

УДК 523.4

Ф. П. Величко, Д. Ф. Лупинко

Фотометрическая астрометрия для приближающихся к Земле астероидов: координаты полюса 1627 Ивар

Усовершенствован метод фотометрической астрометрии для определения координат полюсов астероидов с быстрым видимым движением на небесной сфере по данным наблюдений в одну оппозицию. На основе наблюдений астероида 1627 Ивар в 1985 г. определены координаты его полюса $\lambda_0=333^\circ$, $\beta_0=18^\circ$ и сидерический период вращения $4.798\ 88\pm 0.000\ 03$ ч. Описаны возможности предлагаемой методики и ограничения ее применения.

PHOTOMETRIC ASTROMETRY FOR THE EARTH-APPROACHING ASTEROIDS: POLE COORDINATES OF 1627 IVAR, by Velichko F. P., Lupishko D. F.— The method of photometric astrometry is improved for the purpose of pole determination of asteroids with rapid apparent motion on the celestial sphere using light curve observations at one opposition. On the basis of observations of asteroid 1627 Ivar in 1985 the pole coordinates $\lambda_0=333^\circ$, $\beta_0=18^\circ$ and sidereal rotation period $4.798\ 88\pm 0.000\ 03^h$ are obtained. The possibilities and limitations of the method application are described.

При произвольном видимом движении астероида по небесной сфере синодический период его вращения, определяемый из наблюдений моментов появления одной и той же детали кривой блеска (минимума, максимума и т. п.), как известно, не остается постоянным. Чем неравномернее движется астероид, тем заметнее (за некоторым исключением) изменяется видимый период его вращения, определяемый на разных интервалах времени. Характер изменения периода как функции от скорости углового перемещения астероида по небу непосредственно несет информацию о направлении вращения астероида (более подробно см. [1]). При этом направление вращения (прямое или обратное) устанавливается по отношению к правой системе координат, где определяющим будет положение северного полюса астероида. По аналогии с планетами и их спутниками северным полюсом астероида будем считать тот, который направлен в северное полушарие относительно плоскости эклиптики, т. е. эклиптическая широта его положительна (по этому вопросу для планет и спутников принято специальное решение Объединенной рабочей группы МАС, Международной ассоциации геодезистов и КОСПАР).

В общем случае зависимость синодического периода вращения астероида P_{syn} от скорости его углового перемещения по небу $\Delta\Phi/\Delta t$ (где $\Delta\Phi$ — угловое перемещение за время Δt) нелинейна (рис. 1; см. также [3]). Отклонение от линейности связано с тем, что значениям видимого периода ставится в соответствие действительное (но любое по направлению) перемещение астероида по небесной сфере за единицу времени. Синодический же период с точностью до ошибок его определения будет линейной функцией в том случае, если аргументом является проекция скорости перемещения подземной точки на среднюю параллель астероида в астероидоцентрической системе координат. При этом предполагается, что особенности кривой блеска, по которым вычисляются значения P_{syn} , проявляются в тот момент, когда вызвавшие их детали на поверхности астероида обращены к наблюдателю. Однако при больших углах фазы ($\alpha \geq 20^\circ$) из-за отличия реального закона отражения света от геометрического, а также неправильной формы астероида такое предположение не соответствует действительности. Так, из модельных экспериментов и теоретических расчетов [4, 10] следует, что максимум яркости света, отраженного вытянутым телом, наступает не

тогда, когда оно обращено к наблюдателю или источнику освещения максимальной площадью, а где-то между этими положениями. Поэтому в работах [8, 9] при определении формы астероидов и ориентации их полюсов используются координаты не подземной точки, а вектора биссектрисы фазового угла ρ . Тем самым обеспечивается в первом приближении компромисс между условиями освещения и наблюдения при неизвестных оптических свойствах поверхности исследуемого объекта.

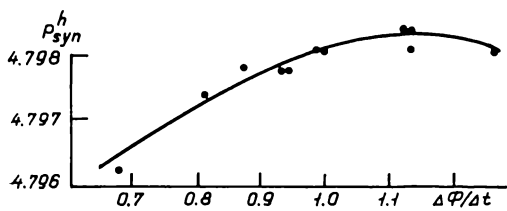


Рис. 1. Зависимость синодического периода вращения Ивара от скорости его углового перемещения на небесной сфере по наблюдениям 1985 г. [2]

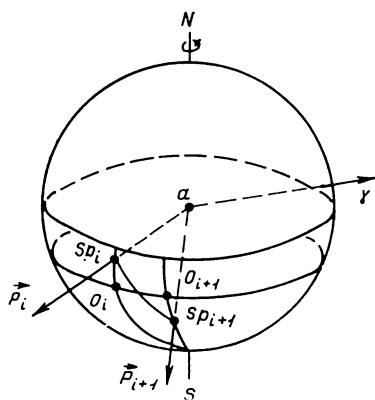


Рис. 2. Геометрия задачи: a — астероид; NS — ось вращения астероида; дуга Sp_iSp_{i+1} — перемещение вектора биссектрисы фазового угла между моментами i и $i+1$; O_iO_{i+1} — ее проекция на среднюю параллель

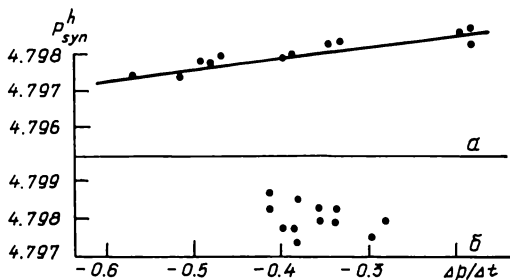


Рис. 3. Зависимость синодического периода вращения Ивара от скорости углового перемещения проекции биссектрисы фазового угла на параллель астероида при координатах его полюса: а) $\lambda_0=333^\circ$, $\beta_0=18^\circ$; б) $\lambda_0=349^\circ$, $\beta_0=18^\circ$

Введение биссектрисы фазового угла при решении таких задач для астероидов, приближающихся к Земле, наиболее оправдано, так как они обычно достигают больших фазовых углов — до 100° и более.

На рис. 2 показана геометрия задачи для астероида, имеющего быстрое видимое движение по небесной сфере (астероиды групп Амура, Аполлона, Атона). Дуга малого круга O_iO_{i+1} — это искомая проекция изменения направления биссектрисы фазового угла между i и $i+1$ моментами наблюдения астероида на среднюю его параллель в астероидоцентрической системе координат. Координаты вектора ρ определяются или через векторы положения астероида Δ и Солнца R , или, как предлагается в [8], через вектор гелиоцентрического положения астероида γ и Δ .

Алгоритм решения задачи состоит в том, что варьируя значения эклиптических координат полюса астероида λ_0 , β_0 и вычисляя по формулам фотометрической астрометрии [11] для каждого момента наблюдений положение вектора биссектрисы фазового угла (в системе координат, связанной с полюсом астероида) отыскивается наилучшее согласие регрессии [1, 12].

$$P_{syn} = P_{sid} \pm \frac{\Delta p(\lambda_0, \beta_0)}{\Delta t} \frac{P_{sid}^2}{360} \quad (1)$$

как по остаточному среднему квадратичному отклонению, так и по тангенсу угла наклона с наблюдаемым изменением P_{syn} при видимом движении астероида. Здесь $\Delta\rho(\lambda_0, \beta_0)$ — проекция на среднюю параллель астероида перемещения биссектрисы его фазового угла за время Δt при заданных координатах полюса λ_0, β_0 ; $P_{sid}^2/360$ — ожидаемый тангенс угла наклона анализируемой регрессии. Знак «плюс» соответствует прямому направлению вращения астероида (и наоборот).

Таким образом, в отличие от классического метода «фотометрической астрометрии» [5, 11], в котором наиболее вероятное положение полюса выбиралось по признаку минимума дисперсии вычисляемого сидерического периода, в предлагаемой методике определения координат полюса используются два критерия (параметра), ограничивающие область решения. Этими параметрами являются минимум дисперсии и тангенс угла наклона линейной регрессии (1). В результате пределы решения для полюса астероида получаются более узкими, чем определенные только по одному признаку.

Координаты полюса Ивара. Кривые блеска Ивара, полученные в оппозицию 1985 г. [2, 6], характеризуются значительной амплитудой (до 0.5^m) и хорошо выраженными максимумами и минимумами яркости.

В таблице представлены эфемеридные и наблюдаемые данные астероида Ивара, используемые для определения координат его полюса: средний момент наблюдения, моменты экстремумов кривой блеска астероида в юлианских днях, исправленные за световой промежуток (обозначения экстремумов согласно [2]), эклиптические координаты астероида λ, β , расстояния его до Земли и Солнца Δ, r , фазовый угол α , а также радиус-вектор R и эклиптические координаты Солнца $\lambda^\odot, \beta^\odot$ на средний момент наблюдения астероида.

Используя рассмотренный выше алгоритм определения координат полюса, основные формулы фотометрической астрометрии [11] и прямое направление вращения Ивара [2], получаем два решения:

$$P_1 \left(\begin{array}{l} \lambda_0 = 147 \pm 3^\circ \\ \beta_0 = 13 \pm 1^\circ \end{array} \right) \text{ при } P_{sid} = 4.800\ 25 \pm 0.000\ 06^h;$$

$$P_2 \left(\begin{array}{l} \lambda_0 = 333 \begin{array}{l} + 15^\circ \\ - 8^\circ \end{array} \\ \beta_0 = 18 \begin{array}{l} + 1^\circ \\ - 5^\circ \end{array} \end{array} \right) \text{ при } P_{sid} = 4.798\ 88 \pm 0.000\ 03^h.$$

Неопределенности значений λ_0, β_0 даны по уровню 3σ как по минимуму остаточного среднего квадратичного отклонения линии регрессии (1), так и по тангенсу ее угла наклона.

Исходные данные для определения координат полюса Ивара

Средний момент наблюдения, 1985 УТ	J. D. (с) 244 200+		$\lambda_{1950.0}$, град	$\beta_{1950.0}$, град	Δ , а. е.
	M_2	m			
Июль 15.0 ^d	61.437	61.478	353.81	9.76	0.2008
16.0	—	62.478	354.79	8.95	0.2008
28.0	74.432	74.474	4.24	—0.60	0.2061
Авг. 10.0	—	87.468	10.61	—9.96	0.2210
15.0	—	92.464	12.00	—13.06	0.2295
31.3	108.803	—	12.8	—20.9	0.2649
Сент. 1.3	—	109.655	12.7	—21.2	0.2675
14.3	—	122.844	10.3	—24.4	0.3092
16.3	—	124.842	9.8	—24.7	0.3169
27.3	—	135.832	7.0	—25.1	0.3665

Чтобы уменьшить вклад в (1) значений P_{syn} , полученных на интервалах времени, когда происходило существенное изменение фазового угла, значения синодического периода вращения Ивара рассматривались только для тех пар моментов экстремумов, между которыми угловое перемещение астероида по небу было больше изменения угла фазы на этом промежутке, т. е. $\Delta\Phi > \Delta\alpha$.

Решение P_2 для полюса Ивара оказалось более «размазанным» на координатной плоскости, чем решение P_1 . Однако дисперсия полученного значения P_{sid} для этого решения вдвое меньше, чем для P_1 , а величина тангенса угла наклона регрессии (1) для P_2 более близка к ожидаемой, чем у первого решения полюса. К тому же полученное значение P_{sid} для второго решения ближе к наиболее вероятному значению $P_{syn} = 4.7979 \pm 0.0001^h$ [2], а вращение с периодом более 4.8^h вообще никогда не наблюдалось [2, 6, 7]. Исходя из этого, следует отдать предпочтение координатам полюса $\lambda_0 = 333^\circ$, $\beta_0 = 18^\circ$.

Полученные решения согласуются с результатами вычислений координат полюса этого астероида классическим методом фотометрической астрометрии [$P_1(\lambda_0 = 110^\circ, \beta_0 = 20^\circ)$; $P_2(\lambda_0 = 320^\circ, \beta_0 = 40^\circ)$], приведенными в [6], где предпочтение отдается также P_2 . Однако неопределенность этих координат составляет $\pm 20^\circ$, что значительно превышает аналогичные величины нашей работы.

На рис. 3 приведена зависимость P_{syn} Ивара от скорости углового перемещения проекции биссектрисы фазового угла астероида на среднюю его параллель для решения P_2 (рис. 3, а). Для сравнения показана та же зависимость за пределами существования решения при $\lambda_0 = 349^\circ$, $\beta_0 = 18^\circ$ (рис. 3, б). Хорошо видно, что линейная регрессия катастрофически разрушается.

Возможности метода. Отличительная особенность описанного метода определения ориентации осей вращения состоит в том, что для локализации положения полюса в пространстве используются два параметра: минимум остаточного уклонения зависимости (1) и соответствие тангенса ее угла наклона ожидаемому значению $P_{sid}^2/360$ при заданных λ_0, β_0 . Применение двухпараметрического ограничения на положение координат полюса позволяет: 1) повысить точность искомых значений λ_0 и β_0 , что дает потенциальную возможность получить решение в случае астероидов, для которых применение других версий фотометрической астрометрии может не обеспечить удовлетворительной точности; 2) находить координаты полюса приближающихся к Земле астероидов по наблюдениям в одну оппозицию, при этом данная методика с заданной точностью определения полюса требует меньшего наблюдательного материала по сравнению с классической.

Уверенное использование описанной методики определения полюса возможно только для быстродвижущихся по небу объектов (из асте-

r , а. е.	α , град	$\lambda_{1950,0}^\odot$, град	$\beta_{1950,0}^\odot$, град	R , а. е.	Литературный источник
1.1240	53.3	111.944	-0.004	1.016 491	[2]
1.1242	53.2	112.938	-0.004	1.016 440	[2]
1.1326	50.8	124.357	-0.004	1.015 417	[2]
1.1566	45.5	136.799	-0.003	1.013 668	[2]
1.1694	42.8	141.600	-0.002	1.012 827	[2]
1.2230	32.4	157.383	-0.002	1.009 330	[6]
1.2266	31.8	158.220	-0.001	1.009 114	[6]
1.2813	23.7	170.891	-0.000	1.005 862	[6]
1.2904	22.6	172.841	-0.000	1.005 321	[6]
1.3427	18.6	183.600	0.000	1.002 191	[6]

роидов — это представители групп Амура, Аполлона и Атона). Применение данного алгоритма к астероидам главного пояса проблематично. Другие ограничения при использовании метода аналогичны требованиям, предъявляемым к исходным данным при определении направления вращения астероидов по одному противостоянию [1].

1. Луишко Д. Ф., Величко Ф. П. Направление вращения астероидов 21, 63, 216, 349 // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 1.— С. 57—65.
2. Луишко Д. Ф., Величко Ф. П., Шевченко В. Г. Астероид 1627 Ивар. UBV-фотометрия, период и направление вращения // Там же.—1986.—2, № 5.— С. 39—43.
3. Луишко Д. Ф., Величко Ф. П., Шевченко В. Г. Фотометрия астероида группы Амура 1036 Ганимед и 1139 Атами // Астрон. вестн.—1988.—22, № 2.— С. 167—173.
4. Dunlap J. L. Laboratory work on the shapes of asteroids // Physical studies of minor planets / Ed. by T. Gehrels.—NASA SP-267, 1971.— P. 147—154.
5. Gehrels T. Minor planets. I. The rotation of Vesta // Astron. J.—1967.—72, N 8.— P. 929—938.
6. Hahn G., Magnusson P., Harris A. et al. Physical studies of Apollo—Amor asteroids: UBVRI photometry of 1036 Ganymed and 1627 Ivar // Icarus.—1989.—77, N 1.— P. 112—119.
7. Harris A. W., Young J. W. Photometric results for Earth approaching asteroids // Bull. Amer. Astron. Soc.—1986.—17, N 3.— P. 726.
8. Harris A. W., Young J. W., Scaltriti F. et al. Lightcurves and phase relation of the asteroids 82 Alkmene and 444 Gyptis // Icarus.—1984.—57, N 2.— P. 251—258.
9. Magnusson P. Distribution of spin axes and senses of rotation for 20 large asteroids // Ibid.—1986.—68, N 1.— P. 1—39.
10. Surdej A., Surdej J. Asteroid lightcurves simulated by the rotation of a three-axes ellipsoid model // Astron. and Astrophys.—1978.—66, N 1/2.— P. 31—36.
11. Taylor R. C. Pole orientation of asteroids // Asteroids / Ed. by T. Gehrels.—Tucson: Arizona Univ. press, 1979.— P. 480—493.
12. Taylor R. C., Tedesco E. F. Pole orientation of asteroid 44 Nysa via photometric astrometry including a discussion of the method's application and its limitations // Icarus.—1983.—54, N 1.— P. 13—22.

Астрон. обсерватория
Харьков. ун-та им. А. М. Горького

Поступила в редакцию 03.05.88,
после доработки 12.07.88

Окончание. Начало с. 84

8. Яценко А. Ю. Рефракция в меридиональной модели атмосферы. Теоретические основы // Там же.—1988.—4, № 2.— С. 59—66.
9. Яценко А. Ю. Рефракция в меридиональной модели атмосферы. Анализ результатов.—Киев, 1989.—17 с.—Деп. в ВИНТИ 25.01.89, № 634.
10. Bergthorsson P., Döös Bo R. Numerical weather map analysis // Tellus.—1955.—7, N 3.— P. 329—340.
11. CIRA 1965: COSPAR International Reference Atmosphere 1965.—Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1965.—313 p.
12. Kolchinskij I. G. On terminology in the theory of atmospheric refraction // Publs Observ. astron. Beograd.—1987.—N 35.— P. 332—337.
13. Owens J. C. Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition // Appl. Opt.—1967.—6, N 1.— P. 51—59.
14. Sibilev V. P., Shulga A. V. The use of atmospheric dispersion in astronomical refraction determination // Publs Observ. astron. Beograd.—1987.—N 35.— P. 180—187.
15. Yatsenko A. Yu. On the room refraction // Bull. Observ. Astron. Beograd.—1985.—N 135.— P. 16—20.
16. Yoshizawa M., Suzuki S., Fukaya R. Tokyo PMC catalog 85 // Ann. Tokyo Astron. Observ.—1987.—21, N 4.— P. 399—408.

Астрон. обсерватория им. В. П. Энгельгардта,
Казань

Поступила в редакцию 03.05.88,
после доработки 03.10.88