

УДК 523.44

Д. Ф. Лупишко¹, Ю. Н. Круглый^{1,2}, В. Г. Шевченко¹

¹ Научно-исследовательский институт астрономии
Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина
61022 Харьков, ул. Сумская 35

² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного 27

Фотометрия астероидов

Фотометрия — один из наиболее эффективных методов исследований, который обеспечил огромный объем данных об альbedo, размерах, форме и вращении, оптических и структурных свойствах астероидов и других малых тел Солнечной системы. Вклад фотометрического метода в определение этих характеристик астероидов является решающим. В обзоре представлены основные результаты изучения астероидов в трех наиболее важных направлениях: а) определение формы и параметров вращения астероидов; б) изучение оптических свойств их поверхностей и в) обнаружение и изучение двойных систем среди астероидов.

ФОТОМЕТРІЯ АСТЕРОЇДІВ, Лупішко Д. Ф., Круглий Ю. М., Шевченко В. Г. — Фотометрія — один із найефективніших методів досліджень, який забезпечив величезний обсяг даних про альbedo, розміри, форму і обертання, оптичні та структурні властивості астероїдів та інших малих тіл Сонячної системи. Внесок фотометричного методу у визначення цих характеристик астероїдів є вирішальним. В огляді представлено основні результати вивчення астероїдів у трьох найважливіших напрямках: а) визначення форми та параметрів осьового обертання астероїдів; б) вивчення оптичних властивостей їхніх поверхонь і в) відкриття та вивчення подвійних систем серед астероїдів.

ASTEROID PHOTOMETRY, by Lupishko D. F., Krugly Yu. N., Shevchenko V. G. — Photometry is one of the most productive investigation techniques which has provided a considerable body of valuable information on albedos and sizes, shapes and rotation, optical and structural properties of asteroids and other small solar system bodies. The contribution of photometry to the determination of the asteroid characteristics is decisive. We present the progress of photometry in three most important directions of asteroid study, namely, determination of asteroid shapes and rotation parameters, study of optical properties of asteroid surfaces as well as detection and investigation of binary asteroid systems.

ВВЕДЕНИЕ

Фотометрия — это не только один из первых (исторически), но и один из наиболее продуктивных методов исследований тел Солнечной системы. Самую первую информацию о вновь открытом объекте (оценки абсолютной звездной величины и размера) обычно получают из фотометрических данных еще в момент его открытия. Затем проводят специальные фотометрические наблюдения с тем, чтобы получить подробную информацию об альбедо и размерах, форме и осевом вращении, оптических и структурных свойствах поверхности, о таксономическом классе, типе минералогии и других свойствах объекта. Цель настоящего обзора — показать текущее состояние знаний в трех основных направлениях фотометрических исследований астероидов: а) в изучении их формы и параметров вращения, б) в изучении оптических свойств их поверхностей и в) в обнаружении и изучении двойных систем среди астероидов.

ФОРМА И ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ

В течение долгого времени до начала радарных наблюдений астероидов и получения прямых изображений фотометрия была единственной возможностью для изучения формы и осевого вращения астероидов, основанной на наблюдениях их кривых блеска, т. е. вариаций блеска астероидов, связанных с их осевым вращением. Эти вариации обусловлены в первую очередь изменением поперечного сечения наблюдаемого тела и распределением альбедо по его поверхности. Параметрами кривой блеска являются ее амплитуда, измеряемая как разность звездных величин в первичном минимуме и первичном максимуме, и эпохи экстремумов. Амплитуда является характеристикой вытянутости тела: для астероидов, форма которых аппроксимирована трехосным эллипсоидом с полуосями $a > b > c$, она дает возможность определить отношение $a : b$. С другой стороны, эпохи экстремумов кривой блеска позволяют определить период и направление вращения с помощью методов составной кривой блеска или фурье-анализа [2].

На рис. 1 и 2 показаны вариации блеска крупнейшего астероида М-типа 16 Психея в течение двух оппозиций [14]. Как видно из рис. 1, в 1978 г. амплитуда кривой блеска астероида была практически нулевой, в то время как в 1979 г. она составляла 0.32^m . Это означает, что в 1978 г. астероид наблюдался со стороны полюса, т. е., в направлении его оси вращения, и координаты полюса астероида были близкими к координатам самого астероида. Поскольку различие эклиптических долгот Психеи в эти две оппозиции составляло почти точно 90° (см. рис. 1), то в 1979 г. астероид наблюдался со стороны экватора (угол аспекта — т. е. угол между осью вращения тела и лучом зрения равен примерно 90°), амплитуда кривой блеска его была максимальной и соответствующей $a : b = 1.34$. Кроме того, в 1978 г. при видимости со стороны полюса астероид был ярче примерно на 0.4^m (на рис. 2 блеск астероида приведен к единичным расстояниям от Земли и Солнца). Это означает, что в 1978 г. наблюдалось большее поперечное сечение астероида, чем в 1979 г. С одной стороны, различие звездных величин при этих двух аспектах (со стороны полюса и со стороны экватора) дает соотношение полуосей $b : c$, а с другой — максимальный блеск астероида со стороны полюса указывает на то, что астероид вращается вокруг наименьшей оси c , сохраняя максимальным момент инерции и минимальной энергию вращения [14]. Сейчас мы знаем, что так вращаются подавляющее большинство астероидов (principal axis rotation), однако 25 лет назад это было не столь очевидным, и одно из первых подтверждений такого враще-

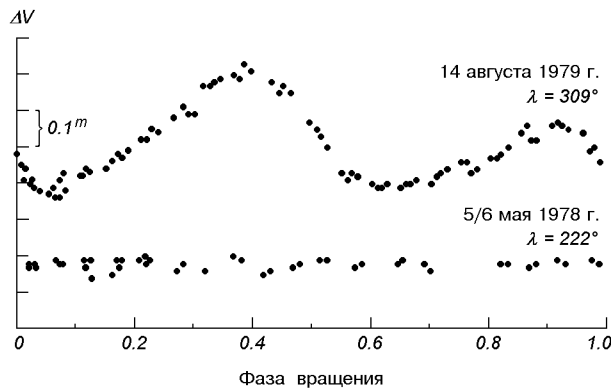


Рис. 1. Кривые блеска астероида М-типа 16 Психея в двух оппозициях [14]

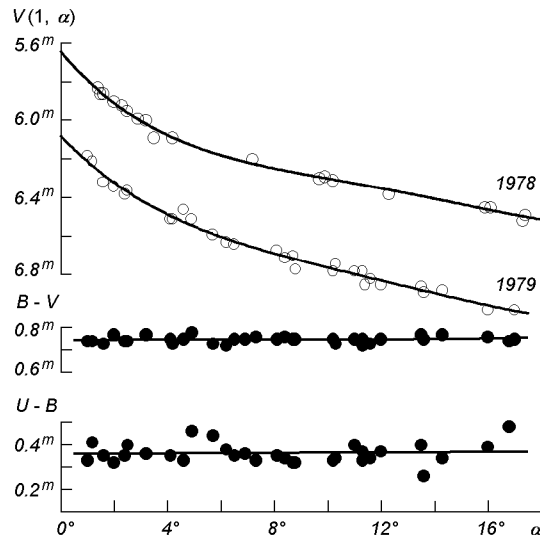


Рис. 2. Фазовые зависимости блеска и цвета Психеи в те же оппозиции [14]

ния было получено из фотометрических наблюдений.

На рис. 3 показаны наблюдаемые вариации блеска астероида группы Аполлона 4179 Тютатис ($D \approx 3$ км), полученные харьковской группой в рамках международной программы наблюдений астероида в оппозицию 1992—1993 гг. Период вариаций блеска является очень большим и составляет 176.4 ч при амплитуде 1.15^m . Совместный анализ радарных и фотометрических данных показал, что астероид имеет очень сложное вращение, причем не вокруг самой короткой оси (non-principal axis rotation). Сейчас известно 12 других астероидов, сближающихся с Землей, с таким нерегулярным вращением, их обычно называют «tumbling asteroids», т. е. кувыркающиеся или беспорядочно вращающиеся астероиды [15, 24]. Таким образом, в отличие от Психеи Тютатис представляет собой совершенно другой пример астероидного вращения: сейчас уже хорошо известно, что он вращается вокруг самой длинной оси a с периодом 129.8 ч, которая прецессирует с периодом 176.4 ч [10, 33].

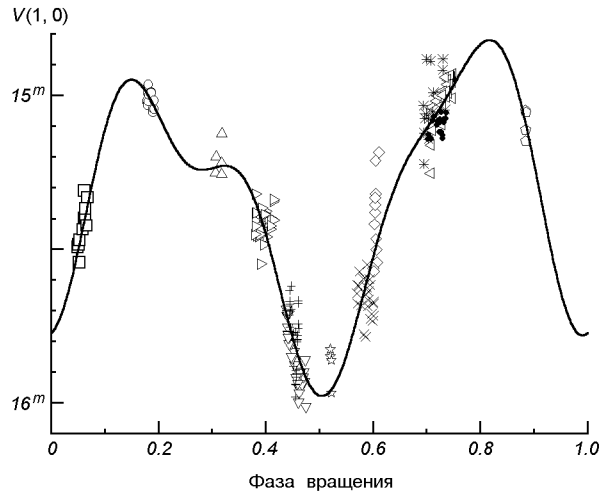


Рис. 3. Составная кривая вариаций блеска аполлона 4179 Туутатис с периодом 176.4 ч [33]

Набор кривых блеска конкретного астероида, полученных при разных эклиптических долготах, т. е. при разных значениях угла аспекта, содержит очень ценную информацию о векторе вращения астероида (о скорости, направлении вращения и ориентации оси вращения в пространстве), о его форме, распределении альbedo по поверхности и даже об оптических свойствах самой поверхности. Есть несколько методов определения всех перечисленных параметров, определяющих физическую модель астероида, среди них:

- метод фотометрической астрометрии (Е-метод или метод эпох), основанный на измерении моментов (эпох) экстремумов кривых блеска астероида при разных относительных положениях его, Земли и Солнца; этим методом можно определить эклиптические координаты полюса астероида λ_0 и β_0 , сидерический период вращения P_{sid} и направление вращения;
- метод «амплитуда — звездная величина» (АМ-метод), в котором анализируется зависимость амплитуды кривой блеска и звездной величины астероида в максимуме кривой блеска от угла аспекта. Метод позволяет определять λ_0 , β_0 , а также соотношения полуосей $a : b$ и $b : c$ эллипсоида, аппроксимирующего фигуру астероида;
- комбинированный метод (ЕАМ-метод), который дает возможность более точно определить все шесть перечисленных выше параметров;
- метод оптимальной инверсии кривых блеска [11, 12], который позволяет также восстанавливать форму астероида и распределение альbedo по его поверхности.

К настоящему времени в результате применения перечисленных методов количество астероидов с известными периодами вращения приближается к 2000; количество астероидов с определенными координатами полюсов, направлением вращения и соотношениями полуосей превышает 200, а с восстановленной в той или иной мере формой — около 80. Вклад харьковской астероидной группы в эти данные составляет около 10 % в определение периодов вращения и около 20 % — в определение координат полюсов, направления вращения и соотношения полуосей астероидов. Все эти данные, полученные фотометрическим методом, представляются очень ценными как для изучения индивидуальных астероидов, так и для статистических

Таблица 1. Средние значения амплитуд кривых блеска и соответствующие им соотношения полуосей астероидов

Популяция	$A_{\text{набл.}}$	$A_{\text{испр.}}$	$a : b$	N
АСЗ	0.53 ± 0.03^m	0.27^m	1.3	292
АГП, $D < 10$ км	0.32 ± 0.02^m	0.26^m	1.3	205
АГП, $D > 130$ км	0.22 ± 0.01^m	0.19^m	1.2	100

обобщений. В качестве примера ниже приведены результаты некоторых из них.

Табл. 1 содержит средние значения измеренных и приведенных к нулевому фазовому углу амплитуд кривых блеска астероидов разных популяций, которые характеризуют среднюю вытянутость их формы. Важно отметить, что приведенные к нулевому фазовому углу (т. е. к одинаковой геометрии освещения и наблюдения астероидов) амплитуды астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) и малых ($D < 10$ км) астероидов главного пояса (АГП) оказались одинаковыми. Это значит, что в среднем АСЗ имеют такую же вытянутость формы, как и астероиды главного пояса примерно таких же размеров, однако заметно большую по сравнению с крупнейшими АГП [15].

На рис. 4 представлена диаграмма зависимости периодов вращения АСЗ, полученных из фотометрических данных, от их абсолютных звездных величин, построенная Ю. Круглым [1] и обновленная по последним данным. Она указывает на наличие некоторого предела вращения или «барьера» для вращения со скоростью выше чем 11 об./сут, соответствующей периоду $P = 2.2$ ч. Более четко этот барьер был показан в [9] на диаграмме для 1686 астероидов (АГП плюс АСЗ) как «rubble pile spin barrier». Он показывает, что при такой скорости вращения центробежная сила на экваторе тела становится равной силе гравитационного притяжения для почти сферического тела типа «rubble piles» (груда камней) с ожидаемой для астероидов плотностью 2—3 г/см³. Наличие этого барьера предпо-

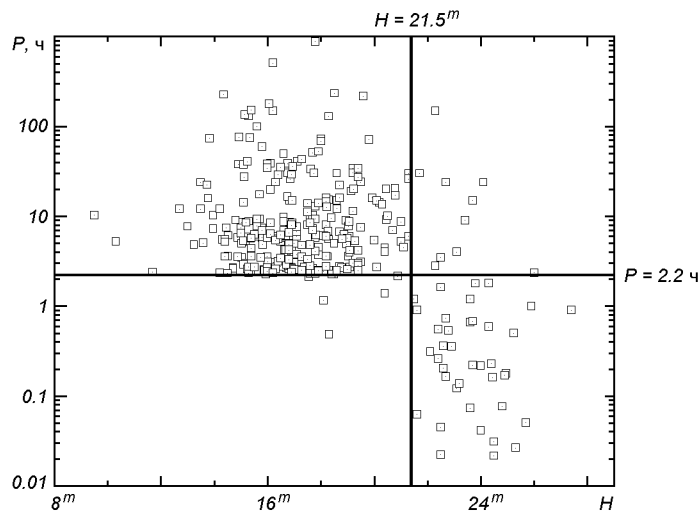


Рис. 4. Диаграмма зависимости периодов P вращения 338 АСЗ от их абсолютных звездных величин H [1]

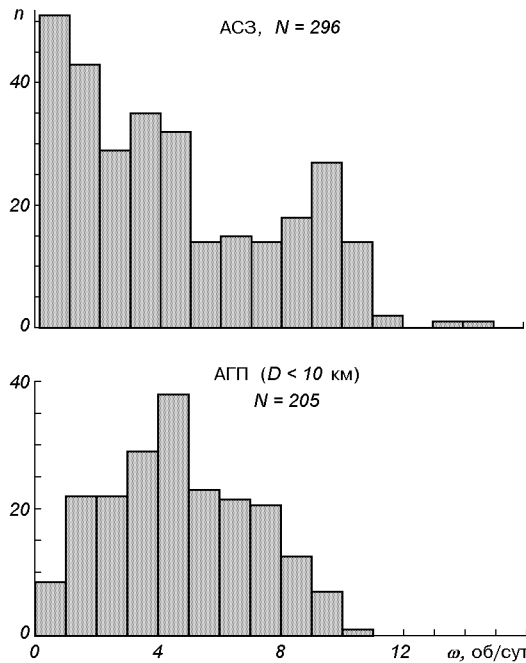


Рис. 5. Распределение АСЗ и малых ($D \leq 10$ км) АГП по скоростям вращения

лагают, что даже такие малые астероиды могут иметь структуру груды камней без существенных сил сцепления. Эта диаграмма (рис. 4) указывает на наличие еще одного критического предела, соответствующего абсолютной звездной величине $H = 21.5^m$, которая при среднем альбедо АСЗ, полученном при учете эффектов наблюдательной селекции $p_v = 0.14 \pm 0.02$ [34], соответствует диаметру тела $D = 180$ м. Тела меньше этого размера выдерживают очень быстрое вращение, т. е. они являются монолитными телами с большими силами внутреннего сцепления. Таким образом, можно утверждать, что область на диаграмме «период вращения — диаметр», где могут существовать слабо консолидированные тела со структурой типа «gubble piles», заключена в пределах $P \geq 2.2$ ч и $D \geq 180$ м.

Рис. 5 показывает гистограммы распределения по скоростям вращения АСЗ и малых ($D < 10$ км) АГП для одинаковых интервалов скоростей. Как можно видеть, эти два распределения совершенно разные. Этот наблюдательный факт объяснить довольно сложно, поскольку есть несколько причин обнаруженного различия, среди них: а) влияние параметров вращения двойных систем среди АСЗ; б) различия распределений по размерам в пределах этих двух популяций астероидов; в) возможное влияние радиационного давления и эффекта Ярковского; г) эффекты наблюдательной селекции и др.

Анализ пространственного распределения полюсов астероидов [4] показал, что анизотропия распределения широты полюсов имеет место только для объектов с прямым вращением (для астероидов с обратным вращением распределение почти изотропное). Степень анизотропии увеличивается с увеличением размера астероидов. Отношение числа астероидов с прямым и обратным вращением увеличивается с диаметром от 1:1 для малых астероидов ($D < 50$ км) до примерно 1.5:1 для промежуточных размеров ($50 < D < 125$ км) и примерно до 2:1 среди больших ($D > 125$ км). Таким образом, среди малых астероидов направление вращения является равновероятным, а для крупных преобладает прямое. В целом преобладание числа астероидов с прямым вращением над обратным составляет 3:2. Все эти

выводы имеют космогонический характер и свидетельствуют в пользу интенсивной столкновительной эволюции в поясе астероидов [4].

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ АСТЕРОИДОВ

К оптическим свойствам, которые можно измерять или определять фотометрическим методом, относятся прежде всего альbedo объекта, показатели цвета, абсолютная звездная величина, а также фазовые зависимости блеска и цвета. Если измерять блеск астероида при разных значениях фазового угла (примерно в течение 3-4 месяцев для астероидов главного пояса и 3-4 недель для приближающихся к Земле), то получим так называемую фазовую зависимость блеска (см. для примера рис. 2). Для астероидов главного пояса, у которых фазовый угол обычно не превышает $\alpha \leq 25...30^\circ$, эта зависимость состоит из линейной части при $\alpha > 5...7^\circ$, описываемой фазовым коэффициентом β , который характеризует изменение блеска астероида с изменением фазового угла на 1° , и области оппозиционного эффекта (ОЭ), т. е. нелинейного увеличения блеска с уменьшением фазового угла вблизи оппозиции. Оппозиционный эффект обычно начинается при фазовых углах $5...7^\circ$, а его величина (амплитуда) варьирует в пределах $0.1...0.5^m$. Величина обоих параметров зависит от типа астероида (таксономического класса).

Совершенно очевидно, что и линейная часть, и область ОЭ формируются рассеивательными свойствами частиц поверхности или их агрегатов. Это значит, что и фазовый коэффициент, и амплитуда ОЭ зависят от альbedo отражающей поверхности (коэффициента преломления вещества) и от структуры отражающего слоя (степени шероховатости и пористости). Получить информацию о свойствах частиц поверхностного слоя можно при наличии подходящей модели рассеивающего слоя. К сожалению, в настоящий момент подобная модель находится в стадии развития, и извлечь надежную информацию о структуре поверхности пока затруднительно.

Изучение фазовых зависимостей блеска и оппозиционного эффекта — одна из основных программ фотометрических исследований астероидов в НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина [7, 30, 31].

На рис. 6 приведена зависимость фазового коэффициента от геометрического альbedo астероидов, полученная в работе [6]. Если альbedo представить в логарифмической шкале, то эта зависимость принимает линейный вид:

$$\beta = -0.0261 \lg p_v + 0.011.$$

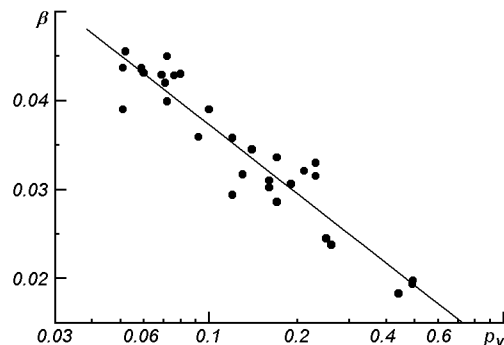


Рис. 6. Зависимость фазового коэффициента β астероидов от их геометрического альbedo p_v [6]

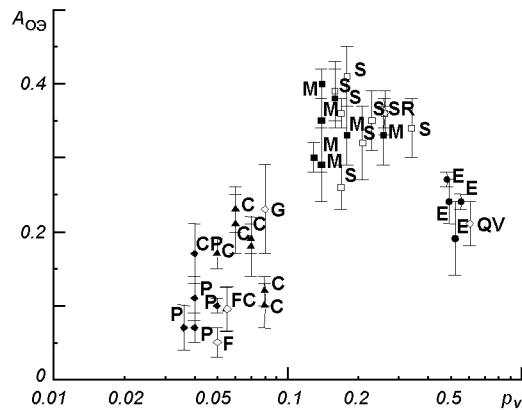


Рис. 7. Зависимость амплитуды A_{oe} оппозиционного эффекта астероидов от их геометрического альbedo p_v [6]. Латинскими буквами указаны типы астероидов (см. текст)

Обратная зависимость фазового коэффициента (т. е. наклона фазовой зависимости) от альbedo обусловлена тем, что с уменьшением последнего увеличивается поглотительная способность частиц поверхности, а также увеличивается роль взаимных затенений между частицами поверхности, вследствие чего наблюдается более быстрое уменьшение блеска астероида с увеличением фазового угла. Эта зависимость представляется очень важной, поскольку дает возможность оценивать альbedo астероида (а значит, и его тип, т. е. общую минералогию) по одним только фотометрическим измерениям.

Анализируя все имеющиеся данные по ОЭ астероидов, полученные в основном харьковской астероидной группой, И. Н. Бельская и В. Г. Шевченко [6] показали, что в отличие от фазового коэффициента амплитуда ОЭ имеет более сложную зависимость от альbedo (рис. 7). Максимальную амплитуду ($0.27—0.42^m$) имеют среднеальбедные астероиды S- и M-типов, минимальную — низкоальбедные C-, G-, P- и F-астероиды. Кроме того, низкоальбедные астероиды демонстрируют большое разнообразие величины (от 0.05 до 0.23^m) и формы ОЭ. В целом амплитуда оппозиционного эффекта зависит от альbedo неоднозначно и имеет максимум при альbedo $p_v = 0.20$. Таким образом, астероиды разных таксономических классов имеют разную величину и форму ОЭ, и это является важным результатом для понимания механизмов формирования ОЭ и изучения различий структуры и состава астероидных поверхностей. В настоящее время известны два механизма формирования ОЭ — это обратное когерентное рассеяние света и теневой эффект. Их относительный вклад разный для разных типов объектов. Для низкоальбедных астероидов преобладающим является теневой эффект, а для высокоальбедных (E-тип) — обратное когерентное рассеяние. В то же время для среднеальбедных объектов оба механизма являются существенными и возможно по этой причине они показывают наибольшую амплитуду ОЭ.

Таким образом, изучение фазовой зависимости блеска и оппозиционного эффекта необходимо, прежде всего, для понимания процессов рассеивания света реголитами безатмосферных космических тел. Кроме того, знание фазовой зависимости и величины ОЭ необходимо для вычисления абсолютных звездных величин этих объектов, которые, с одной стороны, являются основой для определения их альbedo и диаметров, а с другой — основой для эфемеридных вычислений видимого блеска.

В табл. 2 приведены средние значения альbedo, показателей цвета и фазовых коэффициентов астероидов основных типов согласно [5, 32]. Эти данные необходимы прежде всего для таксономической классификации

Таблица 2. Средние значения альbedo p_V , показателей цвета и фазовых коэффициентов астероидов основных типов

Тип астероида	p_V	$U-B$	$B-V$	$V-I$	β
C	0.06 ± 0.02	0.32 ± 0.08	0.69 ± 0.03	0.73 ± 0.07	0.043 ± 0.001
M	0.17 ± 0.04	0.25 ± 0.06	0.72 ± 0.09	0.82 ± 0.06	0.032 ± 0.001
S	0.20 ± 0.07	0.45 ± 0.05	0.86 ± 0.04	0.90 ± 0.08	0.030 ± 0.001
E	0.48 ± 0.05	0.25 ± 0.03	0.72 ± 0.04	0.80 ± 0.05	0.024 ± 0.002

астероидов и понимания их общей минералогии. Фазовые зависимости показателей цвета являются весьма информативными при диагностике механизмов рассеивания света в реголитовом слое, но изучены они еще недостаточно хорошо, особенно в области оппозиционного эффекта. Согласно [3, 29] и другим данным показатели цвета астероидов изменяются с фазовым углом очень слабо и почти линейно. Как правило, для астероидов характерно слабое увеличение показателя цвета $B - V$ с фазовым углом (покраснение), однако для показателя цвета $U - B$ ситуация более сложная, поскольку у некоторых астероидов наблюдается даже уменьшение этого показателя с фазовым углом. Имеющихся данных пока недостаточно для того, чтобы прояснить этот вопрос.

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ СРЕДИ АСТЕРОИДОВ

После многих лет дискуссий и предположений сегодня достоверно известно, что двойные астероиды и спутники у астероидов существуют. Вслед за открытием первого спутника Дактиля у астероида главного пояса 243 Ида, сделанного путем прямых изображений с космического аппарата «Галилео» в 1993 г., последующие открытия двойных астероидов начались уже в 1994 г., причем они были сделаны именно фотометрическим методом

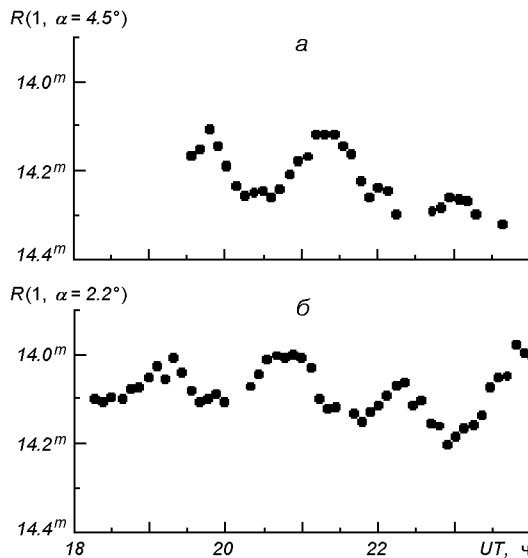


Рис. 8. Индивидуальные кривые блеска астероида 11264 Клаудиомакконе [13]: а — 5/6 ноября 2004 г., б — 11/12 ноября 2004 г.

[21—23, 25, 27]. В настоящее время обнаружение двойных астероидов выполняется методами адаптивной оптики на крупных телескопах, радарным методом, получением прямых изображений с помощью космического телескопа Хаббла и фотометрическим методом, т. е. в результате анализа кривых блеска астероидов, полученных из наземных наблюдений даже с помощью небольших телескопов.

Суть фотометрического метода обнаружения двойственности астероида покажем на примере малого астероида главного пояса 11264 Клаудиомакконе [13]. Наблюдения его были проведены в течение девяти ночей в НИИ астрономии (Харьков) и в КрАО (Симеиз). Полученные индивидуальные кривые блеска (рис. 8) указывали на возможную 3-часовую периодичность блеска, однако они имели нерегулярную форму с дополнительными минимумами, депрессиями и другими аномальными ослаблениями блеска. Было предположено, что эти особенности кривых блеска могут быть результатом суперпозиции двух периодических вариаций блеска астероида, т. е. двойственной его двойственности. Для проверки этой идеи использовалась простая модель двойной системы: два сферических тела (первичное, более крупное, и вторичное) с одинаковой отражательной способностью поверхностей вращаются вокруг общего центра масс, и наблюдаемая сложная кривая блеска является суперпозицией двух компонентов: вариаций блеска первич-

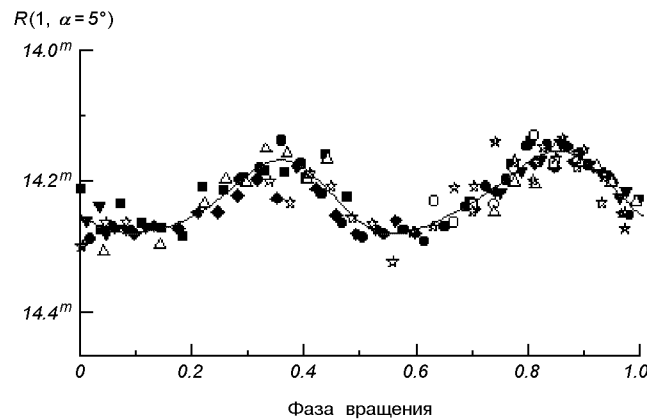


Рис. 9. Короткопериодическая ($P = 3.1872$ ч) кривая блеска 11264 Клаудиомакконе, полученная по всем наблюдениям [13]

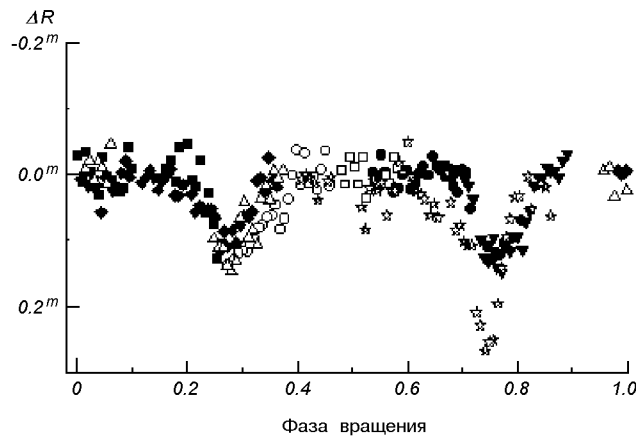


Рис. 10. Длиннопериодическая ($P = 15.11$ ч) кривая вариаций блеска 11264 Клаудиомакконе после вычета короткопериодической составляющей [13]

ного тела и вариаций, связанных с орбитальными явлениями в системе. Используя части кривых блеска без нерегулярных депрессий и ослаблений блеска, удалось получить по данным всех ночей наблюдений короткопериодическую кривую блеска (рис. 9). После вычитания из наблюдений этих 3-часовых колебаний остаточные вариации хорошо согласовались с периодом $P_2 = 15.11$ ч и дали долгопериодическую кривую вариаций блеска (рис. 10), которая выглядит подобно кривой затменно-двойной звезды и действительно указывает на двойственность этого астероида. Анализ обеих кривых позволяет оценить основные параметры системы: период вращения первичного тела $P_1 = 3.1872 \pm 0.0006$ ч, орбитальный период вторичного тела $P_{\text{орб}} = 15.11 \pm 0.01$ ч, отношение диаметров тел $d_1/d_2 \geq 0.31$, отношение радиуса орбиты к диаметру первичного тела $r_{\text{орб}}/d_1 = 1.5 \pm 0.2$, объемная плотность первичного тела $\rho_p \geq 1.2$ г/см³. Кроме того, на основе измеренного показателя цвета $V - R$ определен тип астероида и по его среднему альбедо определены эффективный диаметр астероида (4.2 км) и диаметры компонентов (4.0 и 1.24 км) [13].

Наибольший вклад фотометрический метод внес в обнаружение и изучение двойных систем среди астероидов, сближающихся с Землей, и прежде всего благодаря программе «Photometric Survey for Asynchronous Binary Asteroids» Онджеевской обсерватории в Чехии, координируемой П. Правец [26]. К настоящему времени уже обнаружено 28 двойных систем среди АСЗ. Сотрудники НИИ астрономии (Харьков) активно участвуют в этой программе, и на их счету уже десять двойных АСЗ. Несколько двойных АСЗ было обнаружено радарным методом, а последующие фотометрические наблюдения подтвердили их двойственность.

Табл. 3 из сайта R. Johnston (<http://www.johnstonsarchive.net>) содержит параметры двойных АСЗ по состоянию на 16 ноября 2006 г. Обращает на себя внимание тот факт, что периоды вращения первичных тел заключены в очень небольшом интервале (2.3...4.4 ч), т. е. они примерно одинаковы для всех АСЗ. Точно так же близки между собой и орбитальные периоды вторичных тел, а также отношения полуосей орбиты к диаметру первичного тела (в среднем равны 2). Что же это может означать? Системы с такими параметрами динамически наиболее стабильны или это свидетельство в пользу одного и того же механизма происхождения этих систем? Ответов на эти вопросы пока нет, хотя отчасти это может быть эффектом наблюдательной селекции.

Астероиды главного пояса показывают существенно большее разнообразие в параметрах двойных систем. Так, например, размер Дактиля составляет всего 1.4 км, в то время как размеры первичного тела (243 Ида) — $60 \times 25 \times 19$ км. Совсем другой пример представляет двойная система 90 Антиопа, открытая в 2000 г. [17] — два одинаковых по размерам компонента диаметром $D = 85$ км, которые удалены друг от друга на расстояние $2D = 170$ км и обращаются вокруг общего центра масс с периодом $P_{\text{орб}} = 16.5$ ч. Фотометрические наблюдения этой системы в течение нескольких видимость в рамках сотрудничества между Познаньской обсерваторией (Польша) и НИИ астрономии в Харькове [18—20] позволили существенно уточнить параметры и определить координаты полюса этой двойной системы ($\lambda_0 = 17 \pm 5^\circ$ и $\beta_0 = 25 \pm 5^\circ$).

Наличие нескольких частот в кривых блеска астероидов обнаруживали неоднократно В. В. Прокофьева с коллегами в Крымской астрофизической обсерватории. Среди астероидов, для которых они находили несколько периодов колебаний блеска, был, в частности, астероид 87 Сильвия. Для него была предложена двойственная природа [28], что было подтверждено

Таблица 3. Динамические и геометрические характеристики двойных АСЗ

Астероид	P_1 , ч	$P_{\text{орб}}$, ч	d_1 , км	d_2 , км	Полуось орбиты, км
1862 Apollo	3.065	—	1.2	0.08	> 1.6
3671 Dionysus	2.705	27.72	1.5	> 0.04	2.2
5381 Sekhmet	2.7	12.5	1.0	0.3	1.5
5407 1992 AX	2.549	13.520	3.9	0.8	6.6
7088 Ishtar	—	20.6	1.5?	0.6	3?
31345 1998 PG	2.5162	14.01	0.9	0.3	1.5?
35107 1991 VH	2.624	32.69	1.2	0.5	3.2
65803 Didymos	2.26	11.9	0.8	0.15	1.2?
66063 1998 RO ₁	2.4925	14.55	0.9	> 0.36	0.8?
66391 1999 KW ₄	2.765	18.19	2.6	> 0.36	2.6
69230 Hermes*	13.892	13.89	0.4	0.4	1?
85938 1999 DJ ₄	2.514	17.72	0.6?	0.3?	1.5?
88710 2001 SL ₉	2.400	16.40	1.0	0.31	1.8
1990 OS	—	21	0.3	0.045	> 0.6
1994 AW ₁	2.519	22.40	0.9	0.5	2.1
1996 FG ₃	3.5942	16.14	1.4	0.43	2.4
1998 ST ₂₇	< 3.1	~100	0.8	0.12	4.5?
1999 HF ₁	2.3191	14.02	3.5	0.8	7.0
2000 DP ₁₀₇	2.7755	42.23	0.8	0.3	2.6
2000 UG ₁₁	4.44	18.4	0.23	0.1	0.34
2002 BM ₂₆	2.7	< 72	0.6	0.1	< 1.5
2002 CE ₂₆	3.2931	18	3	0.2	5
2002 KK ₈	—	—	0.5	0.1	—
2003 SS ₈₄	—	24	0.12	0.06	< 0.3?
2003 YT ₁	2.343	30	1.0	0.18	2.7
2004 DC	—	—	0.3	—	—
2005 AB	3.3376	17.92	1.0	0.24	1.9
2006 GY ₂	—	—	0.45	—	—

* — синхронная система

позже с помощью адаптивной оптики [8]. Однако недавно было обнаружено, что Сильвия на самом деле является первой тройной системой среди астероидов [16].

Итак, главная фотометрическая особенность двойного объекта — это его двухпериодическая кривая блеска. Есть некоторое ограничение на отождествление кривой блеска как двухпериодической функции, а именно: точность фотометрии накладывает предел на максимальное отношение диаметров компонентов системы, которое может быть выявлено из кривых блеска. Оценки показывают, что при точности фотометрии не хуже 0.01^m можно отождествить двойственность с отношением диаметров $d_1 : d_2 \leq 5$. Таким образом, поиск двойных систем фотометрическим методом требует как высокой точности измерений, так и продолжительных наблюдений, что возможно в рамках осуществления кооперативных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение физических свойств астероидов, как и других малых тел Солнечной системы (объектов пояса Койпера, комет), фотометрическим методом дало очень большой объем информации об их форме, размерах, вращении, об оптических свойствах, таксономической классификации и т.п. Анализ этих данных привел к пониманию закономерностей распределения астероидов по размерам, внутренней структуры астероидов (существование структур типа «rubble piles»), к пониманию процессов столкновительных взаимодействий в поясе и их роли в формировании наблюдаемой формы и вращения астероидов. Все это очень важно с точки зрения происхождения астероидов и их эволюции.

В последнее десятилетие фотометрия показала себя также как эффективный инструмент для обнаружения и изучения кратных систем среди астероидов главного пояса, сближающихся с Землей и объектов пояса Койпера. Количество двойных систем, обнаруженных среди малых тел Солнечной системы, постоянно увеличивается, и уже превысило сотню. Примерно половина из них обнаружена фотометрическим методом. Их изучение представляется очень важным по двум причинам: а) понимание механизмов их происхождения дает информацию о процессах столкновений, образования и эволюции малых тел и б) их изучение дает возможность определять массы и плотности тел (без необходимости космических миссий к ним), что очень важно для понимания их внутренней структуры и пористости.

В качестве «новых горизонтов» в применении фотометрии к астероидам и другим малым телам представляется важным применение наиболее эффективных ПЗС-приемников, более крупных наземных, а также космических телескопов, расширение спектрального диапазона исследований в ИК-область и кооперация усилий.

1. *Круглый Ю. Н.* Фотометрия астероидов, сближающихся с Землей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 2003.—222 с.—(Машинопись).
2. *Лушичко Д. Ф.* Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных: Дис. докт. физ.-мат. наук. — Харьков, 1998.—259 с.—(Машинопись).
3. *Лушичко Д. Ф., Тушева Ф. А. Величко Ф. П. и др.* UVV-фотометрия астероидов 19 Фортуна и 29 Амфитрита // *Астрон. вестник.*—1981.—15, № 1.—С. 25—31.
4. *Тунгалаг Н., Шевченко В. Г., Лушичко Д. Ф.* Параметры вращения и форма 19 астероидов, качественный анализ и интерпретация данных // *Кинематика и физика небес. тел.*—2003.—19, № 5.—С. 397—406.
5. *Шевченко В. Г., Лушичко Д. Ф.* Оптические свойства астероидов по данным фотометрии // *Астрон. вестник.*—1998.—32, № 3.—С. 250—263.
6. *Belskaya I. N., Shevchenko V. G.* Opposition effect of asteroids // *Icarus.*—2000.—147, N 1.—P. 94—105.
7. *Belskaya I. N., Shevchenko V. G., Kiselev N. N., et al.* Opposition polarimetry and photometry of S- and E-type asteroids // *Icarus.*—2003.—166, N 1.—P. 276—284.
8. *Brown M. E., Margot J. L., Keck W. M.* S/2001 (87) 1 // *IAU Circ.*—2001.—N 7588.
9. *Harris A. W., Pravec P.* Rotational properties of asteroids, comets and TNOs // *Asteroids, Comets, Meteors / Eds D. Lazzaro, S. F. Mello, J. A. Fernandez.* — Cambridge: Univ. Press, 2006.—P. 439—447.
10. *Hudson R. S., Ostro S. J.* Shape and non-principal axis spin state of asteroid 4179 Toutatis // *Science.*—1995.—270, N 5233.—P. 84—86.
11. *Kaasalainen M., Torppa J.* Optimization methods for asteroid lightcurve inversion. I. Shape determination // *Icarus.*—2001.—153, N 1.—P. 24—36.
12. *Kaasalainen M., Torppa J., Muinonen K.* Optimization methods for asteroid lightcurve inversion. II. The complete inverse problem // *Icarus.*—2001.—153, N 1.—P. 37—51.
13. *Krugly Yu. N., Maccone C., Gafonyuk N. M., et al.* 11264 Claudiomaccone: Binary small main-belt asteroid // *Planet. and Space Sci.*—2006.—55, N 4.—P. 449—454.
14. *Lupishko D. F., Belskaya I. N.* Surface, shape, and rotation of the M-type asteroid 16 Psyche from UVV-photometry in 1978 and 1979 // *Uppsala.*—1983.—N 25.—P. 55—61.—(Proc. of a Meet. «Asteroids, Comets, Meteors. Exploration and Theoretical Modelling». 20—22 June 1983, Uppsala / Eds C.-I. Lagerkvist, H. Rickman).
15. *Lupishko D. F., Di Martino M., Binzel R. P.* Near-Earth objects as principal impactors of the Earth: Physical properties and sources of origin // *Proc. IAU Symposium N 236 «Near-Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk» held in Prague, 8—14 August 2006 / Eds A. Milani et al.* — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.—XXIV.—500 p.
16. *Marchis F., Descamps P., Hestroffer D., Berthier J.* Discovery of the triple asteroidal system 87 Sylvia // *Nature.*—2005.—436, N 7052.—P. 822—824.
17. *Merline W. J., Close L. M., Dumas C., et al.* Discovery of companions to asteroids 762 Pulcova and 90 Antiope by direct imaging // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2000.—32.—P. 1309.
18. *Michalowski T., Bartczak P., Velichko F. P., et al.* Eclipsing binary asteroid 90 Antiope // *Astron. and Astrophys.*—2004.—423, N 3.—P. 1159—1168.
19. *Michalowski T., Colas F., Kwiatkowskii T., et al.* CCD photometry of the binary asteroid 90 Antiope // *Astron. and Astrophys.*—2001.—378, N 1.—P. L14—L16.
20. *Michalowski T., Colas F., Kwiatkowskii T., et al.* Eclipsing events in the binary system of the

- asteroid 90 Antiope // *Astron. and Astrophys.*—2002.—396.—P. 293—299.
21. *Mottola S., De Angelis G., Di Martino M., et al.* The Near-Earth objects follow-up program: First results // *Icarus.*—1995.—117, N 1.—P. 62—70.
 22. *Mottola S., Hahn G., Pravec P., Sarounova L.* S/1997 (3671) I // *IAU Circ.*—1997.—N 6680.
 23. *Pravec P., Hahn G.* Two-periodic lightcurves of 1994 AW1: Indication of a binary asteroid? // *Icarus.*—1997.—127, N 2.—P. 431—440.
 24. *Pravec P., Harris A. W., Scheirich P., et al.* Tumbling asteroids // *Icarus.*—2005.—173, N 1.—P. 108—131.
 25. *Pravec P., Sarounova L., Wolf M.* 1996 FG3 // *IAU Circ.*—1998.—N 7074.
 26. *Pravec P., Scheirich P., Kusnirak P., et al.* Photometric survey of binary near-Earth asteroids // *Icarus.*—2006.—181, N 1.—P. 63—93.
 27. *Pravec P., Wolf M., Sarounova L.* Occultation/eclipse events in binary asteroid 1991 VH // *Icarus.*—1998.—133, N 1.—P. 79—88.
 28. *Prokof'eva V. V., Demchik M. L., Karachkina L. G.* Photometric evidences for the binary asteroids 87 Sylvia and 423 Diotima // *Astron. and Astrophys. Transaction.*—1995.—8.—P. 291—295.
 29. *Rosenbush V. K., Kiselev N. N., Shevchenko V. G., et al.* Polarization and brightness opposition effects for the E-type asteroid 64 Angelina // *Icarus.*—2005.—178, N 1.—P. 222—234.
 30. *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. and Space Sci.*—1997.—45, N 3.—P. 1615—1623.
 31. *Shevchenko V. G., Belskaya I. N., Krugly Yu. N., et al.* Asteroid observations at low phase angles. II. 5 Astraea, 75 Eurynome, 77 Frigga, 105 Artemis, 119 Althaea, 124 Alkeste and 201 Penelope // *Icarus.*—2002.—155, N 2.—P. 365—374.
 32. *Shevchenko V. G., Krugly Yu. N., Chiorny V. G., et al.* Rotation properties of E-type asteroids // *Planet. and Space Sci.*—2003.—51, N 2.—P. 525—532.
 33. *Spencer J. R., Akimov L. A., Angeli C., et al.* The lightcurve of 4179 Toutatis: evidence for complex rotation // *Icarus.*—1995.—117, N 1.—P. 71—89.
 34. *Stuart J. S., Binzel R. P.* Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects // *Icarus.*—2004.—170, N 2.—P. 295—311.

Поступила в редакцию 01.12.06