

УДК 523.24

**А. М. Казанцев, Л. В. Казанцева**

Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета им. Тараса Шевченко  
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053  
ankaz51@ukr.net

**Дополнительные критерии выделения  
семейств астероидов и подтверждение эффекта  
пространственного разделения  
членов семейств по альбедо**

*Для более четкого выделения семейств астероидов использовано распределение  $D(a)$  размеров астероидов по большой полуоси и распределение количества  $N(p)$  астероидов по значению альбедо для отдельных семейств. На основании этих распределений выполнен анализ семейств, выделенных в работе [Masiero J. R. et al. // Astrophys. J.—2013.—770, N 1.—P. 22], установлены корректно и ошибочно выделенные семейства. Практически для всех корректно отобранных и не усеченных резонансами семейств наблюдается уменьшение среднего значения альбедо с увеличением большой полуоси. Для большинства из них такое уменьшение является статистически достоверным. Не выявлено ни одного семейства при статистически достоверном увеличении альбедо. Это подтверждает наши предыдущие выводы о действии в поясе астероидов негравитационного эффекта, приводящего к пространственному разделению астероидов с разными альбедо.*

*ДОДАТКОВІ КРИТЕРІЇ ВИДІЛЕННЯ СІМЕЙСТВ АСТЕРОЇДІВ ТА ПІДТВЕРДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ПРОСТОРОВОГО РОЗДІЛЕННЯ ЧЛЕНІВ СІМЕЙСТВА ЗА АЛЬБЕДО, Казанцев А. М., Казанцева Л. В. — Для більш чіткого виділення сімейств астероїдів використано розподіл  $D(a)$  розмірів астероїдів по великій півосі та кількості  $N(p)$  астероїдів по величині альбедо для окремих сімейств. На основі цих розподілів виконано аналіз сімейств, виділених у роботі [Masiero J. R. et al. // Astrophys. J.—2013.—770, N 1.—P. 22], встановлено коректно й помилково виділені сімейства. Практично для всіх коректно відібра-*

*них і не усічених резонансами сімейств спостерігається зменшення середнього значення альbedo зі збільшенням великої півосі. Для більшості з них таке зменшення є статистично достовірним. Немає жодного сімейства при статистично достовірному збільшенні альbedo. Це підтверджує наші попередні висновки про дію в поясі астероїдів негравітаційного ефекту, що призводить до просторового розділення астероїдів з різними альbedo.*

*SOME ADDITIONAL CRITERIA FOR ASTEROID FAMILY DETECTION AND CONFIRMATION OF THE EFFECT OF SPATIAL SEPARATION BY ALBEDO FOR FAMILY MEMBERS, by Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. — The distribution of asteroid sizes by semi-major axis,  $D(a)$ , and the distribution of asteroid numbers by albedo values,  $N(p)$ , for separate families are used for a more precise selection of asteroid families. On the basis of the distributions we analysed the families selected in [Masiero J. R. et al. // *Astrophys. J.*—2013.—770, N 1.—P. 22] and determined which families were selected correctly or incorrectly. Some decrease of the mean albedo with semi-major axis increasing is observed almost for all of the correctly selected families which are not truncated by resonances. For most of them the decrease is statistically plausible. No family is detected at a plausible increase of albedo. This confirms our previous conclusion on the existence of a non-gravitational effect in the asteroid belt which causes a spatial separation of asteroids with different albedos.*

## ВВЕДЕНИЕ

Семейства астероидов были выявлены К. Хираямой почти столетие назад, но до сегодняшнего дня их изучение представляет важную и интересную научную проблему. По характеристикам семейств можно изучать историю формирования пояса астероидов, физические свойства тел в его разных зонах и многое другое. Здесь важной проблемой остается четкое выделение тел отдельных семейств. Известно, что астероиды в каждом семействе должны иметь близкие значения т. н. собственных элементов орбит: больших полуосей  $a$ , эксцентриситетов  $e$  и наклонов  $i$ . Именно близость собственных элементов служит основой для выделения членов семейств относительно астероидов фона. Наиболее известными и авторитетными массивами собственных элементов содержатся в публикациях Милани и Кнезевича и доступны на сайте NASA (<http://pds.nasa.gov>).

Кроме простого отбора членов семейств по значениям собственных элементов есть более рафинированные подходы к выделению семейств, например Метод иерархического кластерирования (НСМ) [7]. Этот метод для выделения членов семейства, кроме близости собственных элементов, учитывает взаимные пространственные расстояния и скорости астероидов.

В последнее время появились большие массивы альbedo и размеров астероидов. Это массив данных IRAS [6], содержащий альbedo и размеры 2228 тел и массив WISE [5] с данными для более 130 тысяч астероидов. Используя альbedo и размеры астероидов, можно эффективнее отделять астероиды семейств от фона. Так, в работе [4] с использованием HCM и данных WISE альbedo астероидов были выделены 76 семейств с общей численностью более 38 тысяч тел. Все эти тела включены в базу WISE.

### КРИТЕРИИ ОТБОРА СЕМЕЙСТВ АСТЕРОИДОВ

Общепризнано, что каждое отдельное семейство получается в результате разрушения одного крупного тела. При этом обломки (члены семейства) разлетаются в разные направления с скоростями от нескольких десятков до нескольких сотен метров в секунду. Новообразовавшаяся популяция астероидов заполняет координатное пространство  $a$  —  $e$  —  $i$  в той зоне, где находились элементы орбиты родительского тела. Элементы орбит  $a$ ,  $e$ ,  $i$  новообразовавшихся членов семейства должны совпадать или быть очень близкими к современным соответствующим собственным элементам. Чем больше обломков, тем большей будет их концентрация относительно концентрации фона в данном координатном пространстве. Именно повышенная концентрация тел по отношению к астероидам фона была первым критерием для отбора семейств.

Понятно, что мелкие обломки в среднем разлетаются с большими скоростями, чем крупные. Поэтому большие полуоси орбит мелких тел будут сильнее отличаться от большой полуоси орбиты родительского тела, чем большие полуоси орбит крупных тел. Элементы орбит наиболее крупных обломков (обломка) могут практически совпадать с элементами орбиты родительского тела. Это означает, что распределение  $D(a)$  размеров тел семейства по большим полуосям орбит должно иметь центральный максимум с ниспадающими крыльями в обе стороны. Левое крыло (меньшие значения  $a$ ) обычно может быть немного короче правого крыла (большие  $a$ ), так как при изотропном разлете с равными скоростями уменьшения  $a$  несколько слабее его увеличения, что следует из интеграла энергии. В принципе под воздействием различных негравитационных эффектов (НГЭ) первоначальный вид распределения  $D(a)$  может несколько изменяться. Однако, поскольку любой из НГЭ в большей степени влияет на тела меньших размеров, то общий характер распределения (центральный максимум с ниспадающими крыльями) останется. Теперь сформулируем первый дополнительный критерий:

а) распределение размеров  $D(a)$  тел семейства по большой полуоси должно иметь центральный максимум с ниспадающими крыльями в обе стороны (необходимое условие). Правое крыло (большие  $a$ ), как правило, несколько длиннее левого.

Из распределения  $D(a)$  можно более точно определить центральное тело семейства, т. е. астероид, именем которого названо данное семейство. Этот астероид должен иметь не только максимальный размер, но на распределении располагаться в вершине центрального максимума или вблизи нее. Если максимальное тело семейства расположено вдали от максимума, то оно, вероятно, не относится к данному семейству. Тогда нужно выбрать следующий по размеру астероид, который расположен вблизи максимума. Это и будет центральное тело семейства.

Каждое родительское тело относится к какому-то определенному таксономическому типу. Поэтому альbedo всех членов семейства будут не очень сильно отличаться от альbedo данного типа. На этом основании можно сформулировать второй критерий:

б) распределение  $N(p)$  числа астероидов семейства по альbedo должно иметь один главный максимум с некоторым разбросом в обе стороны. В данном распределении не может быть два (или больше) подобных максимума. Главный максимум не может располагаться на самом краю распределения (необходимое условие).

В принципе семейства астероидов могут образовываться при столкновении двух астероидов с различными таксономическими типами. Если размеры столкнувшихся тел сопоставимы, то общая группа образовавшихся осколков может иметь бимодальное распределение  $N(p)$ . Однако эта группа, как правило, будет составлять два отдельных семейства. Ведь диапазоны собственных элементов орбит семейств  $a$ ,  $e$ ,  $i$  достаточно узкие. Поэтому даже не очень большие отличия элементов орбит столкнувшихся астероидов приведут к различным диапазонам собственных элементов осколков, относящихся к разным родительским телам. Если же произойдет столкновение двух тел с разными таксономическими типами и практически совпадающими элементами орбит, то именно критерий б позволит установить этот факт.

Применение названных критериев  $a$  и  $b$  становится возможным при наличии больших массивов данных альbedo и размеров астероидов.

В нашей работе выполнен анализ семейств, приведенных в работе [4] с применением дополнительных критериев на основе альbedo и размеров астероидов. При этом анализе была использована табл. 3 из работы [4], любезно предоставленная нам Джозефом Мазиеро, за что мы ему глубоко благодарны.

#### АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ ОТБОРА СЕМЕЙСТВ

В работе [4] приведен список 76 семейств, общая численность которых составляет 38297 астероидов. Все тела включены в базу WISE [5]. Названия семейств в анализируемой работе совпадает с номером максимального астероида по каталогу MPC, а сам размер соответствует

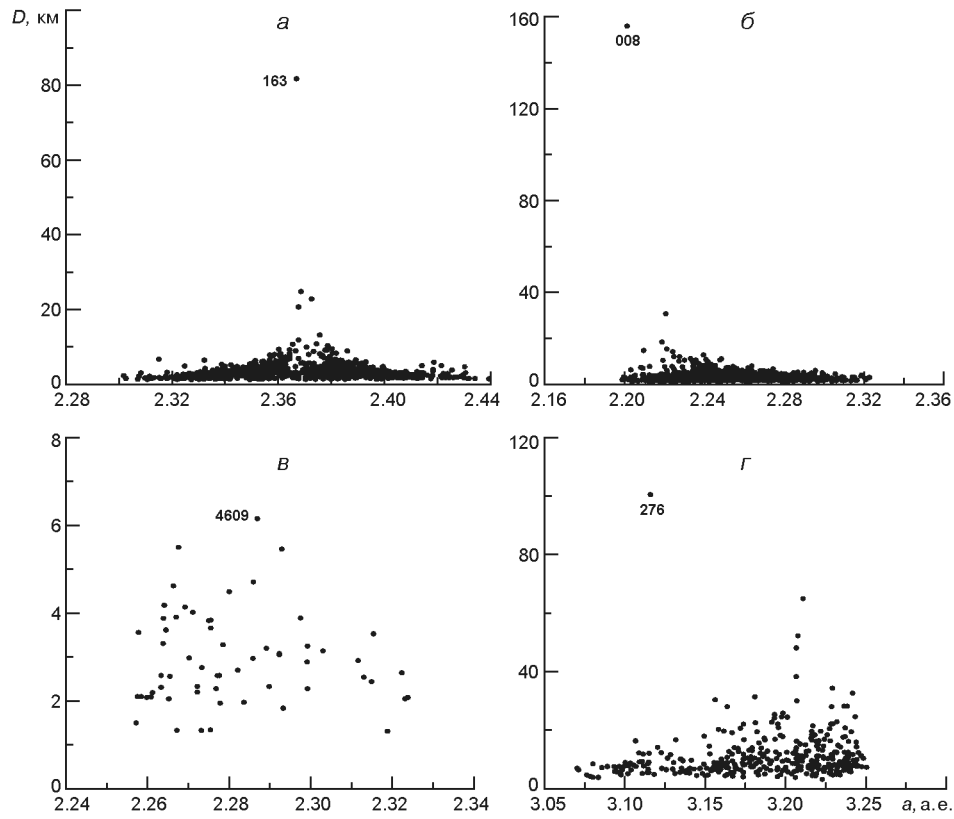


Рис. 1. Распределения  $D(a)$  для разных вариантов семейств: *a* — корректно отобранное, полное; *б* — корректно отобранное, срезанное резонансом; *в* — некорректно отобранное; *г* — семейство с неверно установленным главным астероидом

WISE-каталогу. Например, семейство 004 известно как семейство Весты.

Здесь мы не будем анализировать методику отбора семейств, использованную в работе [4]. Отметим лишь то, что вышеприведенные дополнительные критерии в ней не применялись. Анализ табл. 3 из работы [4] показал, что в данном случае отбор семейств сделан со значительным количеством ошибок.

По результатам анализа отбора все семейства можно условно разделить на четыре группы. Первая группа — это корректно отобранные семейства и не усеченные действием тех или иных резонансов в поясе астероидов. Корректность отбора семейства можно видеть по их распределениям  $D(a)$  и  $N(p)$ . Одним из таких семейств является семейство 163, распределение  $D(a)$  которого приведено на рис. 1, *a*. Это распределение четко отображает описанный выше процесс образования семейства. Из приведенных в работе [4] 76 семейств к первой группе можно отнести 21.

Вторая группа — это корректно отобранные семейства, но частично усеченные действием резонансов. Таких семейств 23. Одним из них является семейство 008 (Флоры), распределение  $D(a)$  которого приве-

дено на рис. 1, б. Хорошо видно, что семейство имеет центральный максимум, но левое крыло распределения полностью отсечено (в данном случае резонансом 6 с Сатурном).

К третьей группе относятся некорректно отобранные семейства. Одним из таких является малочисленное семейство 4609 (распределение  $D(a)$  приведено на рис. 1, в). Видно отсутствие центрального максимума и ниспадающих крыльев. Подобное распределение не может образоваться при дроблении одного крупного тела. Поэтому данную группу астероидов нельзя считать семейством. В анализируемой работе таких семейств 20.

Четвертую группу составляют семейства, которые отобраны с видимыми погрешностями. Некоторые из этих семейств содержат тела, включенные и в другие из рассматриваемых 76 семейств. Их распределения  $D(a)$  близки к классическим (как на рис. 1, а), но заметно значительное количество посторонних тел — «интерлопов». Это могут быть как астероиды фона, так и тела других семейств. Иногда такие тела можно обнаружить лишь по распределению  $N(p)$ , на котором отчетливо видны группы с разными альбедами.

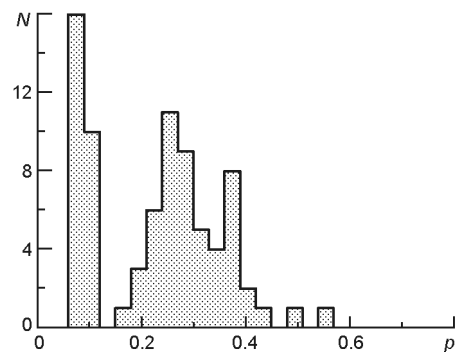


Рис. 2. Распределение  $N(p)$  семейства 2409

На рис. 2 приведено распределение  $N(p)$  для семейства 2409. Можно видеть, что астероиды с альбедами  $p = 0.06 \dots 0.12$  составляют отдельную группу по отношению к остальным телам семейства. К четвертой группе можно отнести 12 из приведенных в работе [4] семейств.

Из рис. 1 и 2 видно, что по распределениям  $D(a)$  и  $N(p)$  можно довольно уверенно проверять корректность отбора семейств. Ведь по диапазонам собственных элементов нельзя видеть структуру семейства, которая здесь хорошо просматривается. Кроме того, именно по распределению  $D(a)$  можно четко устанавливать главный астероид семейства. На рис. 1, г приведено распределение  $D(a)$  для семейства 276. Видно, что правое крыло семейства почти полностью усечено резонансом 2:1 с Юпитером. Главный астероид 276 расположен вдали от центрального максимума. Поэтому можно сделать вывод, что астероид 276 не относится к данному семейству. Интересно сравнить это распределение с рис. 1, б. Здесь астероид 008 также расположен на самом внутреннем краю диапазона больших полуосей, но он, тем не ме-

нее, является центральным телом семейства. Понятно, что без распределений  $D(a)$  это увидеть нельзя.

### ПРОЯВЛЕНИЕ НЕГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В СЕМЕЙСТВАХ

В наших предыдущих работах [1—3] указано на действие некоторого НГЭ, обуславливающего пространственное разделение астероидов с разными альbedo. Большие полуоси орбит астероидов с меньшими альbedo в среднем увеличиваются по сравнению с большими полуосями орбит тел с большими альbedo. Такой вывод сделан на основании численных расчетов эволюции орбит астероидов, а также из зависимостей  $p(a)$  для отдельных семейств астероидов по данным IRAS [6]. Каталог IRAS содержит альbedo и размеры 2228 астероидов. Это сравнительно немного. Поэтому вывод о существовании упомянутого НГЭ нуждается в проверке на большей выборке. Именно такой выборкой может быть каталог WISE, содержащий альbedo и размеры более 130 тысяч астероидов. Хотя точность каталога WISE не очень высока, но за счет больших массивов можно получить статистически достоверные результаты.

Действия упомянутого НГЭ можно выявлять из зависимостей альbedo от большой полуоси для отдельных семейств. Зразу после распада родительского тела распределение  $p(a)$  осколков должно быть близким к равномерному. Гравитационные возмущения в процессе эволюции орбит также не могут качественно повлиять на это распределение. Понятно, что зависимости  $p(a)$  уместно рассматривать лишь для корректно отобранных семейств, не усеченных резонансами (группа 1). Для всех этих семейств строились усредненные линейные зависимости  $p(a)$

$$p = b_1 a + b_0. \quad (1)$$

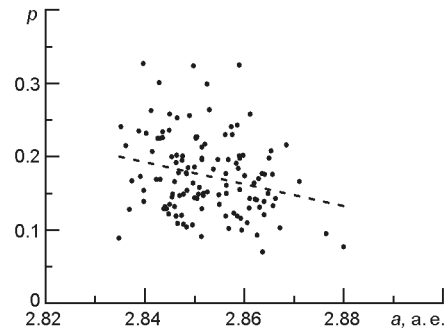
Возможное влияние НГЭ на астероиды семейства определяется по знаку и достоверности коэффициента  $b_1$ . Если этот коэффициент меньше нуля при достаточной статистической достоверности, то можно говорить о реальном проявлении действия НГЭ на тела данного семейства. В математической статистике достаточным принимается уровень «2-сигма», что соответствует квантилю 0.05. Иными словами, если некоторая величина достоверна на уровне «2-сигма», то вероятность случайности ее значения не больше 5 %.

В таблице приведены некоторые характеристики семейств группы 1, а именно: номер центрального астероида, количество  $N$  тел в семействе, диапазоны значений собственных элементов  $a$ ,  $e$ ,  $i$  и альbedo  $p$ , значения коэффициентов  $b_1$  усредненной зависимости  $p(a)$  и уровень их достоверности  $k$ . Следует отметить, что зависимости типа (1) строились для диапазонов альbedo от 0.02 до 0.60. Значения альbedo вне этого диапазона вполне обоснованно можно считать ошибочными.

Характеристики семейств группы 1

| Семейство | $N$  | $a$ , а. е. | $e$         | $i$ , град  | $p$         | $b_1$ | Уровень достоверности $k$ |
|-----------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|---------------------------|
| 004       | 1331 | 2.258—2.462 | 0.081—0.124 | 5.64—7.56   | 0.067—0.843 | -0.28 | 4.0                       |
| 020       | 203  | 2.369—2.448 | 0.147—0.174 | 1.22—1.80   | 0.072—0.581 | -0.05 | 0.2                       |
| 135       | 740  | 2.320—2.476 | 0.160—0.219 | 2.00—2.50   | 0.123—0.548 | -0.33 | 3.5                       |
| 1646      | 46   | 2.316—2.370 | 0.093—0.104 | 7.70—8.45   | 0.067—0.423 | -0.46 | 0.6                       |
| 012       | 269  | 2.295—2.448 | 0.174—0.212 | 8.36—10.96  | 0.029—0.152 | +0.02 | 0.5                       |
| 1715      | 178  | 2.354—2.453 | 0.204—0.252 | 10.07—11.91 | 0.029—0.154 | +0.07 | 0.9                       |
| 163       | 1093 | 2.302—2.440 | 0.189—0.233 | 4.12—6.42   | 0.021—0.151 | -0.03 | 0.2                       |
| 005       | 94   | 2.563—2.604 | 0.182—0.217 | 3.98—4.90   | 0.066—0.629 | -0.35 | 3.4                       |
| 808       | 90   | 2.711—2.787 | 0.127—0.139 | 4.76—5.34   | 0.071—0.543 | +0.27 | 0.7                       |
| 363       | 512  | 2.689—2.789 | 0.025—0.060 | 4.77—5.73   | 0.024—0.149 | +0.06 | 1.5                       |
| 272       | 861  | 2.748—2.819 | 0.040—0.060 | 3.90—5.18   | 0.01—0.153  | -0.01 | 0.3                       |
| 144       | 184  | 2.614—2.709 | 0.172—0.200 | 3.39—4.50   | 0.026—0.129 | -0.01 | 0.2                       |
| 3811      | 61   | 2.539—2.610 | 0.103—0.111 | 10.67—10.95 | 0.019—0.131 | -0.22 | 2.0                       |
| 569       | 357  | 2.594—2.704 | 0.170—0.191 | 1.75—2.85   | 0.024—0.123 | -0.01 | 0.2                       |
| 1128      | 201  | 2.754—2.816 | 0.045—0.052 | 0.51—1.13   | 0.023—0.102 | +0.01 | 0.2                       |
| 221       | 5718 | 2.937—3.158 | 0.022—0.144 | 8.50—12.82  | 0.066—0.558 | -0.18 | 13.4                      |
| 3985      | 126  | 2.835—2.880 | 0.119—0.126 | 14.83—15.24 | 0.070—0.335 | -1.49 | 2.8                       |
| 3330      | 734  | 3.100—3.189 | 0.179—0.222 | 9.39—11.02  | 0.014—0.143 | +0.03 | 0.7                       |
| 283       | 315  | 3.027—3.072 | 0.102—0.130 | 8.69—9.65   | 0.016—0.121 | -0.20 | 2.6                       |
| 702       | 49   | 3.158—3.247 | 0.006—0.026 | 20.88—22.42 | 0.029—0.146 | -0.22 | 0.8                       |
| 928       | 85   | 3.091—3.184 | 0.181—0.206 | 15.88—17.03 | 0.017—0.110 | -0.22 | 2.7                       |

Рис. 3. Зависимость  $p(a)$  для семейства 3985



Из таблицы видно, что для шести семейств значение коэффициента  $b_1$  положительны, но их статистическая достоверность невысока. Кроме того, пять значений  $b_1$  из этих шести меньше 0.1, т. е. распределение  $p(a)$  близко к равномерному. Для остальных 15 семейств коэффициенты  $b_1$  меньше нуля, причем в восьми случаях их достоверность на уровне не ниже «2-сигма». Особенно высокая достоверность для семейства 221 (Эос). Можно еще отметить семейство 3985 с наиболее крутым спадом альбеда. Это семейство хотя относительно немногочисленное, но с достаточно высокой достоверностью коэффициента  $b_1$ . Оно находится в той зоне собственных элементов  $a - e - i$ , где нет близко расположенных других семейств, а концентрация астероидов фона в десятки раз ниже концентрации тел данного семейства. Поэто-



му вероятность попадания «интерлопов» в это семейство крайне мала. Распределение  $p(a)$  и усредненная зависимость (пунктир) для семейства 3985 показаны на рис. 3.

Таким образом, данные таблицы подтверждают действие в поясе астероидов негравитационного эффекта, обуславливающего пространственное разделение тел с разными альбедо.

## ВЫВОДЫ

Предложенные дополнительные критерии выделения семейств астероидов по распределениям  $D(a)$  и  $N(p)$  являются весьма эффективными для корректного отсеивания посторонних тел, для определения полноты семейства и его главного астероида. Без использования этих критериев значительная часть семейств может выделяться с заметными ошибками.

Практически для всех корректно отобранных и не усеченных резонансами семейств наблюдается уменьшение среднего значения альбедо с увеличением большой полуоси. Для большинства из них такое уменьшение является статистически достоверным. Не выявлено ни одного семейства при статистически достоверном увеличении альбедо. Это подтверждает наши предыдущие выводы [1—3] о действии в поясе астероидов негравитационного эффекта, приводящего к пространственному разделению астероидов с разными альбедо.

1. Kazantsev A. M. Possible effect of spatial separation of bright and dark asteroids // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2007.—**23**, N 6.—P. 258—264.
2. Kazantsev A. M. Spatial separation effect of asteroids with different albedos // arXiv0806.2717.—2008.—P. 1—21.
3. Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. On the residuals in asteroid catalogs and a possible nongravitational effect // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2008.—**24**, N 5.—P. 248—252.
4. Masiero J. R., Mainzer A. K., Bauer J. M., et al. Asteroid family identification using the hierarchical clustering method and WISE/NEOWISE physical properties // *Astrophys. J.*—2013.—**770**, N 1.—P. 22.
5. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., et al. Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters // *Astrophys. J.*—2011.—**741**, N 2.—P. 20.—(arXiv:1109.4096).
6. Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D. The supplemental IRAS minor planet survey // *Astron. J.*—2002.—**123**.—P. 1056—1085.
7. Zappala V., Cellino A., Farinella P., Knezevic Z. Asteroid families. I. Identification by hierarchical clustering and reliability assessment // *Astron. J.*—1990.—**100**, N 6.—P. 2030—2046.

Статья поступила в редакцию 04.04.14