

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.042>

УДК 523.44

**А. М. Казанцев, Л. В. Казанцева**

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

## НЕГРАВІТАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ ТА ОРІЄНТАЦІЯ ОСЕЙ ОБЕРТАННЯ КІЛОМЕТРОВИХ АСТЕРОЇДІВ ГОЛОВНОГО ПОЯСУ

*Виконано чисельні розрахунки еволюції орбіт астероїдів головного поясу від 2005 р. до 2016 р. Розрахунки показують, що в наші дні в у зміні великих півосей орбіт помітної частини низькоальбедних астероїдів головного поясу розмірами до 40 км позначається вплив негравітаційного ефекту кометної природи. Зміна великої півосі орбіти астероїда залежить від орієнтації осі обертання. Тому точні чисельні розрахунки еволюції орбіт астероїдів можуть вказувати на напрямок (прямий чи зворотний) осі їхнього обертання.*

**Ключові слова:** астероїд, вісь обертання, негравітаційний ефект.

Вперше про можливість дії у поясі астероїдів негравітаційного ефекту (НГЕ), що викликає просторове розділення тіл з різними альbedo, було вказано близько 10 років тому [2]. Про це свідчать точні розрахунки еволюції орбіт астероїдів та розподіли альbedo тіл в окремих сімействах астероїдів. При цьому використовувалась база IRAS (Infrared Astronomical Satellite) [7], що містить дані про альbedo та розміри 2228 астероїдів.

На сьогодні є можливість використати базу WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) [4], що включає альbedo та розміри більш ніж 90 тисяч астероїдів. Крім того, сучасні каталоги орбіт астероїдів мають дещо менші похибки порівняно з каталогами 10-річної давності. Тому повторне дослідження цього питання має сенс.

### ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ НЕГРАВІТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ

Потрібно мати два каталоги елементів орбіт астероїдів на достатньо рознесені епохи. Викону-

ється чисельне інтегрування еволюції орбіт астероїдів від епохи більш раннього каталогу до епохи більш пізнього. Далі визначаються різниці елементів орбіт

$$da = a_{ct} - a_{cl},$$

де  $a_{ct}$  і  $a_{cl}$  — значення великої півосі орбіти астероїда на більш пізню епоху з каталогу та з розрахунків відповідно.

На значення  $da$  будуть впливати такі фактори: а) помилки у виконаних чисельних розрахунках, б) похибки каталожних елементів, в) реальний вплив тіл, не врахованих у розрахунках (зближення з великими астероїдами чи падіння метеоритів), г) негравітаційні ефекти різної природи.

У нашому розпорядженні були каталоги орбіт астероїдів Міжнародного центру малих планет (MPC) на епохи 18.08.2005 р. та 13.01.2016 р. В каталогах значення великих півосей орбіт приведено з точністю до  $10^{-7}$  а. о. Для оцінки точності каталогів і програми обчислень виконувалось чисельне інтегрування орбіт 20 крупних астероїдів в кожній з п'яти різних зон головного

поясу при значеннях великих півосей орбіт. Зрозуміло, що всі перераховані фактори, які впливають на значення  $da$ , для крупних астероїдів будуть позначатися мінімально. Середні значення  $da$  в кожній зоні великих півосей орбіт наведено у табл. 1. Видно, що у чотирьох зонах з п'яти значення  $da$  явно менші за похибки каталогів ( $10^{-7}$  а. о.). Лише на зовнішньому краї головного поясу значення  $da$  дещо більші. Це цілком зрозуміло, адже для тіл, що рухаються на більших відстанях, похибки елементів орбіт мають бути більшими. Таким чином, можна зробити висновок, що точність наших розрахунків ніяк не нижча за точність каталогів. Метод і програму інтегрування наведено в роботі [1].

### ПОШУК НЕГРАВІТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЗИ WISE

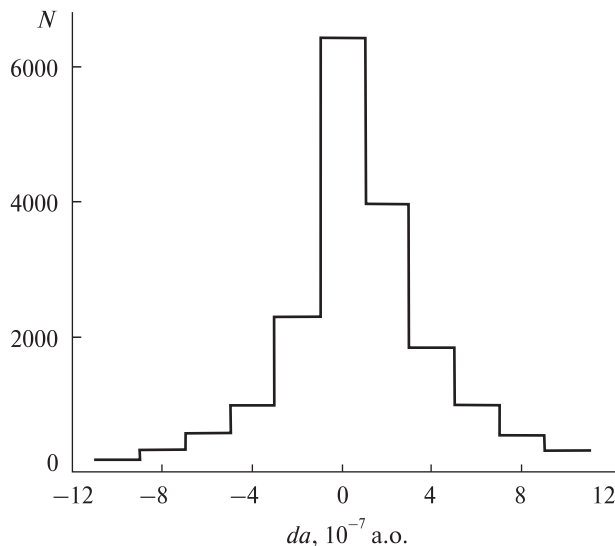
База WISE містить альbedo 94820 окремих астероїдів [4]. Орбіти 52094 з них представлені в обох каталогах MPC. Було виконано чисельне інтегрування всіх цих орбіт від 2005 р. до 2016 р. Величини  $da$  визначалися для астероїдів головного поясу з розмірами  $5 < D < 40$  км та альbedo в ін-

Таблиця 1. Середні значення  $da$  в різних зонах великих півосей орбіт

$a$ , а. о.	$da$ , $10^{-7}$ а. о.
2.20...2.30	0.35
2.40...2.50	0.43
2.70...2.80	0.40
2.90...3.00	0.55
3.10...3.20	1.13

Таблиця 2. Кількості астероїдів зі збільшенням та зменшенням великих півосей орбіт в різних діапазонах  $|da|$

$ da $ , $10^{-7}$ а. о.	$N_+$	$N_-$	$N_+ / N_-$
1...3	3935	2275	1.7
3...5	1835	977	1.9
5...7	972	554	1.8
7...9	518	314	1.7
9...11	305	182	1.7



Розподіл кількості  $N$  астероїдів з альbedo  $p_v < 0.2$  по значеннях величини  $da$

тервалі від 0.02 до 0.60. Тіла з розмірами менше 5 км можуть мати помітні похибки в елементах орбіт, а на крупні тіла НГЕ навряд чи можуть впливати. Значення альbedo астероїдів, менші за 0.02 та більші за 0.60, скоріш за все є помилковими.

Перерахованим вище умовам відповідають 50630 тіл. Значення  $da$  цих тіл лежать у межах  $(-3...+1.7) \cdot 10^{-5}$  а. о. Для аналізу відбиралися значення  $da = (-1...+1) \cdot 10^{-6}$  а. о. (22363 значення). Занадто великі значення  $da$  можуть бути викликані чинниками, не пов'язаними з дією НГЕ. Будувалися розподіли значень  $da$  по значеннях альbedo астероїдів  $p_v$  і проводилися усереднені лінійні залежності

$$da = c_1 p_v + c_0.$$

Вплив НГЕ на астероїди можна бачити за знаком та значенням коефіцієнта  $c_1$ . Якщо цей коефіцієнт відмінний від нуля з досить високою статистичною вірогідністю, то можна припускати, що на орбіти астероїдів в інтервалі між епохами каталогів впливає деякий НГЕ.

Для описаної вибірки 22363 астероїдів коефіцієнт  $c_1$  становив  $-7.6 \cdot 10^{-8}$  а. о. при рівні значимості 0.001 (вище «3-сігма»). Головний внесок у спад залежності  $da(p_v)$  вносять низькоальбедні астероїди з  $p_v < 0.2$ . Для цього діапазону альbedo:

$c_1 = -6.5 \cdot 10^{-7}$  («4.5-сігма»).

Дія НГЕ переважно впливає на збільшення великих півосей тіл з малими альbedo. На рисунку показано розподіл кількості астероїдів з  $p_v < 0.2$  по значеннях  $da$ . Видно, що максимум розподілу відповідає значенням  $da \approx 0$ . Це ще раз свідчить про достатню точність розрахунків та елементів орбіт. Крім того видно, що кількість астероїдів з додатними значеннями  $da$  помітно більша від кількості тіл з від'ємними значеннями  $da$ . Для наведених на рисунку п'яти інтервалів додатних та від'ємних значень  $da$  у табл. 2 вказано відповідні кількості астероїдів ( $N_+$  та  $N_-$ ), а також їхнє відношення. Видно, що перевага  $N_+$  над  $N_-$  зберігається на всьому проміжку величин  $da$  з майже постійним відношенням. Цей факт свідчить про не випадковий характер переважного збільшення великих півосей астероїдів з малими альbedo і може бути використаний для пошуків фізичного механізму дії НГЕ.

#### МОЖЛИВИЙ ФІЗИЧНИЙ МЕХАНІЗМ ДІЇ НЕГРАВІТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ

При номінальній точності великих півосей орбіт в каталогах  $10^{-7}$  а. о. реальними і викликаними дією НГЕ можна вважати абсолютні величини  $da = (2...10) \cdot 10^{-7}$  а. о.

Насамперед варто визначити, чи зможе таку зміну великих півосей орбіт забезпечити ефект Яркowsького. В роботі [6] отримано, що кам'яний астероїд діаметром  $D = 1$  м, що рухається в головному поясі, може змінити велику піввісь своєї орбіти під дією ефекту Яркowsького на 1 а. о. за 1.5 млн років.

Велика піввісь орбіти тіла на певній геліоцентричній відстані однозначно визначається величиною орбітальної швидкості тіла. Отже, зміна великої півосі орбіти астероїда за рахунок ефекту Яркowsького обумовлена додатковою орбітальною швидкістю, наданою тілу за рахунок даного ефекту. Величина додаткової швидкості пропорційна кількості сонячного випромінювання, що попадає на поверхню тіла, тобто  $D^2$ . В той же час ця додаткова швидкість обернено пропорційна масі тіла, тобто  $D^3$ . Отже, для тіла діаметром 20 км, що відповідає середньому розміру астероїдів нашої вибірки, зміна великої півосі орбіти під дією

ефекту Яркowsького має бути в 20 000 разів повільнішою, ніж для тіла діаметром 1 м, тобто близько  $3 \cdot 10^{-10}$  а. о. за 10 років.

На зовнішньому краї поясу середні густини астероїдів можуть становити не  $2 \text{ г/см}^3$ , як для кам'яних тіл, а вдвічі менше. Для таких тіл дія ефекту Яркowsького буде помітнішою. Але ж в цій зоні головного поясу і кількість сонячної енергії менша. Отже, отримані величини  $da = (2...10) \cdot 10^{-7}$  а. о. за 10 років не пояснюються дією ефекту Яркowsького.

Можливим механізмом дії шуканого НГЕ може бути виліт речовини з поверхні астероїда. Оціночні розрахунки були зроблені для тіла розміром 20 км та середньою густиною  $1000 \text{ кг/м}^3$ , яке рухається по орбіті з ексцентриситетом 0.10 та великою піввіссю 3 а. о. Моделюванням зміни геліоцентричної швидкості  $V_h$  такого тіла було визначено, що при збільшенні значення  $V_h = 19 \text{ км/с}$  на  $1.0 \text{ мм/с}$  велика піввісь орбіти збільшиться на  $4 \cdot 10^{-7}$  а. о.

Ця цифра відповідає середньому значенню величин  $da$  для астероїдів нашої вибірки. Орієнтуючись на дане значення, оцінимо інтенсивність вильоту речовини з поверхні тіла, необхідну для такої зміни великої півосі його орбіти. При цьому будемо вважати, що виліт речовини відбувається переважно в напрямку, протилежному орбітальній швидкості астероїда.

Якщо за 10 років додаткова швидкість, надана тілу речовиною, що вилітає з його поверхні, складає  $1 \text{ мм/с}$ , то це відповідає додатковій швидкості  $3 \cdot 10^{-12} \text{ м/с}$  за кожен секунду. Маса тіла близька до  $4 \cdot 10^{15} \text{ кг}$ . Прийmemo, що швидкість вильоту речовини з його поверхні становить  $30 \text{ м/с}$ , що лежить у межах реальних значень швидкостей вильоту пилових часток для комет головного поясу. В такому разі для надання тілу потрібної додаткової швидкості кожної секунди має вилітати біля  $400 \text{ кг}$  речовини з частини його поверхні, що відповідає площі поперечного перерізу (міделя), або  $1.3 \text{ мг}$  з кожного  $\text{м}^2$  цієї площі. Така інтенсивність пиловиділення приблизно на два порядки менша, ніж для комет сімейства Юпітера.

Використовуючи сонячну сталу та відстань астероїда від Сонця, неважко отримати, що доля сумарної кінетичної енергії речовини, що вилі-

тає з поверхні астероїда, складає приблизно  $4 \cdot 10^{-6}$  величини сонячної енергії, що падає на його поверхню.

Таким чином, виліт речовини з поверхонь астероїдів цілком може пояснити отримані вище значення  $da$ . Той факт, що зазначений НГЕ більш помітний для низькоальбедних астероїдів, свідчить на користь такого НГЕ. Адже астероїди з малими альbedo більш порохняві, і на їхніх поверхнях має бути більше летючих речовин порівняно з тілами з більшими альbedo.

Наведене пояснення дії НГЕ може бути слушним, якщо більшість астероїдів у головному поясі мають пряме осьове обертання. На сьогодні напрямки осьового обертання визначені менш ніж для 200 астероїдів. Цю інформацію можна знайти у відкритій базі Planetary Data System [3]. Біля двох третин тіл мають пряме обертання. Відповідно до даних [5] подібне співвідношення має місце і для інших каталогів. Таким чином, наявність даного НГЕ узгоджується з відомими спостережними даними про осьове обертання астероїдів. Більше того, значення, наведені в табл. 2, досить добре узгоджуються з даними про співвідношення між астероїдами з прямим та зворотним осьовим обертанням.

На жаль, серед астероїдів з відомими напрямками осьового обертання немає жодного з  $|da| > 2 \cdot 10^{-7}$  а. о., тому підтвердження дії НГЕ за напрямками обертання конкретних астероїдів можна отримати в майбутньому. Разом з тим отримані дані про зміну великих півосей орбіт можуть вказувати на напрямок осьового обертання астероїдів.

## ВИСНОВКИ

Виконані чисельні розрахунки еволюції орбіт астероїдів свідчать, що в наші дні в русі помітної частини астероїдів головного поясу з розмірами до 40 км позначається вплив деякого негравітаційного ефекту. Такий НГЕ призводить до збільшення великих півосей орбіт низькоальбедних астероїдів у порівнянні з великими півосями орбіт тіл з більшими альbedo.

Фізичний механізм дії НГЕ за своєю природою може бути близький до НГЕ в кометах. Цей висновок узгоджується з наявними спостережними даними про осьове обертання астероїдів.

Визначення у майбутньому напрямків осьового обертання для наведених астероїдів дасть можливість однозначно зробити висновок про реальність дії зазначеного НГЕ. У той же час отримані дані про зміну великих півосей орбіт можуть вказувати на напрямок осьового обертання астероїдів.

## ЛІТЕРАТУРА

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. Kryszczyńska A., Magnusson P. Asteroid spin vector compilation V5.0. EAR-A-5-DDR-ASTEROID-SPIN-VECTORS-V5.0. NASA Planetary Data System, 2008.
4. 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. — art. id.68. — 20 p.
5. Paolicchi P., Kryszczyńska A. Spin vectors of asteroids: Updated statistical properties and open problems // *Planetary and Space Sci.* — 2012. — **73**, N 1. — P.70—74.
6. Spitale J., Greenberg R. Numerical evaluation of the general Yarkovsky effect: Effects on semimajor axis // *Icarus.* — 2001. — **149**, N 1. — P. 222—234.
7. Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D. The supplemental IRAS minor planet survey // *Astron. J.* — 2002. — **123**, N 2. — P. 1056—1085.

Стаття надійшла до редакції 21.11.16

## REFERENCES

1. Kazantsev A. M. A simple method for calculating the evolution of orbits of near-Earth asteroids. *Astron. Vestnik*, **36** (N 1), 48—54 (2002).
2. Kazantsev A. M. Possible effect of spatial separation of bright and dark asteroids. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **23** (N 6), 349—358 (2007).
3. Kryszczyńska A., Magnusson P. Asteroid spin vector compilation V5.0. EAR-A-5-DDR-ASTEROID-SPIN-VECTORS-V5.0. NASA Planetary Data System (2008).
4. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., et al. Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters. *Astrophys. J.*, **741** (N 2), art. id.68 (20 p.) (2011).
5. Paolicchi P., Kryszczyńska A. Spin vectors of asteroids: Updated statistical properties and open problems. *Planetary and Space Sci.*, **73** (N 1), 70—74 (2012).

6. *Spitale J., Greenberg R.* Numerical evaluation of the general Yarkovsky effect: Effects on semimajor axis. *Icarus*, **149** (N 1), 222—234 (2001).
7. *Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D.* The supplemental IRAS minor planet survey. *Astron. J.*, **123** (N 2), 1056—1085 (2002).

А. М. Казанцев, Л. В. Казанцева

Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета  
имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

#### НЕГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ И ОРИЕНТАЦИЯ ОСЕЙ ВРАЩЕНИЯ КИЛОМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА

Выполнены численные расчеты эволюции орбит астероидов главного пояса от 2005 г. до 2016 г. Расчеты показывают, что в наши дни в изменении больших полуосей орбит заметной части низкоальбедных астероидов главного пояса размерами до 40 км сказывается влияние негравитационного эффекта кометной природы. Изменение большой полуоси орбиты астероида зависит от ориентации оси вращения. Поэтому точные расчеты

эволюции орбит астероидов могут указывать на направление (прямое или обратное) оси их вращения.

**Ключевые слова:** астероид, ось вращения, негравитационный эффект.

А. М. Kazantsev, L. V. Kazantseva

Astronomical Observatory of the Taras Shevchenko  
National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

#### A NON-GRAVITATIONAL EFFECT AND SPIN ORIENTATION OF KILOMETER-SIZED ASTEROIDS OF THE MAIN BELT

We present the results of the numerical calculations of the orbital evolution of the main belt (MB) asteroids over the period from 2005 to 2016. We show that, at the present time, the non-gravitational effects of a cometary nature are the essential factors affecting changes in the semi-major axes of the orbits of a significant part of the MB low-albedo asteroids with dimensions up to 40 km. The change in the semi-major axis of an asteroid's orbit depends on the spin direction. Therefore, precise numerical calculations of the evolution of their orbits may indicate the direction (prograde or retrograde) of the axis of their rotation.

**Keywords:** asteroid, spin axis, non-gravitational effect.