

УДК 523.4

В. Г. Кайдаш¹, Ю. Г. Шкуратов^{1,2}, В. В. Корохин¹

¹ Научно-исследовательский институт астрономии

Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, Харьков

² Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ КАК МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ СТРУКТУРЫ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Представлен краткий обзор исследований нарушения изначальной структуры лунного грунта, вызванного как искусственными, так и природными факторами. Для выявления таких нарушений используются данные орбитальной фотометрии высокого разрешения в сочетании с методом фазовых отношений, который был разработан авторами. Метод дает возможность оценивать шероховатость светорассеивающей поверхности в масштабах меньше элемента разрешения изображения. Он, в частности, позволяет идентифицировать места осипей грунта на крутых склонах; он также является эффективным средством поиска новых кратеров, мест падения небольших комет или метеороидных роев. Надежность нового метода доказана детектированием фотометрических аномалий, связанных с изменениями структуры поверхностного слоя реголита в местах посадки космических аппаратов, т. е. там, где влияние человеческой деятельности на реголит Луны известно. Полученные результаты могут быть использованы при планировании и реализации космических миссий к Луне и других безатмосферных тел Солнечной системы космическими агентствами мира.

Ключевые слова: поверхность Луны, реголит, фотометрия, фотометрические аномалии.

ВВЕДЕНИЕ

Космические снимки Луны отображают распределение интенсивности света, рассеянного ее поверхностью. Это распределение описывается функцией яркости $B(\lambda, \alpha, x, y)$ в разных длинах волн λ при разных фазовых углах α , где x и y — координаты точки поверхности. Яркость зависит не только от геометрии освещения/наблюдения, но и от состава и структуры поверхности. Таким образом, измерения фазовых и спектральных зависимостей могут дать важную количественную информацию о Луне.

Есть ряд работ по картированию химико-минералогического состава поверхности Луны с помощью изображений, передающих распреде-

ление колориметрических отношений $C(\lambda_1/\lambda_2) = B(\lambda_1)/B(\lambda_2)$ в длинах волн λ_1 и λ_2 видимого и ближнего ИК-диапазонов [6, 16–18, 20, 25, 28]. Обзор колориметрических измерений был недавно сделан в нашей работе [24]. Здесь мы рассмотрим исследования фазовых отношений $B(\alpha_1)/B(\alpha_2)$, которые дают представления о нарушении первоначальной структуры лунного грунта, вызванного как искусственными, так и природными факторами [7–15, 23, 24, 26, 27, 30, 31]. Отметим, что метод фазовых отношений был впервые предложен, разработан и применен в Институте астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина; в настоящее время он начал применяться в работах других исследователей [1, 3, 19, 21].

С помощью карт фазовых отношений $B(\alpha_1)/B(\alpha_2)$ можно исследовать вариации шерохова-

© В. Г. КАЙДАШ, Ю. Г. ШКУРАТОВ, В. В. КОРОХИН, 2015

тости лунной поверхности, размеры которых меньше элемента разрешения изображения. Степень шероховатости оценивается с помощью измерений отражательной способности как функции фазового угла α , которая в довольно широком диапазоне фазовых углов неплохо описывается экспонентой вида $\exp(-\eta\sqrt{\alpha})$, где η — параметр, зависящий от шероховатости и альбедо поверхности. Фазовая функция яркости монотонно уменьшается с увеличением α . Крутизна такой фазовой функции (фазовой кривой) увеличивается с усилением эффекта затенений, который создается шероховатостями поверхности; он непосредственно влияет на яркость поверхности. Эта крутизна может быть разной в различных точках лунной поверхности.

Таким образом, по отношению двух изображений, полученных при различных углах фазы α , можно судить о вариации структуры исследуемой поверхности [30]. Детали лунной поверхности с необычной шероховатостью проявляются на картах фазовых отношений $B(\alpha_1)/B(\alpha_2)$ как аномальные. Этот метод является очень перспективным методом дистанционного зондирования не только Луны, но и других небесных тел без атмосферы, и даже может применяться для исследования земной поверхности [19]. В случае Луны с его помощью обнаружены фотометрические аномалии в Океане Бурь, которые, возможно, представляют собой участки обнажения материала пород, лежащих ниже лавового морского затопления, или являются областями недавних выпадений небольших метеороидных роев, которые оставили неглубокие следы в реголитовом слое [23].

Изображения лунной поверхности, полученные в ходе космической миссии НАСА LRO (Лунный орбитальный разведчик), предоставляют уникальную возможность применить метод фазовых отношений для построения карт (изображений) параметров фазовой зависимости яркости для районов, отснятых камерой LROC NAC [22] с пространственным разрешением около 1 м. Такие карты можно интерпретировать в терминах шероховатости реголита. Наша работа посвящена описанию некоторых результатов применения метода фазовых отношений и ана-

лизу участков поверхности Луны, характеризующихся изменениями в структуре поверхностного слоя реголита. Такими участками являются места посадки космических аппаратов (КА), места падения КА, а также места падения метеороидов и участки перемещения грунта на крутых склонах.

ДАнные узкоугольной КАМЕРЫ КА LRO

КА LRO был запущен 18 июня 2009 г. с целью выявления и описания перспективных мест посадок пилотируемых и беспилотных аппаратов для дальнейшей колонизации Луны [2, 22]. В состав научной аппаратуры LRO вошел комплекс приборов LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Cameras), содержащий, в частности, две узкоугольные камеры NAC (Narrow Angle Camera), детектором в которых является ПЗС-линейка Kodak KLI-5001G с динамическим диапазоном 12 бит. В качестве объектива каждой камеры используется телескоп системы Ричи — Кретьена ($D = 20$ см, $F = 70$ см) с полем зрения 2.86° . Спектральная чувствительность LROC NAC перекрывает диапазон 400 — 750 нм [22]. LROC NAC имеет пространственное разрешение 50 см/пкл при съемке с высоты 50 км, что дает возможность идентифицировать даже посадочные платформы КК серии «Аполлон» и КА серии «Луна».

На данный момент имеется огромный массив NAC изображений (всего около 1180000 по состоянию на 16 сентября 2015 г.), полученных для некоторых участков при различных условиях освещения и наблюдения, т. е. при различных фазовых углах α [<http://lroc.sese.asu.edu/posts/879>]. Все данные калиброваны и представлены в единицах мкВт/(см² нм), с учетом темнового отсчета, плоского поля и влияния нелинейности приемника. Отсчеты сигнала могут быть переведены в видимое альбедо (radiance factor) [4]. Среди этого массива изображений нами были выбраны такие, которые получены для одних и тех же участков при различных фазовых углах α_1 и α_2 , но близких углах освещения и азимутальных углах солнечных лучей. Близость этих углов для компонентов фазового отношения позволяет ослабить влияние того рельефа поверхности, который разрешается на снимках. Ведущим

фактором в формировании наклона фазовой кривой яркости является теневой эффект, который создается реголитовыми частицами [4, 24, 29] с размером около 100 мкм. Отношение $B(\alpha_1)/B(\alpha_2)$ зависит не только от теневого эффекта; оно также зависит от вклада многократно рассеянного света, которое засвечивает тени, создаваемые частицами, ослабляя тем самым теневой эффект; это приводит к тому, что между отношением $B(\alpha_2)/B(\alpha_1)$, где $\alpha_2 > \alpha_1$, и альбедо поверхности часто наблюдается прямая корреляция [7, 23]. Существенные отклонения от этой корреляции мы называем аномалиями. В частности, если для некоторого светлого участка поверхности значение отношения $B(\alpha_2)/B(\alpha_1)$ заметно больше того, что предусматривает уравнение регрессии отмеченной корреляции, то мы это называем отрицательной аномалией; в противном случае можно говорить об положительной аномалии.

Для того чтобы получить пригодные для анализа распределения (карты) фазовых отношений, изображения компонентов должны быть тщательно совмещены на уровне долей пиксела. Для совмещения мы применяли алгоритм совмещения в скользящем окне по критерию максимума коэффициента корреляции «rubber-sheet geometric transformation» с формальной точностью совмещения 1/10 пкл [7, 15].

НАРУШЕНИЯ СТРУКТУРЫ, ВЫЗВАННЫЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ЧЕЛОВЕКА

Следы деятельности человека на лунной поверхности — посадка космического корабля, перемещение астронавтов и средств передвижения — влияет на структуру верхнего слоя реголита, и это можно обнаружить методом фазовых отношений [10]. Первая попытка поиска таких следов была предпринята в работе [15], с помощью данных космического аппарата «Клементина», который был запущен НАСА в 1994 г. Разрешение изображений, полученных КА Клементина, около 100 м/пкл. В то время нам удалось найти фотометрическую аномалию точно в месте посадки космического корабля КК «Аполлон-15» [15]. Исследование мест посадок космических аппаратов были продолжены нами с использо-

ванием данных высокого разрешения LRO и метода фазовых отношений для мест посадок КК «Аполлон-11», «Аполлон-12», «Аполлон-14» — «Аполлон-17» [10]. Непосредственно в местах посадок удалось выявить нарушения структуры лунной поверхности, вызванные ударом струй двигателей посадочных модулей, и деятельностью астронавтов на поверхности. Ниже в качестве примера мы рассматриваем место посадки КК «Аполлон-11» и место падения КА «Рейнджер-9», используя данные камеры LRO NAC.

Место посадки КА «Аполлон-11». В июле 1969 г. успешно прошел первый полет человека к Луне с высадкой на ее поверхность. В состав экипажа КК «Аполлон-11» входили: Нейл Армстронг (командир), Эдвин Олдрин — они совершили посадку — и Майкл Коллинз, который оставался на орбите. Посадка на Луну была осуществлена в южной части Моря Спокойствия с координатами $0^{\circ}41'$ северной широты, $23^{\circ}26'$ восточной долготы. Главной задачей экспедиции был сбор образцов реголита как в ближайшей окрестности лунной кабины (в случае неожиданного прерывания миссии), так и в широкой окрестности.

Фрагменты изображений M119699983R и M119693197L, полученные камерой LROC NAC, включают место посадки КК «Аполлон-11» и имеют одинаковое разрешение, близкие углы падения и азимута солнечных лучей, но разные фазовые углы α (см. табл. 1). Углы наблюдения также близки по модулю, что означает съемку по разные стороны от нормали к лунной поверхности для двух указанных снимков. Фрагмент M119693197L, который соответствует большему фазовому углу ($\alpha = 76.11^{\circ}$), показан на рис. 1, а. Здесь виден посадочный модуль Eagle, левее кратера Little West. Небольшое повышение яркости в окрестности места посадки трудно интерпретировать однозначно по этому снимку: это может быть связано как с действием газов посадочной ступени, так и с тем, что посадка произошла в месте с немного более высоким альбедо вокруг кратера Little West. Качественно иное распределение представляет собой изображение фазового отношения, на котором темные тона соответствуют меньшим значениям фазового отношения $B(\alpha_2)/B(\alpha_1)$, где $\alpha_2 > \alpha_1$ (рис. 1, б).

Становится хорошо видимым светлое пятно диаметром около ста метров. Оно является отрицательной фотометрической аномалией. Пятно формируется как ореолом вокруг кратера, так и действием двигателя посадочного модуля. Из-за такого наложения центр тяжести пятна смещен от точки посадки. Возможно также, что эта асимметрия частично связана с особенностями посадки на Луну: известно, что Нейл Армстронг был вынужден на малой высоте «протянуть» время посадки, чтобы избежать попадания в кратер Little West. Эти следы очень похожи на те, что были обнаружены в местах посадок других аппаратов, например, КК «Аполлон-14», «Аполлон-15» и «Аполлон-17» [10]. Мы оцениваем различия наклона фазовой зависимости в пятне, окружающей место посадки, от соседних участков поверхности в пределах 10 %. Описанная аномалия связана с действием газовых струй посадочного модуля. Удар газовых струй может разрушать пористую структуру верхних слоев реголита, выдувая преимущественно мелкую фракцию частиц. Разрушение структуры ослабляет теневой эффект, уменьшает наклон фазовой кривой. Кроме того, накачка реголита газами может приводить к флюидизации реголита [5].

Все проанализированные места расположения посадочных модулей Apollo и Луна имеют в соответствии с мощностью их двигателей особенности фазовых соотношений, четко ассоциированные с местами посадки. Единственным исключением из найденных фотометрических аномалий является КА «Луна-24», фотометрическая особенность которого смещена на 150 м к юго-востоку от станции. Если исходить из того, что модуль «Луна-24» работал в обычном режи-

ме, то причин для такого сдвига нет. Нами предложено следующее объяснение [12, 26]: места неудачной посадки КА «Луна-23» и успешной посадки КА «Луна-24» идентифицированы ошибочно; эти места перепутаны. Такое допущение возможно, так как станции расположены в зоне погрешности определения места посадки. Мы предполагаем, что из-за неправильной обработки измерений радиолокационной системы определения расстояния до поверхности, скорости спуска и бокового дрейфа двигатель АМС «Луна-23», прежде чем был выключен, привел к смещению станции на 150 м и жесткой посадке, вызвавшей разрушение КА.

Кратер, образованный падением КА «Рейнджер-9». Аппараты «Рейнджер» были предназначены для разведочных исследований лунной поверхности. Их целью было получение снимков поверхности с различным разрешением в процессе жесткой посадки на лунную поверхность. КА «Рейнджер-7» — «Рейнджер-9» полностью выполнили программу, передав много изображений Луны высокого качества. Последние изображения, перед самым столкновением с поверхностью, имели разрешение около метра. При падении космический аппарат формировал кратер. В качестве примера мы рассмотрим кратер, образованный 24 марта 1965 г. КА «Рейнджер-9»; масса аппарата составляла 366 кг. Точка падения аппарата на Луну находится в кратере Альфонс и имеет координаты 12°54' южной широты и 2°24' западной долготы.

На рис. 2 показана последовательность изображений поверхности, полученных при жесткой посадке КА «Рейнджер-9»; кружком обозначено место соударения. В левом верхнем углу в поле

Таблица 1. Характеристики использованных изображений для места посадки КК «Аполлон-11» (рис. 1) и места падения КА «Рейнджер-9» (рис. 2, 3)

КА	Номер кадра	Разрешение м/пкл	Угол наблюдения, град	Угол падения, град	Фазовый угол, град	Угол азимута, град	Широта центра, град	Долгота центра, град
«Аполлон-11»	M119699983RC	0.68	20.07	55.99	35.93	178.93	0.03	23.45
	M119693197LC	0.67	21.03	55.08	76.11	178.37	0.03	23.5
«Рейнджер-9»	M129302602RC	0.50	18.02	56.33	38.63	188.72	-12.57	357.59
	M129309387RC	0.51	20.91	55.45	76.09	193.19	-12.56	357.55

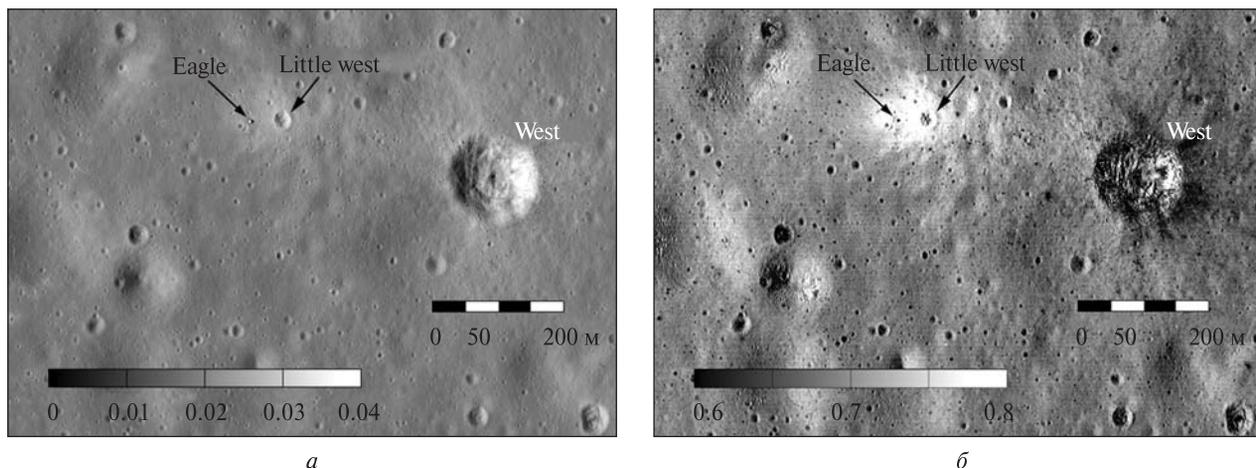


Рис. 1. Место посадки КК «Аполлон-11», сфотографированное камерой LROC NAC: *a* — изображение видимого альbedo, полученное при фазовом угле $\alpha = 76.1^\circ$ с пространственным разрешением 0.67 м/пкл, *б* — изображение, которое передает распределение фазового отношения $B(76.1^\circ)/B(36^\circ)$ для той же области. Стрелками указаны посадочный модуль Eagle и кратер Little West. Показан динамический диапазон изменения видимого альbedo и фазового отношения, а также пространственный масштаб изображений. Здесь и далее на всех изображениях север вверху, восток справа



Рис. 2. Снимки кратера Альфонс, полученные при падении КА «Рейнджер-9». Светлым кружком показано место жесткой посадки. Расстояние до Луны, из которой сделан каждый из снимков, уменьшается от левого верхнего кадра к нижнему правому кадру

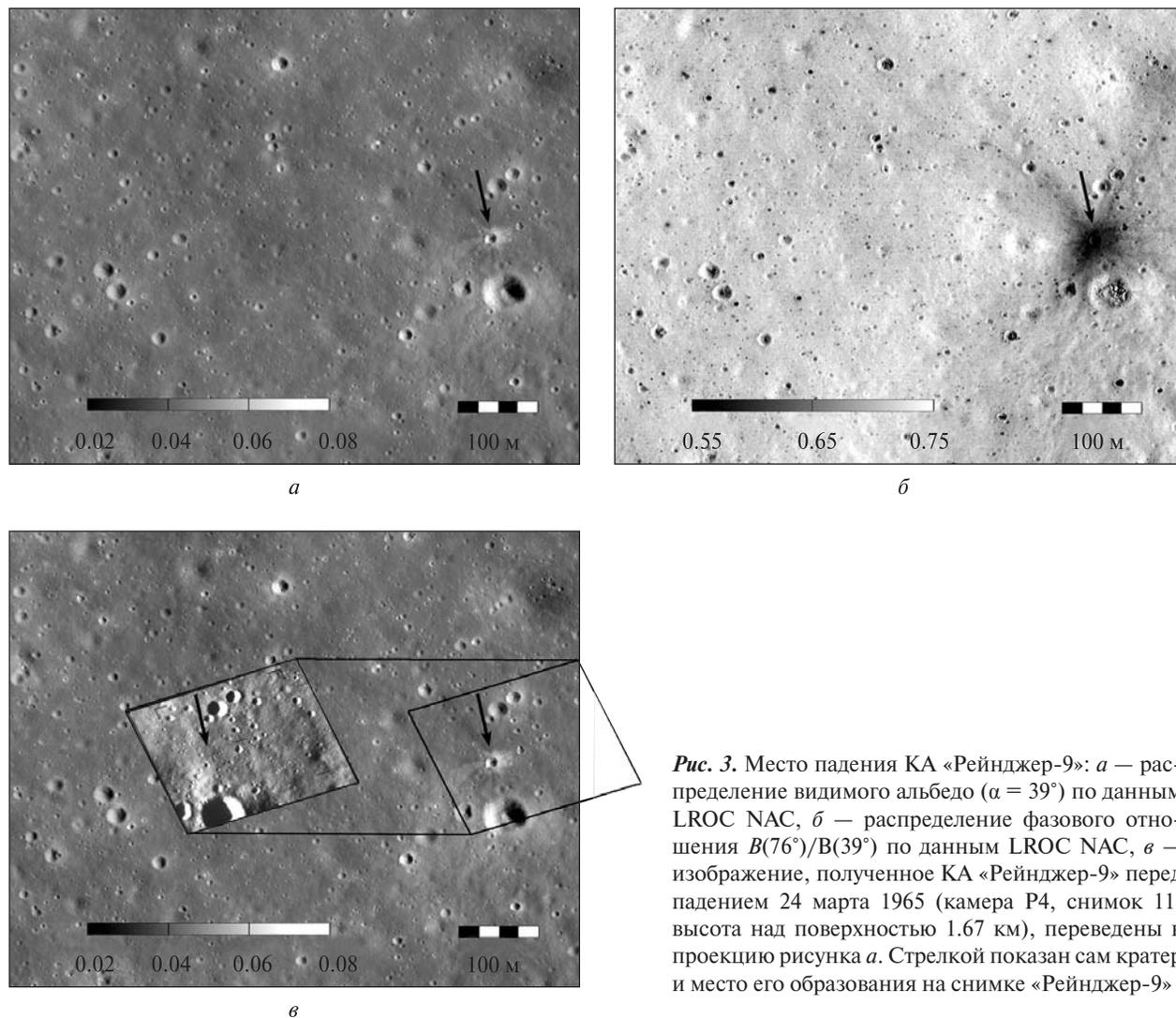


Рис. 3. Место падения КА «Рейнджер-9»: *a* — распределение видимого альbedo ($\alpha = 39^\circ$) по данным LROC NAC, *b* — распределение фазового отношения $B(76^\circ)/B(39^\circ)$ по данным LROC NAC, *v* — изображение, полученное КА «Рейнджер-9» перед падением 24 марта 1965 (камера P4, снимок 11, высота над поверхностью 1.67 км), переведены в проекцию рисунка *a*. Стрелкой показан сам кратер и место его образования на снимке «Рейнджер-9»

зрения камеры почти полностью попадает кратер Альфонс, правый нижний снимок показывает последнее изображение, полученное перед ударом.

Место жесткой посадки КА «Рейнджер-9» было надежно идентифицировано на снимках LROC NAC [<http://lroc.sese.asu.edu/>]. Мы использовали фрагменты изображений LROC NAC M129302602RC и M129309387RC, включающие место посадки КА «Рейнджер-9» и близкие как по разрешению, так и по углу падения солнечных лучей и их азимуту (см. табл. 1). Фрагмент кадра M129309387RC, который соответствует

меньшему фазовому углу ($\alpha = 38.6^\circ$), показан на рис. 3, *a*. Следствием удара станции «Рейнджер-9» является небольшой (около 15 м) кратер со слабыми лучами, который хорошо видим в правой части изображения. Лучевая система этого кратера необычна тем, что здесь обнаруживаются как темные, так и светлые структуры [11]. При рассмотрении изображения фазового отношения $B(76^\circ)/B(39^\circ)$ (рис. 3, *b*) лучевая система кратера видна значительно лучше; лучи оказываются гораздо длиннее, чем на яркостных снимках. Высокие значения наклона фазовой зависимости для этого кратера и его лучевой

системы позволяют рассматривать место падения КА как положительную фотометрическую аномалию. Выбросы камней и обломков породы создают в зоне ореола аномально шероховатую поверхность.

Вариации наклона фазовой зависимости в пятне, окружающей место жесткой посадки, находятся в пределах 10–15 %. На рис. 3, в изображение лунной поверхности, полученное КА «Рейнджер-9» перед падением на Луну, переведены в проекцию рис. 3, а. Таким образом, можно сравнить изображения, полученные непосредственно перед образованием ударного кратера, и через 55 лет после этого события.

НАРУШЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Рассмотрим новые примеры использования метода фазовых отношений применительно к ряду молодых кратеров, имеющих крутые склоны. Одним из важных результатов является то, что потоки на внутренних стенках кратеров, ранее считавшиеся расплавом, скорее всего, являются

сравнительно свежими осыпями этих стенок. В табл. 2 приведены характеристики снимков LRO NAC, использованных для исследования четырех выбранных кратеров.

Молодые кратеры километровых размеров.

Кратеры километровых размеров обычно имеют глубину около 100 м. Это означает, что при их формировании был пробит не только слой реголита, но и, возможно, более глубокий слой мегареголита. В ударном процессе такого масштаба извлекаются фрагменты скальных подстилающих пород.

Исследование методом фазовых отношений лунного кратера диаметром 2 км, который находится на валу старого кратера Römer R, к юго-востоку от кратера LeMonnier с координатами 24.4°N, 33.9°E было выполнено с использованием четырех изображений (см. табл. 2). Снимок кратера (стрелка), сделанный камерой КК «Аполлон-15» в 1971 г. с высоты 107 км при угле освещения 39°, показан на рис. 4 [http://wms.lroc.asu.edu/apollo/view?image_name=AS15-M-0392]. Изображения, охарактеризованные в табл. 2,

Таблица 2. Характеристики снимков LRO NAC, использованных для исследования четырех выбранных кратеров

Номер кадра	Разрешение, м/пкл	Угол наблюдения, град	Угол падения, град	Фазовый угол, град
<i>Безымянный кратер между кратерами Römer M и Littrov D (рис. 4)</i>				
M142048270RC	0.51	19.17	30.94	44.66
M142048270LC	0.51	22.01	30.9	46.84
M142041488RC	0.50	16.87	31.43	25.0
M142041488LC	0.50	14.03	31.39	25.37
<i>Безымянный кратер внутри кратера Hertzprung S (рис. 6)</i>				
M191466684L	1.18	15.58	54.99	39.4
M191480983L	1.203	19.22	52.92	72.13
M191473833L	1.145	1.75	53.97	55.72
<i>Кратер Hall J (рис. 8)</i>				
M144388465LC	0.55	32.45	55.11	83.89
M144388465RC	0.54	29.6	55.18	81.44
M144381680RC	0.47	1.16	55.8	54.85
<i>Кратер Censorin (рис. 10)</i>				
M159732131R	0.49	21.34	46.77	25.44
M159732131L	0.49	18.51	46.7	28.21
M159738917R	0.50	22.54	45.86	68.38
M159738917L	0.51	25.38	45.78	71.15

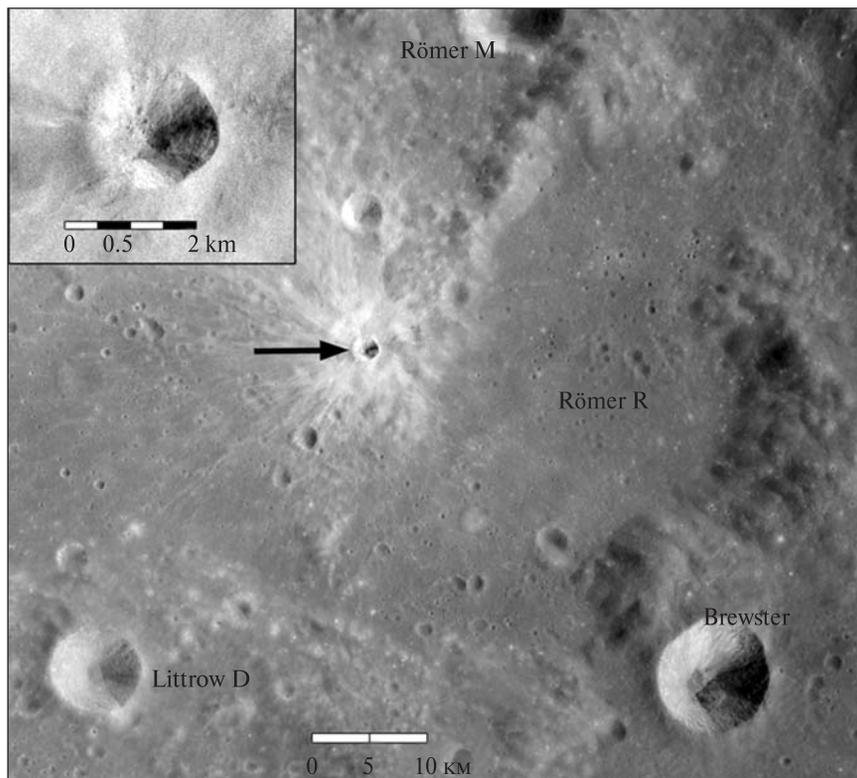
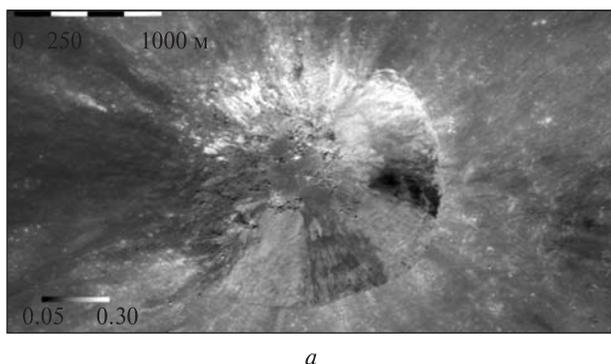
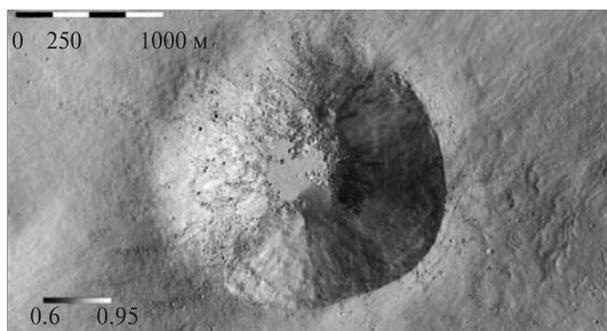


Рис. 4. Изображение AS15-M-0392 исследуемого молодого кратера (указан стрелкой), сделанное камерой КК «Аполлон-15» в 1971 г. с высоты 107 км при угле фазы 39°.



а



б

Рис. 5. Мозаика изображений LROC NAC: а — видимого альbedo для угла фазы 25°, б — фазового отношения $B(46^\circ)/B(25^\circ)$

были использованы для построения мозаики для каждого из двух фазовых углов. Мозаика изображений видимого альbedo для угла фазы 25° и изображение фазового отношения $B(46^\circ)/B(25^\circ)$ представлены на рис. 5, а и б соответственно.

Как видно, вариации фазового отношения довольно значительны и уверенно детектируются.

Мы также исследовали методом фазовых отношений другой молодой кратер, который находится внутри большого старого крате-

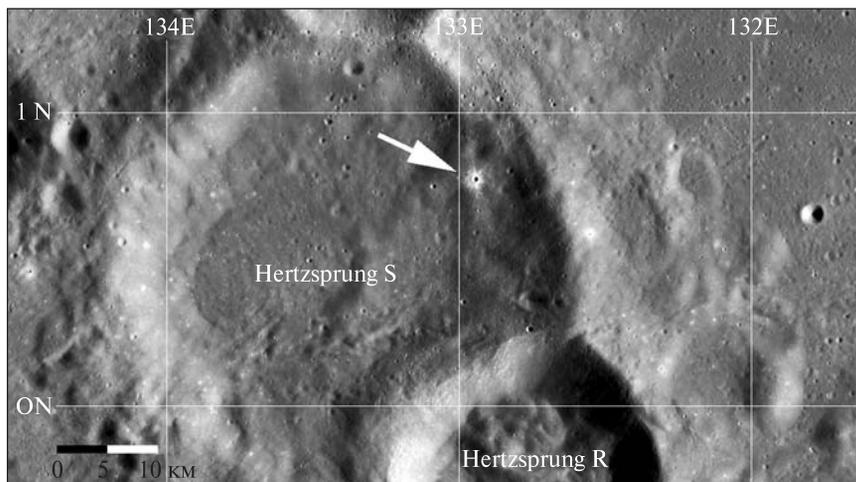
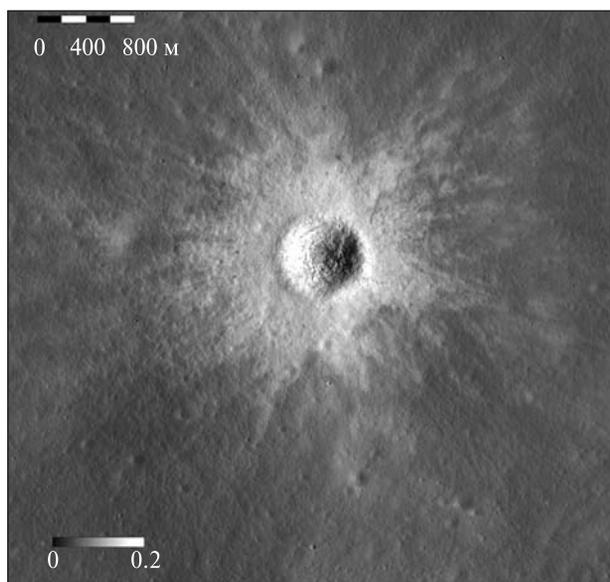
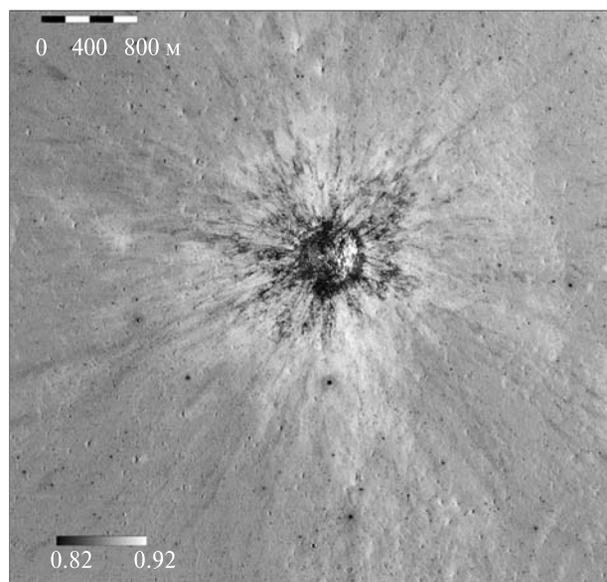


Рис. 6. Изображение молодого кратера (стрелка) на мозаике широкоугольной камеры LROC WAC. Этот кратер расположен на внутренней части вала более крупного кратера Hertzprung S [<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>]



a



б

Рис. 7. Изображение: *a* — видимого альbedo для угла фазы 56° , *б* — фазового отношения $B(72^\circ)/B(56^\circ)$

ра Hertzprung S. Координаты кратера 0.78° N, 132.94° W, а диаметр 700 м.

На рис. 6 представлен пояснительный снимок этого кратера (стрелка) на мозаике, составленной из изображений, полученных широкоугольной камерой LROC WAC. Объект расположен на внутренней части вала старого

кратера Hertzprung S [см. <http://target.lroc.asu.edu/q3/#>].

Рис. 7 представляет изображение видимого альbedo для угла фазы 56° (*a*) и изображение фазового отношения $B(72^\circ)/B(56^\circ)$ (*б*). Для построения фазового отношения использованы три снимка высокого разрешения.

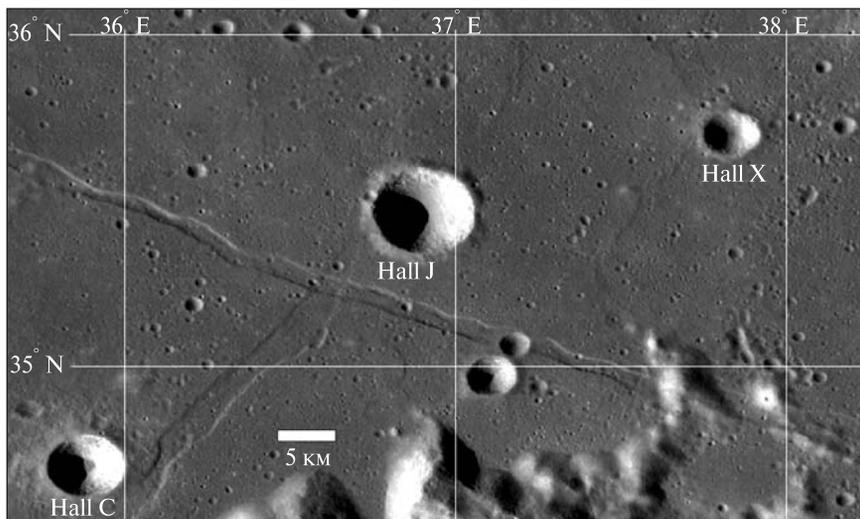
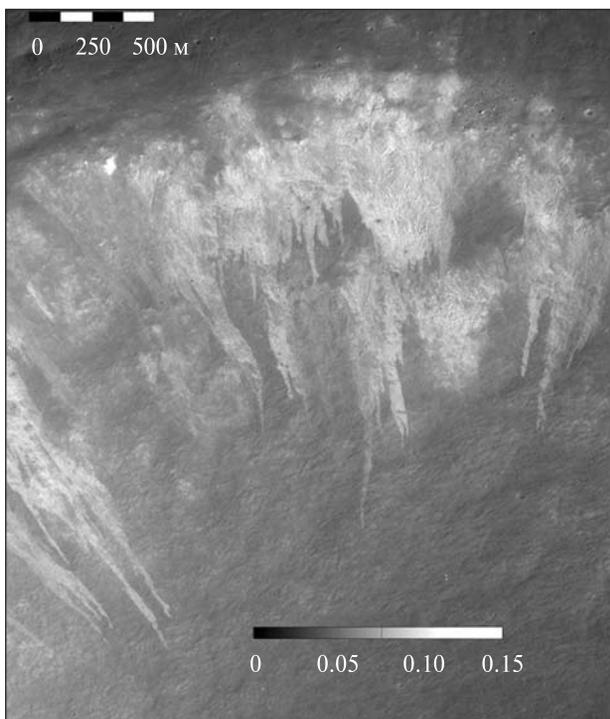
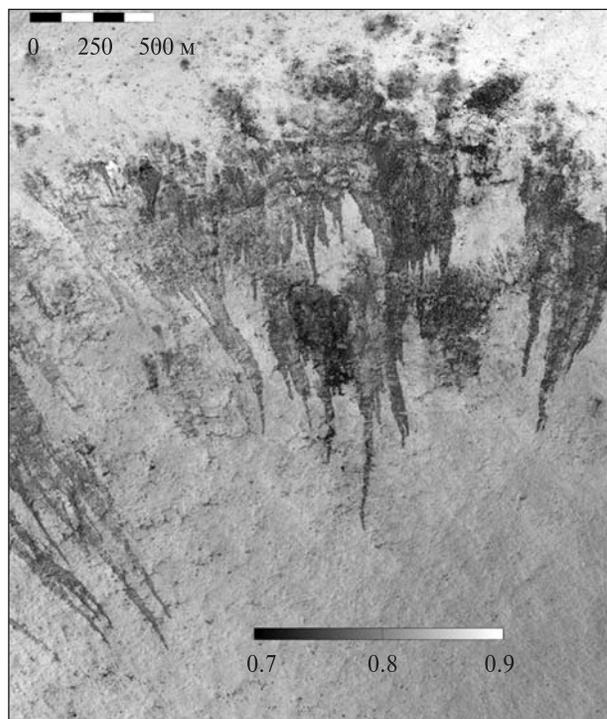


Рис. 8. Изображение окрестностей кратера Hall J на мозаике изображений камеры LROC WAC [<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>]



a



б

Рис. 9. Изображение: *a* — видимого альbedo кратера Hall J при угле фазы 55°, *б* — фазового отношения $B(82^\circ)/B(55^\circ)$

Первый (рис. 5) и второй (рис. 7) описанные кратеры сильно отличаются друг от друга. Второй имеет более развитую лучевую систему, хотя и в окрестности первого прослеживаются сравнительно слабые лучи. В фазовом отношении меньший кратер имеет очень контрастную структуру лучей. Темно окрашенные части лучей на рис. 7, б представляют собой зоны, в которых выбросы создают сильную шероховатость. Как и следовало ожидать, эти зоны расположены ближе к центру кратера. Светлые части лучей выделяются на рис. 7, б либо потому, что в их светлом материале многократное рассеяние заметно нивелирует теневой эффект, либо потому, что это зоны выброса мелкодисперсного материала, который выравнивает шероховатость нетронутой поверхности, что тоже уменьшает теневой эффект. У большего кратера (рис. 5, а) наблюдается мощный односторонний выброс влево темного вещества, однако он практически не выделяется в фазовом отношении, т. е. в шероховатости. Можно предположить, что структура поверхности выброса успела унифицироваться, а значит она заметно старше участков, видимых на внутреннем склоне этого кратера. Следует особо подчеркнуть, что рисунок этих образований в яркости и шероховатости заметно различается. Это означает, что там есть склоновые движения и химически (расплав), и структурно (осыпь) разного материала. Аналогичные особенности наблюдались при исследовании крупного молодого кратера Джордано Бруно [8]. Потоки сыпучего материала перекрывают потоки застывшего расплава; это особенно заметно на южной части внутреннего вала. Отметим необычно плоское дно кратера, на котором набросаны камни (рис. 5, а).

Кратер Hall J. Этот кратер имеет диаметр 7.6 км и находится в Озере Сновидений (Lacus Somnium) (см. рис. 8). Координаты кратера 35.47° N, 36.90° E. Для построения фазового отношения использованы три снимка высокого разрешения (табл. 2.). Рис. 8 представляет собой контекстное изображение окрестностей кратера Hall J на мозаике изображений камеры LROC WAC [<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>]. Рис. 9, а показывает изображение видимого альбеда для

угла фазы 55°, которое охватывает северную сторону вала внутри кратера. Распределение фазового отношения $B(82^\circ)/B(55^\circ)$ для того же участка приведено на рис. 9, б. Снова мы видим склонный узор, созданный потоками расплава и осыпями. Однако, в отличие от предыдущего случая (рис. 5), здесь наблюдается неплохая корреляция рисунков склонов, видимых в яркости и шероховатости. Это, вероятно, связано с тем, что кратер Hall J старше кратера, показанного на рис. 5. У Hall J потоки застывшего расплава, возможно, уже перекрыты осыпями. На днище кратера (здесь оно не показано) видно множество камней и крупных обломков, переместившихся по склону под действием силы тяжести. Они накапливаются не только у подножия склона, но и в локальных понижениях рельефа на склонах. Обвалы и оползни могут инициировать лавины лунной пыли. Повышенную шероховатость создают камни размером ниже разрешения снимков; в данном случае менее 1 м.

Кратер Sensorinus. В полнолуние кратер *Sensorinus* (Цензорин) является одним из самых ярких кратеров видимой стороны Луны. Он находится в северной части материка, обрамляющего Море Спокойствия с юга; его диаметр 4.1 км, а координаты 0.417°S, 32.691°E. Изображение окрестностей кратера Sensorinus на мозаике изображений, полученных камерой LROC WAC [<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>], представлено на рис. 10. Этот кратер моложе, чем Hall J; в его выбросах содержится светлое материковое вещество. Для построения фазового отношения для этого района были выбраны четыре снимка LROC NAC (табл. 2). Рис. 11, а представляет изображение кратера Sensorinus при фазовом угле 70°. Пространственное разрешение изображения 0.5 м/пкл. Кратер выглядит несколько несимметрично, что связано с ракурсом съемки камерой LROC NAC. Фазовое отношение $B(70^\circ)/B(27^\circ)$ дано на рис. 11, б. Как следует из табл. 2, углы падения и отражения солнечных лучей близки у компонентных изображений фазовой пары. Таким образом, различие фазовых углов в большой степени обеспечивается разницей азимутов падающих лучей. Поэтому на изображении фазового отношения $B(70^\circ)/B(27^\circ)$

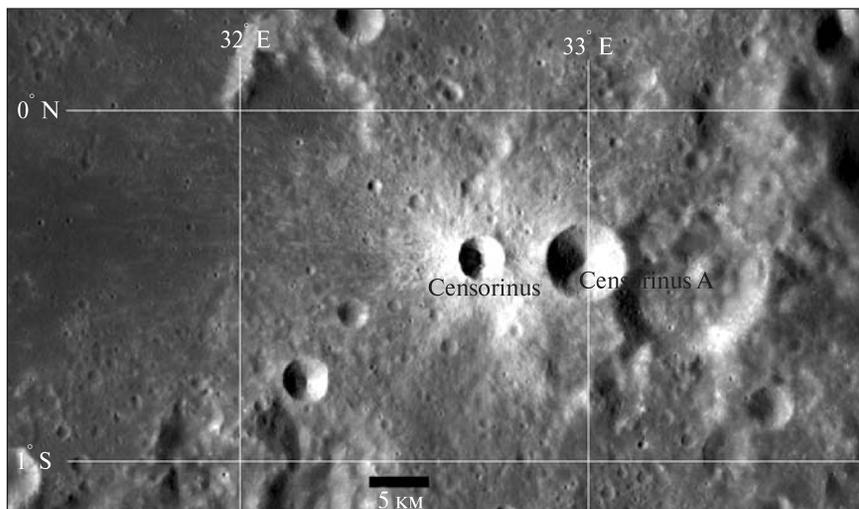
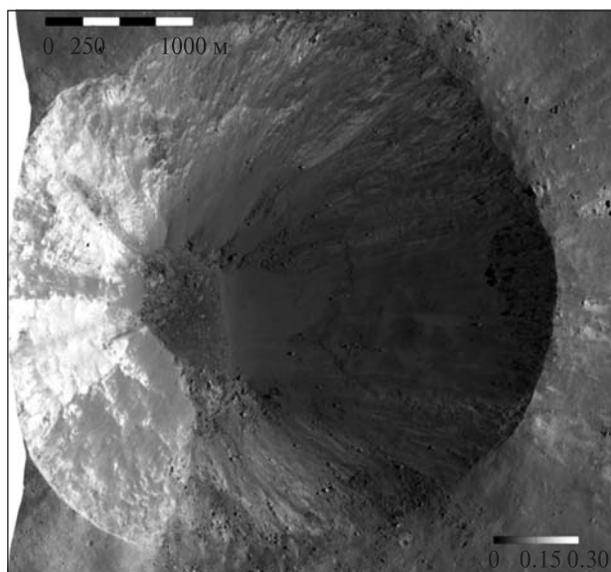
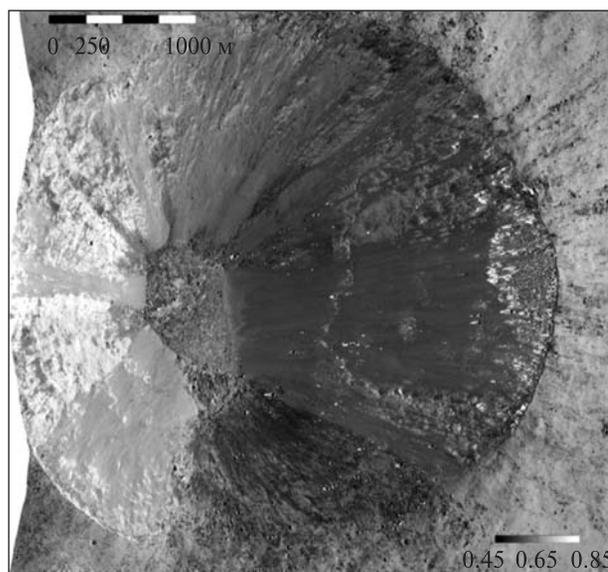


Рис. 10. Изображение окрестностей кратера Censorinus на мозаике изображений камеры LROC WAC [<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>]



а



б

Рис. 11. Фрагмент изображения LROC NAC кратера Censorinus. Фазовый угол для изображения составляет 70°. Пространственное разрешение 0.5 м/пкл

заметно влияние рельефа поверхности, который разрешается камерой.

Ослабить влияние топографии местности на распределение фазового отношения позволяет следующий прием. Строится корреляционная диаграмма «видимое альbedo — фазовый на-

клон» (в данном случае «альbedo (70°) — фазовый наклон $B(70^\circ)/B(27^\circ)$ »). Затем по диаграмме находится уравнение регрессии. В большей мере корреляция создается тем, что яркость и фазовый наклон схожим образом зависят от топографии. Поэтому имеет смысл картогра-

фировать параметр, характеризующий отклонения от линии центральной регрессии. Для кратера Sensorinus корреляционная диаграмма «видимое альbedo $B(70^\circ)$ — фазовое отношение $B(70^\circ)/B(27^\circ)$ » показана на рис. 12. На диаграмме видна прямая корреляция между указанными величинами. В первом приближении она описывается следующим уравнением регрессии: $B(70^\circ)/B(27^\circ) = 1.468 B(70^\circ) + 0.482$ (сплошная серая линия), с коэффициентом корреляции 0.72. Диаграмма построена по всем $3.5 \cdot 10^7$ пикселям изображений, приведенных на рис. 11. Более темный тон на диаграмме соответствует большей частоте встречаемости данной комбинации параметров «фазовое отношение — видимое альbedo». Параметр δ характеризует удаленность точек от линии регрессии (черная линия, перпендикулярная к линии регрессии): $\delta = [B(70^\circ)/B(27^\circ) - K_1 B(70^\circ) - K_2]/(K_1^2 + 1)^{1/2}$, где $K_1 = 1.468$, а $K_2 = 0.482$.

Рис. 13 представляет изображение, передающее распределение параметра δ для кратера Sensorinus. Шкала показывает диапазон вариаций δ . Как видно, это изображение заметно отличается от тех, что показаны на рис. 11; это говорит о том, что эффект топографии здесь значительно нивелирован. Мы интерпретируем положительные значения δ на рис. 13 как увеличенную шероховатость поверхности, которая возникает вследствие накопления валунов, каменных блоков и фрагментов камней с размерами менее 0.5 м при склоновых процессах. Отметим, что следы склоновых процессов четко видны на распределении параметра δ , однако трудно различимы на яркостном изображении. Причиной этих процессов может быть бомбардировки небольшими метеороидными телами, что инициирует оползни и обвалы на крутых склонах кратера.

Таким образом, мы продемонстрировали возможности исследования склоновых процессов в лунных кратерах методом фазовых отношений. Вариации шероховатости реголита Луны чаще всего ассоциируются с обновлением верхнего слоя реголита за счет таких склоновых процессов, как оползни в районах, в которых есть крутые склоны.

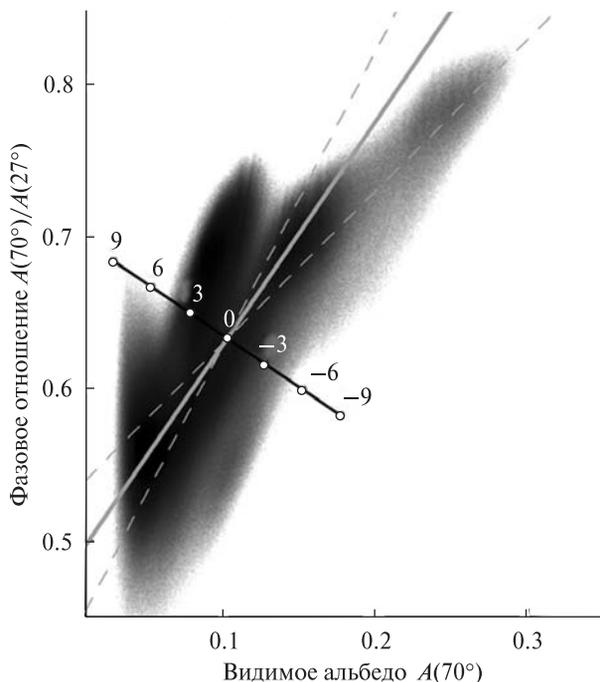


Рис. 12. Диаграмма «видимое альbedo (70°) — фазовый наклон $B(70^\circ)/B(27^\circ)$ » для кратера Sensorinus

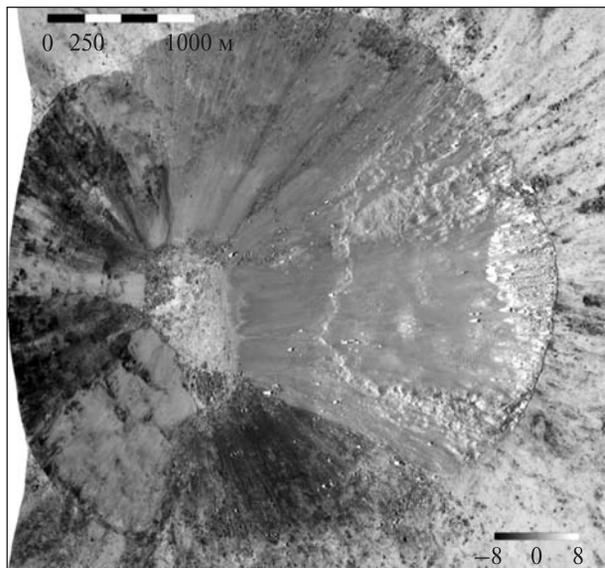


Рис. 13. Изображение, передающее распределение параметра δ для кратера Sensorinus. Шкала показывает диапазон вариаций δ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотометрические аномалии, ассоциирующиеся с местами посадки КК «Аполлон-11» и «Аполлон-12», очевидным образом связаны с действием газовых струй посадочных модулей и деятельностью астронавтов на поверхности. Удар газовых струй может разрушать пористую структуру верхних слоев реголита, выдувая преимущественно мелкую фракцию частиц. Разрушение структуры ослабляет теневой эффект, уменьшает наклон фазовой кривой, приводя к отрицательной аномалии. Кроме того, накачка реголита газами может приводить к флюидизации реголита; это также выравнивает поверхность, и следовательно, ослабляет теневой эффект.

Сильная положительная фотометрическая аномалия видна в месте падения КА «Рейнджер-9». Обнаруживаются лучевая система кратера, слабо прослеживаемая в яркости, но прекрасно видимая на изображении фазового отношения. Это означает, что поверхность в области лучей очень изрыта и шероховатая. Вероятно, там находятся камни и фрагменты пород различной величины, выброшенные при образовании кратера. При падении камни, ударяясь о поверхность, могли еще больше осложнить рельеф в зоне выбросов. Сложный рельеф поверхности продуцирует много теней, что приводит к увеличению крутизны фазовой зависимости яркости. Аналогичный эффект наблюдается для молодых кратеров, образующихся при падении метеороидов с массой порядка массы станции «Рейнджер-9».

Метод фазовых отношений может быть успешно применен не только для исследования мест посадок, но и склонов молодых лунных кратеров, где процессы транспортировки реголита могут быть сильно развиты. Этим методом обнаруживаются свежие оползни, накопления обломочного материала на внутренних стенках кратеров, террасах и днищах. Одним из важных результатов является то, что потоки на внутренних стенках кратеров, ранее считавшиеся расплавом, скорее всего, являются сравнительно свежими осыпями этих стенок.

Метод фазовых отношений в комбинации с традиционным картографированием цветových

отношений может быть эффективно использован для изучения астероидов спутников планет.

Работа сделана при финансовой поддержке «Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012 — 2016 гг.» в рамках проекта «Выявление аномалий структуры поверхности Луны с использованием космической фотометрии высокой разрешающей способности (проект LRO)».

1. *Blewett D., Levy C., Chabot N., et al.* Phase-ratio images of the surface of Mercury: Evidence for differences in sub-resolution texture // *Icarus*. — 2014. — **242**. — P. 142—148.
2. *Chin G., Scott B., Foote M., et al.* Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission // *Space Sci Rev.* — 2007. — **129**. — P. 391—419.
3. *Clegg R. N., Jolliff B. L., Robinson M. S., et al.* Effects of rocket exhaust on lunar soil reflectance properties // *Icarus*. — 2014. — **227**. — P. 176—194.
4. *Hapke B.* Theory of reflectance and emittance spectroscopy. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993. — 450 p.
5. *Immer C., Metzger P., Hintze P., et al.* Apollo 12 Lunar Module exhaust plume impingement on Lunar Surveyor III // *Icarus*. — 2011. — **211**, N 2. — P. 1089—1102.
6. *Johnson J. R., Larson S. M., Singer R. B.* A re-evaluation of spectral ratios for lunar mare TiO₂ mapping // *Geophys. Res. Lett.* — 1991. — **18**, N 11. — P. 2153—2156.
7. *Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Y., et al.* Photometric anomalies of the lunar surface studied with SMART-1 AMIE data // *Icarus*. — 2009. — **202**. — P. 393—413.
8. *Kaydash V. G., Shkuratov Y. G.* Structural disturbance of the lunar surface caused spacecraft // *Solar System Res.* — 2012. — **46**, N 2. — P. 108—118.
9. *Kaydash V. G., Shkuratov Y. G.* Structure perturbations of the lunar surface near the landing site of “Lunokhod-1” // *Solar System Res.* — 2014. — **48**, N 3. — P. 167—175.
10. *Kaydash V., Shkuratov Yu., Korokhin V., Videen G.* Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter // *Icarus*. — 2011. — **211**. — P. 89—96.
11. *Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G.* Phase-ratio imagery as a tool of lunar remote sensing // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2012. — **113**(18). — P. 2601—2607.
12. *Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G.* Landing of the probes Luna 23 and Luna 24 remains an enigma // *Planet. Space Sci.* — 2013. — **89**. — P. 172—182.
13. *Kaydash V. G., Shkuratov Y. G., Videen G.* Dark halos and rays of young lunar craters: a new insight into interpretation // *Icarus*. — 2014. — **231**. — P. 22—33.
14. *Korokhin V. V., Velikodsky Y. I., Shalygin E. V., et al.* Retrieving lunar topography from multispectral LROC images // *Planet. Space Sci.* — 2014. — **92**. — P. 65—76.
15. *Kreslavsky M. A., Shkuratov Y. G.* Photometric anomalies of the lunar surface: Results from Clementine data // *J. Geophys. Res.* — 2003. — **108E**, N 3. — P. 5015.

16. Lucey P. G. Mineral maps of the Moon // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — L08701. — doi:10.1029/2003GL019406.
17. Lucey P. G., Blewett D. T., Bradley L. L. Lunar iron and titanium abundance algorithm based on final processing of Clementine ultraviolet–visible images // *J. Geophys. Res.* — 2000. — **105**. — P. 20297–20305.
18. Lucey P. G., Blewett D. T., Taylor G. J., Hawke B. R. Imaging of the lunar surface maturity // *J. Geophys. Res.* — 2000. — **105**. — P. 20377–20386.
19. Mushkin A., Gillespie A. R. Estimating sub-pixel surface roughness using remotely sensed stereoscopic data // *Remote Sens. Environ.* — 2005. — **99**. — P. 75–83. — doi:10.1016/j.rse.2005.02.018.
20. Pieters C. M., Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G., et al. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine data // *Icarus*. — 2006. — **184**. — P. 83–101.
21. Robinson M. S., Boyd A. K., Denevi B. W., et al. New crater on the Moon and a swarm of secondaries // *Icarus*. — 2015. — **252**. — P. 229–235.
22. Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview // *Space Sci. Rev.* — 2010. — **150**. — P. 81–124.
23. Shkuratov Y., Kaydash V., Gerasimenko S., et al. Probable swirls detected as photometric anomalies in Oceanus Procellarum // *Icarus*. — 2010. — **208**. — P. 20–30.
24. Shkuratov Y., Kaydash V., Korokhin V., et al. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface // *Planet. Space Sci.* — 2011. — **59**. — P. 1326–1371. 10.1016/j.pss.2011.06.011.
25. Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G., Opanasenko N. V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on the lunar nearside // *Icarus*. — 1999. — **137**. — P. 222–234.
26. Shkuratov Y., Kaydash V., Sysolyatina X., et al. Lunar surface traces of engine jets of Soviet sample return probes: The enigma of Luna-23 and Luna-24 landing sites // *Planet. Space Sci.* — 2013. — **75**. — P. 28–36.
27. Shkuratov Y., Kaydash V., Videen G. The crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery // *Icarus*. — 2012. — **218**, N 1. — P. 525–533.
28. Shkuratov Yu., Stankevich D., Kaydash V., et al. Composition of the lunar surface as will be seen from SMART-1: simulation using Clementine data // *J. Geophys. Res. (Planets)*. — 2003. — **108E**, N 4. — P. 1-1–1-12.
29. Shkuratov Yu. G., Stankevich D. G., Petrov D. V., et al. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: Shadowing and multiple scatter // *Icarus*. — 2005. — **173**. — P. 3–15.
30. Shkuratov Yu. G., Starukhina L. V., Kreslavsky M. A., et al. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies // *Icarus*. — 1994. — **109**. — P. 168–190.
31. Velikodsky Yu. I., Opanasenko N. V., Akimov L. A., et al. New Earth-based absolute photometry of the Moon // *Icarus*. — 2011. — **214**, N 1. — P. 30–45.

Стаття надійшла до редакції 08.10.15

В. Г. Кайдаш¹, Ю. Г. Шкуратов^{1,2}, В. В. Корохін¹

¹ Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Харків

² Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

КОСМІЧНА ФОТОМЕТРІЯ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЯК МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ СТРУКТУРИ МІСЯЧНОЇ ПОВЕРХНІ

Представлено короткий огляд досліджень порушення первісної структури місячного ґрунту, викликаного як штучними, і природними чинниками. Для виявлення таких порушень використовуються дані орбітальної фотометрії з високим просторовим розділенням у поєднанні з методом фазових відношень, який був розроблений авторами. Метод дає можливість оцінювати шорсткість світлорозсіювальної поверхні в масштабах менше елемента розділення зображення. Він, зокрема, дає можливість ідентифікації місць осипів ґрунту на крутих схилах; він також є ефективним засобом пошуку нових кратерів, місць падіння невеликих комет або метеороїдних роїв. Надійність нового методу доведено детектуванням фотометричних аномалій, пов'язаних зі змінами структури поверхневого шару реголіту у місцях посадки космічних апаратів, тобто там, де вплив людської діяльності на реголіт Місяця відомий. Отримані результати можуть бути використані при плануванні та реалізації космічних місій до Місяця та інших безатмосферних тіл Сонячної системи космічними агенціями світу.

Ключові слова: поверхня Місяця, реголіт, фотометрія, фотометричні аномалії.

V. G. Kaydash¹, Yu. G. Shkuratov^{1,2}, V. V. Korokhin¹

¹ Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University

² Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

HIGH RESOLUTION SPACE PHOTOMETRY AS A METHOD TO REVEAL STRUCTURE ANOMALIES OF THE LUNAR SURFACE

We have reviewed studies of disturbed primordial structure of the lunar regolith, which is caused by both artificial and natural factors. To identify such disturbances, we used orbital high resolution photometry data in conjunction with the method of phase ratios, which makes it possible to evaluate the surface roughness of the light scattering element on the scale of less than imaging resolution. In particular, this method allows the identification of soil talus; it is also an efficient way to find new craters and places of falling meteoroid streams. The reliability of the new method is proved by the photometric detection of the anomalies associated with changes in the structure of the surface layer of regolith in landing sites of manned spacecraft, i.e., where the impact of human activity on the lunar regolith is well known. The results can be used in a planning and implementation of space missions to the Moon and other atmosphereless bodies of the solar system by the space agencies.

Key words: lunar surface, regolith, photometry, photometric anomalies.