

УДК 523.44

**С. В. Зайцев<sup>1</sup>, Н. Н. Киселев<sup>1</sup>, В. К. Розенбуш<sup>1</sup>,  
С. В. Колесников<sup>2</sup>, К. А. Антонюк<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

sergio908@rambler.ru, kiselev@mao.kiev.ua, rosevera@mao.kiev.ua

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория»

Одесского национального университета имени И. И. Мечникова

ул. Маразлиевская 1в, Одесса, 65014

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»

п. Научный, Крым, 98409

## Поляриметрия астероида E-типа 64 Ангелина

*Представляются результаты поляриметрических наблюдений высокоальбедного астероида 64 Ангелина в диапазоне фазовых углов 0.8...24.3°. Наблюдения проводились в периоды 28 сентября — 9 октября 2008 г., 15 ноября 2011 г. и 18 сентября 2012 г. на 1.25-м и 2.6-м телескопах Крымской астрофизической обсерватории, оснащёнными пятицветным дулучевым фотополяриметром и одноканальным фотометром-поляриметром соответственно. Наши наблюдения подтверждают наличие поляриметрического оппозиционного эффекта для астероида 64 Ангелина на малых фазовых углах и хорошо согласуются с другими наблюдениями. Полученные результаты обсуждаются в рамках известных моделей рассеяния света реголитными поверхностями.*

*ПОЛЯРИМЕТРІЯ АСТЕРОЇДА E-ТИПУ 64 АНГЕЛІНА, Зайцев С. В., Кисельов Н. Н., Розенбуш В. К., Колесников С. В., Антонюк К. А. — Наводяться результати поляриметричних спостережень високоальбедного астероїда 64 Ангеліна у діапазоні фазових кутів 0.8...24.3°. Спростереження провадилися у періоди 28 вересня — 9 жовтня 2008 р., 15 листопада 2011 р. і 18 вересня 2012 р. на 1.25-м і 2.6-м телескопах Кримської астрофізичної обсерваторії за допомогою п'ятиколірного двопроменевого фотополяриметра і одноканального*

*фотометра-поляриметра відповідно. Наші спостереження підтверджують наявність поляриметричного опозиційного ефекту для астероїда 64 Ангеліна на малих фазових кутах та добре узгоджуються з іншими спостереженнями. Отримані результати аналізуються у рамках відомих моделей розсіяння світла реголітними поверхнями.*

*POLARIMETRY OF E-TYPE ASTEROID 64 ANGELINA, by Zaitsev S. V., Kiselev N. N., Rosenbush V. K., Kolesnikov S. V., Antonyuk K. A. — We present our results of polarimetric observations of high-albedo asteroid 64 Angelina which were carried out from 28 September to 9 October 2011, on 15 November 2011, and on 18 September 2012. We used the 1.25-m telescope equipped with the UBVRI double image chopping photoelectric polarimeter and the 2.6-m telescope equipped with a one-channel photoelectric photometer-polarimeter (the Crimean Astrophysical Observatory, Ukraine). Our observations fully confirm the presence of polarization opposition effect for asteroid 64 Angelina and are in good agreement with previous observations. Our results are discussed in terms of existing models for light scattering by regolith surfaces.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Исследование поляризационных характеристик света, рассеянного поверхностями астероидов и других безатмосферных тел Солнечной системы, является важным источником информации о физических свойствах этих поверхностей. Фазовая зависимость линейной поляризации является одной из самых информативных поляризационных характеристик безатмосферных тел Солнечной системы. С ее помощью можно определить альбедо, примерный композиционный состав, размеры частиц, слагающих отражающую поверхность, и т. д. Особое внимание в настоящее время привлекает поведение фазовой зависимости поляризации на малых углах (меньше  $2^\circ$ ). Именно на малых фазовых углах высокоальбедные астероиды, спутники больших планет и кольца Сатурна демонстрируют интересные оптические эффекты — нелинейное увеличение яркости поверхности при приближении к оппозиции, которое называют фотометрическим опозиционным эффектом (ФОЭ), и узкий вторичный минимум отрицательной линейной поляризации, который называют поляриметрическим опозиционным эффектом (ПОЕ).

После выхода ряда теоретических работ [3, 14], посвященных опозиционным явлениям, интерес к поведению фазовой зависимости поляризации на малых фазовых углах сильно возрос. Такие механизмы, как однократное рассеяние света на отдельных частицах, взаимное затенение частиц или элементов поверхности, когерентное усиление обратного рассеяния (эффект слабой локализации фотонов) и эффекты ближнего поля по-разному влияют на наблюдаемые характе-

ристики (амплитуду, полуширину, форму) фотометрического и поляриметрического опозиционных эффектов в зависимости от оптических свойств рассеивающей поверхности. Поэтому наблюдения астероидов и спутников планет вблизи опозиции могут помочь в определении относительного вклада рассматриваемых механизмов рассеяния в формирование опозиционных эффектов.

Астероид 64 Ангелина относится к классу высокоальбедных астероидов Е-типа [26]. Основные характеристики астероида по данным разных исследователей немного разнятся. Тедеско [25] установил, что эффективный размер астероида равен 60 км, позже Шевченко и Тедеско [24] получили размер 50.3 км, а Шеппард и др. [23] по данным радарных наблюдений пришли к выводу, что эффективный размер астероида составляет 53 км. Геометрическое альbedo астероида составляет  $p_v = 0.48$ , координаты полюса  $\lambda = 137^\circ$ ,  $\beta = 14^\circ$ , период вращения 8.75032 ч [7]. По данным спектральных наблюдений Ангелину относят к подтипу ЕП с сильной линией поглощения в районе 480 нм [9].

Во время фотометрических наблюдений Ангелины в 1981 г. и 1988 г. Харрис и др. [10] обнаружили так называемый спайк-эффект, а именно, вблизи опозиции блеск астероида резко увеличивается на величину около  $0.25^m$ . М. И. Мищенко и Ж. М. Длугач [15] объяснили возникновение ФОЭ в рамках механизма когерентного усиления обратного рассеяния.

Первые поляриметрические наблюдения Ангелины были проведены Цельнером и Гради [28] на фазовых углах  $3.7...24^\circ$  в спектральных полосах *B* и *G*. В появлении 1994 г. в работе [12] на малых фазовых углах было обнаружено наличие второй точки инверсии, однако этот эффект оказался ложным, по-видимому, из-за неполной компенсации поляризации фона неба. Астероид во время наблюдений был близок к полной Луне. Во время опозиций 1995, 1999, и 2000/2001 гг. В. К. Розенбуш и др. [20] обнаружили на малых фазовых углах узкий вторичный минимум степени поляризации. Таким образом, Ангелина стала первым астероидом, для которого были обнаружены и фотометрический, и поляриметрический опозиционные эффекты. Параметры поляриметрического опозиционного эффекта для разных опозиций несколько отличались. Впоследствии подобный эффект был обнаружен и для другого высокоальбедного астероида 44 Низа [21].

Профили поляриметрического опозиционного эффекта Ангелины, как и многих других тел Солнечной системы, пока точно не установлены. Есть разные точки зрения на форму фазовой зависимости поляризации вблизи опозиции — от асимметричной ветви отрицательной поляризации до отдельного вторичного минимума поляризации [4]. Поэтому дополнительные наблюдения астероидов на малых фазовых углах остаются востребованными. В данной работе мы представляем новые поляриметрические наблюдения астероида 64 Ангелина в широком диапазоне фазовых углов.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения астероида 64 Ангелина проводились в периоды 28 сентября — 9 октября 2008 г., 15 ноября 2011 г. и 18 сентября 2012 г. на 1.25-м и 2.6-м телескопах Крымской астрофизической обсерватории, оснащенные пятицветным фотополариметром и одноканальным фотометром-полариметром соответственно. Диапазон фазовых углов составил  $0.8...24.3^\circ$ .

Устройство и принцип работы пятицветного двулучевого одноканального фотополариметра, разработанного в обсерватории университета Хельсинки и установленного на 1.25-м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории, подробно описан Пииролой [17, 18]. Измерение поляризации проводится одновременно в полосах *UBVRI* с эффективными длинами волн 370, 440, 530, 690 и 830 нм соответственно. В качестве поляризатора используется пластина из исландского шпата, которая разделяет световой луч на два пучка со взаимно ортогональными направлениями колебаний и смещает необыкновенный луч относительно обыкновенного, в результате чего изображение объекта строится в двух диафрагмах. Модуляция потока измеряемого излучения происходит с помощью дискретно вращающейся с шагом  $22.5^\circ$  полуволновой фазовой пластинки. Полный цикл одного измерения состоит из восьми экспозиций, проводимых при восьми различных положениях фазовой пластинки. В каждой из диафрагм происходит наложение двух пучков от фона неба с ортогональными направлениями колебаний электрического вектора. Таким образом, отпадает необходимость учитывать поляризацию фона неба, а учитывается только яркость фона. Это является одним из преимуществ методики наблюдений с пятицветным полариметром. Однако полной компенсации поляризации фона неба, как показали наблюдения [12], не происходит, если яркость фона неба значительна. Обработка наблюдений, полученных с пятицветным полариметром, проводилась по программе Бердюгина и Шаховского [1].

Измерения поляризации Ангелины на 2.6-м телескопа ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории проводились в полосе *WR* (550...750 нм) с помощью одноканального фотометра-полариметра с фотоэлектронным умножителем в качестве приемника излучения. Полариметрический блок прибора состоит из непрерывно вращающегося со скоростью 33.3 об/с ахроматической пятикомпонентной четвертьволновой фазовой пластинки и установленной за ней призмы Глана. Блок включает оптико-механический узел контроля угла поворота модулятора. Система регистрации накапливает импульсы в восьми ячейках памяти компьютера в зависимости от угла поворота фазовой пластинки, импульсы накапливаются на протяжении  $1/8$  оборота пластинки для интервалов углов, равных  $0...25.5$ ,  $25.5...45^\circ$  и так далее с шагом  $22.5^\circ$ .

Безразмерные параметры Стокса  $u$  и  $q$  при наблюдениях на этом фотометре-поляриметре рассчитываются при помощи выражений

$$u = 314.16 \frac{N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_6 N_7 N_8}{N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_6 N_7 N_8},$$

$$q = 314.16 \frac{N_2 N_1 N_3 N_4 N_5 N_6 N_7 N_8}{N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_6 N_7 N_8},$$

где  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8$  — число накопленных каждым из восьми счетчиков импульсов после учета фона.

Фон неба измерялся в начале наблюдений Ангелины, в конце и во время наблюдений между сериями измерений астероида. Значения интенсивности фона интерполировались и учитывались для каждого измерения объекта.

Значения линейной поляризации рассчитывались из параметров Стокса  $u$  и  $q$ , полученных по наблюдениям Ангелины для каждой даты:

$$P = \sqrt{u^2 + q^2},$$

Позиционный угол плоскости поляризации в инструментальной системе координат рассчитывался по формуле

$$\text{tg} 2\psi = \frac{u}{q}.$$

Степень поляризации и позиционный угол плоскости поляризации по отношению к плоскости, ортогональной к плоскости рассеяния, выражаются через  $P_r$  и  $\psi_r$  [27]:

$$P_r = P \cos 2\psi_r,$$

$$\psi_r = (\psi - 90^\circ).$$

Ошибка определения степени линейной поляризации оценивалась двумя способами — из статистики накопленных импульсов и по дисперсии параметров Стокса, вычисленных для каждой серии в течение ночи. В качестве окончательной ошибки измерения степени поляризации из двух ошибок выбиралась наибольшая [2]. Ошибка определения угла плоскости поляризации в обоих случаях определялась по формуле

$$\frac{28.65}{P} \cdot P_r.$$

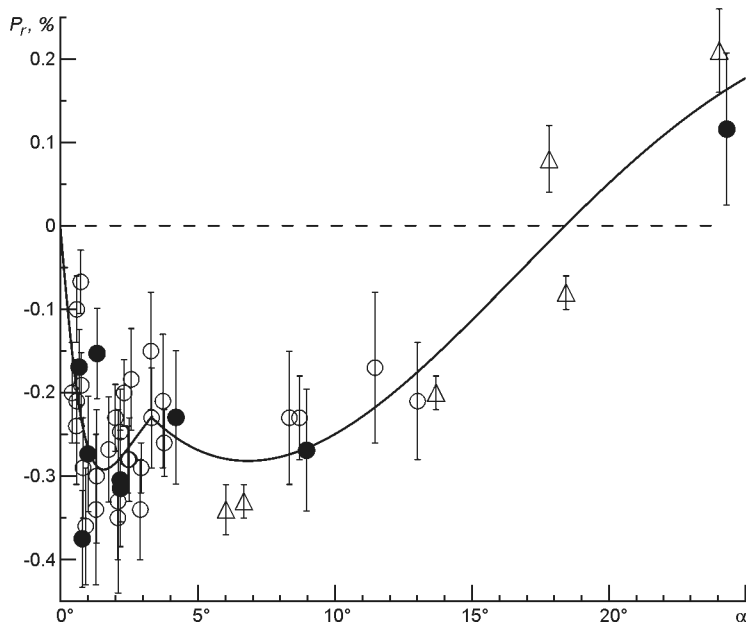
Для учета инструментальной поляризации на обоих телескопах производились наблюдения звезд-стандартов с нулевой поляризацией [22]. Точность определения инструментальной поляризации составляла 0.01...0.02 %. Коррекция за нуль-пункт положения инструментального позиционного угла плоскости линейной поляризации в эква-

ториальной системе определялась из наблюдений звезд-стандартов с большой поляризацией [11, 22].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты новых поляриметрических наблюдений астероида 64 Ангелина представлены в таблице, где приведены: средний момент наблюдения в UT, фазовый угол  $\alpha$ , измеренное значение линейной поляризации  $P$  и ее средняя квадратичная ошибка  $\sigma_P$ , позиционный угол плоскости поляризации  $\psi$  в экваториальной системе координат и его ошибка  $\sigma_\psi$ , степень поляризации  $P_r$  и позиционный угол плоскости поляризации  $\psi_r$  по отношению к плоскости, ортогональной к плоскости рассеяния. Мы представляем результаты в спектральных полосах  $R$  и  $WR$ , так как именно в этих полосах точность наблюдений была самая высокая.

Результаты наших наблюдений представлены в виде фазовой зависимости поляризации на рисунке. Для сравнения там же нанесены результаты наблюдений Розенбуш и др. [20] в фильтре  $R$  и результаты наблюдений Цельнера и Гради [28] в фильтре  $G$  (полоса, близкая к  $V$ ). Данные аппроксимированы составной функцией с двумя минимумами — стандартной функцией для сглаживания фазовых зависимостей поляризации астероидов [13] на больших фазовых углах и функцией  $y = a / (b + c + d \cdot \alpha^2)$  вблизи оппозиции.



Фазовая зависимость линейной поляризации астероида 64 Ангелина. Точки — представляемые результаты в полосе  $R$ , кружки — результаты наблюдений [20] в полосе  $R$ , треугольники — наблюдения [28] в фильтре  $G$ . Сплошная линия — аппроксимация составной функцией с двумя минимумами

Как можно видеть из рисунка, наши наблюдения на больших фазовых углах хорошо ложатся на регулярную ветвь фазовой зависимости поляризации Ангелины. Наблюдения на малых фазовых углах ( $\approx 2^\circ$ ) указывают на вторичный минимум поляризации, подтверждая наличие обнаруженного ранее поляриметрического оппозиционного эффекта. Его профиль несколько отличается от профилей, полученных во время предыдущих наблюдений. Фазовая зависимость поляризации Ангелины описывается составной функцией с двумя минимумами лучше, чем стандартным тригонометрическим полиномом с одним минимумом [13], потому что при аппроксимации первой функцией сумма квадратов отклонений равна 0.178, тогда как при аппроксимации второй функцией — 0.205.

Поскольку наблюдения, как правило, охватывают только часть периода осевого вращения астероида, то небольшие отличия характеристик оппозиционных эффектов для разных оппозиций, а также до и после оппозиции в одном появлении астероида, могут быть реальными и вызываться различиями физических свойств разных наблюдаемых частей поверхности [20]. На это указывают и наблюдаемые различия блеска астероида до и после оппозиции на одних и тех же фазовых углах [19]. Результаты спектральных исследований также указывают на неоднородность поверхности Ангелины. Так, Форназье и др. [8] не обнаружили в спектре астероида полосы поглощения на длине волны 0.92 мкм, о которой ранее сообщали Кларк и др. [6] и Бурбин и др. [5].

Таким образом, неоднородность физических характеристик поверхностного слоя астероида проявляется в фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдениях.

Несмотря на разброс данных, вызванных как ошибками наблюдений, так и причинами, отмеченными выше, фазовая зависимость поляризации астероида Ангелина явно демонстрирует два минимума отрицательной ветви поляризации. Один минимум, лежащий на  $\approx 7^\circ$ ,

#### Результаты поляриметрических наблюдений астероида 64 Ангелина

Дата, UT	$\alpha$ , град	$P$ , %	$P_s$ , %	$\beta$ , град	$\beta_s$ , град	$P_{\beta_s}$ , град	$P_r$ , %
Полоса $R$							
2008 сентябрь 28.8889	0.801	0.375	0.058	17.3	4	89.9	-0.375
2008 сентябрь 30.8596	0.691	0.174	0.045	122	7	83.3	-0.169
2008 октябрь 1.9843	1.014	0.294	0.069	93	7	79.2	-0.273
2008 октябрь 2.8802	1.341	0.236	0.054	69	6	65.2	-0.153
2008 октябрь 5.0125	2.196	0.319	0.070	78	6	85.2	-0.315
2008 октябрь 9.8747	4.218	0.264	0.080	89.7	9.2	104.8	-0.230
Полоса $WR$							
2008 октябрь 4.9677	2.189	0.306	0.050	80.3	3.9	87.3	-0.305
2011 ноябрь 15.1162	24.285	0.235	0.101	46.3	12.2	30.2	0.116
2012 сентябрь 18.8797	8.978	0.351	0.073	51.4	6	70.0	-0.269

относится к регулярной отрицательной ветви поляризации. Вторым минимумом лежит на  $1.5^\circ$ . Как показано в работе [16], близость полуширин фотометрического и поляриметрического оппозиционных эффектов служит прямым доказательством эффективности механизма обратного когерентного рассеяния для высокоальбедных тел Солнечной системы.

## ВЫВОДЫ

1. Новые поляриметрические наблюдения высокоальбедного астероида E-типа Ангелина на больших фазовых углах согласуются с полученными ранее наблюдениями и ложатся на регулярную ветвь поляризации.

2. Поведение фазовой зависимости поляризации на малых фазовых углах указывает на наличие поляриметрического оппозиционного эффекта в виде вторичного минимума отрицательной поляризации, что согласуется с предыдущими наблюдениями.

3. Характеристики поляриметрического оппозиционного эффекта несколько отличаются от характеристик, полученных для астероида во время других оппозиций. Это подтверждает неоднородность поверхностного слоя Ангелины.

4. Необходимо продолжение поляриметрических наблюдений Ангелины, чтобы более точно установить поведение фазовой зависимости линейной поляризации в области перехода от поляриметрического оппозиционного эффекта к регулярной ветви поляризации на фазовых углах  $3...5^\circ$ . Это позволит сделать окончательный вывод о форме фазовой зависимости астероида вблизи оппозиции.

1. Бердюгин А. В., Шаховской Н. М. Методика одновременного измерения четырех параметров Стокса в полосах *UBVRI* // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1993.—**87**.—С. 122—134.
2. Шаховской Н. М., Ефимов Ю. С. Поляризационные наблюдения нестационарных звезд и внегалактических объектов. I. Аппаратура и методика наблюдений и их обработки // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1972.—**45**.—С. 90—110.
3. Шкуратов Ю. Г. Дифракционный механизм формирования оппозиционного эффекта яркости поверхностей со сложной структурой // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—**4**, № 5.—С. 33—38.
4. Belskaya I. N., Kiselev N. N., Krugly Yu. N., et al. Opposition polarimetry and photometry of S and E-type asteroids // *Icarus*. —2003. —**166**, N 2. —P. 276—284.
5. Burbine T. H., Cloutis E. A., Bus S. J., et al. The detection of troilite (FeS) on the surfaces of E-class asteroids // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1998.—**30**.—P. 1025.
6. Clark B. E., Bus S. J., Rivkin A. S., et al. E-type asteroid spectroscopy and compositional modeling // *J. Geophys. Res.*—2004.—**109**, N E2.—E02001.
7. Durech J., Kaasalainen M., Herald D., et al. Combining asteroid models derived by lightcurve inversion with asteroidal occultation silhouettes // *Icarus*.—2011.—**214**, N 2.—P. 652—670.



8. Fornasier S., Migliorini A., Dotto E., Barucci M. A. Visible and near infrared spectroscopic investigation of E-type asteroids, including 2867 steins, a target of the Rosetta mission // *Icarus*.—2008.—**196**, N 1.—P. 119—134.
9. Gaffey M. J., Kelley M. S. Mineralogical variations among high E-type asteroids: Implications for asteroid igneous processes // *Proc. Lunar. Sci. Conf. XXXV*.—2004.—Abstract 1812.
10. 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**, N 2.—P. 365—374.
11. Hsu J.-C., Breger M. On standard polarized stars // *Astrophys. J.*—1982.—**262**, N 1.—P. 732—738.
12. Kiselev N. N., Shakhovskoj N. M., Efimov Yu. S. On the polarization opposition effect of E-type Asteroid 64 Angelina // *Icarus*.—1996.—**120**, N 2.—P. 408—411.
13. Lumme K., Muinonen K. A two-parameters system for linear polarization of some Solar System objects // *Asteroids, Comets, Meteors 1993* / Eds A.W. Harris, E. Bowell. — Houston: Lunar and Planetary Inst., 1993.— P. 194—197.
14. Mishchenko M. I. On the nature of the polarization opposition effect exhibited by Saturn's rings // *Astrophys. J.*—1993.—**411**, N 1.—P. 351—361.
15. Mishchenko M. I., Dlugach J. M. Coherent backscatter and the opposition effect for E-type asteroids // *Planet. Space Sci.*—1993.—**41**, N 3.—P. 173—181.
16. Mishchenko M. I., Rosenbush V. K., Kiselev N. N. Weak localization of electromagnetic waves and opposition phenomena exhibited by high-albedo atmosphereless solar system objects // *Appl. Opt.*—2006.—**45**, N 8.—P. 4459—4463.
17. Pirola V. A double image chopping polarimeter // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**27**.— P. 383—388.
18. Pirola V. Simultaneous five-color (UBVRI) photopolarimeter // *Radiation of circumstellar origin* / Eds G. V. Coyne, A. M. Magalhaes, A. F. Moffat, R. E. Schulte-Ladbeck, S. Tapia. — Vatican City State: Vatican Observatory, 1988.— P. 735—746.
19. Poutanen M. *UBV* photometry of Asteroid 64 Angelina // *Asteroids, Comets, Meteors* / Eds C.-I. Lagerkvist, H. Rickman. — Uppsala: Universitet Reprocentralen, 1983.— P. 45—48.
20. 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 2.—P. 222—234.
21. Rosenbush V. K., Shevchenko V. G., Kiselev N. N., et al. Polarization and brightness opposition effects for the E-type asteroid 44 Nysa // *Icarus*.—2009.—**201**, N. 2.—P. 655—665.
22. Serkowski K. Polarimeters for optical astronomy // *Planets, stars and nebulae. Studied with photopolarimetry* / Eds T. Gehrels. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1974.— P. 135—174.
23. Shepard M. K., Harris A. W., Taylor P. A., et al. Radar observations of Asteroids 64 Angelina and 69 Hesperia // *Icarus*.—2011.—**215**, N 2.—P. 547—551.
24. Shevchenko V. G., Tedesco E. F. Asteroid albedos deduced from stellar occultations // *Icarus*.—2006.—**184**, N 1.—P. 211—220.
25. Tedesco E. F., Williams J. G., Matson D. L., et al. Three-parameter asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 1151—1161.
26. Tholen D. J. Asteroid taxonomic classification // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews.—Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 1139—1150.

С. В. ЗАЙЦЕВ И ДР.

---

27. *Zellner B., Gehrels T., Gradie J.* Minor planets and related objects. XVI. Polarimetric diameters // *Astron. J.*—1974.—**79**.—P. 1100—1110.
28. *Zellner B., Gradie J.* Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids // *Astron. J.*—1976.—**81**.—P. 262—280.

Статья поступила в редакцию 24.10.13