

УДК 523.44-357

Еще одна возможность определения диаметров астероидов по поляриметрическим данным

Л. О. Колоколова, Э. Г. Яновицкий

Обращается внимание на то, что альbedo, а следовательно, и диаметр астероидов можно довольно точно определять с помощью эмпирического уравнения, связывающего альbedo с двумя характеристиками зависимости степени поляризации P от фазового угла α . Первая характеристика — значение степени поляризации в точке минимума функции $P(\alpha)$, вторая — положение точки инверсии $\alpha_0 (P(\alpha_0) = 0)$. Это позволяет по поляриметрическим данным определять диаметры астероидов, наблюдающихся только при $\alpha \leq \alpha_0$, что заметно расширяет класс соответствующих объектов.

ONE MORE POSSIBILITY OF ASTEROID DIAMETERS DETERMINATION FROM POLARIMETRIC DATA, by Kolokolova L. O., Yanovitskij E. G. — It is pointed out that the albedo, and consequently, the diameter of an asteroid may be determined accurately enough by means of empiric equation which contains the albedo and two characteristics of the polarization degree P dependence on phase angle α . The first characteristic is the minimum value of function $P(\alpha)$, the second one is location of the inversion point $\alpha_0 (P(\alpha_0) = 0)$. The equation allows the diameters of asteroids observed only at $\alpha \leq \alpha_0$ to be determined.

В настоящее время существуют три метода определения размеров астероидов. Один из них основан на наблюдениях покрытий звезд астероидами, второй (радиометрический) — на изучении их собственного ИК-излучения, третий метод называется поляриметрическим и состоит в следующем. Известно, что при малых фазовых углах α степень поляризации P света, рассеянного астероидами, отрицательна (плоскость поляризации совпадает с плоскостью рассеяния). Она достигает минимума при $\alpha_{\min} = 5-10^\circ$, затем увеличивается и при $\alpha_0 = 16-24^\circ$ обращается в нуль (точка инверсии), после чего становится положительной. Эмпирически установлено, что наклон h положительной части кривой $P(\alpha)$ вблизи точки инверсии коррелирует с альbedo a . Эта корреляция тщательно изучена при исследовании рассеяния света на земных образцах, лунном грунте, метеоритах. Оказалось, что она слабо зависит от структурных особенностей поверхности и имеет вид [4]: $\ln a = -4.1 - 0.93 \ln h$. Пользуясь этой зависимостью, можно найти альbedo астероида (h -метод определения альbedo), и если известна его звездная величина V , то диаметр D астероида (в км) находится по формуле $2 \lg D = 6.244 - 0.4 V - \lg a$.

Характеристики регрессионных зависимостей альbedo от поляриметрических величин

Объект	Количество объектов	$\ln a = \gamma + \beta \ln h$		
		γ	β	$\sigma \cdot 10^*$
Все безатмосферные тела	39	-4.38	-1.066	3.3
Астероиды	34	-4.31	-1.018	2.4
Луна	78	-3.73	-0.768	0.25
Данные лабораторного моделирования	144	-3.76	-0.816	13
То же, только для порошков	105	-3.78	-0.826	15
То же, исключая порошки	39	-3.69	-0.782	8.4
Лабораторные измерения разных авторов				
Ллио	28	-3.87	-0.878	2.5
Дольфюс	61	-3.68	-0.734	6.8
Цельнер	40	-3.94	-0.887	1.4

Примечание. P_{\min} — в процентах, α_0 — в градусах, h — проценты на градус.

Чтобы воспользоваться поляриметрическим методом определения диаметра астероида, надо получить довольно точное значение h . Это практически возможно лишь тогда, когда имеются наблюдения в диапазоне фазовых углов $[\alpha_0, \alpha^0 + 10^\circ]$ [7], а еще лучше $[\alpha_0, \alpha_0 + 15^\circ]$ [2]. Многие удаленные астероиды не могут наблюдаться при таких фазовых углах. Кроме того, объекты обычно слабы, что затрудняет наблюдения.

Гораздо доступней область фазовых углов вблизи минимума поляризации. Известно, что значение степени поляризации в точке минимума P_{\min} тоже коррелирует с альбедо [4], но точность определения альбедо по этой зависимости мала, так как P_{\min} весьма чувствительна к изменениям структуры поверхности [1]. Определять альбедо астероидов по значениям P_{\min} было бы возможно, если бы удалось исключить влияние структуры поверхности. Этого можно добиться, если найти наблюдательную характеристику, существенно зависящую от структурных особенностей поверхности. Такой величиной, по-видимому, является положение точки инверсии, что следует из результатов лабораторных поляриметрических исследований (см., например, [7]).

К такому же выводу можно прийти и на основе теоретического описания формирования отрицательной поляризации при рассеянии света поверхностями. К настоящему времени наиболее разработана и принята теория, согласно которой отрицательная поляризация есть следствие кратных отражений света неровностями поверхности. Один из вариантов этой теории [3] дает в линейном приближении связь между параметрами отрицательной ветви поляризации и характеристиками поверхности

$$P_{\min} = 0.57 - 0.25Q - 0.23C - 0.21n \lg \kappa - 0.17 \lg \sigma_{\chi_{12}}, \quad \% \tag{1}$$

$$\alpha_{\min} = 8 - 1.38Q - 1.32n \lg \kappa + 0.94n - 0.81Q \lg \kappa, \quad \text{град}, \tag{2}$$

$$\alpha_0 = 26 - 5.41Q - 4.78n \lg \kappa - 4.03 \lg \sigma_{\chi_{12}} - 2.47Q \lg \kappa, \quad \text{град}, \tag{3}$$

где Q — отношение площади, занятой горизонтальными площадками, к площади площадок, расположенных под углом к поверхности; C — параметр, описывающий соотношение между интенсивностями деполаризованной и поляризованной составляющих рассеянного света; $\sigma_{\chi_{12}}$ — параметр структуры, характеризующий дисперсию углов между отражающими площадками; n — показатель преломления; κ — показатель преломления вещества.

Из (1)–(3) видно, что только P_{\min} зависит от параметра C , характеризующего деполаризованную составляющую рассеянного света. Как известно, именно эта величина определяет в основном альбедо астероидов [5]. Следовательно, в (1) слагаемое с параметром C описывает связь P_{\min} с альбедо, а остальные параметры — отклонения от нее. Не связанные с C члены уравнения (1) во многом подобны членам, составляющим правые части уравнений (2) и (3), где главную роль играют структурные характеристики поверхности. Поэтому можно попытаться, пользуясь наблюдаемыми значениями α_0 или α_{\min} , исключить или по крайней мере сильно ослабить влияние структуры поверхности на связь между P_{\min} и альбедо.

ln $a = \gamma + \beta \ln P_{\min}$			ln $a = \gamma + \beta_1 \ln P_{\min} + \beta_2 \ln \alpha_0$			
γ	β	$\sigma \cdot 10^3$	γ	β_1	β_2	$\sigma \cdot 10^3$
—2.32	—1.078	6.6	—4.90	—1.330	0.862	2.7
—2.34	—1.266	2.8	—5.59	—1.330	1.080	2.0
—2.15	—0.813	0.51	—5.15	—0.896	0.945	0.49
—2.22	—0.697	15	—6.33	—0.943	1.400	13
—2.13	—0.729	16	—5.77	—0.938	1.200	15
—2.25	—0.398	15	—7.63	—0.907	1.910	5.5
—2.17	—0.406	3.3	—7.22	—1.070	1.730	2.6
—2.28	—0.670	6.8	—6.19	—0.844	1.350	6.0
—2.15	—0.899	4.6	—5.63	—1.040	1.120	3.4

Мы провели регрессионный анализ зависимости вида $a=f(P_{\min}, \alpha_0)$ для данных поляриметрических наблюдений астероидов и спутников планет [6, 8], поверхности Луны [2], лабораторных поляриметрических исследований (использовались данные из работ, приведенных в списке литературы к [7]). Методом наименьших квадратов находились коэффициенты регрессии, обеспечивающие минимальную дисперсию σ значений альbedo, рассчитанных и измеренных другими методами; например, радиометрическим. Такой же анализ проведен для зависимостей $a=f(h)$ и $a=f(P_{\min})$. Результаты представлены в таблице, из которой следует: 1) для всех рассмотренных объектов двухфакторная зависимость имеет дисперсию меньше, чем однофакторная $a=f(P_{\min})$. Снижение дисперсии особенно заметно в случае выборки, содержащей объекты с сильно отличающейся структурой; 2) в подавляющем большинстве случаев использование двухфакторной зависимости дает дисперсию, не превышающую таковую для h -метода. Исключение составляют результаты для Луны и данных Цельнера (что касается измерений Лио, то здесь отличие невелико, а выборка сравнительно мала). Однако для Луны дисперсии всех зависимостей примерно на порядок меньше, чем в других случаях. Кроме того, Луна, как известно, представляет собой в структурном отношении довольно однородный объект. На результатах Цельнера, видимо, сказалось то, что его исследования были сосредоточены на получении возможно более точных значений h , а остальные параметры определялись с меньшей точностью.

К сожалению, мы не смогли провести подробный анализ зависимости $a=f(P_{\min}, \alpha_{\min})$, поскольку опубликованные данные не позволяют определить значения α_{\min} с достаточной точностью. Отметим лишь, что для всех безатмосферных тел зависимость $a=f(P_{\min}, \alpha_{\min})$ имеет дисперсию $\sigma=4.6 \cdot 10^{-3}$.

Проведенный анализ дает основания считать, что использование двухфакторной зависимости вида $a=f(P_{\min}, \alpha_0)$, а возможно, и вида $a=f(P_{\min}, \alpha_{\min})$ позволит находить альbedo астероидов с точностью, сравнимой с точностью h -метода. Это даст возможность оценивать диаметры астероидов, наблюдаемых только при $\alpha \leq \alpha_0$, т. е. удаленных на 0.2—0.4 а. е. больше, чем те, которые могли быть изучены h -методом. Однако, на наш взгляд, уверенное применение такого метода станет возможным только после тщательной лабораторной калибровки двухфакторной зависимости и получения надежных наблюдательных данных для величин P_{\min} , α_{\min} и α_0 .

Тем не менее в безвыходных ситуациях, когда известные методы неприменимы, использование предлагаемого метода оценки альbedo астероидов можно рекомендовать уже сейчас, для чего достаточно воспользоваться коэффициентами регрессии, приведенными в таблице.

1. *Веверка Дж.* Поляриметрия поверхности спутников // Спутники планет / Под ред. Дж. Бернса.— М.: Мир, 1980.— С. 244—266.
2. *Кварацхелия О. И.* Спектрополяриметрия отдельных участков лунной поверхности и образцов лунного грунта: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Абастумани, 1985.—242 с.
3. *Колоколова Л. О.* Математическое моделирование рассеяния света поверхностями в поляриметрии безатмосферных космических тел.— Киев, 1987.—24 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-87-70Р).
4. *Лушико Д. Ф., Бельская И. Н.* Результаты астрофизических исследований астероидов. II // Астрон. вестн.— 1983.—17, № 1.— С. 5—19.
5. *Шкурагов Ю. Г.* Альbedo астероидов // Астрон. журн.— 1980.—57, вып. 6.— С. 1320—1322.
6. *Bowell E., Zellner B.* Polarization of asteroids and satellites // Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry.— Tucson: Arizona Univ. press, 1974.—P. 381—404.
7. *Geake J. E., Dollfus A.* Planetary surface texture and albedo from parameter plots of optical polarization data // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1986.—218, N 1.— P. 93—102.
8. *Morrison D., Zellner B.* Polarimetry and radiometry of the asteroids // Asteroids.— Tucson: Arizona Univ. press, 1979.— P. 1090—1097.