ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.М. Муминов, Б.Б. Каххаров, Ю.И. Великодский

Ёруғликниг Ой сиртидан қайтиш характерининг таҳлили асосида унинг сирти хусусиятларини тадқиқ этишдаги асосий йўналишдлар тақдим этилган. Турли фотометрик шарт-шароитларда олиб борилган кузатувлар Ой сирти учун ёруғликнинг қайтиш қонунини тадқиқ этишга имкон беради. Ушбу қайтиш қонунига кирувчи параметрлар қайтувчи сиртнинг физик хоссалари ҳақида маълумот беради.

Калит сўзлар: *атмосферасиз жисм, Ой сирти, ёруғликнинг қайтиши, мезорельеф, синдириш кўрсаткичи, Акимов қонуни*

Представлены основные направления в исследовании свойств поверхности Луны из анализа характера отражения света. Наблюдения поверхности Луны при различных фотометрических условиях дают возможность изучать закон отражения света этой поверхностью. Входящие в закон отражения параметры несут информацию о физических свойствах поверхностного вещества.

Ключевые слова*: безатмосферное тело, Лунная поверхность, отражение света, мезорельеф, показатель преломления, закон Акимова*

This article presents the main directions in research of properties of a surface of the Moon from the analysis of nature of reflection of light. Supervision of a surface of the Moon under various photometric conditions give the chance to study the law of reflection of light in this surface. The parameters entering the law of reflection bear information on physical properties of superficial substance.

Keywords: *without the atmosphere body, Lunar surface, reflection of light, mesorelief, index of refraction, Akimov's law*

Одним из важнейших направлений современной планетологии является изучение физических свойств твёрдых планетных поверхностей с помощью фотометрических наблюдений. Эти исследования необходимы для понимания физических процессов, происходящих на других планетах; они важны для изучения эволюции Солнечной системы; а также они являются необходимым звеном освоения космоса человеком. Важным условием для фотометрических исследований поверхностей планет является знание закона отражения света этими поверхностями. Наиболее удобным объектом для исследования закона отражения света твёрдыми планетными поверхностями является Луна. Она является типичным представителем безатмосферных тел Солнечной системы и расположена близко к Земле, что позволяет детально исследовать поверхность нашего естественного спутника. Известно, что закон отражения света лунной поверхностью можно разделить на два сомножителя: фазовую зависимость яркости зеркальной точки и закон распределения яркости по диску Луны относительно зеркальной точки при фиксированном угле фазы. Для описания фазовой зависимости существуют аналитические выражения, применимые для углов фазы, по крайней мере, до 90°. Закон распределения яркости изучен хуже, и поэтому первоочередной задачей можно считать исследование закона распределения яркости по диску Луны.

Актуальным является исследование закона распределения яркости по диску Луны при больших углах фазы, а также нахождение связи между параметром q (фактором гладкости) в законе Акимова и физическими свойствами поверхности Луны. Решение этой задачи позволит использовать эмпирическую формулу Акимова для фотометрической калибровки наблюдательных данных и исследования физических свойств поверхности Луны. Появившиеся за последнее десятилетие высокоточные ПЗС-приборы и мощные компьютеры сделали возможным исследование закона отражения света Луной на новом качественном уровне, что, в частности, должно позволить получить функцию распределения яркости по диску, применимую в широком диапазоне фазовых углов.

Главная цель фотометрических исследований Луны и других безатмосферных космических тел - получение информации о свойствах поверхности из анализа характера отражения света. Наблюдения поверхности Луны при различных фотометрических условиях дают возможность изучать закон

отражения света этой поверхностью. Входящие в закон отражения параметры несут информацию о физических свойствах поверхностного вещества и могут быть найдены в результате обработки наблюдательных данных. Использование панорамных приёмников излучения позволяет строить карты распределения каких-либо параметров по поверхности Луны.

Картирование параметров закона отражения света всей лунной поверхности предполагает быстрый сбор, ввод и переработку больших массивов информации (от мегабайт до сотен мегабайт и больше), полученных в разные даты при различных параметрах либрации, и немыслимо без применения современных средств фотометрии и обработки данных. Поэтому не удивительно, что исторически первые экспериментальные исследования закона отражения света относились к набору отдельных избранных точек лунной поверхности или же ко всему интегральному диску Луны. Некоторые особенности лунной фотометрической функции известны уже давно. Галилео Галилей, анализируя отсутствие потемнения к лимбу в полнолуние, объяснял это наличием на Луне большого количества неровностей - гор, которые будто бы вызывают такой эффект благодаря тому, что всегда находятся склоны, видимые под углом 90° к лучу зрения.

Как показали многочисленные исследования, начиная с первых наблюдений и заканчивая космическими миссиями и высадкой человека на Луну, поверхность последней имеет весьма сложную структуру, сформировавшуюся в ходе длительной эволюции под воздействием различных процессов, основным из которых является метеоритная бомбардировка.

Вообще говоря, для поверхности Луны и других безатмосферных тел чёткую границу между этими масштабами провести нельзя, и это является весьма существенным фактором, определяющим закон рассеяния света лунной поверхностью. Однако теория рассеяния, построенная в приближении дискретных масштабов, более развита и позволяет в некотором приближении описывать рассеяние света поверхностями безатмосферных тел и оценивать качественно (а в некоторых случаях – и количественно) влияние альбедо и рельефа на закон отражения света.

Суть данной теории заключается в следующем. При заданных оптических свойствах вещества (действительной и мнимой частях показателя преломления) и размерах частиц рассчитывается индикатриса рассеяния света отдельной частицей (четвёртый масштаб). Затем, с использованием этой индикатрисы методами теории переноса излучения рассчитывается рассеяние света в порошкообразной среде и выводится фотометрическая функция поверхности в третьем масштабе. После этого учитывается влияние мезорельефа (второй масштаб) путём усреднения фотометрической функции по всем направлениям нормали к поверхности в пределах разрешения телескопа (при этом должны рассматриваются только те элементарные площадки, которые одновременно видны и освещены). Полученная в результате фотометрическая функция описывает отражение света макроповерхностью (первый масштаб) при заданных углах падения i, отражения e и фазы a.

На сегодняшний день наиболее приемлемым теоретическим законом, описывающим распределение яркости по диску однородной Луны, является закон Акимова. Он получен для случая предельно шероховатой поверхности и замечателен тем, что не содержит ни одного параметра, характеризующего свойства поверхности. Однако, при решении ряда задач точности этого закона оказывается недостаточно: наблюдаемое для Луны потемнение к полюсам, особенно проявляющееся при больших углах фазы, значительно меньше потемнения, даваемого законом Акимова.

Формула Хапке, также часто применяющаяся для описания закона отражения света Луной, даёт лучшее согласие с экспериментом; однако она содержит большое количество параметров, характеризующих свойства поверхности, и является чрезвычайно громоздкой. Это делает её весьма неудобной и при решении ряда задач – практически неприменимой.

Существует также эмпирическая формула Акимова, которая в некотором смысле обобщает закон Акимова путём введения параметра q (фактора гладкости), характеризующего свойства поверхности. Этот параметр, по данным Акимова, определяется, в основном, мезорельефом поверхности. Эмпирическая формула Акимова является достаточно простой, и в то же время неплохо описывает распределение яркости по диску Луны. Однако параметр q зависит от угла фазы, и Акимову удалось найти эту зависимость только для углов фазы, меньших 60°. Тем не менее, использование эмпирической формулы Акимова для описания распределения яркости по диску Луны представляется довольно перспективным. Поэтому на сегодняшний день является актуальным исследование закона распределения яркости по диску Луны при больших углах фазы, а также нахождение связи между параметром q и физическими свойствами поверхности Луны.

Решение этой задачи позволит использовать эмпирическую формулу Акимова для фотометрической калибровки наблюдательных данных и исследования физических свойств поверхности Луны. Современные модели, использующие как теоретический, так и эмпирический подходы при определении закона отражения света Луной, позволяют получить соотношения, определяющие с хорошей точностью видимое альбедо лунной поверхности в достаточно широком диапазоне фотометрических условий наблюдения. Фазовая зависимость видимого альбедо при углах фазы a<80° может быть описана функцией

$$\rho(\alpha) = \rho_0 \cdot \frac{e^{-\mu\alpha}}{2 + \exp\left(-\frac{r}{L}\right)} \cdot \left(2 + \frac{\exp\left(-\frac{r}{L}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi L}{l} \sin\frac{\alpha}{2}\right)^2}}\right) \quad (1)$$

содержащей параметры r_0, m, L, r, характеризующие поверхность и имеющие довольно очевидный физический смысл. Распределение яркости по диску Луны, в свою очередь, можно описать эмпирической функцией Акимова:

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

работающей практически при любых углах фазы. Входящий в эту функцию фактор гладкости q зависит от угла фазы, причём, при a<60-90° эту зависимость можно описать линейной функцией. Физический смысл фактора q до конца не ясен, но есть основания считать, что для Луны этот параметр формируется под влиянием мезорельефа.

В качестве распределения яркости по диску можно также использовать комбинированную функцию Акимова

$$Y(a, j, l) = \cos\frac{a}{2} \times \cos^{q(a)} j \times \sec l \times \cos\left(\frac{p}{p - a} l - \frac{a}{2}\right) \quad (3)$$

которая значительно проще для вычислений, и в то же время, мало отличается от эмпирической (2).

Таким образом, дальнейшее исследование закона отражения света Луной может заключаться в уточнении фазовых зависимостей эквигонального альбедо и фактора гладкости при больших углах фазы, а также в установлении связи фактора гладкости q с физическими характеристиками лунной поверхности.

Для изучения фазовой зависимости альбедо необходимо проводить абсолютные фотометрические измерения лунной поверхности при различных углах фазы. Однако и относительные наблюдения могут дать некоторую информацию о механизмах, формирующих фазовую зависимость. Для этого необходимо исследовать зависимость контраста лунных образований от угла фазы и длины волны.

Для изучения же распределения яркости по диску можно использовать только относительную фотометрию. Причём, надо также обратить внимание на следующее. При больших углах фазы долготная составляющая функции распределения Y (2) очень слабо зависит от параметра q. В то же время широтная зависимость альбедо весьма чувствительна к изменениям параметра q и поэтому, наиболее логичным способом определения фактора гладкости q является исследование именно широтной зависимости яркости.

Задача исследования физических свойств поверхности Луны с помощью фотометрических наблюдений и анализа характера отражения света ранее в Узбекистане не решалась. Для решения данной задачи Андижанско-Наманганский научный центр имеет в своем распоряжении 300 мм телескоп рефлектор Андижанской обсерватории и 600 мм телескоп Цейсса Майданакской высокогорной обсерватории. Для получения фотометрических ПЗС-изображений приобретена профессиональная цифровая фотокамера «Nikon 40d» с возможностью получения цифровых изображений в форматах RAW и FITS, необходимых для корректной обработки наблюдательных данных. Для обработки и анализа наблюдательных данных приобретена унифицированная система обработки астрономических данных – программный комплекс IRIS.

В ходе выполнения проекта планируется экспериментально исследовать широтную зависимость яркости лунной поверхности при больших углах фазы в различных участках спектра с целью уточне-

ния фазовой зависимости фактора гладкости и, вообще, проверки применимости существующих законов отражения при больших фазовых углах. Основываясь на более точных наблюдениях различных лунных образований в разных участках спектра, а также результатах индикатометрических измерений образцов, уточнить и, по возможности, разделить влияние, оказываемое рельефом и альбедо на фактор гладкости лунной поверхности.

Работа выполнена в рамках гранта Ф2-ФА-0-53613Ф2-ФА-Ф042 фундаментальных исследований Академии Наук РУз «Разработка методики исследования физических свойств поверхности Луны с помощью фотометрических наблюдений и анализа характера отражения света».

Литература:

1. Кайдаш В.Г., Герасименко С.Ю., Шкуратов Ю.Г., Опанасенко Н.В., Великодский Ю.И., Корохин В.В. Картирование вариаций фотометрической функции видимого полушария Луны // Астрономический вестник. -2009. –Т.43, № 2. –С.99-109

2. Velikodsky Yu.I., Volvach Ya.S., Korokhin V.V., Shkuratov Yu.G., Kaydash V.G., Opanasenko N.V., Muminov M.M., Kahharov B.B. Phase Curve of Lunar Color Ratio // Lunar and Planet. Sci. Conf. 42-nd. March 7–11, 2011. Abstract # 2060. LPI Houston, USA.

3. Акимов Л.А. Отражение света Луной. II // Кинематика и физика небесных тел. –1988. –Т.4, № 2. – С.10-16.

Андижон давлат университети
Харьков давлат университети
2015 йил 6 майда қабул қилинган
(Тақризчи: ф-м.ф.н. О.Бурхонов)