



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 12 • № 2 • 2016 С. 111 – 115

УДК 523.45-87-352

## Сравнительный анализ фотометрических параметров поверхностей галилеевых спутников Юпитера

В.И. Шавловский

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, г. Киев

*Получены модельные параметры Хапке ( $\omega$ ,  $g$ ,  $h$  и  $B_0$ ) отдельно для ведущего и ведомого полушарий галилеевых спутников Юпитера с использованием наземных узкополосных фотоэлектрических наблюдений. Значения полученных параметров подтверждают существование полусферных дихотомий фотометрических характеристик поверхностей галилеевых спутников. Полученные величины полуширины на полумаксимуме (HWHM) оппозиционного пика доказывают, что оппозиционный эффект Ио и Европы обусловлен обратнокогерентным рассеянием.*

*ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ГАЛІЛЕЄВИХ СУПУТНИКІВ ЮПІТЕРА, Шавловський В.І. — Отримано модельні параметри Хапке ( $\omega$ ,  $g$ ,  $h$  і  $B_0$ ) окремо для передньої та задньої півкулі галилеевих супутників Юпітера з використанням наземних вузькополосних фотоелектричних спостережень. Значення отриманих параметрів підтверджують існування дихотомій фотометричних характеристик поверхонь передніх та задніх півкуль галилеевих супутників. Отримані значення напівширини на напівмаксимумі (HWHM) опозиційного піка доводять, що опозиційний ефект Іо та Європи зумовлений зворотньокогерентним розсіюванням.*

*A COMPARATIVE ANALYSIS OF PHOTOMETRIC PARAMETERS OF THE JUPITER GALILEAN SATELLITES' SURFACES, by Shavlovskij V.I. — The Hapke's model parameters ( $\omega$ ,  $g$ ,  $h$  and  $B_0$ ) were obtained separately for leading and trailing hemispheres of the Galilean satellites of Jupiter by using the ground-based narrow band photoelectric observations. The values of the obtained parameters confirm existence of hemispherical dichotomies in the photometric characteristics of Galilean satellites surfaces. The obtained values of the half-width at the half-maximum (HWHM) of the opposition peak prove that the opposition effects of Io and Europa are caused by coherent backscattering.*

**Ключевые слова:** галилеевы спутники; модельные параметры Хапке; полусферные дихотомии; обратнокогерентное рассеяние.

**Key words:** Galilean satellites; Hapke's model parameters; hemispherical dichotomies; coherent backscattering.

На протяжении ряда лет многие авторы [4, 5, 7] использовали фотометрические наблюдения галилеевых спутников Юпитера для определения таких физических свойств поверхностей безатмосферных небесных тел как пористость, шероховатость, размер частиц поверхностного слоя, их распределение по размерам. Обычно для этого используется теория Хапке [8, 9, 10], которая связывает параметры солнечной фазовой функции с физическими характеристиками поверхностного слоя. Однако характеристики ведущего и ведомого полушарий Ио, Европы, Ганимеда, Каллисто, полученные в рамках теории Хапке, плохо согласуются между собой. Это обусловлено малым количеством наблюдений вблизи оппозиции, разнородностью используемых данных, формальной процедурой разделения солнечных и орбитальных вариаций яркости.

На протяжении ряда лет автором был получен обширный набор однородных высокоточных фотометрических наблюдений галилеевых спутников в 11 участках спектра. Использование этих наблюдений и наблюдений [16], которые содержат заметное количество измерений вблизи оппозиции, позволило надежно определить значения параметров солнечных фазовых функций противоположных полушарий галилеевых спутников Юпитера Каллисто и Европа для нескольких участков спектра.

В фотометрической модели Хапке предполагается, что для описания рассеивающих свойств поверхности со сложной пористой структурой можно использовать приближение геометрической оптики. Однократное рассеяние света такой поверхностью определяется строго с учетом затенения. Рассеяние высших порядков учитывается приближенно (предполагается изотропным). Предполагается также, что оппозиционный эффект яркости, который наблюдается при малых фазовых углах, возникает из-за резкого ослабления взаимного затенения частиц. В последнем варианте модели Хапке [10] при этом учитывается и возможное распределение частиц по размерам. Кроме того, в модели Хапке [9] принимается во внимание влияние макрорельефа поверхности (в масштабе сантиметров–метров) на отраженное излучение.

Шавловский Виталий Иванович; ✉ svitaly@mao.kiev.ua

Вісник Астрономічної школи, 2016, том 12, № 2

111

Исходя из вышеуказанных предположений, Хапке получил для интегральной фазовой зависимости яркости диска планеты с гладкой поверхностью выражение

$$\Phi(\alpha) = \frac{1}{A_r} \left\{ \left[ \frac{\omega}{8} [(1+B(\alpha))P(\alpha) - 1] + \frac{r_0}{2} (1-r_0) \right] \times \left[ 1 - \sin \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \ln \left( \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \frac{2}{3} r_0^2 \frac{\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cos \alpha}{\pi} \right\}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — альbedo однократного рассеяния частицы;  $A_r$  — геометрическое альbedo поверхности.

Функция  $P(\alpha)$  в выражении (1) описывает среднюю индикатрису рассеяния отдельной частицы, для которой использовано представление Хеньи–Гринштейна с использованием параметра  $g$ , характеризующего вытянутость индикатрисы. Значения параметра  $g$  могут изменяться в пределах от  $-1$  до  $+1$ ; отрицательные и положительные значения  $g$  означают, что частица рассеивает больше света соответственно назад или вперед. Если  $g = 0$ , то речь идет об изотропном рассеянии.

Функция обратного рассеяния (теневая функция)  $B(\alpha)$  в выражении (1) в последней модификации модели Хапке [10] зависит от параметров  $B_0$  и  $h$ , которые определяют соответственно амплитуду и угловую полуширину оппозиционного эффекта яркости.

При этом для корректного учета орбитальных вариаций яркости автором была предложена четырех-параметрическая фотометрическая модель (в рамках теории Хапке) [8, 9, 10] для ведущего и ведомого полушарий галилеевых спутников Юпитера: Ио, Европы, Ганимеда, Каллисто. Создан пакет программного обеспечения для разделения солнечных и орбитальных вариаций отражательной способности безатмосферных поверхностей спутников с одновременным подбором фотометрических параметров для противоположных полушарий спутников.

Суть предложенного подхода заключается в следующем [3, 13, 14, 15]. Поверхности ведущего и ведомого полушарий отличаются по своим свойствам. Поэтому для каждого полушария принимается отдельный набор параметров. Вклад каждого полушария в общий поток отраженного от поверхности излучения изменяется пропорционально проекциям площадей полушарий на картинную плоскость. Он может быть вычислен по уравнениям теории Хапке для принятых наборов параметров и значений солнечного и орбитального углов на момент наблюдений. Значения параметров для каждого полушария были определены из условия наилучшего согласия модельных и наблюдаемых значений отражательной способности. Процедура подбора параметров была облегчена тем, что непосредственно из наблюдений вблизи оппозиции удалось определить значения геометрического альbedo каждого полушария.

Используя долговременные фотометрические наблюдения автора и Thompson et al [16], для солнечных фазовых углов  $0^\circ - 12^\circ$  в длинах волн 0,346, 0,470, 0,540, 0,792 мкм, получены параметры Хапке (альbedo однократного рассеяния  $\omega$ , фактор асимметрии  $g$  индикатрисы Хеньи–Гринштейна, полуширина  $h$  и амплитуда  $B_0$  оппозиционной волны) фазовых функций для ведущего и ведомого полушарий Каллисто, которые представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Расчетные параметры для поверхности Каллисто

Полушарие Каллисто	$B_0$	$h$	$\omega$	$g$	$\lambda$ , мкм
Ведущее	0,900	0,020	0,350	-0,225	0,346
	0,925	0,025	0,400	-0,275	0,540
	1,000	0,040	0,450	-0,200	0,792
	0,950	0,030	0,337	-0,300	0,470
	0,900	0,030	0,375	-0,300	0,550
	0,925	0,025	0,400	-0,275	0,540
Ведомое	0,800	0,055	0,450	-0,150	0,346
	0,975	0,045	0,500	-0,175	0,540
	0,800	0,045	0,600	-0,100	0,792
	0,975	0,055	0,400	-0,225	0,470
	0,900	0,045	0,450	-0,225	0,550
	0,900	0,045	0,500	-0,175	0,540

Полученные значения фотометрических параметров показывают, что поверхность ведущего полушария Каллисто [1, 2, 3, 13] состоит из частиц, имеющих более сильное обратное рассеяние и более пористое состояние чем поверхность ведомой стороны.

Наблюдательные данные и модельные кривые для 0,540 мкм представлены на рис. 1 и 2.

Как видно из рис. 3, фазовые функции с параметрами, определенными для длины волны 0,540 мкм по наземным наблюдениям в интервале фазовых углов  $1^\circ - 12^\circ$ , хорошо согласуются с фазовыми функциями для обоих полушарий, полученными для интервала фазовых углов  $10^\circ - 140^\circ$  по космическим наблюдениям Voyager. Это свидетельствует о корректности предложенной фотометрической модели, точности наблюдений и надежности определения параметров поверхности Каллисто по наземным исследованиям.

Значения полученных параметров подтверждают существование полушарной дихотомии фотометрических характеристик поверхности Ганимеда [14].

Полученные значения фотометрических параметров показывают, что поверхность ведущего полуша-

рия Ганимеда состоит из частиц, имеющих более сильное обратное рассеяние и более пористое состояние, чем поверхность ведомой стороны.

Величина альbedo однократного рассеяния  $\omega$  отдельной частицы поверхности и амплитуда оппозиционной волны  $B_0$  увеличиваются с увеличением длины волны [14].

Используя полученные нами солнечные фазовые функции для ведущего и ведомого полушарий Европы [15], мы получили значение полуширины оппозиционного эффекта на полумаксимуме оппозиционной амплитуды (HWHM) для двух длин волн. Величина HWHM ОЭ Европы для длины волны 0,47 мкм имеет значение 0,166° и 0,257° для ведущего и ведомого полушарий соответственно, и для длины волны 0,55 мкм — 0,171° и 0,260°.

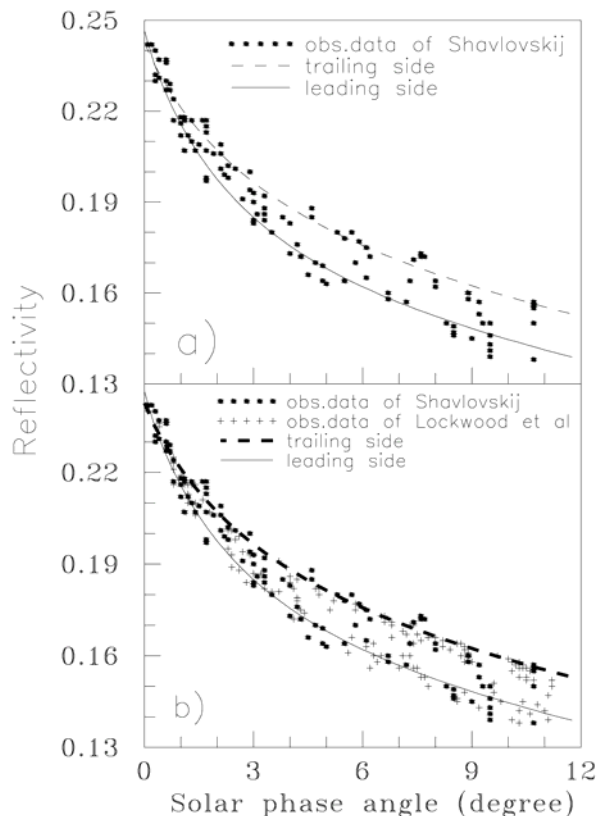
Полученные значения HWHM ОЭ Европы [15] хорошо согласуются с аналогичными величинами, полученными Dlugach and Mishchenko [6]. Mishchenko [11] показал, что величина HWHM когерентного ОЭ для поверхностей, покрытых водяными частицами субмикронных размеров, имеет значение порядка нескольких десятых долей градуса.

Полученные значения HWHM ОЭ Европы с использованием наземных наблюдательных данных Thompson, et al. [16] и предложенного нами метода разделения солнечных и орбитальных вариаций яркости с одновременным подбором параметров отдельно для ведущего и ведомого полушарий Европы показывают, что механизм обратногокогерентного рассеяния может быть использован для исследования ОЭ Европы [12, 15, 17].

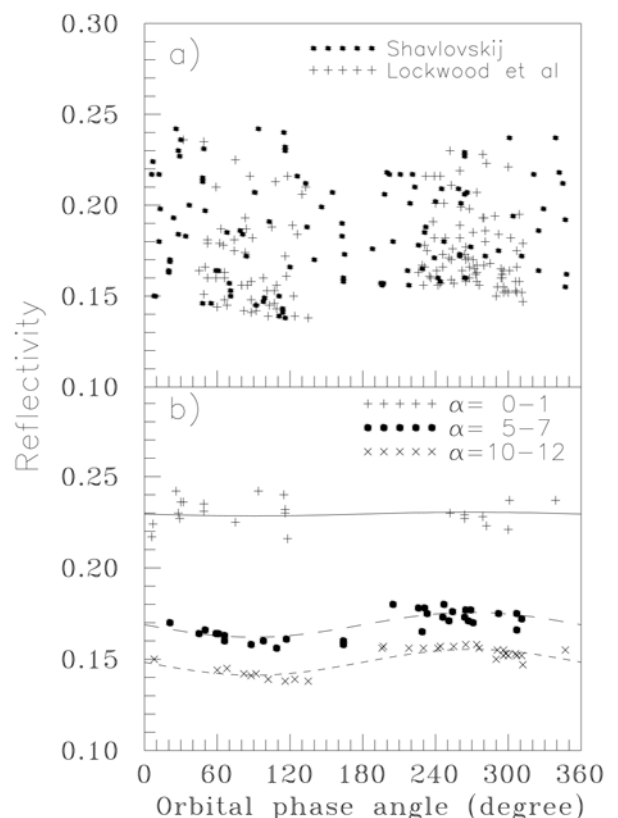
Полученные значения фотометрических параметров показывают, что поверхность ведущего полушария Европы состоит из частиц, имеющих более сильное обратное рассеяние и более пористое состояние, чем поверхность ведомого. Величина альbedo однократного рассеяния  $\omega$  отдельной частицы поверхности и амплитуда оппозиционной волны  $B_0$  практически одинаковы для обоих полушарий и в обоих длинах волн.

Используя полученные нами модельные фазовые функции для обоих полушарий Ио, мы определили значение полуширины на полумаксимуме (HWHM) оппозиционного эффекта (ОЭ) Ио [15].

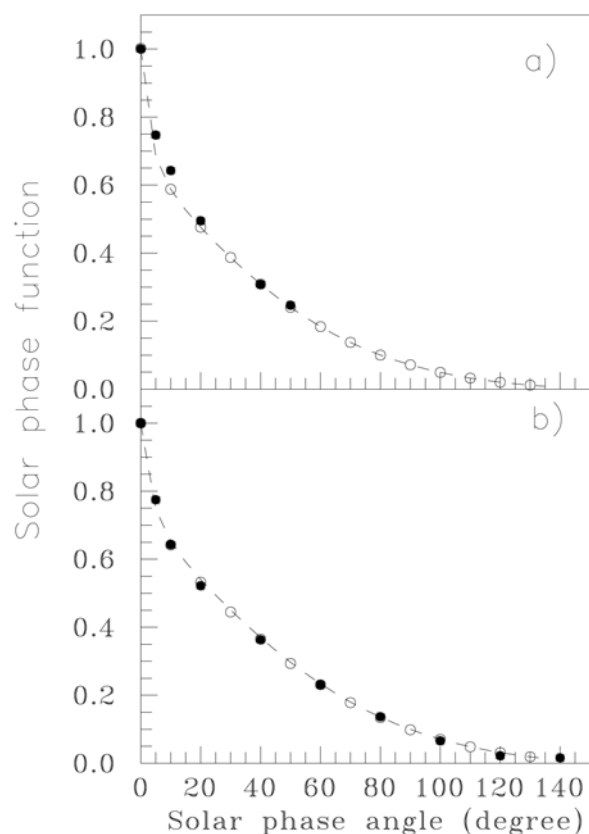
Для длины волны 0,54 мкм значения HWHM Ио равны 0,48° и 0,40° для ведущего и ведомого



**Рис. 1.** *a* — наблюдаемая отражательная способность (точки) Каллисто для 0,540 мкм как функция солнечного фазового угла. Модельная кривая показана непрерывной (ведущая сторона) и пунктирной (ведомая сторона) линиями; *b* — то же самое, что и *a*, но для более обширного набора наблюдений.



**Рис. 2.** Отражательная способность Каллисто для 0,540 мкм как функция орбитального фазового угла; *a* — общий набор наблюдательных данных; *b* — наблюдательные данные для нескольких фиксированных интервалов солнечного фазового угла и соответствующие модельные кривые.



**Рис. 3.** Солнечная фазовая функция в зависимости от солнечного фазового угла для ведущей (a) и ведомой (b) стороны Каллисто для 0,540 мкм. Модельные кривые показаны пунктиром. Их параметры получены по наблюдениям автора. Параметры модели, представленной светлыми кружками, основаны на совместных данных автора и Lockwood, et al. Данные по измерениям Voyager (темные кружки) показаны для сравнения.

полушария соответственно.

Mishchenko [11] показал, что НВНМ для когерентного ОЭ для частиц поверхности безатмосферного небесного тела, покрытых частицами водяного льда субмикронных размеров, составляет несколько десятых долей градуса.

Значения НВНМ оппозиционной волны Ио, полученные по нашим наблюдениям с использованием нашей модели для разделения солнечных и орбитальных вариаций яркости, показывают, что обратно-когерентное рассеяние может быть возможным объяснением ОЭ поверхности Ио.

1. Аврамчук В.В., Шавловский В.И. Оппозиционный эффект спутника Юпитера Каллисто для  $\lambda\lambda 0,407-0,755$  мкм // Кинематика и физика небесных тел. — 1988. — **4**, № 6. — С.11–15.
2. Довгопол А.Н., Шавловский В.И. Фотометрические характеристики галилеевых спутников Юпитера в спектральной области 0,347–0,792 мкм. Зависимость отражательной способности от орбитального фазового угла вблизи оппозиции // Кинематика и физика небесных тел. — 1985. — **1**, № 4. — С.29–36.
3. Шавловський В.І. Аналіз сонячних фазових функцій супутника Юпітера Калісто // Вісник Астрономічної школи. — 2012. — **8**, № 1–2. — С.209–211.
4. Buratti B.J. Callisto: New evidence for a hemispheric difference in surface texture // Bull. Amer. Astron. Soc. — 1989. — **21**, № 3. — P.983.
5. Buratti B.J. Ganymede and Callisto: surface textural dichotomies and photometric analysis // Icarus. — 1991. — **92**, № 2. — P.312–323.
6. Dlugach Zh.M., Mishchenko M.I. Coherent Backscatter as One of the Possible Mechanisms of Forming the Opposition Brightness Peak for Some Bodies of the Solar System // Solar System Res. — 1999. — **33**, № 6. — P.472–481.
7. Domingue D., Verbiscer A. Re-analysis of the solar phase curves of the icy galilean satellites // Icarus. — 1997. — **89**, № 1. — P.49–74.
8. Napke B.W. Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory // J.Geophys. Res. — 1981. — **86**, № B4. — P.3039–3054.
9. Napke B.W. Bidirectional reflectance spectroscopy. 3. Correction for macroscopic roughness // Icarus. — 1984. — **59**, № 1. — P.41–59.
10. Napke B.W. Bidirectional reflectance spectroscopy. 4. The extinction coefficient and opposition effect // Icarus. — 1986. — **67**, № 2. — P.264–280.

11. *Mishchenko M.I.* The angular width of the coherent back-scatter opposition effect: an application to icy outer Planet satellites // *Astrophys. and Space Sci.* — 1992. — **194**. — P.327–333.
12. *Shavlovskiy V.I., Vidmachenko A.P.* Spectrophotometry and surface geology of the Galilean satellites of Jupiter Europe. // IX international conference «Near-Earth Astronomy-2015». Terskol (the Kabardino-Balkar Republic, Russia) since August 31 until September 5, 2015.
13. *Shavlovskiy V.I.* Analysis of the Solar phase curves of the Galelian satellite Callisto // *Kinematics and physics of celestial bodies.* — 2000. — Supplement, № 3. — P.234–236.
14. *Shavlovskiy V.I.* Preliminary analysis of the Solar phase curves of the Jupiter's satellite Ganymede // *Kinematics and physics of celestial bodies.* — 2000. — Supplement, № 3. — P.237–238.
15. *Shavlovskiy V.I.* Opposition Effects of Jupiter's satellites Io and Europa // *Kinematics and physics of celestial bodies.* — 2005. — Supplement, № 5. — P.513–516.
16. *Thompson D.T., Lockwood G.W.* Photoelectric photometry of Europa and Callisto 1976–1991 // *J. Geophys. Res.* — 1992. — **97**, № E9. — P.14761–14772.
17. *Vidmachenko A., Morozhenko A., Klyanchin A., Shavlovskiy V., Ivanov Yu., Kostogryz N.* Asymmetry of reflective properties of the hemispheres of Jupiter satellite Europa // *Astronomical School's Report.* — 2011. — **7**, № 1. — P.133–144.

Поступила в редакцию 31.07.2016

Принята к печати 31.10.2016