

УДК 523.34(084)

## Сравнительное изучение карт альbedo Луны

Л. А. Акимов, Н. С. Олифер

Приводится описание существующих карт альbedo поверхности Луны, анализируется точность их данных на основе опорного каталога оптических характеристик лунных образований АО ХГУ. Найдены коэффициенты линейной зависимости, связывающие одни карты с другими. Обсуждается точность абсолютной привязки и калибровки.

*A COMPARATIVE INVESTIGATION OF THE MOON'S ALBEDO MAPS, by Akimov L. A., Olifer N. S.—A comparative analysis of the accuracy of the available lunar albedo maps is given on the base of the reference catalogue compiled at the Astronomical Observatory of the Kharkov University. The coefficients of linear relation between the data of different maps are obtained. The accuracy of the results is discussed.*

Задачи, решаемые с помощью карт альbedo при геолого-морфологическом районировании, а также при использовании лунной поверхности в качестве фотометрического стандарта, можно разбить на две группы. Одна из них может довольствоваться относительными характеристиками в системе карты (выявление типов пород, их распространенность, распределение по диску). Для другой — необходима абсолютная привязка и калибровка. Сюда относится сравнение свойств лунных пород со свойствами земных или составляющих поверхности других планет, спутников, астероидов. Абсолютные характеристики необходимы и для светотехнических расчетов.

В настоящее время создано несколько карт отражательной способности лунной поверхности. Ниже перечисляются их основные характеристики и способ построения.

Основой для карты нормального альbedo видимого полушария Луны [17] послужил снимок Луны, полученный при фазовом угле  $\alpha = 1.5^\circ$  в фотометрической системе, близкой к визуальной, с разрешением около  $3''$ . Калибровка осуществлялась на основании данных фотоэлектрического сканирования диска Луны, проведенного одновременно с фотографированием. Абсолютная привязка яркости проведена по фотоэлектрическим наблюдениям стандартных звезд. Редукция к полнолуннию осуществлена для всех точек карты Луны одинаково в предположении, что на участке фазовых углов от  $1.5^\circ$  до  $0^\circ$  увеличение яркости достигает 5%. Карта построена во внешней перспективной проекции в масштабе 1:5000000. Весь диапазон изменения альbedo от 6.9 до 23.9% разделен на 20 интервалов при равномерной шкале альbedo. Контуры областей с заданным значением интервала альbedo определялись с помощью автоматического сканирования исходного снимка Луны.

Цифровая карта нормального альbedo Луны [21] построена по 5 фотографиям Луны, полученным 29 ноября 1974 г. перед лунным затмением при минимальных углах фазы  $\alpha = 1.5^\circ$  в системе V. Калибровка проведена при помощи электронограммы полной Луны (с разрешением  $1/125$  лунного диска), полученной ранее при помощи электронной камеры Крона. Используемые в этой камере эмульсионные пластинки, предназначенные для регистрации треков частиц, чрезвычайно однородны, что обеспечивает строгую пропорциональность между оптической плотностью и световым потоком. Абсолютная привязка проведена при помощи карты нормального альbedo [17]. Данная карта вместе с электронограммой использовалась для пересмотра геометрического альbedo Луны. Приведение к истинному полнолуннию осуществлено косвенным методом с использованием техники счетной обработки изображения, позволяющим заменить экстраполяцию прямым измерением поправок фотометрической функции. Цифровая карта составлена с разрешением, приблизительно равным  $1/550$  диаметра Луны (около 6.3 км), и представлена в табличном виде, где кроме координат ( $\lambda$ ,  $\alpha$ ) и значений среднего нормального альbedo точек указано также стандартное отклонение от среднего. Диапазоны изменения альbedo — от 0.0896 (Океан Бурь) до 0.228 (кратер Стевин).

Фотометрическая карта видимого полушария Луны [5] построена методом фототрафической эквидисцитометрии на основе снимка Луны, полученного при угле фазы  $\alpha = 1.5^\circ$  в системе, близкой к V, с разрешением около  $3''$ . Калибровка осуществлена путем привязки к данным фотометрического каталога [13] (исходный снимок — один

из снимков данного каталога). Для абсолютной привязки использовался каталог [12]. Редукция к истинному полнолуннию не проводилась. Карта построена в ортографической проекции в масштабе 1 : 5000000. Общий диапазон альbedo карты (от 5.6 до 21.2 %) разбит на 22 неравномерных интервала.

Основой для карты альbedo видимого полушария Луны [6] послужил снимок Луны в красной области спектра ( $\lambda=0.62$  мкм), с угловым разрешением около  $1.5''$  при угле фазы  $2.0^\circ$ . Фотометрическая обработка снимка проведена методом эквиденситометрии. Калибровка карты проведена при помощи ряда фотометрических разрезов с использованием характеристической кривой пластинки. Абсолютная привязка произведена по Харьковскому фотометрическому каталогу [13]. Учтен спектральный ход альbedo и его различие для разных районов Луны. Редукция к истинному полнолуннию не проводилась. Карта составлена в ортографической проекции в масштабе 1 : 5000000. Общий диапазон альbedo карты (от 7.1 до 23.2 %) разбит на 25 неравномерных интервалов.

Фотометрическая карта изофот [18] получена при помощи фотоэлектрического сканирования Луны механическим развертывающим устройством, установленном на телескопе. Наблюдениями охвачены 24 значения угла фазы в области спектра с  $\lambda=0.445$  мкм, минимальное значение угла фазы составляет  $2.16^\circ$ , которое и явилось основой фотометрической карты. Изображение диска Луны было представлено 200 сканами, что соответствует разрешению системы около  $10''$ . Абсолютная привязка проводилась по каталогу [11]. Редукция карты к истинному полнолуннию не проведена. Результаты обработки представлены в виде контурной карты изофот с нанесенной прямоугольной системой координат. Масштаб карты 1 : 10000000. Диапазон изменения альbedo от 4.7 до 22.4 % содержит 19 интервалов.

Наиболее полной по охвату поверхности Луны (около 80 %) является общая карта альbedo лунного шара [14]. Исходным материалом послужили наземные наблюдения и космические снимки. Область западного полушария Луны исследовалась по 2 снимкам из серии АМС «Зонд-6» при фазовом угле  $\alpha=12^\circ$ , а область восточного полушария по 2 снимкам, полученным космическим кораблем «Аполлон-13» при  $\alpha=4^\circ$  и  $\alpha=10^\circ$ . Для центральной части видимого полушария была использована фотометрическая карта изофот [19] при угле фазы  $2.16^\circ$ . Снимки были обработаны методом фотографической эквиденситометрии. Калибровка и абсолютная привязка карты проведена по каталогу [20], основанному на данных фотометрического атласа [18]. Редукция к истинному полнолуннию проводилась по измеренному значению истинного эффекта оппозиции на основе космических снимков КК «Аполлон-13». В качестве картографической основы использована псевдоцилиндрическая проекция Мольвейде, отображающая всю поверхность шара. Карта представлена в виде изолиний альbedo с постоянным шагом  $\Delta\rho=1$  %, в масштабе 1 : 10000000 (по экватору). Общий диапазон значений альbedo — от 6 до 18 %.

Цифровые карты либрационной зоны Луны [10] построены по результатам фотометрического анализа двух одиночных снимков АМС «Зонд-6» и «Зонд-8». Снимки получены с космических аппаратов с расстояния около 10000 км от поверхности Луны в фотометрической системе с  $\lambda=0.62$  мкм при фазовом угле центров снимка  $\alpha=13^\circ$ ,  $\alpha=39^\circ$ . Фотометрические измерения снимков проведены на автоматическом сканирующем микрофотометре. Калибровка снимков проведена при помощи каталогов [4] и [13]. Зависимость яркости от фотометрической долготы при данной фазе задавалась теоретическим законом Л. А. Акимова [1]. Для редукции яркостного фактора  $\rho$  к нормальному альbedo  $\rho_0$  была использована численная модель лунной индикатрисы [9]. Значения яркостного фактора  $\rho$  и нормального альbedo  $\rho_0$  представлены на цифровых картах, разделенных на несколько листов и выполненных в масштабе приблизительно 1 : 5000000 (в центре лунного диска). В качестве основы цифровой карты использована сетка селенографических координат во внешней положительной перспективной проекции. Диапазон изменения нормального альbedo — от 5 до 25 %.

Все описанные карты значительно отличаются по исходному материалу, методике построения, исходным фотометрическим системам, калибровке и абсолютизации, приведению к истинному полнолуннию. Поэтому существенным является вопрос о точности фотометрических карт. В. И. Езерский и др. [7] в 1976 г. провели сравнение карт нормального альbedo и обнаружили систематические различия между ними. Сравнение сделано для четырех карт с несколько различающимися фотометрическими системами.

К настоящему времени число фотометрических карт возросло, в АО ХГУ создан достаточно точный и полный опорный каталог оптических характеристик лунных образований [3]. Появилась возможность сравнить существующие фотометрические карты с опорным каталогом, считая данные каталога близкими к истинным, выяснить вопрос о точности сравниваемых карт.

Опорный каталог оптических характеристик лунных образований включает 256 деталей. Основной материал для определения альbedo и фазового изменения яркости получен фотографическим способом в красной области спектра ( $\lambda=0.65$  мкм), где меньше сказывается изменение прозрачности атмосферы на точность наблюдения. Калибровка проводилась по фотоэлектрическим измерениям яркости в том же участке спектра. Методика наблюдения позволяла контролировать прозрачность атмосферы. При помощи каталогов [12] и [16], а также с учетом распределения энергии по спектру, по опорному спектрофотометрическому каталогу [8] получены абсолютные значения коэффициента яркости исследуемых районов для угла фазы  $\alpha=4.3^\circ$ . Эти величины до известной степени могут быть эквивалентом нормальной яркости.

С целью определения относительной и абсолютной точности существующих карт нами проведено сравнение карт с опорным каталогом оптических характеристик. Сравнение проводилось в одной фотометрической системе:  $\lambda=0.56$  мкм,  $\alpha=1.5^\circ$ . Пересчет показаний карт и опорного каталога к длине волны  $\lambda=0.56$  мкм проведен по данным показателя цвета  $C=\rho_{0.65}/\rho_{0.44}$  из опорного каталога для каждой сравниваемой точки. Приведение к фазе  $1.5^\circ$  опорного каталога карты альbedo видимого полушария Луны [6], фотометрической карты изофот [18], цифровых карт либрационной зоны Луны по снимкам АМС «Зонд-6» и «Зонд-8» проведено по данным фазовой зависимости [1] с учетом оппозиционного эффекта. Показания карты нормального альbedo видимого полушария Луны [17] приведены к своим первоначальным значениям, т. е. к фазе  $1.5^\circ$ , с учетом того, что при переходе от  $\alpha=1.5^\circ$  до  $\alpha=0^\circ$  показания увеличены на 5%. Общая карта альbedo Луны приведена к  $\alpha=1.5^\circ$  по данным фазовой зависимости [15]. Кроме учета средней зависимости изменения яркости лунных деталей с фазой, для всех точек опорного каталога учитывался индивидуальный градиент яркости. В результате, при сравнении карт с опорным каталогом в фотометрической системе  $\lambda=0.56$  мкм,  $\alpha=1.5^\circ$ , значения абсолютного яркостного фактора по опорному каталогу можно признать за истинные с точностью 2%.

Сравнение карт с опорным каталогом проводилось путем сопоставления значений яркостного фактора примерно 250 точек. По совокупности сравниваемых точек определяли параметры линейных уравнений регрессии и средние ошибки уравнений регрессии. Результаты сравнения карт с опорным каталогом представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что лучшей относительной точностью обладают карты нормального альbedo [17] и цифровая карта [21]. Для них коэффициент корреляции  $r=0.97\div 0.94$  и средняя квадратичная ошибка  $\sigma(\rho_N)=(5.6\div 6.7)\cdot 10^{-3}$ . В случае карты [17] средняя квадратичная ошибка определения яркостного фактора меньше интервала градации данной карты.

Следующая по точности — карта изофот [18], для которой  $r=0.96$  и  $\sigma(\rho_N)=8.6\cdot 10^{-3}$ , что примерно равно интервалу градации карты.

Для фотометрических карт [5, 6]  $r=0.92\div 0.93$  и  $\sigma(\rho_N)=(11.1\div 10.3)\cdot 10^{-3}$ , что уже больше интервала градации карты.

Для общей карты альbedo поверхности Луны  $r=0.91$  и  $\sigma(\rho_N)=11.7\cdot 10^{-3}$ .

Меньшей относительной точностью обладают цифровые карты либрационной зоны Луны, для которых  $r=0.86\div 0.83$  и  $\sigma(\rho_N)=(18.6\div 14.0)\cdot 10^{-3}$ . Такую точность можно объяснить тем, что основой этих карт послужили снимки Луны, полученные при достаточно больших углах  $\alpha=13^\circ$  и  $\alpha=39^\circ$ , и сравнение с ними проведено по гораздо меньшему числу точек, чем для остальных карт.

Параметры линейных уравнений регрессии  $\rho_N=K\rho_{оп.к}+\Delta\rho$ , где  $K$  — контраст и  $\Delta\rho$  — положение нуля-пункта характеризуют абсолютную точность карт.  $\rho_{оп.к}$  — яркостный фактор по опорному каталогу. Малым контрастом  $K=0.79\div 0.69$  и большим отклонением нуля-пункта  $\Delta\rho=(20\div 41)\cdot 10^{-3}$  отличаются карта нормального альbedo [17] и цифровая карта [21]. Зависимость яркостного фактора по карте нормального альbedo [17] (ось  $Y$ ) от яркостного фактора по опорному каталогу (ось  $X$ ) изображена на рис. 1. Зависимость очень резкая, разброс точек мал, достаточно велико отклонение нуля-пункта и мал контраст  $K=0.79$ .



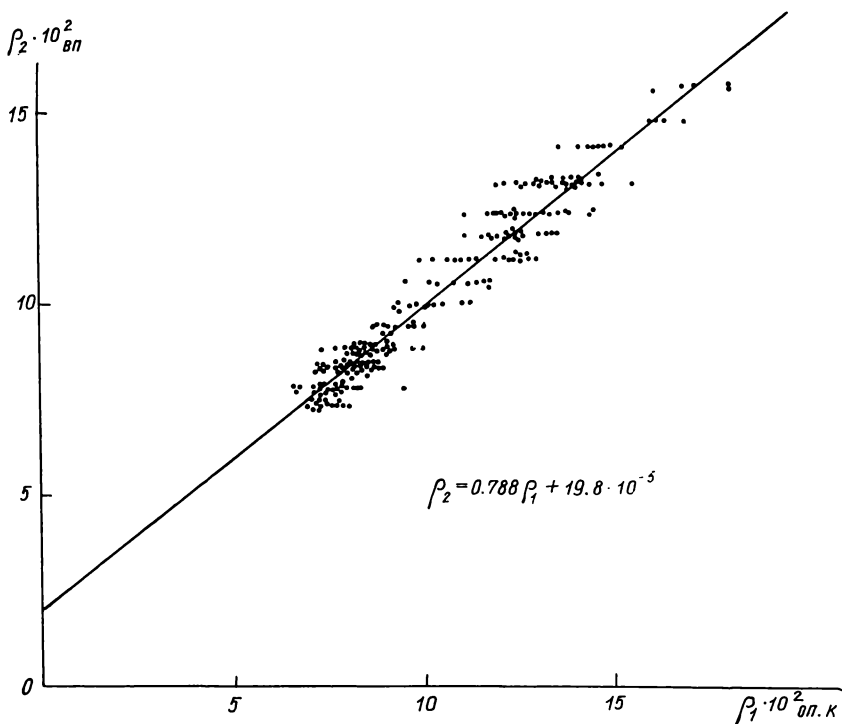


Рис. 1. Сопоставление данных сравнения карты [17] с опорным каталогом оптических характеристик лунных образований. Сплошная черта — линия регрессии

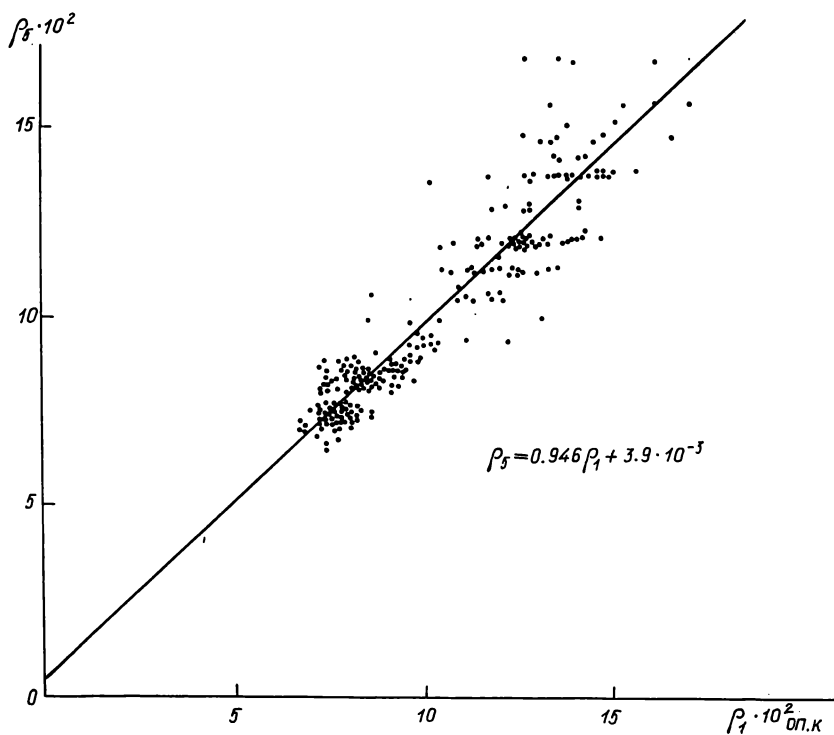


Рис. 2. Сопоставление данных сравнения карты альbedo видимого полушария Луны [6] с опорным каталогом оптических характеристик лунных образований

Для карт [5, 6], фотометрической карты [18] и общей карты альbedo поверхности Луны контраст  $K$  близок к единице ( $0.93 \div 1.08$ ), положение нуля-пункта  $D_0$  близко к нулю:  $(4 \div 15) \cdot 10^{-3}$ . Зависимость яркостного фактора по карте альbedo видимого полушария Луны [6] (ось  $Y$ ) от яркостного фактора по опорному каталогу (ось  $X$ ) изображена на рис. 2. Здесь разброс точек уже больше, чем для карт в [17]. Положение нуля-пункта близко к нулю, а контраст близок к единице. Основную причину данных различий следует искать в калибровке и абсолютной привязке карт. Все карты в основном привязаны к абсолютным наблюдениям [12] непосредственно или к каталогу [13], который абсолютизирован по тем же наблюдениям. Карта [17] и цифровая карта [21] базируются на абсолютных измерениях, которые расходятся с наблюдениями [12].

С целью выяснения зависимости изменения контраста при малых фазовых углах нами проведены дополнительные исследования по материалам полного лунного затмения 6 августа 1971 г., которые показали, что контраст уменьшается с уменьшением фазы: при  $\alpha = 1.20^\circ$  контраст составляет 0.91 от его значения при  $\alpha = 7^\circ$ . Однако маловероятно, что он упадет еще на 10—20 % в истинную оппозицию. По-видимому, значения контраста на картах [21] занижены. Вопрос об абсолютной точности карт пока остается открытым. Для решения его нужны новые дополнительные исследования.

Кроме сравнения карт с опорным каталогом, нами проведено сравнение карт друг с другом, результаты сравнения представлены в табл. 2.

1. Акимов Л. А. Изменение яркости лунных образований с фазой // Вестн. Харьк. ун-та. Астрометрия и физика солнеч. системы.— 1982.— Вып. 17, № 232.— С. 12—22.
2. Акимов Л. А., Евсюков Н. Н. Альbedo и цвет на картах Луны // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.— 1983.— № 1.— С. 78—81.
3. Акимов Л. А., Латынина И. И., Стадникова Н. П. Опорный каталог оптических характеристик избранных участков Луны. 1 // Вестн. Харьк. ун-та. Астрометрия и физика солнеч. системы.— 1982.— Вып. 17, № 232.— С. 70—80.
4. Барабашов Н. П., Белоброва О. И., Езерский В. И. и др. Фотометрические характеристики избранных объектов восточного сектора обратной стороны Луны // Атлас обратной стороны Луны.— М.: Наука, 1967.— Ч. 2.— С. 179—214.
5. Евсюков Н. Н. Фотометрическая карта видимого полушария Луны.— 1 : 5000000.— Киев : Наук. думка, 1973.
6. Евсюков Н. Н. Карта альbedo видимого полушария Луны.— 1 : 5000000.— Киев : Наук. думка, 1973.
7. Езерский В. И., Кудзьменков С. Г., Мамницкий В. И. и др. Сравнение карт нормального альbedo видимого полушария Луны // Вестн. Харьк. ун-та. Физика Луны и планет. Вопр. астрометрии.— 1976.— № 137.— С. 8—13.
8. Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Латынина И. И. Спектрофотометрический каталог участков лунной поверхности // Вестн. Харьк. ун-та. Астрономия солнеч. системы.— 1983.— № 247.— С. 18—29.
9. Псарев В. А. Численная модель лунной индикатрисы // Астрон. циркуляр.— 1980.— № 1130.— С. 4—6.
10. Псарев В. А., Лаврова Н. П. Фотометрическое картирование Луны по материалам АМС «Зонд-6» и «Зонд-8».— М., 1982.— 99 с.— (Деп. в ВИНТИ; № 1655—81).
11. Сытинская Н. Н. Сводный каталог абсолютных значений визуальной отражательной способности 104 лунных объектов // Астрон. журн.— 1953.— 30, № 3.— С. 295—301.
12. Сытинская Н. Н., Шаронов В. В. Исследование отражательной способности лунной поверхности // Учен. зап. Ленингр. ун-та.— 1952.— № 153.— С. 114—154.
13. Федорец В. А. Фотографическая фотометрия лунной поверхности.— Харьков, 1952.— 109 с.— (Тр. Харьков. обсерватории; Т. 2).
14. Шевченко В. В. О природе альbedo поверхности лунного шара // Астрон. журн.— 1974.— 51, № 5.— С. 1064—1071.
15. Шевченко В. В. Современная селенография.— М.: Наука, 1980.— 172 с.
16. Peacock K. Multicolor photoelectric photometry of lunar surface // Icarus.— 1968.— 9, N 1.— P. 16—66.
17. Pohn N. A., Wildey R. L. A photoelectric-photographic study of the normal albedo of the Moon (map.— 1 : 5 000 000) // Geol. Surv. Prof. Pap.— 1970.— N 599—E.
18. Saari I. M., Shorthill R. W. Isothermal and isophotic atlas of the Moon contour through a lunation.— Langley: NASA, 1967.— 35 p.
19. Saari I. M., Shorthill R. W. The sunlight lunar surface. I. Albedo studies and full Moon temperature distribution // Moon.— 1972.— 5, N 1/2.— P. 161—178.
20. Saari I. M., Shorthill R. W., Baird F. E., Le Compte J. R. Photometric properties of selected lunar features. NASA.— 1969.— CR—1429.— 440 p.
21. Wildey R. L. A digital file of the lunar normal albedo // Moon.— 1977.— 16, N 2.— P. 231—277.