

УДК 629.783:054

**Фотоэлектрическая фотометрия  
спутника «Интеркосмос-Болгария-1300»****М. В. Братийчук, А. Б. Гвардионов, В. П. Епишев,  
И. Ф. Найбауэр, О. Е. Стародубцева**

По результатам комплексных наблюдений ИСЗ «Интеркосмос-Болгария-1300» экспериментально определен характер рассеяния света от различных частей поверхности.

В статье приведены аналитические выражения фазовых функций, удовлетворяющие наблюдениям за период март 1982 г.— октябрь 1983 г. Установлено, что в период наблюдений имела место переориентация спутника.

*PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS OF SATELLITE «INTERCOSMOS-BULGARIA-1300», by Bratijchuk M. V., Gvardionov A. B., Epishev V. P., Najbauer I. F., Starodubtseva O. E.— From the results of complex observations of the satellite «Intercosmos-Bulgaria-1300» the character of light scattering by different parts of its surface has been determined. The analytical expressions of phase functions for observations obtained from March 1982 to October 1983 are given.*

Комплексные наблюдения искусственных небесных тел (ИНТ) [1] дают возможность определять факторы, зависящие от спутника и влияющие на его кривую блеска. Однако при интерпретации кривых блеска ИНТ наименее изученным является вопрос определения и применения фазовой функции [3], особенно для объектов с неизвестной формой, ориентацией и покрытием поверхности. Аналитические выражения фазовых функций для большинства простых стереометрических форм найдены давно [7]. Но их практическое использование затруднено в первую очередь двумя причинами: 1) фазовая функция для различных форм объекта, не считая сферы, требует знания ориентации исследуемого объекта в моменты наблюдений; 2) поверхность многих ИНТ является совокупностью нескольких стереометрических форм.

В тех случаях, когда от поверхности искусственного объекта наблюдается зеркальное отражение, ориентацию, как показано в [5], можно определить по зеркальным вспышкам независимо от формы объекта. В случае диффузного отражения задача уже сводится к одновременному определению двух неизвестных — формы и ориентации. Для ее решения необходимо либо использовать модели объектов, либо задавать все известные типы ориентации ИНТ, и методом последовательных приближений, согласуясь с результатами наблюдений, найти, при какой из ориентаций описывается фазовая зависимость блеска исследуемого объекта. Как показывает практика, это довольно трудная задача.

В этом плане ИСЗ «Интеркосмос-Болгария-1300» («ИКБ-1300») оказался очень удобным для исследований, так как основная информация о нем известна [4]. По этому объекту можно было проверить методику определения ориентации, описанную в [5], и попытаться определить по реальным наблюдениям фазовую функцию для ИНТ сложной формы. Трудность заключалась в том, что спутник не только активно управлялся с Земли, но и обладал двумя автономными системами ориентации: а) орбитальной; б) панелей солнечных батарей относительно Солнца.

С марта 1982 г. по октябрь 1983 г. в Ужгороде проводились комплексные фотоэлектрические и фотографические наблюдения «ИКБ-1300». В результате получен большой экспериментальный материал, из которого отобрано и исследовано около 30 кривых блеска. Для 8 из них выполнено приведение блеска к стандартным условиям [2], общей сложностью на 1698 моментов времени. В процессе стандартизации учтено изменение топоцентрического расстояния до наблюдаемого объекта, экстинкция земной атмосферы, а также освещение объекта отраженным от Земли светом.

После учета перечисленных факторов выявлена фазовая зависимость блеска, подтверждающая преимущественно диффузный характер рассеяния света от поверхности «ИКБ-1300». Кроме того, на большинстве полученных кривых выделялся один пик. А с конца мая 1983 г. на некоторых из них появились два и даже три пика. Их форма и характер свидетельствуют о зеркальных бликах.

Имеющаяся информация о системах ориентации спутника и наличие зеркальных бликов на кривых блеска позволили нам определить в экваториальной спутникоцентрической системе координат положение основных рассеивающих деталей поверхности «ИКБ-1300» на требуемые моменты времени. В случае орбитальной ориентации объекта ось, направленная к центру Земли, за время оборота спутника вокруг Земли делает разворот на 360°. У спутника «ИКБ-1300» такой осью, согласно [4], являлась его продольная ось. Работая над методикой определения ориентации, мы пришли к выводу, что мгновенное направление оси, совпадающее с направлением «спутник — центр Земли», можно определить в экваториальной спутникоцентрической системе координат, как

$$\alpha_R = \alpha_{\text{геоц}} \pm 180^\circ, \delta_R = -\delta_{\text{геоц}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{геоц}}$ ,  $\delta_{\text{геоц}}$  — геоцентрические экваториальные координаты объекта. Переход к геоцентрическим координатам от топоцентрических  $\alpha$ ,  $\delta$  разработан давно и описан во многих литературных источниках, например в [6].

Направление нормали к зеркально отражающей площадке в моменты блика определялось согласно методике, представленной в работе [5]. Полученные результаты показали, что дающая зеркальный блик площадка всегда наклонена к Солнцу приблизительно под одним и тем же углом, и ее ориентация не связана с направлением «спутник — центр Земли». Из описания формы объекта [4] следует, что эта площадка — панель солнечной батареи. Следовательно, определение направления нормали  $\vec{n}$  к отражающей площадке дает возможность определить ориентацию солнечных батарей. Определение направления «спутник — центр Земли» дает мгновенную ориентацию продольной оси объекта относительно Солнца и наблюдателя.

Располагая данными об ориентации «ИКБ-1300» на требуемые моменты времени, можно подбирать различные фазовые функции для описания наблюдаемого рассеяния света его поверхностью. В процессе исследования аналитические выражения фазовых функций [7] использовались как в отдельности, так и в различных сочетаниях. Задача состояла в том, чтобы подобрать выражение фазовой функции, отвечающее соответствующему значению поправки:

$$\Delta m_{\psi_i} = -2.5 \lg [F(\psi) / F(\psi_{\text{ст}})], \quad (2)$$

где  $F(\psi_i)$  — фазовая функция для  $i$ -го фазового угла,  $F(\psi_{\text{ст}})$  — для стандартного фазового угла, как правило, равного нулю.

При введении такой поправки среднее стандартизованное значение блеска вдоль всей кривой становится постоянным.

В результате оказалось, что в тех случаях, когда на кривой блеска наблюдался один или несколько пиков (рис. 1), аналитическое выра-

жение фазовой функции, удовлетворяющее вышеизложенному требованию, представляло собой сочетание двух фазовых функций: для диффузного цилиндра и диффузной плоскости, а именно:

$$F(\psi, \epsilon, \theta) = \{\pi^{-1} [\sin \psi + (\pi - \psi) \cos \psi] \cos \epsilon_1 \cos \theta_1\} \cos \epsilon_2 \cos \theta_2. \quad (3)$$

В случаях, когда кривые блеска отличались плавным ходом и отсутствием резких скачков изменения блеска (рис. 2), фазовая функция удовлетворяла диффузной плоскости:

$$F(\psi, \epsilon, \theta) = \cos \epsilon_2 \cos \theta_2. \quad (4)$$

В приведенных соотношениях аргументами являются:  $\epsilon_{1,2}$  — углы падения солнечного света соответственно к цилиндрической (рис. 3) и плоской (рис. 4) частям поверхности объекта в спутникоцентрической системе координат;  $\theta_{1,2}$  — соответствующие углы рассеяния света от этих участков в сторону наблюдателя;  $\psi$  — фазовый угол. Из-за того, что «ИКБ-1300» обладал двумя автономными системами ориентации (относительно Солнца и относительно центра Земли), углы  $\epsilon_1$ ,  $\theta_1$  и  $\epsilon_2$ ,  $\theta_2$  являлись независимыми величинами.

На рис. 1 и 2 показаны ориентации объекта к наблюдателю в момент записи соответствующей кривой изменения видимого блеска

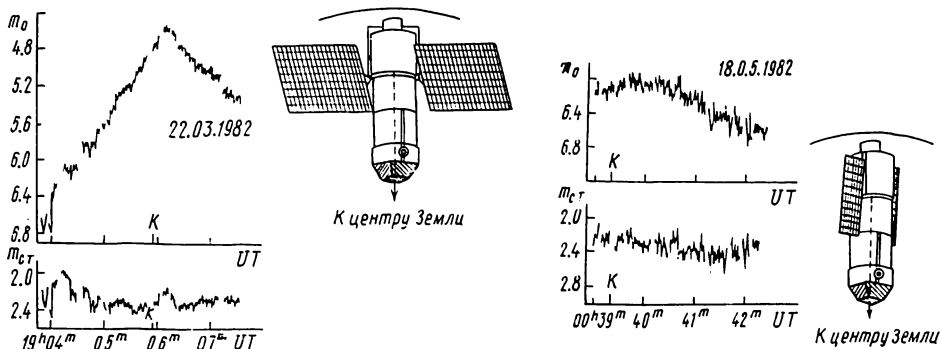


Рис. 1. Изменение блеска «ИКБ-1300» в зависимости от ориентации и фазы спутника в марте 1982 г.

Рис. 2. Изменение блеска «ИКБ-1300» в зависимости от ориентации и фазы спутника в мае 1982 г.

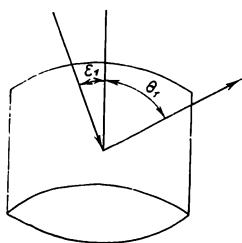


Рис. 3. Углы падения  $\epsilon_1$  и отражения  $\theta_1$  света относительно оси диффузно отражающего цилиндра

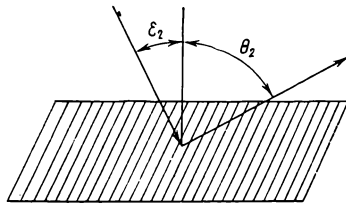


Рис. 4. Углы падения  $\epsilon_2$  и отражения  $\theta_2$  света относительно нормали к диффузно отражающей плоскости

( $m_0$ ), а также вид этой кривой после приведения блеска к стандартным условиям ( $m_{ст}$ ), в том числе и с учетом фазовой поправки  $\Delta m_{ф}$ . Анализируя данные об ориентации объекта и характере рассеяния света, мы попытались объяснить существующее различие между двумя группами кривых блеска. Оно, на наш взгляд, связано с тем, что во время записи кривых (рис. 2) панели солнечных батарей затеняли обращенную к наблюдателю часть рассеивающего цилиндра.

Полученные фазовые функции хорошо описывали результаты наблюдений «ИКБ-1300» вплоть до мая 1983 г. В мае ситуация изменилась. Вычисленные поправки  $\Delta m_\psi$  не выравняли среднее значение блеска объекта, а еще больше искажали картину. Предполагаемая причина такого изменения заключалась в изменении ориентации объекта. Исходя из этого, мы попытались решить обратную задачу, а именно, по известному характеру рассеяния света оценить ориентацию объ-

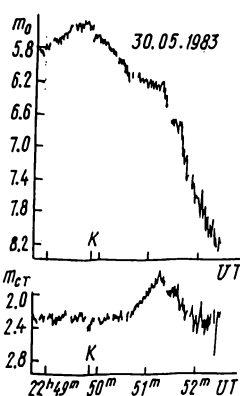


Рис. 5. Характер ориентации «ИКБ-1300» в мае 1983 г.

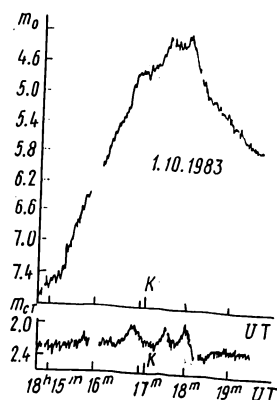


Рис. 6. Изменение ориентации «ИКБ-1300» к октябрю 1983 г.

екта. Замена в фазовой функции (соотношение (3))  $\cos \epsilon_1 \cos \theta_1$  на  $\sin \epsilon_1 \sin \theta_1$  позволила получить для данного периода наблюдения приемлемые результаты. Фазовая функция вида

$$F(\psi, \epsilon, \theta) = \{\pi^{-1} [\sin \psi + (\pi - \psi) \cos \psi] \sin \epsilon_1 \sin \theta_1\} \cos \epsilon_2 \cos \theta_2, \quad (5)$$

описывающая эти результаты, подтверждает такую ориентацию ИНТ, когда с направлением «спутник — центр Земли» совпадает не продольная ось объекта, а поперечная (рис. 5). Полное решение задачи возможно только с учетом прецессионного движения главной оси объекта.

Таким образом, полученные результаты подтверждали не только переориентацию объекта, но и отсутствие стабилизации его осей в указанный период. И лишь в сентябре — октябре 1983 г. снова пришлось вернуться к фазовым функциям, имеющим первоначальный вид (соотношение (3)). Значит, у объекта вновь была восстановлена его прежняя ориентация (рис. 6), хотя ось прецессировала с периодом порядка 4 мин.

Все необходимые для проведения стандартизации и вычисления координат исходные данные получены из синхронных фотографических наблюдений спутника, аналогично тому, как это описано в [2, 3]. Результаты вычислений для выбранных моментов времени представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Элементы орбиты спутника и экваториальные координаты Солнца

Номер п/п	Дата	Время наблюдений (УТ)	$i$	$\Omega$	$\alpha_\odot$	$\delta_\odot$
1	22.03.82	19 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup> —19 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup>	81,2°	320,5°	1,9°	0,8°
2	24.03.82	18 38 —18 42	81,2	318,2	3,5	1,5
3	18.05.82	00 39 —00 42	81,2	266,3	54,5	19,4
4	30.05.83	22 49 —22 53	81,2	254,9	67,3	21,8
5	28.09.83	18 58 —19 02	81,2	135,2	184,9	—2,1
6	01.10.83	18 15 —18 20	81,2	132,3	187,3	—3,2

Таблица 2. Результаты определения фазовой зависимости блеска

Дата	UT	$\psi$	$\varepsilon_1$	$\theta_1$	$\theta_2$	$m$	$\Delta m_\psi$	$m_{ст}$	
$\varepsilon_2 = 45.2^\circ$									
22.03.82	19 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup>	92.2°	67.0°	34.5°	45.4°	5.21 <sup>m</sup>	-3.21 <sup>m</sup>	2.00 <sup>m</sup>	
	04 49	81.7	66.6	25.6	40.6	5.08	-2.82	2.26	
	05 52	60.8	66.0	8.4	31.5	4.43	-2.11	2.32	
	06 02	57.5	65.7	9.1	31.6	4.25	-2.03	2.22	
	06 11	54.6	65.4	11.2	31.8	4.13	-1.98	2.15	
	06 49	45.0	63.8	23.3	45.4	4.32	-2.04	2.28	
	07 00	43.0	63.4	27.1	48.0	4.35	-2.10	2.25	
	07 25	38.5	62.3	35.8	51.5	4.42	-2.23	2.19	
$\varepsilon_2 = 45.5^\circ$									
24.03.82	18 38 32	54.9	69.1	17.6	40.1	4.58	-2.30	2.28	
	39 10	46.5	68.1	21.3	30.1	4.24	-1.98	2.26	
	39 26	43.2	67.6	23.3	23.5	4.08	-1.90	2.18	
	39 31	42.6	67.4	24.0	21.7	4.06	-1.87	2.19	
	40 20	36.5	65.4	30.8	16.5	4.08	-1.76	2.32	
	40 55	31.5	64.0	41.4	11.2	4.09	-1.79	2.30	
	41 32	30.6	62.4	49.0	9.5	4.10	-1.84	2.26	
	$\varepsilon_2 = 45.1^\circ$								
18.05.82	00 39 05	90.5	71.6	35.0	86.0	5.48	-3.26	2.22	
	39 20	93.8	72.3	34.3	85.8	5.41	-3.21	2.20	
	39 35	98.0	73.1	34.8	85.5	5.35	-3.14	2.21	
	40 09	108.6	74.6	36.9	84.8	5.25	-2.98	2.27	
	41 14	124.4	77.3	47.8	83.6	5.03	-2.76	2.27	
	41 55	130.7	78.9	53.3	82.8	4.85	-2.63	2.22	
	42 18	134.0	80.0	55.8	82.5	4.76	-2.58	2.18	
	$\varepsilon_2 = 50.1^\circ$								
30.05.83	22 48 40	64.1	61.5	23.6	32.3	4.62	-2.41	2.21	
	49 30	78.6	68.5	30.8	26.0	4.40	-2.17	2.23	
	49 40	81.4	69.8	39.2	25.0	4.38	-2.15	2.23	
	50 06	88.6	73.7	45.9	33.8	4.58	-2.30	2.28	
	51 13	106.5	82.1	62.6	50.1	5.18	-2.95	2.23	
	51 56	113.5	88.2	67.3	58.8	5.60	-3.38	2.22	
	52 33	117.1	89.9	78.3	68.7	6.14	-3.86	2.28	
	$\varepsilon_2 = 50.2^\circ$								
28.09.83	18 58 29	108.3	65.1	42.5	57.6	6.54	-4.33	2.21	
	58 54	102.9	63.6	43.3	51.4	6.06	-3.88	2.18	
	59 05	100.5	62.8	42.3	50.2	5.75	-3.73	2.02	
	59 29	95.3	65.5	37.5	44.4	5.75	-3.48	2.27	
	59 58	89.4	66.5	36.3	39.1	5.46	-3.22	2.24	
	19 00 09	87.2	66.8	37.3	37.5	5.40	-3.16	2.24	
	00 30	83.9	67.6	37.4	33.7	5.25	-3.05	2.20	
	00 45	81.5	67.5	43.1	35.1	5.29	-3.09	2.20	
	01 45	74.0	67.8	55.5	33.7	5.43	-3.18	2.25	
	$\varepsilon_2 = 45.7^\circ$								
	01.10.83	18 15 20	106.5	20.4	40.1	74.8	6.23	-3.98	2.25
		15 49	103.8	24.0	35.8	66.7	5.67	-3.43	2.24
16 31		96.5	28.0	30.3	58.4	5.05	-2.83	2.22	
17 00		90.2	31.1	28.9	45.7	4.61	-2.34	2.27	
17 34		83.4	25.6	19.8	37.0	4.08	-1.86	2.22	
18 05		78.0	21.7	19.3	32.5	3.88	-1.64	2.24	
18 37		73.9	21.6	44.0	32.7	4.15	-1.86	2.29	
19 16		69.4	25.5	51.5	33.0	4.20	-1.94	2.26	

Примечание:  $m$  и  $m_{ст}$  — значение блеска спутника до и после учета диффузного рассеяния света.

Исследования характера рассеяния света поверхностью «ИКБ-1300» показали, что использованием сочетания фазовых функций для простых стереометрических форм можно, на основании фотоэлектрических наблюдений ИНТ, описать оптические характеристики объектов сложной формы.

В заключение выражаем искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории космических исследований УжГУ, принимавших участие в получении и обработке фотографических наблюдений.

1. *Братийчук М. В.* Комплексные наблюдения искусственных небесных тел — наиболее эффективный путь к внедрению результатов исследования // Пробл. косм. физики.— 1978.— Вып. 13.— С. 18—27.
2. *Братийчук М. В., Епишев В. П., Мотрунич Я. М.* О стандартизации кривых блеска искусственных небесных тел // Там же.— 1979.— Вып. 14.— С. 26—31.
3. *Братийчук М. В., Епишев В. П., Мотрунич Я. М.* Исследование формы поверхности спутника «Пагеос» по электрофотометрическим наблюдениям // Астрометрия и астрофизика.— 1980.— Вып. 40.— С. 78—89.
4. *Ежегодник* большой советской энциклопедии. 1982.— М.: Сов. Энциклопедия, 1982.— Вып. 26.— 600 с.
5. *Епишев В. П.* Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрометрия и астрофизика.— 1983.— Вып. 50.— С. 89—93.
6. *Эскобал П.* Методы определения орбит.— М.: Мир, 1970.— 280 с.
7. *Rambauske W. R., Gruensel R. R.* Distribution of diffuse optical reflection around some stereometric surfaces // J. Opt. Soc. Amer.— 1965.— 55, N 3.— P. 315—318.

Ужгород. ун-т,  
Ужгород

Поступила в редакцию 19.02.85,  
после доработки 08.07.85