

УДК 523.3/4

Отражение света Луной. II

Л. А. АКИМОВ

Рассмотрены общие закономерности в поведении фазовой функции яркости лунных образований на основе данных опорного каталога оптических характеристик избранных участков лунной поверхности. Исследована зависимость фазовой функции от альбедо. Обсуждается природа оппозиционного эффекта. Показано, что экспоненциальный вид фазовой функции при малых углах фазы — следствие распределения Пуассона случайных значений параметров, формирующих фазовую функцию. Рассмотрены характерные размеры, влияющие на формирование закона отражения света шероховатой поверхностью. Дана интерпретация фазовой кривой контраста между морскими и материковыми участками.

LIGHT REFLECTION BY THE MOON. II, by Akimov L. A.— General regularities in the behaviour of the phase function of the brightness of lunar features are studied on the basis of the fundamental catalogue of optical characteristics of the Moon selected regions. The dependence of the phase function upon the albedo is investigated. The nature of the opposition effect is discussed. It has been found that the exponential form of the phase function at small phase angles is a consequence of the Poisson distribution of random values of the parameters which form the phase function. The characteristic sizes effecting the light reflection law of a rough surface are discussed. The interpretation of the contrast phase curve between maria and continents is given.

Введение. На основе данных опорного каталога оптических характеристик 255 участков лунной поверхности и индикатометрических измерений различных образований исследуется закон отражения света Луной. Предполагается, что яркость лунной поверхности с точностью до постоянного множителя можно описать следующим выражением:

$$B(\lambda, \varphi, \alpha) = \rho(\alpha_0) f(\alpha) \psi(\lambda, \varphi, \alpha), \quad (1)$$

где $\rho(\alpha_0)$ — видимое альбедо исследуемой области при стандартном угле фазы α_0 ; $f(\alpha)$ — фазовая зависимость яркости этой области, если бы она находилась в зеркальной точке на диске, где угол падения света i равен углу отражения e и половине фазового угла α ; λ — фотометрическая долгота, а φ — фотометрическая широта исследуемой площадки; $\psi(\lambda, \varphi, \alpha)$ — распределение яркости по диску однородной Луны относительно зеркальной точки.

Первая часть статьи [3] посвящена исследованию $\psi(\lambda, \varphi, \alpha)$. В ней показано, что влияние достаточно пологого мезорельефа на распределение силы света отраженного излучения по диску описывается выражением

$$I = j + \overline{\delta^2} (2j + \nabla^2 j) / 4, \quad (2)$$

где $j(\lambda, \varphi, \alpha)$ — сила света отраженного излучения от ровной площадки; $\overline{\delta^2}$ — средний квадратичный наклон поверхности относительно средней плоскости, обусловленный мезорельефом.

Поверхность планеты предполагается настолько неровной, что дополнительное крупномасштабное достаточно пологое волнение уже не в состоянии изменить относительное распределение яркости по диску. Из этого предположения следует, что добавка к прежней силе света в формуле (2) с точностью до постоянного множителя равна самой силе света.

Таким образом, мы получили дифференциальное уравнение, для которого решение задачи Штурма — Лиувилля приводит к тому, что распределение яркости по диску относительно зеркальной точки для такой планеты описывается выражением

$$\psi(\lambda, \varphi, \alpha) = \cos(\alpha/2) (\cos \varphi)^{\alpha/(\pi-\alpha)} \cos[\pi(\lambda - \alpha/2)/(\pi - \alpha)]. \quad (3)$$

Эта формула [3] лучше других, предложенных ранее, описывает относительное распределение яркости по диску Луны.

Зависимость фазовой функции яркости от альbedo. Из рисунков 3, 4 [3] видно, что контраст между морскими и материковыми участками (в данном случае они разбиты на две категории лишь по отражательной способности) изменяется с изменением угла фазы. Наша цель — исследовать возможность получения по фазовой зависимости яркости характеристик поверхности, зависящих от ее строения, структуры частиц и, по возможности, не зависящих от альbedo, для получения которого нет необходимости проводить трудоемкие измерения фазовой функции. Поэтому следующим шагом при обработке результатов наблюдений было исследование зависимости фазовой функции

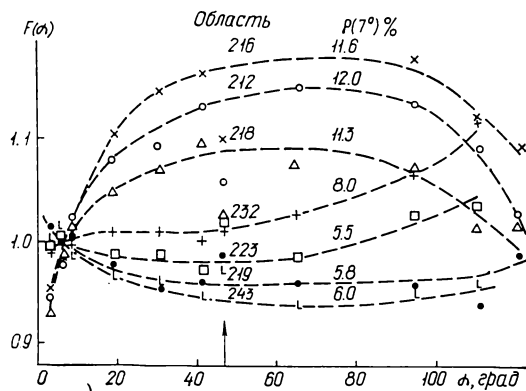
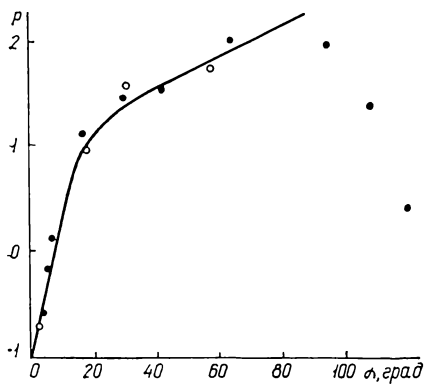


Рис. 1. Зависимость контраста между светлыми и темными участками от угла фазы. Сплошная кривая — результат расчета по формуле (11)

Рис. 2. Отклонение индивидуальных фазовых кривых яркости от средней для некоторых областей. Для угла фазы 47° проведен учет зависимости контраста от альbedo. Отклонение точек соответствующей области от кривой для этой области при $\alpha = 47^\circ$ есть поправка за альbedo

от альbedo. Для этого построены графики, на которых по оси абсцисс отложено альbedo, а по оси ординат — отклонение фазовой функции от среднего значения для точек, удаленных от экватора не более, чем на 30° (чтобы не учитывать широтный эффект). По этим данным найдена такая линейная часть зависимости контраста от альbedo, чтобы фазовую функцию отдельной точки можно было описать выражением

$$f(\alpha, \rho) = \overline{f(\alpha)} + p(\alpha)(\rho - \overline{\rho})\overline{f(\alpha)}, \quad (4)$$

где $\overline{f(\alpha)}$ и $\overline{\rho}$ — средние значения фазовой функции и альbedo; ρ — альbedo исследуемого района; p — коэффициент, зависящий от угла фазы, значения которого представлены на рис. 1. Светлыми кружками нанесены значения, полученные для углов фазы перед полнолунием, темными — посл. Сплошная кривая — результат модельного расчета. На кривой контраста хорошо выделяются три области. Резкое, почти линейное увеличение контраста в оппозиционной части ($\alpha < 15^\circ$), плавное, почти линейное увеличение контраста при $20^\circ < \alpha < 80^\circ$ и нелинейное уменьшение контраста при $\alpha > 90^\circ$. Такое поведение свидетельствует о наличии трех существенных механизмов формирования фазовой зависимости яркости лунной поверхности.

Фазовая зависимость яркости. На рис. 2 представлены данные для некоторых точек, характеризующие отклонение индивидуальных фазовых кривых от средней без учета зависимости от альbedo. Учет этой зависимости, выполненный для угла фазы $\alpha = 47^\circ$ (на рис. 2 отмечен стрелкой), приводит к значительному уменьшению различий кривых. Так, области 218, 223, 232, первоначально занимавшие 10 %-ный коридор, по фазовой зависимости яркости стали практически одинаковыми.

Предварительным сопоставлением отклонений индивидуальных фазовых кривых от средней с возрастом лунной поверхности обнаружена корреляция. Так, западная часть Океана Бурь, материковое окружение Моря Восточного, имеют более пологую фазовую функцию, юго-восточные и центральные материки, Моря Влажности и Спокойствия — более крутую. Но различия фазовых кривых яркости, вызванные различием альbedo или положением на диске (если не учитывать зависимость от фотометрической широты), больше, чем обусловленные возрастом. Отметим, что картирование такой

характеристики по фотографическим измерениям весьма затруднительно из-за недостаточной точности измерений (после учета распределения яркости по широте и влияния альbedo средний квадратичный разброс фазовых кривых относительно средней для углов фазы меньше 1 рад, не превышает 5 %).

Подробный сравнительный анализ фазовых кривых всех 255 участков поверхности — тема отдельного исследования. Здесь же рассмотрим общие физические причины, влияющие на формирование фазовой зависимости яркости, т. е. основу для сравнительного анализа.

Теоретический расчет рассеяния света на такой сложной поверхности, как лунная, — весьма трудная задача. Можно отметить несколько характерных величин, влияющих на формирование закона отражения света от такой поверхности: $\tilde{\lambda}$ — длина волны освещающего света; l_0 — радиус области когерентности, зависит от длины волны падающего излучения и углового распределения яркости по источнику освещения; d — характерный диаметр частиц поверхности; l — радиус эффективной площадки, из которой выходит рассеянный поток света, упавшего в точку на поверхности. Эта величина характеризует диффузию излучения в рассеивающем слое и зависит от коэффициента поглощения света в частице, коэффициента отражения от ее границы, от расстояния между рассеивающими поверхностями; L — верхняя граница неровностей, которые мы относим к микрорельефу.

Первые две величины характеризуют источник света. По изменению рассеивающих свойств среды при изменении этих величин можно судить об абсолютных значениях характерных неоднородностей поверхности. Для Луны $d \approx 50$ мкм, $l_0 \approx d/2$, $l \approx 3d$, $L \approx 100 d$.

Соотношение между l и d контролирует альbedo поверхности. Увеличение отражательной способности рассеивающего слоя можно получить увеличением показателя преломления, уменьшением показателя поглощения и уменьшением размеров частиц. Влияние когерентности облучающего света, на что обращалось внимание в [7], приводит к увеличению яркости в полнолуние, что может внести существенный вклад в опозиционный эффект.

Соотношение между L и d характеризует степень сложности микрорельефа, диапазон его неровностей, а соотношение между L и l — степень воздействия неровностей рельефа на закон отражения света от поверхности. Чем больше это отношение, тем больше влияние затенения и тем менее существен конкретный вид индикатрис рассеяния света от элемента радиусом l при формировании относительного распределения яркости по диску планеты (если поверхность достаточно темна, чтобы многократным отражением света между такими элементами можно было пренебречь). Яркость при $L/l \gg 1$ можно представить произведением двух функций:

$$B(\lambda, \varphi, \alpha) = T(\lambda, \varphi, \alpha) \Phi(\alpha). \quad (5)$$

Функция $T(\lambda, \varphi, \alpha)$ определяется строением поверхности, вероятностью того, что данная площадка видна и освещена одновременно; несет информацию лишь о геометрическом строении поверхности, и если альbedo достаточно мало, то распределение яркости по диску не зависит от физических свойств грунта. Функция $\Phi(\alpha)$ — усредненная индикатриса отражения света от элемента размером l при всех возможных ориентациях его; несет информацию об альbedo, поляризации и в значительной мере об опозиционном эффекте, т. е. о физических свойствах грунта.

В свою очередь $T(\lambda, \varphi, \alpha)$ можно представить произведением двух отдельно зависящих от координат и угла фазы функций

$$T(\lambda, \varphi, \alpha) = S(\alpha) \psi(\lambda, \varphi, \alpha). \quad (6)$$

Свойства функции $\psi(\lambda, \varphi, \alpha)$ мы исследовали в [3] и получили для нее выражение (3).

Исходя из выражений (1) и (5), (6), находим

$$\rho f(\alpha) = S(\alpha) \Phi(\alpha). \quad (7)$$

Из известных астрономам характеристик небесных тел функция $\Phi(\alpha)$ по физическому смыслу наиболее близко соответствует интегральной яркости шероховатой планеты с неровностями, размер которых меньше l . Функция $S(\alpha)$ учитывает затенение микро-

рельефом в диапазоне размеров неровностей от l до L . Замечательной особенностью отражения света от сложных поверхностей является опозиционный эффект.

В настоящее время в понимании причин, приводящих к концентрации отраженного света на источник, наметились два подхода. Обычно обсуждаются концентрации теневая, вызванная взаимным экранированием в слое взвешенных частиц, достаточно удаленных друг от друга, и оптическая, вызванная фокусировкой, глорией, интерференцией лучей в области когерентности и т. д. Первый подход рассмотрен в [5, 9—11], в том числе и в модели Б. Хапке. Оптическая концентрация обсуждалась в [12, 13],

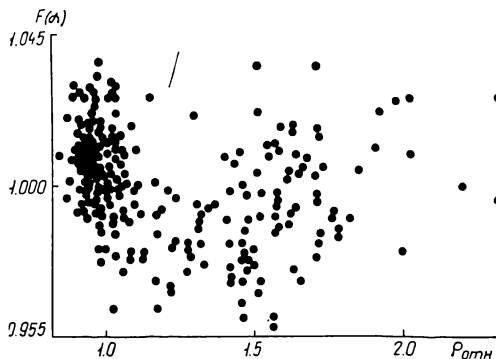
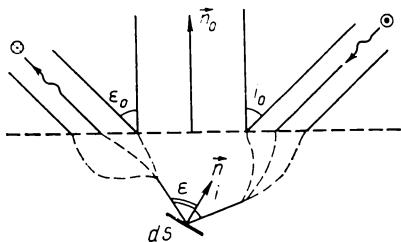


Рис. 3. Модель рассеяния света лунной поверхностью

Рис. 4. Отклонение от среднего значения фазовой функции яркости при $\alpha = 12^\circ$ в зависимости от альbedo для синей области спектра. Альbedo кратера Лемонье принято за единицу

в последнее время — в работах сотрудников Харьковской обсерватории [1, 4, 6, 7]. Механизмы формирования опозиционного эффекта довольно разнообразны.

Однако можно показать, что при определенных статистических характеристиках физического состояния рассеивающего поверхностного слоя результат воздействия некоторых из этих механизмов описывается одинаковыми математическими выражениями, отличающимися физическим смыслом входящих в них параметров. Пусть на поверхность, в среднем плоскую, (рис. 3) падает свет под углом i_0 в азимуте A_1 . На некотором расстоянии z от средней плоскости расположена рассеивающая свет площадка ds , на которую падает излучение под углом i в азимуте a_1 из телесного угла $d\omega_1$, и создает освещенность

$$dE = E_0 b(i_0, A_1, i, a_1) \cos i d\omega_1, \quad (8)$$

где $b(i_0, A_1, i, a_1)$ — распределение яркости «по небу», видимое из элемента ds ; E_0 — нормальная освещенность поверхности. Элементарная площадка рассеивает падающее на нее излучение под углом ϵ в азимуте a_2 . Функция $r(i, \epsilon, a_1, a_2)$ характеризует распределение этого излучения по углам. Выходящее вновь в пространство излучение под углом ϵ_0 в азимуте A_2 описывается распределением яркости «по небу» $b(\epsilon_0, A_2, \epsilon, a_2)$, видимым из элемента ds , если свет падает на среднюю плоскость под углом ϵ в азимуте A_2 .

Для всего излучения интенсивность

$$I(\epsilon_0, A_2, i_0, A_1) = \int_{a_1=0}^{2\pi} \int_{a_2=0}^{2\pi} \int_{i=-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\epsilon=-\pi/2}^{\pi/2} E_0 b(i_0, A_1, i, a_1) r(i, \epsilon, a_1, a_2) \times \\ \times b(\epsilon_0, A_2, \epsilon, a_2) \cos i \cos \epsilon \sin i \sin \epsilon di da_1 da_2, \quad (9)$$

а средняя интенсивность есть математическое ожидание I , где усреднение ведется по ансамблю при различных глубинах расположения элементарной площадки ds , ее наклона, отражательной способности и т. д.

Для выяснения физической сути явления сделаем некоторые упрощения. Предположим, что элемент ds отражает свет ортотропно, т. е. $r(i, \epsilon, a_1, a_2)$ — постоянная величина ρ . Тогда выражение (9) можно представить произведением двух интегралов,

зависящих лишь от направления падающего и отраженного излучений. Средняя интенсивность выразится формулой

$$\bar{I} = E_0 M [\rho \chi(\epsilon_0, A_2) \chi(i_0, A_1)], \quad (10)$$

где $\chi(i_0, A_1)$ — суммарная освещенность элемента ds , зависящая от направления падающего луча, ориентации площадки, ослабления света на пути к ней; $\chi(\epsilon_0, A_2)$ — такая же функция своих аргументов. Для зеркальной точки ($A_1 = A_2$, $i_0 = \epsilon_0 + \alpha$) интенсивность отраженного излучения является автокорреляционной функцией суммарной освещенности площадки.

Пусть над площадкой расположены полупрозрачные образования, которые могут создавать неоднородности ее освещенности в зависимости от направления падающего излучения. Тогда амплитуда неоднородностей освещенности будет задавать мощность, а угловая ширина — характерный угловой размер оппозиционного пика. Если площадка расположена на изрытой поверхности, то освещенность на ней в зависимости от угла падения описывается некоторой ступенчатой функцией. Ширина импульсов зависит от взаимного расположения частиц рельефа и представляет собой угол, в котором площадка открыта во внешнее пространство. Величина этого угла случайна. Понятно, что если интегральные характеристики случайных процессов одинаковые для фокусировки и затенения, то мы получим одинаковые автокорреляционные функции. Если случайный процесс в обоих случаях подчиняется распределению Пуассона, что наиболее вероятно, то для фазовой кривой яркости (по крайней мере при малых углах фазы) получим экспоненциальную зависимость, в которой множитель в показателе экспоненты при фазовом угле — величина, обратная характерному угловому размеру неоднородностей освещенности элементарной площадки.

Эти соображения, как и данные [6], могут служить некоторым обоснованием предложенной в [2] эмпирической формулы, которая будет использоваться в дальнейшем для интерпретации результатов наблюдений.

$$\rho(0) f(\alpha) = m \exp(-\mu\alpha) + g \exp(-\gamma\alpha), \quad (11)$$

где первое слагаемое описывает в основном влияние затенения на фазовую функцию, второе — оппозиционный эффект. Характерные значения параметров для кратера Лемонье в зеленой области спектра: $\rho(0) = 0.091$, $m = 0.061$, $g = 0.03$, $\mu = 0.75$, $\gamma = 14$. Выражения (7) и (11) можно привести в соответствие между собой, если $\Phi(\alpha)$ представить суммой медленно и быстро изменяющихся составляющих. Здесь $\rho(0) = m + g$ — нормальное альbedo; g — интенсивность оппозиционного пика; $1/\gamma$ — эффективная угловая ширина оппозиционного пика; μ — характеризует затенение неровностями и зависит от строения поверхности (величина μ определяется отношением средней высоты неровностей к среднему расстоянию между ними, если частицы поверхности темные и непрозрачные). Если альbedo велико, частицы прозрачны, то наблюдается засветка теней. Влияние засветки эквивалентно некоторому эффективному уменьшению высоты неровностей, зависящему от альbedo, что приводит к уменьшению коэффициента μ . Это уменьшение в первом приближении можно попытаться учесть линейной зависимостью $\mu = h - \zeta m$, где h — значение μ для темной поверхности.

Если подобным образом объяснить поведение кривой контраста материк — море (рис. 1) в области углов фазы от 20 до 80°, то получим значение $\zeta = 1.17$. Для образца Fe_2O_3 , о котором шла речь в [3], по фазовому изменению цвета $\zeta = 1.39$. У лунного грунта из Моря Изобилия [8] по измерениям в синей и красной областях спектра $\zeta = 1.16$. У грунта, доставленного станцией «Луна-20» [8], $\zeta = 1.43$. В дальнейшем в моделях примем значение $\zeta = 1.3 \pm 0.13$. Использование формулы (11) для описания фазовой зависимости яркости в сочетании с формулой (3) для относительного распределения яркости по диску позволило вполне удовлетворительно описать интегральные и поверхностные фотометрические наблюдения Луны [2]. С помощью этих формул с учетом зависимости μ от альbedo получена кривая контраста материк — море (рис. 1, сплошная линия). При этом для материков $m = 0.12$, $h = 0.94$, $g = 0.05$, $\gamma = 14$; для морей $m = 0.068$, $h = 0.92$, $g = 0.037$, $\gamma = 12$. Наклон кривой при $\alpha > 20^\circ$ задается коэффициентом $\zeta = 1.3$.

Падение контраста материк — море при $\alpha > 80^\circ$ можно было бы полностью объяснить влиянием мезорельефа, более сильным на материках. Однако отношение яркости в красной области спектра к яркости в синей для образца Fe_2O_3 тоже достигает мак-

симума при $\alpha \approx 90^\circ$. При больших углах фазы это отношение уменьшается, хотя и в меньшей степени, чем для контраста материк — море. Такое поведение объясняется, по-видимому, относительным уменьшением вклада света, рассеянного в слое частиц, по сравнению с излучением, отраженным от поверхности слоя. Таким образом, поведение контраста при $\alpha > 80^\circ$ вызвано влиянием мезорельефа и альbedo. Разделение вклада обоих механизмов требует дальнейшего специального исследования рассеяния света шероховатой поверхностью при больших углах фазы.

Как следует из рис. 1, относительная величина оппозиционного пика в красной области спектра для морей выше, чем для материков. В синей области спектра наблюдается другая картина. На рис. 4 приведена диаграмма, на которой по оси абсцисс отложена относительная яркость в полнолуние при $\alpha = 1.3^\circ$ (яркость Лемонье принята за единицу), а по оси ординат с точностью до постоянного множителя — отношение яркости при $\alpha = 12^\circ$ к яркости в полнолуние. Зависимость видимого альbedo от положения точки на диске исключалась формулой (3).

У большинства темных морей и молодых кратеров (Тихо, Коперник) оппозиционный пик в синей области спектра меньше, чем у светлых морей и темных материков — наиболее древних образований лунной поверхности. В [8] показано, что лунный грунт из Моря Изобилия имеет максимальный оппозиционный пик в красной области спектра, а материковый грунт — в синей. Рисунки 1 и 4 свидетельствуют о том, что этот эффект наблюдается по телескопическим данным и позволяет проследить зависимость данного явления от альbedo. При использовании оппозиционной части фазовой кривой яркости для районирования лунной поверхности необходимо учитывать зависимость оппозиционного эффекта от альbedo. По-видимому, относительный оппозиционный пик максимален, когда нормальное альbedo составляет 9—10%. В этом случае основной вклад в рассеянное излучение дают первые два — три слоя частиц лунного грунта. Эти условия наиболее благоприятны для оптической концентрации отраженного света на источник.

Из формулы (10) следует, что любая угловая неоднородность в освещенности элементарной площадки, вызванная затенением, фокусировкой, отражением от граней и т. д., приводит к оппозиционному увеличению яркости. Поэтому связывать оппозиционный эффект с пористостью отражающего слоя имеет смысл лишь для совершенно темной поверхности. Мы не касались интерференционных явлений, существующих при рассеянии света поверхностным слоем. Следует отметить, что ожидаемый вклад в оппозиционный эффект, как и в случае фокусировки и глорни, в значительной мере зависит от прозрачности и размера частиц, поскольку интерференционные явления лишь усиливают действие других механизмов (за исключением затенения), если расстояние между входящим и выходящим лучами находится в пределах области когерентности.

Краткое перечисление механизмов формирования оппозиционного эффекта свидетельствует о том, насколько сложна и многообразна природа этого явления. При низком альbedo велика роль затенения. При высоком альbedo основное значение приобретает фокусировка, глория, интерференционные эффекты. Для лунной поверхности ($\rho(0) \approx 10\%$), когда в рассеянии участвуют два — три слоя частиц, пренебречь чем-либо нельзя. Таким образом, пока нет законченной теории оппозиционного эффекта, полагаем, что все разнообразие оптических свойств рассеивающего слоя сводится к вариациям параметров m , g , h и γ , при этом g и γ определяются целым спектром физических явлений.

1. Акимов Л. А. О природе оппозиционного эффекта // Вестн. Харьков. ун-та.— 1980.— Вып. 15, № 204.— С. 3—12.
2. Акимов Л. А. Изменение яркости лунных образований с фазой // Там же.— 1982.— Вып. 17, № 232.— С. 12—22.
3. Акимов Л. А. Отражение света Луной. I // Кинематика и физике небес. тел.— 1987.— 4, № 1.— С. 3—10.
4. Грецкий А. М. Некоторые результаты спектрофотометрии колец Сатурна // Вестн. Харьков. ун-та.— 1976.— Вып. 11, № 137.— С. 21—31.
5. Морозенко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические свойства поверхностного слоя Луны // Астрон. журн.— 1971.— 48, вып. 1.— С. 172—183.
6. Шкуратов Ю. Г. Модель оппозиционного эффекта яркости безатмосферных космических тел // Там же.— 1983.— 60, вып. 5.— С. 1005—1008.
7. Шкуратов Ю. Г. О природе оппозиционного эффекта яркости и отрицательной поляризации света твердых космических поверхностей // Астрон. циркуляр.— 1985.— № 1400.— С. 3—6.

8. Akimov L. A., Antipova-Karataeva I. I., Shcuratov Yu. G. Indicatrix measurements of the lunar soil Luna-24, Luna-16, Luna-20 // Lunar and Planetary Sci. Conf. (abstrs).—Houston: LPI/USRA press, 1979.—P. 9—12.
9. Hapke B. W. A theoretical function for the lunar surface // J. Geophys. Res.—1963.—68, N 15.—P. 4571—4586.
10. Irvine W. M. The shadowing effect in diffuse reflection // Ibid.—1966.—71, N 12.—P. 2931—2937.
11. Lumme K., Howell E. Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies // Astron. J.—1981.—86, N 11.—P. 1705—1721.
12. O'Keefe J. Lunar rays (notes) // Astrophys. J.—1957.—126, N 2.—P. 466.
13. Trowbridge T. S. Retroreflection from rough surfaces // J. Opt. Soc. Amer.—1978.—68.—P. 1225—1242.

Астрон. обсерватория
Харьков. ун-та им. А. М. Горького

Поступила в редакцию 22.10.86,
после доработки 17.06.87

РЕФЕРАТ ДЕПОНИРОВАННОЙ РУКОПИСИ

УДК 521.9

ОБ ОДНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВИДИМЫХ МЕСТ ЗВЕЗД /Заливадный Н. М.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 7075-В87)

Описана методика вычисления на ЭВМ видимых мест звезд в системе каталога FK5. Используются новые значения постоянных аберрации, прецессии и новая теория нутации МАС (1980). Учтены поправки за гравитационное отклонение света.

Постановка настоящей работы вызвана тем, что с 1 января 1984 г. службы времени и широты выполняют обработку своих наблюдений на основе новых постоянных, новой системы координат и новой методики вычисления видимых мест звезд. Применена схема вычисления видимых мест звезд в прямоугольной системе координат с использованием в качестве промежуточного этапа преобразования в координатной системе эклиптики и переходом в конце вычислений к сферическим экваториальным координатам на момент наблюдения. Исключен промежуточный этап вычисления среднего места звезды на начало года.

Процедура учета звездной аберрации проводится в эклиптической системе на основе компонентов полной скорости Земли относительно барицентра Солнечной системы, отнесенных к среднему равноденствию даты. Приведены численные значения поправок к компонентам гелиоцентрической скорости Земли в системе эклиптики за приведение к центру масс Солнечной системы. Единственным аргументом для вычисления видимых мест звезд принято время t , выраженное в юлианских столетиях от стандартной эпохи $J 2000.0$. Вычисленные по данной методике видимые места звезд имеют точность выше $0.001''$ по прямому восхождению и $0.01''$ по склонению. Методика вычисления видимых мест звезд практически использована для обработки рядов наблюдений на зенит-телескопах и призмной астролэбии в Полтавской гравиметрической обсерватории.