

## Поведение блеска астероидов на малых фазовых углах. Результаты наблюдений

И.А. Терещенко<sup>1</sup>, В.Г. Шевченко<sup>1</sup>, В.Г. Чорный<sup>1</sup>, Ю.Н. Круглый<sup>1</sup>, И.Н. Бельская<sup>1</sup>,  
Н.М. Гафтонюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина, Харьков

<sup>2</sup>НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», Симеиз, Крым

*Данная работа является продолжением наблюдательной программы по исследованию поведения блеска астероидов различных композиционных типов в широком диапазоне фазовых углов, включая предельно малые углы (<1 град.), проводимой в Институте астрономии ХНУ им. В.Н.Каразина в сотрудничестве с другими обсерваториями. Проведены ПЗС-наблюдения восьми астероидов (композиционные типы поверхностей указаны в скобках): 122 Gerda (ST), 176 Iduna (G), 214 Aschera (E), 218 Bianca (S), 250 Bettina (M), 635 Vundtia (C), 717 Wisibada (D), 1279 Uganda (C). Для шести астероидов наблюдения выполнены в четырех стандартных BVRI спектральных полосах. По результатам наблюдений получены детальные фазовые зависимости блеска указанных выше астероидов.*

*ПОВЕДІНКА БЛИСКУ АСТЕРОЇДІВ НА МАЛИХ ФАЗОВИХ КУТАХ. РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ, Терещенко І.А., Шевченко В.Г., Чорний В.Г., Круглий Ю.Н., Бельська І.Н., Гафтонюк Н.М. — Дана робота є продовженням програми спостережень по дослідженню поведінки блиску астероїдів різних композиційних типів у широкому діапазоні фазових кутів, включаючи гранично малі кути (<1 град.), що проводиться в Інституті астрономії ХНУ ім. В.Н.Каразіна в співробітництві з іншими обсерваторіями. Проведено ПЗС-спостереження восьми астероїдів (композиційні типи поверхонь зазначені в дужках): 122 Gerda (ST), 176 Iduna (G), 214 Aschera (E), 218 Bianca (S), 250 Bettina (M), 635 Vundtia (C), 717 Wisibada (D), 1279 Uganda (C). Для шести астероїдів спостереження виконані в чотирьох стандартних BVRI спектральних смугах. За результатами спостережень отримані детальні фазові залежності блиску зазначених вище астероїдів.*

*BRIGHTNESS BEHAVIOR OF ASTEROIDS AT SMALL PHASE ANGLES. RESULTS OF OBSERVATIONS, by Tereschenko I.A., Shevchenko V.G., Chiorny V.G., Krugly Yu.N., Belskaya I.N., Gaftonjuk N.M. — This work is a continuation of the observing program devoted the investigation of brightness behavior for different asteroid types in wide range of phase angles including very small phase angles (<1 deg) that is performed in Astronomical Institute of Kharkiv Karazin National University in collaboration with other observatories. We carried out new CCD observations for eight asteroids (composition types are given in parentheses): 122 Gerda (ST), 176 Iduna (G), 214 Aschera (E), 218 Bianca (S), 250 Bettina (M), 635 Vundtia (C), 717 Wisibada (D), 1279 Uganda (C). For six asteroids the observations were performed in four standard BVRI spectral bands. As a result we obtained the lightcurves and the magnitude-phase dependences for the above-mentioned asteroids.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оппозиционным эффектом (ОЭ) называется нелинейное возрастание блеска вблизи оппозиции, обычно начинающееся при углах фазы < 7 градусов. Это явление характерно для большинства безатмосферных тел Солнечной системы. У астероидов ОЭ был впервые обнаружен Герельсом [6] по наблюдениям среднеальбедного астероида S-типа 20 Massalia. Долгое время считалось, что амплитуда ОЭ не зависит от композиционного типа и практически одинакова для всех астероидов (см., например, [11]). Систематические наблюдения фазовых зависимостей блеска, прежде всего в Институте астрономии ХНУ, а также других обсерваториях Европы и США позволили существенно увеличить количество и качество данных для уверенного анализа зависимости поведения блеска на малых фазовых углах от типа поверхности астероидов. Такой анализ был выполнен Бельской и Шевченко [3] по данным наблюдений 33-х астероидов. Было показано, что поведение блеска в области ОЭ зависит главным образом от альбедо поверхности, при этом наибольшую величину ОЭ имеют среднеальбедные астероиды S и M типов, а наименьшую — низкоальбедные астероиды. Кроме того, низкоальбедные астероиды демонстрируют большее разнообразие в поведении блеска в области ОЭ по сравнению с астероидами других типов. В целом, амплитуда ОЭ, измеренная на фазовом угле 0.3 град., неоднозначно зависит от альбедо и имеет максимум при альбедо около 20%. Полученный результат был интерпретирован как указывающий на сравнимый вклад двух основных механизмов, ответственных за формирование ОЭ. Для низкоальбедных астероидов основную роль в формировании ОЭ играет взаимное затенение частиц, слагающих их поверхность [7], тогда как для высокоальбедных

астероидов, основным механизмом считается когерентное усиление обратно рассеянного света [14]. На предельно малых фазовых углах ( $< 1$  град.) вклад когерентного рассеяния, по-видимому, становится сравнимым с вкладом затенения, что приводит к немонотонной зависимости амплитуды ОЭ от альбедо. Не исключено, что и другие механизмы формирования ОЭ, такие как глория, уголковое отражение и др., также могут играть заметную роль.

Чтобы выяснить количественное соотношение этих механизмов у разных типов поверхностей астероидов, необходимы высокоточные измерения фазовых зависимостей блеска для астероидов с различной минералогией поверхности в широком диапазоне фазовых углов, включая предельно малые углы, и в различных спектральных полосах. Именно на малых фазовых углах роль теневого механизма сводится к минимуму и появляется возможность выделить влияние других механизмов формирования ОЭ.

Данная работа является продолжением наблюдательной программы по исследованию поведения блеска астероидов на малых фазовых углах, проводимой в Институте астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина в сотрудничестве с другими обсерваториями [4, 12, 13]. В настоящей работе представлены ПЗС-наблюдения восьми астероидов различных композиционных типов: 122 Gerda, 176 Iduna, 214 Aschera, 218 Bianca, 250 Bettina, 635 Vundtia, 717 Wisibada, 1279 Uganda. Для шести из них наблюдения выполнены в четырех стандартных BVRI спектральных полосах.

## 2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ

Наблюдения астероидов проводились в 2000–2006 гг., в основном на телескопе АЗТ-8 Института астрономии ХНУ. Поскольку достижение предельно малых фазовых углов для данного астероида — событие довольно редкое и возможно только в определенные оппозиции в короткий промежуток времени, то при таких наблюдениях особенно высока зависимость от погодных условий. Чтобы уменьшить влияние погодных факторов и улучшить фазовое покрытие, для наблюдений был задействован также 1 м телескоп КраО (Симеиз). В качестве приёмника информации использовались ПЗС-камеры ST6 и IMG 4710. Матрицы ПЗС-камер имеют  $375 \times 242$  и  $1056 \times 1027$  светочувствительных элементов соответственно и охлаждаются элементами Пельтье до температуры  $-50^\circ\text{C}$  относительно окружающей среды, чтобы уменьшить тепловые шумы. Размер пикселя матрицы ST-6 составляет  $23 \times 27$  микрон, а матрица IMG 4710 имеет более мелкие пиксели размером  $13 \times 13$  микрон. Для получения изображений в различных полосах использовалась фильтровая насадка фирмы FLI с набором фильтров, которые реализуют BVRI систему Джонсона–Козинса [5].

Первичные ПЗС-изображения содержат как информацию о небесных объектах, так и шумы. Последние разделяются на фон неба и тепловые шумы. Кроме того, каждый элемент изображения имеет разный коэффициент усиления, из-за чего возникает фотометрическая ошибка поля, которая может достигать 10%. Чтобы учесть неравномерность чувствительности матрицы по полю, ее необходимо осветить световым пучком, который будет давать равномерную освещенность по полю матрицы, т.е. получить так называемое «плоское поле». Такие поля получались по наблюдениям сумеречного неба в вечернее или утреннее время. При наблюдениях астероида время накопления сигнала выбиралось из условия, чтобы отношение сигнал/шум было больше 150. Это позволяет получать точность относительной фотометрии не хуже 0.01 зв. вел. С такой же экспозицией получались и темновые изображения (матрица закрывается специальным затвором), чтобы учесть тепловые шумы. Редукция первичных снимков представляла собой получение изображений, свободных от тепловых шумов и скорректированных за неравномерность чувствительности по полю. В начале из исходного изображения вычиталось среднее темновое изображение, а затем полученное изображение делилось на «плоское поле». Такая первичная редукция, а также фотометрические измерения изображений астероида и звезд производились при помощи программного обеспечения «ASTRPHOT», разработанного С.Моттолой [10]. Измерения блеска проводились методом апертурной фотометрии. Программное обеспечение ASTRPHOT позволяет выбирать эллиптическую апертуру с полуосями размерами 5 пикселей для измерения блеска астероида и звезд сравнения. Количество используемых звезд сравнения обычно было более трех, чтобы исключить их возможную переменность. Размер диафрагмы выбирался таким образом, чтобы объект почти полностью проваливался в диафрагму на уровне 95–99% его общей яркости. Фон измерялся вокруг астероида и каждой из звезд сравнения. Более подробно методика наблюдения с ПЗС-камерой и редукция изображений изложены в работе [1].

## 3. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ФАЗОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ БЛЕСКА АСТЕРОИДОВ

Наиболее важными и сложными процедурами при получении фазовых зависимостей блеска астероидов является привязка звезд сравнения к фотометрическим стандартам (т.е. стандартизация) и

определение звездной величины астероида. Обычная методика наблюдений астероидов дифференциальным методом предполагает измерение в течение ночи одной или нескольких звезд сравнения для контроля прозрачности атмосферы, определения коэффициентов экстинкции и получения кривой блеска астероида. Для того, чтобы получить блеск астероида во всем диапазоне наблюдаемых фазовых углов (для главного пояса 0–30 град), астероид необходимо наблюдать на протяжении 2–3 месяцев. Вследствие видимого движения астероида по небесной сфере каждую ночь приходится выбирать новую звезду сравнения. В среднем, за период наблюдений используется 10–15 звезд, причем не всегда солнечного спектрального класса. Практически для всех этих звезд блеск известен с точностью 0.1 зв. вел., что недостаточно для получения фазовой зависимости блеска астероида. Поэтому все звезды сравнения привязывались к известным фотометрическим стандартам. Для стандартизации звезд сравнения в данной работе использовались фотометрические стандарты из каталогов [9, 15]. Редукция к общепринятой системе была проведена, используя формулы перехода, полученные в отделе физики астероидов (см., например, [1]).

Стандартизация звезд сравнения проводилась в два этапа: во-первых, в каждую ночь наблюдения астероида (если позволяли погодные условия) и, во-вторых, в конце всего периода наблюдений. На первом этапе в качестве дополнительных фотометрических стандартов использовались звезды сравнения за предыдущие ночи, если их звездные величины были определены с необходимой точностью (обычно ошибка определения не превышала 0.02 зв. вел.). В конце всего периода наблюдений производилась общая привязка всех звезд сравнения к выбранным фотометрическим стандартам, а также стандартизировались те звезды сравнения, блеск которых, не был определен из-за плохих погодных условий. Привязка всех звезд сравнения, используемых за весь цикл наблюдений фазовой зависимости, к одним и тем же фотометрическим стандартам позволяет свести к минимуму погрешности абсолютной фотометрии астероида. В некоторых случаях такую привязку не удавалось осуществить после окончания наблюдений и привязка проводилась в следующий период видимости звезд сравнения.

Другая важная особенность получения фазовых зависимостей заключается в правильном разделении вклада фазового эффекта и периодических изменений блеска, связанных с вращением астероида, что возможно только при наличии хорошо измеренной кривой блеска, охватывающей весь период вращения. Кроме того, нужно учитывать, что амплитуда кривой блеска увеличивается с ростом фазового угла (см., напр., [2]), и для очень вытянутых астероидов (соотношение полуосей 1.5 и больше) несферичность формы заметно влияет на фазовый ход блеска. Известно, что изменения амплитуды происходят главным образом за счет углубления минимумов кривой блеска, а блеск астероида, определенный в максимуме кривой блеска, подвержен меньшему влиянию кривизны поверхности. Неучет изменения амплитуды с углом фазы приводит к тому, что при определении параметров, описывающих фазовую зависимость блеска (напр., линейный фазовый коэффициент, параметр  $G$  и др.), вносится дополнительная ошибка, которую можно учесть только в случае известных формы фигуры, координат полюса астероида и распределения яркости по диску. Так как эти параметры для большинства астероидов неизвестны, то наблюдения выполнялись таким образом, чтобы получить по возможности полную кривую блеска астероида и определить блеск астероида для данного фазового угла в максимуме кривой блеска. По отдельным кривым блеска, полученным в разные ночи, строилась составная кривая блеска астероида. Фазовая зависимость блеска астероида приводилась к одному из максимумов, обычно наиболее протяженному или наиболее наблюдаемому в полосе  $V$ . Показатели цвета определялись в каждую ночь наблюдений для произвольного участка на кривой блеска, в дальнейшем они добавлялись к фазовой зависимости в полосе  $V$  для получения фазовых зависимостей в других полосах.

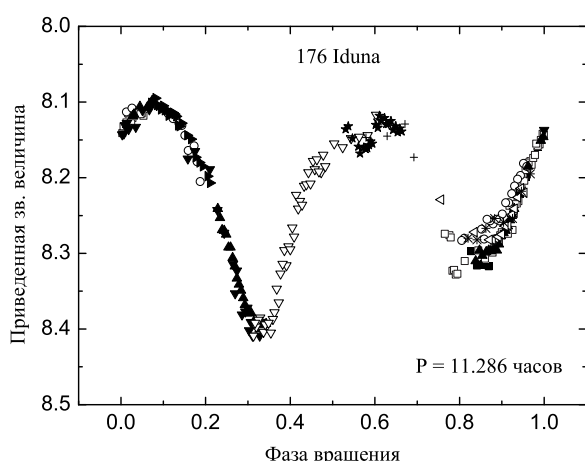
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения 8-ми астероидов были выполнены в общей сложности в течение 70 ночей. Основные результаты наблюдений представлены в табл.1, где приведен список астероидов, их основные физические данные (композиционный тип, альbedo, диаметр), минимальный фазовый угол наблюдений, а также определенные нами периоды вращения, амплитуды кривых блеска, амплитуды оппозиционного эффекта, параметры  $H$  и  $G$  фазовой зависимости блеска и показатели цвета  $B-V$ ,  $V-R$  и  $R-I$ . Измеренные показатели цвета данных астероидов близки к средним значениям для соответствующих типов, что подтверждает определенный ранее композиционный тип поверхности. Для астероидов с неоднозначной классификацией 122 Gerda и 717 Wisibada (по данным [17]) измеренные показатели цвета ближе к  $T$ - и  $D$ -типу соответственно.

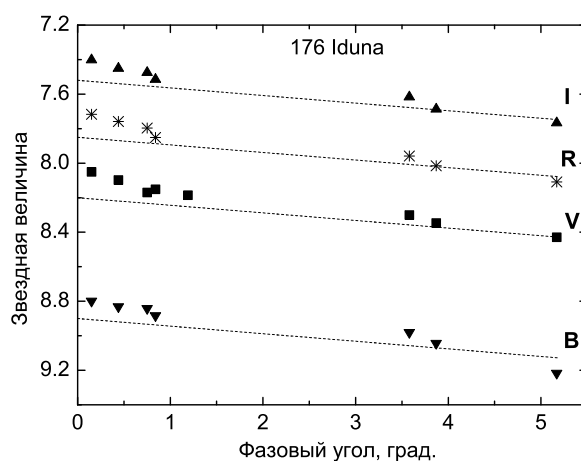
Благодаря длительным рядам наблюдений впервые определены или существенно уточнены перио-

**Таблица 1.** Основные физические характеристики наблюдавшихся астероидов

Астероид	Тип <sup>[17]</sup>	$p_V^{[16]}$	$D^{[16]}$ км	Мин. угол	P, часы	Амп. зв. вел.	Амп. ОЭ зв. вел.	H, зв. вел.	G, зв. вел.	B-V, зв. вел.	V-R, зв. вел.	R-I, зв. вел.
122 Gerda	ST	0.19	81.7	0.32	10.688	0.12	—	—	—	0.91	0.49	—
176 Iduna	G	0.083	121.0	0.15	11.286	0.30	0.15	8.04	0.24	0.68	0.33	0.34
214 Aschera	E	0.52	23.2	0.13	6.834	0.23	0.10	9.41	0.44	0.71	0.41	0.37
218 Bianca	S	0.18	60.6	0.31	6.337	0.18	—	—	—	0.84	0.44	0.38
250 Bettina	M	0.26	79.8	0.30	5.054	0.35	0.31	7.03	0.17	—	—	—
635 Vundtia	C	0.046	98.2	0.16	5.894	0.15	—	—	—	0.74	0.30	0.41
717 Wisibada	DX	0.067	31.0	0.20	> 6	0.05	—	—	—	0.68	0.44	0.44
1279 Uganda	S	—	9.0	0.51	> 20	0.04	0.13	12.44	0.64	—	—	—



**Рис. 1.** Составная кривая блеска астероида 176 Iduna



**Рис. 2.** Фазовая зависимость блеска астероида 176 Iduna

ды вращения 3-х астероидов (122 Gerda, 176 Iduna, 635 Vundtia), а для двух астероидов (717 Wisibada и 1279 Uganda) сделаны оценки нижней границы периода вращения. Амплитуда кривых блеска этих двух астероидов за весь период наблюдений не превышала 0.05 зв. вел., что свидетельствует либо о том, что форма этих астероидов близка к сферической, либо о том, что их ось вращения сильно наклонена к плоскости эклиптики, т.е. наблюдениям была доступна приполярная область. В целом, низкоальбедные астероиды нашей выборки показывают небольшую амплитуду кривых блеска, не превышающую 0.15 зв.вел. Максимальные амплитуды кривых блеска (0.3–0.35 зв.вел.) измерены у астероидов G-типа 176 Iduna и M-типа 250 Bettina, что позволяет предположить заметную вытянутость формы этих астероидов с соотношением осей аппроксимирующего эллипсоида  $\geq 1.3$ . На рис.1 в качестве примера показана составная кривая блеска астероида 176 Iduna, построенная с периодом  $P = 11.286$  час по наблюдениям в марте–июне 2005 г.

Фазовые зависимости блеска для 6-ти астероидов получены в четырех спектральных полосах BVRI, а для остальных 2-х астероидов фазовые зависимости удалось измерить только в полосе V. На рис.2 показана фазовая зависимость блеска астероида 176 Iduna, детально измеренная в диапазоне фазовых углов 0.15–5.2 град в различных спектральных полосах. Пунктирные линии представляют экстраполяцию линейной части фазовой зависимости с фазовым коэффициентом 0.044 зв.вел./град, вычисленным по наблюдениям на больших фазовых углах в полосе V. Как видно из рисунка, амплитуда опозиционного эффекта, определяемая превышением блеска астероида над линейной экстраполяцией фазовой зависимости, составляет около 0.15 зв.вел., и практически не зависит от длины волны в пределах погрешностей измерений.

Амплитуды ОЭ астероидов нашей выборки близки к средним значениям для соответствующих композиционных типов. Детальные результаты наблюдений находятся в электронном формате и могут быть получены у авторов статьи по электронной почте.

## 5. ВЫВОДЫ

Как результат выполнения работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведены фотометрические наблюдения 8 астероидов различных композиционных типов в полосе V, в широком диапазоне фазовых углов, при этом ход опозиционного эффекта измерен

до минимальных фазовых углов 0.1–0.5 град. Для шести астероидов фазовые зависимости блеска получены также в BRI спектральных полосах.

2. Амплитуды оппозиционного эффекта измеренных астероидов близки к средним значениям для соответствующих типов поверхности и подтверждают немонотонный характер зависимости амплитуды от альбедо поверхности. С точностью до ошибок наблюдений изменений величины оппозиционного эффекта с длиной волны не обнаружено.

1. *Круглый Ю.Н.* Фотометрия астероидов, сближающихся с Землёй: Дис... канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 2003. — 180 с.
2. *Шевченко В.Г.* Фотометрия астероидов: фазовая зависимость блеска, фотометрическая модель: Дис... канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 1997. — 140 с.
3. *Belskaya I.N., Shevchenko V.G.* Opposition effect of asteroids // *Icarus*. — 2000. — **146**. — P. 490–499.
4. *Belskaya I.N., Shevchenko V.G., Kiselev N.N., et al.* Opposition polarimetry and photometry of S and E-type asteroids // *Icarus*. — 2003. — **166**. — P. 276–284.
5. *Bessell M.S.* UBVR photometry II: The Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry // *P.A.S.P.* — 1979. — **91**, № 543. — P. 589–607.
6. *Gehrels T.* Photometric studies of asteroids: V. The lightcurve and phase function of 20 Massalia // *Astrophys. J.* — 1956. — **123**. — P. 331–335.
7. *Hapke B., Nelson R., Smythe W.* The opposition effect of the Moon: Coherent backscatter and shadow-hiding // *Icarus*. — 1998. — **133**. — P. 89–97.
8. *Harris A.W., Young J.W., Contreiras L., et al.* Phase relations of high albedo asteroids: the unusual opposition brightening of 44 Nysa and 64 Angelina // *Icarus*. — 1989. — **81**. — P. 365–374.
9. *Landolt A.U.* UBVR photometric standard stars in the magnitude range 11.5–16.0 around the celestial equator // *Astron. J.* — 1992. — **104**. — P. 340–371.
10. *Mottola S., De Angelis G., Di Martino M., et al.* The Near-Earth objects follow-up program: first results. // *Icarus*. — 1995. — **117**. — P. 62–70.
11. *Scaltriti F., Zappala V.* The similarity of the opposition effect among asteroids. // *Astron. Astrophys.* — 1980. — **83**. — P. 249–251.
12. *Shevchenko V.G., Belskaya I.N., Chiorny V.G., et al.* Asteroid observations at low phase angles. I. 50 Virginia, 91 Aegina and 102 Miriam // *Planet. Space Sci.* — 1997. — **45**. — P. 1615–1623.
13. *Shevchenko V.G., Chiorny V.G., Gaftonyuk N.M., et al.* Asteroid observations at low phase angles. III. Brightness behavior of dark asteroids // *Icarus*. — 2008. Accepted.
14. *Shkuratov Yu.G.* Study of the backscatter of light by solid surfaces of celestial bodies: opposition brightness effect // *Sol. Syst. Res.* — 1994. — **28**. — P. 3–18.
15. *Skiiff B.A.* UBVR photometry of faint field stars // *VizieR On-line Data Catalog: II/277*. 2007.
16. *Tedesco E.F., Noah P.V., Noah M., Price S.D.* The supplemental IRAS minor planets survey // *Astron. J.* — 2002. — **123**. — P. 1056–1085.
17. *Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid Taxonomy // *Asteroids II* / Ed.: R.P.Binzel, T.Gehrels and M.S.Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press. — 1989. — P. 298–315.

Поступила в редакцию 5.08.2008