

На рисунку 13 наводиться характер змін нахилу орбіти для ретроградного Дамоклоїду Діоретса (20461).

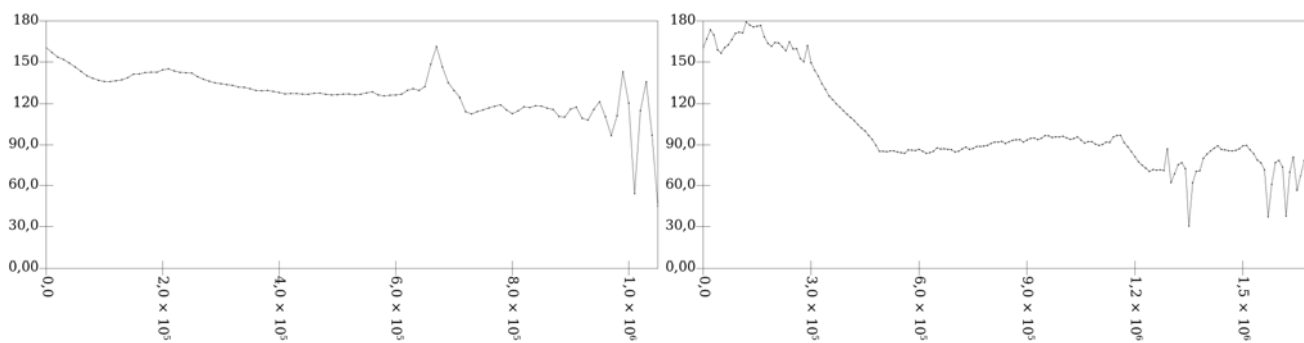


Рис. 13. Зміни нахилу орбіти для ретроградного Дамоклоїду Діоретса (20461), при інтегруванні в минуле (зліва) і в майбутнє (справа)

Результати інтегрування показали, що деякі еволюційні треки допускають перехід від прямого руху до ретроградного й навпаки, і рисунок 13 ілюструє один з таких випадків. Втім, на великих проміжках часу, внаслідок тісних зближень з планетами-гігантами, результати моделювання слід розглядати лише статистично.

**Висновки.** Наши результати показали, що динамічний час життя популяції Дамоклоїдів становить порядку  $10^6$ - $10^7$  років. Популяція Дамоклоїдів зберігає великі нахили орбіт впродовж часу інтегрування до 1 млрд років в минуле і в майбутнє. Таким чином, популяція Дамоклоїдів дійсно може представляти динамічний зв'язок комет з нахиленими орбітами (комет типу Галлея) з гіпотетичною сферичною хмарою Оорта.

Деякі еволюційні треки допускають перехід від ретроградного руху до прямого і навпаки (наприклад, астероїд Діоретса (20461)). Однак, на великих проміжках часу, внаслідок тісних зближень з планетами-гігантами, результати моделювання слід розглядати лише статистично.

#### Список використаних джерел:

1. Morbidelli, A. (2008). Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs, arXiv:astro-ph/0512256.
2. Jewitt, D. (2005). A first look at the Damocloids, *The Astronomical Journal* 129 (1): 730–738. Bibcode:2005AJ....129..530J. doi:10.1086/426328. Retrieved 2011-02-13.
3. [http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb\\_query.cgi#x](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi#x).
4. <http://www.boulder.swri.edu/swifter/>.
5. Duncan, Levison, and Lee (1998). A Multiple Time Step Symplectic Algorithm for Integrating Close Encounters, *The Astronomical Journal*, Volume 116, Issue 4, pp. 2067-2077.
6. Levison and Duncan (2000). Symplectically Integrating Close Encounters with the Sun, *The Astronomical Journal*, Volume 120, Issue 4, pp. 2117-2123.

Надійшла до редколегії 20.11.13

Н. Коваленко, канд. физ.-мат. наук, Р. Гулиев, науч. сотр. (Шемахинская астрофизическая обсерватория, Азербайджан),  
К. Чурюмов, д-р физ.-мат. наук, проф.  
КНУ имени Тараса Шевченко, Киев

### ПРО НАКЛОНЫ ОРБИТ ДАМОКЛОИДОВ В ПРОЦЕССЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

На сегодня известно 93 Дамоклоида, некоторые из этих астероидов движутся по ретроградным орбитам. Предполагается, что Дамоклоиды являются неактивными ядрами комет галлеевского типа. Было проведено моделирование орбитальной эволюции Дамоклоидов на 1 млрд лет в прошлое и будущее, с использованием пакета интегрирования SWIFTER. Результаты обсуждаются.

Ключевые слова: Дамоклоиды, орбитальная эволюция.

N. Kovalenko, Ph.D. in Phys. and Math. Sciences, R. Guliev, K. Churyumov, Dr. Phys. and Math. Sciences, Prof.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

### ABOUT DAMOKLOIDIV INCLINATIONS OF THE ORBITS DURING THE DYNAMICAL EVOLUTION

There are 93 Damocloides currently known, some of these asteroids moves along retrograde orbits. Damocloides are believed to be inactive nuclei of Halley type comets. The orbital evolution modeling for Damocloides were performed 1Gyr backward and forward in time, using SWIFTER package. Results are discussed.

Key words: Damocloides, orbital evolution.

УДК 52 (031)

Л. Ксанфомаліті, д-р фіз.-мат. наук, проф., К. Чурюмов, д-р фіз.-мат. наук, проф.  
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

### ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ АСТЕРОЇДІВ ІТОКАВА, ТОУТАТИС ТА ЯДРА КОМЕТИ БОРЕЛЛІ

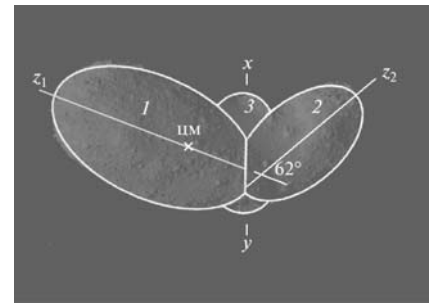
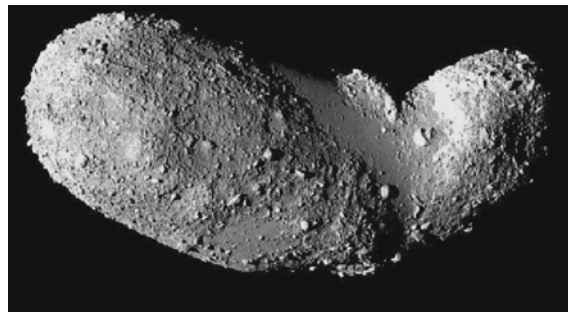
Розглянуто ротаційну нестійкість астероїдів Ітокава, Тоутатис і ядра комети Бореллі і показано, що їх фігури є стійкими, відносно руйнування цих малих тіл відцентровими силами.

Ключові слова: Ітокава, Тоутатис, Бореллі.

В роботі [1] (Ксанфомаліті, Чурюмов, 2012) було розглянуто ротаційну нестійкість ядра комети Хартлі 2 і було показано, що протягом короткого часу (1-2 наступні оберти навколо Сонця) ядро комети розділиться на 2 фрагменти, внаслідок того, що відцентрові сили, які діють на шийку кеглеподібної форми ядра, перебільшують силу гравітації.

Знайомство с космічними фотографіями комет і астероїдів дозволило знайти ще три об'єкти, які мають кеглеподібну форму із шийкою, хоча не стільки характерною, як у комети Хартлі 2. Це комета 19P/Бореллі, астероїди Тоутатис і Ітокава.

Динамічна стійкість астероїду Ітокава



Фізичні характеристики астероїду Ітокава

Розміри 535x294x209 м, Маса  $3.51 \cdot 10^{10}$  кг, Середня густина 1920 кг м<sup>-3</sup>, Геометричне альbedo 0.53, Період обертання 12.13 годин

**Рис. 1.** Астероїд Ітокава, досліджений в 2005 р. японським космічним апаратом Хаябуса. Найбільше широка частина астероїда на цьому знімку близько 300 м. Знімок японського космічного агентства JAXA

**Рис. 2.** Інша сторона астероїда Ітокава. За своїми розмірами астероїд дуже малий, всього 535x294x209 м. У його центральній частині видно гладкий ділянку, що нагадує шийку ядра комети Хартлі 2. (Знімок японського космічного агентства JAXA)

**Рис. 3.** Складна форма астероїда Ітокава ускладнює обчислення, але виконання розрахунків таки можливо на основі спрощеної схеми. Напруження від відцентрових сил в перерізі XY в 5 разів менше напруг стиснення. Ітокава не руйнується

Ділянка, що нагадує шийку комети Хартлі 2, можна бачити на астероїді Ітокава – небесному тілі іншого класу. Розміри небесного тіла всього 535x294x209 м. Таких дрібних астероїдів сотні тисяч. У 2005 р., 10 листопада, апарат Хаябуса, первісток японських космічних місій до астероїдів, наблизився до маленького астероїда Ітокава і навіть торкнувся його поверхні. На жаль, одну з головних завдань місії – захопити ґрунт і доставити на Землю – не вдалося. Коли 13 липня 2010 пристрій для захоплення ґрунту вдалося повернути на Землю, воно виявилася порожнім. Але це перша така місія, і не тільки японська. Астероїд був названий на честь Хідео Ітокави, одного із засновників японських досліджень космосу.

Астероїд Ітокава має настільки неправильну форму (рис. 1), що підібрати для неї розрахункову модель, що складається з простих геометричних форм, важко. На відміну від Хартлі 2, середня густина Ітокави майже 2 г·см<sup>-3</sup>. Поверхня дуже світла, в 20 разів світліше в порівнянні з ядром комети Хартлі 2. У перигелії астероїд виявляється всередині земної орбіти, а в афелії йде за орбіту Марса на 100 млн км.

Район перетяжки, що нагадує шийку комети Хартлі 2, видно в середині астероїда (рис. 2). Розрахунок напружень, як у випадку комети Хартлі 2, дозволяє визначити, наскільки астероїд стійкий до відцентрових сил, тим більше, що його період обертання в 1.5 рази коротше, а відцентрові сили, при тих же умовах, в 2.2 рази більше. Але значно більшими (відносно, звичайно) виявляються зусилля гравітації, так як густина астероїда в 6 разів вища.

Спрощену геометрію частин астероїда (з тими ж обсягами, масами і їх розташуванням) все ж таки вдалося підібрати. Розрахункова схема виходить складною і включає невелику середню частину (3) і два тривісних еліпсоїда 1, 2 (рис. 3). Вісь обертання проходить через точку ЦМ. Головні осі еліпсоїдів складають кут 62°, що призводить до появи невеликого додаткового розламують моменту.

Незважаючи на невеликий обсяг, повна маса астероїда досить велика,  $3.51 \cdot 10^{10}$  кг, і ділиться між великими його частинами у відношенні 3:1. Маси фрагментів 1, 2 і 3 становлять відповідно  $2.54 \cdot 10^{10}$ ,  $0.83 \cdot 10^{10}$  і  $0.14 \cdot 10^{10}$  кг. У перетині XY відцентрові сили розтягування  $F = \sum MR\omega^2$  рівні  $7.5 \cdot 10^4$  н, а напруги  $4.4$  н·м<sup>-2</sup>.

Осі нахилені під кутом 62°, тому найбільші напруги розтягнення в перерізі XY дещо більше розрахункових, але не набагато, як  $1/\cos 62^\circ$ . Сили стиснення від сумарного гравітаційної взаємодії всіх фрагментів  $F_+ = G \sum Mm / R^2$ , віднесені до перетину XY, складають  $3.4 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, а напруги  $20$  н·м<sup>-2</sup>, що в 4.5 рази більше розтягуючих напружень. Таким чином, розрахунки показують, що форма астероїда сприяє його динамічній стійкості.

Сумарний момент інерції астероїда  $I = 8.2 \cdot 10^{14}$  кг·м<sup>2</sup>, через його малі розміри, приблизно в тисячу разів менше, ніж у ядра комети Хартлі 2. При кутовий швидкості  $\omega_1 = 1.44 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> енергія, запасена в обертанні астероїда незначна,  $E = I \omega_1^2 / 2 = 8.5 \cdot 10^5$  Дж.

Астероїд Ітокава далекий від стану руйнації, якщо, звичайно, не відбудеться його зіткнення з іншим небесним тілом.

**Форми ядра комети 19P/Бореллі і астероїда Тоутатис.** Форми ядра комети 19P/Бореллі (Рис.5) і астероїда Тоутатис (Рис.6) схожі своєю видовженістю на ядро комети Хартлі 2, причому ядро комети Бореллі в 15 разів довше, а астероїд Тоутатис у 8.5 разів довший ядра комети Хартлі 2. Знімки комети 19P зроблені з більшої відстані, ніж ядра комети Хартлі 2 і розрізнити подробиці на них не вдається. Астероїд Тоутатис було знято з дуже близької відстані у 3.2 км.

Фізичні характеристики комети Бореллі: розміри – 8×4×4 км; маса –  $2 \cdot 10^{13}$  кг; середня густина – 0.3 г/см<sup>3</sup>; альbedo – 0.03.

Фізичні параметри астероїда Тоутатис: розміри 4.5×2.4×1.9 км; маса –  $5.0 \cdot 10^{13}$  кг; середня густина – 2.1 г/см<sup>3</sup>; період обертання – 5.41-7.33 доби; альbedo 0.13.

Вражаюче зображення форми і рель'єфу астероїда 4719 Тоутатис було отримано 13 грудня 2012 р. китайським космічним зондом Чань'е 2 (рис.6) [3].

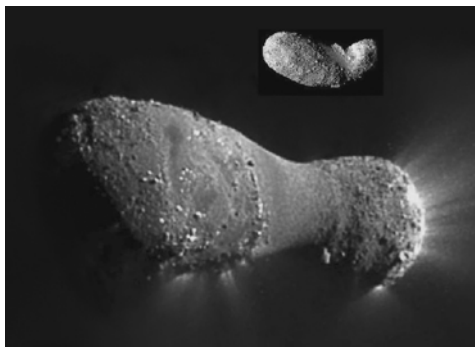


Рис. 4. Ядро комети Хартлі 2 і астероїд Ітокава в однаковому масштабі. Знімки NASA і JAXA

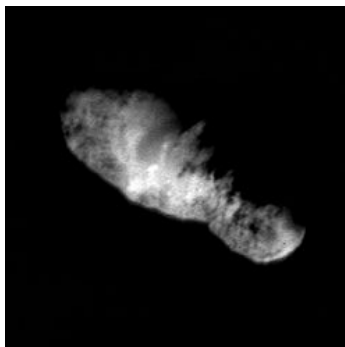


Рис.5. Ядро комети Бореллі (фото КА Deep Space 1)



Рис. 6. Астероїд Туутатис – зображення отримане китайським космічним апаратом Chang'e-2 (Чань'е 2), який пролетів від астероїда на відстанні 3.2 км (роздільна здатність 10 м) 13 грудня 2012 р.

(4179) Туутатис (Toutatis; також зустрічаються транскрипції Тутатис і Таутатис) – астероїд, що зближується із Землею, з групи Аполлона, орбіта якого знаходиться в резонансах 3 : 1 з Юпітером і 1 : 4 із Землею. Із-за малого нахилу його орбіти ( $0,47^\circ$ ) і малого періоду обертання навколо Сонця (близько 4 років) Туутатис часто зближується із Землею, причому мінімальна можлива на даний момент відстань зближення астероїда із Землею) складає 0,006 а. о. (у 2,3 рази більше відстані до Місяця). Зближення 29 вересня 2004 року було особливо близьким, (коли астероїд пройшов на відстані в 0,0104 а. о. від Землі (4 радіуси місячної орбіти), давши хорошу можливість для спостережень – максимальний блиск астероїда склав 8,9 зоряної величини. У грудні 2012 року Туутатис наблизився на відстані 0,0463 а.о. (6930000 км) до Землі, наступне зближення із Землею до 0.2 а.о.відбудеться в 2069 р.

Попередні розрахунки показують, що для ядра комети 19P/Бореллі і астероїду Туутатис сили стиснення від сумарного гравітаційної взаємодії обох фрагментів, розділених шийкою в декілька разів перевищують розтягуючі напруження. Тобто їх фігури будуть залишатись стійкими ще протягом тривалого інтервалу часу.

Детальний кількісний аналіз ротаційної нестійкості ядра комети 19P/Бореллі і астероїду Туутатис планується опублікувати в наступній статті.

**Висновок.** Незважаючи на зовнішню схожість деяких ділянок поверхні ядра комети Хартлі і астероїда Ітокава (рис. 6), можливо, що природа цих утворень різна. Ядро комети знаходиться в стані, близькому до руйнування, в той час, як стан астероїда Ітокава стабільний. Небесні тіла, на кшталт кометних ядер або астероїдів, руйнуються тим легше, чим менше їх середня щільність, яка відіграє велику роль, ніж їх розміри або швидкість обертання.

Для ядра комети 19P/Бореллі і астероїду Туутатис сили стиснення від сумарного гравітаційної взаємодії обох фрагментів, розділених шийкою значно перевищують розтягуючі напруження. Тобто фігури цих малих тіл будуть залишатись стійкими ще протягом тривалого інтервалу часу.

Химерні форми малих небесних тіл, астероїдів і ядер комет, пояснюються надзвичайно складною історією їх утворення. Заплутана теорія виникнення Сонячної системи в наші дні доповнюється новими важливими подробицями, одержуваними в результаті безпосередніх досліджень раніше недосяжних небесних тіл і розвитку теоретичних уявлень про їх формування.

Висловлюємо вдячність агентствам NASA, JAXA, ESA та CNSA за використання в статті знімків, опублікованих на їх сайтах.

#### Список використаних джерел:

1. Л. В. Ксанфомаліті, К.І.Чурюмов. Фізичний механізм майбутнього розділення ядра комети 103P/Хартлі 2. Вісник астрономічної школи. – К.– 2012. – т. 8 – №1-2 – с. 209-215.
2. <https://www.google.com.ua/search?q=Toutatis+asteroid+images&client=opera&hs=q4C&tbn=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=MSaOUvedN8fsswbniYDIBQ&ved=0CC8QsAQ&biw=1600&bih=792>.

Надійшла до редколегії 20.11.13

Л. Ксанфомаліти, д-р физ.-мат. наук, проф., К. Чурюмов, д-р физ.-мат. наук, проф.  
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

#### ДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ АСТЕРОИДОВ ИТОКАВА, ТУУТАТИС И ЯДРА КОМЕТЫ БОРЕЛЛИ

*Рассмотрено ротационную неустойчивость астероидов Итокава, Туутатис и ядра кометы Борелли и показано, что их фигуры являются устойчивыми, относительно разрушения этих малых тел центробежными силами.*

*Ключевые слова: Итокава, Туутатис, Борелли.*

L. Ksanfomality, Dr. Phys. and Math. Sciences, Prof., K. Churyumov, Dr. Phys. and Math. Sciences, Prof.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

#### DYNAMIC STABILITY OF THE ASTEROID ITOKAWA, TOUTATIS AND THE NUCLEUS OF COMET BORELLI

*We consider rotational instability of asteroids Itoqawa and Toutatis and comet Borelly nucleus and show that their shapes are stable relative to the destruction of these small bodies by centrifugal forces.*

*Key words: Itoqawa, Toutatis, Borelly.*