

УДК 523.45+523.2

О причине расхождения кривых блеска Ганимеда и Калисто, полученных с Земли в полосе V и космическими аппаратами

*В.В. Прокофьева-Михайловская*¹, *А.Н. Абраменко*¹, *Г.В. Байда*¹, *А.В. Закревский*¹,
*Л.Г. Карачкина*¹, *Е.А. Сергеева*¹, *Е.А. Жужулина*²

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
prok@crao.crimea.ua

² ООО “Инфоходдинг”, Украина, Крым, Симферополь
iguana-sev@mail.ru

Поступила в редакцию 30 января 2010 г.

Аннотация. Дано краткое описание свойств поверхностей спутников Юпитера – Ганимед и Калисто. Приведены их фотографии, полученные космическими аппаратами. Рассмотрены причины различия орбитальных кривых блеска спутников, полученных по наземным наблюдениям в интервале фазовых углов освещения Солнцем от 0° до 12° и по картам, построенным по фотографиям спутников, сделанным космическими аппаратами в большом диапазоне солнечных фазовых углов. Сделано предположение, что причиной различий построенных кривых блеска является, в основном, эффект обратного когерентного рассеяния, который наблюдается только при малых фазовых углах Солнца.

ABOUT THE REASON OF THE DISTINCTION OF LIGHTCURVES OF GANYMEDE AND CALLISTO RECEIVED FROM THE EARTH IN THE BAND V AND SPACE APPARATUS, by *V.V. Prokofjeva-Mikhailovskaya, A.N. Abramenko, G.V. Bajda, E.A. Zhuzhulina, A.V. Zakrevskij, L.G. Karachkina, E.A. Sergeeva*. The brief description of properties of surfaces of Jupiter's satellites Ganymede and Callisto is given. Their photos received by space vehicles are listed. The reasons of the distinction of orbital lightcurves of Jupiter's satellites Ganymede and Callisto, received on ground observations at intervals of sunshining angles from 0° up to 12°, and on maps, constructed on the base of photos of satellites, made by space vehicles in large ranges of solar phase angles are considered. The assumption is made, that the reason of distinctions of the lightcurves is, basically, the effect of inverse coherent scattering, which acts at small phase Sun's angles.

Ключевые слова: галилеевы спутники, взаимные явления, фотометрия

1 Введение

Четыре спутника Юпитера – Ио, Европа, Ганимед, Калисто – были открыты Галилеем 7 января 1610 года при использовании изобретенного им телескопа. В настоящее время эти спутники хорошо исследованы различными средствами. Известно, что все четыре галилеевых спутника всегда повернуты в сторону Юпитера одной стороной. Они являются синхронными: период их вращения вокруг оси равен периоду обращения вокруг Юпитера. В отличие от известной соизмеримости скоростей

Таблица 1. Основные характеристики спутников Ганимед и Калисто

	Лед %	Плотность г/см ³	Период сутки	Диаметр км
Ганимед	25–65	1.9	7.16	5270
Калисто	5–25	1.8	16.7	4840

Таблица 2. Блеск в полосе V и геометрическое альbedo в полосе V Ганимеда и Калисто

J3 Ганимед	$4.^m61 \pm 0.03$	Morrison et al., 1974	0.43 ± 0.02	Morrison&Morrison, 1977
J4 Калисто	5.65 ± 0.10	Morrison et al., 1974	0.17 ± 0.02	Morrison&Morrison, 1977

трех галилеевых спутников Юпитера (Ио, Европа, Ганимед), недавно обнаружены целочисленные соотношения, описывающие пространственные связи геометрических характеристик (средних расстояний между центрами масс Юпитер-спутник и экваториальными радиусами спутников) четырех Галилеевых спутников (Курбасова, 2009).

Фотометрические свойства спутников определяются рассеивающими свойствами их поверхностей. Аврамчук и Шавловский в статье (1998), посвященной микроструктуре и свойствам частиц на поверхности Калисто, делают заключение, что микроструктура поверхностей Ганимеда и Калисто сходна с микроструктурой поверхности Луны и доставленных на Землю образцов лунного грунта. В то же время поверхности спутников Европа и Ио имеют существенно другую микроструктуру. Сильное различие особенностей поверхностей близких к Юпитеру галилеевых спутников (Ио, Европа) и далеких (Ганимед, Калисто) позволяет нам провести обсуждение фотометрических свойств последних в одной статье.

Основные характеристики спутников Ганимед и Калисто приведены в таблице 1. В первом столбце приведено название спутника, во втором – процент содержания льда, в третьем – средняя плотность спутника, в четвертом – период вращения (или обращения спутника), в пятом – диаметр спутника в километрах.

В таблице 2 содержатся данные о блеске и альbedo поверхностей Ганимеда и Калисто (<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/parcor.htm>). В первом столбце приведено название спутника, во втором V – геоцентрическая визуальная звездная величина спутника в среднюю оппозицию, в третьем – ссылка на авторов, в четвертом – геометрическое альbedo спутников, в пятом – ссылка на авторов.

Наибольшее количество информации о Ганимеде и Калисто получено с помощью большого числа космических аппаратов (КА), проходивших мимо Юпитера или остававшихся на орбите около него в течение длительного времени. Кратко перечислим их.

В 1973 и 1974 гг. мимо Юпитера прошли КА “Пионер-10” и “Пионер-11” на расстоянии 132 и 43 тыс. км. соответственно. Аппараты передали несколько сот снимков планеты и галилеевых спутников невысокого разрешения. В 1979 г. около Юпитера пролетели КА “Вояджер” на расстоянии 207 и 570 тыс. км. Впервые были получены снимки планеты и ее спутников высокого разрешения (всего около 33 тыс.). Аппараты передали большое количество других ценных данных. В 1992 г. мимо планеты прошел КА “Улисс”, направлявшийся к Солнцу. Аппарат провел измерения магнитосферы Юпитера. С 1995 по 2003 гг. на орбите Юпитера находился КА “Галилео”. С его помощью было получено много новых данных. Это позволило подробно изучить динамику атмосферных процессов Юпитера, а также получить новые данные, касающиеся его спутников. В 2000 г. мимо Юпитера пролетел КА “Кассини”. Он сделал ряд фотографий планеты с рекордным разрешением и получил новые данные о плазменном торе Ио. 28 февраля 2007 г. по пути к Плутону в окрестностях Юпитера совершил гравитационный маневр аппарат “Новые горизонты”. Проведена съемка планеты и спутников; данные в объеме 33 гигабайт переданы на Землю. На 2010 г. запланирован запуск космического аппарата “Юнона”, который должен выйти на орбиту Юпитера и провести де-

тальные исследования планеты. В 2010-х годах планируется осуществление межпланетной миссии по изучению галилеевых спутников.

Карты спутников, построенные по данным КА “Вояджер” и “Галилео”, были составлены из многих снимков, полученных при разных солнечных фазовых углах. В 2006 г. в ГАИШ выполнено сравнение кривых блеска галилеевых спутников Юпитера, полученных из картографии спутников КА (<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/JupiterSatellites/>) и из наземной фотометрии. Обнаружено несовпадение результатов, которому не найдено никаких объяснений (<http://www.sai.msu.ru/research/report2006.html>). В связи с этими расхождениями в НИИ “КрАО” была поставлена задача фотометрических исследований галилеевых спутников Юпитера.

Целью настоящей статьи является описание результатов фотометрии спутников Ганимед и Каллисто, проведенной в НИИ “КрАО” в течение 4-х лет в спектральной полосе V, сравнение полученных кривых блеска с данными других наблюдателей и объяснение возможной причины расхождения космических данных и наземных наблюдений. Поэтому в статье приводится достаточно подробное описание данных, полученных космическими аппаратами, проходившими и работавшими в районе Юпитера.

2 Основные характеристики Ганимеда и Каллисто

Основные данные о галилеевых спутниках Юпитера сейчас базируются на снимках, полученных космическими аппаратами, работавшими около Юпитера или пролетавшими мимо него. Однако наряду с этими данными большую ценность представляют и наземные наблюдения спутников.



Рис. 1. Изображение вращающегося полушария Ганимеда, полученное из космоса (<http://wopedia/mobi/ru>)

2.1 Спутник Юпитера Ганимед

Ганимед (англ. Ganymede) является крупнейшим спутником в Солнечной системе (рис. 1). 40 % поверхности Ганимеда представляет собой древнюю мощную ледяную кору, покрытую многочисленными метеоритными кратерами. Эта кора была частично разломана и обновлена активными

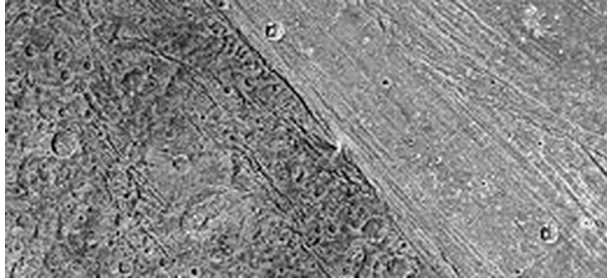


Рис. 2. Темные и светлые регионы поверхности Ганимеда

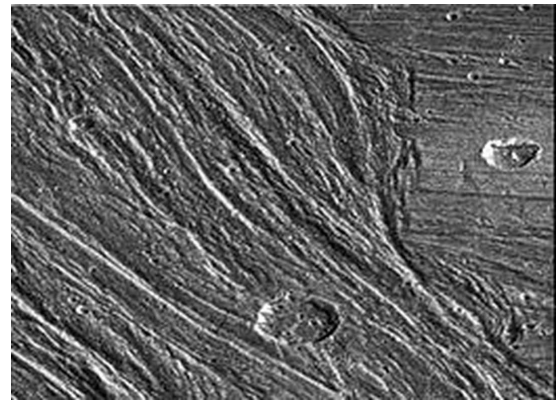


Рис. 3. Ряды гряд и выемок на поверхности Ганимеда

геологическими процессами примерно 3.5 млрд. лет назад. Те же процессы породили области, покрытые бороздами, которые занимают остальные 60 % площади спутника. На Ганимеде отмечена вулканическая активность.

Внутри Ганимеда можно выделить расплавленное металлическое ядро, состоящую из горных пород мантию и слой льда толщиной 900–950 км. Не исключено, что между каменистыми породами и льдом имеется слой жидкой воды. Толщина водяного слоя, залегающего на глубине около 170 км, не превосходит нескольких километров. Благодаря металлическому ядру, у Ганимеда очень сильное магнитное поле.

На поверхности Ганимеда имеется два типа регионов: совсем старые, сильно кратерированные темные области, и более “молодые” светлые области. Ширина границы между областями, представленными на рис. 2, составляет порядка нескольких десятков метров. Ледяная кора Ганимеда, возможно, разделена на крупные куски, которые могли двигаться, взаимодействуя, и порождая горные гряды и разломы (рис. 3). Наблюдаются также потоки застывшей старой лавы.

Ударные кратеры имеются на обоих типах поверхности Ганимеда. Относительно молодые кратеры имеют светлые лучи выбросов. Кратеры Ганимеда достаточно плоские, неглубокие, с низкими стенками. Возможно, это свидетельствует о вязкости ледяной коры, которая может сглаживать детали рельефа. Наряду со светлыми системами лучей у некоторых кратеров на Ганимеде имеются темные лучи. Возможно, они образовались из темного материала поверхности.

Поскольку в “свежих” кратерах имеется более высокое содержание льда, то, можно считать, что Ганимед покрыт узким покрывалом, состоящим из темного вещества, а подповерхностные слои состоят из водяного льда. Этот темный материал может иметь метеоритную природу. Считается, что поверхность спутника припорошена слоем рыхлой каменно-ледяной пыли толщиной от нескольких метров до нескольких десятков метров.

Еще в 70-е годы астрономы обнаружили у Ганимеда при затмении им одной из звезд следы крайне слабой атмосферы (см. обзор Кумар, Хантен, 1986). С помощью спектрографа высокого разрешения телескопа Хаббл был обнаружен озон. Атмосфера состоит из кислорода, образовавшегося в результате разложения льда на водород и кислород под действием солнечной радиации (водород улетучивается в космос ввиду его легкости). Давление атмосферы в 10^{11} раз меньше давления земной атмосферы.

2.2 Спутник Юпитера Калисто

Калисто – третий по величине спутник в Солнечной системе, представляющий собой одно из самых кратерированных тел (рис. 4) и имеющий наименьшую плотность из всех галилеевых спутников,



Рис. 4. Фотография Каллисто, полученная из космоса

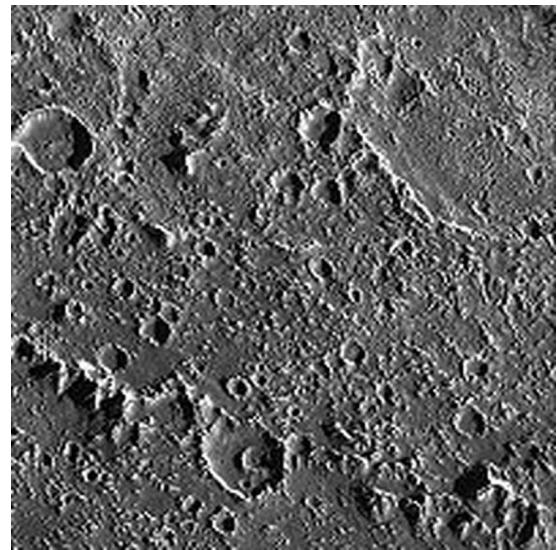


Рис. 5. Кратерированная местность внутри образования Асгард

1.8 г/см³. Оценки дают состав: 40 % льда и 60 % силикатов и железа. Температура поверхности Каллисто на экваторе в полдень достигает 140–150° К и быстро падает после захода Солнца.

Темный материал, видимый на поверхности Каллисто, является тонким “покрывалом”. Низкое альbedo указывает на присутствие в коре пыли. Этот материал, возможно, образован после столкновений метеоритов с поверхностью спутника. Собственного вулканизма или тектонической активности нет. Яркие пятна на темной поверхности – метеоритные кратеры, при образовании которых более светлый материал был выброшен на поверхность. Кратеры на Каллисто имеют слабовыраженный вал и небольшую глубину. Возраст поверхности оценивается в 3.5 млрд. лет. Предполагается, что Каллисто покрыт ледяной корой толщиной 200 км, под которой находится слой воды толщиной около 10 км. На Каллисто полностью отсутствуют протяженные равнины, покрытые продуктами извержений (как “морские” области Ганимеда или Луны).

Каллисто имеет множество больших ударных кратеров, но у него намного меньше мелких ударных образований в отличие от других тел Солнечной системы. Согласно одной из теорий, вокруг Юпитера находится меньше ударных тел малого размера, чем предполагалось ранее.

На обращенной к Юпитеру стороне видна огромная многокольцевая структура с яркой центральной областью – Валхалла. Она представляет собой светлое пятно диаметром 600 км и концентрические кольца вокруг него диаметром до 3000 км. По-видимому, это является следствием падения крупного метеорита. Еще одно схожее образование – Асгард – имеет диаметр 1600 км (см. рис. 5).

Обнаружено, что магнитное поле спутника изменяется в зависимости от ориентации относительно магнитного поля Юпитера; это предполагает наличие высокопроводящей жидкости внутри Каллисто. Еще одно подтверждение существования жидкого океана заключается в том, что Каллисто не имеет характерного “разломанного” рельефа в местах, противоположных падению гигантских метеоритов (на Луне и Меркурии такие местности есть, что объясняется действием сейсмических волн в результате удара). На Каллисто сейсмические волны могут гаситься слоем жидкости.

Обнаружена крайне слабая атмосфера, имеющая давление лишь 10⁻⁶ Па. Она состоит из аммиака, углекислого газа, воды, кислорода и метана. Ее давление в 10¹¹ раз меньше давления земной атмосферы.

Чрезвычайно малая величина атмосферного давления на спутниках Юпитера Ганимед и Каллисто позволяют их рассматривать как безатмосферные тела.

2.3 Фотометрические характеристики поверхностей Ганимеда и Каллисто и природа опозиционного эффекта

Наземная фотометрия галилеевых спутников проводилась многократно разными авторами. Наиболее полно их фотометрические характеристики, полученные до 1980 г., приведены в обзорах, опубликованных в книге “Спутники планет” (Моррисон и Моррисон, 1980; Веверка, 1980).

Геометрическое альbedo у Каллисто по величине близко к альbedo некоторых ярких областей Луны. Сейчас известно, что Луна покрыта слоем реголита различной толщины (Шкуратов, 2006). Рассеивающие свойства реголита достаточно хорошо изучены. Его верхний слой обладает всеми параметрами, необходимыми для возникновения эффекта обратного когерентного рассеяния.

Амплитуды кривых блеска спутников в спектральной полосе V невелики и составляют около $0.^m17$ для Ганимеда и $0.^m14$ для Каллисто. Лобовая (ведущая) сторона Ганимеда ярче, чем задняя (ведомая). А для Каллисто справедливо обратное соотношение: лобовая сторона слабее задней.

Моррисон и Моррисон в обзоре (1980) приводят результаты исследования опозиционного пика яркости спутников при малых фазовых углах. Значение опозиционного эффекта для Ганимеда составляет около $0.^m1$. Для Каллисто опозиционный эффект для лобовой (ведущей) стороны (орбитальный фазовый угол 0° - 180°) достигает $0.^m32$, а для задней (ведомой) стороны (орбитальный фазовый угол 180° - 360°) составляет всего около $0.^m12$.

В восьмидесятые годы прошлого столетия фотометрические наблюдения галилеевых спутников были проведены в Узбекистане на горе Майданак с помощью 60-см телескопа (Довгопол и Шавловский, 1985, 1986). Были определены зависимости отражательной способности спутников от орбитального фазового угла при фазовых углах Солнца 0° и 6° . Данные показали сильное различие кривых, полученных для Каллисто при фазовом угле Солнца 0° и 6° . Авторы объяснили это различие большой величиной опозиционного эффекта для более темного ведущего полушария Каллисто. Они сделали заключение, что орбитальные кривые галилеевых спутников зависят от фазового угла Солнца и могут иметь разную форму при разных фазах освещения их Солнцем. Несомненно, требуются дальнейшие фотометрические наблюдения галилеевых спутников с Земли и исследование указанного феномена.

Многоцветные наблюдения Каллисто, полученные на г. Майданак в течение 92 ночей с 1980 по 1985 годы, были проанализированы и обсуждены Аврамчуком и Шавловским (1988) с точки зрения опозиционного эффекта, то есть зависимости яркости спутника от фазового угла Солнца. Полученные ими величины значений опозиционного эффекта ведущего ($0.^m27$) и ведомого ($0.^m15$) полушарий Каллисто для длины волны 0.540 мкм согласуются с данными, приведенными Моррисон и Моррисон (1980). Для фазовых углов Солнца в диапазоне 6° - 12° различий найдено не было. Приведено среднее значение линейного фазового коэффициента, которое составляет $\beta = 0.034 \pm 0.004$ зв. вел/град.

Опозиционный эффект увеличения яркости безатмосферных тел получил объяснение только после открытия обратного когерентного рассеяния в неупорядоченных системах частиц (Кузьмин, Романов, 1996; Кузьмин, Меглинский, 2006; Длугач, Мищенко, 1999, 2005). Явление когерентного обратного рассеяния было открыто в 1985 г. одновременно в трех местах: в Сиэтле, в Амстердаме и в Гренобле. Оно вызвало большой интерес, и исследования рассеяния света были проведены во многих физических лабораториях мира. Явление оказалось универсальным, так как оно связано с самыми общими свойствами переноса излучения. Пик обратного когерентного рассеяния определяется диффузионными путями квантов, которые идут в глубине рассеивающей среды. Крылья пика определяются путями, которые идут в рассеивающей среде неглубоко, и связаны с небольшим числом актов рассеяния. В астрофизике изучение пика обратного когерентного рассеяния сейчас актуально, так как позволяет получать информацию о поверхностях безатмосферных тел Солнечной системы. Проблема состоит в том, что волны, претерпевающие многократное рассеяние, несут информацию о рассеивателе в очень сложной форме, которая пока не поддается моделированию.

Когерентное рассеяние квантов света происходит в достаточно рыхлой среде, каковой является реголит, покрывающий поверхность большинства безатмосферных тел Солнечной системы. При падении на такую поверхность когерентной плоской волны в каждом акте упругого рассеяния изменяется направление волны. Выяснилось, что каждой волне, обходящей ряд рассеивателей в одном направлении, соответствует волна, обходящая тот же ряд рассеивателей в обратном направлении. Такие волны когерентны и они интерферируют (Шкуратов, 2006). Было показано, что интерференция происходит только в случае рассеивания назад. В этом случае оптические пути волн и сдвиг фаз будут строго одинаковы. Показано также, что эффект имеет место в случае, когда размеры рассеивающих частиц сравнимы с размерами длины волны падающего света, и поверхность тела имеет порошкообразную структуру. Учитывая обратное когерентное рассеяние, авторы Аврамчук и Шавловский (1998) оценили, что пористость поверхности ведущего полушария Каллисто составляет около 71 %, а ведомого – 62 %. Эта разница пористости обеспечивает разную величину оппозитного эффекта ведущего и ведомого полушарий.

3 Сравнение фотометрии Ганимеда и Каллисто, проведенной с Земли, с результатами, полученными при использовании карт, построенных по данным космических аппаратов

Сейчас активно используются наблюдения взаимных явлений галилеевых спутников Юпитера, которые позволяют уточнить их орбиты. Эти явления, когда один спутник попадает в тень другого, или один спутник покрывает второй, наблюдаются с Земли раз в 6 лет. Емельянов и Жильбер (2006) подробно описали результаты, полученные при обработке наблюдений взаимных явлений галилеевых спутников в 2002 и 2003 гг., и привели полученные астрометрические ошибки. Они достигали величины около 0.15 угловой секунды. При выполнении расчетов (Емельянов, Жильбер, 2006) были использованы закон отражения света Халке (1981) и карты, полученные по наблюдениям космических аппаратов и приведенные на сайте (<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/JupiterSatellites/>).

Емельянов (2000, 2003), обсуждая ошибки, полученные при обработке взаимных явлений, указывает на возможное изменение распределения яркости спутника по его диску как на источник ошибок. Выполнено сравнение кривых блеска четырех галилеевых спутников, синтезированных из карт, с кривыми блеска, полученными из наземных фотометрических наблюдений. Показано, что различия данных наземной фотометрии и фотометрии, полученной из космоса, для спутников Ио и Европа невелики, и можно считать, что они находятся в пределах ошибок. Однако для спутника Ганимед различие увеличивается, а для спутника Каллисто кривые идут в противофазе. Это видно на рис. 6, взятом из работы (Емельянов и Жильбер, 2006). Отметим, что расхождение космических и наземных данных растет с уменьшением альбеда спутника, которое равно 0.43 у Ганимеда и 0.17 у Каллисто. Наибольшее расхождение присутствует у Каллисто.

Отметим, что наземные наблюдения ведутся в интервале фаз освещения дисков спутников Солнцем от 0° до 12° . Это обусловлено положениями Земли на орбите около Солнца. В то же время практически все наблюдения космических аппаратов были выполнены при различных (в основном значительно больших по величине) фазовых углах, что обусловлено техникой подлета космических аппаратов к Юпитеру и его спутникам. Карты спутников были построены по отдельным снимкам, полученным с космических аппаратов при различных фазовых углах освещения спутников Солнцем.

4 Возможная причина расхождения наземной и космической фотометрии

Рассмотрение имеющихся сейчас данных о галилеевых спутниках Ганимед и Каллисто показывает, что они значительно отличаются друг от друга. По-видимому, поверхностный слой у них различен. Различная величина альбеда поверхности говорит о разных составах поверхностного слоя на этих спутниках.

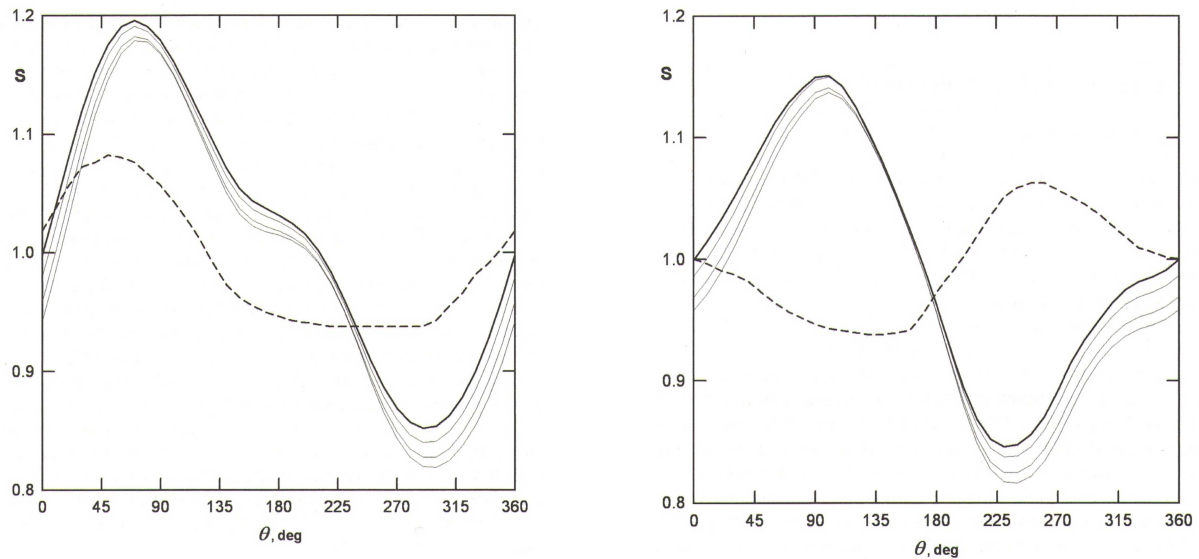


Рис. 6. Сравнение интегральной яркости галилеевых спутников Юпитера, Ганимеда и Каллисто, определенной по картам, полученным космическими аппаратами (сплошные кривые), с данными наземной фотометрии (пунктирная кривая). Интегральная яркость вычислена при угле фазы 0 градусов (толстая линия) и при углах фазы 4, 8 и 12 градусов (тонкие линии). Интегральная яркость Ганимеда (слева), интегральная яркость Каллисто (справа)

Проведем аналогию с астероидами. В последние годы стало известно, что поверхность их покрыта реголитом. Напомним, что альbedo поверхностей астероидов колеблется в пределах от 0.06 до 0.4. Судя по величине альbedo, можно предположить, что на поверхностях Ганимеда и Каллисто имеется достаточно большое количество реголита. Исходя из известных свойств рассеяния света реголитом, попробуем объяснить расхождение между кривыми блеска, полученными при наблюдениях с Земли и из космоса. При этом не будем рассматривать теневой механизм, поскольку рельеф поверхностей Ганимеда и Каллисто не имеет высоких вершин. Галилеевы спутники находятся на расстоянии около 5 а. е. от Солнца, поэтому можно считать, что солнечные лучи падают на них параллельным пучком. В этом случае четко наблюдается эффект обратного когерентного рассеяния.

Явление обратного когерентного рассеяния позволило понять и описать механизм формирования оппозиционного эффекта у тел солнечной системы. При многократном рассеянии света в порошкообразной среде появляются пары лучей, которые интерферируют между собой (Кузьмин, Романов, 1996), увеличивая количество квантов в обратном направлении до двух раз. Этот механизм многократно обсуждался в ряде работ и интенсивно изучался рядом исследователей. Впервые вопрос о применении интерференционного механизма для объяснения оппозиционного эффекта яркости безатмосферных тел был описан в работе Шкуратова (1985). В более поздних работах (Шкуратов, 1988; Хапке, 1990; Мищенко, Длугач, 1993; Шкуратов и др., 1999; Длугач, Мищенко, 1999, 2005) он был детально разработан. Великодским в кандидатской диссертации (2002) приведены подробные обзоры известных сейчас законов рассеяния и отражения света космическими телами. Исследуя рассеяние солнечного света Луной, он приходит к выводу, что альbedo деталей поверхности Луны сильно влияет на закон распределения яркости по диску планеты. Влияние это осуществляется в результате изменения доли многократного рассеянного света в излучении, отраженном различными деталями поверхности.

В последние годы физиками был описан новый эффект в рассеянии света, получивший название

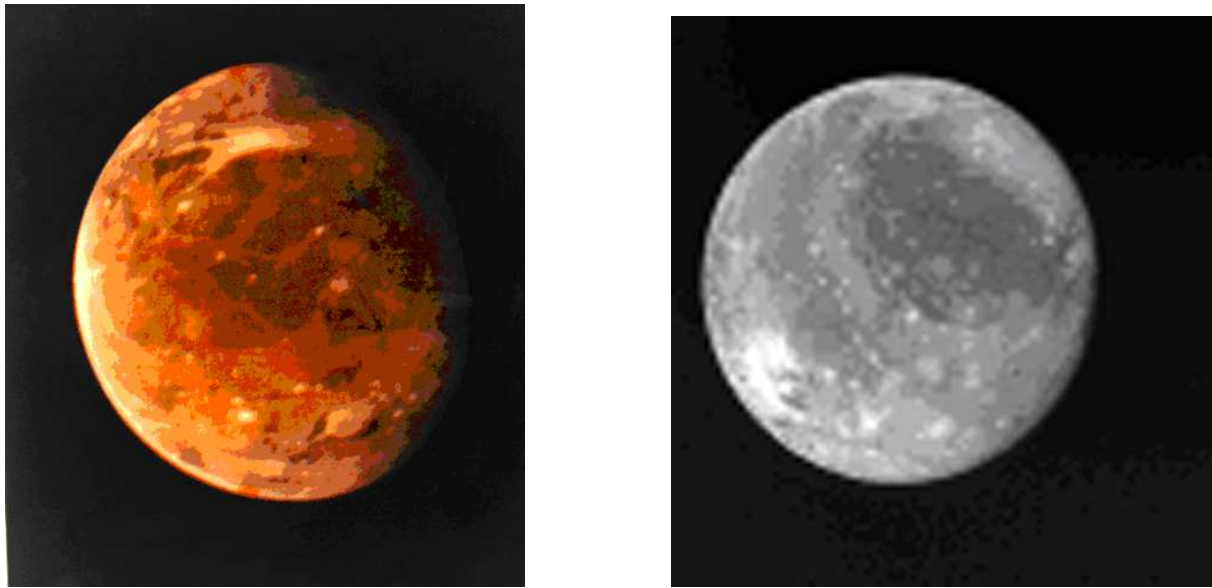


Рис. 7. Справа изображение Ганимеда, полученное КА “Вояджер-1” с расстояния 3.4 млн. км. (Voyager 1, P-21186). Слева – изображение Ганимеда, полученное КА “Вояджер-2” с расстояния 1230000 км. (Voyager 2, FDS 20608.11). Приведенные фотографии взяты с сайта <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/jupiter/jupiter.htm>.

“эффект ближнего поля”. Он был теоретически предсказан проф. Гадамским в 1994 г. В XXI веке появился ряд публикаций, посвященных проявлению этого эффекта при астрономических наблюдениях (Петрова и др., 2007).

Авторы приходят к выводу, что фазовые зависимости интенсивности рассеянного света определяются взаимодействием двух механизмов: обратного когерентного рассеяния и эффекта ближнего поля. Первый механизм эффективен в разреженных ансамблях, а второй – в более компактных структурах, состоящих из частиц, размеры которых и расстояния между которыми сравнимы с длиной волны света. Разделить количественно вклады этих механизмов при моделировании или с помощью измерений еще почти невозможно.

Для примера на рис. 7 приведены две фотографии, полученные различными космическими аппаратами Вояджер в разное время и при разных фазовых углах. Сравнение изображений показывает их сильное различие и наличие на них большого числа ярких пятен. Снимки Ганимеда, полученные из космоса, показывают, что распределение яркости по диску галилеева спутника может сильно зависеть от фазового угла освещения поверхности спутника Солнцем. Это объясняется законом обратного когерентного рассеяния, которое может различаться как при разных фазовых углах Солнца, так и определяться свойствами реголита, лежащего в отдельных районах спутника.

Снимки спутника Каллисто, полученные “Вояджером-1” и “Вояджером-2”, представлены на рис. 8. Распределения ярких пятен по диску сильно отличаются. Распределение ярких областей на фотографии справа отличается и фотографии на рис. 4.

Исходя из приведенных и кратко описанных выше достижений физики рассеяния света, особенно при изучении рассеяния на поверхностях, покрытых реголитом, можно объяснить различие кривых блеска галилеевых спутников, полученных при наблюдениях с Земли и с борта многих космических аппаратов.

Итак, возможной причиной расхождения результатов наземных фотометрических наблюдений галилеевых спутников Юпитера и данных, полученных из космоса, что проявляется в ошибках, полученных (Емельянов, Гильбер, 2006) при обработке взаимных покрытий спутников, является отсутствие учета изменений в распределении яркости по дискам спутников с изменением фазового



Рис. 8. Снимки спутника Каллисто: справа – изображение, полученное КА “Вояджер-2” с расстояния 2 млн. км. (Voyager 2, P-21740), слева – изображение, полученное КА “Вояджер-1” с расстояния 1.22 млн км. Светлая округлая область на левом краю изображения – Валхалла (Voyager 1, FDS 16399.48). Приведенные фотографии взяты с сайта <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/jupiter/jupiter.htm>.

угла освещения их Солнцем. В этой работе при сравнении результатов учитывался оппозиционный эффект согласно закону Хапке, однако он принимался одинаковым для всей поверхности каждого спутника, что на самом деле неправильно. Оппозиционный эффект, а значит и обратное когерентное рассеяние, имеет наибольшее значение у Каллисто. Именно поэтому кривые блеска для Каллисто, приведенные на рис. 6, больше всего расходятся.

Это предположение подтверждается наземными фотометрическими наблюдениями астероидов. В НИИ “КрАО” совместно с ГАИШ (Москва) сейчас успешно разработан спектрально-частотный метод определения пятен различной природы на поверхностях астероидов (Бусарев и др., 2007). Опыт применения этого метода к исследованиям поверхности астероидов 21 Лютеция и 4 Веста показывает, что наблюдаются яркие пятна, обусловленные обратным когерентным рассеянием, которые становятся видимыми только при определенных условиях освещения астероида Солнцем (Прокофьева и др., 2005; Прокофьева-Михайловская и др., 2008а, 2008б).

Таким образом, небольшой обзор достижений физики и астрофизики за последние десятилетия является основой для анализа результатов сравнения карт спутников Юпитера Ганимед и Каллисто, построенных по данным космических аппаратов, с данными наземных фотометрических наблюдений этих спутников.

Рассмотрим ниже результаты полученных нами в течение 4-х лет фотометрических наблюдений этих спутников в спектральной полосе V и проведем сравнение наших кривых блеска с данными наземной фотометрии других авторов.

5 Методика фотометрических наблюдений галилеевых спутников и обработки данных наблюдений в НИИ “КрАО”

Наблюдения галилеевых спутников Юпитера в НИИ “КрАО” велись в фокусе куде телескопа МТМ-500 с помощью астрономической телевизионной установки (Абраменко и др., 1984). Приемником све-

та в ней была передающая телевизионная трубка (ПТТ) суперизокон (ЛИ804). При наблюдениях температура ПТТ поддерживалась около 0°C , что обеспечивалось обдувкой трубки сухим холодным воздухом. Благодаря стабильности температуры ПТТ ее чувствительность при наблюдениях не менялась.

Основной трудностью фотометрических наблюдений галилеевых спутников Юпитера является рассеянный свет от Юпитера. Поэтому требуется его ослабление. В НИИ “КрАО” для наблюдений спутников Юпитера на телевизионной установке в фокальной плоскости телескопа МТМ-500 устанавливается специально изготовленная диафрагма, представляющая собой засвеченную фотопленку, обеспечивающую ослабление света в 200 раз. В пленке вырезано отверстие диаметром 22 мм, центр которого совпадает с оптической осью телескопа. Во время наблюдений изображения Юпитера устанавливаются на засвеченный край фотопленки и ослабляются в 200 раз. А спутники, расположенные по одну сторону от Юпитера, наблюдаются без ослабления. Для регистрации спутников, расположенных по другую сторону от Юпитера, его изображение приходится смещать в противоположный конец поля зрения, где оно также ослабляется в 200 раз.

Изображение наблюдаемого объекта, находящееся в фокальной плоскости телескопа, проектируется на фотокатод передающей телевизионной трубки (ПТТ) с помощью объектива Юпитер-9 с уменьшением в 1.4 раза. Между объективом Юпитер-9 и фотокатодом ПТТ установлена турель сменных светофильтров, так называемая ТБСС (турель быстрой смены светофильтров). На турели имеется четыре гнезда с фиксируемой установкой относительно фотокатода, в которые помещаются наборы стеклянных светофильтров. Три из них обеспечивают участки спектров В (светофильтры СС5+СЗС22+ЖС10), V (СЗС21+ЖС18) и R (КС14+ЖС18). В четвертом гнезде установлен нейтральный светофильтр НС13, ослабляющий световой поток в несколько сот раз, что обеспечивает возможность установки изображения Юпитера в нужное место фотопленки. Управление ТБСС с целью смены светофильтров осуществляется оператором во время наблюдений дистанционно.

Возможность абсолютной фотометрической калибровки обеспечивает проектор звездного теста, установленный на ТБСС. Искусственные звезды теста проектируются на фотокатод ПТТ одновременно с изображениями спутников или звезд-стандартов вне зависимости от положения ротора турели. Освещение звездного теста производится светодиодами типа У-132В, яркость которых регулируется изменением проходящего через них тока. Ток измеряется с точностью до 0.1 %. Максимум излучения используемых светодиодов имеет полуширину около 300 \AA и находится на длине волны 5700 \AA . Зависимость яркости осветителя звездного теста от величины тока светодиодов определена в лабораторных условиях в широких пределах с точностью до 0.1 %. Привязка величины сигнала от звездного теста при данном токе осветителя к звездам-стандартам обеспечивает абсолютную фотометрическую калибровку звездного теста, а следовательно, и калибровку объектов, наблюдаемых с помощью телевизионной установки.

В ТБСС есть еще пятое фиксируемое положение, которое, с помощью оптической системы, позволяет проектировать на фотокатод ПТТ так называемое “плоское поле”, назначение которого – определение ошибки поля, то есть неравномерности чувствительности аппаратуры в разных участках поля. Плоское поле образуется белым экраном, освещаемым светодиодами У-132В, яркость которых регулируется с помощью изменения проходящего через них тока. Определяемая таким образом ошибка поля близка к ошибке поля в спектральной области V.

Устройство ТБСС позволяет регистрировать яркости спутников и звезд-стандартов как последовательно в каждом из трех участков спектра (через светофильтры, обеспечивающие спектральные полосы, близкие к В, V, R), так и одновременно в трех участках спектра (Абраменко и др., 1984). Одновременные наблюдения в разных участках спектра, конечно, уменьшают амплитуду сигналов в этих участках примерно в 5 раз, но это несущественно, так как спутники Юпитера достаточно яркие. Наблюдения галилеевых спутников в НИИ “КрАО” проводились как в отдельных светофильтрах, так и одновременно в полосах, близких В, V и R. В данной статье приведены результаты, полученные отдельно в светофильтре V (см. таблицу 3). В первом столбце указан год наблюдений, во втором – дата и месяц начала и конца наблюдений спутников, в третьем – диапазон изменений склонений Юпитера во время наблюдений в градусах, в четвертом и пятом – число определений блеска

Таблица 3. Наблюдения Ганимеда и Калисто в течение 2005–2008 гг.

1	2	3	4	5
Год	Временной диапазон наблюдений	Диапазон склонений Юпитера	Число записей в полосе V в отдельных фильтрах	
			Ганимед	Калисто
2005	14.05–6.07	$-2^{\circ}20 \dots -3^{\circ}$	12	18
2006	29.04–30.08	$-13 20 \dots -15$	7	5
2007	28.04–5.09	$-21 25 \dots -22 15$	4	4
2005–2008			25	30

спутников Ганимед и Калисто в полосе V в течение каждого года. В нижней строке приведено общее число наблюдений для этих спутников.

Регистрация наблюдений производилась в персональной ЭВМ. Для этого специальным стробирующим устройством видеосигнал от наблюдаемых объектов и звездного теста вырезался из видеосигнала телевизионного раstra во всю длину кадровой развертки. Ширина строба устанавливалась оператором равной примерно двум ширинам сигнала от наблюдаемого объекта (вместе с его “крыльями”). Расположение строба в растре выбиралось в таком месте фотокатода, где ошибка поля была наименьшая. В строб оператором вводились изображения звезд теста и наблюдаемых объектов. Значения видеосигнала в каждой из строк строба оцифровывались и поступали в ЭВМ, где усреднялись в течение 500 или 1000 телевизионных кадров, а затем данные записывались в память ЭВМ.

Благодаря тому, что ось вращения телевизионной камеры вместе с передающей телевизионной трубкой совмещена с оптической осью телескопа и может быть повернута относительно телескопа на ± 90 градусов, оператор может установить изображения Юпитера и его спутников вдоль строба. Коррекцией телескопа по α и δ можно расположить их строго на одной линии со звездным тестом. Оператор следит, чтобы наблюдаемое изображение спутников Юпитера было неподвижно относительно фотокатода во время экспозиции. Это достигается специально созданной системой коррекции движения телескопа по α и δ .

Для увеличения точности измерения блеска наблюдаемых объектов в телевизионном комплексе осуществлен ряд усовершенствований. Накал ламп видеоусилителя и подогреватель катода ПТТ были переведены на питание постоянным током, напряжение которого стабилизировано электронным стабилизатором. Был улучшен коэффициент стабилизации всех питающих ПТТ напряжений и токов. В процессе наблюдений в любых режимах работы телевизионного комплекса величины напряжений и токов меняются не более чем на $\pm 0.5\%$. Эти переделки обеспечили повышение стабильности работы телевизионной аппаратуры и повышение точности фотометрических измерений почти в два раза – до $\pm 0^m.005$.

Во время наблюдений, после регистрации данного спутника Юпитера, в том же режиме ПТТ регистрируются звезды-стандарты спектральных типов F–G, по блеску близкие к блеску данного спутника. В течение ночи проводится несколько регистраций одних и тех же спутников и стандартов.

Математическая обработка полученных наблюдений проводилась согласно разработанной в НИИ “КрАО” методике (Прокофьева и др., 1992, 1993). С помощью программы В.В. Бочкова, доработанной Е.А. Жужулиной, определялись звездные величины в инструментальной фотометрической системе.

Внеатмосферный блеск спутников в полосе V в системе Джонсона-Моргана при наблюдениях в фильтре V определялся по формуле:

$$V = V_{01} - \alpha_v F(z) + V_{in}, \quad (1)$$

где V_{01} – нуль-пункт инструментальной шкалы звездных величин, позволяющий перейти к системе

Джонсона-Моргана при наблюдениях отдельно в фильтре V, $\alpha_v F(z)$ – фактор ослабления света в земной атмосфере, α_v – коэффициент экстинкции в полосе V; $F(z)$ – воздушная масса, на которой проводились наблюдения, V_{in} – инструментальная звездная величина спутника в полосе V. Величина V_{01} определялась по наблюдениям стандартных звезд в течение десятков ночей. Использовалось ее значение $V_{01} = 10.^m20$.

После того, как нуль-пункт инструментальной шкалы звездных величин был определен достаточно уверенно, определялись средние значения экстинкции для каждой ночи. Переход к стандартной фотометрической системе внес погрешности в абсолютные значения блеска объекта не более 3 %.

Полученные внеатмосферные звездные величины спутников приводились к расстояниям, равным одной астрономической единице от Земли и Солнца по формуле:

$$V(1, 1, \alpha) = V - 5lg(r\Delta), \quad (2)$$

где $V(1, 1, \alpha)$ – значение блеска спутника на единичном расстоянии от Земли и Солнца, r – расстояние от Солнца, Δ – расстояние от Земли.

Таким образом, используемая телевизионная аппаратура обеспечила ослабление света от Юпитера примерно в 200 раз, точность регистрации инструментального значения блеска V при суммировании в ЭВМ 500–1000 телевизионных кадров порядка $\pm 0.^m005$ и точность величин V в системе Джонсона-Моргана лучше, чем $\pm 0.^m03$.

6 Кривые блеска Ганимеда и Каллисто в полосе V

В настоящей статье представлены результаты наблюдений Ганимеда и Каллисто, которые проведены в течение четырех лет с 2005 г. по 2008 г. в спектральной полосе V (см. таблицу 3). Данные блеска в полосе V были получены в диапазоне солнечных фазовых углов 5.5° – 11° . Записи в ЭВМ позволяли определить инструментальный блеск спутников с точностью порядка $0.^m005$.

Как известно, наилучшее время для наблюдений Юпитера и его спутников приходится на моменты противостояний (наименьших расстояний между наблюдаемой планетой и Землей), которые происходят ежегодно, со смещением примерно в месяц относительно прошлогодней даты. Как правило, в период летних противостояний Юпитер поднимается не очень высоко над горизонтом: в среднем для широты НИИ “КрАО” – на 20–30 градусов. Таковы были наблюдения 2005–2008 гг.

Таблицы 4 и 5 представляют данные о наблюдениях спутников Юпитера – Ганимед и Каллисто – в полосе V. Колонка 1 содержит номера по порядку, колонки 2 и 3 – даты наблюдений и среднее время записи, колонка 4 – полученные нами значения в полосе V, колонки 6 и 7 – гео- и гелиоцентрические расстояния спутников, колонка 8 – орбитальные долготы спутников в порядке возрастания.

Таблица 4. V-величины Ганимеда, полученные в течение четырех лет в НИИ “КрАО”

1	2	3	4	5	6	7	8
№	Дата	УТ	V	Δ (а. е.)	г (а. е.)	Фазовый угол Солнца	Долгота на орбите
1	08/09.08.08	21 ^h 08 ^m 07 ^s	4. ^m 741	4.277	5.167	6. ⁰ 0706	14. ⁰ 50
2	26/27.06.05	18 56 25	4.632	4.832	5.456	10.6894	32.16
3	08/09.05.07	23 25 30	4.620	4.431	5.328	5.4748	39.46
4	14/15.05.05	20 57 43	4.639	4.690	5.456	7.4463	32.97
5	26/27.06.05	20 26 43	4.633	4.833	5.456	10.6906	35.30
6	23/24.08.06	18 13 57	4.621	5.628	5.399	10.2380	42.26

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8
№	Дата	UT	V	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фазовый угол Солнца	Долгота на орбите
7	27/28.06.05	18 51 54	4.620	4.844	5.456	10.7106	82.16
8	24/25.08.06	18 04 48	4.622	5.643	5.398	10.1986	92.07
9	02/03.05.07	00 09 40	4.635	4.496	5.330	6.4745	98.56
10	28/29.06.05	18 35 55	4.664	4.871	5.456	10.7340	131.90
11	28/29.06.05	20 23 58	4.689	4.872	5.456	10.7357	135.68
12	28/29.06.05	20 32 36	4.680	4.872	5.456	10.7362	136.72
13	21/22.06.05	19 36 23	4.701	4.770	5.456	10.6134	142.22
14	25/26.08.06	18 12 34	4.722	5.657	5.398	10.1552	142.63
15	18/19.08.06	18 54 39	4.738	5.555	5.400	10.4915	152.71
16	07/08.06.05	21 23 46	4.760	4.998	5.456	9.9598	162.03
17	17/18.05.05	18 11 24	4.779	4.722	5.456	7.8616	178.25
18	04/05.05.07	00 18 58	4.810	4.476	5.330	6.1373	199.84
19	18/19.05.05	19 02 18	4.841	4.734	5.456	8.0000	229.95
20	18/19.05.05	21 21 47	4.832	4.764	5.456	8.0135	235.31
21	27/28.08.06	18 19 05	4.840	5.686	5.398	10.0321	243.27
22	20/21.08.06	19 02 50	4.841	5.585	5.399	10.3960	253.55
23	20/21.08.08	18 58 47	4.825	4.398	5.162	7.9845	254.73
24	28/29.04.07	23 03 19	4.831	4.527	5.331	7.0680	254.88
25	21/22.08.06	18 09 56	4.760	5.599	5.399	10.3389	301.82

Таблица 5. V-величины Калисто, полученные в течение четырех лет в НИИ "КрАО"

1	2	3	4	5	6	7	8
№	Дата	UT	V	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фазовый угол Солнца	Долгота на орбите
1	24/25.08.06	17 ^h 42 ^m 07 ^s	5. ^m 941	5.642	5.398	10. ⁰ 1740	13. ⁰ 50
2	02/03.07.05	19 41 23	5.959	5.376	5.455	10.7133	30.89
3	25/26.08.06	18 12 34	5.951	5.657	5.398	10.1239	35.34
4	04/05.05.07	23 32 34	5.962	4.467	5.329	6.1485	40.16
5	14/15.05.05	20 57 43	5.955	4.690	5.456	7.4332	55.48
6	05/06.05.07	22 45 27	5.961	4.458	5.329	5.9999	61.03
7	17/18.06.05	20 33 14	5.969	5.146	5.456	10.4564	68.94
8	17/18.06.05	20 43 13	5.960	5.146	5.456	10.4568	69.09
9	06/07.07.05	18 44 54	5.999	5.438	5.455	10.7168	115.96
10	08/09.05.07	00 04 35	5.998	4.400	5.328	5.4939	127.17
11	18/19.05.05	18 23 23	5.964	4.733	5.456	7.9814	139.70
12	18/19.05.05	18 28 09	5.966	4.733	5.456	7.9818	139.80
13	30/31.08.06	17 48 13	5.980	5.728	5.397	9.8630	142.12
14	04/05.06.05	20 35 49	5.969	4.954	5.456	9.7420	148.88
15	04/05.06.05	20 46 59	5.945	4.955	5.456	9.7427	149.06
16	21/22.06.05	19 13 21	5.944	5.206	5.455	10.6237	153.93
17	21/22.06.05	19 36 23	5.950	5.206	5.455	10.6242	154.26
18	05/06.08.08	19 47 58	5.910	4.261	5.168	5.5653	192.39
19	31.05/01.06.08	00 37 29	5.901	4.380	5.192	7.3216	205.70
20	07/08.06.05	19 07 59	5.890	4.997	5.456	9.9702	212.41

Продолжение Таблицы 5.

1	2	3	4	5	6	7	8
№	Дата	UT	V	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фазовый угол Солнца	Долгота на орбите
21	18/19.08.06	18 01 51	5.890	5.554	5.400	10.4881	245.20
22	26/27.06.05	19 49 19	5.882	5.283	5.455	10.7155	262.25
23	28/29.04.07	00 39 52	5.880	4.527	5.331	7.0435	271.51
24	27/28.06.05	19 32 45	5.889	5.299	5.455	10.7172	283.49
25	28/29.06.05	19 14 51	5.890	5.314	5.455	10.7165	304.71
26	28/29.06.05	19 52 18	5.905	5.315	5.455	10.7165	305.27
27	29/30.06.05	18 23 18	5.915	5.329	5.455	10.7147	325.39
28	29/30.06.05	18 56 03	5.929	5.330	5.455	10.7147	325.87
29	23/24.08.06	17 49 55	5.932	5.628	5.399	10.2243	352.18
30	07/08.06.08	23 31 25	5.925	4.312	5.189	6.1848	356.13

Для построения кривых блеска в полосе V все данные наблюдений были приведены к солнечному фазовому углу 6° . Это приведение производилось для Ганимеда с использованием фазового коэффициента 0.019 m/grad (Моррисон и Моррисон, 1980). Для Каллисто использовалось среднее значение 0.033 m/grad , полученное нами из данных разных наблюдателей (Довгопол и Шавловский, 1985, 1986; Веверка, 1980).

На рис. 9а и 9б представлены кривые блеска Ганимеда и Каллисто, связанные с изменением их орбитальной долготы. Изменения блеска Ганимеда показывают монотонное увеличение блеска до долготы примерно 70° , затем монотонное же уменьшение блеска до долготы 250° и, по-видимому, далее идет увеличение блеска. К сожалению, отсутствие данных в диапазоне долгот, превышающих 300° , не дает возможности с уверенностью судить о ходе кривой в этом диапазоне.

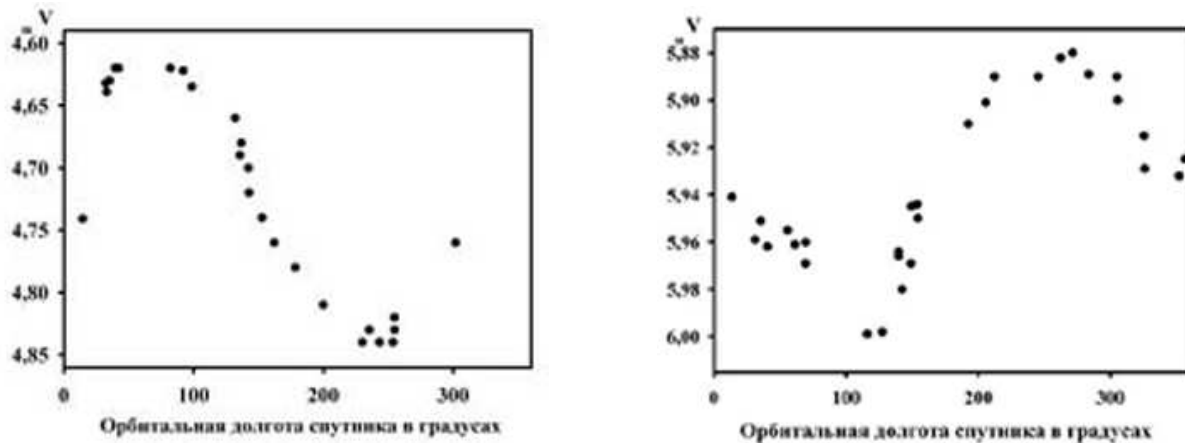


Рис. 9. Кривые блеска Ганимеда (слева) и Каллисто (справа), полученные при наблюдениях на телескопе МТМ-500 в НИИ "КрАО"

Сравнение с аналогичной кривой из работы (Моррисон и Моррисон, 1980) показывает, что, наряду с аналогичным ходом кривой, имеются некоторые отличия. В нашей кривой блеска амплитуда составляет около 0^m22 , а на рис 6.3 из вышеупомянутой работы амплитуда несколько меньше – около 0^m17 . Точное значение амплитуды определить сложно из-за имеющегося разброса точек. Кроме того, максимум кривой блеска у Моррисон Д. и Моррисон Н. приходится на 55° . Минимумы примерно совпадают.

На рис. 9б приведены изменения блеска Калисто, которые показывают монотонное уменьшение блеска до долготы примерно 125° , затем монотонное же увеличение блеска до долготы 260° и затем последующее уверенное уменьшение блеска. Амплитуда кривой составляет около 0^m12 . В работе Моррисон Д. и Моррисон Н. ход кривой аналогичен ходу кривой, полученному нами. Минимум кривой достигается на долготе примерно 140° , максимум – около 255° – 260° . Имеющаяся разница в долготе минимума, возможно, объясняется немногочисленностью наших данных.

Таким образом, наши фотометрические наблюдения Ганимеда и Калисто подтвердили правильность наблюдений, приведенных в обзоре (Моррисон и Моррисон, 1980) на основе наземных наблюдений спутников Юпитера.

7 Дискуссия и выводы

Рассмотрение особенностей спутников Юпитера – Ганимед и Калисто – показывает, что эти два спутника, имеющие ничтожно малую атмосферу, можно в первом приближении считать телами безатмосферными. Данные о поверхностях таких тел мы получаем, исследуя рассеянный ими солнечный свет. Законы рассеяния света безатмосферными телами Солнечной системы, по-видимому, применимы и к исследованиям Ганимеда и Калисто. Сейчас стало известно, что при рассеянии света поверхностями безатмосферных тел необходимо учитывать рассеивающие особенности реголита, покрывающего большинство таких тел. Верхний слой реголита состоит из мелких частиц, сравнимых с длиной волны, и имеет большую пористость. Эти свойства обеспечивают обратное когерентное рассеяние, открытое в 80-х годах прошлого столетия. Эффект ближнего поля, который проявляется в более плотных средах, был теоретически предсказан О.Н. Гадомским немногим более 10 лет назад.

Поэтому можно сделать вывод, что для анализа фотометрии взаимных явлений галилеевых спутников надо использовать последние достижения астрофизики. Зависимость отражательных свойств поверхности спутников от фазового угла Солнца учитывается исследователями давно. Например, Хапке учитывает эту зависимость в своем законе, исходя из физической структуры поверхности. Параметры в законе Хапке берутся из фотометрических наблюдений при разных углах солнечной фазы. В частности, обратное когерентное рассеяние учитывается в законе Хапке эмпирически. Все неточности возникают из-за того, что делаются “обобщающие” допущения. Например, полагают, что оппозиционный эффект одинаков для всей поверхности спутника. А это неверно. Или что зависимость яркости спутника от угла вращения одинаковая при всех углах солнечной фазы, что также вносит ошибки. Эти допущения делаются из-за недостатка наблюдательной информации. Поэтому сейчас стоит проблема детализации этого учета. Н.В. Емельянов придает этому большое значение, указывая в статье (Емельянов, 2003) на необходимость использования при обработке взаимных явлений спутников Юпитера эффектов вариации светоотражательных свойств поверхностей спутников. Открытые и изученные в последние годы и десятилетия законы рассеяния света – обратное когерентное рассеяние и эффект ближнего поля – могут, в значительной степени, изменять распределение яркости по диску спутника в зависимости от фазового угла Солнца.

В последние годы в НИИ “КрАО” и ГАИШ (МГУ) активно развивается спектрально-частотный метод (СЧМ), который позволяет определять размеры пятен различной природы на поверхностях безатмосферных тел (Бусарев и др., 2007; Бусарев и др., 2008; Прокофьева и Рублевский, 2007; Прокофьева-Михайловская и др., 2008а, б). Показано, что обратное когерентное рассеяние может возникать от площадок (пятен) небольших размеров, расположенных на поверхности тел, и это проявляется в переменной измеряемой с Земли яркости тела, что известно астрономам достаточно давно (Бернс и Тедеско, 1979).

Необходимо помнить, что для построения карт спутников использовались снимки, полученные космическими аппаратами при разных фазовых углах и в разных спектральных областях. Например, фотометрические свойства спутника Европа были получены по результатам анализа 90 снимков, полученных космическим аппаратом “Вояджер” при фазовых углах спутника 3° – 143° в спектральном диапазоне от 0.34 до 0.58 μ .

В настоящей статье приведены кривые блеска спутников Ганимед и Каллисто, полученные в интервале фазовых солнечных углов 5.5° – 11° и приведенные к фазовому углу 6° . Их анализ показывает совпадение с данными наблюдений, проведенных с Земли и представленных в обзоре (Моррисон и Моррисон, 1980).

Поскольку все наблюдения взаимных явлений спутников Юпитера проводятся с Земли в диапазоне фазовых углов от 0° до 12° , то при анализе наблюдений, по-видимому, надо использовать фотометрические кривые спутников, полученные с Земли и, по возможности, при тех же фазовых углах, при которых производятся наблюдения взаимных явлений. Для этого надо для разных интервалов фазовых углов получить кривые блеска спутников в зависимости от их вращения.

Таким образом, причиной расхождения кривых блеска Ганимеда и Каллисто, полученных с Земли и по картам, построенным по данным космических аппаратов, является распределение яркости по диску спутника, которое зависит от угла освещения поверхности спутника Солнцем.

Авторы глубоко благодарны Н.В. Емельянову за постоянный интерес к работе и ценные замечания по содержанию данной статьи.

Литература

- Абраменко А.Н., Агапов Е.С., Анисимов В.Ф., Прокофьева В.В., Синенко С.М. // Телевизионная астрономия. М.: Наука. 1984. С. 272.
- Аврамчук В.В., Шавловский В. И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1988. Т. 4. №. 6. С. 11.
- Бердников Л.Н. // Переменные звезды. 1987. Т. 22. С. 505.
- Бернс и Тедеско (Burns J.A., Tedesco E.F.) // Asteroids I. / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press. 1979. P. 494.
- Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Бочков В.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. №. 6. С. 663.
- Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 6. С. 95.
- Великодский Ю.И. // Дисс. канд. физ.-мат. наук. Харьков. Рукопись. 2002.
- Веверка Дж. // Спутники планет. / Ред. Дж. Бернс. М.: Мир. 1980. С. 203.
- Длугач Ж.М., Мищенко М.И. // Астрон. вестник. 1999. Т. 33. №. 6. С. 356.
- Длугач Ж.М., Мищенко М.И. // Тезисы докладов конференции “Астрономия-2005: состояние и перспективы развития”. Труды ГАИШ. 2005. Т. 78. С. 81.
- Довгопол А.Н., Шавловский В.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1985. Т. 1. №. 4. С. 29.
- Довгопол А.Н., Шавловский В.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1986. Т. 2. №. 3. С. 48.
- Емельянов Н.В. // Астрон. вестник. 2003. Т. 37. №. 4. С. 344.
- Емельянов и Жильбер (Emelyanov N.V. and Gilber R.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 453. P. 1141.
- Кузьмин В.Л., Романов В.П. // Успехи физ. наук 1996. Т. 166. №. 3. С. 247.
- Кузьмин В.Л., Меглинский И.В. // Квант. электроника. 2006. Т. 36. №. 11. С. 990.
- Кумар Ш., Хантен Д.М. // Спутники Юпитера. / Ред. Д. Моррисон. М.: Мир. 1986. С. 171.
- Курбасова Г.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. №. 1. С. 212.
- Мищенко и Длугач (Mishchenko M.I., Dlugach J.M.) // Planet. Space Sci. 1993. V. 41. P. 173.
- Моррисон и др. (Morrison D., Morrison N.D. and Lazarewicz A.R.) // Icarus. 1974. V. 23. P. 399.
- Моррисон Д., Моррисон Н. (Morrison D. and Morrison N.) // In: Planetary satellites. Tucson. University of Arizona Press. 1977. P. 363.
- Моррисон Д., Моррисон Н. // Спутники планет / Ред. Дж. Бернс. М.: Мир. 1980. С. 402.
- Петрова и др. (Petrova E.V., Tishkovets V.P., Jockers K.) // Icarus. 2007. V. 188. P. 233.

- Прокофьева В.В., Демчиак М.И., Карачкина Л.Г., Павленко Е.П. // Астрон. вестник. 1992. Т. 26. №. 5. С. 3.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Павленко Е.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1993. Т. 88. С. 110.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Бусарев В.В. // Астрон. вестник. 2005. Т. 39. №. 5. С. 457.
- Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008а. Т. 104. №. 1. С. 218.
- Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. // Астрон. вестник. 2008б. Т. 42. №. 6. С. 540.
- Шкуратов Ю.Г. // Астрон. циркуляр. 1985. №. 1400. С. 3.
- Шкуратов Ю.Г. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1988. Т. 5. №. 3. С. 21.
- Шкуратов и др. (Shkuratov Yu.G., Kreslavsky M.A., Ovcharenko A.A., Stankevich D.G., Zubko E.S.) // Icarus. 1999. V. 141. P. 132.
- Шкуратов Ю.Г. // Луна далекая и близкая. Харьков. 2006.