

УДК 521.3 + 523.44

А. М. Казанцев, Л. В. Казанцева

Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

О невязках в астероидных каталогах и возможном негравитационном эффекте

В одной из наших работ на основании численных расчетов эволюции орбит астероидов сделан вывод о возможности действия в Солнечной системе негравитационного эффекта, вызывающего пространственное разделение астероидов с разными альбедами и с размерами в десятки километров. С целью поиска новых аргументов мы выполнили анализ невязок в использованных каталогах орбит астероидов на 1996 г. и на 2006 г. Получено, что для орбит с большими значениями невязок зависимости, указывающие на возможность негравитационного эффекта, выражены более четко, чем аналогичные зависимости для орбит с меньшими значениями невязок. Этот результат можно рассматривать как косвенное подтверждение отмеченного негравитационного эффекта.

ПРО НЕВ'ЯЗКИ В АСТЕРОЇДНИХ КАТАЛОГАХ ТА МОЖЛИВИЙ НЕГРАВІТАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ, Казанцев А. М., Казанцева Л. В. — В одній із наших робіт на основі чисельних розрахунків еволюції орбіт астероїдів зроблено висновок про можливість дії у Сонячній системі негравітаційного ефекту, що викликає просторове розділення астероїдів з різними альбедами та з розмірами в десятки кілометрів. З метою пошуку нових аргументів ми виконали аналіз невіязок у використаних каталогах орбіт астероїдів на 1996 р. та на 2006 р. Отримано, що для орбіт з більшими значеннями невіязок залежності, що вказують на можливість існування негравітаційного ефекту, виражені чіткіше, ніж аналогічні залежності для орбіт з меншими значеннями невіязок. Цей результат можна розглядати як непряме підтвердження зазначеного негравітаційного ефекту.

ON RESIDUALS IN ASTEROID CATALOGUES AND ON A POSSIBLE NONGRAVITATIONAL EFFECT, by Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. — In the previous paper one of the authors point to an possible existence of non-gravitational effect in the solar system which causes spatial separation of asteroids with different albedos and with sizes of some tens kilometres. Such conclusion was made on the basis of numeral calculations of asteroid orbit evolutions as well as on the basis of the analysis of asteroid albedo distribu-

tions. In order to find new arguments «for» or «against» the conclusion, we carried out the analysis of residuals in the asteroid orbit catalogues for 1996 and 2006. It is obtained that for the orbits with larger residuals the dependences pointing to the possibility of non-gravitational effect existence are appeared more clear and significant than corresponding dependences for the orbits with lesser residuals. This result can be considered as indirect confirmation of the possible existence of the non-gravitational effect.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе одного из авторов [2] сделан вывод о возможности действия в Солнечной системе негравитационного эффекта, приводящего к пространственному разделению астероидов с разными значениями альbedo и размерами в десятки километров.

Кратко суть аргументации состоит в следующем. Были выполнены численные расчеты эволюции орбит астероидов от эпохи 1996 г. к эпохе 2006 г. Используемый численный метод интегрирования описан в работе [1]. Учитывались возмущения от восьми планет, Плутона, Цереры, Паллады и Весты. Расчеты проводились для астероидов, включенных в каталог IRAS [5], содержащий 2228 значений альbedo астероидов (p). Из этих астероидов была составлена выборка, включающая тела главного пояса с размерами от 10 до 50 км. Крупные астероиды были исключены потому, что для них негравитационные эффекты проявляются минимально. Мелкие исключены потому, что их орбиты в среднем должны быть менее точными. Такие астероиды открыты позже, и их орбиты определены на меньшем временном интервале. Кроме того, они имеют слабый блеск, что затрудняет их регулярные наблюдения.

Затем были определены разности da между каталожными и расчетными значениями больших полуосей на 2006 г. Если $da > 0$, то каталожное значение a больше расчетного. Оказалось, что есть характерные зависимости значений da от альbedo астероидов. С увеличением альbedo da в среднем уменьшается. На основании такой зависимости $da(p)$ и было сделано предположение о возможности действия в Солнечной системе некоторого негравитационного эффекта. Такое предположение получило определенное подтверждение при анализе зависимостей альbedo от большой полуоси орбит астероидов семейств.

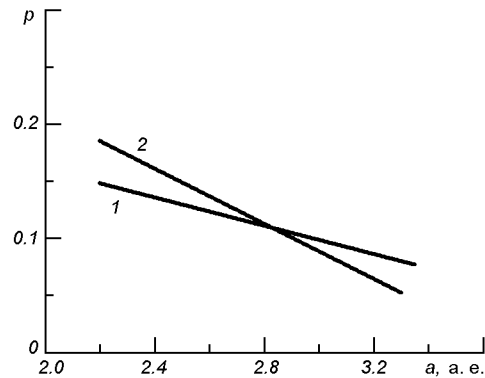
Следует отметить, что зависимость $da(p)$ более четко проявляется для астероидов на орбитах с большими наклонами. В работе [2] такая особенность была интерпретирована тем, что при малых наклонах есть большая вероятность столкновений астероидов с другими мелкими телами. Следовательно, действие возможного негравитационного эффекта будет замываться.

В настоящей работе представлены новые аргументы в пользу указанного негравитационного эффекта, а также дополнительные данные, объясняющие более четкое проявление зависимости $da(p)$ при больших наклонах орбит.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЛЬBEDO АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА

Факт зависимости среднего значения альbedo астероидов главного пояса от больших полуосей орбит известен давно. Астероиды, движущиеся ближе к

Рис. 1. Усредненные зависимости альbedo от большой полуоси орбит для астероидов главного пояса всех размеров



Солнцу, имеют в среднем бóльшие значения альbedo. На сегодня этот факт объясняется первичным распределением вещества в зоне формирования пояса астероидов.

Как отмечено выше, в работе [2] было установлено, что зависимость $da(p)$ более четко проявляется для астероидов на орбитах с большими наклонами. В связи с этим представляет интерес рассмотреть зависимости $p(a)$ для тел главного пояса астероидов при разных диапазонах наклонов орбит.

Усредненные зависимости $p(a)$ для всего главного пояса представлены на рис. 1. Значения альbedo астероидов взяты из каталога IRAS [5], наиболее представительного на сегодняшний день. Хотя имеются публикации, указывающие на наличие заметных ошибок в этом каталоге [3], однако для исследований, требующих больших выборок, он наиболее приемлем. Зависимости приведены для разных диапазонов наклонов орбит и для простоты аппроксимированы линейными функциями:

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

Линия 1 соответствует диапазону наклонов от 0 до 5° (458 астероидов), линия 2 — наклоны больше 15° (416 астероидов). Хорошо видно, что линии по-разному наклонены к оси a . То есть астероиды с меньшими наклонами орбит имеют в среднем меньшую дифференциацию значений альbedo, чем астероиды с большими наклонами орбит.

В принципе можно предложить довольно простое и логичное объяснение данному факту. Поверхности астероидов со временем покрываются пылинками и мелкими частицами, образовавшимися при столкновениях других тел. При этом альbedo очень светлых поверхностей должно уменьшаться, а очень темных — увеличиваться. Максимальная концентрация пылевых частиц должна быть вблизи плоскости эклиптики. Следовательно, астероиды на орбитах с меньшими наклонами должны быстрее покрываться реголитом, что и будет объяснением зависимостей на рис. 1. Таким образом, тот факт, что зависимости $da(p)$ более четко проявляются для астероидов с большими наклонами орбит, можно объяснить физическими свойствами поверхностей астероидов.

Ниже мы будем анализировать распределения для астероидов с размерами от 10 до 50 км. Поэтому здесь также следует привести зависимости типа (1) для астероидов в этом диапазоне размеров. На рис. 2 приведены зависимости для трех диапазонов наклонов орбит: 1 — от 0...5°, 2 — от 5...15°, 3 — больше 15°. Видно, что увеличение дифференциации альbedo

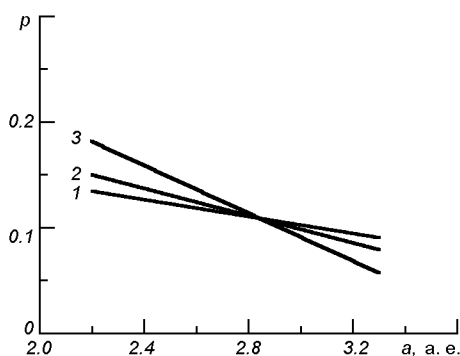


Рис. 2. Усредненные зависимости альбедо от большой полуоси орбит для астероидов главного пояса с размерами от 10 до 50 км

астероидов с увеличением наклонов орбит носит не случайный, а систематический характер. Коэффициент b_1 для зависимости 1 почти в три раза меньше, чем для зависимости 3. Такое различие зависимостей является существенным по критерию Колмогорова — Смирнова на уровне значимости ниже 0.02, а по критерию Фишера — менее 0.001.

Приведенное выше объяснение изменения зависимости $p(a)$ с изменением наклонов орбит за счет покрытия астероидов пылинками является возможным, но не обязательно единственным. Главное, что само изменение зависимости $p(a)$ является реальным.

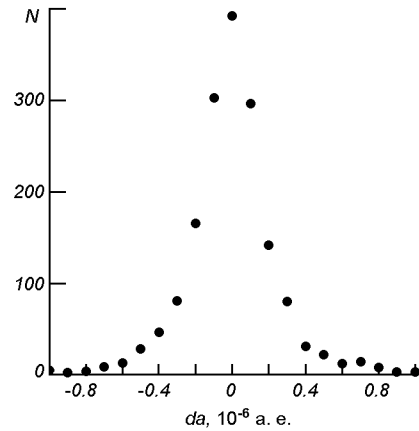
ВЛИЯНИЕ КАТАЛОЖНЫХ ОШИБОК И НЕВЯЗОК НА ПРОЯВЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОГО НЕГРАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Как уже отмечалось, предположение о возможности негравитационного эффекта было сделано в работе [2] на основании анализа зависимостей $da(p)$. При этом число орбит астероидов, включенных одновременно в каталог IRAS [5], каталог орбит на 1996 г. [4] и каталог MPC на 2006 г. (эпоха 6 марта 2006 г.), составило 1694. Для дальнейшего анализа из них были отобраны астероиды с размерами от 10 до 50 км и с наклонами орбит $i > 10^\circ$. Объяснения для такого отбора приведены выше. Кроме того, из рассмотрения были исключены орбиты с абсолютными значениями величины $da > 4 \cdot 10^{-7}$ а. е. (В каталогах большие полуоси орбит приведены с точностью до 10^{-7} а. е.) Такой отбор был объяснен тем, что большие разности между каталожными и расчетными значениями больших полуосей, вероятно, обусловлены ошибками в каталожных элементах орбит астероидов. Здесь мы собираемся более детально остановиться на влиянии ошибок и невязок в астероидных каталогах на зависимость $da(p)$. Для этого будут использованы те же каталоги и результаты тех же расчетов, что и в работе [2].

Сразу необходимо отметить, что ошибки элементов орбит и невязки — это разные величины. Ошибками будем называть разности между точными и каталожными элементами. Точные элементы — это близкие к каталожным, но неизвестные нам величины, которые точно определяют оскулирующую орбиту конкретного астероида на указанную эпоху.

Невязки — это средние квадратичные значения разностей между вычисленными и наблюдаемыми положениями астероидов. Наблюдаемые положения, которые сильно отличаются от вычисленных, исключаются из массива для определения орбиты. Поэтому очень больших невязок в

Рис. 3. Зависимость количества N орбит астероидов от величины da



каталогах нет. В каталоге на 1996 г. значения невязок лежат в пределах $0.4...3.3''$, в каталоге на 2006 г. — от 0.5 до $1.28''$.

Вероятно, при больших невязках возможны большие значения ошибок, обусловленных погрешностями наблюдательных данных. Однако есть принципиальная возможность того, что при больших невязках могут быть меньшие ошибки.

При выявлении возможного негравитационного эффекта следует максимально исключить орбиты с заметными ошибками. Такие орбиты должны нивелировать действие искомого эффекта. На наш взгляд, именно значения da могут служить некоторым аналогом ошибок орбит. На рис. 3 приведена зависимость количества орбит от величины da . Орбиты с очень большими разностями ($da > 10^{-6}$ а. е.) здесь не учтены. Видно, что нулевое значение da соответствует максимальному количеству орбит. Это говорит о том, что погрешность численных расчетов до последнего знака соответствует погрешности каталожных значений больших полуосей. Если программа точно вычисляет эволюцию одних орбит, то все остальные орбиты также должны быть просчитаны точно.

Большие значения da можно объяснить либо влиянием астероидов, которые не учитывались в численных расчетах, либо каталожными ошибками. Во всяком случае орбиты с меньшими значениями da должны в среднем иметь меньшие каталожные ошибки. Величины da , обусловленные влиянием возможного негравитационного эффекта должны лежать в очень узком диапазоне. Поэтому для выявления подобного эффекта следует сделать выборку орбит с минимальными значениями da . С другой стороны, поскольку влияние подобного эффекта можно выявить лишь статистическим методом, то лучше иметь более многочисленную выборку. Поэтому мы ограничились значениями $da = \pm 4 \cdot 10^{-7}$ а. е. Из рис. 3 можно видеть, что такие значения da являются оптимальными. При этих значениях крутой спад зависимости $N(da)$ сменяется на плавный.

Таким образом, из 1694 вычисленных орбит для выявления возможного негравитационного эффекта была сформирована выборка, ограниченная по размерам астероидов (от 10 до 50 км), по наклонам орбит ($i > 10^\circ$) и по значениям da ($da = \pm 4 \cdot 10^{-7}$ а. е.). При этом все три диапазона получили свое обоснование.

Сформированная таким образом выборка насчитывает 436 орбит. Усредненная зависимость $da(p)$ для этих орбит, аппроксимированная линейной

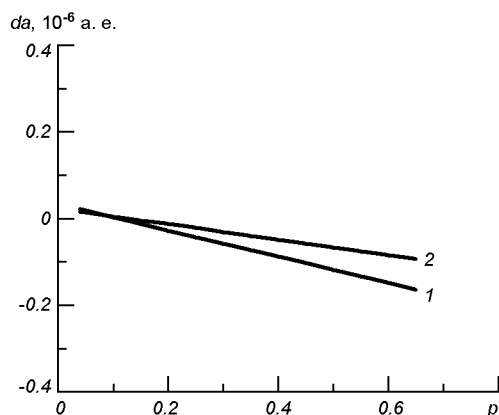


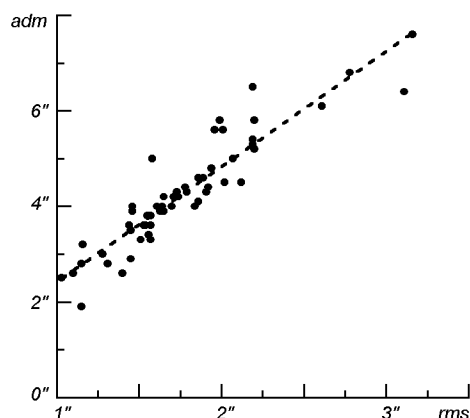
Рис. 4. Усредненные зависимости $da(p)$ для орбит с разными диапазонами da

функцией типа (1), приведена на рис. 4 (линия 1). Соответствующий коэффициент b_1 почти в три раза превышает свою стандартную ошибку. По критерию Фишера данная зависимость статистически существенна на уровне значимости ниже 0.005. Еще раз отметим, что подобная зависимость свидетельствует о возможности существования в Солнечной системе некоторого негравитационного эффекта, приводящего к пространственному разделению астероидов с разными альбедо. В работе [2] приведена детальная аргументация в пользу такого вывода. Здесь заметим, что данная выборка 436 орбит должна иметь в среднем меньшие каталожные ошибки, чем группа не вошедших в нее орбит. Если взять такую же выборку (размеры от 10 до 50 км, наклоны орбит больше 10°), но с большими значениями da (от -1.0 до 1.0), то соответствующая усредненная зависимость $da(p)$ (рис. 4, линия 2) станет менее выраженной и статистически не существенной. Коэффициент регрессии b_1 практически равен своей стандартной ошибке. Как отмечено выше, орбиты с большими значениями da должны иметь в среднем большие каталожные ошибки. Следовательно, зависимость $da(p)$ более четко выражена и более существенна для более точных орбит. Это также может быть некоторым аргументом в пользу предположения о возможности негравитационного эффекта.

Что касается невязок, то их роль в проявлении искомого негравитационного эффекта совсем иная. Напомним, что невязки — это разности между вычисленными и наблюдаемыми положениями астероидов. При вычислении расчетных положений астероидов никакие негравитационные эффекты не учитываются. Следовательно, реальное влияние какого-либо негравитационного эффекта на движение астероидов должно приводить к увеличению значений невязок. В нашем случае это означает, что если такой эффект есть, то зависимость $da(p)$ должна быть более четко выражена для орбит с большими невязками. Подобное возможное проявление негравитационного эффекта следует проверить на нашей выборке.

Здесь необходимо обратить внимание на то, что в каталоге на 1996 г. [4] значения невязок приведены не для всех орбит. В то время в ежегодниках «Эфемериды малых планет» было принято приводить подобные данные только для вновь вычисленных или уточненных элементов на основании новых наблюдательных данных. При этом не для всех таких орбит приводились значения невязок (rms). Для некоторых вместо невязок приведены значения максимального отклонения (dm). Так, в каталоге на 1996 г., содержащего элементы орбит 6160 астероидов, приведены сведения

Рис. 5. Зависимость абсолютных значений максимальных отклонений от величин невязок



о новых элементах для 959 орбит. Для 60 % из них указаны значения невязок, для остальных 40 % — максимальные отклонения. Понятно, что значения невязок и максимальных отклонений для остальных орбит, включенных в этот каталог, должны содержаться в предыдущих выпусках ежегодника. Оказалось, что для нашей выборки из 1694 орбит такие величины содержатся в каталогах до 1982 г. включительно.

Обычно считается, что значения невязок rms в три раза меньше соответствующих абсолютных значений максимальных отклонений adm . Для проверки справедливости такого мнения мы проанализировали связь между этими величинами, используя данные ежегодника «Эфемериды малых планет на 1982 год». Здесь для некоторых орбит приведены одновременно значения и невязок, и максимальных отклонений. Соответствующая зависимость $adm(rms)$ приведена на рис. 5. Штриховой линией обозначена МНК-аппроксимация

$$adm = 2.42rms - 0.01.$$

Из рис. 5 видно заметный разброс точек относительно усредненной зависимости. Следовательно, мнение о том, что значения невязок в три раза меньше максимального отклонения является довольно упрощенным. Поэтому для дальнейших оценок мы использовали как значения adm , так и rms без замены одних величин другими.

Теперь еще раз обратимся к выборке орбит, для которой зависимость $da(p)$ приведена на рис. 4 (линия 1). Выборка содержит 436 орбиты. Здесь для каталога 1996 г. $rms_{96} = 0.50 \dots 3.30''$, $dma = 1.20 \dots 7.40''$, для каталога 2006 г. $rms_{06} = 0.51 \dots 1.28''$. Более четверти значений rms_{06} не превышают величины $0.56''$. Из этой выборки было составлено четыре дополнительные подвыборки с разными диапазонами невязок. (Здесь и в дальнейшем при использовании термина «диапазон невязок» будем иметь в виду также и диапазон максимальных отклонений). В первую подвыборку включены орбиты с минимальными невязками ($rms_{96} \leq 1.5''$, $dma \leq 3.0''$, $rms_{06} \leq 0.56''$). Их количество составило 78. Вторая подвыборка включает орбиты без максимальных невязок ($rms_{96} \leq 1.7''$, $dma \leq 4.5''$, $rms_{06} \leq 0.8''$). Численность подвыборки — 304. В третью подвыборку вошли орбиты без минимальных невязок ($rms_{96} \geq 1.0''$, $da \geq 2.0''$, $rms_{06} \geq 0.56''$). Численность подвыборки — 247. Четвертую подвыборку составили орбиты с максимальными невязками ($rms_{96} \geq 1.65''$, $dma \geq 2.5''$, $rms_{06} \geq 0.60''$); их количество

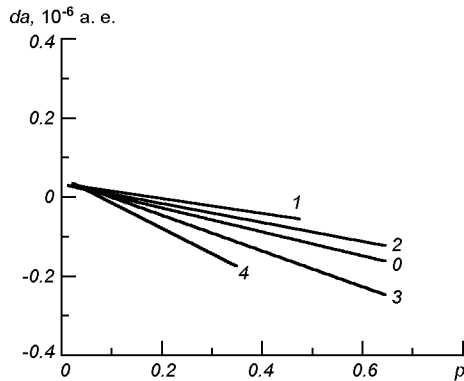


Рис. 6. Усредненные зависимости $da(p)$ для орбит с разными диапазонами невязок и максимальных отклонений

— 81. Таким образом, были составлены четыре подвыборки с разными диапазонами невязок. Среднее значение невязок увеличивается с увеличением номера подвыборки. Сюда еще можно добавить полную выборку орбит (436). Назовем ее нулевой. Средние значения невязок полной выборки лежат между соответствующими величинами подвыборок 2 и 3.

Для каждой из подвыборок были построены распределения $da(p)$. Их МНК-аппроксимации приведены на рис. 6. Номер зависимости соответствует номеру подвыборки. Цифрой 0 обозначена зависимость для полной выборки, приведенная ранее на рис. 4 (линия 1). Сами распределения орбит не приведены, поскольку они накладываются друг на друга и заполняют все координатное пространство. Видно, что для орбит с большими невязками значения da более круто уменьшаются с увеличением альбедо. Как и прежде, данные зависимости аппроксимированы линейными функциями типа (1). Абсолютные значения коэффициентов b_1 увеличиваются с увеличением невязок. Зависимости 0 и 3 статистически достоверны на уровне значимости менее 0.005, зависимость 4 — на уровне значимости менее 0.04.

Данные о подвыборках, невязках и коэффициентах приведены в таблице. Здесь указаны: N_s — номер подвыборки, rms_{96} , dma и rms_{06} — соответствующие диапазоны невязок и отклонений, N_{orb} — количество орбит подвыборки, b_1 — значения коэффициентов в соответствующих линейных аппроксимациях типа (1).

Нами были рассмотрены другие подвыборки, кроме 1—4. При этом следует отметить, что увеличение средних значений невязок не сопровождается постоянным увеличением наклона зависимости $da(p)$. Иногда имеют место небольшие отклонения. Однако средняя тенденция сохраняется.

Данные о подвыборках и коэффициентах усредненных зависимостей $da(p)$

N_s	rms_{96}	dma	rms_{06}	N_{orb}	b_1
1	0.50—1.50"	1.3—3.0"	0.51—0.56"	78	-0.099
2	0.50—1.70"	1.3—4.5"	0.51—0.80"	304	-0.240
0	0.50—3.30"	1.3—7.4"	0.51—1.28"	436	-0.303
3	1.00—3.30"	2.0—7.4"	0.56—1.28"	237	-0.452
4	1.65—3.30"	2.5—7.4"	0.60—1.28"	81	-0.644

Увеличение наклона зависимости $da(p)$ с увеличением значений невязок можно рассматривать как свидетельство в пользу высказанного предположения о возможности негравитационного эффекта. Кроме того, этот результат говорит о том, что на значения невязок в каталогах орбит астероидов частично может влиять предполагаемый негравитационный эффект. Действительно, если для некоторых астероидов негравитационный эффект проявляется сильнее, то их орбиты будут иметь большие значения невязок. Понятно, что для таких астероидов усредненная зависимость $da(p)$ должна иметь больший наклон.

ВЫВОДЫ

Зависимости среднего значения альbedo астероидов главного пояса от большой полуоси орбит имеют более крутой спад для тел на орбитах с большими наклонами. Это может быть обусловлено более быстрым покрытием пылинками и мелкими частицами тел на орбитах с меньшими наклонами.

Зависимости $da(p)$ более круто и четко выражены при больших значениях невязок в астероидных каталогах. Этот факт может служить подтверждением высказанного ранее предположения о возможности негравитационного эффекта в Солнечной системе, приводящего к пространственному разделению астероидов с разными альbedo.

Авторы благодарят В. А. Шора за предоставление отдельных материалов и консультации.

1. Казанцев А. М. Простой метод численных расчетов эволюции орбит околоземных астероидов // Астрон. Вестн.—2002.—36, № 1.—С. 48—54.
2. Казанцев А. М. О возможном эффекте пространственного разделения светлых и темных астероидов // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—23, № 6.—С. 349—358.
3. Лушичко Д. Ф. Улучшенные IRAS-альbedo и размеры астероидов // Астрон. Вестн.—1998.—32, № 2.—С. 141—146.
4. Эфемериды малых планет на 1996 год. — Ст.-Петербург, 1995.—628 с.
5. Tedesco E. F., Paul V. Noah, Meg Noah, Stephan D. Price. The Supplemental IRAS Minor Planet Survey // Astron. J.—2002.—123, N 2.—P. 1056—1085.

Поступила в редакцию 17.03.08