

УДК 523.4

**Оптические характеристики галилеевых спутников Юпитера в спектральной области 0.347—0.792 мкм.****I. Зависимость отражательной способности от орбитального фазового угла вблизи оппозиции**

А. Н. Довгопол, В. И. Шавловский

Проведены электрофотометрические наблюдения галилеевых спутников Юпитера в спектральной области 0.347—0.792 мкм с использованием 11 интерференционных фильтров ( $\Delta\lambda/\lambda \approx 2\%$ ). Получена зависимость отражательной способности спутников от орбитального фазового угла вблизи оппозиции ( $\alpha \leq 1.2^\circ$ ). Наибольшая амплитуда орбитальных вариаций отражательной способности (до 40%) наблюдается у Ио в ультрафиолетовой области ( $\lambda = 0.347$  мкм), наименьшая ( $\sim 5-7\%$ ) — у Каллисто во всем исследуемом спектральном диапазоне.

*OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE GALILEAN SATELLITES OF JUPITER (0.347—0.792  $\mu\text{m}$ ): THE DEPENDENCE OF THE REFLECTIVITY ON ORBITAL ANGLE NEAR OPPOSITION, by Dougopol A. N., Shavlovskij V. I.* — Photoelectric observations of the Galilean satellites were carried out in the spectral region 0.347—0.792  $\mu\text{m}$  using 11 interference filters ( $\Delta\lambda/\lambda \approx 2\%$ ). The observations were made for solar phase angles  $\alpha \leq 1.2$ . The dependence of the satellite reflectivity on orbital phase angle was obtained. The most significant variations of the reflectivity ( $\sim 40\%$ ) were observed for Io in the ultraviolet region ( $\lambda = 0.347 \mu\text{m}$ ). Negligible variations ( $\sim 5-7\%$ ) of the reflectivity were observed for Callisto in the whole spectral region.

**Введение.** Одним из методов изучения физических характеристик поверхностей естественных спутников планет Солнечной системы являются фотометрические наблюдения. В результате фотометрических исследований галилеевых спутников Юпитера было установлено, что интенсивность солнечного излучения, отраженного от поверхностей спутников, зависит от их орбитальных и солнечных фазовых углов [2], причем эта зависимость различна в разных участках спектра [5].

Изучение особенностей солнечных и орбитальных вариаций яркости спутников позволяет сделать определенные выводы о физических свойствах их поверхностного слоя [1].

Солнечная фазовая функция каждого спутника (участка поверхности), которую можно получить из наблюдений, зависит от трех факторов [1]. Во-первых, от индикатрисы рассеяния и альbedo отдельных частиц, образующих поверхность. Эти два параметра определяются размерами частиц, их формой и оптическими свойствами материала. Во-вторых, от функции затенения отдельных элементов поверхности. Для этой функции главную роль играет мелкомасштабная структура поверхности, ее пористость, характеризуемая параметром упаковки. В-третьих, фазовая кривая зависит от функции затенения, определяемой рельефом поверхности (например, наличием кратеров) [1].

Большой интерес представляют орбитальные вариации яркости спутников. Поскольку периоды вращения и обращения галилеевых спутников совпадают, имеет место однозначное соответствие между орбитальным углом  $\theta$  и долготой центра видимого диска спутника. Следовательно, орбитальные кривые отражают характер распределения материалов с различными свойствами по поверхности спутников. Такого рода информация необходима для исследования процессов взаимодей-

ствия галилеевых спутников с окружающей средой, для построения моделей поверхностей этих объектов.

К сожалению, орбитальные кривые спутников имеются только для больших солнечных фазовых углов ( $\alpha=6-8^\circ$ ) [5], фазовые функции для широкой спектральной области неизвестны. Это связано с ограниченностью наблюдательных данных и сложностью проблемы разделения солнечных и орбитальных вариаций яркости.

Таблица 1. Характеристики фильтров

| Номер<br>фильт-<br>ра | $\lambda$ , мкм | $\Delta\lambda$ , мкм | Номер<br>фильт-<br>ра | $\lambda$ , мкм | $\Delta\lambda$ , мкм | Номер<br>фильт-<br>ра | $\lambda$ , мкм | $\Delta\lambda$ , мкм |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| 1                     | 0.792           | 0.003                 | 5                     | 0.648           | 0.008                 | 9                     | 0.457           | 0.018                 |
| 2                     | 0.755           | 0.015                 | 6                     | 0.619           | 0.010                 | 10                    | 0.407           | 0.028                 |
| 3                     | 0.726           | 0.010                 | 7                     | 0.595           | 0.010                 | 11                    | 0.347           | 0.015                 |
| 4                     | 0.692           | 0.010                 | 8                     | 0.540           | 0.014                 |                       |                 |                       |

Особенно мало данных для наиболее важного периода наблюдений — момента оппозиции, когда тени, обусловленные рельефом, не играют существенной роли, и по деталям «оппозиционной волны» можно получить информацию о микроструктуре поверхности. В связи с этим авторами данной работы проведены наблюдения спутников вблизи оппозиции. Эти наблюдения выполнялись в рамках долгосрочной программы по изучению физических характеристик поверхностей галилеевых спутников. Полученные результаты позволили определить зависимость отражательной способности спутников от орбитального угла в различных участках спектра. В дальнейшем эти данные будут использованы для определения фазовых функций отдельных участков поверхности галилеевых спутников.

**Наблюдения.** Наблюдения проводились в мае — июне 1983 г. на 60-см рефлекторе ГАО АН УССР (гора Майданак, УзССР) с помощью электрофотометра, работающего в режиме счета фотонов. В качестве приемника излучения использовался фотоумножитель ФЭУ-79. Отдельные участки спектрального интервала 0.347—0.792 мкм вырезались при помощи 11 интерференционных фильтров, эффективные длины волн  $\lambda$  и полуширины  $\Delta\lambda$  которых приведены в табл. 1.

В качестве звезды сравнения была выбрана звезда  $9\omega$  Орh, имеющая спектральный класс, близкий к солнечному, и располагавшаяся на угловом расстоянии  $\sim 1^\circ$  от Юпитера. Абсолютные значения распределения энергии в спектре звезды  $9\omega$  Орh определяли путем привязки к звезде  $\lambda$  Vir, данные для которой взяты из [6]. Привязка этих звезд осуществлялась параллельно с наблюдениями спутников на той же аппаратуре. Внутренняя сходимость относительной привязки звезд оказалась лучше 1 %.

Привязка к звезде сравнения проводилась до и после каждой серии наблюдений спутников. В течение ночи яркость звезды сравнения измерялась 10—15 раз. Наблюдения звезды проводились по схеме: звезда — фон — звезда. При измерении яркости спутника особое внимание уделялось корректному учету фона от яркой планеты. Для этого предварительно исследовалось распределение фона вокруг Юпитера в различных участках спектра. Во время измерения фона центр диафрагмы фотометра находился на том же угловом расстоянии от центра диска Юпитера, что и спутник. При отсчете на звезду или спутник накапливалось  $\sim 10^4-10^5$  импульсов, что обеспечивало статистическую точность лучше 1 %.

Начало и конец экспозиции по всемирному времени UT, орбитальный фазовый угол  $\theta$  и солнечный фазовый угол  $\alpha$  на момент наблюдений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Условия наблюдений

| Дата         | $\alpha$ , град | Спутник      | Время (UT)   | $\theta$ , град | Спутник      | Время (UT)   | $\theta$ , град |     |
|--------------|-----------------|--------------|--|-----------------|--------------|--|-----------------|-----|
| 21.05.83     | 1.20            | Ио           | 21 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> —21 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> | 35              | Ганимед      | 19 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> —20 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup> | 250             |     |
|              |                 |              | 21 55 —21 57   | 36              |              | 20 05 —20 07   | 251             |     |
|              |                 |              | 22 01 —22 03   | 37              |              | 20 10 —20 12   | 251             |     |
|              |                 |              | 22 07 —22 09   | 37              |              | 21 20 —21 22   | 253             |     |
|              |                 |              | 22 35 —22 37   | 42              |              | 21 26 —21 28   | 253             |     |
|              |                 |              | 22 41 —22 43   | 42              |              | 21 31 —21 33   | 254             |     |
|              |                 |              |  |                 |              | 22 52 —22 54   | 256             |     |
|              |                 | Каллисто     | 19 41 —19 43   | 321             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 19 47 —19 50   | 321             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 19 53 —19 55   | 321             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 21 03 —21 05   | 322             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 21 09 —21 11   | 322             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 21 15 —21 17   | 322             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 22 56 —22 58   | 324             |              |  |                 |     |
| 22.05.83     | 1.00            | Ио           | 18 15 —18 17   | 208             | Европа       | 20 37 —20 39   | 97              |     |
|              |                 |              | 18 22 —18 24   | 209             |              | 20 42 —20 44   | 97              |     |
|              |                 |              | 18 28 —18 30   | 210             |              | 20 48 —20 50   | 98              |     |
|              |                 |              | 19 36 —19 38   | 220             |              | 21 21 —21 23   | 100             |     |
|              |                 |              | 19 42 —19 44   | 220             |              | 21 28 —21 30   | 101             |     |
|              |                 |              | 21 59 —22 01   | 240             |              |  |                 |     |
|              |                 |              | 22 04 —22 06   | 240             |              |  |                 |     |
|              |                 | Ганимед      | 20 55 —20 57   | 303             | Каллисто     | 19 15 —19 17   | 342             |     |
|              |                 |              | 21 02 —21 04   | 303             |              | 19 21 —19 23   | 342             |     |
|              |                 |              | 21 07 —21 09   | 303             |              | 19 26 —19 28   | 342             |     |
|              |                 |              | 21 35 —21 38   | 304             |              | 21 47 —21 49   | 345             |     |
|              |                 |              | 21 41 —21 43   | 304             |              | 21 54 —21 55   | 345             |     |
|              |                 |              | 21 19 —21 21   | 78              |              | Европа   | 19 51 —19 53    | 195 |
|              |                 |              | 21 26 —21 29   | 79              |              |  | 19 56 —19 58    | 196 |
| 21 33 —21 36 | 80              | 20 02 —20 04 | 196  |                 |              |  |                 |     |
| 21 39 —21 42 | 81              | 22 03 —22 06 | 205  |                 |              |  |                 |     |
| 22 37 —22 40 | 87              | 22 08 —22 11 | 205  |                 |              |  |                 |     |
| 22 43 —22 45 | 88              | 22 14 —22 17 | 205  |                 |              |  |                 |     |
| Ганимед      | 18 26 —18 28    | 348          | Каллисто   | 18 48 —18 50    | 5            |  |                 |     |
|              | 18 32 —18 34    | 348          |  | 18 53 —18 55    | 5            |  |                 |     |
|              | 18 37 —18 41    | 348          |  | 18 59 —19 01    | 6            |  |                 |     |
|              | 19 38 —19 40    | 350          |  | 24 47 —21 50    | 8            |  |                 |     |
|              | 19 44 —19 46    | 350          |  | 21 53 —21 56    | 8            |  |                 |     |
|              | 19 45 —19 47    | 268          |  | Европа          | 19 56 —19 58 | 297  |                 |     |
|              | 19 50 —19 52    | 269          |  |                 | 20 01 —20 03 | 297  |                 |     |
| 20 54 —20 56 | 278             | 21 06 —21 08 | 302  |                 |              |  |                 |     |
| 21 01 —21 03 | 279             | 21 11 —21 13 | 302  |                 |              |  |                 |     |
| 21 52 —21 55 | 286             | 22 02 —22 04 | 306  |                 |              |  |                 |     |
| 21 56 —21 58 | 287             | 22 08 —22 10 | 306  |                 |              |  |                 |     |
|              |                 | 22 14 —22 16 | 307  |                 |              |  |                 |     |
| 24.05.83     | 0.60            | Ио           | 20 06 —20 08   | 42              | Каллисто     | 20 16 —20 18   | 28              |     |
|              |                 |              | 20 10 —20 12   | 43              |              | 20 21 —20 23   | 28              |     |
|              |                 |              | 21 18 —21 20   | 45              |              | 21 29 —21 31   | 29              |     |
|              |                 |              | 21 23 —21 25   | 45              |              | 21 35 —21 37   | 29              |     |
|              |                 |              | 22 20 —22 22   | 47              |              | 22 32 —22 34   | 30              |     |
|              |                 |              | 22 25 —22 27   | 47              |              | 22 36 —22 38   | 30              |     |
|              |                 |              | 20 20 —20 22   | 117             |              | Европа   | 20 35 —20 37    | 42  |
|              |                 | 20 24 —20 26 | 117  | 20 39 —20 41    | 42           |  |                 |     |
|              |                 | 19 22 —19 24 | 91   | Каллисто        | 19 32 —19 34 |  | 49              |     |
|              |                 | 19 27 —19 29 | 91   |                 | 19 36 —19 38 |  | 49              |     |
|              |                 | 18 08 —18 10 | 145  |                 | Европа       |  | 20 11 —20 13    | 243 |
|              |                 | 18 13 —18 15 | 146  |                 |              |  | 20 16 —20 18    | 243 |
|              |                 | 18 21 —18 23 | 147  |                 |              |  | 20 22 —20 24    | 243 |
|              |                 | 19 16 —19 18 | 155  |                 |              | 21 38 —21 40   | 249             |     |
| 19 22 —19 24 | 156             | 21 42 —21 44 | 249  |                 |              |  |                 |     |
| 19 29 —19 31 | 157             |              |  |                 |              |  |                 |     |
| Ганимед      | 18 27 —18 30    | 190          | Каллисто   | 20 53 —20 55    |              | 94   |                 |     |
|              | 18 34 —18 36    | 190          |  | 21 00 —21 02    | 94           |  |                 |     |
|              | 18 39 —18 41    | 190          |  | 21 06 —21 08    | 94           |  |                 |     |
|              | 19 39 —19 41    | 192          |  | 21 11 —21 13    | 94           |  |                 |     |
|              | 19 44 —19 46    | 192          |  | 21 50 —21 52    | 94           |  |                 |     |
|              | 19 48 —19 50    | 193          |  | 21 54 —21 56    | 94           |  |                 |     |
|              | 21 17 —21 19    | 196          |  |                 |              |  |                 |     |
|              | 21 23 —21 25    | 196          |  |                 |              |  |                 |     |

| Дата          | $\alpha$ , град | Спутник       | Время (УТ)  | $\theta$ , град | Спутник       | Время (УТ)  | $\theta$ , град |
|---------------|-----------------|---------------|---|-----------------|---------------|---|-----------------|
| 28.05.83      | 0.30            | Ио            | 17 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup> — 17 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup> | 346             | Европа        | 18 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> — 18 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> | 337             |
|               |                 |               | 17 57 — 17 59   | 346             |               | 18 35 — 18 37   | 337             |
|               |                 |               | 22 15 — 22 18   | 24              |               | 18 40 — 18 42   | 338             |
|               |                 | Ганимед       | 22 21 — 22 23   | 24              | 19 11 — 19 13 | 340   |                 |
|               |                 |               | 20 27 — 20 29   | 244             | 19 15 — 19 17 | 340   |                 |
|               |                 |               | 20 32 — 20 35   | 245             | 19 19 — 19 21 | 340   |                 |
|               |                 |               | 21 02 — 21 05   | 246             | 20 15 — 20 17 | 344   |                 |
|               |                 |               | 21 08 — 21 10   | 246             | 20 20 — 20 22 | 345   |                 |
|               |                 |               | Каллисто  | 21 13 — 21 15   | 246           | 20 40 — 20 42   | 115             |
|               |                 |               |   | 21 46 — 21 49   | 247           | 20 45 — 20 47   | 115             |
|               |                 |               |   | 21 52 — 21 55   | 247           | 21 19 — 21 22   | 116             |
|               |                 |               |   |                 |               | 21 25 — 21 27   | 116             |
|               |                 |               |   |                 |               | 21 30 — 21 32   | 116             |
|               |                 |               |   |                 |               | 21 59 — 22 02   | 116             |
|               |                 |               | 01.06.83  | 1.10            | Ио            | 18 02 — 18 05   | 82              |
| 18 07 — 18 10 | 83              | 18 19 — 18 21 |   |                 |               | 22  |                 |
| 18 13 — 18 15 | 84              | 18 24 — 18 26 |   |                 |               | 23  |                 |
| Ганимед       | 19 45 — 19 49   | 97            |   |                 | 18 29 — 18 31 | 23  |                 |
|               | 19 52 — 10 54   | 98            |   |                 | 20 02 — 20 04 | 30  |                 |
|               | 19 56 — 19 58   | 99            |   |                 | 20 07 — 20 09 | 30  |                 |
|               | 20 56 — 20 58   | 107           |   |                 | 20 12 — 20 14 | 30  |                 |
|               | 21 01 — 21 03   | 108           |   |                 | 20 38 — 20 41 | 32  |                 |
|               | Каллисто        | 21 06 — 21 08 |   |                 | 109           | 20 44 — 20 46   | 33              |
|               |                 | 18 51 — 18 53 |   |                 | 83            | 20 50 — 20 52   | 33              |
|               |                 | 18 57 — 18 59 |   |                 | 84            | 19 08 — 19 11   | 200             |
|               |                 | 19 02 — 19 04 |   |                 | 84            | 19 14 — 19 16   | 200             |
|               |                 | 21 20 — 21 22 |   |                 | 88            | 19 19 — 19 21   | 200             |
|               |                 | 21 26 — 21 28 |   |                 | 89            | 21 39 — 21 41   | 202             |
|               | 21 30 — 21 33   | 89            |   |                 | 21 44 — 21 46 | 202   |                 |
|               |                 | 21 49 — 21 51 | 202   |                 |               |   |                 |

Для каждой ночи определялись спектральные коэффициенты прозрачности земной атмосферы, а также их вариации в течение времени наблюдений. При этом использовался метод «высокая — низкая» звезда. Как оказалось, вариации коэффициента прозрачности в течение ночи не превышали нескольких процентов, что в наших условиях дает ошибку учета прозрачности не более нескольких десятых долей процента.

**Вычисление отражательной способности спутников.** Для вычисления спектральной отражательной способности спутников использовали выражение:

$$A_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}^{\text{сп}}}{I_{\lambda}^*} \cdot \frac{E_{\lambda}^*}{E_{\lambda}^{\odot}} \cdot \left( \frac{r l}{R} \right)^2 \cdot \rho_{\lambda}^{\Delta M},$$

где  $A_{\lambda}$  — отражательная способность для длины волны  $\lambda$ ;  $I_{\lambda}^{\text{сп}}$  и  $I_{\lambda}^*$  — измеренные интенсивности спутника и звезды сравнения;  $E_{\lambda}^*$  и  $E_{\lambda}^{\odot}$  — внеатмосферные значения освещенности для звезды сравнения и Солнца;  $R$  — радиус спутника;  $r$  и  $l$  — гелиоцентрические и геоцентрические расстояния спутников;  $\rho_{\lambda}$  — коэффициент прозрачности земной атмосферы;  $\Delta M$  — разность воздушных масс звезды и спутника. Для радиусов спутников были приняты следующие значения, полученные с помощью космических аппаратов [11]: Ио — 1820 км, Европа — 1565 км, Ганимед — 2640 км, Каллисто — 2420 км (точность  $\pm 15$  км). Данные о распределении энергии в спектре Солнца взяты из [4].

Солнечный фазовый угол до и после оппозиции изменялся примерно на один градус. В связи с этим для редукиции полученных данных к нулевой солнечной фазе можно воспользоваться линейным приближением фазового закона. Поскольку фазовые функции галилеевых

спутников слабо зависят от длины волны [7, 9], фазовая функция каждого спутника для  $\lambda=0.54$  мкм использовалась (с учетом малого интервала изменений солнечного угла) и в других длинах волн [7]. В случае Каллисто фазовые функции ведущего и ведомого полушарий несколько отличаются [9], поэтому для каждого полушария использовался свой фазовый закон [9].

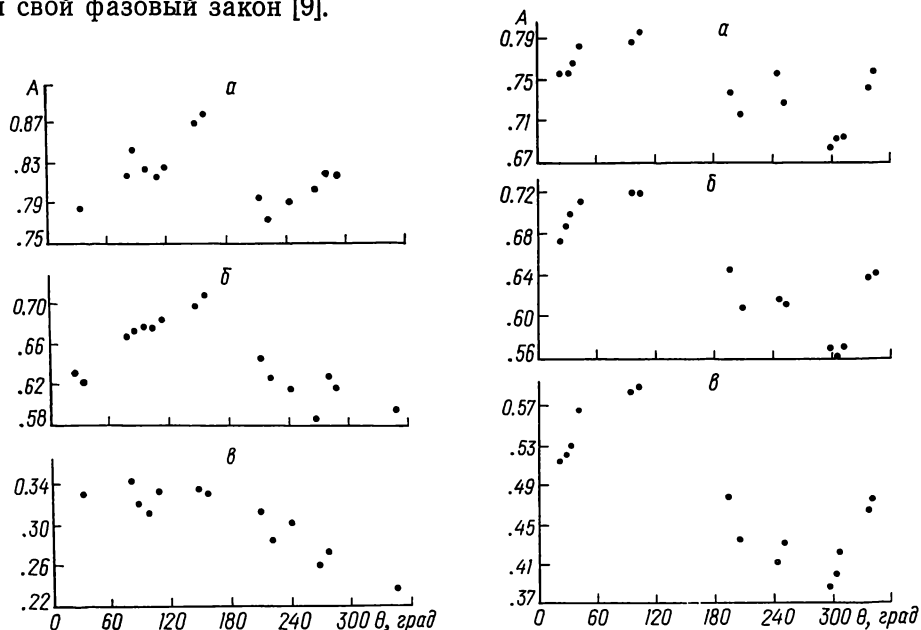


Рис. 1. Зависимость отражательной способности Ио от орбитального фазового угла  $\theta$  при  $\alpha=0$ : а —  $\lambda=0.755$  мкм, б —  $\lambda=0.540$  мкм, в —  $\lambda=0.347$  мкм

Рис. 2. Зависимость отражательной способности Европы от орбитального фазового угла  $\theta$  при  $\alpha=0$ : а —  $\lambda=0.755$  мкм, б —  $\lambda=0.540$  мкм, в —  $\lambda=0.347$  мкм

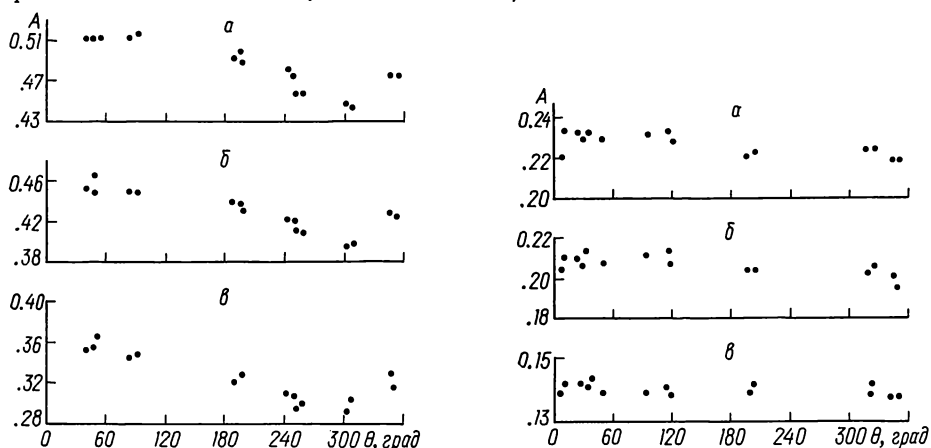


Рис. 3. Зависимость отражательной способности Ганимеда от орбитального фазового угла  $\theta$  при  $\alpha=0$ : а —  $\lambda=0.755$  мкм, б —  $\lambda=0.540$  мкм, в —  $\lambda=0.347$  мкм

Рис. 4. Зависимость отражательной способности Каллисто от орбитального фазового угла  $\theta$  при  $\alpha=0$ : а —  $\lambda=0.755$  мкм, б —  $\lambda=0.540$  мкм, в —  $\lambda=0.347$  мкм

**Орбитальные вариации отражательной способности.** Полученная нами зависимость отражательной способности галилеевых спутников от орбитального фазового угла в трех участках спектра показана на рис. 1—4. Значения отражательной способности спутников, средние для каждой серии измерений, приведены в табл. 3. Ошибка воспроизводимости, определяемая как среднее квадратичное отклонение внутри

Таблица 3. Отражательная способность спутников

| Дата     | θ,<br>град | Длина волны λ, мкм |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |            | 0.347              | 0.407 | 0.457 | 0.540 | 0.595 | 0.620 | 0.648 | 0.692 | 0.725 | 0.755 | 0.792 |
| Ю        |            |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 21.05.83 | 37         | 0.306              | 0.274 | 0.412 | 0.572 | 0.604 | 0.628 | 0.674 | 0.696 | 0.710 | 0.722 | 0.693 |
| 22.05.83 | 209        | 0.295              | 0.304 | 0.442 | 0.605 | 0.635 | 0.660 | 0.684 | 0.719 | 0.739 | 0.741 | 0.815 |
| 22.05.83 | 220        | 0.267              | 0.279 | 0.432 | 0.586 | 0.601 | 0.642 | 0.666 | 0.693 | 0.726 | 0.721 | 0.706 |
| 22.05.83 | 240        | 0.296              | 0.274 | 0.418 | 0.577 | 0.622 | 0.646 | 0.671 | 0.707 | 0.747 | 0.736 | 0.739 |
| 23.05.83 | 79         | 0.326              | 0.313 | 0.463 | 0.634 | 0.670 | 0.697 | 0.713 | 0.757 | 0.776 | 0.778 | 0.752 |
| 24.05.83 | 268        | 0.249              | 0.238 | 0.393 | 0.565 | 0.607 | 0.642 | 0.687 | 0.730 | 0.758 | 0.772 | 0.749 |
| 24.05.83 | 278        | 0.266              | 0.249 | 0.418 | 0.610 | 0.645 | 0.685 | 0.716 | 0.754 | 0.776 | 0.783 | 0.761 |
| 24.05.83 | 286        | 0.283              | 0.240 | 0.396 | 0.596 | 0.636 | 0.663 | 0.706 | 0.754 | 0.769 | 0.784 | 0.754 |
| 25.05.83 | 116        | 0.308              | 0.328 | 0.491 | 0.666 | 0.690 | 0.715 | 0.742 | 0.765 | 0.793 | 0.804 | 0.758 |
| 27.05.83 | 146        | 0.331              | 0.362 | 0.516 | 0.690 | 0.745 | 0.765 | 0.786 | 0.815 | 0.836 | 0.860 | 0.840 |
| 27.05.83 | 156        | 0.327              | 0.450 | 0.524 | 0.728 | 0.729 | 0.773 | 0.807 | 0.841 | 0.857 | 0.871 | 0.826 |
| 28.05.83 | 346        | 0.227              | 0.243 | 0.377 | 0.584 | 0.585 | 0.637 | 0.651 | 0.651 | 0.699 | 0.689 | 0.700 |
| 28.05.83 | 24         | 0.363              | 0.298 | 0.458 | 0.619 | 0.658 | 0.693 | 0.748 | 0.766 | 0.799 | 0.828 | 0.790 |
| 01.06.83 | 83         | 0.297              | 0.318 | 0.464 | 0.626 | 0.663 | 0.681 | 0.711 | 0.746 | 0.763 | 0.782 | 0.743 |
| 01.06.83 | 98         | 0.289              | 0.309 | 0.461 | 0.626 | 0.652 | 0.683 | 0.699 | 0.735 | 0.744 | 0.763 | 0.729 |
| 01.06.83 | 108        | 0.313              | 0.307 | 0.461 | 0.626 | 0.656 | 0.680 | 0.712 | 0.743 | 0.747 | 0.759 | 0.737 |
| Европа   |            |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 22.05.83 | 98         | 0.560              | 0.545 | 0.579 | 0.692 | 0.711 | 0.709 | 0.712 | 0.724 | 0.745 | 0.759 | 0.757 |
| 22.05.83 | 101        | 0.567              | 0.551 | 0.580 | 0.691 | 0.720 | 0.717 | 0.722 | 0.732 | 0.757 | 0.765 | 0.759 |
| 23.05.83 | 196        | 0.463              | 0.493 | 0.535 | 0.624 | 0.643 | 0.654 | 0.665 | 0.680 | 0.699 | 0.714 | 0.685 |
| 24.05.83 | 297        | 0.378              | 0.410 | 0.482 | 0.553 | 0.590 | 0.606 | 0.621 | 0.634 | 0.664 | 0.669 | 0.670 |
| 24.05.83 | 302        | 0.388              | 0.402 | 0.469 | 0.547 | 0.580 | 0.598 | 0.616 | 0.630 | 0.664 | 0.675 | 0.661 |
| 24.05.83 | 306        | 0.414              | 0.406 | 0.468 | 0.551 | 0.590 | 0.590 | 0.607 | 0.621 | 0.662 | 0.676 | 0.658 |
| 25.05.83 | 42         | 0.557              | 0.547 | 0.589 | 0.699 | 0.718 | 0.711 | 0.723 | 0.729 | 0.758 | 0.773 | 0.737 |
| 27.05.83 | 243        | 0.408              | 0.548 | 0.539 | 0.612 | 0.645 | 0.664 | 0.670 | 0.717 | 0.742 | 0.757 | 0.724 |
| 27.05.83 | 249        | 0.437              | 0.457 | 0.530 | 0.607 | 0.643 | 0.643 | 0.663 | 0.697 | 0.715 | 0.721 | 0.699 |
| 28.05.83 | 337        | 0.459              | 0.492 | 0.544 | 0.630 | 0.663 | 0.662 | 0.684 | 0.705 | 0.728 | 0.739 | 0.721 |
| 28.05.83 | 340        | 0.469              | 0.497 | 0.546 | 0.634 | 0.657 | 0.680 | 0.690 | 0.716 | 0.743 | 0.756 | 0.734 |
| 01.06.83 | 23         | 0.492              | 0.508 | 0.553 | 0.643 | 0.667 | 0.665 | 0.674 | 0.694 | 0.709 | 0.724 | 0.699 |
| 01.06.83 | 30         | 0.496              | 0.512 | 0.554 | 0.658 | 0.670 | 0.667 | 0.680 | 0.700 | 0.712 | 0.725 | 0.692 |
| 01.06.83 | 33         | 0.507              | 0.506 | 0.556 | 0.668 | 0.684 | 0.689 | 0.700 | 0.715 | 0.740 | 0.734 | 0.726 |
| Ганимед  |            |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 21.05.83 | 251        | 0.280              | 0.315 | 0.346 | 0.393 | 0.407 | 0.409 | 0.414 | 0.424 | 0.445 | 0.438 | 0.430 |
| 21.05.83 | 253        | 0.287              | 0.313 | 0.337 | 0.391 | 0.401 | 0.401 | 0.414 | 0.420 | 0.432 | 0.436 | 0.421 |
| 22.05.83 | 303        | 0.280              | 0.315 | 0.334 | 0.380 | 0.397 | 0.405 | 0.408 | 0.419 | 0.429 | 0.431 | 0.429 |
| 22.05.83 | 304        | 0.293              | 0.313 | 0.333 | 0.382 | 0.403 | 0.404 | 0.409 | 0.419 | 0.431 | 0.430 | 0.423 |
| 23.05.83 | 348        | 0.323              | 0.341 | 0.367 | 0.413 | 0.429 | 0.439 | 0.442 | 0.452 | 0.462 | 0.461 | 0.459 |
| 23.05.83 | 350        | 0.305              | 0.337 | 0.362 | 0.410 | 0.431 | 0.438 | 0.445 | 0.448 | 0.469 | 0.462 | 0.444 |
| 24.05.83 | 43         | 0.347              | 0.368 | 0.392 | 0.442 | 0.467 | 0.474 | 0.476 | 0.487 | 0.505 | 0.501 | 0.491 |
| 24.05.83 | 45         | 0.348              | 0.362 | 0.383 | 0.437 | 0.459 | 0.469 | 0.475 | 0.477 | 0.494 | 0.497 | 0.486 |
| 24.05.83 | 47         | 0.378              | 0.373 | 0.387 | 0.456 | 0.466 | 0.469 | 0.469 | 0.486 | 0.508 | 0.497 | 0.489 |
| 25.05.83 | 91         | 0.340              | 0.366 | 0.390 | 0.441 | 0.469 | 0.475 | 0.474 | 0.483 | 0.495 | 0.511 | 0.497 |
| 27.05.83 | 190        | 0.317              | 0.352 | 0.372 | 0.433 | 0.442 | 0.450 | 0.458 | 0.471 | 0.483 | 0.489 | 0.470 |
| 27.05.83 | 193        | 0.315              | 0.355 | 0.375 | 0.430 | 0.439 | 0.456 | 0.461 | 0.469 | 0.483 | 0.498 | 0.472 |
| 27.05.83 | 196        | 0.326              | 0.357 | 0.385 | 0.452 | 0.437 | 0.446 | 0.460 | 0.468 | 0.483 | 0.484 | 0.464 |
| 28.05.83 | 245        | 0.306              | 0.341 | 0.370 | 0.417 | 0.434 | 0.443 | 0.447 | 0.455 | 0.468 | 0.476 | 0.463 |
| 28.05.83 | 246        | 0.304              | 0.336 | 0.364 | 0.417 | 0.432 | 0.444 | 0.449 | 0.459 | 0.464 | 0.471 | 0.463 |
| 01.06.83 | 84         | 0.331              | 0.356 | 0.380 | 0.431 | 0.450 | 0.454 | 0.465 | 0.469 | 0.477 | 0.492 | 0.467 |
| Каллисто |            |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 21.05.83 | 321        | 0.134              | 0.146 | 0.164 | 0.188 | 0.198 | 0.198 | 0.202 | 0.209 | 0.218 | 0.217 | 0.210 |
| 22.05.83 | 342        | 0.132              | 0.144 | 0.162 | 0.189 | 0.196 | 0.199 | 0.201 | 0.205 | 0.211 | 0.214 | 0.208 |
| 22.05.83 | 345        | 0.133              | 0.142 | 0.159 | 0.183 | 0.197 | 0.195 | 0.203 | 0.208 | 0.216 | 0.215 | 0.214 |
| 23.05.83 | 5.5        | 0.133              | 0.144 | 0.160 | 0.180 | 0.195 | 0.197 | 0.200 | 0.203 | 0.212 | 0.210 | 0.210 |
| 23.05.83 | 8          | 0.138              | 0.148 | 0.162 | 0.194 | 0.203 | 0.206 | 0.205 | 0.212 | 0.223 | 0.225 | 0.212 |
| 24.05.83 | 28         | 0.140              | 0.152 | 0.170 | 0.199 | 0.212 | 0.210 | 0.217 | 0.220 | 0.226 | 0.228 | 0.218 |
| 24.05.83 | 29         | 0.139              | 0.149 | 0.166 | 0.196 | 0.208 | 0.206 | 0.211 | 0.218 | 0.207 | 0.224 | 0.215 |
| 25.05.83 | 49         | 0.138              | 0.154 | 0.169 | 0.200 | 0.211 | 0.211 | 0.212 | 0.218 | 0.223 | 0.229 | 0.224 |
| 27.05.83 | 94         | 0.142              | 0.160 | 0.180 | 0.209 | 0.219 | 0.219 | 0.228 | 0.231 | 0.240 | 0.239 | 0.233 |
| 28.05.83 | 115        | 0.143              | 0.156 | 0.174 | 0.208 | 0.217 | 0.221 | 0.222 | 0.227 | 0.235 | 0.239 | 0.228 |
| 28.05.83 | 116        | 0.139              | 0.155 | 0.174 | 0.201 | 0.216 | 0.219 | 0.222 | 0.221 | 0.226 | 0.231 | 0.219 |
| 01.06.83 | 200        | 0.134              | 0.148 | 0.163 | 0.189 | 0.200 | 0.200 | 0.204 | 0.205 | 0.211 | 0.214 | 0.209 |
| 01.06.83 | 202        | 0.140              | 0.143 | 0.160 | 0.188 | 0.200 | 0.202 | 0.203 | 0.203 | 0.216 | 0.216 | 0.211 |

серии, составляет в среднем 2—3 %. Суммарная ошибка значений отражательной способности, включающая погрешность в абсолютных значениях энергии звезды сравнения (4 %), Солнца (3—4 %) и прозрачности земной атмосферы ( $\sim 1$  %), составляет при этом 7—8 %.

По результатам наблюдений мы получили кривые для  $\alpha \approx 0^\circ$ . Так как аналогичные данные других авторов для момента оппозиции почти полностью отсутствуют, для сравнения в табл. 4 приводим только средние значения геометрического альbedo ведущих полушарий спутников [3].

Таблица 4. Геометрическое альbedo галилеевых спутников [3]

| $\lambda$ , мкм | Ио   | Европа | Ганимед | Каллисто | $\lambda$ , мкм | Ио   | Европа | Ганимед | Каллисто |
|-----------------|------|--------|---------|----------|-----------------|------|--------|---------|----------|
| 0.358           | 0.13 | 0.47   | 0.28    | 0.12     | 0.665           | 0.86 | 0.76   | 0.50    | 0.22     |
| 0.402           | 0.33 | 0.57   | 0.37    | 0.15     | 0.699           | 0.86 | 0.76   | 0.50    | 0.22     |
| 0.467           | 0.61 | 0.68   | 0.45    | 0.19     | 0.730           | 0.87 | 0.76   | 0.50    | 0.22     |
| 0.532           | 0.75 | 0.77   | 0.49    | 0.21     | 0.765           | 0.87 | 0.78   | 0.51    | 0.22     |
| 0.598           | 0.81 | 0.76   | 0.50    | 0.22     | 0.809           | 0.86 | 0.77   | 0.51    | 0.23     |
| 0.633           | 0.83 | 0.77   | 0.50    | 0.22     |                 |      |        |         |          |

Из рис. 1—4 и табл. 3 видно, что значения отражательной способности при некоторых орбитальных углах значительно отличаются от средних величин.

В случае Ио орбитальные кривые (форма и амплитуда) сильно зависят от длины волны; амплитуда орбитальных вариаций отражательной способности увеличивается от 13 % в красной области ( $\lambda = 0,755$  мкм) до 40 % в ультрафиолетовой области ( $\lambda = 0,347$  мкм).

У Европы амплитуда в красной и ультрафиолетовой областях примерно такая же, как у Ио, а для  $\lambda = 0,540$  мкм вариации у Европы составляют примерно 25 %, тогда как у Ио — 15 %.

Наиболее отчетливая деталь на поверхности Ио находится вблизи долготы  $280^\circ$ . Поскольку орбитальные кривые Ио почти одинаковы по форме при различных солнечных фазовых углах [9], наличие этой детали не может быть объяснено эффектом оппозиции. Следовательно, это темное красное пятно, которое по размерам меньше, чем ведомое полушарие. Этот факт хорошо согласуется с данными наземных наблюдений других авторов [8] и космическими исследованиями [10].

Согласно данным, полученным с помощью космического аппарата «Вояджер-1» [10], больше половины площади рассматриваемой области занимают равнины. Верхний слой равнин состоит, по-видимому, из серы и ее соединений, летучих щелочных солей, силикатного вулканического пепла. Эти участки имеют преимущественно оранжево-красный и оранжево-коричневый цвета [10]. Значительную часть площади занимают кратеры вулканического происхождения, состоящие из серы и ее различных аллотропических модификаций. Цвет кратеров изменяется от белого и желтого до коричневого и черного. Некоторые участки покрыты потоками серы и силикатно-серными образованиями различной вязкости [10].

Обращает на себя внимание деталь на поверхности Европы (долгота  $240^\circ$ ), меньшего размера и менее выраженная, чем в случае Ио.

У Ганимеда амплитуда орбитальных вариаций отражательной способности в красной области достигает такой же величины, а в ультрафиолетовой области — в два раза меньше, чем у Ио и Европы.

Орбитальные вариации отражательной способности Каллисто в нашем случае не превосходят 5—7 %, хотя при  $\alpha = 8^\circ$  они могут достигать 30 % [2]. Этот факт объясняется тем, что более темная сторона Каллисто (ведущее полушарие) имеет значительно больший оппози-

ционный эффект, чем светлая. Поэтому яркости обоих полушарий в оппозицию почти выравниваются.

Общей закономерностью для всех галилеевых спутников является увеличение амплитуды орбитальных вариаций отражательной способности с уменьшением длины волны. С увеличением расстояния от планеты поверхности спутников становятся более темными и более однородными по цвету.

Авторы выражают благодарность В. М. Клименко за помощь, оказанную при подготовке работы.

1. *Веверка Дж.* Фотометрия поверхности спутников. — В кн.: Спутники планет. М.: Мир, 1980, с. 203—243.
2. *Гаррис Д. Л.* Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников. — В кн.: Планеты и спутники. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 241—305.
3. *Джонсон Т., Пильчер К.* Спектрофотометрия и строение поверхности спутников. — В кн.: Спутники планет. М.: Мир, 1980, с. 267—305.
4. *Макарова Е. А., Харитонов А. В.* Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. — М.: Наука, 1972.—288 с.
5. *Моррисон Д., Моррисон Н.* Фотометрия галилеевых спутников. — В кн.: Спутники планет. М.: Мир, 1980, с. 402—417.
6. *Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н.* Сводный спектрофотометрический каталог звезд. — Алма-Ата: Наука, 1978.—197 с.
7. *Lockwood G. W., Thompson D. T., Lumme K.* A possible detection of solar variability from photometry of Io, Europa, Callisto, and Rhea, 1976—1979.—Astron. J., 1980, 85, p. 961—968.
8. *McFadden L. A., Bell J. F., McCord T. B.* Visible spectral reflectance measurements (0.33—1.1  $\mu\text{m}$ ) of the Galilean satellites at many orbital phase angles. — Icarus, 1980, 44, p. 410—430.
9. *Millis R. L., Thompson D. T.* UVB photometry of the Galilean satellites. — Ibid., 1975, 26, p. 408—419.
10. *Schafer G. G.* The surface of Io: geologic units, morphology, and tectonics. — Ibid., 1980, 43, p. 302—333.
11. *Smith B. A., Soderblom L. A., Johnson T. V.* The Jupiter system through the eyes of Voyager 1. — Science, 1979, 204, p. 951—971.

Глав. астроном. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 24.09.84,  
после доработки 31.10.84

## РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 520.27;520.874

### АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ РАДИОТЕЛЕСКОПА УТР-2 / Рашковский С. Л., Соколов К. П.

(Препринт / АН УССР, Ин-т радиоэлектроники, 1983(1984); № 225)

Рассматривается система автоматизации радиотелескопа УТР-2, построенная на базе УВК М-6000 АСВТ-М. Описывается аппаратный комплекс и программное обеспечение системы, позволяющие осуществлять управление диаграммой направленности телескопа, сбор и обработку поступающей с выходов радиотелескопа информации. Приведены примеры обращения к различным блокам системы в программах на BASIC.