48, вып. 1.—С. 172—183.
7. Шкуратов Ю. Г. Фрактоиды и фотометрия твердых поверхностей небесных тел // Астрон. вестник.—1995.—29, № 6.—С. 483—496.
8. Harke V. Bidirectional reflectance spectroscopy. 3. Correction for macroscopic roughness // Icarus.—1984.—59, № 1.—P. 41—59.
9. Shkuratov Yu. G., Starukhina L. V., Kreslavsky M. A., et al. Principle of undulatory invariance on photometry of atmosphereless celestial bodies // Icarus.—1994.—109, N 1.—P. 168—190.

Поступила в редакцию 15.02.2000