

**Ю. Д. Давудов, И. К. Коваль**

Фотометрические наблюдения спутников планет, как класса объектов, лишенных (за некоторым исключением) атмосфер, можно достаточно полно использовать для суждения о микрорельефе верхнего слоя их поверхностей и отчасти о природе самого поверхностного слоя. Во всяком случае, как показывает многолетний опыт фотометрических исследований Луны, данные ее фотометрических наблюдений — зависимость блеска от угла фазы, спектральный ход альбеда, распределение яркости по диску и др. — привели к достаточно определенному заключению о микрорельефе лунной поверхности и позволили высказать некоторые суждения о природе материала, из которого состоит поверхностный слой Луны.

К сожалению, для спутников планет, в отличие от Луны, сами фотометрические данные существенно ограничены из-за малых угловых размеров этих тел и ограниченности фазовых углов, при которых могут быть проведены их наблюдения с поверхности Земли. Кроме того, относительно слабый блеск спутников, а также их угловая близость к центральным телам в ряде случаев значительно снижают точность фотометрических наблюдений.

Тем не менее фотометрические (с использованием светофильтров) и спектрофотометрические наблюдения — довольно эффективное средство изучения этой группы объектов.

### **Зависимость блеска галилеевых спутников Юпитера от угла фазы**

В течение 1926 г. Стеббинс [1], а в 1927 г. Стеббинс и Якобсен [2] выполнили многочисленные фотоэлектрические измерения блеска ярких спутников Юпитера при полном наборе наблюдаемых значений фазового угла (до  $11^\circ$ ). Основная цель этих наблюдений состояла в изучении вариаций блеска спутников с фазой вращения вокруг центрального тела. Полученные данные близки к цветовой системе *B* и убедительно показывают вариации блеска всех четырех спутников с фазой вращения.

Данные Стеббинса и Якобсена неоднократно обсуждались в литературе. В результате дополнений их материалами, полученными в 50-х годах в обсерватории Мак-Дональд, было убедительно показано существование плотного эффекта в блеске, а иногда и в цвете галилеевых спутников. Последнее связано, по-видимому, с пятнистой структурой их поверхностей. Наибольшими изменениями блеска с фазой вращения отличается Каллисто при больших углах солнечной фазы.

Остановимся на результатах указанных наблюдений, полученных Стеббинсом и Якобсеном попутно, а именно: на зависимости блеска спутников от угла солнечной фазы.

На рис. 1 приведены графики зависимости блеска спутников от угла фазы, проведенные по 20—30 измерениям, более или менее равномерно покрывающим интервал фазовых углов от  $0^\circ.3$  до  $11^\circ$ . При линейной экстраполяции измерений на нулевую фазу приведенные на рис. 1 графики хорошо аппроксимируются квадратичной функцией вида

$$m = m_0 + a\alpha + b\alpha^2$$

при следующих значениях постоянных  $a$  и  $b$ :

Юпитер I (Ио)	$a=0.046$ ;	$b=-0.001$ ;
II (Европа)	$0.0312$ ;	$-0.00125$ ;
III (Ганимед)	$0.323$ ;	$-0.00066$ ;
I (Каллисто)	$0.090$ ;	$-0.036$ .

Фазовая функция Каллисто относится к ведомой (более темной вблизи оппозиции) стороне спутника. Для ведущей стороны

$$m = m_0 + 0.112 + 0.060\alpha - 0.0019\alpha^2.$$

На рис. 1 график для ведущей стороны обозначен  $IV$ .

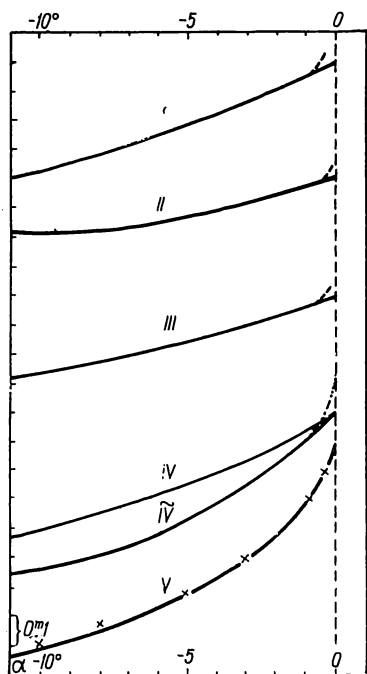


Рис. 1. Фазовая зависимость блеска:

$I$  — Ио,  $II$  — Европы,  $III$  — Ганимеда,  $IV$  — ведущей, и  $IV$  — ведомой сторон Каллисто,  $V$  — Луны, крестики — астероида 20 massalia. Ось абсцисс — фазовые углы, ось ординат — блеск в звездных величинах.

На рис. 1 видно, что наибольшим ростом блеска к оппозиции отличается ведущая сторона Каллисто — перепад блеска для крайних значений  $\alpha$  (при экстраполяции измерений на  $\alpha=0$  по Стеббинсу и Якобсену) равен  $0^m.55$ . Более внимательное рассмотрение измерений Стеббинса и Якобсена обнаруживает тенденцию к резкому возрастанию блеска всех четырех спутников в интервале фазовых углов  $1 \div 0^\circ$  (пунктир на рис. 1). Особенно хорошо этот эффект выражен у Каллисто (ведущая сторона), где в отмеченном интервале фазовых углов лежат четыре измерения.

Таким образом, вероятнее всего действительный перепад блеска спутников для фазовых углов  $0-11^\circ$  должен превышать значения, снятые непосредственно из фазовых кривых Стеббинса и Якобсена (см. рис. 1, сплошные кривые).

Основываясь на результатах Стеббинса и Якобсена и используя методику, изложенную в работе [3], можно оценить для спутника Каллисто величину эффекта оппозиции в интервале фазовых углов  $1-0^\circ$ .

Геометрическое альbedo этого спутника сравнительно низкое ( $P(B)=0.2$ ). Поэтому можно, как и в случае Луны, пренебречь эффектом рассеяния высших

порядков и полностью использовать расчеты, приведенные в работе [3]. В частности, можно определить параметр  $g$ , характеризующий относительную плотность поверхностного слоя Каллисто. Для этой цели воспользуемся данными табл. 1 о фазовой зависимости блеска планеты для различных значений параметра  $g$ , согласно [3]. Используя фазовую зависимость блеска Каллисто в интервале  $1-11^\circ$ , получим для ведущей стороны спутника (см. рис. 1,  $IV$ )  $g \approx 0.2$ . Для поверхностного слоя Луны, согласно [3],  $g=0.25$  (см. рис. 1,  $V$ ). При найденном значении параметра  $g$  приращение блеска Каллисто (ведущая сторона) в интервале фазовых углов  $0-1^\circ$  составляет  $0^m.28$ , а перепад блеска на всем интервале  $0-11^\circ$  — около  $0^m.75$ .

Естественно, что сделанный вывод о структуре поверхностного слоя на ведущей стороне Каллисто справедлив только в том случае, если этот слой удовлетворяет модели Хапке [4].

В 1955 г. Т. Герелс [5] провел фотоэлектрические измерения фазовой зависимости блеска астероида 20 massalia. В табл. 2 приведены цветовые характеристики этого астероида, а на рис. 1 — его фазовая функция в системе  $V$  (крестики), которая также практически не отличается от фазовой функции Луны и ведущей стороны Каллисто.

Таблица 1  
Фазовая зависимость блеска планеты вблизи оппозиции  
при различных значениях параметра  $g$

$\alpha$	$g$					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	0 <sup>m</sup> 00	0 <sup>m</sup> 00	0 <sup>m</sup> 00	0 <sup>m</sup> 00	0 <sup>m</sup> 00	0 <sup>m</sup> 00
1	0.62	0.47	0.28	0.18	0.14	0.11
2	0.68	0.58	0.41	0.30	0.23	0.17
3	0.71	0.63	0.49	0.38	0.30	0.24
4	0.72	0.66	0.54	0.40	0.35	0.29
5	0.73	0.68	0.57	0.48	0.40	0.34
10	0.76	0.74	0.67	0.61	0.59	0.48
15	0.80	0.78	0.73	0.68	0.63	0.58

Ведомая сторона Каллисто менее пориста, и, следовательно, эффект оппозиции менее выраженный. Непосредственно по кривой  $IV$  рис. 1, пользуясь табл. 1, получим  $g=0.6$ . Если учесть, что альbedo поверхности спутника на ведомой стороне примерно на 10% меньше, чем на ведущей, то можно принять грубо для ведомой стороны  $g=0.5$ , что примерно соответствует пористости «среднего Марса» [6].

Таблица 2  
Некоторые характеристики спутников планет

Планета и ее спутник	Радиус, км	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Абсолютная звездная величина, ( $V$ )	$m_{сп} - m_{\odot}$					$A_r$ ( $V$ )
				$U$	$B$	$V$	$R$	$I$	
<b>Юпитер</b>									
I-Ио	1660	3.9	-1.90	1.70	0.54	0.00	-0.21	-0.24	0.92
II-Европа	1440	4.0	-1.53	0.62	0.24	0.00	-0.12	-0.14	0.83
III-Ганимед	2470	2.5	-2.16	0.56	0.20	0.00	-0.14	-0.16	0.49
IV-Каллисто	2340	1.7	-1.20	0.64	0.23	0.00	-0.16	-0.19	0.26
<b>Сатурн</b>									
Энцелад	300	0.6	2.22	—	0.01	0.00	—	—	0.54
Тетия	600	0.7	0.72	0.35	0.15	0.00	—	—	0.84
Диона	650	0.85	0.89	0.24	0.08	0.00	-0.03	-0.06	0.94
Рея	900	0.75	0.21	0.34	0.13	0.00	-0.16	-0.13	0.82
Титан	2500	2.7	-1.16	1.28	0.67	0.00	-0.43	-0.25	0.21
Гиперион	200	3.3	4.61	0.34	0.06	0.00	—	—	—
Япет	600	5.5	1.48	0.49	0.08	0.00	—	—	—
<b>Уран</b>									
Титания	500	—	1.30	0.10	-0.01	0.00	-0.07	-0.19	—
Оберон	400	—	1.49	0.12	0.02	0.00	-0.04	-0.08	—
<b>Нептун</b>									
Тригон	2000	4.6	-1.16	0.40	0.14	0.00	-0.13	-0.28	0.36
Неренда	150	3.6	4.00	—	0.17	0.00	—	—	—
Луна	1738	3.34	0.21	0.61	0.29	0.00	-0.35	-0.52	0.11
20	—	—	6.77	0.47	0.19	0.00	—	—	—

Высокое альbedo первых трех галилеевых спутников не позволяет столь просто определить параметр  $g$  (как это было сделано выше), что связано с необходимостью учета рассеяний высших порядков. Однако при одной и той же пористости поверхностного слоя с увеличением альbedo поверхности должна уменьшаться величина наблюдаемого эффекта оппозиции [7]. Если, например, при очень высоком альbedo Ио (геометрическое альbedo в системе  $B$  около 0.6) фазовая кривая спутника все же дает в интервале  $0-11^\circ$  перепад блеска около  $0^m.4$ , то это означает, что пористость его поверхности также довольно высока. В какой-то мере это относится также к спутникам Европа и Ганимед. В целом данный результат хорошо согласуется с малой тепловой инерцией Ганимеда, найденной по изменению теплового излучения при вхождении спутника в тень Юпитера [8].

Вывод о высокой пористости поверхностных слоев галилеевых спутников Юпитера необходимо принимать во внимание при анализе спектрофотометрических наблюдений с целью изучения природы верхнего покрова спутников.

### Альbedo и распределение энергии в спектре спутников

В настоящее время мы располагаем зависимостью альbedo галилеевых спутников Юпитера от длины волны в интервале  $0.35-2.5$   $\mu\text{км}$ . В области  $0.35-0.82$   $\mu\text{км}$  фотоэлектрические измерения со светофильтрами [9] достаточно уверены. Спектрофотометрические данные в видимой [10] и в ИК-области [11] спектра отрывочны и нуждаются в уточнении. Геометрическое альbedo первых двух спутников в красной области спектра загадочно высокое (табл. 2).

Для планеты, лишенной атмосферы, геометрическое альbedo  $p$ , видимое альbedo в центре полного диска  $q$  и фактор гладкости поверхности  $g$  связаны соотношением [12]

$$p = \frac{2}{q + 2} g.$$

Как правило,  $q > p$ , но для Каллисто, по крайней мере в коротковолновой области спектра (где геометрическое альbedo спутника примерно такое же, как и у Луны),  $q \approx 0$  и  $g \approx p$ . С увеличением альbedo возрастает и величина параметра  $g$  [7, 13]. Таким образом, перепад видимого альbedo в интервале  $0.35-0.82$   $\mu\text{км}$  у всех галилеевых спутников, особенно у Ио, должен быть еще больше, чем отмеченный в табл. 2 перепад геометрического альbedo.

Обращает внимание, что большему значению альbedo спутника соответствует большая его средняя плотность (см. табл. 2). Направляется вывод, что диаметры Ио и Европы определены с большой ошибкой (занижены), особенно если учесть, что угловые диаметры этих спутников сравнительно малы и что они расположены ближе к Юпитеру, чем Ганимед и Каллисто, так что фон от Юпитера затрудняет точные микрометрические измерения.

Камишель [14] и Дольфюс [15] получили значения диаметров Ио и Европы несколько больше ранее принятых, но соответствующие поправки не меняют основную суть — альbedo Ио и Европы все же остаются очень высоким.

Высокое альbedo определено также для спутников Сатурна — Тетии, Дионы и Реи. Однако эти данные не заслуживают доверия, так как диаметры названных спутников непосредственно измерить нельзя из-за большого их удаления от Земли. Пожалуй, за исключением Луны и галилеевых спутников Юпитера, для всех спутников планет более или

менее достоверными фотометрическими характеристиками являются только их блеск и распределение энергии в спектре.

По измерению ИК-спектра галилеевых спутников Юпитера в области 0.7—2.5  $\mu\text{м}$  В. И. Мороз [16] высказал предположение, что, по крайней мере, значительная часть поверхностей Европы и Ганимеда может быть покрыта льдом. Однако, согласно [17], в видимой области спектра лед имеет обратный ход альbedo по спектру по сравнению с тем, что дают наблюдения. Если сравнительно небольшой спад энергии к фиолетовому концу спектра у Европы еще можно попытаться объяснить присутствием иней, сквозь который просвечивает собственная поверхность спутника, то данные для Ио пока не поддаются никакому объяснению. Вопрос же о наличии атмосферы у галилеевых спутников пока остается открытым.

В течение 1968—1969 гг. на 2-метровом рефлекторе Шемахинской астрофизической обсерватории Ю. Д. Давудовым было получено около 60 спектрограмм галилеевых спутников Юпитера и Титана в области 0.40—0.65  $\mu\text{м}$ . Наблюдения проводились в касегреновском фокусе с помощью дифракционного спектрографа (дисперсия — 30 и 75  $\text{\AA}/\text{мм}$ ). Звезды сравнения выбирались по каталогу Харитонова [18], а для фотометрической привязки спектрограмм спутников к Солнцу использовались данные Г. Ф. Ситника [19]. Средние графики распределения энергии в спектре Ио (16 спектрограмм), Европы (9), Ганимеда (7), Каллисто (7) и Титана (17) представлены на рис. 2 и показывают удовлетворительное согласие с данными других авторов, если учесть, что показатель цвета спутников испытывает изменения с фазой вращения.

Полученные спектрограммы спутников сравнивались также со спектром Луны в области полосы 6190  $\text{\AA}$   $\text{CH}_4$ . В спектре Титана эта полоса хорошо выделяется. Ее эквивалентная ширина составляет около 20  $\text{\AA}$  [20]. Тщательные измерения спектрограмм спутников Юпитера не показали никаких следов полосы 6190  $\text{\AA}$   $\text{CH}_4$ , что отмечали ранее и другие наблюдатели. Добавим к этому, что спектральный ход альbedo Ио вообще довольно трудно объяснить влиянием атмосферы. Если предположить, что спутник имеет в этой области спектра нейтральную поверхность с высоким альbedo, то для удовлетворения наблюдениям понадобилась бы атмосфера с довольно сложной оптической моделью. Такая атмосфера должна иметь относительно большую оптическую толщину и значительное истинное поглощение во всей области 0.35—0.82  $\mu\text{м}$ , что трудно согласовать с высоким альbedo спутника в красных лучах.

Цвет Ио очень меняется с фазой вращения, достигая в  $U-V$  значения около  $0^m.65$  ( $\approx 0^m.2$  в  $B-V$  и  $\approx 0^m.45$  в  $U-B$ ). Это означает, что величина долготного эффекта в блеске Ио возрастает от  $V$  к  $U$ . Иными

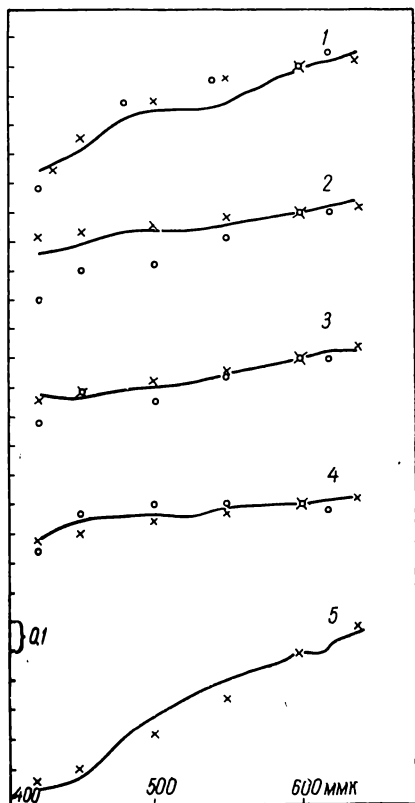


Рис. 2. Относительное распределение энергии в спектре:

1 — Ио, 2 — Европы, 3 — Ганимеда, 4 — Каллисто, 5 — Титана. Крестики — измерения Гарриса, кружки — Прибоевой. Ось ординат — логарифмы интенсивностей.

словами, контраст темных образований на поверхности спутника с их окрестностями возрастает к фиолетовому концу спектра. У остальных трех галилеевых спутников контраст деталей в  $U$ ,  $B$  и  $V$  почти один и тот же [9]. Такой эффект, который наблюдается у Ио, могла бы дать атмосфера, у которой истинное поглощение преобладает над рассеянием, а оптическая толщина растет к фиолетовому концу спектра. Тогда необходимо предположить, что в области долготы около  $300^\circ$  (соответствующей минимуму блеска Ио вблизи оппозиции) располагаются области рельефа с пониженным уровнем. Однако отсутствие наблюдаемых признаков атмосферы у Ио делает такую гипотезу мало оправданной.

По-видимому, за наблюдаемый ход спектральных значений у Ио, как и у подавляющего большинства других спутников планет, ответственна главным образом все же его поверхность, хотя ни астероиды, ни метеориты не имеют сходных с этим спутником спектральных значений альбеда [17]. С другой стороны, атмосферную гипотезу окончательно отбрасывать пока нет достаточных оснований. Во всяком случае, сравнительно небольшая масса галилеевых спутников и отсутствие в их спектре молекулярных полос  $\text{CN}_4$  еще не являются определяющим аргументом в пользу этого.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stebbins J. — Lick Obs., Bull, 1927, 385.
2. Stebbins J., Jacobsen T. S. — Lick Obs. Bull., 1928, 401.
3. Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. — Астрон. журн., 1970, 47.
4. Нарке В. W. — J. Geophys. Res., 1963, 68, 4571.
5. Gehrels T. — Ap. J., 123, 1956, 2.
6. Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. — Астрон. журн., 1971, 48.
7. Бугаенко О. И. и др. — Статья в наст. сб.
8. Muggau V. C., Westphal J. A., Wildey R. L. — Ap. J., 1965, 141, 1590.
9. Гаррис Д. Планеты и спутники, гл. 8, под ред. Д. Койпера и Б. Миддлхерст, ИЛ, 1963.
10. Прибоева Н. Б. — Труды АИ АН Каз.ССР, 1967, IX.
11. Мороз В. И. — Астрон. журн., 1965, 42, 1287.
12. Коваль И. К. Докт. дисс. К., 1968.
13. Акимов Л. А., Барабашов Н. П. — АЦ АН СССР, 1969, 540.
14. Samichel H. — Ann. d'Astrophys., 1953, 16, 41.
15. Dollfus A. — C. R., 1954, 238, 1475.
16. Мороз В. И. Физика планет. «Наука», М., 1967, 475.
17. Кринов Е. Л. — Астрон. журн., 1940, 17, 4.
18. Харитонов А. В. — Астрон. журн., 1963, 40, 2.
19. Ситник Г. Ф. — АЦ АН СССР, 1964, 292.
20. Давудов Ю. Д. — АЦ АН СССР, 1970, 563.

#### SPECTROPHOTOMETRIC PECULIARITIES OF SOME SATELLITES OF PLANETS

Yu. D. DAVUDOV, I. K. KOVAL

#### Summary

Stebbin's and Jacobsen's photoelectric measurements of the solar phase-brightness dependence for Jupiter's galilean satellites are used to show that the surface layers of the satellites are very porous. The parameter  $g$  that characterized relative density of a surface layer is equal to 0.2 for Callisto.

Results of spectrophotometric observations of satellites are discussed briefly from the point of view of a possible nature of their surfaces.