

УДК 523.44; 521.8/9; 520.8

## О ФОТОМЕТРИИ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ ПРИ МАЛЫХ ФАЗОВЫХ УГЛАХ

*Сухов П. П.<sup>1</sup>, Карпенко Г. Ф.<sup>2</sup>, Сухов К. П.<sup>3</sup>*

ABOUT PHOTOMETRY OF GEOSTATIONARY SATELLITES NEAR SMALL PHASES ANGLES

Sukhov P. P., Karpenko G. F., Sukhov K. P.

Determination of photometric and dynamic characteristics of geostationary satellites with low brightness needs long photometrical observations (from half of the year to year) at different positions of satellite to the observer. To receive these characteristics authors offer carrying out photometrical measurements of GSS when it enters and leaves Earth shadow near the dates of equinoxes. In these dates GSS brightness increases by several magnitudes that allows to use telescopes with a mirror diameter of 50-70 cm effectively. It is possible to receive more real information about the reflective properties of the object at small phase angles than during long-term observations at big phase angles.

Keywords: geostationary satellite, photometry, identification satellite, phase angle, equinox, Earth's shadow.

Геостационарная орбита (ГСО) перенаселена космическими аппаратами (КА) и космическим мусором. На ГСО имеются группы геостационарных спутников (ГСС) образующих компактный кластер из нескольких спутников, имеющих близкие к нулю наклонение к экватору и эксцентриситет. Идентификация по орбитальным параметрам близко расположенных КА не всегда дает уверенный результат, особенно после их передислокации и маневров. Проведение фотометрии во время входа и выхода ГСС из тени Земли близ дат равноденствий, когда их блеск увеличивается в десятки – сотни раз, существенно дополняет необходимую информацию.

Из-за изменения в течение года геометрии системы «ГСО – Земля – Солнце» перемещается и земная тень относительно плоскости ГСО, совпадающей с плоскости экватора. Экваториальные ГСС начинают входить в тень за 22 дня до равноденствия и заканчивают спустя 22 дня после равноденствия. В эти ночи длительность пребывания ГСС в тени меняется от 10 мин до 72 мин (при равноденствии). Отраженное поверхностью ГСС

световое пятно («зеркальный блик») в виде пятна диаметром около 350 км падает на поверхность Земли и медленно перемещается по земной поверхности. Время, благоприятное для регистрации максимальных по амплитуде вспышек, зависит от географических координат наблюдателя. Оно длится  $\approx 1,5$  суток. На широте близ  $45^\circ$  С.Ш. даты максимальных по амплитуде вспышек ГСС приходятся на 3 марта и 12 октября. Уменьшая временное разрешение фотометрических наблюдений можно получить дополнительную информацию о структуре поля отражения данного типа КА [1–4]. Для входа ГСС в тень Земли нужно выполнение двух условий

$$|\delta_s - \delta_t| \leq \rho_s \text{ и } |\alpha_s - \alpha_t| \leq r_t,$$

где  $\delta_s$  – склонение ГСС,  $\delta_t$  – склонение оси тени,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_t$  – РА соответственно КА и оси тени,  $r_t$  – длина хорды, проходимой спутником в тени,  $\rho_s$  – диаметр конуса тени,  $\delta_t = -\delta_\Theta$ ,  $\alpha_t = \alpha_\Theta - 12^h$  [5].

Приведем отражательные характеристики спутника в видимом диапазоне, используя

<sup>1</sup>Сухов Петр Петрович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова; e-mail: psukhov@ukr.net.

<sup>2</sup>Карпенко Геннадий Федорович, научный сотрудник НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова; e-mail: geenXX@ukr.net.

<sup>3</sup>Сухов Константин Петрович, инженер-программист НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова; e-mail: kosty\_work@mail.ru.

емые для идентификации КА и его поведения на орбите.

*Фотометрические характеристики ГСС:* 1) эффективная площадь отражения ( $S\gamma_\lambda$ ), 2) спектральный коэффициент отражения ( $\gamma_\lambda$ ), 3) фазовый коэффициент  $\beta$  (изменение зв. величины при изменении  $\psi$  на  $1^\circ$ ), 4) показатель цвета (B-V, V-R и т.д.), 5) звездная величина  $m$  вычисленная для фазового угла  $\psi = 0^\circ$  и приведенная к расстоянию 36 000 км.

*Оптико-геометрические характеристики:* 1) линейные размеры КА, 2) доминирующая форма объекта (сфера, цилиндр, конус, пластина и т.д.).

*Динамические характеристики ГСС:* 1) период вращения вокруг центра масс, или одной из осей, 2) ориентация КА в пространстве.

Ввиду прикладного значения не все характеристики спутника публикуются в открытой печати.

Анализ фотометрической и координатной информации о КА позволяет с некоторой степенью вероятности определить класс, тип объекта, тип платформы, полезную нагрузку, доминирующую форму объекта и динамическое состояние на орбите (штатный, внештатный режим работы). При аварийном состоянии КА можно определить признаки аварийности объекта [1, 4].

Обычно, для определения фотометрических, оптико-геометрических характеристик ГСС проводятся длительные фотометрические наблюдения ГСС в течение ночи при  $\psi > 30^\circ$ . В этом случае есть следующие трудности.

1. При фазовых углах  $\psi > 30^\circ$  блеск геостационарного спутника очень слабый, порядка  $10^m$ – $15^m$ . Для наблюдений таких ГСС нужно использовать телескоп с диаметром зеркала близ 1 м и более.

2. При проведении синхронных базисных наблюдений при  $\psi > 30^\circ$  ГСС с расстоянием в сотни, тысячи километров, каждый наблюдатель будет видеть КА даже в одно и тоже время под разными углами. Сравнить или объединить такие кривые блеска для объяснения поведения КА в динамике в момент наблюдения некорректно. Для такого сравнения необходимы кривые блеска с одинаковыми фазовыми углами. Это условие часто не соблюдается из-за разных погодных условий на пунктах наблюдения.

Авторы считают, что фотометрия ГСС на малых фазовых углах наиболее информатив-

на. Блеск ГСС в эти даты за короткое время резко возрастает. Анализ «коротких» кривых блеска (при входе, выходе из тени), имеющих диффузную и зеркальную составляющую, позволяет получить отражательные характеристики спутника близкие к реальным. В этом случае для фотометрии ГСС можно эффективно использовать телескопы с диаметром зеркала 50–70 см.

Наблюдаемая звездная величина спутника  $m$  в основном зависит от трех параметров: площади отражающей поверхности ГСС —  $S$ , отражательных характеристик поверхности —  $\gamma_\lambda$ , фазового угла —  $\psi$ ,  $m = F\{\psi, S, \gamma_\lambda\}$ .

Из наблюдений можно определить  $m$  и рассчитать фазовый угол  $\psi$ . Вычисление  $\gamma_\lambda$  и  $S$  носит вероятностный характер и зависит от многих причин, о них ниже. Блеск ГСС вычисляется по известной формуле Погсона

$$m = -2,5 \lg \frac{E_1}{E_2}.$$

Согласно Мак-Кью и др. [6] блеск спутника в наблюдаемом диапазоне длин волн можно представить формулой

$$m_\lambda = m_\lambda^\ominus - 2,5 \lg \left[ \frac{S\gamma_\lambda F(\psi)}{d^2} \right]. \quad (1)$$

Здесь  $m_\lambda^\ominus$  — звездная величина Солнца в наблюдаемом диапазоне длин,  $S$  — видимая наблюдателем площадь КА освещенная Солнцем,  $\gamma_\lambda$  — спектральный коэффициент отражения,  $(S\gamma_\lambda)$  — эффективная площадь отражения,  $\psi$  — спутникоцентрический фазовый угол,  $F(\psi)$  — фазовая функция,  $d$  — топоцентрическое расстояние до объекта. В формуле (1) не учтена подсветка от Луны, отражение и рассеивание света от Земли. На высоте 36 000 км их влияние пренебрежимо мало, ими можно пренебречь [7].

Форма кривой блеска ГСС при входе-выходе из земной тени в первую очередь связана с эффективной площадью отражения —  $(S\gamma_\lambda)$ . Она зависит от отражательных характеристик поверхности КА, долготы подспутниковой точки, ориентации КА, географических координат наблюдателя, времени года и длительности нахождения объекта на орбите (старение материалов конструкции). При малых фазовых углах, когда наблюдаемая площадь отражения максимальна ( $\cos \psi = 1$ ), для ГСС известных размеров

величины ( $S\gamma_\lambda$ ) и  $\gamma_\lambda$  определяются из наблюдений. Из формулы (1) следует

$$S\gamma_\lambda = d^2 10^{\frac{m_\lambda^\ominus - m_\lambda}{2.512}} \sec \psi.$$

Аналогично, для КА известных размеров следует

$$\gamma_\lambda = \frac{d^2}{S} 10^{\frac{m_\lambda^\ominus - m_\lambda}{2.5}}.$$

Таким образом для известных размеров спутника можно определить ( $S\gamma_\lambda$ ) и  $\gamma_\lambda$  близкие к реальным.

Для известной доминирующей геометрической формы КА используются соответствующие фазовые функции рассеивания тела  $F(\psi)$  для сферы, цилиндра, пластины и др. Но  $F(\psi)$ , кроме сферы, предполагает знание пространственной ориентации КА. Для ГСС, находящегося на малых фазовых углах, пространственную ориентацию активного КА можно определить по зеркальным всплескам (вспышкам) отраженного излучения. Она определяется ориентацией вектора нормали к поверхности КА, формирующей вспышку на момент наблюдения в спутникоцентрической системе координат. Компоненты вектора нормали  $X_n, Y_n, Z_n$ . Ось  $X$  параллельна небесному экватору и направлена в точку весеннего равноденствия. Ось  $Y$  направлена в центр Земли. Ось  $Z$  параллельна оси вращения Земли. Вектор нормали к отражающей поверхности определяется по методу, описанному в [8].

Отождествление спутника по фотометрическим наблюдениям можно решать двумя способами.

*Прямая задача.* По известной форме объекта, условиям освещенности и отражения, оптическим свойствам его поверхности и ориентации объекта относительно наблюдателя вычисляется видимый блеск объекта на любой момент времени с последующим его анализом.

*Обратная задача.* В этом случае возникает неоднозначность определения формы КО по кривой блеска связанная со следующим принципиальным положением. На вход алгоритма поступает функция, зависящая только от одного аргумента, — блеска от фазы (или  $m(t)$ ). Такая задача в математике относится к классу некорректных, а полученные решения в общем случае неустойчивы, неоднозначны, либо не имеют физического смысла. Задачу можно упростить. Задав доминирующую форму объекта можно выбрать соответствующую функцию рассеивания  $F(\psi)$

для данной формы (пластина, цилиндр, сфера и др.). Они определены аналитически в [9] и других.

Определим некоторые фотометрические характеристики при малых  $\psi$  ГСС «Intelsat 10-02» и «Cosmos 2397». «Intelsat 10-02» имеет платформу «Eurostar 3000», размах солнечных панелей (СП) 45 м.

Фотометрическая база данных Одесской астрономической обсерватории (ОАО) содержит около 300 стандартизированных кривых блеска 80 ГСС разных классов: «Intelsat», «Eutelsat», «Express», «Ямал», «Sicral», «Mentor», «Mercury», «Skynet», «P\B Arian-4» и др. В 2004–2013 гг. для «Intelsat 10-02» получено около 50 стандартизированных кривых блеска в В-, V-, R-фильтрах. Для анализа кривых блеска «Intelsat 10-02» логично выбрать  $F(\psi)$  для плоской пластины с ламбертовским отражением, имеющей вид  $F(\psi) = \cos \varepsilon \cos \theta$ , где  $\varepsilon$  и  $\theta$  — углы падения и отражения света по отношению к нормали, направленной к плоскостям СП.

На рис. 1 показана «короткая» (диапазон  $\psi < 15^\circ$ ) фазовая кривая блеска «Intelsat 10-02», полученная авторами (ОАО, 50 см телескоп, ФЭУ-79), а на рис. 2 «длинная» (диапазон  $\psi > 25^\circ$ ) кривая, полученная П. Добовским, И. Кудзей (Словакия, 1 м телескоп, ФЭУ-79).

Наличие двух максимумов блеска на кривой авторы работы [2] объясняют вкладом квазизеркальной составляющей в общий отраженный световой поток в начале от одной панели, потом от второй, вследствие их пространственной ориентации и разделённости платформы с аппаратурой. Падение блеска между двумя максимумами вызвано попаданием зеркального пятна на аппаратуру, размещённую на платформе. На аппаратуре зеркальная составляющая пропадает.

В табл. 1 даны вычисленные характеристики  $\gamma_\lambda$  и ( $S\gamma_\lambda$ ) для «Intelsat 10-02», приведенные к  $\psi = 0^\circ$ . Как видно из табл. 1, вычисленные  $\gamma_\lambda$  и ( $S\gamma_\lambda$ ) по «коротким» и «длинным» кривым блеска имеют близкие значения.

По аварийному ГСС «Cosmos 2397» имеется 3 кривых блеска на малых  $\psi$ . Одна из них представлена на рис. 3.

В табл. 2 даны вычисленные компоненты вектора нормали к поверхности СП для второго максимума от  $\psi = 19^\circ,1$  до  $23^\circ,6$ . Направление нормали к СП в случае первой вспышки имеет экваториальные координаты

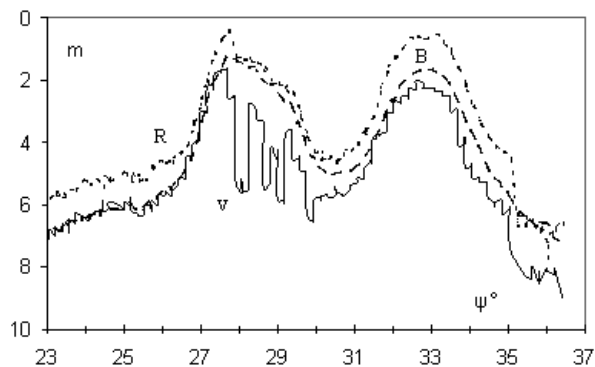


Рис. 1. Одесса. «Короткая» фазовая кривая блеска «Intelsat 10-02» после выхода из тени. 12.10.10

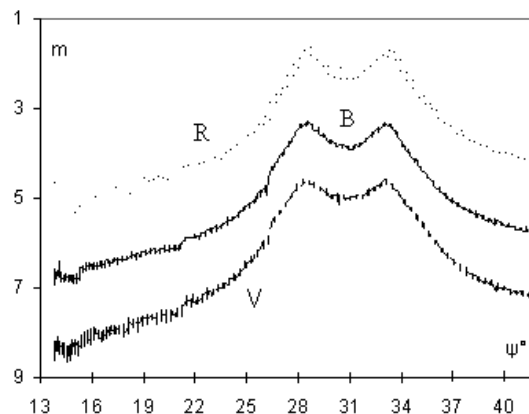


Рис. 2. Словакия. «Длинная» фазовая кривая блеска «Intelsat 10-02» после выхода из тени. 17.10.11

Таблица 1. Вычисленные  $(S\gamma_\lambda)$  и  $\gamma_\lambda$  для «Intelsat 10-02» по «короткой» и «длинной» кривой блеска (со значком \*)

Sp	$\gamma_\lambda \pm 0,02$	* $\gamma_\lambda \pm 0,02$	$(S\gamma_\lambda), \text{ м}^2 \pm 1,0$	* $(S\gamma_\lambda), \text{ м}^2 \pm 0,60$
B	0,18	0,18	17,58	16,25
V	0,34	0,38	32,44	34,11
R	0,22	0,21	20,26	19,15

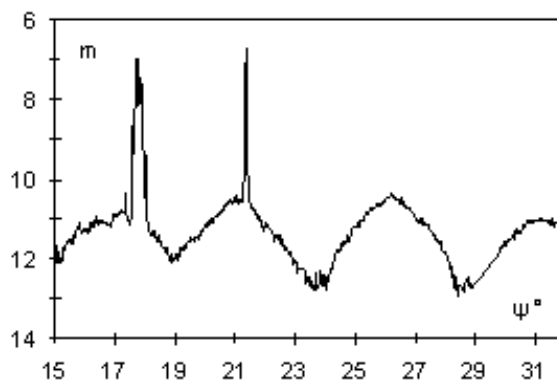


Рис. 3. Фазовая кривая блеска «Cosmos 2397» без фильтров, 12.09.2004, выход из тени

Таблица 2. Направления нормали к СП относительно наблюдателя для фазовых углов от 19°,13 до 23°,65 за 12.09.2004

$\Psi^\circ$	$X_n$	$Y_n$	$Z_n$
19,130	0,023	0,994	-0,104
20,196	0,013	0,995	-0,096
21,044	0,004	0,996	-0,090
21,413	0,001	0,996	-0,088
21,766	-0,003	0,996	-0,086
22,855	-0,014	0,997	-0,081
23,652	-0,021	0,997	-0,077

$\alpha = 176^\circ,96$ ,  $\delta = 4^\circ,94$ . Для второй вспышки  $\alpha = 179^\circ,22$ ,  $\delta = 4^\circ,96$ , то есть вращения СП происходило практически в плоскости эклиптики.

Возможная причина аварийности состоит в следующем. Вокруг компоненты  $Z$  происходит вращение объекта с периодом 18 мин., описывающее конус с углом близким к  $5^\circ$  и вызывающие изменение регистрируемого блеска (в основном от СП) амплитудой около  $2^m,0$ . Вероятнее всего у спутника нарушилась стабилизация, что привело к его вращению вокруг оси, близкой по направлению к оси  $Z$  и видимому перемещению по орбите.

На примерах показано, как можно по «коротким» кривым блеска ГСС при малых фазовых углах определить динамическое состояние спутника на орбите, рассчитать его эффективную площадь отражения и спектральные коэффициенты отражения

При фотометрии ГСС близ равноденствий за ночь можно получить более десятка кривых блеска последовательно заходящих и выходящих из тени Земли ГСС. Это позволяет значительно сократить время для получения фотометрических, оптических и динамических характеристик ГСС.

*Авторы выражают благодарность сотруднику ИНАСАН А. В. Багрову за дискуссию и полезные замечания к статье.*

### Литература

1. Диденко А. В., Усольцева Л. А. Анализ наземной информации об аварийном геостационарном спутнике DSP F23 // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. 2010. №4. С. 81–84.

2. Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I. Photometrical research of GSS "Intelsat 10-02" // Odessa Astronomical Publications. 2009/2010. Vol. 22. P. 55–59.
3. Северный С. А., Смирнов М. А., Багров А. В. Определение формы искусственного спутника Земли по фотометрическим наблюдениям // Научн. информ. Астрон. совета АН СССР. 1986. Вып. 58. С. 103–106.
4. Sukhov P. P., Movchan A. I., Kochkin N. I., Korniyuchuk L. V., Strakhova S. L., Epishev V. P. Some results of the photometry of GEO objects // Odessa Astronomical Publications. 2004. Vol. 17. P. 99–102.
5. Karpenko G. F., Murnikov B. A., Sukhov P. P. The conditions of an active equatorial GSS entering the Earth's shadow // Odessa Astronomical Publications. 2009/2010. Vol. 22. P. 25–28.
6. McCue G. A., Williams J. G., Morford J. M. Optical characteristics of artificial satellites // Planet. Sp. Sci. 1971. Vol. 19. P. 851–868.
7. Смирнов М. А. Фотометрические наблюдения искусственных небесных тел. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Институт астрономии РАН, 1994. 164 с.
8. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрометрия и астрофизика АН УССР. 1983. Вып. 50. С. 89–93.
9. Rambauske W. R., Gruenzel R. R. Distribution of reflection around some stereometric surfaces // J. Opt. Soc. Am. 1965. Vol. 55. P. 315–318.

Ключевые слова: геостационарный спутник, фотометрия, тень Земли, фазовый угол, идентификация, равноденствие.

Статья поступила 29 ноября 2013 г.

НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова, г. Одесса

© Сухов П. П., Карпенко Г. Ф., Сухов К. П., 2013