

УДК 523.3

## КАРТИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ВИДИМОГО ПОЛУШАРИЯ ЛУНЫ

© 2009 г. В. Г. Кайдаш, С. Ю. Герасименко, Ю. Г. Шкуратов,  
Н. В. Опанасенко, Ю. И. Великодский, В. В. Корохин

НИИ астрономии Харьковского национального университета  
им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 03.07.2008 г.

В течение двух лунаций на Майданакской высокогорной обсерватории (Узбекистан) выполнена телескопическая съемка видимого полушария Луны с использованием цифровых камер на базе КМОП-детекторов. С помощью метода фазовых отношений для длины волны 0.52 мкм выполнено картирование наклона крутизны фазовой функции лунной поверхности для различных диапазонов фазовых углов. Показано, что при последовательном уменьшении фазового угла корреляция наклона фазовой функции с альбедо исчезает, а затем и меняет знак при малых фазовых углах.

PACS: 95.75.De, 96.20.-n

### ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие излучения с веществом реголита включает в себя различные физические явления – такие, как однократное рассеяние, некогерентное межчастичное рассеяние, взаимозатенение частиц реголита, когерентное усиление обратного рассеяния при многократном рассеянии. Оптическая прозрачность реголитовых частиц и структура реголита (в масштабах от длины волны до элемента разрешения имеющихся данных) контролируют относительный вклад вышеназванных явлений в отраженное излучение (Нарке, 1993; 2002). Таким образом, наблюдаемые вариации фотометрических свойств могут дать информацию о структуре реголита.

Для описания вариаций яркости  $B$  поверхности планеты вводят фотометрическую функцию  $F$ , такую, что  $B(i, \epsilon, \phi) = B_0 F(i, \epsilon, \phi)$ , где  $i, \epsilon$  – углы падения и отражения, соответственно, а  $\phi$  – азимутальный угол (угол между плоскостями падения и отражения). Здесь  $B(i, \epsilon, \phi)$  – яркость поверхности при произвольной геометрии освещения/наблюдения, а  $B_0$  – яркость при некоторой “стандартной” геометрии, например, полагают  $B_0 = B(0, 0, 0)$ .

В фотометрии часто более удобным оказывается другой набор углов, описывающих геометрию съемки. Таковыми являются фотометрическая долгота  $\gamma$ , фотометрическая широта  $\beta$  и фазовый угол  $\alpha$ . Эти углы образуют систему фотометрических координат. Связь между  $(i, \epsilon, \phi)$  и  $(\alpha, \beta, \gamma)$  выражается следующими известными формулами (Нарке, 1993):

$$\left. \begin{aligned} \cos \gamma &= \cos \epsilon / \cos \beta \\ \cos \alpha &= \cos i \cos \epsilon + \sin i \sin \epsilon \cos \phi \\ \cos \beta &= \sqrt{\frac{(\sin(i + \epsilon))^2 - \left(\cos \frac{\phi}{2}\right)^2 \sin 2\epsilon \sin 2i}{(\sin(i + \epsilon))^2 - \left(\cos \frac{\phi}{2}\right)^2 \sin 2\epsilon \sin 2i + (\sin \epsilon)^2 (\sin i)^2 (\sin \phi)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и

$$\left. \begin{aligned} \cos i &= \cos \beta \cos(\gamma - \alpha) \\ \cos \epsilon &= \cos \beta \cos \gamma \\ \cos \phi &= \frac{\cos \alpha - \cos i \cos \epsilon}{\sin i \sin \epsilon} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для удобства исследования функции  $F(\alpha, \beta, \gamma)$  зависимость яркости поверхности от фотометрических координат представляют в виде следующего произведения (Нарке, 1993):

$$B(\alpha, \beta, \gamma) = B_0 f(\alpha) D(\alpha, \beta, \gamma), \quad (3)$$

где  $f(\alpha)$  представляет собой фазовую функцию, а  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  – дисковую функцию. Под фазовой функцией понимают зависимость яркости участков лунной поверхности от фазового угла без учета положения этих участков на лунном диске. Дисковая функция описывает распределение яркости по лунному диску при данном фазовом угле и связана со сферичностью Луны. Для наземных телескопических наблюдений Луны при больших фазовых углах фотометрические координаты  $\beta, \gamma$  близки к селенографической широте и долготе с точностью до либрации. Таким образом, наземная телескопическая фотометрия Луны дает возможности изучать региональные вариации зависимости  $f(\alpha)$ , в то время как исследования вариаций дисковой функции для произвольных точек лунного диска практически не представляются возможными. Глобальная зависимость дисковой функции от фотометрических координат по наземным телескопическим данным изучалась в (Акимов и др., 1999; 2000; Великодский, 2002).

Исследования фазовой зависимости  $f(\alpha)$  были начаты еще 100 лет назад. Так, изучение эффекта сильного обратного рассеяния Луны было начато в (Barabashev, 1922; van Diggelen, 1964; Gehrels и др., 1964). Первые исследования распределений параметров фазовой зависимости яркости Луны были предприняты в (Wildey, 1978; Акимов, Шкуратов, 1981). В этих работах нашел применение метод фазовых отношений, в котором предлагается рассматривать частное двух изображений Луны, полученных при различных фазовых углах. Таким образом, вариации альбеда на частном будут подавлены, что дает возможность извлечь информацию о собственно фотометрической функции поверхности. Так, в работе (Акимов, Шкуратов, 1981) было построено фазовое отношение  $f(3.2^\circ)/f(14.5^\circ)$  в двух длинах волн. Этот метод получил новое развитие при начале широкого применения цифровых методов регистрации и обработки астрономических изображений. Анализ серии фазовых отношений  $f(1^\circ)/f(6^\circ)$ ,  $f(6^\circ)/f(12^\circ)$  и  $f(12^\circ)/f(96^\circ)$ , полученных в работе (Shkuratov и др., 1994), показал, что региональные вариации фазовой зависимости связаны с альбедами и шероховатостью лунной поверхности. Другой подход был применен в работе (Корохин, Акимов, 1997). По набору 8 изображений Луны, полученных при углах фазы от  $8^\circ$  до  $38^\circ$  как до, так и после полнолуния, были построены карты параметров фазовой функции, аппроксимируемой экспонентой, причем с автоматическим учетом локальных наклонов рельефа.

В ходе космических миссий к Луне и планетам были получены новые фотометрические данные, что дало возможность применить метод фазовых отношений к снимкам высокого разрешения. Опозиционный эффект (нелинейное возрастание

яркости при малых фазовых углах) по данным КА Clementine изучался в работах (Buratti и др., 1996; Shkuratov и др., 1999; Kreslavsky и др., 2000). Было показано, что амплитуда опозиционного эффекта зависит от длины волны и типа поверхности. В (Kreslavsky, Shkuratov, 2003) были изучены районы, обладающие аномальными фотометрическими свойствами, такие, как зоны выбросов вокруг некоторых кратеров и участки с повышенной шероховатостью реголита. Метод фазовых отношений применялся также для исследований галилеевых спутников Юпитера (Helfenstein и др., 1998) и поверхности Марса по данным миссии Mars Express (Kreslavsky и др., 2006).

В данной работе в продолжение (Акимов, Шкуратов, 1981; Shkuratov и др., 1994) мы представляем результаты картирования наклона фазовой функции Луны по наземным телескопическим данным в широком диапазоне фазовых углов.

## ФОТОМЕТРИЯ ЛУНЫ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВЫХ КАМЕР

Двухмесячная наблюдательная программа по фотометрии Луны (сентябрь–октябрь 2006 г., обсерватория Майданак, Узбекистан) была проведена с использованием харьковских 15-см рефрактора и 50-см рефлектора. В качестве приемников излучения использовались цифровые камеры Canon моделей EOS 300D и EOS 350D, оснащенные КМОП-матрицами размером 6 и 8 мегапикселей, соответственно. Спектральная чувствительность этих матриц обеспечивается специфической повторяющейся “*rggb*” структурой пикселей, соответствующей трем широким спектральным полосам (*r*:  $\lambda_{\text{eff}} = 0.63$  мкм, *g*:  $\lambda_{\text{eff}} = 0.52$  мкм, *b*:  $\lambda_{\text{eff}} = 0.48$  мкм). Это значит, что существует возможность одномоментной съемки Луны в трех спектральных диапазонах. Съемка проводилась в режиме RAW, т.е. с отключением аппаратной предобработки значений пикселей. В этой работе мы используем данные, полученные камерой EOS 300D на 15-см рефракторе. В рамках программы наблюдений камерой 300D было получено около 20000 изображений в широком диапазоне фазовых углов ( $1.5^\circ$ – $165^\circ$ ). Эффективное угловое разрешение изображений составляет 1.91 угл. с/пиксел в каналах *r* и *b*, и 1.35 угл. с/пиксел в канале *g*.

К преимуществам использования цифровых камер с КМОП-матрицами следует отнести отсутствие характерного для ПЗС-приемников блюминга, т.е. распыливания изображения из-за перетекания заряда в соседние ячейки фотоприемника. Спектральный ход альбеда Луны и различия в чувствительности *r*, *g* и *b* пикселей используемых матриц приводят к необходимости съемки серий кад-

ров с различной экспозицией, с тем, чтобы наиболее эффективно использовать динамический диапазон камеры (12 бит = 4096 отсчетов) в различных спектральных каналах. При этом приходится сталкиваться с насыщением  $g$  пикселей при оптимальном выборе экспозиции в  $r$  и  $b$  диапазонах, и антиблэминг КМОП-камер позволяет в этом случае эффективно использовать всю “непересвеченную” площадь фотоприемника. Еще одним важным фактором является необходимость быстрой последовательной съемки серий кадров, что обеспечивает получение изображений лунного диска с “замороженной” атмосферой. Используемый интерфейс позволяет при характерных экспозициях 1/100–1/10 с получать короткие серии изображений размером 6 мегапикселей ( $3088 \times 2056$  пикселей) с частотой  $\sim 2$  Гц, что дает возможность накапливать сигнал для избавления от пуассоновского шума отдельных пикселей.

К недостаткам КМОП-приемников относят большие по сравнению с ПЗС отклонения от линейности. В связи с этим нами были предприняты измерения фотометрической нелинейности с использованием оптической скамьи и стабильного источника света при варьировании расстояния от источника до камеры. Показано, что отклонения от линейности составляют  $< 3\%$  в диапазоне сигналов 0–3000 единиц, однако достигают 15% при отсчетах  $\sim 4000$ . Таким образом, в дальнейшем мы использовали для наблюдений только диапазон отсчетов 0–3000 единиц с учетом коррекции за нелинейность в этом диапазоне. Также в серии экспериментов со стабильным источником света нами показано, что существуют отклонения времени экспозиции отдельных кадров от значений, фиксируемых процессором камеры. Эти отклонения достигают 5%, но являются стабильными во времени (Velikodsky и др., 2008).

Далее нами была исследована фотометрическая точность камеры. Оказалось, что дисперсия значений единичного пикселя хорошо подчиняется следующему закону:

$$[\sigma(S)]^2 = 0.105S + 3.42, \quad (4)$$

где  $S$  – отсчет в данном пикселе изображения. Первое слагаемое в уравнении (4) – шум фотоэлектронных, подчиняющийся пуассоновской статистике, второе – темновой шум. Это значит, что, например, для сигнала  $S \sim 1000$  единиц среднеквадратичное отклонение  $\sigma(S) \sim 1\%$ .

Сравнение измерений плоского поля в системе камера-телескоп по изображениям дневного неба и по серии изображений Луны, смещенным в поле зрения друг относительно друга, показало наличие рассеянного света в телескопе. Это явление приводит к паразитному фону на изображениях с трендом

от центра к краю поля зрения  $\sim 5\%$ . На основе этих данных мы разработали двухступенчатый алгоритм компенсации плоского поля: 1) учет высокочастотных деталей (пылинки на матрице) по изображениям дневного неба для даты наблюдений, 2) компенсация низкочастотного колоколообразного фона по серии изображений Луны (Velikodsky и др., 2008).

Итак, алгоритм обработки наблюдательных данных состоит из: 1) вычитания электрического нуля (индивидуально для каждого кадра по затененной области КМОП-детектора), 2) учета постоянного смещения сигнала (BIAS), 3) коррекции за нелинейность, 4) деления на плоское поле, 5) коррекции “плохих” пикселей. После перечисленных процедур данные готовы для перехода в единую пространственную проекцию и совмещения с целью фотометрических исследований.

### УЧЕТ ДИСКОВОЙ ФУНКЦИИ И ПЕРЕВОД ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЕДИНУЮ ПРОЕКЦИЮ

В методе фазовых отношений для изучения берут частное двух изображений лунного диска, полученных при различной геометрии освещения/наблюдения. Из (3) следует, что

$$\frac{f(\alpha_1)}{f(\alpha_2)} = \frac{B(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) D(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)}{B(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2) D(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)}. \quad (5)$$

Чтобы исследовать фазовую функцию по отношению  $f(\alpha_1)/f(\alpha_2)$ , необходимо привести измерения к некоторой стандартной геометрии, определяемой только фазовым углом; при этом становится возможным корректное сопоставление фотометрических измерений отдельных участков лунного диска. Для этих целей полезно использовать понятие эквигонального альbedo (Акимов, 1988), которое соответствует условию “зеркальной геометрии” освещения/наблюдения, когда нормаль рассеивающей поверхности лежит в плоскости рассеяния, содержащей падающий и отраженный лучи. В этом случае для любой точки лунного диска справедливо:

$$\begin{cases} (i, \varepsilon, \varphi) = (\alpha/2, \alpha/2, \pi) \\ (\alpha, \beta, \gamma) = (\alpha, 0, \alpha/2). \end{cases} \quad (6)$$

Практически, изображение, отвечающее эквигональному альbedo, отличается от изображения видимого альbedo при том же фазовом угле отсутствием хода яркости от лимба к терминатору (Корохин и др., 2007). Для вычисления дисковой функции необходимо аппроксимировать долготно-широтную зависимость путем учета закона распределения яркости по диску Луны. В нашей работе в качестве

такого закона мы используем следующую эмпирическую формулу (Акимов, 1988):

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = \cos(\alpha/2) \frac{[\cos(\gamma - \alpha/2)]^{v\alpha+1} - [\sin(\alpha/2)]^{v\alpha+1}}{(1 - [\sin(\alpha/2)]^{v\alpha+1}) \cos \gamma} (\cos \beta)^{v\alpha}. \quad (7)$$

Эта формула содержит всего один эмпирический параметр – так называемый фактор гладкости  $v$ , и удовлетворительно описывает долготно-широтную зависимость яркости лунной поверхности как для наземных (Великодский, 2002), так и космических фотометрических данных (Shkuratov и др., 1999; Kreslavsky и др., 2000). Детальное исследование функции  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  показало, что наиболее эффективное устранение хода яркости лимб–терминатор происходит при значениях параметра  $v \approx 0.1-0.3$  (Великодский, 2002). Напомним, что  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  является медленно меняющейся функцией фотометрических координат, поэтому варьирование  $v$  в указанном диапазоне приводит к небольшому изменению глобального тренда лимб–терминатор, для соседних точек лунного диска вариации функции (7) малы.

Отметим, что Акимовым была предложена также модель дисковой функции, вообще не имеющая свободных параметров. В этой модели поверхность небесного тела полагается “предельно шероховатой”, когда дополнительное крупномасштабное изменение уже существующего мезорельефа не в состоянии изменить относительное распределение яркости по диску планеты (Акимов, 1988). Эта же функция без параметров может быть получена для фракталоподобных поверхностей (Shkuratov, 1995):

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = \cos\left[\frac{\pi}{\pi - \alpha}\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right)\right] \cos(\alpha/2) \frac{1}{\cos \gamma} (\cos \beta)^{\alpha/(\pi - \alpha)}. \quad (8)$$

Функция (8) удовлетворительно описывает распределение яркости по диску планеты; в области малых фазовых углов она несколько лучше компенсирует возрастание яркости на лимбе видимого диска, чем функция (7). Легко видеть, что при условиях (6) функции (7) и (8) обращаются в  $D(\alpha, \beta, \gamma) \equiv 1$ , что и является условием нормировки для перехода в систему эквигонального альбеда.

Для достижения высокой фотометрической точности в задачах, где сравниваются несколько изображений, важно тщательно выполнить их селенографическую привязку и совмещение; это касается изображений, полученных как квазиодновременно (последовательная серия), так и по истечении нескольких лунаций. Для такой привязки и перевода изображений в единую ортографическую проекцию нами была выбрана координатная систе-

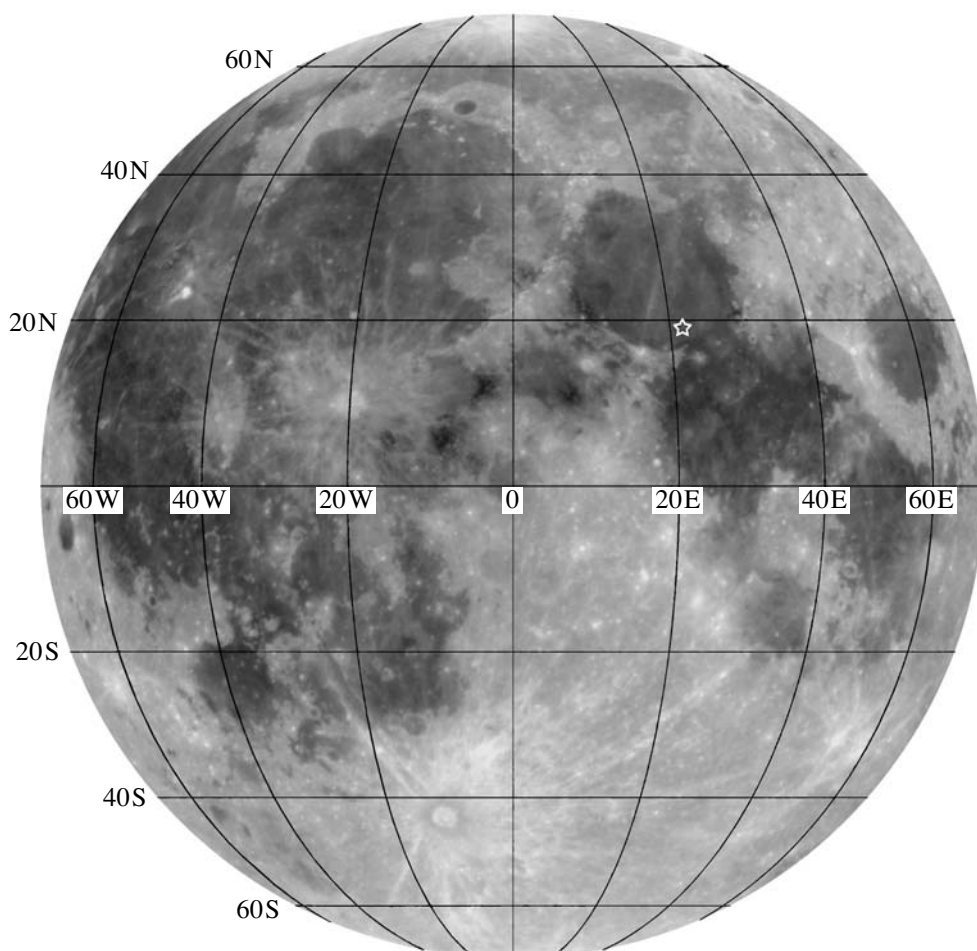
ма UVVIS мозаик КА Clementine, базирующаяся на селенодезической сети CLCN (Clementine Lunar Control Network) (Isbell и др., 1999). Использование этой системы позволяет в будущем провести сравнение наших изображений и данных, полученных КА Clementine.

Съемка сквозь турбулентную атмосферу связана с необходимостью учета быстропеременных ( $\sim 1-2$  с) искажений волнового фронта с минимальным угловым размером  $\sim 10''-20''$ . Также сравнение последовательных снимков в серии показывает наличие крупномасштабных неоднородностей атмосферы ( $3'-5'$ ), сдвигающих и дефокусирующих в фокальной плоскости отдельные части изображения лунного диска. Аналогично, сравнение изображений в разные даты приводит к необходимости учета их качества, в первую очередь фактического углового разрешения.

Для учета турбулентности атмосферы при детальном совмещении изображений нами была разработана специальная процедура совмещения, основанная на поиске максимума корреляции между фрагментами совмещаемых изображений. Результатом работы этого алгоритма является поле относительных сдвигов фрагментов, которое затем используется для окончательного совмещения сравниваемых изображений. Варьируя параметры алгоритма совмещения, мы учитываем мало- и крупномасштабные атмосферные искажения. Различия реального углового разрешения изображений мы компенсировали приведением разрешения всех сравниваемых изображений к наихудшему с помощью свертки с двумерным гауссовым ядром, зависящим от разницы разрешений. На рис. 1 представлено изображение лунного диска в ортографической проекции для фазового угла  $2^\circ$ , полученное камерой Canon 300D (длина волны  $0.52$  мкм). Изображение переведено в систему эквигонального альбеда поэлементным делением отсчетов на функцию (8), рассчитанную для каждой точки лунного диска на момент наблюдений.

## КАРТИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО НАКЛОНА

Средняя фазовая кривая лунной поверхности  $f(\alpha)$  показывает возрастание фазовой функции с уменьшением фазового угла. Амплитуда оппозитного пика в диапазоне фазовых углов  $0.2^\circ-10^\circ$  составляет  $\sim 60\%$  для длины волны  $\lambda = 0.42$  мкм (Шкуратов и др., 2003). Отличия фазовой функции для отдельных участков лунной поверхности от средней



**Рис. 1.** Изображение эквигонального альбеда для фазового угла  $2^\circ$  (длина волны 0.52 мкм) в ортографической проекции. Звездочкой указана область, использованная для калибровки фазовых отношений.

зависимости зависят от особенностей структуры лунной поверхности. Для различных диапазонов изменения угла  $\alpha$  преимущественную роль в формировании фазовой кривой играют разные масштабы структуры реголита. Так, при малых фазовых углах  $\alpha \leq 4^\circ$  для светлых участков может давать вклад когерентное усиление обратного рассеяния (Shkuratov и др., 1999). При фазовых углах  $\alpha \leq 40^\circ - 50^\circ$  большее влияние оказывает теневой эффект на неоднородностях порядка среднего размера частиц реголита ( $\sim 100$  мкм). В этом диапазоне фазовых углов наблюдается зависимость фазовой функции от альбеда поверхности, связанная с частичной засветкой теней из-за прозрачности частиц реголита (Корохин и др., 2007). При дальнейшем увеличении  $\alpha$  мезо- и макрорельеф также начинают заметно влиять на фазовую зависимость яркости (Шкуратов и др., 2003) и играть определяющую роль при больших  $\alpha$  (Корохин и др., 2007). Таким образом, по пространственным распределениям параметров фазовой

функции можно судить об особенностях структуры лунного реголита.

Как отмечалось ранее, на поэлементном частном (5) двух распределений яркости по лунному диску вариации альбеда должны быть подавлены, а результирующее частное будет нести информацию о вариациях наклона фазовой зависимости яркости  $f(\alpha)$ . В реальной ситуации, кроме различий фазовых наклонов, на частное влияет рельеф поверхности, в значительной степени искажающий расчетные значения фотометрических углов, зависящих от локальных наклонов поверхности. Это делает невозможной интерпретацию полученного фазового наклона. Решением проблемы являлось бы использование данных о топографии Луны, однако существующие глобальные цифровые модели рельефа (Zuber и др., 1994, <http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/clementine/gravtopo.html>) обладают низким пространственным разрешением ( $\sim 200$  км) и не дают возможности использовать их для коррекции фотометрических углов. Таким об-

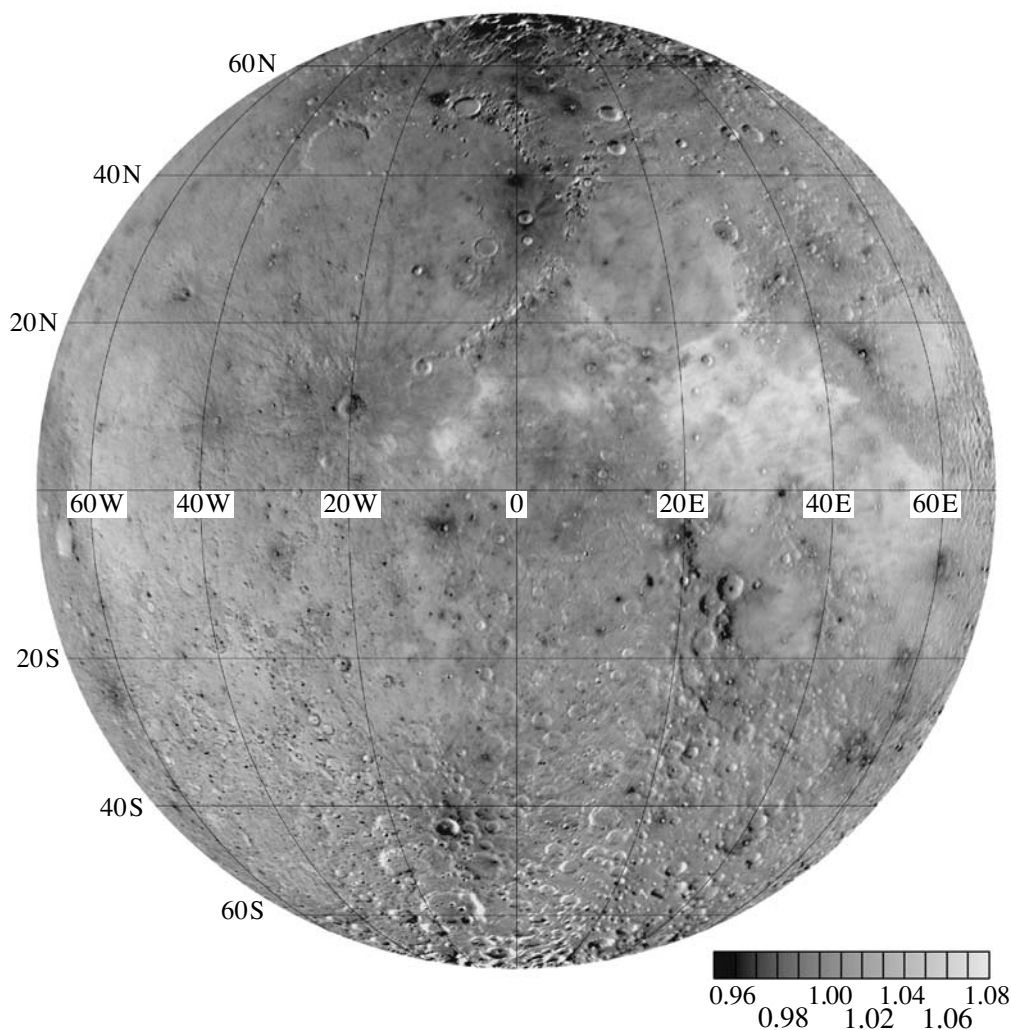


Рис. 2. Карта нормированного фазового отношения  $f(21^\circ)/f(46^\circ)$  для длины волны 0.52 мкм.

разом, в нашем случае надежная интерпретация результатов возможна для регионов с плоской топографией: поверхности морей, днища кратеров, затопленных лавой, и т.п. Собственный шум изображений, погрешности совмещения изображений, искаженных влиянием земной атмосферы, оставшиеся различия пространственного разрешения снимков также влияют на качество изображений фазового отношения.

Итак, для построения фазовых отношений мы усредняли серии (10–12 штук) последовательно полученных изображений при определенном фазовом угле. Затем мы переводили усредненные изображения яркости в систему эквигонального альбеда с использованием формул (7) и (8). Частное двух изображений эквигонального альбеда представляет собой фазовое отношение. На рис. 2 представлено распределение фазового отношения  $f(21^\circ)/f(46^\circ)$  для видимого полушария Луны. Это изображение получено путем “сшивания” изображений из двух при-

близительно одинаковых фазовых отношений для восточной и западной частей диска при противоположном направлении освещения (Gerasimenko и др., 2008). Более светлый тон соответствует большим значениям отношения  $f(21^\circ)/f(46^\circ)$ . Заметим, что детали с выраженной топографией (горные цепи, валы кратеров, тектонические разломы и т.п.) искажают фазовое отношение, которое в этом случае выглядит подобно освещенному рельефу. Изображение на рис. 2 характеризуется сравнительно слабым контрастом море/материк, хотя общая обратная корреляция альбеда и фазового наклона хорошо прослеживается. Поверхность самого темного Моря Спокойствия видна как регион с наибольшим фазовым наклоном. Выбросы из кратеров, формирующие яркие альбедные гало, проявляются как детали с наименьшей крутизной фазовой функции. Наши исходные данные не подвергались абсолютной фотометрической калибровке, поэтому все представленные в работе фазовые отношения бы-

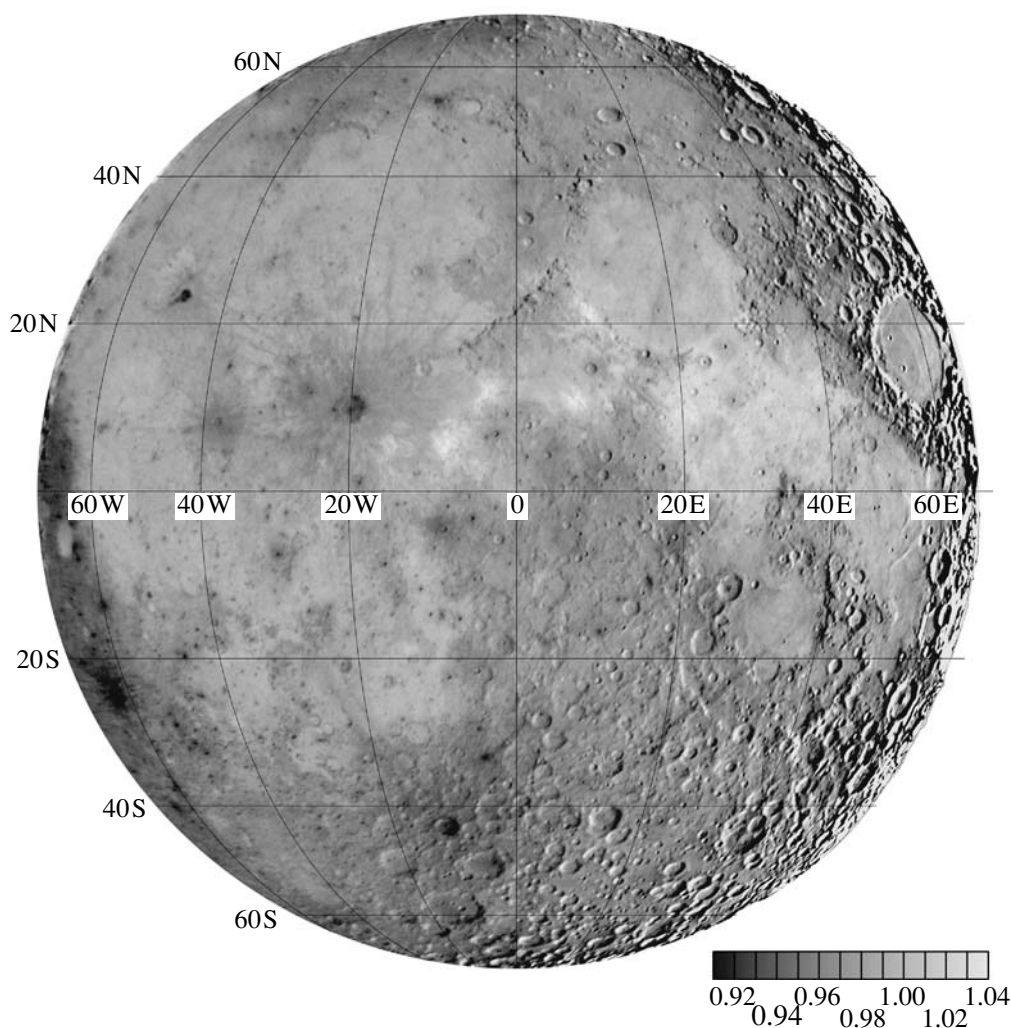


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для фазового отношения  $f(10^\circ)/f(23^\circ)$ .

ли нормированы на значение фазового наклона в небольшом фотометрически однородном участке на юге Моря Ясности (звездочка на рис. 1). Этот участок находится вблизи спектрофотометрического стандарта MS-2 (Pieters, 1986). Как видно из рис. 2, для фазового отношения  $f(21^\circ)/f(46^\circ)$  диапазон относительного изменения фазового наклона видимого полушария Луны составляет от  $-5\%$  до  $+8\%$ . Мы отмечаем, что отличия по фазовому наклону морей юго-западной части диска (Море Влажности, Море Облаков) от окружающего материка составляют менее  $1\%–2\%$  при значениях наклона  $\sim 1.03$ , в то время как для Моря Холода значения  $\sim 0.97$ .

Следующая карта фазового отношения  $f(10^\circ)/f(23^\circ)$  приведена на рис. 3. Мы отмечаем для этого фазового отношения такую же обратную зависимость фазового наклона от альбедо, как и на рис. 2, с наибольшими значениями относительного наклона ( $1.04$ ) для Моря Спокойствия. В то же вре-

мя Море Холода не отличается по фазовому наклону от морей Ясности и Дождей, а моря юго-западной части диска четко контрастируют с материковой поверхностью, в отличие от отношения  $f(21^\circ)/f(46^\circ)$ . Отличия по параметру фазового наклона от материка в западной части лимба ( $\sim 0.93$ ) составляет, по нашим данным, около  $7\%$ . По-прежнему, лучевые системы и выбросы кратеров дают низкие значения фазового наклона. Области плато Аристарха и холмов Мариуса характеризуются повышенными, по сравнению с окружающей морской поверхностью, значениями фазового наклона.

Наклон фазовой функции контролируется альбедо и теневым эффектом. Для ярких поверхностей теневой эффект оказывается ослабленным благодаря многократному рассеянию между частицами реголита и элементами микрорельефа. В результате наклон фазовой зависимости уменьшается. Таким образом, обратная зависимость фазового наклона от альбедо, наблюдаемая на отношениях

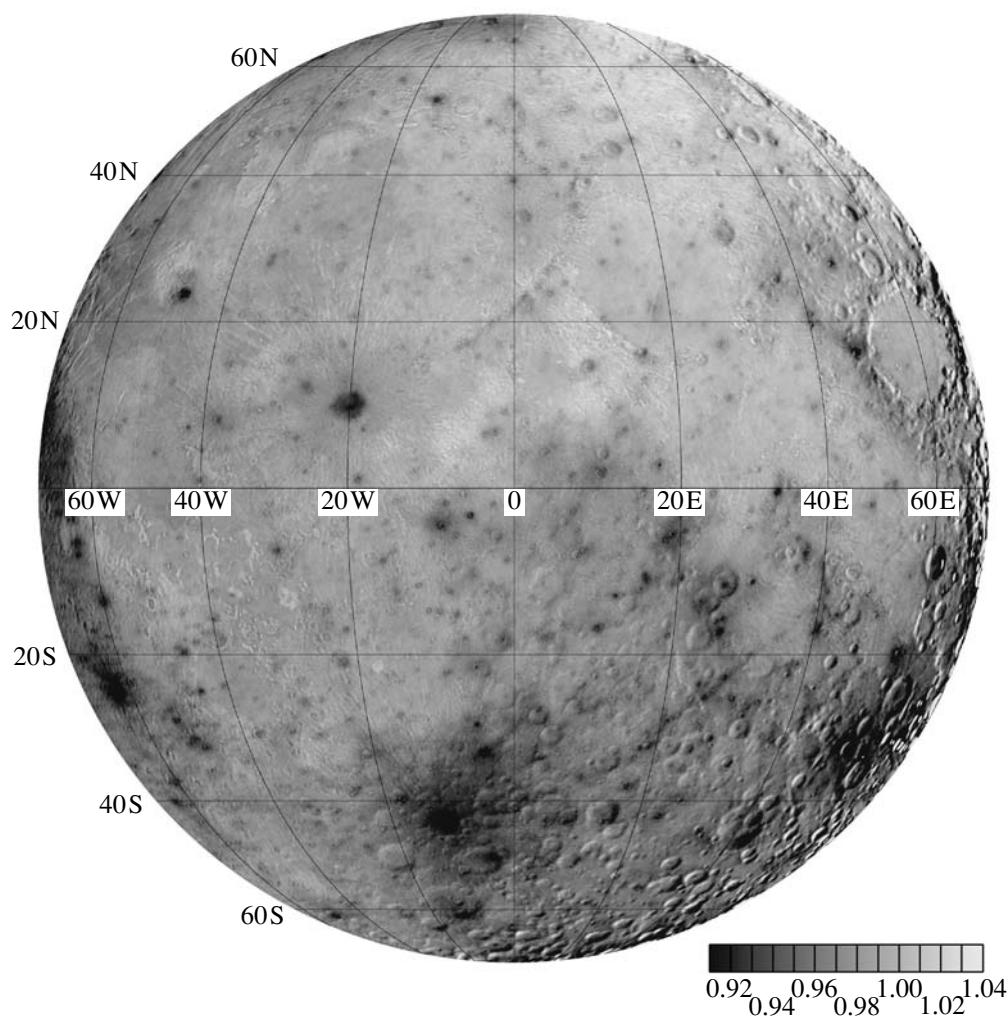


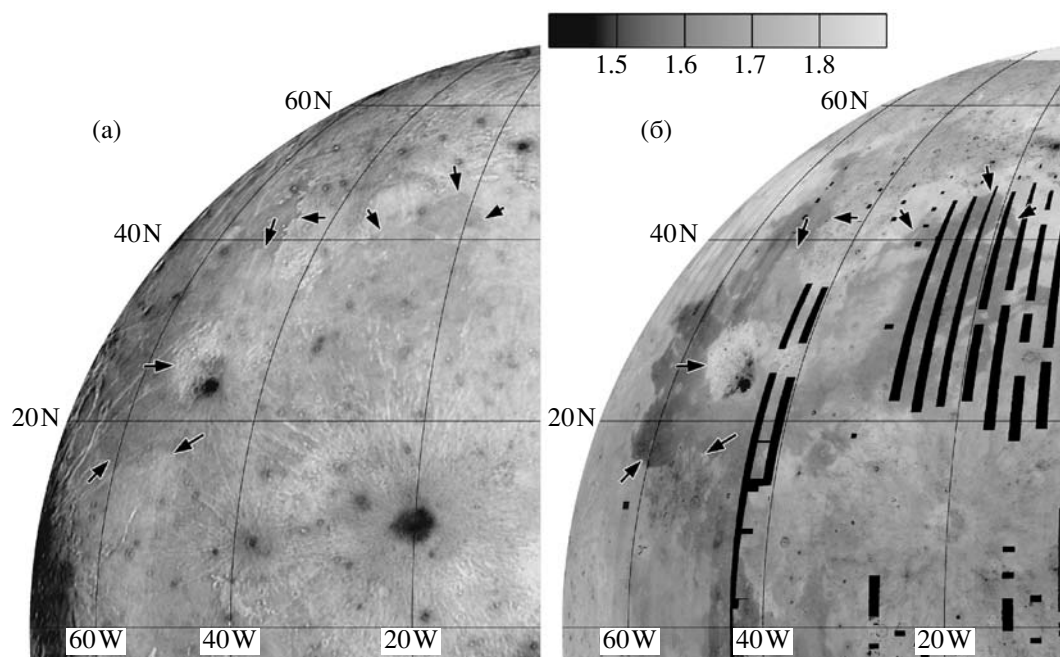
Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для фазового отношения  $f(2^\circ)/f(10^\circ)$ .

$f(21^\circ)/f(46^\circ)$  и  $f(10^\circ)/f(23^\circ)$ , может быть объяснена ослаблением теневого механизма при возрастании альбеда.

Дальнейшее продвижение в сторону малых фазовых углов ( $\leq 10^\circ$ ) существенно изменяет вид распределения фазового наклона для видимого полушария Луны. На рис. 4 мы представляем карту фазового отношения  $f(2^\circ)/f(10^\circ)$ . Напомним, что изображения, соответствующие фазовому углу  $2^\circ$ , переводились в систему эквигонального альбеда по формуле (8), тогда как остальные изображения из этой работы – по формулам (7). Основным отличием рис. 4 от приведенных выше фазовых отношений является практическое отсутствие (по уровню 0.01) контраста отдельных морских регионов, в частности морей Ясности, Спокойствия, восточной части Моря Дождей. В Океане Бурь и Море Дождей отчетливо видны области с пониженным фазовым наклоном. Таким образом, плато Аристарха и холмы Мариуса отчетливо видны на фоне темной

(меньшая крутизна фазовой функции) морской поверхности. Интересно, что границы указанных морских регионов с низким фазовым наклоном совпадают с цветовыми границами на распределении показателя цвета  $C_{RB} = C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ . На рис. 5 представлено сравнение нормированного фазового отношения  $f(2^\circ)/f(10^\circ)$  с распределением параметра  $C_{RB}$  для северо-западной части лунного диска. Карта показателя цвета построена по спектрофотометрическим данным КА Clementine (Eliason и др., 1999), стрелками указаны идентичные детали на картах фазового наклона и показателя цвета. Показатель  $C_{RB}$  широко используется как индикатор различий в химическом составе лунного реголита ( $C_{RB}$  уменьшается при возрастании содержания  $\text{TiO}_2$ ) (Charette и др., 1974; Lucey и др., 2000; Shkuratov и др., 2003). Таким образом, особенности распределения фазового наклона связаны с присутствием химически отличного материала в этих областях. Здесь, возможно, мы имеем де-





**Рис. 5.** Сравнение нормированного фазового отношения  $f(2^\circ)/f(10^\circ)$  (а) с распределением показателя цвета  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  (б) для северо-западной части лунного диска. Более светлому тону на рис. 5б соответствуют большие значения параметра  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ . Черные полосы в меридиональном направлении – отсутствие данных.

ло с различиями в гранулометрическом составе лавовых потоков различного возраста, сформировавших морскую поверхность. Отметим, что подобная связь фазового наклона с вариациями показателя цвета  $C_{RB}$  отмечалась ранее при анализе данных КА Clementine (Kreslavsky, Shkuratov, 2003). Также обращает на себя внимание высокий контраст море–материк для умеренных южных широт в западной части лимба. Значения относительного фазового наклона для материковой поверхности составляют здесь  $\sim 0.93$ , что сравнимо со значениями для кратеров и лучевых систем (см. рис. 4), представляющих сравнительно более крупнозернистый материал с низкой степенью зрелости.

Тенденцию к исчезновению контраста море–материк на распределении фазового наклона подтверждает карта фазового отношения  $f(2^\circ)/f(5^\circ)$ , представленная на рис. 6. Мы отмечаем отсутствие глобальных различий в фазовом наклоне между морями восточной части диска и южным материком. Море Влажности и южная часть Океана Бурь на карте фазового наклона показывают даже инверсию контраста море–материк, т.е. признаки прямой корреляции фазового наклона с альбедо. Возможно, это обусловлено вкладом эффекта когерентного усиления обратного рассеяния (Shkuratov и др., 1999). В то же время лучевая система Тихо и крупные материковые кратеры по-прежнему

показывают относительно низкий фазовый наклон на уровне 3%–4% ниже, чем у морского участка MS-2. Это может быть связано с тем, что пик когерентного рассеяния становится уже  $2^\circ$  благодаря большему размеру частиц в зонах выбросов молодых кратеров и, потому, не оказывает влияния на фазовое отношение  $f(2^\circ)/f(5^\circ)$ . Цветовые границы в Море Дождей и Океане Бурь менее выражены по сравнению с рис. 4–5.

Таким образом, зависимость наклона фазовой функции от альбедо для малых фазовых углов является немонотонной. Такое поведение фазовой функции было найдено по ранним телескопическим наблюдениям Луны и лабораторным измерениям порошкообразных образцов (Shkuratov и др., 1992). Зависимость фазового наклона от альбедо имеет подковообразную форму и фазовый наклон оказывается максимальным для поверхности со средним альбедо. Для поверхностей со средним или низким альбедо форма индикатрисы рассеяния одной частицы может влиять на фазовую функцию поверхности непосредственно, через однократное рассеяние (Kreslavsky, Shkuratov, 2003). Этот вывод согласуется с тем, что для лунной поверхности в диапазоне малых фазовых углов  $\leq 10^\circ$  вариации фазового наклона формируются в ходе рассеяния на масштабах порядка размера частиц реголита.

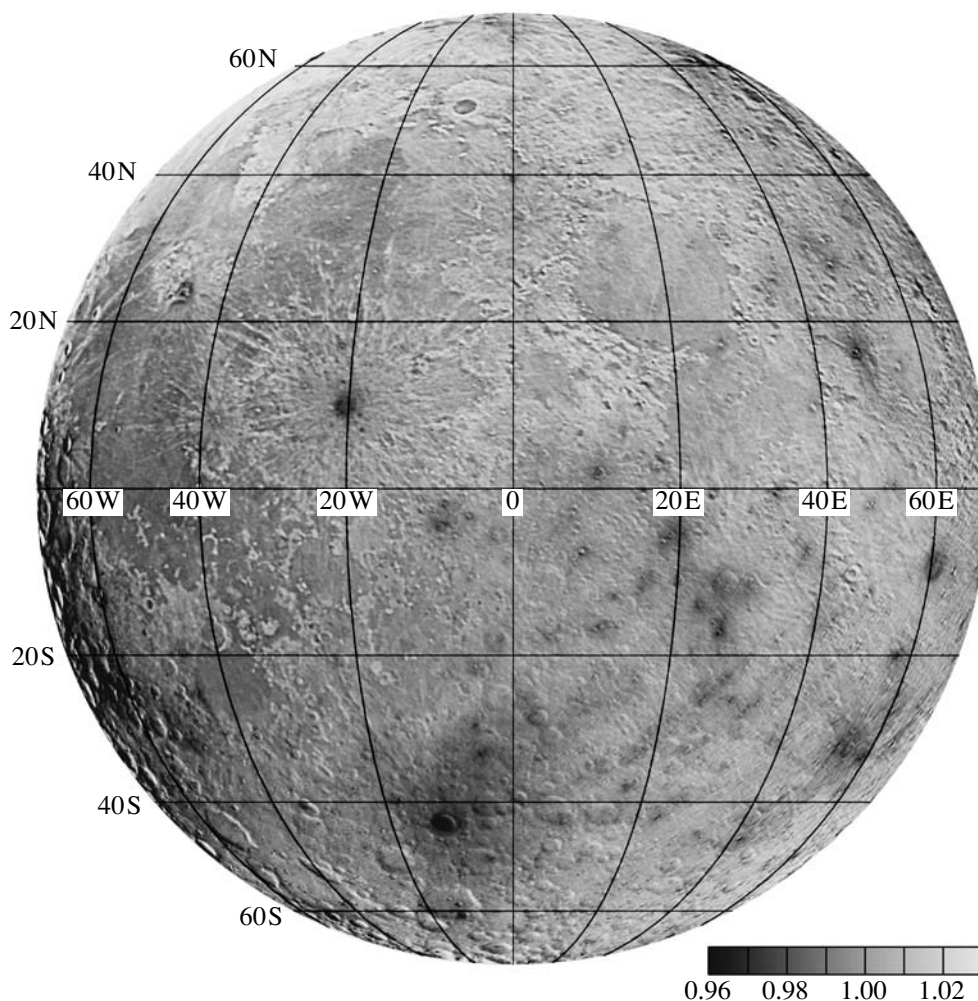


Рис. 6. То же, что на рис. 2, но для фазового отношения  $f(2^\circ)/f(5^\circ)$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены карты относительного наклона фазовой функции в диапазоне  $2^\circ$ – $40^\circ$  на длине волны 0.52 мкм для видимого полушария Луны. Карты построены по результатам наземной телескопической съемки с использованием в качестве фотоприемника цифровой камеры на основе КМОП-матрицы. Анализ полученных распределений подтверждает гипотезу о влиянии различных масштабов структуры поверхности на фазовую зависимость яркости. Вариации фазового отношения в диапазоне малых фазовых углов  $\leq 10^\circ$  контролируются преимущественно неоднородностями реголита, сравнимыми с размером реголитовых частиц. В области фазовых углов  $10^\circ$ – $40^\circ$  влияние на крутизну фазовой функции оказывает теневой эффект, зависящий от мезорельефа поверхности. Ослабление теневого эффекта из-за роста вклада многократного рассеяния при увеличе-

нии альbedo дает наблюдаемую антикорреляцию фазового наклона с альbedo. Найденные особенности распределения фазового наклона в диапазоне  $2^\circ$ – $10^\circ$ , связанные с присутствием химически разнородного материала, могут указывать на различия в гранулометрическом составе реголита, принадлежащего лавовым потокам различного возраста и химического состава.

Работа проведена при поддержке фонда CRDF (грант UKP2-2897-KK-07).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Л.А. Отражение света Луной. I // Кинемат. и физ. небес. тел. 1988. Т. 4. № 1. С. 3–10.
- Акимов Л.А., Великодский Ю.И., Корохин В.В. Зависимость яркости лунных материков от фотометрической широты // Кинемат. и физ. небес. тел. 1999. Т. 15. № 4. С. 304–309.

- Акимов Л.А., Великодский Ю.И., Корохин В.В. Зависимость широтного распределения яркости по диску Луны от альbedo и рельефа // Кинемат. и физ. небес. тел. 2000. Т. 16. № 2. С. 181–187.
- Акимов Л.А., Шкуратов Ю.Г. Распределение фазового градиента яркости по лунной поверхности в двух участках спектра. Предварительные исследования // Астрон. циркуляр. 1981. № 1167. С. 3–6.
- Великодский Ю.И. Влияние альbedo и рельефа на закон распределения яркости по диску Луны // Дисс. канд. физ.-мат. наук. Харьков. 2002. 152 с. <http://www.univer.kharkov.ua/astron/dslpp/moon/disser/velikodsky/index.html>
- Корохин В.В., Акимов Л.А. Картирование фазовой зависимости яркости лунной поверхности // Астрон. вестн. 1997. Т. 31, № 2. С. 143–152.
- Корохин В.В., Великодский Ю.И., Шкуратов Ю.Г., Маль У. Исследование фазовой зависимости яркости и цвета лунной поверхности по данным интегральной фотометрии // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 1. С. 1–9.
- Шкуратов Ю.Г., Креславский М.А., Станкевич Д.Г. и др. Миссия SMART-1: фотометрические исследования Луны с помощью камеры AMIE // Астрон. вестн. 2003. Т. 37. № 4. С. 1–10.
- Barabashev N.P. Bestimmung der Erdalbedo und des Reflexions gesetztes für die Oberfläche der Mondmeere: Theorie der Rillen // Astron. Nachr. 1922. V. 217. P. 445–452.
- Buratti B.J., Hillier J.K., Wang M. The lunar opposition surge: Observation by Clementine // Icarus 1996. V. 124. P. 490–499.
- Charette M., McCord T., Pieters C., Adams J. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 1605–1613.
- Eliason E., Isbell C., Lee E., et al. Mission to the Moon: The Clementine UVVIS Global Lunar Mosaic // PDS Volumes USA\_NASA\_PDS\_CL\_4001 through 4078, produced by the U.S. Geological Survey and distributed on CD media by the Planetary Data System. 1999.
- Gehrels T., Coffen T., Owings D. Wavelength dependence of polarization. III. The lunar surface // Astron. J. 1964. V. 69. P. 826–852.
- Gerasimenko S., Kaydash V., Shkuratov Yu., et al. Global search for photometric anomalies of lunar nearside // Abstr. Conf. “Solar System Bodies: From Optics to Geology”. 2008. P. 40–41.
- Hapke B. Theory of reflectance and emittance spectroscopy. Cambridge Univ. Press, 1993. 450 p.
- Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy. 5. Coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering // Icarus. 2002. V. 157. P. 523–534.
- Helfenstein P., Currier N., Clark B., et al. Galilean observation of Europa’s opposition effect // Icarus. 1998. V. 135. P. 41–63.
- Isbell C.E., Eliason E.M., Adams K.C., et al. Clementine: A Multi-Spectral Digital Image Model Archive of the Moon // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXX. LPI. 1999. Abstract #1812.
- Kreslavsky M.A., Shkuratov Y.G., Velikodsky Y.I., et al. Photometric properties of the lunar surface derived from Clementine observations // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 20281–20295.
- Kreslavsky M.A., Shkuratov Y.G. Photometric anomalies of the lunar surface: Results from Clementine data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № E3. P. 5015. doi: 10.1029/2002JE001937
- Kreslavsky M.A., Bondarenko N.V., Pinet P.C., et al. Mars Express HRSC Co-Investigator Team. Mapping of photometric anomaly of Martian surface with HRSC data // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXVII. 2006. Abstract #2211.
- Lucey P.G., Blewett D.T., Jolliff B.L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet–visible images // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 20297–20306.
- Pieters C.M. Composition of the lunar highland crust from near-infrared spectroscopy // Rev. Geophys. 1986. V. 24. № 3. P. 557–578.
- Shkuratov Y.G., Opanasenko N.V., Kreslavsky M.A. Polarimetric and photometric properties of the Moon: Telescope observation and laboratory simulation. 1. The negative polarization // Icarus. 1992. V. 95. P. 283–299.
- Shkuratov Y., Starukhina L., Kreslavsky M., et al. Principle of undulatory invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies // Icarus. 1994. V. 109. P. 168–190.
- Shkuratov Yu.G. Fractoids and photometry of solid surfaces of celestial bodies // Sol. Syst. Res. 1995. V. 29. P. 421–432.
- Shkuratov Y., Kreslavsky M., Ovcharenko A., et al. Opposition effect from Clementine data and mechanisms of backscatter // Icarus. 1999. V. 141. P. 132–155.
- Shkuratov Yu.G., Stankevich D.G., Kaydash V.G., et al. Composition of the lunar surface as will be seen from SMART-1: A simulation using Clementine data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № E4. doi: 10.1029/2002JE00197103.
- van Diggelen J. The radiance of lunar objects near opposition // Planet. and Space Sci. 1964. P. 13271–13279.
- Velikodsky Yu.I., Opanasenko N.V., Akimov L.A., et al. Absolute photometry of the lunar surface // Abstr. Conf. “Solar System Bodies: From Optics to Geology”. 2008. P. 126–127.
- Wildev R.L. The Moon in Heiligenschein // Science. 1978. V. 200. P. 1265–1266.
- Zuber M.T., Smith D.E., Lemoine F.G., Neumann G.A. The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission // Science. 1994. V. 266. P. 1839–1843.