

ФИЗИКА ПЛАНЕТ

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА I (обзор и анализ результатов)

В. В. Аврамчук, Т. П. Семенюк

За последние годы значительно возрос интерес к астрофизическим исследованиям спутников планет. Расширились сведения о фотометрических, спектральных, поляриметрических, температурных и других свойствах этих объектов. Совершенно новая информация о природе некоторых спутников была получена благодаря использованию космических аппаратов. Так, с помощью межпланетной станции «Маринер-9» впервые были получены крупномасштабные снимки спутников Марса Фобоса и Деймоса [35, 36]. Анализ этих снимков показал, что Фобос и Деймос представляют собой тела неправильной формы, покрытые множеством кратеров. Альбедо поверхности этих спутников очень низкое. Оба спутника состоят из очень твердого, но, возможно, раздробленного материала. С помощью космического аппарата «Пионер-10» получены интересные данные о Юпитере и его галилеевых спутниках [20, 21]. Радиопросвечивание атмосфер Ио и Юпитера во время покрытия ими КА показало, что Ио имеет ионосферу, которая на дневной стороне простирается до высот ~ 800 км с максимумом электронной плотности на высоте ~ 100 км. Протяженность ионосферы на ночной стороне ~ 200 км с максимумом электронной плотности на высоте ~ 60 км. При такой ионосфере полное давление у поверхности Ио должно быть 10^{-8} — 10^{-9} бар.

Предварительный анализ снимков спутников Юпитера [10] показывает, что два внутренних спутника — Ио и Европа состоят, по-видимому, из горных пород, а Ганимед и Каллисто — из водяного льда. В дальнейшем эти данные должны быть уточнены.

Настоящая работа посвящена обзору и анализу результатов наблюдений галилеевых спутников Юпитера за последние годы (результаты более ранних исследований привлекаются в случае необходимости). В ней рассматриваются результаты изучения вариаций яркости и цвета галилеевых спутников в зависимости от солнечного фазового угла и орбитального положения относительно Юпитера, а также результаты измерений в разных участках спектра геометрического альбедо спутников и поиски в их спектрах линий или полос поглощения, отличных от фраунгоферовых или теллурических. Особое внимание удалено вопросу недавно обнаруженной в спектре Ио эмиссии натрия в D -линии и послезатменному уярчению спутников.

ВАРИАЦИИ ЯРКОСТИ И ЦВЕТА СПУТНИКОВ С ФАЗОЙ ВРАЩЕНИЯ

Наиболее полный обзор фотометрических и колориметрических данных о спутниках, основанных на наблюдениях, выполненных в 1930—1950 гг. разными авторами, представлен в работе [2]. Анализ этих данных показывает, что только в отношении галилеевых спутников Юпитера наши сведения об основных фотометрических параметрах более или менее надежны. В случае более слабых и близких к планетам спутников рассеянный свет делает практически невозможными точные фотоэлектри-

ческие и фотографические измерения. Дальнейший прогресс в изучении природы этих тел будет связан, по-видимому, с применением космических аппаратов.

Для галилеевых спутников Юпитера представляют большой интерес вариации их яркости и цвета в зависимости от положения на орбите. Характер этих вариаций был уже достаточно полно изучен в известных работах Стеббинса [38], Стеббинса и Якобсена [39] и по наблюдениям на обсерватории Мак-Дональд в 1951—1954 гг. [2]. Дальнейшее изучение особенностей изменений блеска и цвета галилеевых спутников Юпитера было выполнено в последнее время в работах [12, 17, 29, 33]. Прежде чем перейти к обсуждению указанных работ, кратко остановимся на терминологии, принятой при исследовании спутников. На рис. 1 схематически представлена плоскость Солнце — Юпитер — спутник — Земля. Орбиты всех четырех галилеевых спутников имеют очень малый эксцентриситет. Наклон плоскостей их орбит к экваториальной плоскости Юпитера незначителен, а наклон экватора Юпитера к эклиптике всего $3^{\circ}05'$ [1]. Поэтому орбиту спутника без большой погрешности можно представить в виде окружности. Орбитальный фазовый угол α отсчитывается против часовой стрелки от линии верхнего геоцентрического соединения спутника. Поскольку спутники имеют синхронный характер вращения, то будет иметь место однозначное соответствие между углом α и долготой центра O видимого диска спутника. При $\alpha < 180^\circ$ употребляют выражение «ведущая» сторона спутника и при $\alpha > 180^\circ$ — «ведомая сторона». Угол определяется соотношением

$$\alpha = \left[\frac{t_0 - t_{\text{в.с.}}}{T_{\text{п}}} \right] 360^\circ, \quad (1)$$

где t_0 — время наблюдения спутника; $t_{\text{в.с.}}$ — время последнего верхнего соединения; $T_{\text{п}}$ — период обращения вокруг планеты. Угол θ называют солнечным фазовым углом.

В 1971 г. на обсерватории Мак-Дональд Оуэн и Лазор [33] провели серию наблюдений цвета галилеевых спутников. Они использовали 30" рефлектор и сканирующий фотометр с многоканальным счетчиком фотонов. Измерения выполнены с фильтрами стандартной системы UBV , что в сочетании с другими параметрами дало инструментальную систему $U'B'V'$, близкую к международной. Однако точной редукции своей системы к системе UBV авторы не дают, что несколько затрудняет сравнение с результатами других работ.

Измерение блеска спутников Галилея в системе UBV в 1971 г. выполнили Бланко и Каталано [12], они определили величины и показатели цвета спутников для средней оппозиции и изменение этих параметров в зависимости от солнечного и орбитального фазовых углов.

Обширная четырехцветная фотометрия галилеевых спутников Юпитера в системе $ubvy$ выполнена летом 1973 г. Моррисоном, Моррисоном и Лазаревичем [29]. Для наблюдений использовался один из 61-сантиметровых телескопов обсерватории Мауна Кеа и однолучевой фотометр с фильтрами, обеспечивающими систему, близкую к стандартной системе $ubvy$. Характеристики этих фильтров следующие:

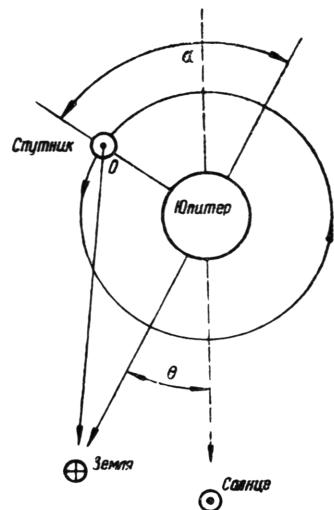


Рис. 1. Схематическая геометрия плоскости Земля—Юпитер—Солнце.

Координаты	<i>u</i>	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>y</i>
$\lambda_{\text{эфф}} V, \text{ мкм}$	0.350	0.411	0.467	0.547
Ширина пропускания, мкм	0.030	0.019	0.018	0.023

где $\lambda_{\text{эфф}}$ — эффективная длина волны фильтра.

Для получения оценок блеска и показателей цвета спутников максимальной фотометрической точности в [29]делено большое внимание корректному учету рассеянного от Юпитера света, учету экстинкции и преобразованию инструментальной системы в стандартную. Кроме того, авторы работы [29] применили для анализа полученных ими результатов методику, которая до них в фотометрии спутников Юпитера не применялась. Она будет описана ниже.

В [12, 29, 33], как и ранее [2, 38, 39], для наблюдений спутников использовались широкополосные фильтры, охватывающие относительно небольшую спектральную область ($\sim 0,350$ — $0,550 \text{ мкм}$). Поэтому на основании результатов указанных выше работ мы можем только качественно судить о тех или иных свойствах спутников. Более полную и точную информацию можно получить, применяя узкополосную фотометрию, т. е. в принципе приближаясь к монохроматическим значениям измеряемых величин. Такую работу в 1969 г. выполнил Джонсон [17], использовав для наблюдений спутников Юпитера широкий набор интерференционных фильтров (с $\Delta\lambda \approx 0,02 \text{ мкм}$) в интервале $\lambda \lambda 0,3$ — $1,1 \text{ мкм}$. Наблюдения были выполнены на $24''$ и $60''$ телескопах обсерватории Маунт Вильсон с помощью двухлучевого электрофотометра [25]. Один из каналов электрофотометра использовался для измерений спутника, а другой — для измерения фона неба.

На рис. 2, *a* и *b* представлены кривые изменения показателей цвета Ио в зависимости от фазы вращения согласно [2, 33]. Можно отметить, что по своей форме кривые $B'—V'$ [33] и $B—V$ [2] находятся в удовлетворительном согласии и дают довольно полную картину изменений цвета спутника с фазой вращения. Некоторый систематический сдвиг между кривыми (см. рис. 2, *b*) объясняется тем, что система $U'B'V'$ не совпадает с UBV , хотя, как мы уже отмечали, довольно близка к ней. Более сложная картина наблюдается в случае показателей цвета в системах $U'—B'$ и $U—B$. При хорошем согласии результатов для ведомой стороны спутника, для ведущей стороны расхождение между значениями показателей цвета $U'—B'$ и $U—B$ достигает $0^m.3$.

Аналогичные изменения показателей цвета $U'—B'$ и $B'—V'$ для других спутников согласно работе [33] показаны на рис. 2, *в*—*з*.

Как отмечалось, обширная информация об изменениях цвета спутников JI—JIV в зависимости от фазы вращения и солнечного фазового угла получена в [29] (рис. 3). Поскольку в [29] авторы использовали другую систему — $uvby$, затрудняется непосредственное сравнение их результатов с результатами в работах [2, 12, 33], где использовалась система UBV или системы, близкие к ней. Тем не менее качественное сравнение результатов указанных работ можно сделать достаточно корректно.

Рассмотрим некоторые характерные особенности вариаций цвета спутников. Как правило, самые большие вариации цвета спутников наблюдаются в ультрафиолетовой области спектра. Так, для Ио (рис. 2, *a* и 3, *a*) вариации показателей цвета достигают $0^m.35$ — $0^m.45$. При этом кривые $U'—B'$ [33] и $u—b$ [29] практически совпадают как для ведущей, так и ведомой сторон Ио, в отличие от прежних результатов Гарриса [2]. Как видно из рис. 2, *a*, *b* и 3, *a*, *b*, самая «красная» деталь на спутнике Ио расположена на его ведомой стороне (вблизи $\alpha=300^\circ$) и занимает сравнительно небольшую область поверхности. Она краснее окружающей области по крайней мере на $0^m.1$.

Авторы работы [29] высказали предположение, что отмеченная выше красная деталь на ведомой стороне Ио может состоять из такого же материала, как и открытые Минтоном [26] темно-красные полярные шапки, которые видны, когда мы смотрим на Ио при $\alpha=180^\circ$.

Цветовые вариации J II в зависимости от фазы вращения в соответствии с результатами работ [33] и [29] представлены соответственно на рис. 2, a , b , δ и 3, a , b , ε и согласованы между собой.

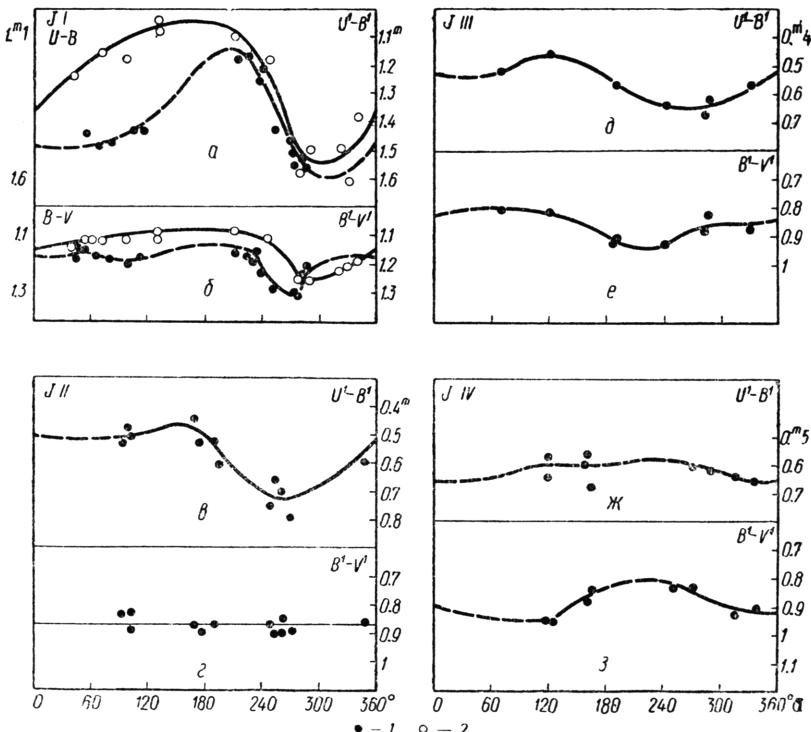


Рис. 2. Изменение характеристик цвета спутников в зависимости от фазы вращения (а):

a , b , δ , $ж$ — в показателе цвета $U'-B'$ для J I, J II, J III, J IV соответственно; $б$, $г$, $е$, $з$ — в показателе цвета $B'-V'$ для этих же спутников. 1 — наблюдения Оуэна и Лазора [33], 2 — наблюдения Гарриса [2].

В ультрафиолетовой области спектра цветовые вариации у J II такие же по величине, как и у J I. Однако в отличие от Ио для видимой области спектра у Европы вариаций цвета не наблюдается или они очень слабы, что также согласуется с более ранними результатами Гарриса [2].

Вариации показателей цвета в системах $U'-B'$ и $u-b$ (рис. 2, δ , e и 3, δ , $з$) имеют место также и в случае J III, хотя они значительно слабее, чем у J I и J II. Для видимой области спектра результаты несколько противоречивы: согласно [33], наблюдается слабое изменение цвета спутника от фазы вращения, в то время как в [2, 29] никаких изменений не установлено.

Еще более противоречивые результаты получены разными авторами при наблюдениях J IV. Как видно из рис. 2, $ж$, $з$ и 3, $ж$, $з$, кривые, полученные в [33] и [29], различаются по форме и по амплитуде как в ультрафиолете, так и в видимой области спектра. По наблюдениям [2] никаких вариаций ни в $U-B$ ни в $B-V$ в зависимости от фазы вращения вообще не было обнаружено. Возможно, в случае Каллисто, в отличие от других спутников, существенно большее влияние на вариации цвета оказывало изменение солнечного фазового угла. Например, со-

гласно Джонсону [17], при построении зависимостей цвет—фаза вращения по наблюдениям J IV, полученным при различных значениях солнечного фазового угла ($\theta = 0 \div 9^\circ$), разброс точек превышает ошибки наблюдений. По-видимому, это указывает на некоторую (порядка нескольких процентов) зависимость вариаций цвета от солнечного фазового угла. Для получения более определенных выводов по данному вопросу необходимо дополнительное тщательное исследование.

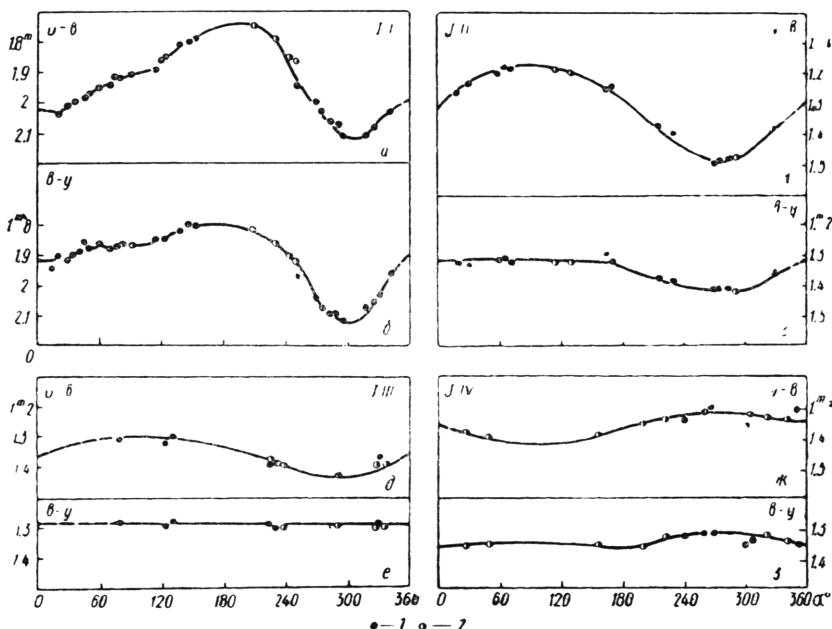


Рис. 3. Изменение характеристик цвета спутников в зависимости от фазы вращения (a) согласно [29]:

a, b, δ, φ — в показателе цвета $u-b$ для J I, J II, J III, J IV соответственно;

b, g, e, z — в показателе цвета $b-y$ для этих же спутников.

Широкополосная фотометрия спутников, выполненная в [2, 29, 33], дает возможность детально исследовать их цветовые вариации в зависимости от фазы вращения лишь в нескольких участках спектра, определяемых системами (UBV или $ubvy$). Получение таких зависимостей при использовании большого числа светофильтров представляет собой очень длительный и трудоемкий процесс. Поэтому Т. В. Джонсон [17] использовал другой метод, сущность которого заключается в получении отношений усредненных кривых для ведомой и ведущей сторон каждого спутника в спектральном интервале 0.3—1.1 $\mu\text{мкм}$. Теряя часть информации о цветовых различиях на поверхности спутника, мы, однако, получаем возможность изучить более широкий спектральный интервал.

Полученные таким образом результаты, согласно [17], представлены на рис. 4, a, б, в, г. Как видно из рис. 4, a, в случае J I вариации цвета, отмеченные в [2, 29, 33], являются только частью систематических различий спектров отражения его ведущей и ведомой сторон в интервале 0.3—0.5 $\mu\text{мкм}$. Различия в спектрах отражения ведущей и ведомой сторон спутника наблюдаются и в спектральной области от 0.68 до 0.9 $\mu\text{мкм}$.

Кривая для J II (см. рис. 4, б) показывает в ультрафиолете особенность, похожую по форме на такую же особенность кривой для J I,

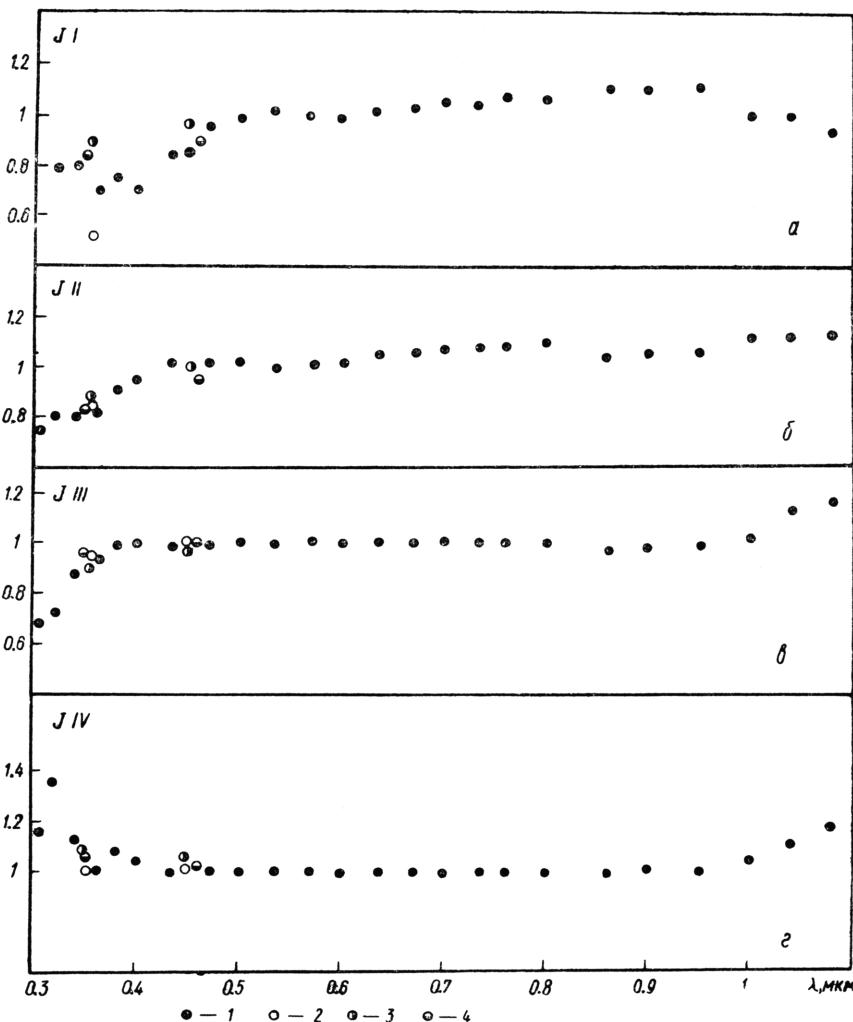


Рис. 4. Отношение спектральной отражательной способности ведомой ($\alpha > 180^\circ$) и ведущей ($\alpha < 180^\circ$) сторон спутников; за единицу принята отражательная способность спутников при $\lambda = 0,56 \text{ мкм}$:

1 — наблюдения Джонсона [17]; 2 — наблюдения Гарриса [2], 3 — наблюдения Оуэна и Лазора [33]; 4 — наблюдения Моррисона и др. [29].

однако она имеет меньшую глубину и занимает более узкий спектральный интервал (0.30—0.43 мкм). В спектральной области 0.6—1.1 мкм также наблюдаются систематические различия для ведомой и ведущей сторон спутника.

Ряд особенностей (рис. 4, в и г) наблюдается и на кривых, построенных для $J\text{ III}$ и $J\text{ IV}$. При этом для $J\text{ IV}$ эффект в ультрафиолете имеет противоположный знак по сравнению с кривыми для $J\text{ I}$ — $J\text{ III}$: ведомая сторона спутника имеет более высокую отражательную способность по сравнению с ведущей стороной.

Кроме результатов Джонсона [17], на рис. 4 для всех спутников приведены для сравнения усредненные результаты UVB - и ubv -фотометрии согласно [2, 29, 33]. Согласие результатов указанных работ вполне удовлетворительно.

В [17, 29], кроме изучения вариаций цвета, значительное внимание уделялось изучению вариаций яркости спутников $J\text{ I}$ — $J\text{ IV}$ в зависимости от орбитального и солнечного фазовых углов.

Поскольку изменения яркости спутников, обусловленные изменением солнечного фазового угла, могут быть такого же порядка, как и изменения из-за орбитального угла, то при построении зависимостей яркость—орбитальный фазовый угол удобно относить наблюдения спутника к средней оппозиции, т. е. к некоторым стандартным условиям. Для этого можно воспользоваться выражением

$$f_{\text{сп.опп}}(\lambda, a) = f_{0*}(\lambda) l(\lambda, a, \Theta) \left[\frac{r\Delta}{a(a-1)} \right]^2 \Phi^{-1}(\Theta), \quad (2)$$

где $f_{\text{сп.опп}}(\lambda, a)$ — поток от спутника, отнесенный к средней оппозиции в данной длине волны; $f_{0*}(\lambda)$ — внеатмосферный поток от звезды; $l(\lambda, a, \Theta)$ — наблюденное отношение потоков от спутника и звезды (исправленное за экстинкцию); r — расстояние Солнце—спутник (в а. е.); Δ — расстояние Земля—спутник; a — большая полуось орбиты Юпитера, равная 5.208 а. е.; $\Phi(\Theta)$ — фазовый закон, определяющий изменение яркости спутника от Θ , и при этом $\Phi(0^\circ) = 1$. Иногда более удобно пользоваться звездными величинами. Тогда вместо выражения (2) получим

$$m_{\text{сп.опп}}(\lambda, a) - m_*(\lambda) = -2.5 \lg \left\{ l(\lambda, a, \Theta) \left[\frac{r\Delta}{a(a-1)} \right]^2 \Phi^{-1}(\Theta) \right\}, \quad (3)$$

где $m_{\text{сп.опп}}(\lambda, a)$ и $m_*(\lambda)$ — соответственно величины спутника и звезды.

Как видно из выражений (2) и (3), для приведения наблюдаемых величин спутника к средней оппозиции необходимо знать его фазовый закон, или, иначе говоря, фазовую функцию. Стеббинс [38] первым определил фазовые функции спутников на основании фотоэлектрических наблюдений, предполагая фазовый закон в форме

$$-2.5 \lg \Phi(\Theta) = A\Theta + B\Theta^2, \quad (4)$$

т. е. используя способ параболизации фазовой зависимости. Гаррис [2] использовал фазовую функцию Стеббинса [38] для редукции большого числа наблюдений спутников.

В несколько измененном виде метод параболизации фазовой зависимости использован и в работе [17].

В качестве первого приближения для расчета функции $\Phi(\Theta)$ Джонсон [17] использовал коэффициенты A и B (для системы V — величин спутника) согласно [39], а затем по сглаженным кривым находил значения коэффициентов, наиболее подходящих для данных наблюдений. Сводка значений коэффициентов A и B для $J I$ — $J IV$ согласно [39] и

полученных Джонсоном [17] дана в табл. 1.

В отличие от [2, 39, 17] Моррисон и др. [29] применили для анализа полученных ими результатов методику, используемую при фотометрии астероидов [3]. Согласно этой методике зависимость звездной величины спутника, как и астероида, от солнечного фазового угла можно представить двумя частями. При $6^\circ < \Theta < 12^\circ$ имеет место линейная зависимость, характеризуемая так называемым фазовым коэффициентом, или величиной $dV/d\Theta$, т. е. скоростью изменения звездной величины спутника. Однако при меньших значениях фазовых углов яркость спутников $J I$ — $J IV$ увеличивается существенно быстрее, чем по линейному закону, и для моделирования этого увеличения можно исполь-

Таблица 1

Спутник	A [39]	A [17]	B [39]
$J I$	0.0460	0.0360	—0.00100
$J II$	0.0312	0.0262	—0.00125
$J III$	0.0323	0.0273	—0.00066
$J IV$	0.0780	0.0830	—0.00270

ны спутника, как и астероида, от солнечного фазового угла можно представить двумя частями. При $6^\circ < \Theta < 12^\circ$ имеет место линейная зависимость, характеризуемая так называемым фазовым коэффициентом, или величиной $dV/d\Theta$, т. е. скоростью изменения звездной величины спутника. Однако при меньших значениях фазовых углов яркость спутников $J I$ — $J IV$ увеличивается существенно быстрее, чем по линейному закону, и для моделирования этого увеличения можно исполь-

зователь подходящие параболы. Вблизи оппозиции для спутников имеет место так называемый оппозиционный эффект, или оппозиционная волна, амплитуду которой можно оценить разностью между реально наблюдаемой величиной спутника V' при $\Theta=0^\circ$ и величиной V , которая получается в результате линейной экстраполяции фазового закона. Таким образом, сложная кривая зависимости блеска спутника от солнечного фазового угла в работе [29] характеризуется следующими па-

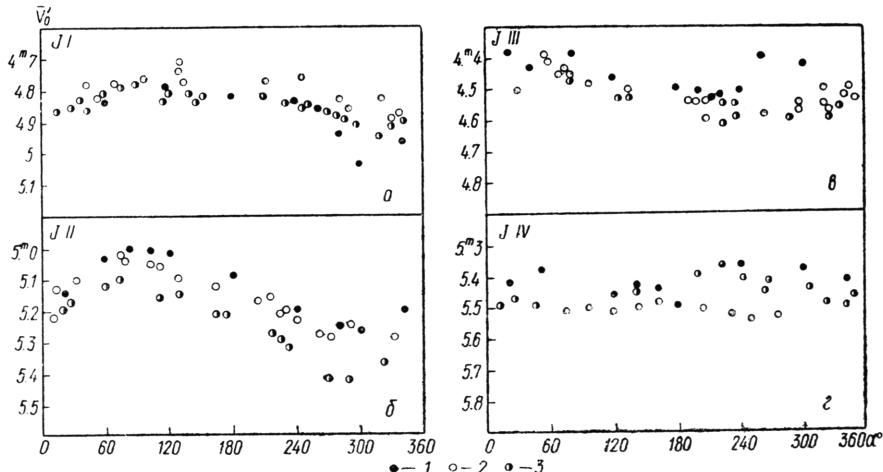


Рис. 5. Изменение блеска галилеевых спутников (\bar{V}_0') с фазой вращения (а): а, б, в — фазовые кривые Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто соответственно; 1 — наблюдения Джонсона [17], 2 — наблюдения Гарриса [2], 3 — наблюдения Моррисона и др. [29].

раметрами: V' и V при $\Theta=0^\circ$, $dV/d\Theta$ при $6^\circ < \Theta < 12^\circ$; коэффициентами A и B при $0^\circ < \Theta < 6^\circ$. Усредненные значения указанных параметров согласно [29] приведены в табл. 2, где для сравнения также даны интегральные звездные величины спутников \bar{V}_0' в среднее противостояние согласно Гаррису [2] и Джонсону [17].

Таблица 2

Спутник	\bar{V}_0'			\bar{V}_0	$d\bar{V}/d\Theta$ ($\Theta > 6^\circ$)	A ($\Theta < 6^\circ$)	B ($\Theta < 6^\circ$)
	[29]	[2]	[17]				
Ио	+4.85	+4.80	+4.80	+5.06	0.0150	0.0850	-0.0058
Европа	5.27	5.17	5.23	5.35	0.0030	0.0370	-0.0028
Ганимед	4.54	4.54	4.44	4.67	0.0125	0.0542	-0.0035
Каллисто	5.47	5.50	5.41	5.77	0.0250	0.1250	-0.0083

Звездные величины спутников, приведенные в табл. 2, даны в системе V . Основными звездами сравнения для перевода инструментальной системы в стандартную [29] служили HR 7560 и HR 7602. Джонсон [17] измерял яркость спутников по отношению к звезде о Vir класса G5, для которой он получил величину $\lambda=0.56$ мкм $3^m.99$ из наблюдений отношения яркости этой звезды к яркости α Leo.

Как мы уже отмечали, Джонсон [17] предположил, что величины спутников, полученные этим путем, близки к истинным V -величинам. Однако из собственных наблюдений авторы работы [29] сделали вывод, что звездная величина о Vir в системе V равна не $3^m.99$, а $4^m.15 \pm 0^m.02$. Если последнее значение величины о Vir использовать для редукции наблюдений Джонсона, то оно хорошо согласуется с результатами [2, 29]. Однако мы находим, что это не так. В некоторых случаях, например для Ио, после исправления результатов Джонсона [17] на $0^m.15$

получился систематический сдвиг как по отношению к Гаррису [2], так и Моррисону и др. [29]. Поэтому мы использовали для всех спутников результаты Джонсона, приведенные в [17].

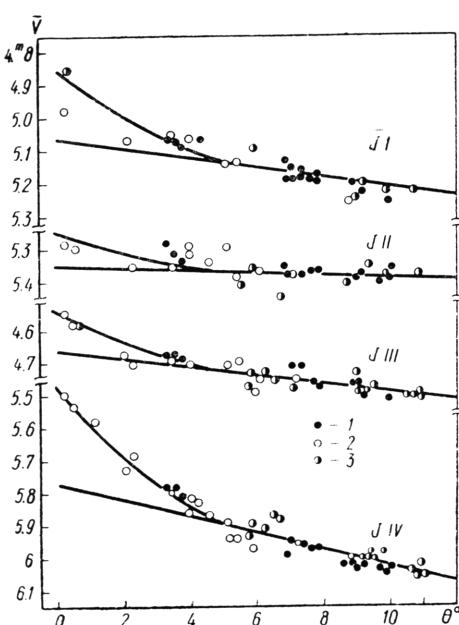


Рис. 6. Зависимость блеска галилеевых спутников (V) от солнечного фазового угла (Θ):

1 — наблюдения Моррисона и др. [29], 2 — наблюдения Джонсона [17], 3 — наблюдения Бланко и Каталано [12].

кривые показывают, что спутники Галилея имеют различающиеся фазовые функции как при $\Theta > 6^\circ$, так и при меньших фазовых углах. Для спутников подтверждается наличие эффекта оппозиции, особенно большого для Каллисто ($\sim 0^m.3$).

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ АЛЬБЕДО СПУТНИКОВ

Количественно отражательную способность спутников удобно характеризовать с помощью геометрического альбедо, для определения которого можно использовать выражение (см. [1])

$$\lg P(\lambda) + \lg \Phi(\Theta) = 0.4[m_{\odot}(\lambda) - m_{\text{сп}}(\lambda)] + 2 \lg \left(\frac{r\Delta}{P} \right), \quad (5)$$

где r — расстояние спутник—Солнце (в а. е.); Δ — расстояние спутник—Земля (в а. е.); R — радиус спутника (в а. е.); Θ — солнечный фазовый угол; $\Phi(\lambda)$ — фазовая функция; $m_{\odot}(\lambda)$ и $m_{\text{сп}}(\lambda)$ — соответственно звездные величины Солнца и спутника. Основные трудности, возникающие при вычислении геометрического альбедо, связаны с необходимостью знать звездную величину Солнца (интегральную, для всего диска) и линейный (или угловой) радиус спутника.

Звездная величина Солнца определялась неоднократно как визуально, так и фотоэлектрически. Наиболее полный обзор и анализ всех этих определений содержится в сводке Гарриса [2], согласно которой в качестве окончательной оценки звездной величины Солнца можно принять $V = -26^m.81 \pm 0^m.10$. Исходя из этой оценки звездной вели-

С учетом этого на рис. 5 показаны изменения блеска спутников с орбитальной фазой в соответствии с результатами [2, 17, 29]. Для $J I$, $J III$ и $J IV$ мы находим удовлетворительное согласие результатов указанных работ. Только результаты для $J II$ Моррисона и др. [29] показывают систематический сдвиг порядка $0^m.1$ по отношению к результатам Гарриса [2] и Джонсона [17]. Это может быть объяснено недостаточно хорошей редукцией результатов работы [29] к средней оппозиции методом параболизации из-за отсутствия наблюдений при $\Theta < 3^\circ$.

На рис. 6 показаны зависимости усредненных, исправленных за вращение, V -величин спутников от солнечного фазового угла в соответствии с результатами работ [12, 17, 29].

Как видим, линейная часть фазовой кривой для каждого спутника хорошо представлена. Однако из-за ограниченного количества наблюдений кривые определены менее уверенно при малых фазовых углах. Тем не менее приведенные на рис. 6

чины Солнца, мы и вводили при необходимости соответствующие поправки в значения геометрических альбедо спутников.

Значение геометрического альбедо спутника существенным образом зависит от его радиуса. Действительно, изменение радиуса спутника на ΔR будет изменять его альбедо в $\left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)^2$ раз. Поэтому при сравнении результатов разных авторов необходимо учесть поправки из-за различий в принимаемых ими радиусах спутников.

В 1970 г. Дольфюс [4] опубликовал значения пересмотренных радиусов галилеевых спутников. Однако О'Лири [31] на основании более поздних и более точных измерений радиуса Ио по покрытию им β Sco [40] показал, что значения радиусов спутников согласно сводке Дольфюса занижены на несколько процентов. В дальнейшем Моррисон, Круикшенк и Мерфи [28] показали, что в расчетах целесообразно принимать радиус Ио, полученный из покрытия β Sco, а для остальных спутников радиусы Дольфюса [4] должны быть увеличены на $0''.02$. В результате были получены значения радиусов, использованные нами при анализе и сравнении результатов разных авторов.

Спутник	Радиус	Угловой радиус для расстояния 5 а. е.
Ио	1820 км	$0''.50$ дуг. сек. на расстоянии 5 а. е.
Европа	1620	0.45
Ганимед	2850	0.79
Каллисто	2570	0.71

В табл. 3 сравниваются средние значения геометрического альбедо спутников в соответствии с результатами Джонсона [17], использовавшего радиусы спутников согласно В. В. Шаронову [9] и значения альбедо, пересчитанных в соответствии с данными табл. 3 настоящей работы. В зависимости от принятых значений радиусов различия в геометрических альбедо спутников составляют 15—30%.

С учетом приведенных выше данных на рис. 7—10 показано распределение значений геометрических альбедо соответственно для J I—J IV в спектральном интервале 0.3—5.0 мкм по результатам работ [2, 17, 19, 41, 34, 8, 29, 15]. Кроме того, средние значения геометрических альбедо спутников представлены в табл. 4.

Наблюдения спутников с целью определения их геометрического альбедо выполнены Гаррисоном [2] в системе UVBVR. Для расчета использовались средние размеры спутников согласно Койперу [22].

В [17] прямые измерения геометрического альбедо спутников выполнены для $\lambda=0.56$ мкм. Для других длин волн значения $P(\lambda)$ получены нами на основании усредненных нормированных к $\lambda=0.56$ мкм кривых отражения J I—J IV. В [17] исследовался спектральный интервал 0.3—1.1 мкм.

В 1971 г. Джонсон и Маккорд [19] выполнили работу по определению значений геометрического альбедо спутников J I—J III в спектральном интервале 0.9—2.4 мкм, используя интерференционные фильтры с $\Delta\lambda=0.05$ мкм. Средние радиусы спутников принимались согласно [9]. Для редукции наблюдений к средней оппозиции использованы фазовые коэффициенты согласно работе [17]. В качестве стандарта использовалась звезда α Boo.

Таблица 3

Спутник	Геометрическое альбедо $P(\lambda_0)$ при радиусах, приведенных в	
	[24]	данной статье
Ио	0.792	0.679
Европа	0.796	0.688
Ганимед	0.615	0.414
Каллисто	0.266	0.210

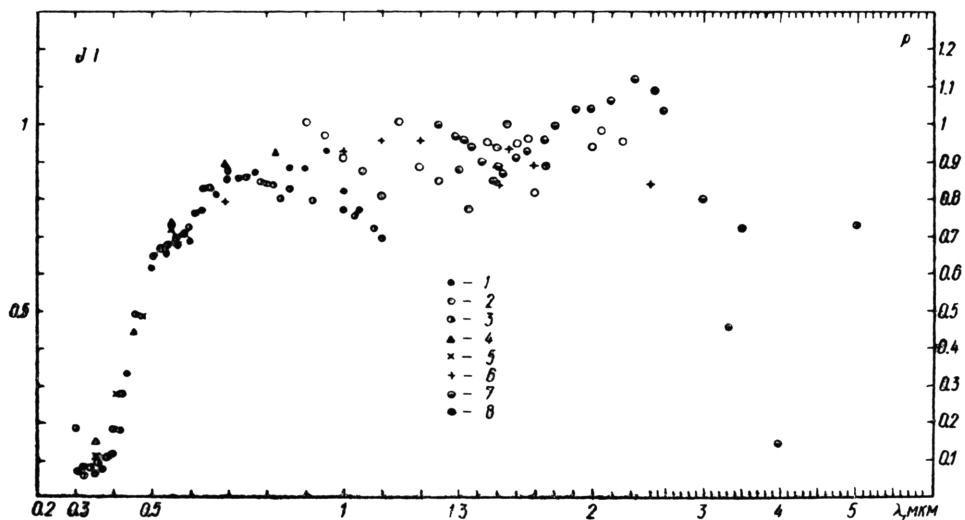


Рис. 7. Зависимость геометрического альбедо Ио от длины волны согласно наблюдениям:

1 — Джонсона [17], 2 — Джонсона и Мак Корда [19], 3 — Уэмстекера [41], 4 — Гарриса [2],
5 — Моррисона и др. [29], Мороза [8], 7 — Пилчера и др. [34], 8 — Жилемма и др. [15].

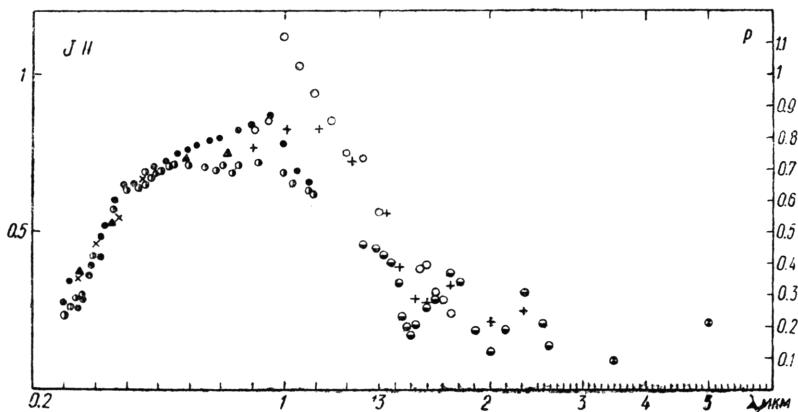


Рис. 8. Зависимость геометрического альбедо Европы от длины волны. Условные обозначения см. на рис. 7.

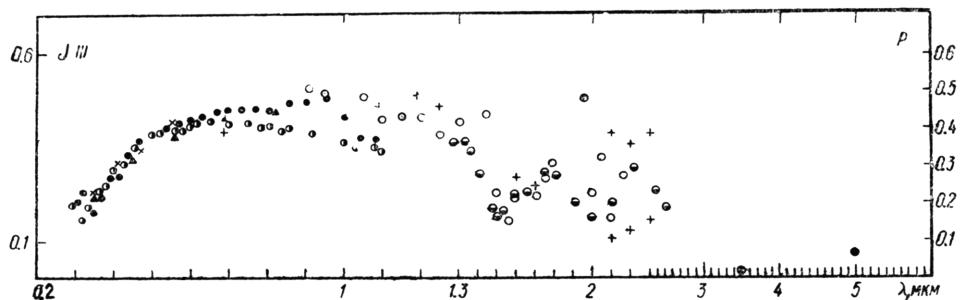


Рис. 9. Зависимость геометрического альбедо Ганимеда от длины волны.

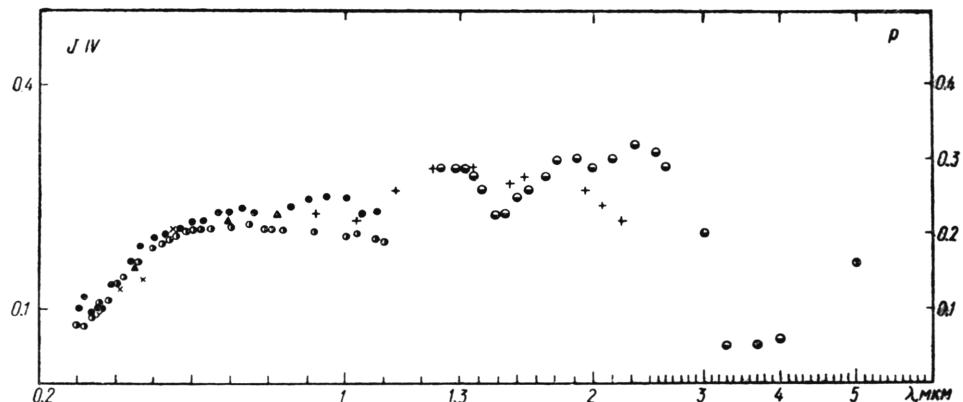


Рис. 10. Зависимость геометрического альбедо Каллисто от длины волны. Условные обозначения см. на рис. 7.

Уэмстекер [41] в 1971 г. выполнил серию наблюдений спутников Юпитера на 40" и 61" телескопах обсерватории Каталина, используя интерференционные фильтры в области 0.3—1.1 мкм. Спектральное разрешение $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.030$.

Средние размеры спутников принимали согласно [22], а для Солнца было принято значение $V_{\odot} = -27^m.64$.

В 1972 г. Пилчер и др. [34] выполнили наблюдения спутников Юпитера на 60" солнечном телескопе обсерватории Китт-Пик, используя быстродействующий Фурье-спектрометр. Ими была охвачена спектральная область 1.25—4.0 мкм и достигнуто разрешение $\Delta\lambda \simeq 0.007$ мкм вблизи $\lambda = 2.0$ мкм. Для сравнения использовались звезда λ Sqr и лунный кратер Fra Mauro. Полученные кривые спектральной отражательной способности для J I—J III были затем приближенно преобразованы в кривые геометрического альбедо. В случае J IV в [34] получена только относительная кривая отражательной способности. Для ее преобразования в кривую спектрального распределения альбедо мы воспользовались данными В. И. Мороза [8] для области 1.25—1.30 мкм.

В. И. Мороз [8] исследовал спектры галилеевых спутников с помощью призменного спектрометра. На основании полученных записей спектров спутников в области 0.7—2.5 мкм им были оценены значения геометрических альбедо. При этом для «привязки» использовались данные Гарриса [2].

Жиллетт, Меррилл и Стейн [15] в 1969—1970 гг. наблюдали спутники Юпитера на 50" рефлекторе обсерватории Китт-Пик, используя

Таблица 4

$\lambda, \text{мкм}$	Геометрическое альбедо $P(\lambda)$			
	J I	J II	J III	J IV
0.30	0.07	0.25	0.20	0.09
0.40	0.17	0.42	0.28	0.13
0.50	0.62	0.63	0.38	0.19
0.55	0.69	0.66	0.39	0.20
0.60	0.73	0.70	0.41	0.21
0.70	0.84	0.74	0.43	0.22
0.80	0.89	0.76	0.43	0.22
0.90	0.89	0.77	0.43	0.22
1.00	0.89	0.75	0.42	0.22
1.10	0.90	0.69	0.41	0.23
1.20	0.94	0.61	0.40	0.28
1.30	0.93	0.47	0.37	0.29
1.40	0.91	0.39	0.30	0.27
1.50	0.90	0.25	0.19	0.23
1.60	0.91	0.32	0.22	0.26
1.70	0.94	0.26	0.26	0.28
1.80	0.97	0.21	0.28	0.30
1.90	1.00	0.16	0.22	0.30
2.00	1.02	0.20	0.19	0.28
2.10	1.04	0.25	0.20	0.27
2.20	1.04	0.22	0.32	0.26
2.30	1.04	0.11	0.26	0.25
3.00	0.81	0.10	0.08	0.19
3.30	0.76	0.09	0.04	0.07
4.00	0.73	0.09	0.03	0.06
5.00	0.73	0.21	0.06	0.16

в качестве приемника германиевый болометр, охлаждаемый жидким гелием до $T=2^{\circ}\text{K}$. Наблюдения спутников были выполнены для четырех длин волн: $\lambda=3.5$; 4.3 ; 8.4 и 11.0 мкм с разрешением $\Delta\lambda=1$; 1 ; 0.8 и 2 мкм соответственно. Используя для Солнца данные Е. А. Макаровой и А. В. Харитонова [7] и средние размеры спутников согласно Койперу [22], авторы работы [15] оценили значение геометрического альбедо спутников для $\lambda=3.5$ и 4.9 мкм .

При вычислении альбедо спутников Юпитера авторы работы [29] использовали их средние размеры согласно Моррисону и Крукшенку [27], а для Солнца принималась величина $V_{\odot}=-26^{m}.77$ согласно [16].

Отметим наиболее характерные особенности спектрального распределения геометрического альбедо для галилеевых спутников.

Как видно из рис. 7—10, галилеевы спутники существенно отличаются между собой как значением, так и ходом альбедо по спектру. Для Ио, начиная с 0.7 мкм , наблюдается сильное уменьшение отражательной способности к коротковолновому концу спектра. Для других спутников также наблюдается ультрафиолетовое поглощение, хотя оно и существенно меньше, чем для Ио. При этом отчетливо прослеживается закономерность: ультрафиолетовое поглощение уменьшается с увеличением расстояния спутника от Юпитера.

В длинноволновой области спектра галилеевы спутники также показывают снижение отражательной способности. Особенно это заметно для Ио и Европы, альбедо которых существенно уменьшается, начиная соответственно с $\lambda=2.3$ и 1.1 мкм .

Для Ганимеда и Каллисто снижение отражательной способности в длинноволновую область спектра идет более монотонно.

Представляет несомненный интерес наличие на кривых отражения спутников ряда уверенно наблюдаемых депрессий, которые могут объясняться наличием вокруг некоторых из спутников разреженных атмосфер или, что более предпочтительно, определяются поверхностным составом этих тел. Рассмотрим вопрос о спектроскопических исследованиях галилеевых спутников более подробно.

ДЕТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ

Наблюдения спутников Юпитера с целью обнаружения их атмосфер, состоящих из CH_4 , NH_3 и других газов, ранее производились неоднократно, но каких-либо линий, отличных от солнечных, обнаружено не было.

В 1963 г. А. А. Калиняк [5] на телескопе МТМ-500 Крымской астрофизической обсерватории с помощью дифракционного спектрографа с ЭОП (дисперсия 20 \AA/mm) получил ряд спектрограмм галилеевых спутников. На некоторых из них в области 0.56 — 0.61 мкм были обнаружены десятки линий, не наблюдающихся в спектре Солнца. Автор пришел к заключению, что эти линии могут принадлежать атмосферам спутников, хотя не исключалась возможность появления ложных линий из-за несовершенства ЭОП.

Исследователи Биндер и Крукшенк [11] провели повторные наблюдения спутников Юпитера на $61''$ рефлекторе обсерватории Каталина со спектрографом с дисперсией 18.2 \AA/mm . Они установили, что во всех случаях линии, о которых сообщил Калиняк, соответствуют отдельным линиям или группам слабых фраунгоферовых линий. Не было обнаружено ни одной линии, которую можно было бы отнести только к спектрам спутников. Таким образом, результаты Калиняка не подтвердились.

А. А. Калиняк сообщил о наблюдении новых линий, расположенных вблизи дублета натрия, т. е. в области, почти свободной от бландиро-

вания фраунгоферовыми линиями. Именно в этой области спектра у Ио в последнее время была открыта переменная во времени эмиссия натрия в *D*-линии [13], что будет рассмотрено более подробно во второй части настоящего обзора.

Попытки обнаружения газовых атмосфер галилеевых спутников были предприняты также Оуэном [32] в 1963—1964 гг. Наблюдения спутников были выполнены им на 36" рефлекторе обсерватории Китт-Пик со спектрографом с дисперсией 250 Å/мм. Исследовалась полоса поглощения CH₄ 8873 Å, являющаяся наиболее сильной в еще доступной для фотографирования *ИК*-области спектра. Полученные спектрограммы Ио, Ганимеда и Каллисто сравнивались затем с лабораторными спектрами метана. Никаких следов метанового поглощения в спектрах спутников обнаружено не было.

Джонсон и Маккорд [18] впервые отметили в спектрах *J I—J III* депрессию в области 0.5—0.6 мкм, что затем подтвердил и Уэмстекер [41]. Эта депрессия сильнее всего проявляется для Ио (рис. 7), менее выражена на кривых отражения Европы и Ганимеда (рис. 8 и 9) и не существует на кривой для Каллисто (рис. 10). Авторы работы [18] указали также на депрессию вблизи $\lambda=0.8$ мкм в спектрах Ио и Каллисто и на сильное уменьшение отражательной способности этих спутников вблизи $\lambda=1$ мкм. Однако в дальнейшем [41, 34] эти результаты не получили достаточного подтверждения. Только в случае Каллисто вблизи $\lambda=1.05$ мкм (рис. 10) возможно наличие незначительной депрессии.

Наиболее характерной особенностью спектров отражения *J II—J IV* является наличие сильной депрессии в области 1.52—1.60 мкм, на что неоднократно указывалось [8, 14, 19, 22, 24].

В спектре Ио эта депрессия была также обнаружена благодаря тщательной работе Пилчера и др. [34]. В данном случае скорее всего речь идет о депрессии, вызываемой полосой поглощения какого-то материала, входящего в состав поверхностей спутников. Более подробно существующие предположения по данному вопросу мы обсудим во второй части нашего обзора.

Отметим также, что согласно [8, 34] в спектрах *J II—J IV* наблюдается ряд абсорбционных деталей и в области 2.05—2.10 мкм. Согласно [34], подобные абсорбционные детали имеют место и в спектре Ио, хотя это предположение нуждается в дальнейшей экспериментальной проверке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. ИЛ., М., 1960.
2. Гаррис Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников. — В кн.: Планеты и спутники. ИЛ., М., 1963, 241.
3. Герельс Т. Фотометрия астероидов. — В кн.: Планеты и спутники. М., «Мир», 1974, 367.
4. Дольфюс А. Диаметры планет и спутников. — В кн.: Планеты и спутники, М., «Мир», 1974, 59.
5. Калиняк А. А. Данные о спектрах галилеевых спутников Юпитера. — АЖ, 1965, 42, 1067.
6. Койпер Д. П. Обзор атмосфер планет. — В кн.: Атмосферы Земли и планет. ИЛ., М., 1951, 341.
7. Макарова Е. А., Харitonov A. B. Средние данные об абсолютном распределении энергии в спектре Солнца в области от 1800 Å до 4 мкм. — АЖ, 1968, 45.
8. Мороз В. И. Опыт инфракрасной спектрофотометрии спутников. Луна и галилеевы спутники Юпитера. — АЖ, 1965, 42.
9. Шаронов В. В. Природа планет. Ф. М. Л., М., 1968.
10. Aviation Week and Space Technology, 1974, 101, № 11, 40.
11. Binder A. B., Cruikshank D. P. On the Spectra of Galilean Satellites of Jupiter. — Astrophys. J., 1966, 144, 1240.

12. Blanco G., Catalano S. On the Photometric Variation of the Saturn and Jupiter Satellites. — Astron. and Astrophys., 1974, 33, 105.
13. Brown R. A., Chaffee F. H. Jr. High-resolution Spectra of Sodium Emission from Io. — Astrophys. J., 1974, 187, L 125.
14. Fink U., Dekkers N. H., Larson H. P. Infrared Spectra of the Galilean Satellites of Jupiter. — Astrophys. J., 1973, 179, 155.
15. Gillett F. C., Merrill K. M., Stein W. A. Albedo and Thermal Emission of Jovian Satellites I—IV. — Astrophys. Letters, 1970, 6, 247.
16. Gehrels T., Coffeen T., Owings D. Wavelength Dependence of Polarization. III. The lunar surface. — Astron. J., 1964, 69, 826.
17. Johnson T. V. Galilean satellites: narrowband photometry 0.30 to 1.10 microns. — Icarus, 1971, 14, 94.
18. Johnson T. V., McCord T. B. Galilean Satellites. The Spectral Reflectivity 0.30—1.10 microns. — Icarus, 1970, 13, 37.
19. Johnson T. V., McCord T. B. Spectral Geometric Albedo of the Galilean Satellites, 0.3 to 2.5 microns. — Astrophys. J., 1971, 169, 589.
20. Kliore A. J., Cain D. L., Fjeldbo G., Seidel B. L., Rassol S. I. Preliminary Results on the Atmospheres of Io and Jupiter from the Pioneer 10 S-Band Occultation Experiment. — Science 1974, 183, 323.
21. Kliore A. J., Fjeldbo G., Seidel B. L., Sweetnam D. N., Sesplaukis T. T., Woiceshyn P. M. The Atmosphere of Io from Pioneer 10 Radio Occultation Measurements. — IAU Colloquim N 28.
22. Kuiper G. P. Infrared Observations of Planets and Satellites. — Astrophys. J., 1957, 62, 245.
23. Lambert D. L. Solar Limb Darkening in the Infra-red Region. — Doctoral Dissertation, Oxford University, England, 1965.
24. Lee T. Spectral Albedos of the Galilean Satellites. — Communs lunar and planet. Lab., 1972, 9, 179.
25. McCord T. B. A Double Beam Astronomical Photometer. — Appl. Optics, 1968, 7, 475.
26. Minton R. B. The Red Polar Caps of Io. — Communs Lunar and Planet. Lab., 1973, 10, 35.
27. Morrison D. P., Cruikshank D. R. Physical Properties of the Nature Satellites. — Space Sci. Rev., 1974, 15, 641.
28. Morrison D. P., Cruikshank D. P., Murphy R. E. Temperatures of Titan and Galilean Satellites at 20 Microns. — Astrophys. J., 1972, L 143.
29. Morrison D. P., Morrison N. D., Lazarewicz A. R. Four-Color Photometry of the Galilean Satellites. — Icarus, 1974, 23, 399.
30. Oke J. B. Photoelectric Spectrophotometry of Stars Suitable for Standards. — Astrophys. J., 1964, 140, 689.
31. O'Leary B. T., Van Flandern T. C. Io's Triaxial Figure. — Icarus, 1972, 17, 209.
32. Owen T. Saturn's Ring and Satellites of Jupiter: Interpretation of Infrared Spectra. — Science, 1965, 149, 974.
33. Owen F. N., Lazor F. J. Surface Color Variations of the Galilean Satellites. — Icarus, 1973, 19, 30.
34. Pilcher C. M., Ridgway S. T., McCord T. S. Galilean Satellites: Identification of Water Frost. — Science, 1972, 178, 1087.
35. Pollack J. B., Veverka J., Noland M., Sagan C., Duxbury T. C., Acton C. H., Jr., Born G. H., Hartmann W. K., Smith B. A. Mariner 9 Television Observations of Phobos and Deimos. 2. — J. Geophys. Res., 1973, 78, 4313.
36. Pollack J. B., Veverka J., Noland M., Sagan C., Hartmann W. K., Duxbury T. C., Born G. H., Milton D. J., Smith B. A. Mariner 9 Television Observations of Phobos and Deimos. — Icarus, 1972, 17, 394.
37. Robinson N. Solar Radiation. Ebsevir, Amsterdam, New York, 1966.
38. Stebbins J. The Light-Variations of the Satellites of Jupiter and Their Application to Measures of the Solar Constant. — Lick Obs. Bull., 1927, 13, 1.
39. Stebbins J., Jacobsen T. S. Further Photometric Measures of Jupiter's Satellites and Uranus with Test for the Solar Constant. — Lick Obs. Bull., 1928, 13, 180.
40. Taylor G. E. The Determination of the Diameter of Io from Its Occultation of β Scorpii C on May 14, 1971. — Icarus, 1972, 17, 202.
41. Wamsteker W. Narrow-Band Photometry of the Galilean Satellites. — Communs. Lunar and Planet. Lab., 1972, 9, 171.