

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.04.060>

УДК 523.24

А. М. Казанцев, Л. В. Казанцева

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна, 3, Київ-53, Україна, 04053
ankaz51@ukr.net

Специфический негравитационный эффект и параметры осевого вращения астероидов

Выполнен поиск дополнительных аргументов в пользу реальности специфического негравитационного эффекта в поясе астероидов (НГЭ), обнаруженного более десяти лет назад. Данный НГЭ вызывает постепенное увеличение больших полуосей орбит низкоальбедных астероидов по сравнению с большими полуосями орбит астероидов с большими альбедо. Такое специфическое действие НГЭ подтверждено распределениями альбедо по большой полуоси для отдельных семейств астероидов. Изменение больших полуосей орбит астероидов главного пояса за счет НГЭ (da) доходит до 10^{-6} а. е. за 10 лет. Физический механизм действия НГЭ близок к кометному. Поэтому знак величин da должен зависеть от направления осевого вращения астероидов, а их абсолютные значения da — от периода P . Такое соотношение между da и P будет и в случае действия эффекта Ярковского, но последний на 3-4 порядка слабее данного НГЭ. В настоящее время количество астероидов, для которых точно установлены направления осевого вращения, очень мало. Поэтому для подтверждения реальности НГЭ были использованы данные о периодах осевого вращения астероидов. Из базы MPC было отобрано более 12 тысяч астероидов главного пояса, для которых определены периоды осевого вращения. Выполнены численные расчеты эволюции орбит отобранных астероидов на интервале от 2005 г. до 2016 г. и определены соответствующие значения da . Построены и проанализированы зависимости $da(P)$, которые соответствуют теоретическим зависимостям на уровне выше 2. Для более точных значений периодов вращения значимость зависимости $da(P)$ увеличивается, хотя количество таких тел более чем в два раза меньше общего. Полученный резуль-

тат можно считать еще одним подтверждением реальности обсуждаемого НГЭ.

Ключевые слова: астероид, негравитационный эффект, период вращения.

ВВЕДЕНИЕ

Обсуждаемый здесь негравитационный эффект (НГЭ) был впервые обнаружен более десяти лет назад [2]. Данный НГЭ вызывает постепенное увеличение больших полуосей орбит низкоальбедных астероидов по сравнению с большими полуосями орбит астероидов с большими альбедо. Год спустя наличие НГЭ было подтверждено на основании анализа невязок в астероидных каталогах [3]. При этом использовался каталог IRAS, содержащий альбедо и размеры 2228 астероидов. Еще позже [4] для проверки и подтверждения НГЭ был использован каталог WISE, в котором представлены данные более 90 тысяч астероидов. Был проведен анализ распределений астероидов по значениям альбедо в отдельных семействах. Получено, что практически для всех корректно отобранных и не усеченных резонансами семейств наблюдается уменьшение среднего значения альбедо с увеличением собственных больших полуосей. Для большинства из них такое уменьшение является статистически существенным. Не выявлено ни одного семейства при статистически существенном увеличении альбедо. Этот результат подтвердил более ранние выводы о действии в поясе астероидов НГЭ, приводящего к пространственному разделению астероидов с разными альбедо.

В нашей публикации [5] реальность данного НГЭ была еще раз подтверждена на основе численных расчетов эволюции орбит астероидов. При этом были использованы как каталог IRAS, так и каталог WISE.

Возможность обнаружения любых НГЭ из численных расчетов эволюции орбит астероидов состоит в следующем. Нужно иметь два точных каталога орбит астероидов на достаточно разнесенные эпохи. При этом элементы орбит в каждом из каталогов должны быть получены с использованием результатов наблюдений, выполненных до эпохи каталога, а не пересчитанные из более поздней эпохи. Желательно, чтобы при подготовке более позднего каталога было использовано как можно больше наблюдений, полученных между эпохами каталогов. Затем выполняется численное интегрирование эволюции орбит астероидов от эпохи более раннего каталога до эпохи более позднего. Потом определяются разности элементов орбит

$$da = a_{ct} - a_{cl}, \quad (1)$$

где a_{ct} и a_{cl} — большие полуоси орбит астероидов на более позднюю эпоху из каталога и из расчетов соответственно. На значения da будут

влиять следующие факторы: а) ошибки выполненных нами численных расчетов; б) ошибки каталожных элементов; в) реальное влияние тел, неучтенных в расчетах (сближение с крупными астероидами или падение метеоритов); г) негравитационные эффекты различной природы.

Именно такой подход был применен в работе [5]. Использовались каталоги MPC на 18 августа 2005 г. и на 13 января 2016 г. При этом было установлено, что точность расчетов не уступает точности каталогов. В процессе оценки точности каталогов и расчетов были обнаружены заметные ошибки в каталоге MPC на эпоху 10 июня 2003 г.

В целом выполненные численные расчеты эволюции орбит астероидов, включенных в базы данных альbedo IRAS и WISE, для периода времени 2005—2016 гг. подтвердили, что в наши дни в движении заметной части астероидов главного пояса с размерами до 50 км сказывается влияние некоторого НГЭ. Такой НГЭ приводит к увеличению больших полуосей орбит низкоальбедных астероидов по сравнению с большими полуосями орбит тел с большими альbedo. Механизм подобного пространственного разделения тел с разными альbedo приведен в работе [5]. Скорости увеличения больших полуосей астероидов с размерами до 50 км и альbedo $p_v < 0.1$ за счет НГЭ могут достигать 10^{-7} а. е. в год. В публикации [5] сделан вывод, что физический механизм действия такого НГЭ по своей природе должен быть близок к НГЭ в кометах.

СВЯЗЬ НЕГРАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА С ПАРАМЕТРАМИ ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

Реальность отмеченного НГЭ подтверждается как точными численными расчетами, так и распределениями альbedo в семействах астероидов. Однако для многих исследователей такие аргументы могут показаться недостаточными. В работе [5] в качестве окончательного и неоспоримого аргумента в пользу НГЭ предложена возможность проверки данного эффекта по направлениям осевого вращения астероидов. В работе представлен список нескольких десятков астероидов с предсказанными направлениями осевого вращения (прямым или обратным). Предсказания о направлении вращения сделаны на основании полученных из расчетов значений da . Явно положительные значения da должны относиться к астероидам с прямым вращением, а отрицательные da — к астероидам с обратным вращением. Полученные из наблюдений направления вращения приведенных астероидов должны стать окончательными аргументом в пользу реальности данного НГЭ.

Однако определение направлений вращения из наблюдений — это довольно сложная задача. Для таких целей используют кривые блеска астероидов. Сами кривые блеска непосредственно не могут указывать на направление вращения. Для определения ориентации осей враще-

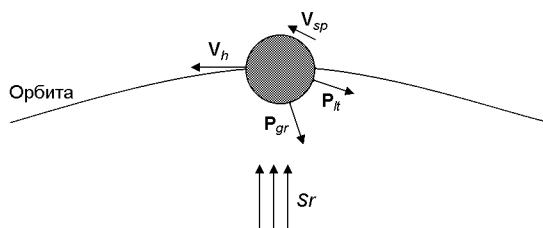


Рис. 1. Схема действия негравитационного эффекта на астероид

ния нужно точно знать не только форму астероида, но и распределение альbedo по его поверхности. Эта задача решается путем моделирования. Многообразие моделей форм астероидов и распределений альbedo по их поверхностям существенно затрудняет или делает практически невозможным однозначное определение направления осевого вращения. Часто исследователи приводят два варианта ориентации оси вращения, которые могут весьма заметно отличаться между собой.

Оказывается, есть гораздо более простой и в тоже время довольно эффективный способ установления реальности НГЭ. Для этого можно ограничиться лишь периодами осевого вращения астероидов. Известно, что периоды осевого вращения P определяются из наблюдений намного проще и надежнее, чем ориентация осей. Значения P определяются непосредственно из кривых блеска без привлечения каких-либо моделей формы и распределения альbedo по поверхности. Естественно, что значения P также могут содержать ошибки. Однако доля ошибочных значений P намного меньше, чем доля ошибочных положений осей вращения. Ведь при неверных периодах невозможно определить правильное положение осей. Но и далеко не всегда при точных значениях P удастся получить точные ориентации осей вращения.

Связь реального НГЭ с периодами вращения астероидов можно видеть из самого механизма НГЭ. На рис. 1 показана схема приращенния астероидом дополнительного импульса за счет вылета вещества с его поверхности. Солнечное излучение S_r падает на подсолнечную сторону поверхности астероида. Молекулы газа и пылинки вылетают с нагретой части поверхности тела. От момента падения солнечного излучения до момента вылета проходит некоторое время. Если период осевого вращения астероида очень большой, то вылет вещества происходит практически в направлении на Солнце. При относительно небольших эксцентриситетах орбиты астероида дополнительный импульс астероиду будет направлен почти перпендикулярно к вектору его орбитальной скорости V_h . Понятно, что в таком случае изменение V_h , как и большой полуоси орбиты (da), будет минимальным. Если период вращения небольшой, т. е. астероид вращается быстрее, то проекция дополнительного импульса на вектор орбитальной скорости астероида будет больше. Значит, и значения da должны быть большими.

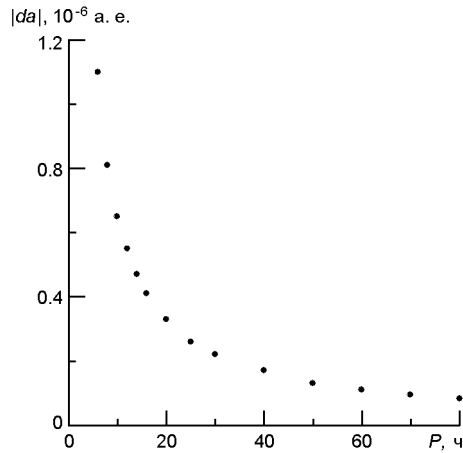


Рис. 2. Теоретическая зависимость $|da|(P)$

На рис. 1 векторы \mathbf{P}_{gt} и \mathbf{P}_{lt} показывают направление вылетающего вещества при больших и при малых периодах осевого вращения астероидов соответственно. Вектор \mathbf{V}_{sp} указывает направление осевого вращения астероида.

Таким образом, если полученные из численных расчетов значения da обусловлены действием реального НГЭ, то должна наблюдаться характерная зависимость $da(P)$. Вид подобной зависимости представлен на рис. 2. Эта зависимость получена простым моделированием вылета вещества с астероида сферической формы при разных периодах осевого вращения. Ось вращения направлена перпендикулярно к плоскости орбиты, направление вращения прямое. Скорость и масса вылетающего вещества принимались постоянными. Изменялся лишь период вращения. Изменения больших полуосей орбит определялись из интеграла энергии с учетом дополнительного импульса. Цифровые значения модельно подобраны так, чтобы значения шкал на рис. 2 соответствовали реальным значениям P и da . Зависимость довольно точно можно аппроксимировать гиперболическим соотношением

$$da = c_1/P + c_0. \tag{2}$$

В данном случае нас интересовала лишь зависимость величины da от периода вращения астероида при достаточном для этого импульсе вылетающего вещества. Сам физический механизм такого вылета кратко изложен в работе [5].

Качественно подобная зависимость должна быть и в случае эффекта Ярковского. Однако максимальные значения da будут на 3-4 порядка меньше, чем полученные из наших численных расчетов [5, 8].

Описанная схема не учитывает тепловую инерцию поверхности астероидов I , которая, безусловно, будет влиять на зависимость $da(P)$. Чем больше I , тем с большим запаздыванием будет происходить вылет вещества с поверхности астероида после падения на нее солнеч-

ной радиации. Для астероидов с очень большой тепловой инерцией и малыми периодами осевого вращения может вообще по всей поверхности устанавливаться одинаковая равновесная температура. В таком случае вылет вещества с поверхности будет практически изотропным, и следовательно, значение da будет близко к нулю. Учет влияния тепловой инерции — довольно громоздкая задача. В работе [6] сделана оценка влияния тепловой инерции в случае действия эффекта Ярковского. В нашем случае в модельных расчетах учитывать тепловую инерцию нет смысла, поскольку для реальных астероидов ее учесть невозможно, так как необходимо знать величину I для каждого отдельного тела. Однако отсутствие учета тепловой инерции качественно не будет влиять на зависимость $da(P)$. Для тел с небольшими значениями I влияние этой величины будет минимальным, а при больших I соответствующие значения da будут просто очень малыми, что и без того, в силу других различных факторов, характерно для большинства астероидов.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НЕГРАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ПО ПЕРИОДАМ ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

С целью дальнейшего подтверждения реальности обнаруженного ранее НГЭ был использован массив, содержащий периоды осевого вращения астероидов. Сейчас на сайте MPC можно найти данные о периодах вращения около 20 тысяч нумерованных тел. Из них были отобраны астероиды, относящиеся к главному поясу, содержащиеся как в каталоге MPC на 2005 г., так и в каталоге WISE [7], где приведены альбедо и размеры тел. Полная выборка таких тел составила более 12 тысяч.

Была просчитана численная эволюция орбит этих астероидов от эпохи 2005 г. до эпохи 2016 г. Численное интегрирование орбит осуществлялось по методу, описанному в работе [1]. Учитывались возмущения от восьми больших планет, Цереры, Плутона, Паллады и Весты. Кроме того, учитывались релятивистские смещения перигелиев орбит. Затем вычислялись значения da согласно выражению (1).

При прямом осевом вращении величины da должны быть положительными, а при обратном — отрицательными. Абсолютные же значения da не должны зависеть от направления вращения. Поэтому при построении зависимости изменений большой полуоси от P проще использовать абсолютные значения $|da|$.

В работе [5] сделан анализ самих величин da . Там показано, что значения da , превышающие 10^{-6} а. е., возможно, обусловлены ошибками в элементах орбит астероидов. Поэтому для более детального анализа зависимости $da(P)$ ограничимся диапазоном абсолютных значений $da < 10^{-6}$ а. е.

Периоды вращения астероидов рассматриваемого массива достигают до 1200 часов. Понятно, что очень большие периоды вращения до-

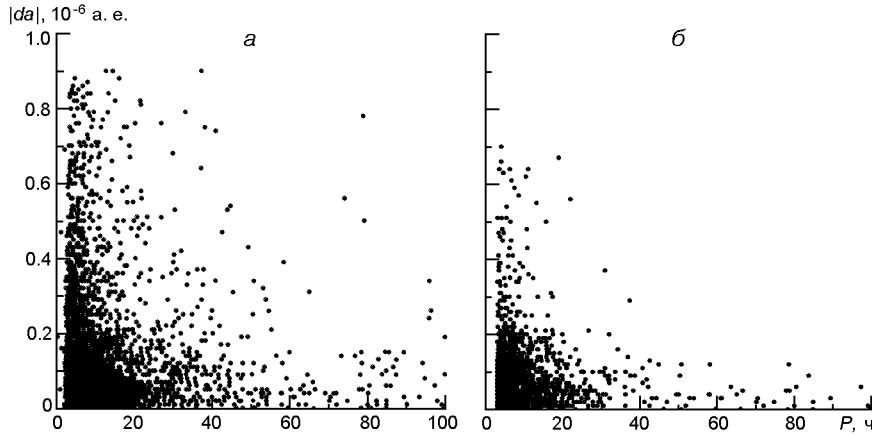


Рис. 3. Распределения $|da|$ по значениям периодов P различной точности

временно сложно определять из наблюдений. Для этого нужны непрерывные наблюдения в течение нескольких или даже нескольких десятков суток. Кроме того, для построения непрерывной кривой блеска необходимо иметь наблюдения одного и того же астероида в пунктах, расположенных на различных долготах. Поэтому мы ограничились периодами $P < 100$ ч, количество которых составляет около 98% всего массива.

Размеры астероидов были выбраны в интервале $7 < D < 50$ км. Для тел больших размеров влияние НГЭ практически не сказывается, а орбиты астероидов меньших размерами определяются менее точно. Количество отобранных тел составило 4057.

Распределение $da(P)$ для этой выборки представлено на рис. 3а. Видно, что меньшим значениям периодов вращения в среднем соответствуют большие абсолютные значения da . Такая зависимость и должна быть, если величины da обусловлены действием НГЭ (рис. 2). Если усредненную зависимость данного распределения представить выражением (2), то она будет соответствовать теоретической (рис. 2) на уровне 2.3.

В базе MPC, кроме значений периодов вращения, указаны и точности их определения — от 1 до 3 (1 — наименее точные, 3 — максимально точные). Для получения более корректной зависимости $da(P)$ были использованы периоды с точностью определения от 2.5 до 3. Количество таких периодов составило 1749. Распределение $da(P)$ для этой выборки представлено на рис. 3б. Видно, что это распределение заметно ближе к теоретическому распределению (рис. 2). И хотя количество точек по сравнению с рис. 3а уменьшилось более чем в два раза, значимость усредненной зависимости $da(P)$ возросла до 3.5. Следовательно, при более точных значениях периодов вращения распределение $da(P)$ более точно соответствует теоретическому. Это

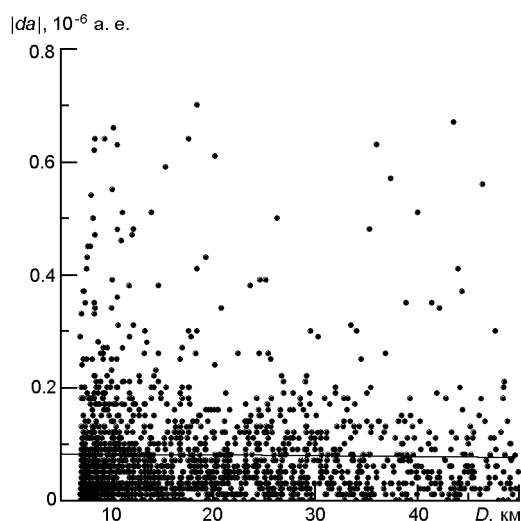


Рис. 4. Распределение $|da|$ для тел с точными значениями P по значениям абсолютных звездных величин H

можно рассматривать как аргумент в пользу реальности рассматриваемого НГЭ.

Следует отметить, что на данное распределение $da(P)$ может влиять и зависимость периодов вращения от размеров астероидов D . Для астероидов главного пояса, как и для нашей выборки, имеет место некоторое увеличение среднего значения P с увеличением размера.

Логично предположить, что НГЭ должен в большей степени сказываться для тел меньших размеров. Если при этом тела меньших размеров имеют в среднем меньшие периоды вращения, то этот факт будет явно отображаться на зависимости $da(P)$. Поэтому для получения зависимости величин da только от периодов вращения желательно иметь такую выборку тел, где значения da не показывают явной обратной зависимости от размеров. Это важно и с той точки зрения, если предполагать, что тела меньших размеров имеют большие ошибки в элементах орбит. Тогда подтверждение влияния НГЭ по зависимости $da(P)$ вообще будет выглядеть неубедительным.

Распределение в координатах $D — da$ для нашей последней выборки 1749 астероидов представлено на рис. 4. Тонкой линией обозначена усредненная линейная зависимость $da(D)$, которая идет практически горизонтально. То есть, в данном случае зависимости величины da не наблюдается. Следовательно, на распределение $da(P)$, представленное на рис. 3, *b*, не влияют ни меньшие периоды вращения при меньших размерах тел, ни возможные большие ошибки элементов орбит таких тел. Это распределение показывает зависимость значений da только лишь от периодов вращения астероидов P , которая однозначно свидетельствует в пользу реальности обсуждаемого НГЭ.

ВЫВОДЫ

Вычисленные абсолютные значения изменений da больших полуосей орбит астероидов главного пояса с размерами от 7 до 50 км имеют характерную зависимость от периодов их осевого вращения P . Данная зависимость $da(P)$ довольно уверенно объясняется действием на астероиды специфического НГЭ. Следовательно, действие такого НГЭ в наше время в поясе астероидов можно считать реальным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась в рамках планового финансирования учреждений Министерства образования и науки Украины.

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. Казанцев А. М., Казанцева Л. В. О невязках в астероидных каталогах и возможном негравитационном эффекте. *Кинематика и физика небес. тел.* 2008. 24, № 5. С. 379—387.
4. Казанцев А. М., Казанцева Л. В. Дополнительные критерии выделения семейств астероидов и подтверждение эффекта пространственного разделения членов семейств по альбедо. *Кинематика и физика небес. тел.* 2014. 30, № 5. С. 72—80.
5. Казанцев А. М., Казанцева Л. В. Специфический негравитационный эффект в поясе астероидов. *Астрон. Вестн.* 2017. 51, № 6. С. 562—570.
6. Golubov O., Kravets Y., Krugly Yu. N., Scheeres D. J. Physical models for the normal YORP and diurnal Yarkovsky effects. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. 458, 4. P. 3977—3989.
7. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., Bauer J. M., Cutri R. M., Dailey J., Eisenhardt P. R. M., McMillan R. S., Spahr T. B., Skrutskie M. F., et al. Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters. *Astrophys. J.* 2011. 741, № 2. P. 20.
8. Spitale J., Greenberg R. Numerical evaluation of the general Yarkovsky effect: Effects on semimajor axis. *Icarus.* 2001. 149, № 1. P. 222—234.

REFERENCES

1. Kazantsev A. M. (2002) A simple method for numerical calculations of the evolution of orbits of near-Earth asteroids. *Solar System Res.* 36, № 1. P. 43—49.
2. Kazantsev A. M. (2007) Possible effect of spatial separation of bright and dark asteroids. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 23, № 6. P. 258—264. <https://doi.org/10.3103/S0884591307060037>
3. Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. (2008) On the residuals in asteroid catalogs and a possible nongravitational effect. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 24, № 5. P. 248—252. <https://doi.org/10.3103/S0884591308050048>

4. Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. (2014) Additional criteria for identifying the asteroid families and confirmation of the effect of spatial separation of family members according to their albedos. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 30, № 5. P. 255—260. <https://doi.org/10.3103/S0884591314050031>
5. Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. (2017) A specific nongravitational effect in the asteroid belt. *Solar System Res.* 51(6). P. 527—534.
6. Golubov O., Kravets Y., Krugly Yu. N., Scheeres D. J. (2016) Physical models for the normal YORP and diurnal Yarkovsky effects. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 458, 4. P. 3977—3989.
7. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., Bauer J. M., Cutri R. M., Dailey J., Eisenhardt P. R. M., McMillan R. S., Spahr T. B., Skrutskie M. F., et al. (2011) Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters. *Astrophys. J.* 741, № 2. P. 20.
8. Spitale J., Greenberg R. (2001) Numerical evaluation of the general Yarkovsky effect: Effects on semimajor axis. *Icarus.* 149, № 1. P. 222—234.

A. M. Kazantsev, L. V. Kazantseva

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СПЕЦИФІЧНИЙ НЕГРАВІТАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ ТА ПАРАМЕТРИ ОСЬОВОГО ОБЕРТАННЯ АСТЕРОЇДІВ

Виконано пошук додаткових аргументів на користь реальності специфічного негравітаційного ефекту у поясі астероїдів (НГЕ), виявленого понад десять років тому. Даний НГЕ викликає поступове збільшення великих півосей орбіт низькоальбедних астероїдів порівняно з великими півосями орбіт астероїдів з більшими альbedo. Таку специфічну дію НГЕ підтверджено розподілами альbedo по великій півосі для окремих сімейств астероїдів. Зміна великих півосей орбіт астероїдів головного поясу за рахунок НГЕ (da) доходить до 10^{-6} а. о. за 10 років. Фізичний механізм дії НГЕ близький до кометного. Тому знак величин da повинен залежати від напрямку осьового обертання астероїдів, а їхні абсолютні значення da — від періоду P . Таке співвідношення між da і P буде й у випадку дії ефекту Ярківського, але останній на 3-4 порядки слабший даного НГЕ. Сьогодні кількість астероїдів, для яких з точно встановлено напрямки осьового обертання, дуже мала. Тому для підтвердження реальності НГЕ були використані дані про періоди осьового обертання астероїдів. З бази MPC було відібрано понад 12 тисяч астероїдів головного поясу, для яких відомі періоди осьового обертання. Виконано чисельні розрахунки еволюції орбіт відібраних астероїдів на інтервалі від 2005 р. до 2016 р. і отримано відповідні значення da . Побудовано і проаналізовано залежності $da(P)$, які відповідають теоретичним залежностям на рівні вище 2. Для більш точних значень періодів обертання значущість залежності $da(P)$ збільшується, хоча кількість таких тіл більш ніж у два рази менша від загальної. Отриманий результат можна вважати ще одним підтвердженням реальності обговорюваного НГЕ.

A. M. Kazantsev, L. V. Kazantseva

Astronomical observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine

A SPECIFIC NON GRAVITATIONAL EFFECT AND SPIN-PARAMETERS OF THE ASTEROIDS

Search for additional arguments for the reality of a specific non-gravitational effect in the asteroid belt (NGE), obtained more than ten years ago, has been performed. This NGE

causes a gradual increase in the semi-major axes of orbits of low-albedo asteroids compare to the semi-major axes of orbits of asteroids with larger albedos. Such specific action of the NGE is confirmed by albedo distributions on the semi-major axes for separate asteroid families. The change of the major semi-axes of the orbits of the asteroids of the main belt due to the NGE (da) comes to 10^{-6} AU per 10 years. The physical mechanism of action of the NGE is similar to the cometary one. Therefore, the sign of the da values should depend on the direction of the axial rotation of the asteroids, and their absolute value da — upon the spin period P . Such relationship between da and P will be in the case of the Yarkovsky effect, but the latter is 3-4 orders of magnitude weaker than this NGE. At present, there are very few asteroids with precisely defined spin directions. Therefore, to confirm the reality of the NGE, data on the spin periods of asteroids were used. More than 12 thousands main belt asteroids were selected from the MPC base, for which spin periods were determined. The numerical calculations of the evolution of the orbits of the selected asteroids are performed for the interval from 2005 to 2016 and the corresponding da values are determined. The $da(P)$ dependencies are constructed and analyzed. The form of $da(P)$ dependencies is consistent with the theoretical dependencies at a level above 2 . For more accurate values of the spin periods, the significance of the $da(P)$ dependence increases, although the number of such bodies is more than twice less than the total. The obtained result can be considered one more confirmation of the reality of the NGE existence.

Key words: asteroid, non-gravitational effect, spin period.

Статья поступила в редакцию 24.01.2019

После доработки 15.04.2019

Принята к публикации 18.04.2019