

УДК 523.44

О смещении видимого центра астероида, обусловленном законом рассеяния света его поверхностью

Н. Тунгалаг¹, В. Г. Шевченко², Д. Ф. Лупишко²

¹НИИ геофизики и астрономии АН Монголии

²Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета
61022, Харьков, ул. Сумская 35

Проведено численное моделирование распределения яркости по видимой поверхности астероида с целью определения положения фотоцентра для разных законов рассеяния света (Ламберта, Ломмеля — Зеелигера, Хапке, теоретического и эмпирического законов Акимова). Использовалась численная фотометрическая модель, которая предусматривает произвольную форму астероида, произвольное распределение альбедо по поверхности и произвольный закон рассеяния света. Показано, что смещение видимого центра астероида относительно геометрического существенно зависит от величины фазового угла астероида, его формы и закона рассеяния света поверхностью. Величина смещения может составлять 30—40 % углового радиуса астероида. Для астероидов с размерами больше 0.1" такие смещения превышают погрешность космических астрометрических измерений и сравнимы с погрешностью наземных наблюдений. Их учет может заметно повысить точность определяемых положений астероидов. Даны практические рекомендации по определению и учету смещения фотоцентра астероида.

ПРО ЗМІЩЕННЯ ВИДИМОГО ЦЕНТРА АСТЕРОЇДА, ОБУМОВЛЕНЕ ЗАКОНОМ РОЗСІЯННЯ СВІТЛА ЙОГО ПОВЕРХНЕЮ, Тунгалаг Н., Шевченко В. Г., Лупишко Д. Ф. — Проведено чисельне моделювання розподілу яскравості по видимій поверхні астероїда з метою визначення положення фотоцентра для різних законів розсіяння світла (Ламберта, Ломмеля — Зеєлігера, Хапке, теоретичного та емпіричного законів Акімова). Використовувалась чисельна фотометрична модель, що передбачає довільну форму астероїда, довільний розподіл альбедо по поверхні та довільний закон розсіяння світла. Показано, що зміщення видимого центра відносно геометричного суттєво залежить від фазового кута астероїда, його форми та закону розсіяння світла. Величина зміщення може складати 30—40 % кутового радіуса астероїда. Для астероїдів з розмірами понад 0.1" такі зміщення перевищують похибку космічних астрометричних вимірювань і близькі до похибок наземних спостережень. Їх урахування може суттєво підвищити точність положень астероїдів. Даються практичні рекомендації щодо визначення і урахування зміщення фотоцентра астероїда.

ON THE DISPLACEMENT OF ASTEROID PHOTOCENTRE DUE TO SURFACE SCATTERING, by Tungalag N., Shevchenko V. G., Lupishko D. F.

— *The numerical modelling of asteroid brightness distribution for different scattering laws (Lambert, Lommel-Seeliger, Hapke, theoretical and empirical Akimov laws) was carried out for the purpose of determination of asteroid photocentre position. A numerical photometric model of an asteroid which considers the arbitrary i) asteroid shape, ii) albedo distribution on the surface, and iii) scattering law was used. It is shown that the photocentre displacement depends essentially on the asteroid shape, phase angle, and light scattering. The displacement may reach a value of $(0.3-0.4)R$, where R is asteroid's angular radius. Such displacements exceed the accuracy of space-based astrometric measurements, and they are comparable with the accuracy of ground-based observations. Therefore, the accuracy of asteroid position determinations can be noticeably improved when they are taken into account. Some practical recommendations on the determination of asteroid photocentre displacements are given.*

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При астрометрических наблюдениях астероидов на точность получаемых положений, как известно, влияет смещение видимого (фотометрического) центра объекта относительно геометрического. Это смещение в общем случае обусловлено тремя причинами:

- 1) неправильностью формы астероида и произвольным распределением альbedo по его поверхности;
- 2) наличием неосвещенной части диска астероида, повернутой к наблюдателю при фазовых углах $\alpha \neq 0^\circ$;
- 3) распределением яркости по видимому диску астероида, определяемым законом рассеяния света его поверхностью.

Учитывая возможную фотометрическую неоднородность поверхностей астероидов [2] и их реальную форму (см., например, изображения астероидов 243 Ида, 253 Матильда, 433 Эрос и 951 Гаспра, полученные КА Галилео и NEAR), можно ожидать, что смещение фотометрического центра за счет этих факторов для некоторых астероидов может существенно ухудшить точность измеряемых положений. Однако ни реальная форма астероида, ни распределение альbedo по его поверхности с достаточной степенью точности не известны, поэтому учесть эту составляющую смещения пока не представляется возможным.

Вторая причина смещений связана с фазовым углом и вытянутостью формы астероида (амплитудой кривой блеска). Учет этого смещения не представляет особой сложности. Его значение для астероидов главного пояса ($\alpha \leq 25^\circ$) не превышает $(0.15 \div 0.20)R$ (здесь R — угловой радиус астероида), а для сближающихся с Землей астероидов групп Амура, Аполлона, Атона оно может достигать $0.5R$ при $\alpha \approx 90^\circ$.

Повышение точности наземных астрометрических наблюдений астероидов в последнее время, прежде всего благодаря применению ПЗС-приемников, а также использование высокоточных измерений с борта КА HIPPARCOS, делают необходимым учет третьей составляющей, т. е. смещения фотоцентра астероида, обусловленного неравномерным распределением яркости по диску или, иными словами, рассеивающими свойствами его поверхности. Попытки учета этого смещения уже предпринимались [5, 8, 9], и было показано, что оно может превышать точность современных астрометрических измерений. Однако для корректной оценки этого смещения необходимо знать закон рассеяния света (ЗРС) поверхностью астероида, чтобы правильно вычислить распределение яркости по видимому полушарию астероида при данной геометрии его наблюдения и освещения. Такие

данные являются исходными для определения положения фотоцентра астероида, и следовательно, его смещения относительно геометрического центра при $\alpha \neq 0^\circ$.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ ПО ДИСКУ АСТЕРОИДА ДЛЯ РАЗНЫХ ЗАКОНОВ РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Хотя определение ЗРС для астероидов представляет собой очень сложную задачу (поскольку они наблюдаются как точечные источники), в работе [3] было показано, что законы Акимова (теоретический и эмпирический) [1] и закон Хапке [6] достаточно хорошо описывают рассеивающие свойства поверхностей астероидов. Менее пригодными оказались так называемый «геометрический закон» (закон Эйлера), законы Ламберта и Льюмме—Боуэлла. Однако, поскольку ранее для коррекции за смещение фотоцентра астероида использовались законы Ламберта и Ломмеля—Зеелигера [5, 8], вычисление распределения яркости по диску астероида мы проводили для пяти ЗРС: Ламберта, Ломмеля—Зеелигера, Хапке, теоретического и эмпирического законов Акимова.

Использовалась численная фотометрическая модель астероида, разработанная на АО Харьковского университета [4]. Она предусматривает произвольную форму астероида, которая задается радиусом-вектором точки на поверхности, произвольное распределение альбедо по поверхности, произвольный закон распределения яркости по поверхности и фазовую функцию. Модель дает возможность вычислять яркость отдельной точки на поверхности тела с заданными координатами, интегральную яркость (блеск) освещенной и видимой поверхности, кривые блеска тел неправильной формы и фазовую зависимость блеска.

В качестве фигуры модели при изучении смещения фотоцентра объекта относительно геометрического центра был выбран трехосный эллипсоид с соотношением полуосей $a : b : c = 2 : 1.4 : 1$. Такое соотношение следует из результатов лабораторного моделирования катастрофических столкновений астероидов [7], как наиболее вероятное. При этом предполагается, что поверхность модельного астероида фотометрически однородная, т. е. значение альбедо во всех точках поверхности одно и то же. Поверхность модели разбивалась на элементарные площадки размером $3^\circ \times 3^\circ$, который определялся как требуемой точностью, так и временем вычисления распределения яркости по поверхности. Предполагалось также, что геометрия освещения и наблюдения соответствует экваториальному аспекту, т. е. плоскость рассеяния совпадает с экваториальной плоскостью модели, которая задается положением полуосей a и b . В этом случае распределение яркости по видимому диску модели будет симметричным относительно экватора интенсивности.

Для определения фотоцентра выберем систему координат XOY с началом в геометрическом центре диска модели, ось абсцисс которой

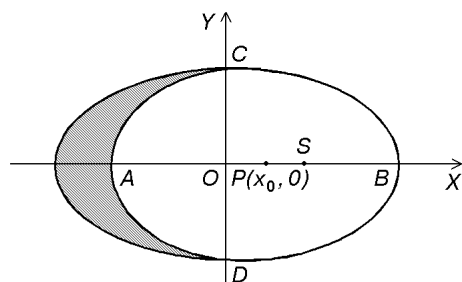


Рис. 1. Геометрия задачи: O — геометрический центр фигуры; $P(x_0, 0)$ — видимый центр (фотоцентр); S — подсолнечная точка; AB — экватор интенсивности; CD — ось вращения фигуры; $OP = \Delta$ — смещение фотоцентра

направлена вдоль экватора интенсивности (рис. 1). Вследствие симметричности распределения яркости по диску относительно экватора интенсивности смещение фотоцентра будет происходить по оси OX . В качестве фотоцентра модели будем считать точку $P(x_0, 0)$ на экваторе интенсивности, справа и слева от которой интегральные яркости будут равны между собой:

$$\int_{x_{\min}}^{x_0} \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} B(\iota, \varepsilon, \alpha) dx dy = \int_{x_0}^{x_{\max}} \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} B(\iota, \varepsilon, \alpha) dx dy. \quad (1)$$

Аналитические выражения для законов Ламберта, Ломмеля—Зеелигера, Хапке, теоретического и эмпирического законов Акимова содержатся в работе [3] (там же приведены значения параметров эмпирического закона Акимова и закона Хапке и ссылки на литературные источники). Для каждого из этих законов вычислялась видимая яркость $B(\iota, \varepsilon, \alpha)$ в каждой точке диска модели:

$$B(\iota, \varepsilon, \alpha) = j(\iota, \varepsilon, \alpha) / (\Delta S \cos \varepsilon), \quad (2)$$

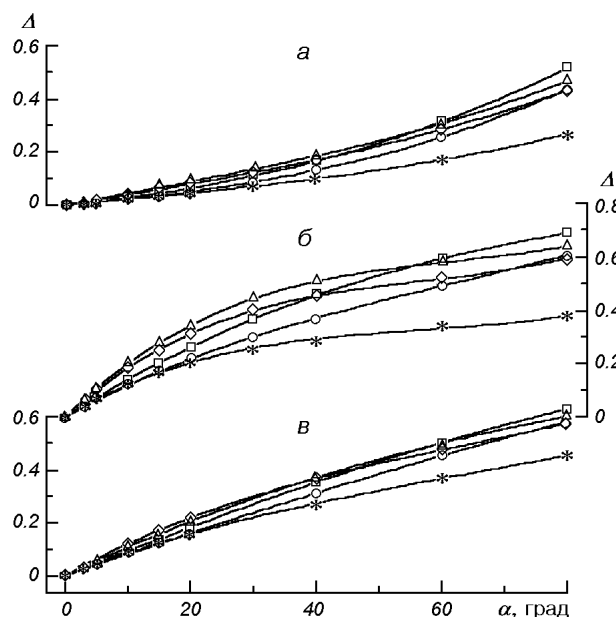
где $j(\iota, \varepsilon, \alpha)$ — сила света, отраженного площадкой ΔS на поверхности модели в направлении на наблюдателя (т. е. под углом ε к нормали), записанная для данного закона рассеяния света; ι и ε — углы падения и отражения света соответственно. Суммируя полученные яркости, нетрудно определить положение точки $P(x_0, 0)$, удовлетворяющее условию (1), которое и даст смещение фотоцентра диска относительно геометрического центра, т. е. величину $OP = \Delta$ (см. рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены вычисленные величины относительного смещения фотоцентра Δ в зависимости от фазового угла для максимального и минимального сечений модели (при экваториальном аспекте наблюдений), образованных осями a, c и b, c , соответственно. Значения смещений Δ выражены в долях соответствующих полуосей (a — для максимального сечения и b — для минимального). Хорошо видно, что величина смещения фотоцентра зависит не только от фазового угла α , но также от вытянутости формы модели (максимальное и минимальное сечения модели дают значения Δ , различающиеся в два—три раза) и от закона рассеяния света. Вычисленные значения Δ для закона Ломмеля—Зеелигера существенно отклоняются от значений для всех остальных законов при $\alpha \geq 20^\circ$ и дают наименьшие относительные значения Δ . Закон Ламберта, обычно используемый для поверхностей с высоким альбедо, наоборот, дает в среднем бóльшие смещения по сравнению с другими законами. В то же время законы Акимова и Хапке, наиболее соответствующие рассеивающим свойствам астероидных поверхностей [3], дают промежуточные и относительно близкие значения Δ . Варьируя значение единственного свободного параметра p эмпирического закона Акимова, можно достичь полного согласия с теоретическим законом или законом Хапке.

На рис. 2 также представлены результаты вычисления величины смещения Δ для сферической модели. Видно, что они являются промежуточными и примерно средними по сравнению со смещениями для минимального и максимального сечений эллипсоидальной модели. При этом величина смещений составляет около $0.2R$ при $\alpha = 20^\circ$ и увеличивается почти линейно до $0.6R$ при $\alpha = 80^\circ$. Поскольку для астероидов главного пояса при наземных наблюдениях фазовые углы могут достигать $25\text{—}30^\circ$, то для наиболее крупных из них, у которых угловой поперечник превышает $0.1''$, величина

Рис. 2. Относительное смещение фотоцентра для сферической и эллипсоидальной моделей астероида: *a* — максимальное сечение эллипсоида, *б* — минимальное (шкала справа), *в* — сферическая поверхность. Квадратики — для эмпирического закона Акимова, кружки — для теоретического закона Акимова, ромбики — для закона Хапке, треугольники — для закона Ламберта, звездочки — для закона Ломмеля—Зеелигера



смещения Δ может достигать значений $0.015''$ и больше, что сравнимо с погрешностью современных астрометрических наблюдений. Последняя составляет $0.15\text{--}0.25''$ для наземных меридианных наблюдений и $0.015\text{--}0.020''$ для измерений, проведенных с борта КА HIPPARCOS [5]. Отметим также, что применение ПЗС-приемника при астрометрических наблюдениях астероидов и использование высокоточного каталога звезд АСТ (Astrometric Catalogue Thicho) позволило повысить точность наблюдений до $0.01\text{--}0.03''$ [12]. Для крупнейших астероидов 1 Церера, 2 Паллада, 4 Веста, 324 Бамберга (максимальные угловые размеры $0.36\text{--}0.67''$) величина смещения может достигать $0.06\text{--}0.10''$.

Рис. 3 дает представление о том, как зависит величина смещения Δ от вытянутости фигуры астероида, характеризуемой соотношением полуосей $a:b$. Эти данные получены для экваториального аспекта модели, рассеивающей свет по закону Акимова.

В таблице приведены коэффициенты аппроксимации зависимостей $\Delta(\alpha)$ полиномом третьей степени

$$\Delta(\alpha) = A\alpha + B\alpha^2 + C\alpha^3$$

Коэффициенты аппроксимации зависимости $\Delta(\alpha)$ полиномом третьей степени

Закон	$A \cdot 10^{-3}$	$B \cdot 10^{-5}$	$C \cdot 10^{-7}$
Эллипсоид, максимальное сечение			
Акимова, теоретический	2.06 ± 0.20	2.00 ± 0.79	3.06 ± 0.72
Акимова, эмпирический	2.33 ± 0.23	4.00 ± 0.91	1.58 ± 0.83
Хапке	3.86 ± 0.12	0.08 ± 0.49	2.35 ± 0.44
Ламберта	4.41 ± 0.15	-0.61 ± 0.59	3.02 ± 0.54
Ломмеля—Зеелигера	2.25 ± 0.19	-0.23 ± 0.76	2.00 ± 0.69
Эллипсоид, минимальное сечение			
Акимова, теоретический	13.10 ± 0.21	-12.00 ± 0.85	6.57 ± 0.78
Акимова, эмпирический	15.12 ± 0.19	-10.00 ± 0.77	2.79 ± 0.70
Хапке	21.48 ± 0.41	-33.00 ± 2.00	19.09 ± 1.49
Ламберта	23.16 ± 0.24	-33.00 ± 0.97	17.68 ± 0.89
Ломмеля—Зеелигера	14.15 ± 0.33	-22.00 ± 1.00	13.02 ± 0.12

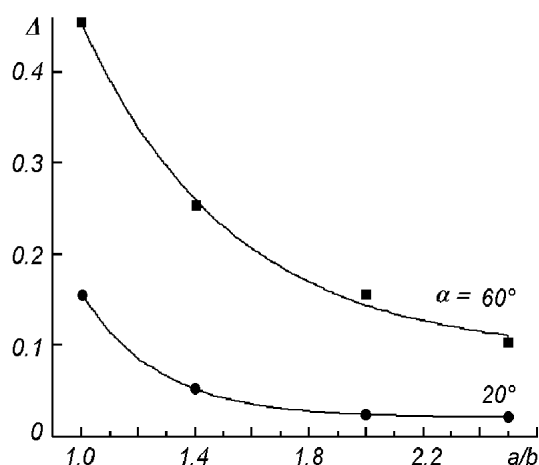


Рис. 3. Зависимость смещения фотоцентра от вытянутости фигуры астероида, поверхность которого рассеивает свет согласно теоретическому закону Акимова (экваториальный аспект)

в диапазоне фазовых углов $\alpha = 0 \div 80^\circ$, которые могут быть использованы для оценки величины относительного смещения фотоцентра Δ .

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты проведенного моделирования показывают, что смещение видимого центра астероида относительно геометрического существенно зависит от величины фазового угла астероида, его формы и закона рассеяния света поверхностью. Его величина при наземных наблюдениях ($\alpha \leq 30^\circ$) может достигать значения $(0.3—0.4)R$ (см. рис. 2). Это означает, что для всех астероидов с диаметром более $0.1''$ абсолютная величина смещения может достигать значений $0.03—0.04''$ и больше, вплоть до $0.12''$ для астероида 1 Церера. Такие смещения превышают погрешность космических измерений и сравнимы с погрешностью наземных наблюдений. Их учет может заметно повысить точность определяемых положений астероидов.

В случае астероидов, сближающихся с Землей (группы Амура, Аполлона, Атона), относительное смещение фотоцентра может быть большим за счет больших значений фазового угла. Так, например, астероид группы Аполлона 4179 Тоутатис ($D \approx 3$ км) в декабре 1992 г. сближался с Землей на расстояние до 0.024 а. е., при этом его угловой размер был равен $0.2''$, а фазовый угол — около 100° . В этом случае смещение фотоцентра было равным около $0.7R$, или около $0.07''$. Такую величину необходимо учитывать и при наземных, и тем более при космических наблюдениях типа HIPPARCOS.

При наблюдениях конкретного астероида определение величины Δ будет зависеть от того, известна ли форма (соотношение полуосей $a:b:c$) данного астероида. Если форма известна, то желательно определить, какое сечение астероида (минимальное, максимальное или промежуточное) было обращено к наблюдателю в момент наблюдений, чтобы использовать нужные аппроксимационные коэффициенты (см. таблицу). Кроме того, вычисленную поправку $\Delta(\alpha)$ необходимо исправить за отличие соотношения $a:b:c$ от модельного $(2 : 1.4 : 1)$, пользуясь данными рис. 3. Если форма астероида неизвестна, величину смещения целесообразно определять для наиболее вероятного соотношения полуосей $2 : 1.4 : 1$, используя средние значения коэффициентов аппроксимации A, B, C . При этом следует использовать коэффициенты аппроксимации для теоретического закона Акимова или закона Хапке, которые достаточно хорошо описывают рассеивающие свойства поверхностей астероидов.

Процедура редукции координат α и δ астероида за смещение фотоцентра подробно описана в работе [5]. Данные о соотношении полуосей астероидов содержатся в [11] и во многих других публикациях, а данные о периодах осевого вращения астероидов и их кривых блеска на конкретную эпоху содержатся в каталоге [10] и его дополнениях. Наиболее полным источником данных об оценках линейных размеров астероидов является IRAS-каталог [13].

1. *Акимов Л. А.* Отражение света Луной // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 1.—С. 3—10.
2. *Акимов Л. А., Лушичко Д. Ф., Бельская И. Н.* О фотометрической неоднородности поверхностей астероидов // Астрон. журн.—1983.—60, № 5.—С. 999—1004.
3. *Акимов Л. А., Лушичко Д. Ф., Шевченко В. Г.* О законе рассеяния света поверхностями астероидов. Распределение яркости по диску // Астрон. вестник.—1992.—26, № 4.—С. 62—67.
4. *Шевченко В. Г.* Фотометрия астероидов: фазовая зависимость блеска, фотометрическая модель: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 1996.—140 с.—Машинопись.
5. *Batrakov Yu. V., Chernetenko Yu. A., Gorel G. K., Gudkova L. A.* Hipparcos catalogue orientation as obtained from observations of minor planets // Astron. and Astrophys.—1999.—(submitted).
6. *Bowell E., Hapke B., Domingue D., et al.* Application of photometric models to asteroids // Asteroids II / Eds R. P. Binzel, T. Cehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 524—556.
7. *Fujiwara A., Kamimoto G., Tsukamoto A.* Expected shape distribution of asteroids obtained from laboratory impact experiments // Nature.—1978.—272.—P. 602—603.
8. *Hestroffer D.* Photocentre displacement of minor planets: analysis of Hipparcos astrometry // Astron. and Astrophys.—1998.—336.—P. 776—781.
9. *Hestroffer D., Morando B., Mignard F., Bec-Borsenberger A.* Astrometry of minor planets with Hipparcos // Astron. and Astrophys.—1995.—304.—P. 168—175.
10. *Lagerkvist C.-I., Barucci M. A., Capria M. T., et al.* Asteroid Photometric Catalogue. — CNR, Istituto di Astrofisica Spaziale, Roma, 1987.
11. *Magnusson P.* Pole determinations of asteroids // Asteroids II / Eds R. P. Binzel, T. Cehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 1180—1190.
12. *Owen Jr. W. M., Synnott S. P., Null G. W.* High-accuracy asteroid astrometry from Table Mountain Observatory // Modern astrometry and astrodynamics: Proc. of Int. Conf. Vienna (Austria) 25—26 May, 1998 / Eds R. Dvorak, H. F. Haupt, K. Wodnor. — Vienna, 1999.—P. 89—101.
13. *Tedesco E. F., Veeder G. J.* IMPS albedos and diameters catalog (FP 102) // The IRAS Minor Planet Survey / Eds E. F. Tedesco, et al. — Philips Lab. Hanscom Air Force Base, MA, 1992.—P. 243—285.

Поступила в редакцию 09.10.00