

УДК 523.3

**А. Н. Опанасенко, Н. В. Опанасенко, Ю. Г. Шкуратов,  
В. Г. Кайдаш, Ю. И. Великодский, В. В. Корохин**

Научно-исследовательский институт астрономии  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
61022 Харьков, ул. Сумская 35

### **Распределение спектрополяриметрического параметра по участку Луны в северной части Океана Бурь при большом фазовом угле**

*С помощью 50-см телескопа, установленного на горе Майданак (Узбекистан), проведена поляриметрия Луны в двух спектральных каналах ( $\epsilon_{\text{ф}} = 0.48$  и  $0.63$  мкм). Для регистрации изображений использовалась КМОП-матрица фотоаппарата «Сапоп-350D» в комбинации с вращающимся пленочным поляроидом. Исследовалась северо-западная часть диска Луны, охватывающая часть Океана Бурь. Для этого участка получены изображения, передающие распределения альбедо, степени поляризации, показателя цвета и поляриметрического цветового отношения при фазовом угле  $96^\circ$ . Последняя характеристика исследовалась с разрешением на поверхности около 1 км впервые. Оказалось, что ее распределение напоминает распределение показателя цвета, хотя наблюдаются и отличия. Это значит, что спектрополяриметрия может дать независимую информацию о структуре и оптических свойствах лунного реголита.*

*РОЗПОДІЛ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ПАРАМЕТРА ПО ДІЛЯНЦІ МІСЯЦЯ В ПІВНІЧНІЙ ЧАСТИНІ ОКЕАНУ БУР ПРИ ВЕЛИКОМУ ФАЗОВОМУ КУТІ, Опанасенко О. М., Опанасенко М. В., Шкуратов Ю. Г., Кайдаш В. Г., Великодський Ю. І., Корохін В. В. — За допомогою 50-см телескопа, встановленого на горі Майданак (Узбекистан), проведено поляриметрію Місяця у двох спектральних каналах ( $\epsilon_{\text{ф}} = 0.48$  і  $0.63$  мкм). Для реєстрації зображень використовувалась КМОП-матриця фотоапарата «Сапоп-350D» в комбінації з плівковим поляроїдом, який обертається. Досліджувалась північна частина*

Океану Бур. Для цієї ділянки отримано зображення, що передають розподіл альbedo, ступеня поляризації, показника кольору та поляриметричного колірною відношення у видимому діапазоні довжин хвиль при фазовому куті  $96^\circ$ . Розподіл поляриметричного колірною відношення з розділенням біля 1 км досліджувався вперше. Виявилось, що він схожий на розподіл показника кольору, хоча є й відмінності. Це значить, що спектрополяриметрія може дати незалежну інформацію про структуру та оптичні властивості місячного реголіту.

*DISTRIBUTION OF THE SPECTROPOLARIMETRIC PARAMETER OF THE MOON IN THE NORTHERN PART OF OCEAN PROCELLARUM FOR A LARGE PHASE ANGLE, by Opanasenko A. N., Opanasenko N. V., Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G., Velikodsky Yu. I., Korokhin V. V. — Using the 50-cm telescope of the Maidanak (Middle Asia) observatory, polarimetric observations of the Moon at  $\theta_{\text{eff}} = 0.48$  and  $0.63$  m were carried out. The Canon-350D camera equipped with the CMOS array and the rotated film polaroid were used for imaging. A part of the lunar disk which comprises the north part of Ocean Procellarum was studied. Albedo, polarization degree, color-index, and polarimetric color ratio at a phase angle of  $96^\circ$  were imaged for the area. The last-named parameter was imaged with a resolution of about 1 km for the first time. The image obtained for this parameter resembles the color-index distribution, though important differences can be seen. This shows that spectropolarimetric observations of the Moon can give new information on the composition and structure of the lunar surface.*

## ВВЕДЕНИЕ

Степень поляризации  $P$  света, рассеянного лунной поверхностью, зависит от фазового угла  $\alpha$  и свойств рассеивающей среды. При углах фазы  $\alpha > 25^\circ$  этот свет поляризован положительно. Это означает, что электрический вектор электромагнитных волн, формирующих поток рассеянного излучения, колеблется преимущественно перпендикулярно к плоскости рассеяния. Степень поляризации достигает максимума при  $\alpha = 100^\circ$ . Поляриметрические исследования лунной поверхности сравнительно редки, хотя и продолжаются много лет [3—6, 8—10, 12]. До сих пор не вполне ясно, какую количественную информацию о физических свойствах поверхности можно получить из измерений поляризации света, рассеянного лунной поверхностью.

Степень поляризации коррелирует с альbedo; при больших фазовых углах  $\alpha$  эта корреляция очень тесная (эффект Умова). Регрессионная зависимость для корреляции степени поляризации  $P$  и альbedo  $A$  вблизи угла максимума  $\alpha_{\text{max}}$  имеет вид  $\lg A + a \lg P = b$  [10]. Как видно, эта зависимость обратная: чем выше альbedo, тем меньше степень поляризации. В работах [8, 9, 12] было показано, что при больших

независимую информацию о структурных свойствах лунной поверхности дает параметр  $b$ , который, как оказалось, хорошо коррелирует с размером частиц и пористостью светорассеивающей поверхности.

Из-за того, что степень поляризации при больших фазовых углах тесно коррелирует с альбедо, можно ожидать, что и поляриметрическое цветовое отношение  $P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$  (его называют также спектрополяриметрическим параметром) при больших фазовых углах будет коррелировать с показателем цвета  $A(\lambda_2)/A(\lambda_1)$ , где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн. Исследование спектрополяриметрического параметра представляет собой сложную задачу, поскольку требует высокой точности измерений. Первая попытка изучения корреляции этого параметра с альбедо и показателем цвета была предпринята в работе [5] с использованием дискретных фотоэлектрических измерений, проведенных на поляриметре ГАО НАН Украины (Майданак) для  $\lambda_1 = 0.42$  и  $\lambda_2 = 0.63$  мкм. Исследования  $P_{\max}(\lambda_1)/P_{\max}(\lambda_2)$  проводились также в работе [7] на основе анализа дискретных наблюдений [3]. В частности, в работе [7] получено, что спектрополяриметрический параметр может коррелировать с индексом зрелости лунного грунта. В работе [4] исследования поляриметрического цветового параметра были продолжены с помощью CCD-камеры. Было построено изображение для восточной четверти лунного диска с пространственным разрешением около 10 км для  $\lambda_1 = 0.46$  и  $\lambda_2 = 0.67$  мкм. В настоящей работе приводится первое изображение западной части лунного диска, передающее распределение поляриметрического цветового параметра с пространственным разрешением около 1 км при фазовом угле  $96^\circ$ .

## ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Поляриметрические наблюдения Луны были проведены Н. В. Опанасенко и Ю. И. Великодским с 27 августа по 17 октября 2006 г. на 50-см рефлекторе, расположенном на высокогорной обсерватории на горе Майданак (Узбекистан). Эта обсерватория имеет отличные астроклиматические условия. Все измерения были выполнены в девятиметровом кассегреновском фокусе. Мы использовали для регистрации изображений камеру «Canon-350D» в режиме получения сырых данных, т. е. с отключением аппаратной предобработки значений сигнала в пикселах. Предварительно нами было исследовано поле ошибок, измерялся темновой сигнал и снималась кривая реакции приемника (исследовалась нелинейность). Камера оснащена КМОП-матрицей 3474 × 2314 пкл. Измерения проводились в трех спектральных диапазонах  $\lambda_{\text{ф}} = 0.48, 0.52$  и  $0.63$  мкм, которые соответствовали трем типам светочувствительных элементов КМОП-матрицы. Ниже приводятся результаты только для длин волн  $\lambda_1 = 0.48$  мкм и  $\lambda_2 = 0.63$  мкм. Формальное угловое разрешение съемки составляло  $0.16$  /пкл. Реаль-

но на снимках удается разрешать детали размером около  $0.5 \lambda$ . Здесь мы используем изображения, полученные при фазовом угле  $96^\circ$ , что достаточно близко к максимуму поляризации.

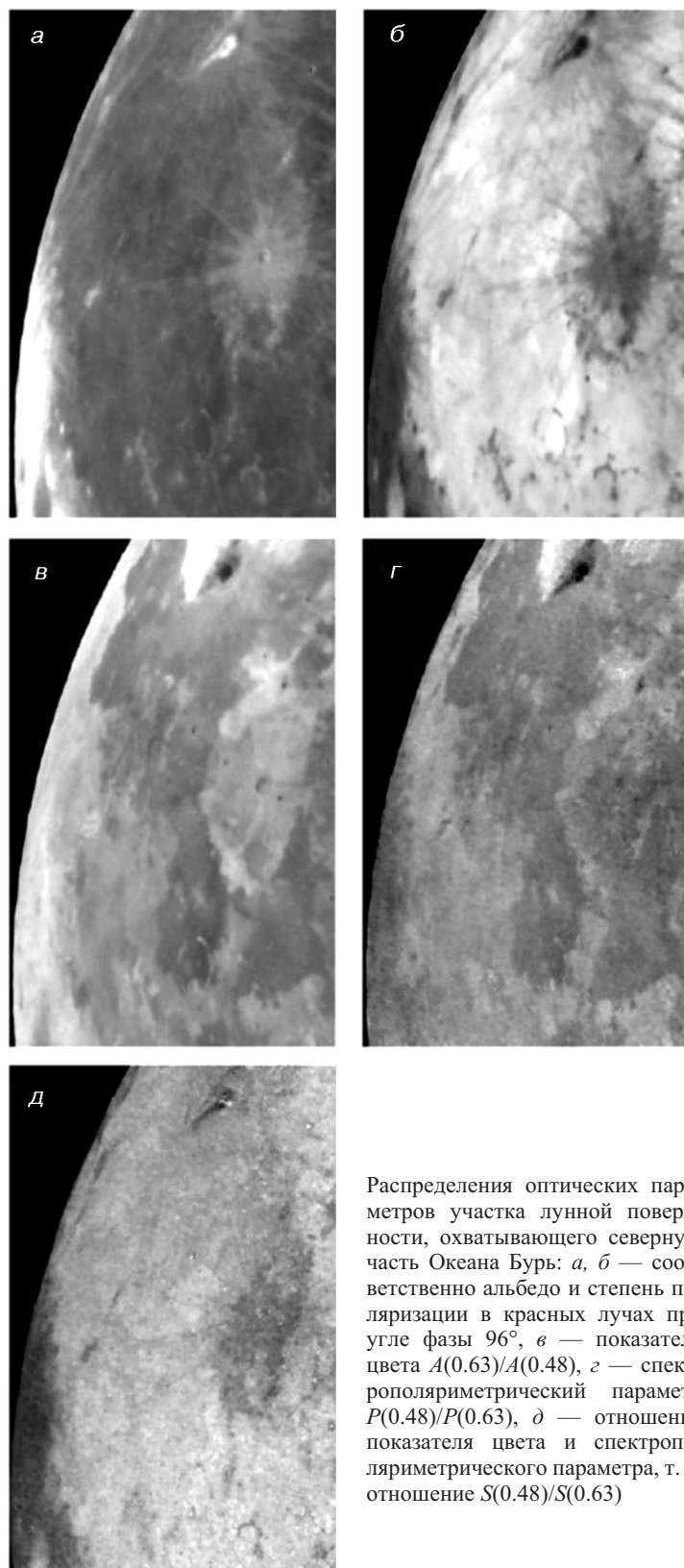
Нами были разработаны алгоритмы и составлены компьютерные программы для обработки изображений, включая коррекцию за крупномасштабные атмосферные искажения. Имеются в виду небольшие взаимные смещения разных частей изображения Луны, вызванные атмосферой, которые удается частично компенсировать так называемым «мягким» совмещением методом скользящего окна. После всех предварительных редуций мы получили распределение отсчетов, пропорциональных яркости. Для поляриметрии использовался пленочный поляризатор, вращающийся по команде с компьютера с шагом  $60^\circ$ . Время экспозиции составляло  $0.3\text{—}0.8$  с. Интервал между снимками составлял  $1.7\text{—}2.5$  с. Степень поляризации  $P$  вычислялась с помощью формулы Фесенкова [2].

Все полученные изображения распределений параметров представлены в прямой ортографической проекции.

#### ИЗОБРАЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для исследования был выбран участок лунной поверхности, который включает в себя северную часть Океана Бурь. Распределение альбедо для этого участка, полученное в красных лучах при фазовом угле  $96^\circ$ , приведено на рисунке (фрагмент *a*). Для компенсации хода яркости от лимба к терминатору использовалась эмпирическая формула Акимова [1]. На фрагменте *b* дано изображение, которое представляет распределение степени поляризации света, рассеянного лунной поверхностью при том же фазовом угле. Как видно, это изображение очень похоже на негатив изображения альбедо; что свидетельствует о тесной корреляции степени поляризации и альбедо поверхности (эффект Умова). Изображения, передающие распределения отношений  $A(\lambda_2)/A(\lambda_1)$  и  $P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$ , представлены на фрагментах *в* и *г*, где  $\lambda_1 = 0.48$  мкм и  $\lambda_2 = 0.63$  мкм. Эти отношения коррелируют. Изображение для параметра  $P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$  показывает большое сходство с изображением показателя цвета  $A(\lambda_2)/A(\lambda_1)$ . Таким образом, как и предполагалось, эффект Умова может индуцировать корреляцию отношений  $P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$  и  $A(\lambda_2)/A(\lambda_1)$ . Изображение спектрополяриметрического параметра совсем не похоже на изображения для степени зрелости лунного реголита, полученные путем обработки данных для близкой инфракрасной области спектра [11]. Это несколько противоречит данным работы [7].

Для того чтобы исследовать отклонения от линии регрессии корреляции отношений  $P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$  и  $A(\lambda_2)/A(\lambda_1)$ , мы построили изображение, которое передает распределение частных указанных парамет-



Распределения оптических параметров участка лунной поверхности, охватывающего северную часть Океана Бурь: *а*, *б* — соответственно альbedo и степень поляризации в красных лучах при угле фазы  $96^\circ$ , *в* — показатель цвета  $A(0.63)/A(0.48)$ , *г* — спектрополяриметрический параметр  $P(0.48)/P(0.63)$ , *д* — отношение показателя цвета и спектрополяриметрического параметра, т. е. отношение  $S(0.48)/S(0.63)$



ров:  $[P(\lambda_1)/P(\lambda_2)]/[A(\lambda_2)/A(\lambda_1)]$  (фрагмент  $d$ ). Это частное является отношением вторых ненормированных параметров Стокса  $S(\lambda_1)/S(\lambda_2)$ , поскольку  $P = S/A$ . На изображении хорошо заметны отличия между морскими и материковыми областями Луны. Яркие кратеры на этом изображении не видны. Хорошо проявляются лучевая система кратера Кеплер и образование Рейнер-гамма. В целом изображение, передающее распределение параметра  $S(\lambda_1)/S(\lambda_2)$ , имеет мало деталей.

Таким образом, мы впервые получили изображение участка лунной поверхности для параметра  $S(\lambda_1)/S(\lambda_2)$ . Этот параметр потенциально полезен для целей дистанционного зондирования лунной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке CRDF грант UKP2-2897-KK-07.

1. *Акимов Л. А.* Отражение света Луной. 2 // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 2.—С. 10—16.
2. *Домбровский В. А.* Астрополяриметрия // Курс астрофизики и звездной астрономии. — М.: Наука, 1973.—С. 460—485.
3. *Кварацхелия О. И.* Спектрополяриметрия лунной поверхности и образцов лунного грунта // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1988.—64.—312 с.
4. *Корохин В. В., Великодский Ю. И.* Картирование параметров максимума положительной поляризации Луны // Астрон. вестн.—2005.—39, № 1.—С. 51—60.
5. *Опанасенко Н. В., Сучкова Т. И., Шкуратов Ю. Г.* Диаграмма альbedo (0.63 мкм) — спектральный поляриметрический показатель (0.42/0.63 мкм) для Луны // Астрон. циркуляр.—1988.—№ 1525.—С. 25—27.
6. *Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г.* Результаты одновременной поляриметрии и фотометрии Луны // Астрон. вестн.—1994.—28, № 4-5.—С. 133—154.
7. *Шевченко В. В., Скобелева Т. П., Кварацхелия О. И.* Спектрополяриметрический индекс зрелости лунного грунта // Астрон. вестн.—2003.—37, № 3.—С. 198—219.
8. *Шкуратов Ю. Г.* Взаимосвязь альbedo и поляризационных свойств Луны. Френелевский компонент отраженного света // Астрон. журн.—1981.—58, вып. 4.—С. 862—868.
9. *Dollfus A., Bowell E.* Polarimetric properties of the lunar surface and interpretation. I. Telescope observation // Astron. and Astrophys.—1971.—10.—P. 29—53.
10. *Dollfus A.* Lunar surface imaging polarimetry: 1. Roughness and grain size // Icarus.—1998.—136.—P. 69—103.
11. *Lucy P. G., Blewett D. T., Taylor G. J., Hawke B. R.* Imaging of lunar surface maturity // J. Geophys. Res.—2000.—105.—P. 20,377—20,386.
12. *Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V.* Polarimetric and photometric properties of the Moon: Telescope observation and laboratory simulation. 2. The positive polarization // Icarus.—1992.—99. P. 468—484.

Поступила в редакцию 15.07. 09