

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Голубов Олексій Андрійович

УДК 523.44-336+52-327+521.14

**ДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ АСТЕРОЇДІВ
ПІД ДІЄЮ НЕГРАВІТАЦІЙНИХ СИЛ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді.
Робота виконана в Науково-дослідному інституті астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Бельська Ірина Миколаївна,
НДІ астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна МОН України,
завідувач відділу фізики астероїдів і комет.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Розенбуш Віра Калениківна,
Астрономічна обсерваторія Київського
національного університету імені Тараса
Шевченка МОН України,
головний науковий співробітник
сектору астрометрії та малих тіл
Сонячної системи;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Тишковець Віктор Павлович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач відділу космічної радіофізики;

доктор фізико-математичних наук, професор
Андронов Іван Леонідович,
Одеський національний морський університет
МОН України, завідувач кафедри математики,
фізики та астрономії.

Захист відбудеться « 2 » вересня 2021 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою:
03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ГАО НАН України за адресою:
03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розісланий « 2 » серпня 2021 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Чим більше ми дізнаємось про об'єкти Сонячної системи, тим більше постає нових цікавих питань. Разом з експансією людства в космос ці питання зміщуються з теоретичної в практичну площину. В останні десятиріччя одними з найважливіших об'єктів досліджень у межах Сонячної системи стали астероїди, і цьому є ряд причин. Астероїди в майже первинному вигляді містять речовину, з якої 4.5 мільярди років тому формувались планети Сонячної системи, і таким чином їх вивчення дає змогу краще зрозуміти фундаментальні процеси планетоутворення. Астероїди є джерелом небезпеки для людства, і розуміння їхніх фізичних і динамічних характеристик необхідне, щоб своєчасно передбачити й запобігти їхньому зіткненню з Землею. Зіткнення астероїдів з планетами були й залишаються однією із ключових рушійних сил в геології планет. А в недалекому майбутньому астероїди можуть стати джерелом ресурсів для космічного будівництва.

Перші астероїди були відкриті ще на початку 1800-х років, але до середини ХХ сторіччя астероїди здебільшого залишались космічними тілами, про які було невідомо майже нічого, крім їхньої яскравості і кеплерових орбіт. У другій половині ХХ сторіччя знання про астероїди надзвичайно зросли, зокрема завдяки широкому застосуванню до їх досліджень методів фотометрії, спектроскопії, радіометрії, поляриметрії, радарної астрономії, а також першим прольотам космічних апаратів поблизу астероїдів.

Однак справжній бум досліджень астероїдів припадає саме на сьогоднішній день. Спеціалізовані огляди неба масово відкривають нові астероїди. Поєднання різних спостережних методів дає змогу отримувати моделі форм для тисяч астероїдів [45]. Останнім часом були відкриті сотні подвійних астероїдів [50, 64]. Завдяки космічній місії Gaia було отримано безпрецедентно точні параметри орбіт астероїдів [71]. Космічні апарати відвідали вже понад 10 астероїдів, 6 астероїдів були детально вивчені спеціалізованими орбітальними місіями, і ще більше місій заплановано на наступні роки.

Теоретичним дослідженням астероїдів важко встигнути за цим неймовірним темпом прогресу у накопиченні спостережних даних. Аналітичним і чисельним моделюванням вдається охопити все більше явищ, але часто такі моделювання містять забагато невизначених параметрів і нездатні відокремити більш важливі фізичні процеси від другорядних, так що об'єднання окремих описаних аспектів в загальну картину ще попереду. Останнім часом однією з найважливіших об'єднуючих теоретичних ідей у фізиці астероїдів стала ідея про вирішальну роль сил світлового тиску в динаміці малих астероїдів розміром до 10–20 км, а саме ефектів Ярковського та ЯОРП (Ярковського–О'Кіфа–Радзієвського–Педдека).

Ефект Ярковського полягає у впливі теплового випромінювання астероїда на його орбіту. Через теплову інерцію найвища температура на поверхні астероїда досягається не опівдні, коли нагрівання поверхні Сонцем найпотужніше, а ближче до вечора. Вечірня сторона астероїда виявляється в середньому теплішою за його ранкову сторону, тому випромінює більше теплового інфрачервоного світла, і сили віддачі від цього випромінювання штовхають астероїд. Ця ідея була вперше

запропонована Іваном Янковським у 1901 році для пояснення руху планет в межах теорії світлового ефіру [39]. В 1950-х роках ідея була переформульована Ернстом Епіком у термінах сучасної електродинаміки і застосована до руху метеороїдів [57]. Незалежно ця сама ідея була сформульована Володимиром Радзієвським [38]. В 1980-х роках ефект Янковського було залучено до пояснення динаміки космічних апаратів [67], а в 1990-х він був успішно застосований до моделювання динаміки астероїдів [40, 46, 68].

Ефект ЯОРП полягає у впливі тиску розсіяного або випроміненого світла на обертання астероїдів. Термін було введено Девідом Рубінкамом [69] у 2000 році на честь авторів, які досліджували подібний ефект [56, 59–61, 66].

І ефект Янковського, і ефект ЯОРП обговорювалися в окремих наукових роботах починаючи з 1950-х років, але остаточне усвідомлення науковим суспільством їхньої ролі в динаміці астероїдів припадає на кінець 1990-х – початок 2000-х років (див., наприклад, [42]).

Стало зрозуміло, що на масштабах часу в мільйони років ефект Янковського здатний достатньо змінювати орбіту астероїда, щоб астероїд потрапив у резонанс з планетами і був переведений гравітаційними збуреннями на принципово іншу орбіту. Таким чином, ефект Янковського суттєво впливає на розподіл астероїдів по орбітах та на поповнення популяції навколоземних астероїдів, зокрема таких, що становлять астероїдну небезпеку [53]. Більш того, урахування ефекту Янковського необхідне для точного розрахунку орбіт потенційно небезпечних астероїдів та надійного передбачення їхніх можливих зіткнень із Землею (наприклад, [47]).

Ефект ЯОРП, в свою чергу, виявився ключовим чинником еволюції обертального стану кілометрових астероїдів на масштабах часу в мільйони років. З'ясувалося, що він здатний сповільнювати обертання астероїдів, доки астероїд не почне нутаційний рух, що суттєво змінить діючий на астероїд ЯОРП. В інших випадках, ЯОРП може пришвидшувати обертання астероїдів, доки відцентрові сили не призведуть до зміни форми астероїда, втрати речовини з його поверхні або розпаду астероїда [73]. Вважається, що саме ефект ЯОРП значною мірою відповідає за формування подвійних астероїдів та астероїдів дзигоподібних форм (*top-shaped asteroids*), які виявляються дуже розповсюдженими у Сонячній системі [75]. ЯОРП має відігравати ключову роль у формуванні розподілу малих астероїдів і метеороїдів за розмірами [43]. Крім того, змінюючи швидкість обертання й орієнтацію осі астероїда, ЯОРП впливає на величину ефекту Янковського, який діє на астероїд.

Ефекти ЯОРП та Янковського в останні роки активно досліджуються за допомогою спостережень. ЯОРП був відкритий для менш ніж 10 астероїдів (див. [73]), ефект Янковського – для понад 200 астероїдів [48]. Крім астероїдів, обидва ефекти спостерігалися для космічних апаратів на навколоземних орбітах [41, 67]. Узагальнення теорій, що були розроблені для розрахунків світлового тиску, успішно застосовуються для опису реактивних сил, що діють на комети [49] та сил спротиву міжзоряного середовища, що діють на міжзоряні астероїди [76]. Таким чином, краще розуміння ефектів Янковського і ЯОРП необхідне для пояснення еволюції астероїдів, походження подвійних астероїдів, інтерпретації розподілу астероїдів за розмірами, для прогнозування астероїдної небезпеки та

своєчасної розробки захисту від неї, а також для боротьби з проблемою космічного сміття.

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні окремих проявів ефектів Ярковського та ЯОРП, загальне розуміння еволюції астероїдів під дією цих ефектів досі залишалось обмеженим. Був незрозумілим вплив нерівностей поверхні астероїда на зміни швидкості його осевого обертання. Бракувало узагальнених досліджень зміни обертального стану астероїда під дією ефекту ЯОРП. В моделюваннях динаміки астероїдів зазвичай не враховувалась можливість зупинки еволюції їхнього обертального стану в точках стійкої рівноваги, де різні компоненти негравітаційних сил компенсують один одного.

Представлена робота присвячена побудові загальної теорії динаміки астероїдів під дією негравітаційних ефектів Ярковського і ЯОРП. Основна увага була зосереджена на побудові нової аналітичної теорії цих ефектів, дослідженні компонента ЯОРП, пов'язаного з дрібномасштабними нерівностями поверхні, а також на аналітичному і чисельному моделюванні еволюції обертального стану одинарних і подвійних астероїдів, зокрема знаходженню нових станів рівноваги астероїдів. Представлені в роботі результати сформулювали нове уявлення про наслідки дії негравітаційних ефектів на малі тіла Сонячної системи та є підґрунтям для подальшого дослідження їх еволюції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в межах наступних держбюджетних НДР НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, у яких здобувач був виконавцем:

- «Визначення фізичних та динамічних характеристик астероїдів, що наближаються до Землі» (2015–2017 рр., № держ. реєстрації 0115U000482);
- «Фізичні властивості астероїдів на орбітах поблизу орбіти Землі за результатами спостережень і чисельного моделювання» (2018–2020 рр., № держ. реєстрації 0118U002019);
- «Динаміка і кінематика навколоземних астероїдів під дією негравітаційних сил» (з 2021 р., № держ. реєстрації 0121U109815).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження обертання астероїдів під дією негравітаційних сил світлового тиску, виявлення їхніх загальних закономірностей, розробка моделей для аналітичного та чисельного розрахунку динаміки астероїдів.

Виходячи із сформульованої мети, були поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Розробка напіваналітичної теоретичної моделі для ефектів Ярковського та ЯОРП.
2. Дослідження впливу рельєфу та теплової інерції поверхні астероїда на ефект ЯОРП.
3. Застосування створеної моделі до дослідження еволюції обертального руху астероїдів та астероїдних сімейств.

4. Аналіз можливих положень рівноваги обертального стану подвійних астероїдів під дією ефекту ЯОРП, дослідження ймовірності існування положень рівноваги та їх стійкості.

Об'єктами дослідження є астероїди Головного поясу та астероїди, що наближаються до орбіти Землі.

Предмет дослідження – динамічні властивості астероїдів, що входять до даних груп.

Методи дослідження: математичний аналіз, чисельне моделювання, аналітичні розрахунки, порівняльний аналіз отриманих даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано новий підхід та розроблено нову напіваналітичну модель розрахунку ефекту ЯОРП та Ярковського для астероїдів. У припущенні локально пласкої поверхні доведено незалежність впливу ЯОРП на швидкість обертання астероїдів від теплової моделі.
2. Вперше запропоновано концепцію тангенціального ефекту ЯОРП, який виникає завдяки нерівномірному нагріву каменів на поверхні астероїда. За результатами чисельного моделювання доведено значимість впливу цього ефекту на обертання астероїдів. Створено наближену аналітичну модель тангенціального ЯОРП та виведено формулу для його розрахунку.
3. За результатами аналізу даних наземних та космічних спостережень для астероїдів (25143) Ітокава та (101955) Бенну, показано, що розбіжності між теоретично розрахованим та спостережуваним ефектом ЯОРП для цих астероїдів можуть бути пояснені впливом тангенціального ЯОРП.
4. Розроблено модель еволюції обертального руху астероїдів під одночасним впливом нормального та тангенціального ЯОРП. Аналітично виведено рівняння для типової поведінки ЯОРП в залежності від нахилу осі обертання астероїда. Знайдено аналітичні розв'язки цих рівнянь, що якісно співпадають з результатами чисельних моделювань.
5. Знайдено новий тип рівноваги обертального стану астероїда, в якому нормальний та тангенціальний ЯОРП взаємно компенсуються. Сформульовані умови існування такого стану рівноваги та показано, що умови його існування можуть виконуватись для близько 10% астероїдів.
6. Розроблено методику застосування аналітичної теорії ефекту ЯОРП до розрахунку еволюції астероїдних сімейств. Показано, що результати моделювань якісно узгоджуються зі спостережними даними, і розроблена модель може використовуватись для розрахунку розподілу орбітальних параметрів сімейств астероїдів.
7. Запропоновано два нові типи рівноваги подвійних систем астероїдів, що виникають завдяки взаємній компенсації різних компонентів ефекту ЯОРП. За результатами моделювань доведено стійкість цих типів рівноваги та показано, що такі стани рівноваги існують для кількох відсотків подвійних астероїдів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень мають фундаментальне значення для розуміння еволюції астероїдів під дією

негравітаційних ефектів Ярківського і ЯОРП. Вагомість роботи полягає у знаходженні нового компонента ефекту ЯОРП, викликаного дрібномасштабними нерівностями поверхні, а також у комплексному підході до опису еволюції обертального стану астероїда та знаходженні станів стійкої рівноваги астероїдів.

Результати роботи можуть бути застосовані до такої практично важливої задачі, як прогнозування і запобігання астероїдної небезпеки. Іншим перспективним застосуванням створених моделей є розробка таких методик виведення з експлуатації космічних апаратів, які б мінімізували їхнє розкручування ефектом ЯОРП, і таким чином уникали роздроблення апаратів на космічне сміття.

Результати роботи вже застосовувалися вітчизняними і закордонними науковими групами в теоретичних розрахунках кутового прискорення астероїдів і в моделюваннях динаміки популяцій астероїдів, а також в освітньому процесі.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень базуються на застосуванні загальноприйнятих та добре перевірених фізичних, математичних та чисельних методів. Достовірність ряду отриманих результатів перевірено використанням різних підходів для опису одного і того ж явища та несуперечністю отриманих результатів. Достовірність отриманих даних підтверджується також апробацією результатів досліджень у фахових міжнародних журналах та на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладено у роботах [1–10]. В усіх зазначених роботах дисертанту належать теоретичні розрахунки ефекту ЯОРП.

В роботі [1] здобувач брав участь у постановці задачі, створив використану в розрахунках модель ефекту ЯОРП та описав її в тексті статті.

В роботі [2] здобувач зробив для статті теоретичний розрахунок тангенціального ефекту ЯОРП досліджуваного астероїда, а також перевірів незалежним розрахунком значення нормального ефекту ЯОРП, визначене іншими співавторами.

В роботі [3] здобувач взяв участь у постановці задачі, виконав розрахунки, створив комп'ютерні програми, написав більшу частину тексту.

В роботі [4] постановка задачі виконана в рівній мірі Деніелом Ширсом і здобувачем. Аналітичні розрахунки виконані разом здобувачем і Владиславом Унуковичем. Здобувач написав більшу частину тексту статті і створив більшу частину використаних у статті комп'ютерних програм.

Стаття [5] написана одноосібно.

В роботі [6] постановка задачі виконана разом здобувачем і Деніелом Ширсом. Здобувачем виконано розрахунки, створено програми, написано текст статті.

В роботі [7] здобувачу належить постановка задачі, аналіз результатів, чисельні розрахунки тангенціального ефекту ЯОРП еліпсоїдального астероїда, частково – написання тексту статті.

В роботі [8] здобувач виконав більшу частину розрахунків для статті.

Написання комп'ютерних програм і написання тексту статті виконані в рівній мірі Євгеном Кравцем і здобувачем.

В роботі [9] автор брав участь у постановці задачі, створив комп'ютерну програму, провів розрахунки та написав текст статті.

В роботі [10] постановка задачі виконана разом здобувачем і Юрієм Круглим. Здобувачем створено комп'ютерну програму, проведено розрахунки та написано більшу частину тексту статті.

В роботі [11] здобувачу належить постановка задач для чисельного моделювання, створення статистичної моделі для оцінки важливості ефекту Ярковського, написання частини тексту статті.

В роботах [12–18] здобувач брав участь в обговоренні та інтерпретації результатів в якості наукового співробітника космічної місії NASA OSIRIS-REx.

В роботі [19] здобувач виконав постановку задачі, аналітичні та чисельні розрахунки, написав текст роботи.

В роботі [20] здобувач брав участь у постановці задачі, виконав аналітичні та чисельні розрахунки, написав текст.

В роботі [21] здобувачу належить постановка задачі, створення комп'ютерних програм, виконання чисельних розрахунків, участь у написанні тексту.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи обговорювалися на наукових семінарах НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна, Університету Колорадо у Боулдері (США), Гарвард-Смітсонівського астрофізичного центру (США), Гельсінського університету (Фінляндія), Обсерваторії Лазурового Узбережжя (Франція) та були представлені або доповідалися на наступних наукових конференціях:

- Lunar and Planetary Science Conference, Зе-Вудлендс, США (online), 2021 р.;
- International Churyumov readings «Comet, Asteroids, Meteors, Meteorites, Astroblemes, Craters» (САММАС-2020), Вінниця, Україна (online), 2020 р.;
- The Apophis T–9 Years: Knowledge Opportunities for the Science of Planetary Defense workshop, Ніцца, Франція (online), 2020 р.;
- EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Женева, Швейцарія, 2019 р.;
- Binary Asteroids 5, Форт-Коллінс, США, 2019 р.;
- Lunar and Planetary Science Conference, Зе-Вудлендс, США, 2019 р.;
- Thermal Models for Planetary Science (TherMoPS III), Будапешт, Угорщина, 2019 р.;
- Lunar and Planetary Science Conference, Зе-Вудлендс, США, 2018 р.;
- DPS Annual Meeting, Ноксвілл, США, 2018 р.;
- XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Відень, Австрія, 2018 р.;
- Atmosphereless Solar System Bodies in the Space Exploration Era, Харків, Україна, 2018 р.;
- Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System, Кобе, Японія, 2018 р.;
- Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Київ, Україна, 2018 р.;

- DPS Annual Meeting, Прово, США, 2017 р.;
- International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, Харків, Україна, 2016 р.;
- Workshop on Binaries in the Solar System, Прага, Чехія, 2016 р.;
- DDA Meeting, Нешвілл, США, 2016 р.;
- European Planetary Science Congress, Нант, Франція, 2015 р.;
- Thermal Models for Planetary Science (TherMoPS II), Пуерто-де-ла-Крус, Іспанія, 2015 р.;
- Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Київ, Україна, 2015 р.;
- Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Одеса, Україна, 2014 р.;
- AGU Meeting, Сан-Франциско, США, 2013 р.;
- DPS Annual Meeting, Денвер, США, 2013 р.;
- International Astronomical Union General Assembly, Пекін, Китай, 2012 р.;
- JENAM, Санкт-Петербург, Росія, 2011 р.;
- IAA Planetary Defense Conference, Бухарест, Румунія, 2011 р.;
- Asteroids, Comets, Meteors, Ніїґата, Японія, 2012 р.;
- Asteroid-Comet Hazard, Санкт-Петербург, Росія, 2009 р.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені в 10 статтях в спеціалізованих реферованих журналах I квартилю (Q1), а саме «Astronomical Journal», «Astrophysical Journal», «Astrophysical Journal Letters», «Astronomy and Astrophysics», «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», «Geophysical Research Letters» [1–10].

Усього за темою дисертації опубліковано 37 наукових праць, серед яких 18 статей у наукових фахових виданнях I квартилю [1–18], ще 2 праці у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Web of Science і Scopus [19–20], 1 стаття у науковому фаховому виданні України [21] і 16 тез доповідей на фахових вітчизняних і міжнародних наукових конференціях [22–37].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Повний обсяг дисертації – 133 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді, яка містить аналіз сучасного стану наукової проблеми, опис методів і результатів досліджень, детально представлених в опублікованих працях.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність наукової проблеми, яка була обрана для дослідження, мету і завдання дослідження, сформульовано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

Розділ 1 «Теоретична модель ефектів ЯОРП і Ярковського» присвячений побудові напіваналітичної теоретичної моделі ефектів Ярковського і Ярковського–О'Кіфа–Радзієвського–Педдека (ЯОРП) на основі простої теплофізичної моделі астероїда.

В найпростішому випадку теплопровідність у приповерхневому шарі астероїда можна вважати одновимірною. Це припущення несправедливе, коли на поверхні астероїда є нерівності розміром порядку довжини теплової хвилі, і тепло може розповсюджуватись крізь них. Але для локально пласкої поверхні теплообміном між сусідніми ділянками поверхні можна знехтувати і описати теплообмін під кожним елементом поверхні одновимірним рівнянням теплопровідності.

Граничною умовою для рівняння теплопровідності на поверхні астероїда є баланс енергії між потоком тепла, що надходить від Сонця, потоком тепла, що йде вглиб астероїда за рахунок теплопровідності, та потоком тепла, що випромінюється з поверхні за законом Стефана–Больцмана. Другою граничною умовою є зникнення теплового потоку на великій глибині, що справедливо для достатньо великих астероїдів. Рівняння теплопровідності розв'язується з періодичною початковою умовою, тобто припускається, що після повного оберту астероїда навколо своєї осі розподіл температури має повернутись до свого початкового значення. Розв'язок рівняння теплопровідності з даними граничними і початковою умовами дає температуру в приповерхневому шарі астероїда як функцію часу.

Знаючи температуру поверхні астероїда, можна за законом Стефана–Больцмана розрахувати інтенсивність теплового випромінювання з елемента поверхні як функцію часу. Припускаючи, що випромінювання розподілене за напрямками за законом Ламберта, розраховується тиск, який теплове випромінювання передає поверхні. До нього додається тиск розсіяного світла, для якого в найпростішому випадку також застосовується закон Ламберта.

Таким чином знаходиться тиск на окремий елемент поверхні астероїда в залежності від часу. Його потрібно проінтегрувати по поверхні, щоб знайти силу й момент сил, що діють на весь астероїд, а також усереднити за часом, щоб позбутися короткоперіодичних добових і річних осциляцій. Традиційно ці дві процедури виконувались саме в такому порядку: спочатку інтегрування по поверхні, потім усереднення за часом [69, 74]. Оскільки модель форми астероїда задається чисельно, то й інтегрування по поверхні можна було виконати лише чисельно. Відтак і подальше усереднення за часом було можливе тільки чисельно.

В роботі використано протилежний підхід: спочатку проведено усереднення дії ефектів Ярковського і ЯОРП за часом для кожного елемента поверхні, а вже потім – інтегрування по поверхні. Це дає змогу виразити ці ефекти аналітично як інтеграли по поверхні астероїда від певних універсальних функцій, які можна дослідити чисельно або знайти аналітично в певному наближенні.

Такий підхід вперше було запропоновано в роботах [37] і [72] для граничного випадку нульової теплової інерції поверхні. Його узагальнення на довільну теплову інерцію було виконане в статті [8]. Таким чином, були отримані наступні вирази для трьох компонентів моменту сил ЯОРП та для сили Ярковського:

$$\begin{aligned}
\langle T_z \rangle &= \frac{\Phi}{c} \oint_S dS r \sin \Delta \cos \eta \cos \psi p_z^\alpha, \\
\langle T_\varepsilon \rangle &= - \frac{\Phi}{c} \oint_S dS r \left(\sin \psi \cos \eta \sin \Delta \times \right. \\
&\quad \times (A p_{\sin}^\alpha(\psi, \varepsilon) + (1 - A) p_{\sin}^\tau(\psi, \varepsilon, \theta)) + \\
&\quad + (\cos \psi \sin \eta - \sin \psi \cos \eta \cos \Delta) \times \\
&\quad \left. \times (1 - A) p_{\cos}^\tau(\psi, \varepsilon, \theta) \right), \\
\langle T_\Psi \rangle &= \frac{\Phi}{c} \oint_S dS r \left((\sin \psi \cos \eta \cos \Delta - \cos \psi \sin \eta) \times \right. \\
&\quad \times (A p_{\sin}^\alpha(\psi, \varepsilon) + (1 - A) p_{\sin}^\tau(\psi, \varepsilon, \theta)) + \\
&\quad \left. + \sin \psi \cos \eta \sin \Delta (1 - A) p_{\cos}^\tau(\psi, \varepsilon, \theta) \right), \\
\langle F_{\text{Yark}} \rangle &= \frac{(1 - A) \Phi}{c} \oint_S dS p_{\text{Yark}}^\tau(\psi, \varepsilon, \theta),
\end{aligned}$$

де c – швидкість світла, Φ – сонячна стала на орбіті астероїда, кути ψ , η , Δ характеризують положення й орієнтацію елемента поверхні астероїда, A – альbedo, ε – нахил площини екватора астероїда до площини його орбіти, а θ – тепловий параметр, що характеризує теплову інерцію ґрунту. Всі інтеграли беруться по поверхні астероїда. Безрозмірні функції p є універсальними і залежать лише від означених трьох параметрів – широти ψ , нахилу осі ε і теплового параметра θ . Вони виражаються через певні усереднені значення від освітленості або температури. Конкретні вирази для функцій p наведені у роботі [8]. На рис. 1 і рис. 2 показано залежності різних безрозмірних тисків p від ψ , ε і θ .

Наведені формули дають змогу розрахувати ефекти ЯОРП і Ярковського для довільних опуклих астероїдів. Компонент T_ψ , що викликає прецесію осі астероїда, може поступатись за величиною гравітаційним збуренням. Крім того, для астероїда на коловій орбіті еволюція нахилу осі і кутової швидкості не залежить від прецесії, тому T_ε (що змінює нахил осі астероїда ε) і T_z (що змінює кутову швидкість) дають самодостатню задачу, і в першому наближенні T_ψ можна не враховувати.

Такий формалізм узагальнюється на випадок еліптичних орбіт. Внесок в ефект ЯОРП від розсіяного світла зі зміною ексцентриситету перераховується за простою аналітичною формулою, натомість як внесок від випромінюваного світла може бути розрахований лише чисельно і має бути досліджений для значно більшої кількості вільних параметрів, що робить в цьому випадку весь запропонований формалізм значно менш зручним.

Запропонована напіваналітична модель для закону Ламберта також узагальнюється на інші закони розсіювання світла. Голубов та ін. [8] показують, що

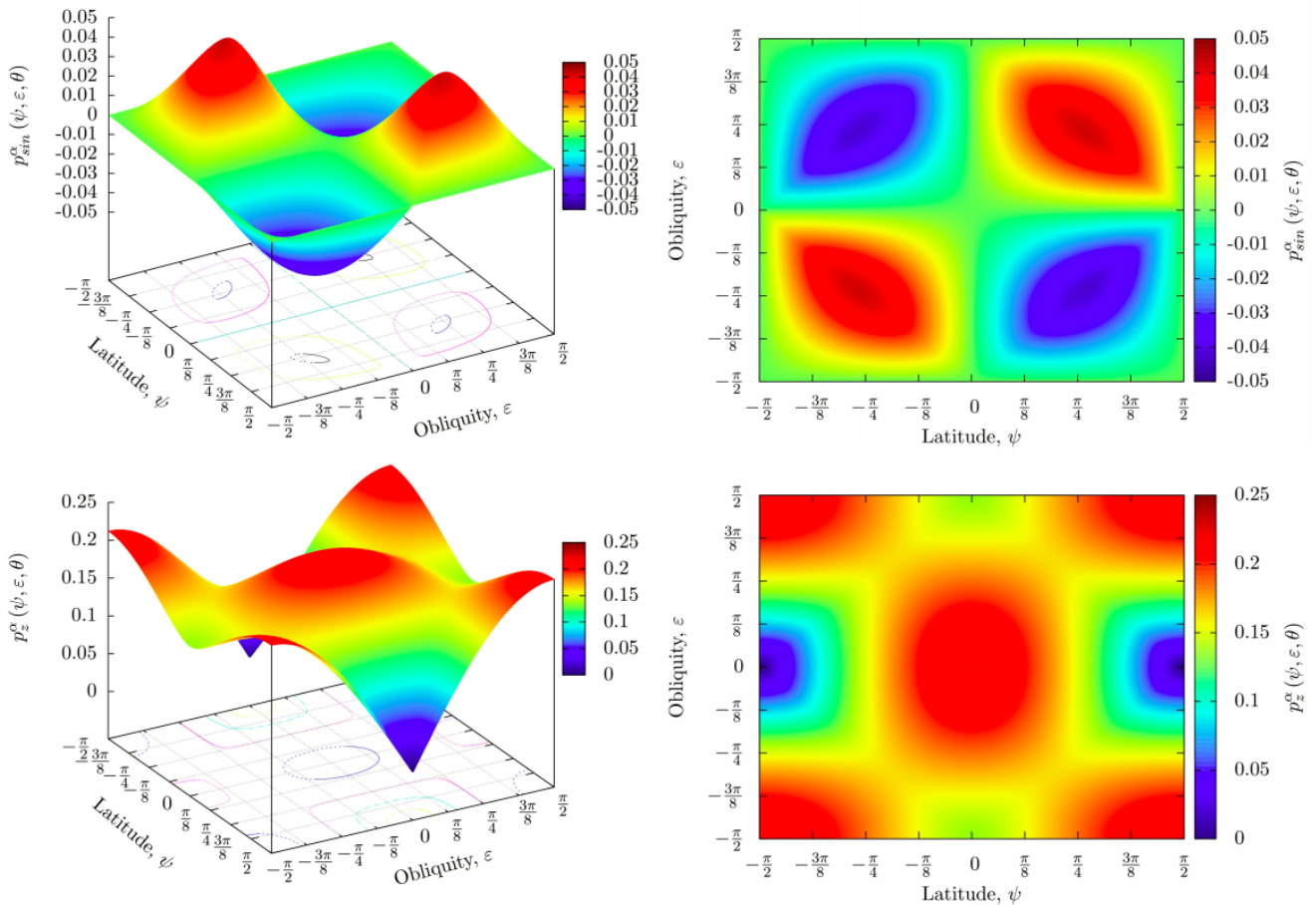


Рис. 1. Залежності p_{\sin}^{α} (вгорі) і p_z^{α} (внизу) від широти ділянки на поверхні астероїда ψ і нахилу осі обертання астероїда ϵ у вигляді тривимірних графіків (ліворуч) і кольорових карт (праворуч).

закон Ломмеля–Зелігера не призводить до значних змін безрозмірних тисків у порівнянні з законом Ламберта.

З іншого боку, опуклість форми астероїда виявляється більш принциповим наближенням моделі. Для окремих неопуклих форм астероїдів вплив неопуклості був досліджений за допомогою комп'ютерної програми для трасування. Значну розбіжність між теоретичною моделлю і результатами трасування променів було знайдено лише для найбільш неопуклих форм астероїдів (рис. 3).

Компоненти ефекту ЯОРП T_{ϵ} , T_{ψ} і сила Ярковського F_{Yark} істотно залежать від теплової моделі. Голубов та ін. [8] побудували наближені моделі для розрахунку безрозмірних тисків в цих формулах у випадках високої і низької теплової інерції.

З іншого боку, T_z не залежить від теплової інерції. Ця теорема доводиться в роботі за досить загальних умов. Ключовим наближенням, використаним при доведенні цієї теореми, є одновимірність теплової моделі астероїда, тобто відсутність обміну енергією між різними елементами поверхні. В наступному розділі обговорюється, як такий обмін енергією може призводити до появи нового компонента ефекту ЯОРП.

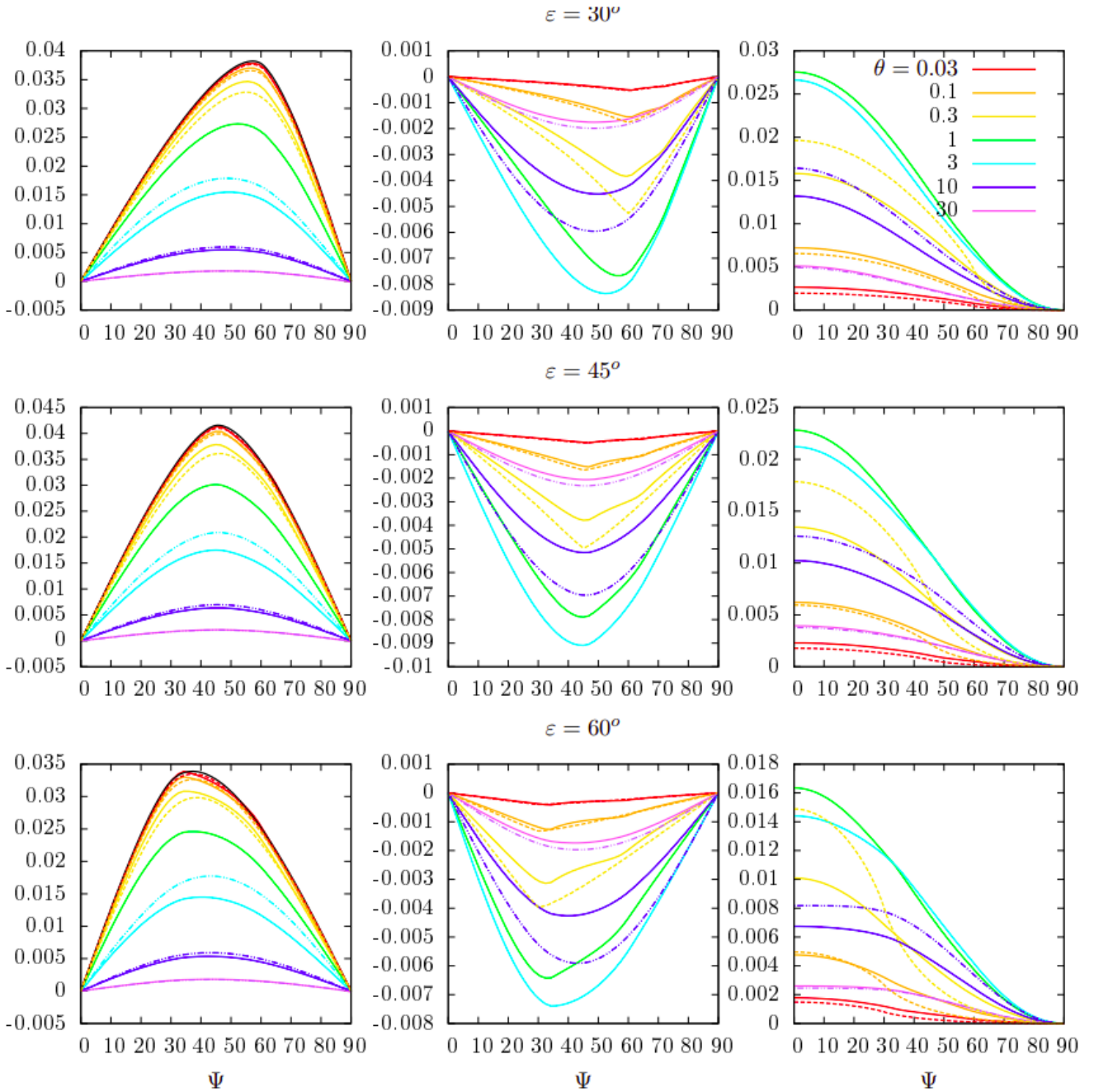


Рис. 2. Залежність p_{\sin}^{τ} (ліворуч), p_{\cos}^{τ} (в центрі) і p_{Yark}^{τ} (праворуч) від параметрів. Три рядки відповідають різним значенням нахилу осі ε . Широта ψ відкладена вздовж горизонтальної осі. Різні значення теплового параметра θ показані лініями різного кольору. Пунктирні лінії тих самих кольорів показують наближені аналітичні моделі.

Розділ 2 «Вплив нерівностей поверхні на ефект ЯОРП» присвячено відкриттю і дослідженню тангенціального ефекту ЯОРП, викликаного теплопровідністю в дрібномасштабних нерівностях рельєфу астероїда (наприклад, в каменях).

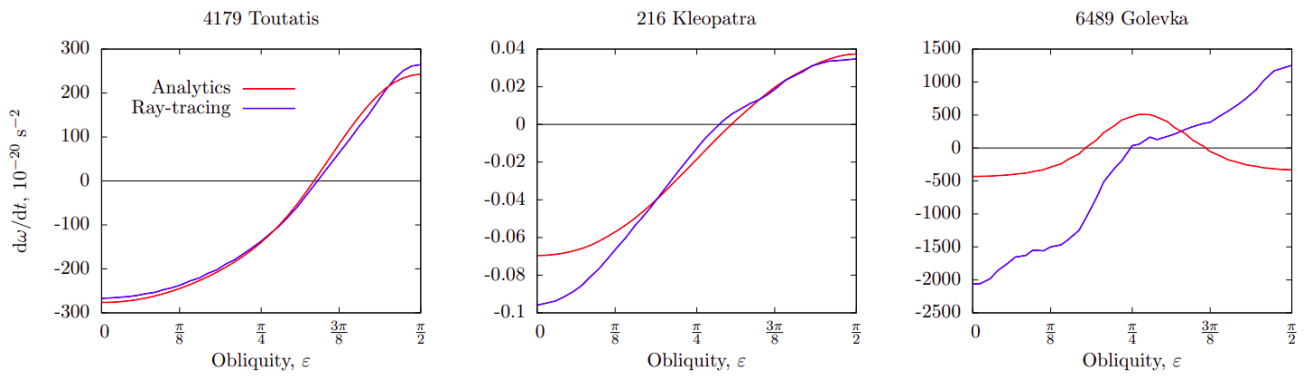


Рис. 3. Прискорення обертання під дією ЯОРП, розраховане за радарними моделями форми трьох астероїдів, в залежності від нахилу осі обертання астероїда ε . Червоні лінії розраховані в аналітичній моделі, блакитні – шляхом трасування променів.

Тангенціальний ЯОРП виникає, коли енергія сонячного світла, поглинута окремими каменями на поверхні астероїда, перерозподіляється всередині каменів завдяки теплопровідності і перевипромінюється анізотропно. При цьому кожен камінь відчуває сили віддачі тільки по нормалі до його локальної поверхні, але ці сили містять складову, дотичну до глобальної поверхні астероїда. Через цю дотичну (тангенціальну) складову ми назвали цей ефект «тангенціальний ЯОРП», на відміну від «нормального ЯОРП», створеного силами, перпендикулярними (нормальними) до глобальної поверхні, який розглядався раніше.

Сили нормального ефекту ЯОРП зазвичай на 2–3 порядки більші за сили тангенціального ЯОРП, але моменти цих двох сил для астероїдів можуть бути одного порядку. По-перше, це пов'язано з тим, що сили тангенціального ЯОРП мають більше плече важеля. По-друге, моменти нормального ЯОРП для різних ділянок астероїда переважно компенсують один одного, натомість як для тангенціального ЯОРП моменти різних ділянок додаються.

Тангенціальний ЯОРП був вперше запропонований у роботі [10] за результатами чисельного дослідження ідеалізованої моделі високого плаского каменя, що вертикально стоїть на астероїді вздовж меридіана (рис. 4). Вранці цей

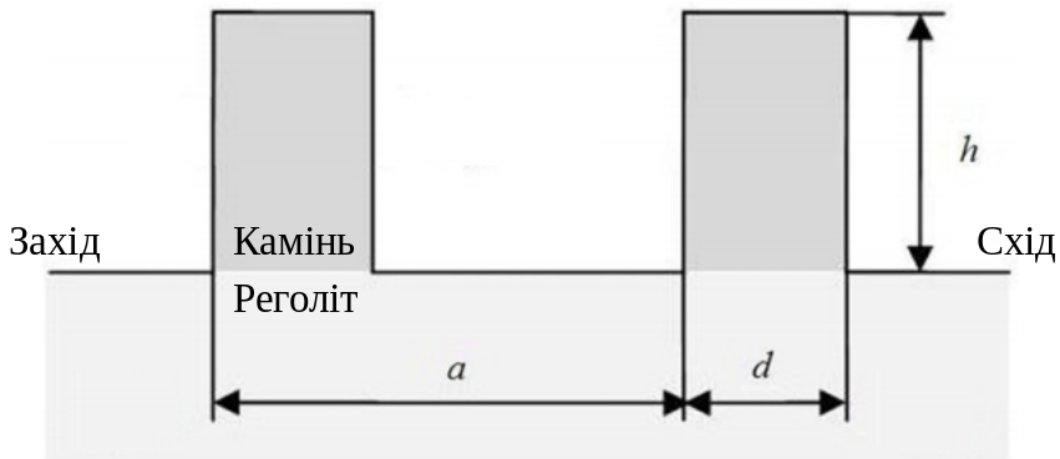


Рис. 4. Найпростіша модель, що ілюструє тангенціальний ефект ЯОРП: довгі високі прямокутні камені, встановлені на поверхні реголіту.

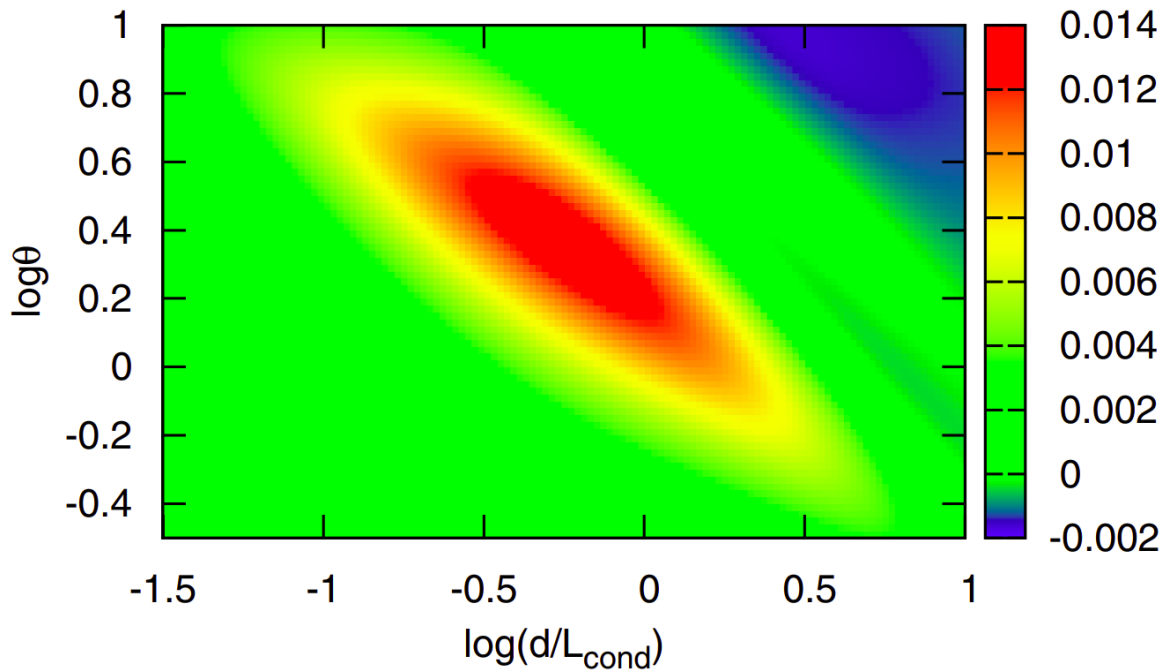


Рис. 5. Залежність величини тангенціального ЯОРП від теплового параметра θ та товщини каменя d .

камінь освітлюється Сонцем зі сходу, і поглинуте тепло розповсюджується завдяки теплопровідності від східного до західного боку каменя. Коли ввечері камінь освітлюється Сонцем з заходу, то його західний бік, вже підігрітий теплопровідністю, досягає вищої температури, ніж досягав східний бік. Інтенсивність випромінювання і створювана ним сила віддачі пропорційні четвертому ступеню температури. Таким чином ввечері західний бік каменя своїм випромінюванням пришвидшує обертання астероїда сильніше, ніж вранці східний бік гальмував обертання. Величину тангенціального ЯОРП було розраховано чисельно. Було знайдено, що максимальний момент сил діє на астероїд тоді, коли товщина каменя порядку довжини теплової хвилі, а тепловий параметр – порядку одиниці (рис. 5).

Досконалішу геометричну модель тангенціального ЯОРП було розглянуто в роботі [9]. Замість високої одновимірної стіни розглядалися сферичні камені, що рівними рядами лежали на поверхні реголіту (рис. 6). Вільними параметрами в цій моделі виступали радіуси каменів, їхні теплові параметри, висоти центрів каменів над поверхнею реголіта, відстані між ними та широта ділянки на поверхні астероїда. Була створена комп'ютерна програма, яка методом трасування променів розв'язувала оптичну частину задачі, а методом скінченних різниць моделювала теплопровідність в каменях. За результатами розрахунків програми була досліджена величина ефекту в залежності від всіх п'яти вільних параметрів. Середній тиск, створюваний кожним каменем, зменшувався при збільшенні широти, при зануренні каменів у реголіт і при наближенні каменів один до одного. Залежність сили тангенціального ЯОРП від теплового параметра і розміру каменів мала чітко виражений максимум, подібний до того, що спостерігався для високих одновимірних каменів (рис. 7).

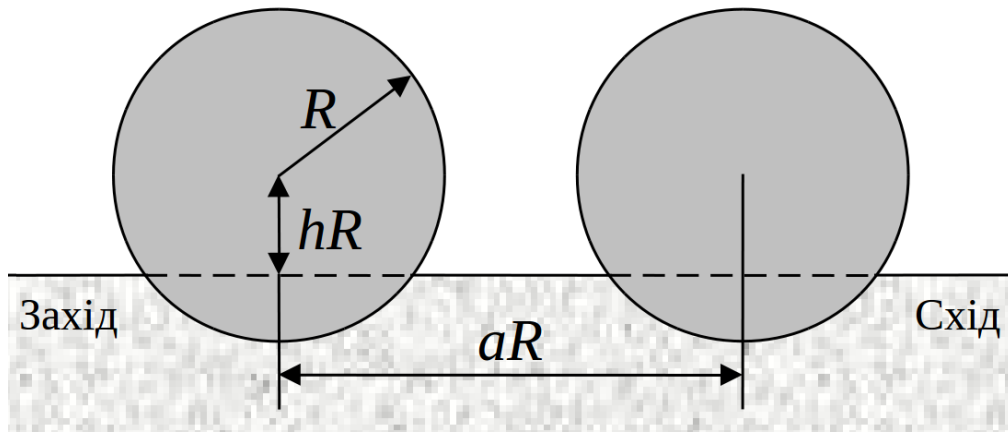


Рис. 6. Модель сферичних каменів на реголіті, використана для розрахунку тангенціального ЯОРП у роботі [9].

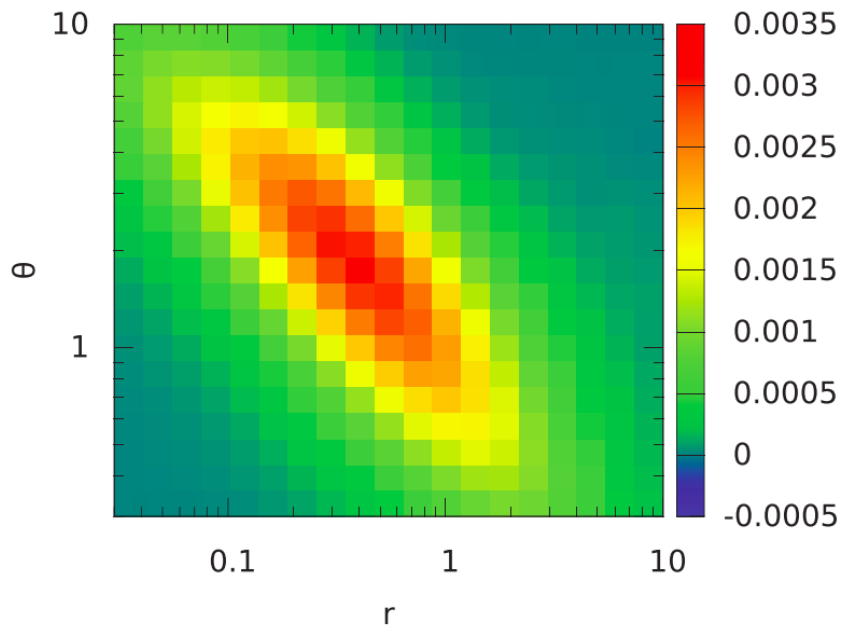


Рис. 7. Залежність величини тангенціального ЯОРП від теплового параметра θ і розміру каменів r (у безрозмірних одиницях) для випадку сферичних каменів.

Шевечек та ін. [7] продовжили моделювання сферичних каменів, дослідивши залежність тангенціального ЯОРП від нахилу осі астероїда ε . Було виявлено, що тангенціальний ЯОРП астероїда приблизно пропорційний множнику $1 + \cos^2 \varepsilon$. Крім того, чисельним інтегруванням тангенціального ЯОРП по поверхні еліпсоїда було знайдено коефіцієнт пропорційності між силою, що діє на окремий камінь, і моментом сили, який відчуває весь астероїд. Виявилось, що незалежно від співвідношення осей еліпсоїда тангенціальний ЯОРП з високою точністю пропорційний його об'єму. В цій роботі було використано методи чисельного моделювання, принципово відмінні від використаних в роботі [9]: метод скінченних елементів замість методу скінченних різниць, функції освітлення замість трасування променів. Розрахунки за допомогою різних методів добре узгодились між собою, підтвердивши таким чином надійність отриманих результатів.

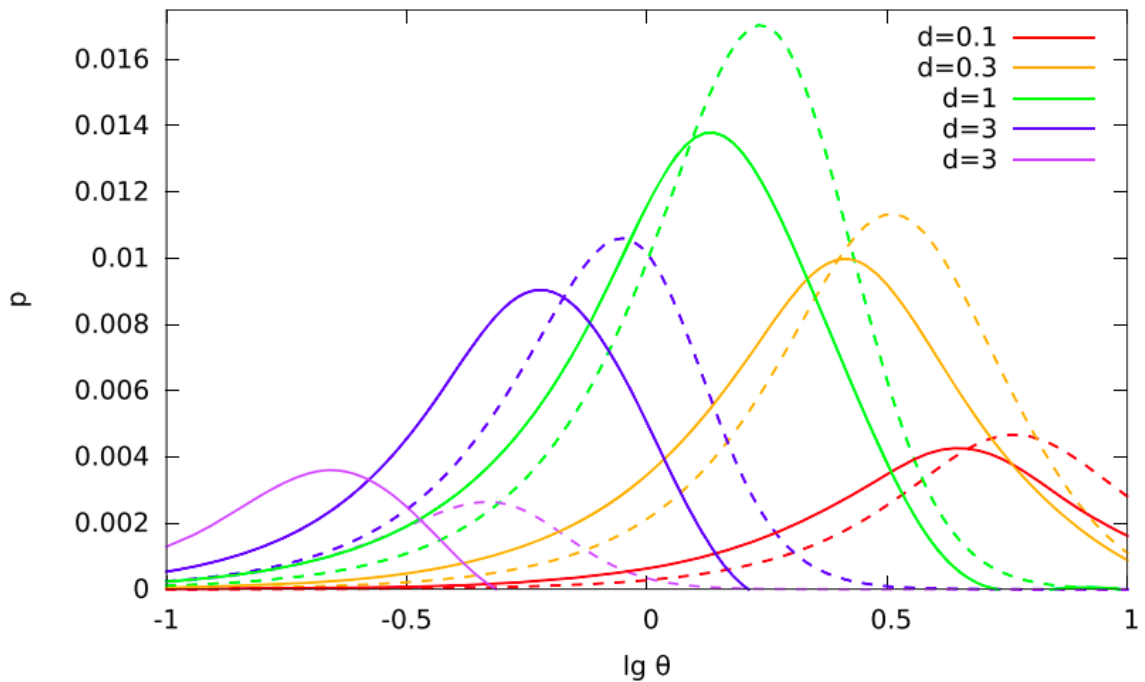


Рис. 8. Безрозмірний тиск тангенціального ЯОРП для високого плаского каменя, розрахований за результатами чисельного моделювання (суцільні лінії) та за аналітичною формулою (штрихові лінії) в залежності від теплової інерції θ для різних значень безрозмірної товщини каменя d .

Ще одне незалежне підтвердження тангенціального ЯОРП було отримано в роботі [5] в наближеній аналітичній моделі. Для оцінки величини тангенціальної сили було зроблено ряд припущень:

1. Камінь на поверхні астероїда розділено на дві половини, східну й західну, і температура в кожній з половин усереднена. Це спростило задачу, перетворивши рівняння з частинними похідними для теплопровідності в камені на систему двох звичайних диференціальних рівнянь для усереднених температур двох половин каменя.

2. Освітленість, створювана сонячним світлом на камені, розкладена в ряд Фур'є за часом, і враховано тільки члени нульового та першого порядків.

3. Зміни температури каменя протягом доби вважаються невеликими, так що рівняння розкладаються за цими змінами в ряд Тейлора, і розглядаються лише старші члени цього ряду, необхідні для появи тангенціального ЯОРП.

Із застосуванням цих припущень було виведено аналітичний вираз для тангенціальної сили, що діє на камінь. Отримана формула добре узгодилась з результатами чисельних розрахунків як для сферичного каменя [9], так і для плаского каменя [10] (рис. 8).

Виведена аналітична формула дала змогу вперше оцінити внесок до тангенціального ЯОРП з боку реголіту. З одного боку, поверхня реголіту має бути більш рівною в порівнянні з рельєфом, що створюється камінням, і це зменшує тангенціальний ЯОРП. З іншого боку, реголіт може займати більшу площу поверхні, ніж камені, і мати ближчий до одиниці тепловий параметр, що збільшує тангенціальний ЯОРП. Було оцінено, що для очікуваних значень параметрів реголіт може створювати тангенціальний ЯОРП того ж порядку, що й каміння.

Знайдений в статті аналітичний вираз для тангенціального ЯОРП був наближений спрощеною аналітичною формулою та усереднений за всіма розмірами каменів. Таким чином, було отримано вираз для величини тангенціального ЯОРП, створюваного не окремими каменями на астероїді, а всією популяцією каменів різних розмірів.

Узагальнюючи попередні результати з аналітичних і чисельних моделювань тангенціального ЯОРП, Голубов і Ширс [3] записали такий вираз для величини цього ефекту:

$$T_{\text{ТЮОРП}} = 4.5 \frac{\Phi R^3}{c} n_0 \mu \exp \left(- \frac{(\ln \theta - \ln \theta_0)^2}{\nu^2} \right) (1 + \cos^2 \varepsilon).$$

Тут Φ позначає середній світловий потік від Сонця на відстані орбіти астероїда, R – радіус астероїда, c – швидкість світла, θ – тепловий параметр, ε – нахил осі обертання астероїда, n_0 визначає щільність каменів на поверхні, а μ , ν і θ_0 є константами. Передекспоненційний множник в цій формулі був взятий з інтегрувань моменту сил по поверхні астероїда, виконаних у роботах [7] та [9], експонента – з аналітичної теорії [5], а залежність від нахилу осі ε , виражена останнім членом, – з моделювань [7]. Цей вираз в подальшому використовувався для аналітичних теорій динаміки астероїдів [3], чисельних моделювань еволюції астероїдних популяцій [1], аналізу виміряних у спостереженнях прискорень астероїдів [2].

Теорія тангенціального ефекту ЯОРП була застосована до астероїда (25143) Ітокава, і було знайдено, що тангенціальний ЯОРП здатний пояснити різницю між результатами розрахунків нормального ЯОРП для цього астероїда і його спостережуваним прискоренням [9, 10]. Ітокава був об'єктом космічної місії JAXA Hayabusa, за результатами якої отримано модель його форми з дуже високою роздільною здатністю. Ця детальна модель форми дала змогу розрахувати нормальний ЯОРП з такою точністю, що неузгодження розрахунку зі спостереженнями вийшло за межі похибок і дало змогу таким чином оцінити тангенціальний ЯОРП.

Також теорія тангенціального ЯОРП була застосована до астероїда (101955) Бенну, цілі космічної місії НАСА OSIRIS-REx [12].

Кутове прискорення Бенну було виміряно за результатами наземних спостережень кривих блиску цього астероїда під час його зближень з Землею в 1999 і 2005 роках, а також космічних спостережень телескопом Габбла в 2012 році [2]. Виявилось, що спостережні дані несумісні зі сталим періодом обертання, але добре узгоджуються зі сталим кутовим прискоренням $(2.64 \pm 1.05) \times 10^{-6}$ град/день² (рис. 9).

Для порівняння було обчислено нормальний ефект ЯОРП, що діє на Бенну. Для розрахунків було використано модель форми астероїда, отриману за даними радарних спостережень [58]. Щоб врахувати можливі похибки цієї моделі, ЯОРП було обчислено для цілого ансамблю моделей, отриманих шляхом збурень номінальної моделі за допомогою методу випадкових гаусових сфероїдів [54]. Таким чином, було отримано теоретичне значення нормального ЯОРП $(-8.8 \pm 8.1) \times 10^{-6}$ град/день².

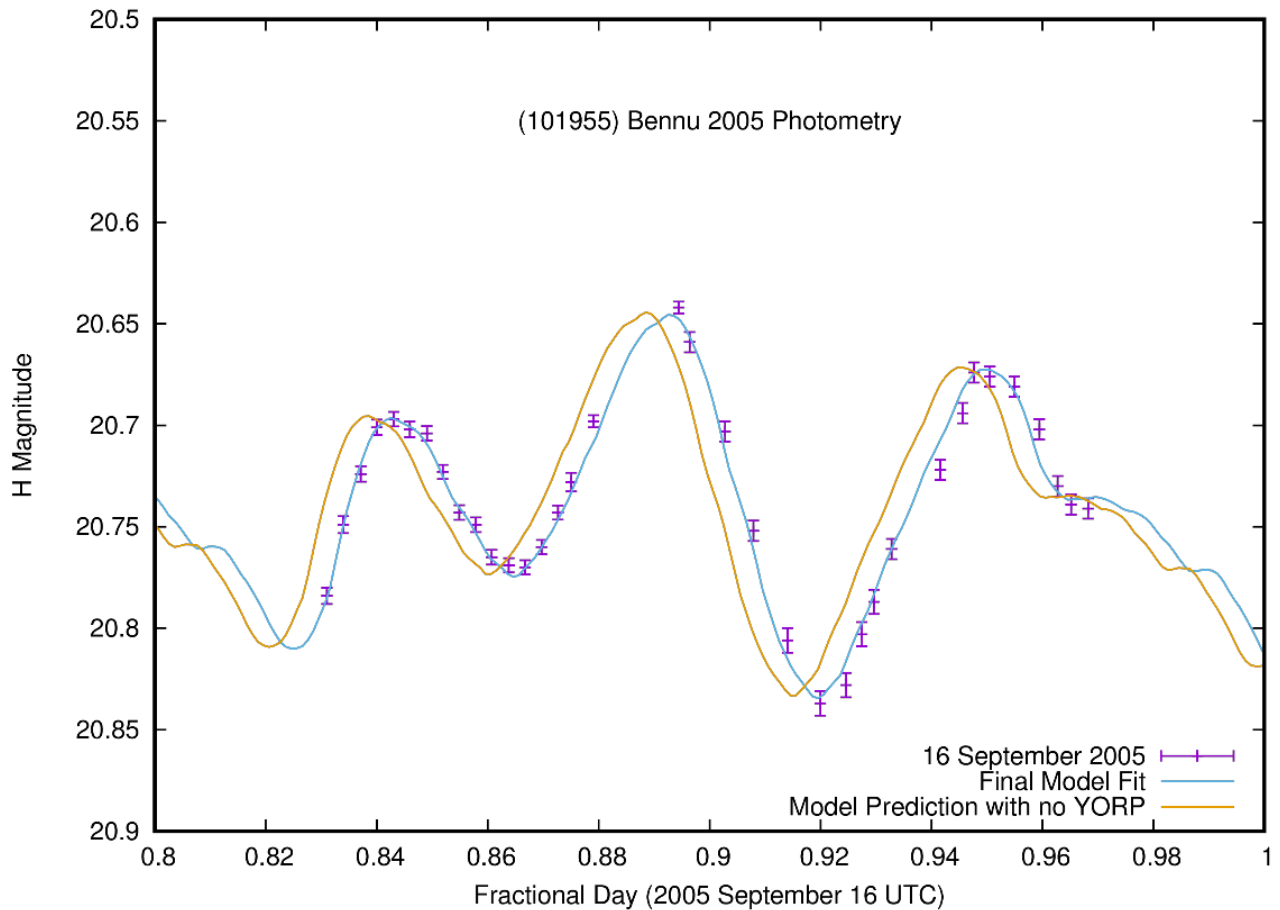


Рис. 9. Спостережувана крива блиску астероїда Бену (точки), наближена теоретичною моделлю зі сталим періодом обертання (крива, що проходить ліворуч від точок) та з прискоренням під дією ЯОРП (крива, що перетинає точки).

Це теоретичне значення дуже погано узгоджується зі спостереженнями й навіть має протилежний знак. 92% випадково згенерованих моделей форми дають менші прискорення, ніж спостережене значення.

Однак додавання в модель тангенціального ЯОРП виправляє це неузгодження. Для оцінки тангенціального ЯОРП було зроблено припущення, що щільність каменів на поверхні Бенну така ж сама, як на астероїді Ітокава. Це дало значення прискорення за рахунок тангенціального ЯОРП рівне $(11.5 \pm 7.3) \times 10^{-6}$ град/день². Сума нормального й тангенціального ЯОРП добре узгоджується зі спостереженнями. Дані, отримані пізніше космічним апаратом OSIRIS-REx [13], підтвердили основні результати роботи [2].

Таким чином, дослідження астероїдів Ітокава та Бенну надали експериментальне підтвердження важливості тангенціального ЯОРП для динаміки астероїдів.

Розділ 3 «Еволюція обертального стану астероїдів під дією ефекту ЯОРП» представляє результати моделювань впливу ефекту ЯОРП на еволюцію обертального стану астероїдів та опосередковано, через ефект Ярковського, – на еволюцію їхніх орбіт.

Подібні моделювання еволюції обертального стану проводились і чисельно [51, 69], і аналітично з використанням певних спрощуючих припущень [65, 70]. Запропонований в цьому розділі підхід поєднує чисельні й аналітичні моделювання, що дає змогу, з одного боку, зберегти точність, а з іншого – пояснити та якісно дослідити еволюцію астероїдів.

Динаміка обертального стану астероїда описується рівняннями:

$$I_z \frac{d\omega}{dt} = T_z,$$

$$I_z \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\omega} T_\varepsilon.$$

Тут I_z – момент інерції астероїда, ε – нахил осі обертання астероїда, ω – його кутова швидкість, а T_z і T_ε – два компонента моменту сил ЯОРП. Виявляється, що добре наближення до T_z і T_ε дається рівняннями [3]:

$$T_z = \frac{\Phi R^3}{c} C_z (\cos 2\varepsilon + \beta),$$

$$T_\varepsilon = \frac{\Phi R^3}{c} C_\varepsilon \sin 2\varepsilon.$$

Приклади наближення залежностей ЯОРП від нахилу осі для окремих астероїдів зображено на рис. 10. Точність наближення кількісно характеризується параметром δ , який визначається як середньоквадратична розбіжність між чисельним розрахунком ЯОРП та аналітичним наближенням, нормалізована на максимальне значення обчисленого. Для понад 50% промодельованих фотометричних і радарних моделей форм астероїдів узгодження результатів чисельних розрахунків з аналітичним наближенням було добрим ($\delta < 0.2$), як на верхніх двох графіках рис. 10. Для близько 30% моделей форм узгодження було таким, як на двох середніх графіках рис. 10, – зі значними розбіжностями ($\delta > 0.2$), але з тією самою кількістю коренів (так званий «тип I–II», [74]). Для близько 20% форм астероїдів T_z або T_ε набувають нових коренів, як це показано на нижніх двох графіках рис. 10 (так званий «тип III–IV», [74]). Таким чином, можна очікувати, що теорія, яка базується на запропонованих аналітичних наближеннях, буде кількісно вірно працювати для близько половини астероїдів, а якісно вірно описуватиме переважну більшість астероїдів.

Між коефіцієнтами цих рівнянь існує кореляція, проілюстрована на рис. 11 і рис. 12: для більшості астероїдів $\beta \approx 0.32$, $\alpha = C_\varepsilon/C_z \approx 0.73$. Як показано в роботі [3], подібну кореляцію можна аналітично вивести з теорії для нормального ефекту ЯОРП [8].

Підставляючи вирази для T_ε і T_z в еволюційні рівняння, можна отримати аналітичний вираз, що пов'язує кутову швидкість і нахил осі обертання астероїда:

$$\omega = \omega_0 (\sin \varepsilon)^{\frac{1+\beta}{2\alpha}} (\cos \varepsilon)^{\frac{1-\beta}{2\alpha}}.$$

Цей розв'язок проілюстровано на рис. 13. Фазові траєкторії, задані рівнянням, зображено чорними лініями, а стрілки позначають напрямок еволюції. На графіку показана область $0^\circ < \varepsilon < 180^\circ$, $-\omega_{cr} < \omega < \omega_{cr}$, де ω_{cr} – гранична кутова швидкість обертання астероїда. Маленькі зображення астероїда показують його орієнтацію й обертання в шести різних положеннях на графіку, причому північна

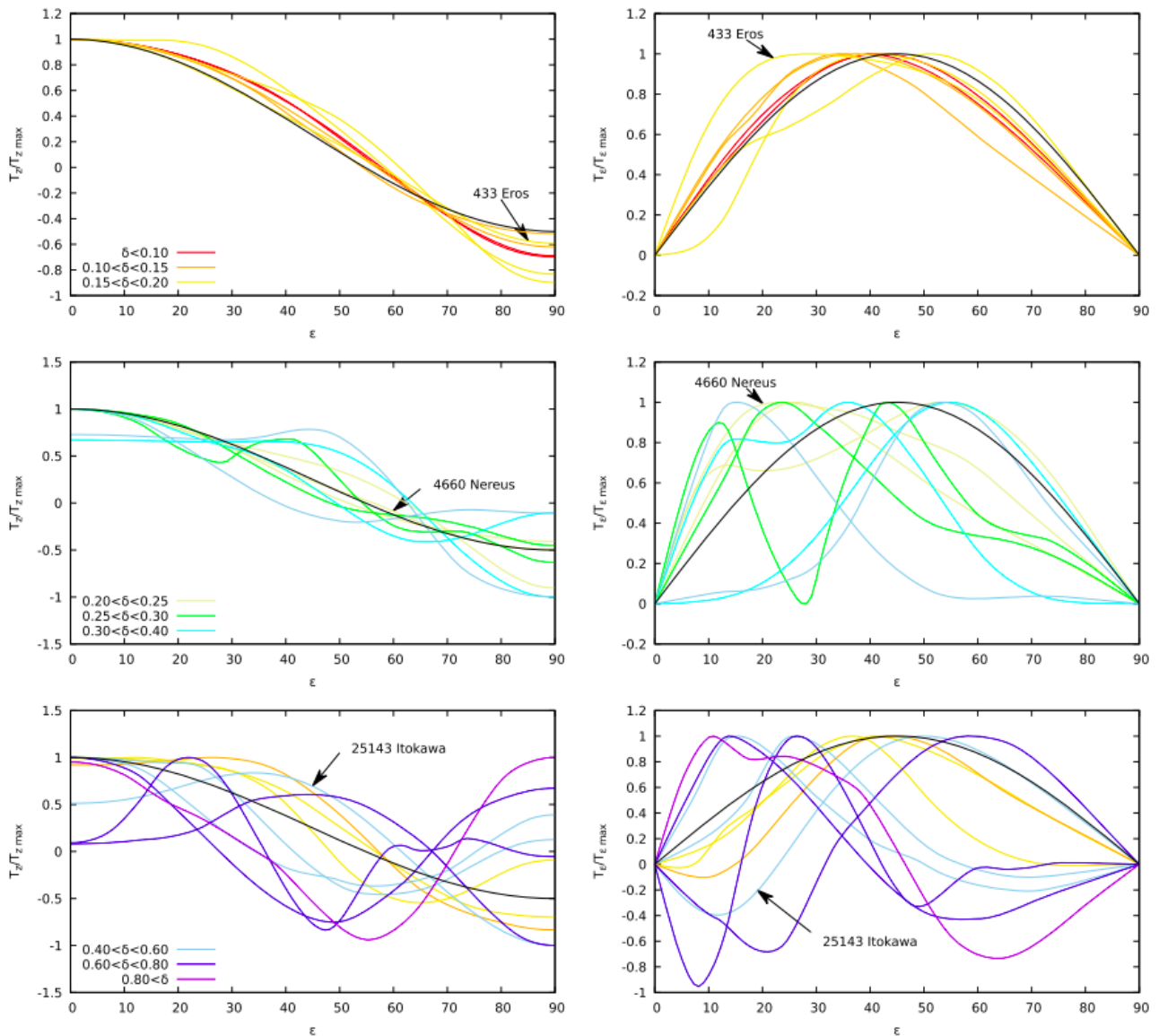


Рис. 10. Залежність безрозмірного моменту сил ЯОРП від нахилу осі обертання для різних моделей форми астероїдів. Ліворуч – компонент T_z , праворуч – компонент T_x . Кольорами райдуги від червоного до фіолетового показано приклади астероїдів з різною якістю наближення моделювання аналітичною формулою. Нормоване відхилення моделювань від наближеної формули для кожного кольору вказане на графіках. Чорними лініями позначено аналітичне наближення (пояснення позначень див. в тексті).

й південна півкулі астероїда показані білим і сірим кольором відповідно. Червона область на графіку позначає межу руйнування астероїда. Блакитна область позначає область повільного обертання, в якій починається нутація (відносний розмір області нутацій перебільшений.) Запропонована аналітична модель ЯОРП працює тільки в області між синьою і червоною границями. Всі фазові криві виходять з режиму нутацій і призводять астероїд до руйнування або повертаються назад до нутацій.

На рис. 14 хід еволюції проілюстровано на прикладі астероїда (4660) Нерей. Аналітична модель дає задовільне наближення для еволюції під дією нормального

ефекту ЯОРП, але за наявності тангенціального ЯОРП поведінка траєкторій може якісно змінюватись. Найцікавішим можливим ускладненням є стан стійкої рівноваги між тангенціальним і нормальним ЯОРП.

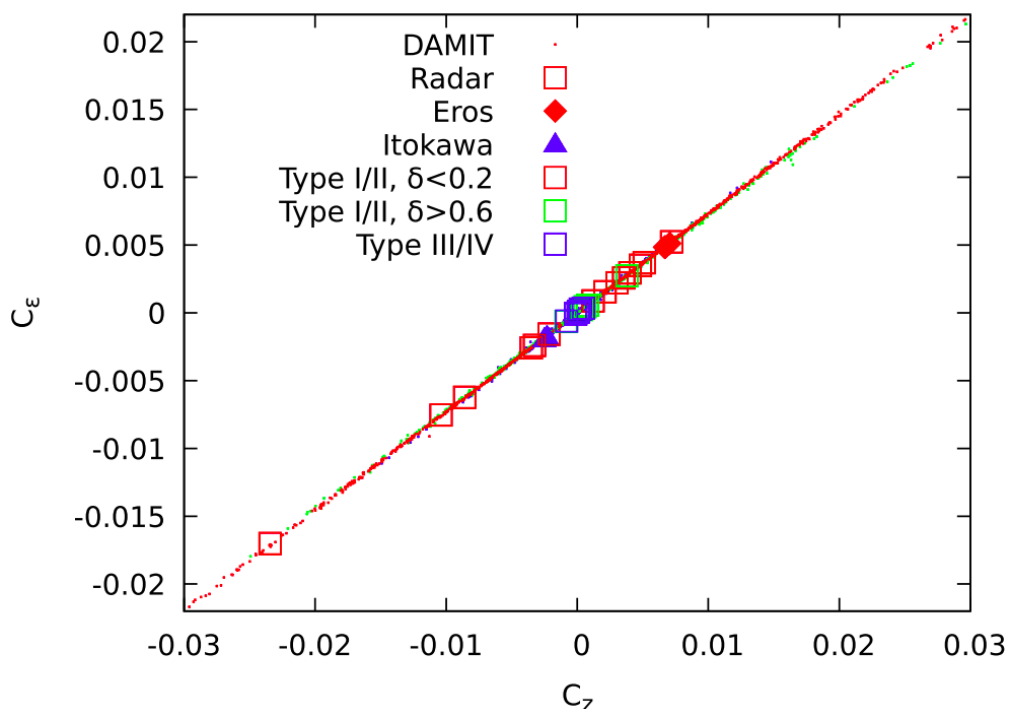


Рис. 11. Кореляція між ЯОРП коефіцієнтами C_z і C_ϵ . Різні точки й символи відповідають окремим астероїдам.

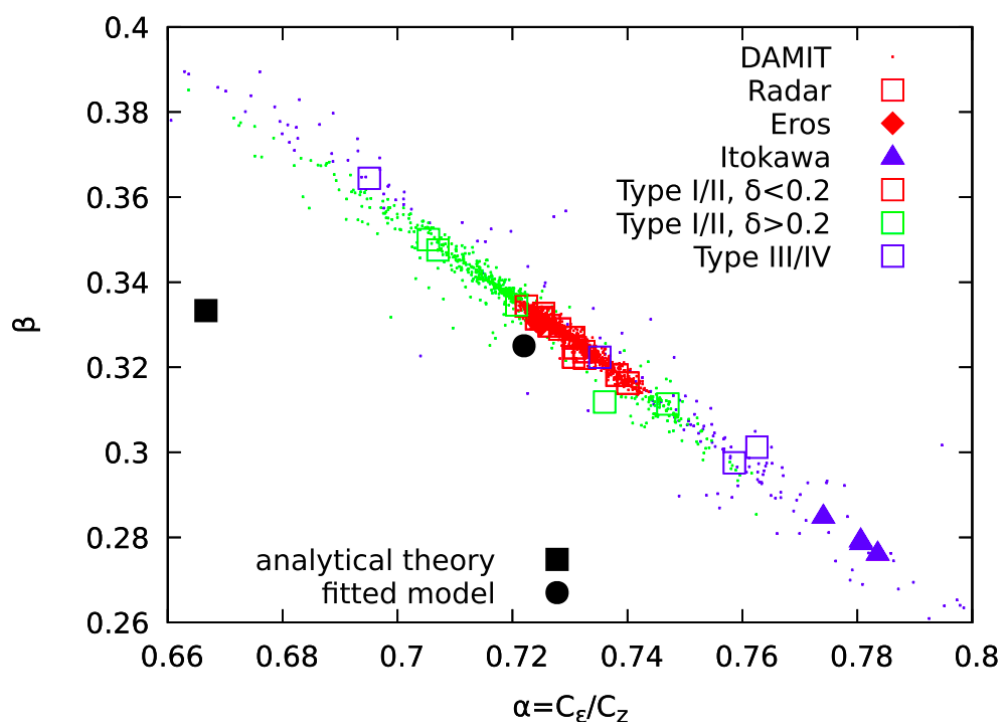


Рис. 12. Кореляція між коефіцієнтами C_z і C_ϵ . Різні точки й символи відповідають окремим астероїдам, колір позначає точність, з якою T_z і T_ϵ наближуються тригонометричними функціями.

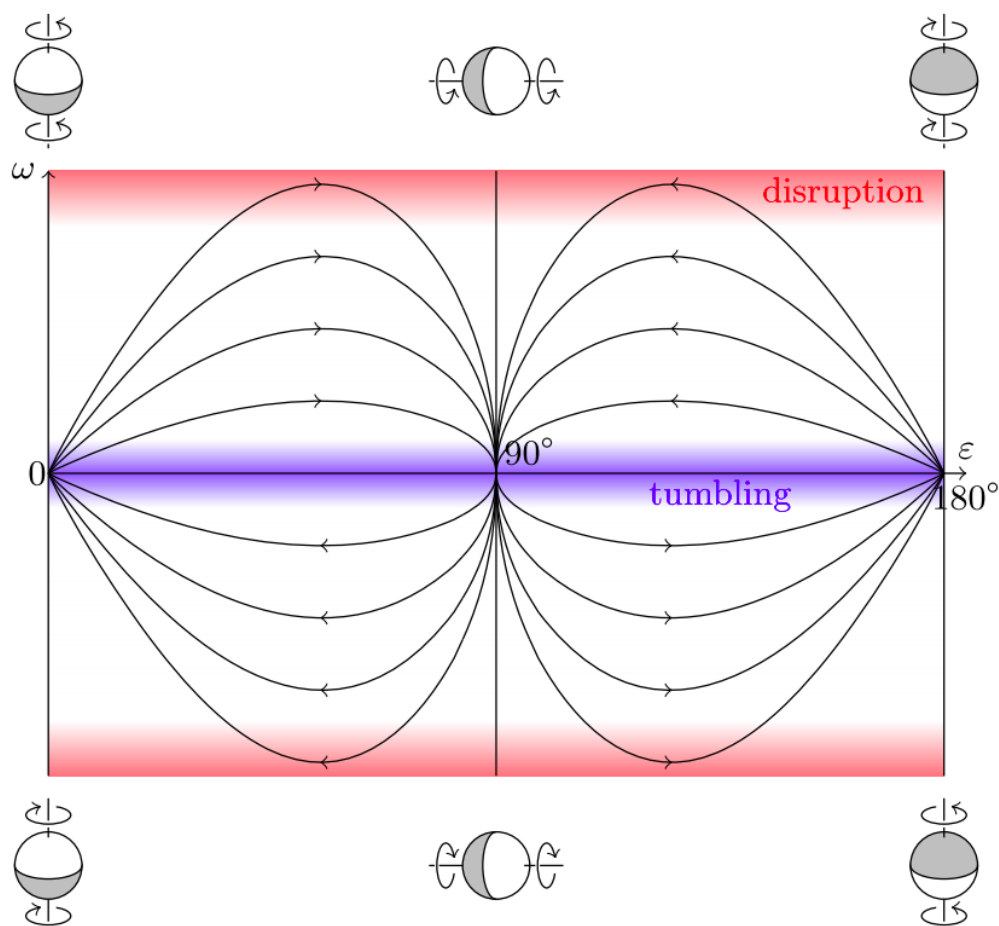


Рис. 13. Еволюційна діаграма для найпростішої еволюційної моделі астероїда. Швидкість обертання ω та нахил осі ϵ нанесені вздовж осей координат. Маленькі значки ілюструють орієнтацію та напрямок обертання астероїда. Чорними лініями зі стрілками показані еволюційні шляхи астероїдів з різними початковими умовами. Межа руйнування та область нутацій показані червоним і блакитним кольорами відповідно.

Появу такого стану рівноваги пояснено на рис. 15. У верхній частині рисунка кольорами показано області, де нормальний і тангенціальний ЯОРП є додатними (помаранчевий колір) та від'ємними (зелений). У нижній частині рисунка зображено лінії, на яких $T_z = 0$ в залежності від сили тангенціального ЯОРП. Коли тангенціальний ЯОРП відсутній, T_z дорівнює нулю на вертикальній прямій лінії (червона лінія). Коли невеликий тангенціальний ЯОРП додається до нормального ЯОРП, лінія викривляється (помаранчева лінія). Потім відбувається біфуркація і з'являється точка рівноваги (зелена лінія, жовта точка). При ще більш сильному тангенціальному ЯОРП лінія нульового кутового прискорення перетинається з лініями нульового T_ϵ ($\epsilon = 0, 90^\circ, 180^\circ$), і з'являються шість точок рівноваги, для яких і T_ϵ , і T_z дорівнюють нулю (блакитна лінія). Стійкий і нестійкий стани рівноваги позначені зеленими і червоними точками відповідно.

Ймовірність існування станів рівноваги була оцінена за результатами чисельного моделювання радарних та фотометричних моделей форми астероїдів. На рис. 16 показана ймовірність існування рівноваги в залежності від безрозмірної щільності каменів на поверхні для різних баз моделей форми, різних

нахилів осі обертання та різних теплових інерцій ґрунту. Припустимий діапазон безрозмірних щільностей каменів для астероїда Ітокава за результатами космічної місії Hayabusa показаний сірим кольором. Можна побачити, що ймовірність існування стану рівноваги складає близько 10%.

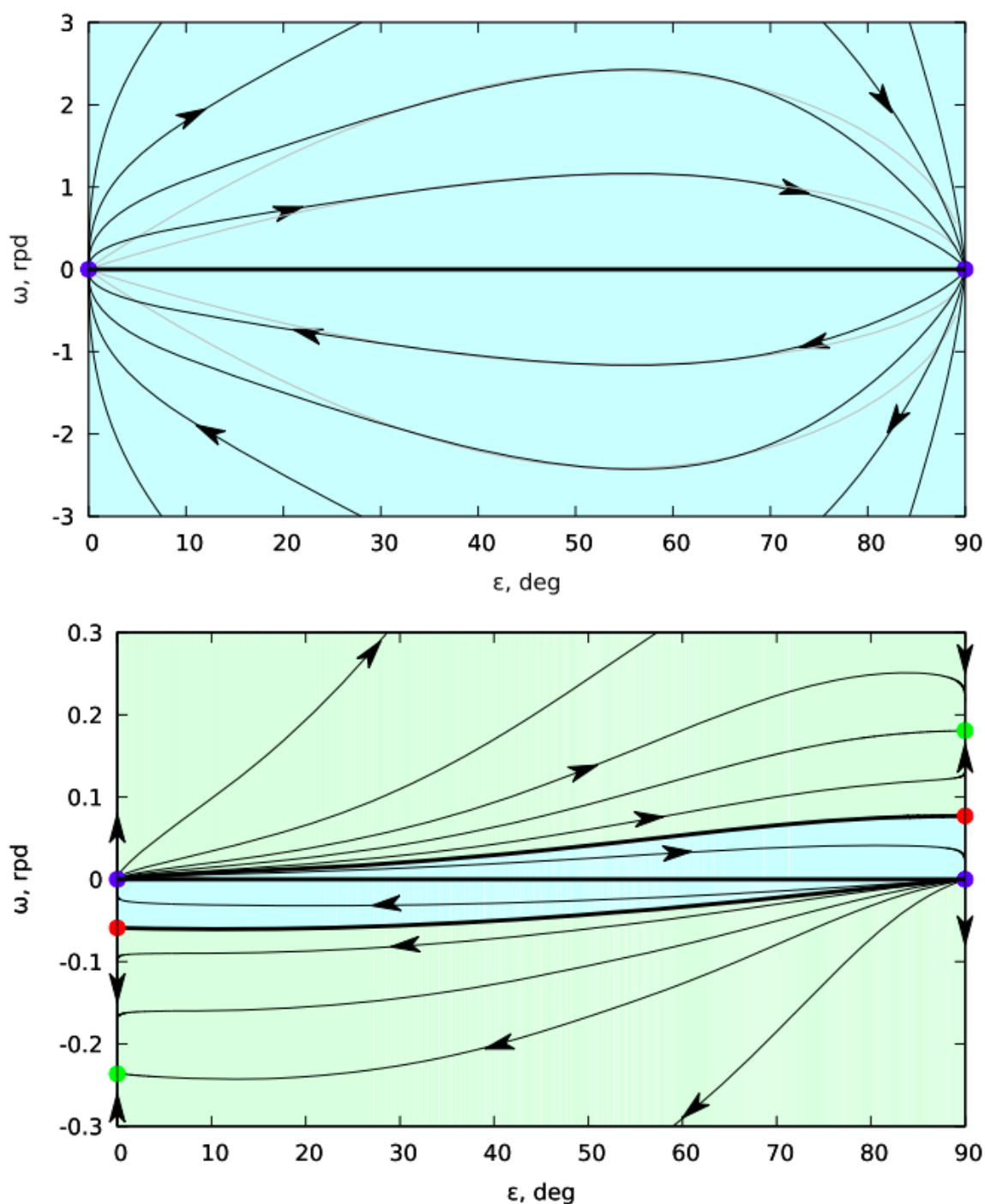


Рис. 14. Еволюційні діаграми для астероїда (4660) Нерей. Вгорі: без тангенціального ЯОРП. Сірі лінії позначають аналітичний розв'язок еволюційних рівнянь. Внизу: з тангенціальним ЯОРП. Стійкі стани рівноваги відзначені зеленими кружками, нестійкі – червоними, а аттрактори при повільному обертанні – блакитними. Басейни різних аттракторів відмічені кольорами аттракторів і розділені жирними чорними лініями.

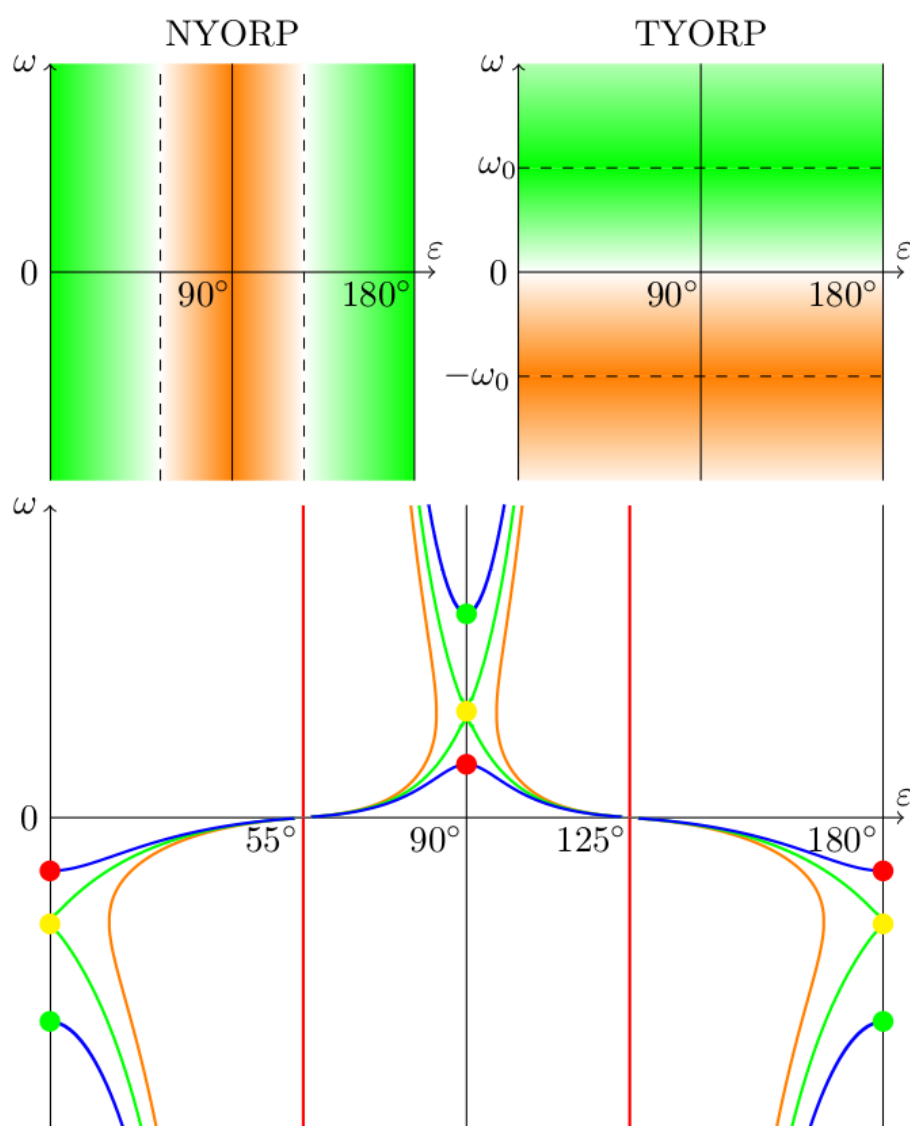


Рис. 15. Еволюційні діаграми, що ілюструють появу положень рівноваги між нормальним і тангенціальним ЯОРП. Вгорі: області збільшення (зелений колір) і зменшення (помаранчевий колір) швидкості обертання ω за рахунок нормального і тангенціального ЯОРП. Внизу: лінії нульового кутового прискорення для випадків різної відносної потужності нормального і тангенціального ЯОРП (пояснення див. в тексті).

Такі стани рівноваги можуть кардинально змінити еволюцію астероїдів. Тепер астероїд не має повторювати велику кількість ЯОРП-циклів аж до свого повного руйнування. Йому буде достатньо повторити ЯОРП-цикл близько 10 разів з різними початковими умовами й трохи різними формами (форма може змінюватись у кожному ЯОРП-циклі відцентровими силами при досягненні критичної швидкості обертання). Після цього астероїду вдасться знайти стан стійкої рівноваги, в якому він зможе залишатись протягом тривалого часу, аж до наступного потужного зіткнення або зміни орбіти. Таким чином, на астероїди може діяти своєрідний «природній добір», який з усіх можливих форм астероїдів вибиратиме ті, які здатні досягати станів ЯОРП-рівноваги.

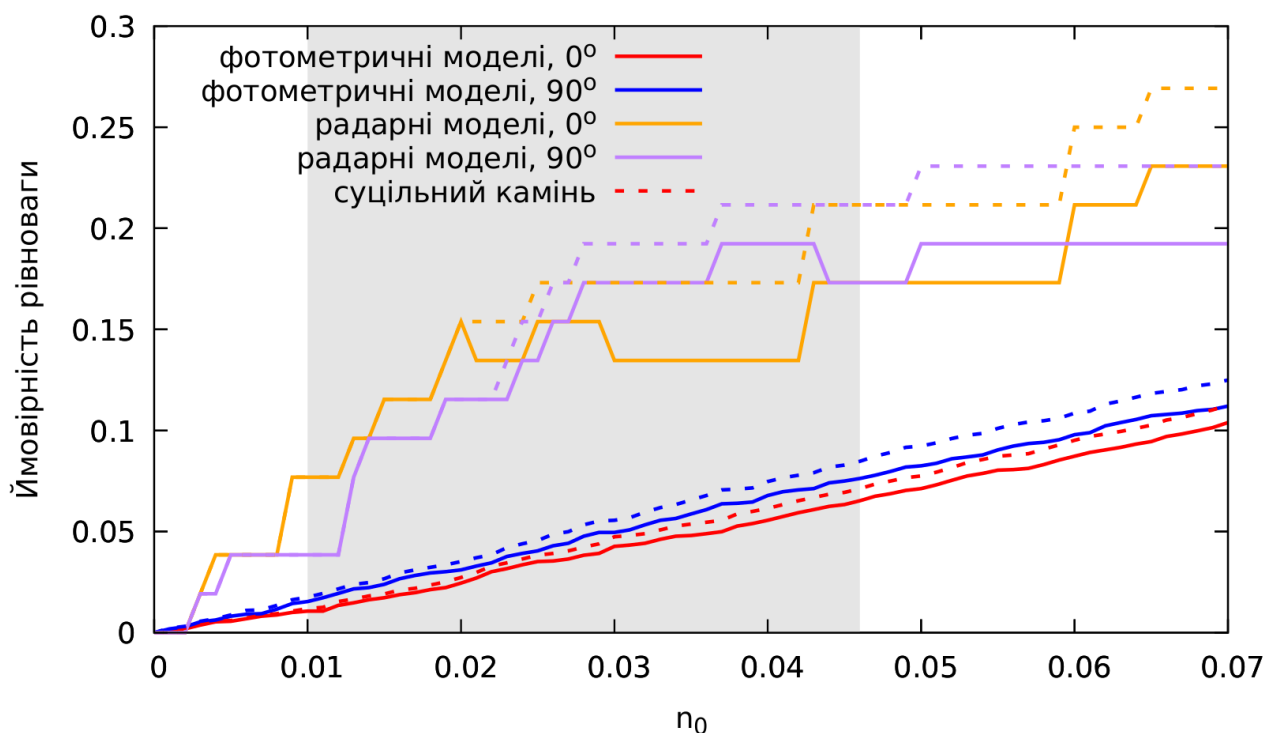


Рис. 16. Ймовірність рівноваги як функція поверхневої щільності каменів. Заштрихована область показує діапазон невизначеності для поверхневої щільності каменів на поверхні астероїда (25143) Ітокава.

Теоретична модель еволюції астероїда під дією ЯОРП була застосована для моделювання еволюції сімейств астероїдів з урахуванням ефектів Ярковського, ЯОРП, зіткнень і гравітаційних збурень [1].

Сімейство астероїдів утворюється, коли два астероїда стикаються на космічних швидкостях і розколюються на велику кількість уламків різних розмірів [52]. Новоутворені уламки мають невисокі відносні швидкості, тому займають майже ідентичні навколосонячні орбіти. З часом вплив ефекту Ярковського призводить до зміни великих півосей орбіт астероїдів, і сімейство розповсюджується в напрямку великої півосі. Якщо вздовж однієї координатної осі відкласти зоряну величину астероїда H , а вздовж іншої – велику піввісь його орбіти a , то розподіл членів сімейства в цих координатах набуває характерної V-подібної форми. Це відбувається через те, що менші астероїди змінюють свою велику піввісь швидше, а більші астероїди – повільніше [55]. Всередині V-подібної форми у деяких сімейств спостерігається дефіцит астероїдів – так зване «око ЯОРП» [62, 63].

В статті [1] промодельовано розподіл астероїдів гіпотетичного сімейства за великою піввіссю під дією ефекту Ярковського. Взято до уваги, що ефект Ярковського залежить від обертального стану астероїда (швидкості обертання й нахилу осі). А обертання, в свою чергу, визначається ефектом ЯОРП.

Для моделювання нормального ЯОРП використано спрощену модель з аналітичною залежністю ЯОРП від нахилу осі астероїда (Розділ 3), а коефіцієнт в цій залежності згенеровано у випадковий спосіб, в межах розподілу, отриманого для фотометричних моделей форми астероїдів.

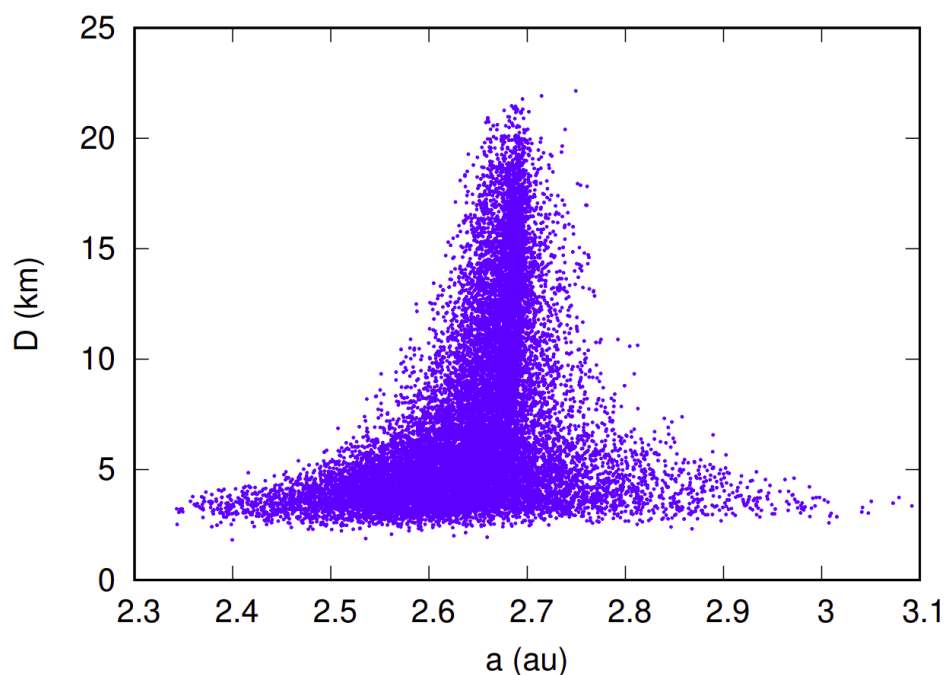


Рис. 17. Моделювання розповсюдження 20000 астероїдів сімейства, подібного до сімейства Короніс, під дією ефекту Ярковського, нормального й тангенціального ЯОРП та зіткнень.

Для тангенціального ЯОРП було використано виведені раніше залежність від розмірів і нахилу осі астероїда [7], а також залежність від теплового параметра і щільності каменів на поверхні [5].

Було взято до уваги зіткнення між астероїдами, що можуть як безпосередньо змінювати обертальний стан астероїда шляхом передачі йому моменту імпульсу, так і опосередковано впливати на обертання астероїдів шляхом випадкової зміни ефекту ЯОРП.

Всі зазначені фактори були закладені в чисельну модель і використані для дослідження еволюції сімейства астероїдів. Ця модель дала змогу відтворити V-подібні розподіли членів сімейств за зоряними величинами й великими півосями орбіт (рис. 17). Було виявлено, що як зіткнення, так і тангенціальний ЯОРП збільшують швидкість розширення сімейства вздовж великої півосі орбіти, роблячи еволюцію обертального стану менш плавною та регулярною.

Поява «ока ЯОРП» у моделюваннях не спостерігалася. Це може означати, що «око ЯОРП», коли воно присутнє, походить з початкового розподілу за швидкостями уламків зіткнення, а не з їхньої подальшої еволюції під дією ЯОРП.

У розділі 4 «Вплив ефекту ЯОРП на обертання подвійних астероїдів» аналізується динаміка подвійних астероїдів з урахуванням негравітаційних сил і, зокрема, досліджуються два нові стани рівноваги подвійних систем. Такі системи можуть змінювати орбітальний момент під впливом так званого подвійного ефекту ЯОРП [44], але можуть і знаходити такі стани рівноваги, в яких різні компоненти ЯОРП взаємно компенсуються, і динамічна еволюція подвійної системи зупиняється.

Перший такий стан рівноваги був досліджений в роботі [6] для

двосинхронних подвійних астероїдів, тобто таких, для яких періоди обертання обох компонентів подвійної системи навколо своєї осі співпадають з періодом їх обертання навколо центра мас системи, так що обидва компоненти завжди обернені один до одного тим самим боком.

Розрахунок моменту сил ЯОРП було проведено на основі теоретичної моделі, розробленої в роботі [8]. Для подвійної системи ця модель вимагала невеликого уточнення: плече важеля сили світлового тиску тепер враховувало не тільки вектор від центра астероїда до елемента поверхні, а ще й вектор від центра мас подвійної системи до центра астероїда. Це призводить до наступної лінійної залежності крутного моменту ЯОРП T_z від відстані між астероїдами r :

$$T_z = C_1 + C_2 r.$$

Тут C_1 і C_2 – коефіцієнти, які виражаються як інтеграли від певних функцій по поверхні двох компонентів подвійної системи. Вони залежать від форм і співвідношення розмірів компонентів. Можна вважати, що член C_1 відповідає за нормальний ЯОРП, а член $C_2 r$ – за подвійний ЯОРП. Але оскільки компоненти двосинхронної системи перебувають у стані припливного захоплення, то моменти сил перерозподіляються між ними, так що розділення крутного моменту на нормальний і подвійний ЯОРП не важливе, а важливий лише сумарний момент.

В залежності від знаку коефіцієнтів C_1 і C_2 можлива різна поведінка сукупного моменту ЯОРП як функції відстані між компонентами, як це проілюстровано на рис. 18. У випадку (а) система розпадається, утворюючи пару гравітаційно незв'язаних астероїдів. У випадку (б) система зливається, утворюючи контактно-подвійний астероїд. У випадку (в) існує стан рівноваги, в якому ЯОРП дорівнює нулю, але він нестійкий. У випадку (г) з'являється стійкий стан рівноваги, який стає атрактором для подвійних систем.

Було проведено моделювання, в яких в якості прикладів форм подвійних астероїдів було використано форми одинарних астероїдів, визначені фотометричними або радарними методами. Було перевірено, коли стан стійкої рівноваги існує і коли він відповідає відстані між компонентами подвійної системи, яка більша за суму розмірів двох компонентів, але менша за радіус сфери

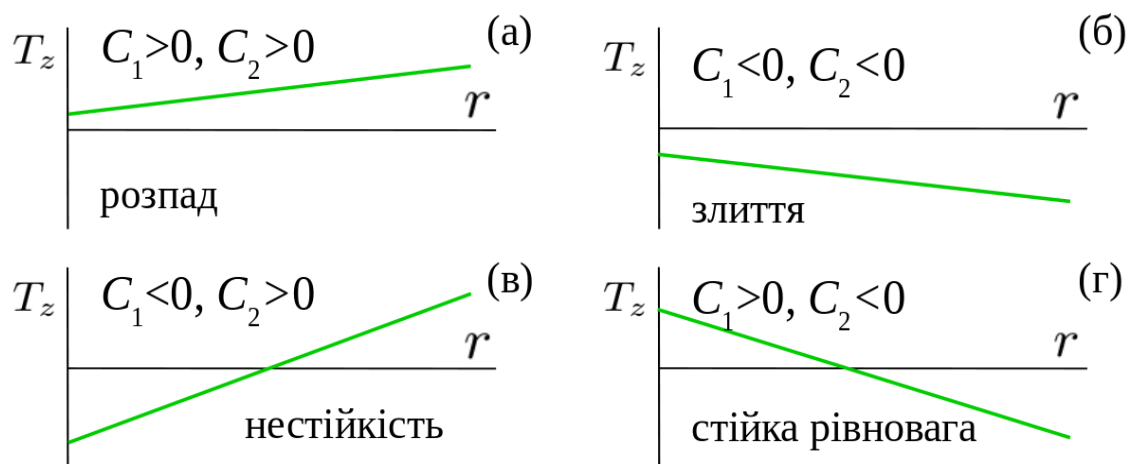


Рис. 18. Ілюстрація чотирьох типів залежності моменту сил ЯОРП від відстані між компонентами подвійної системи.

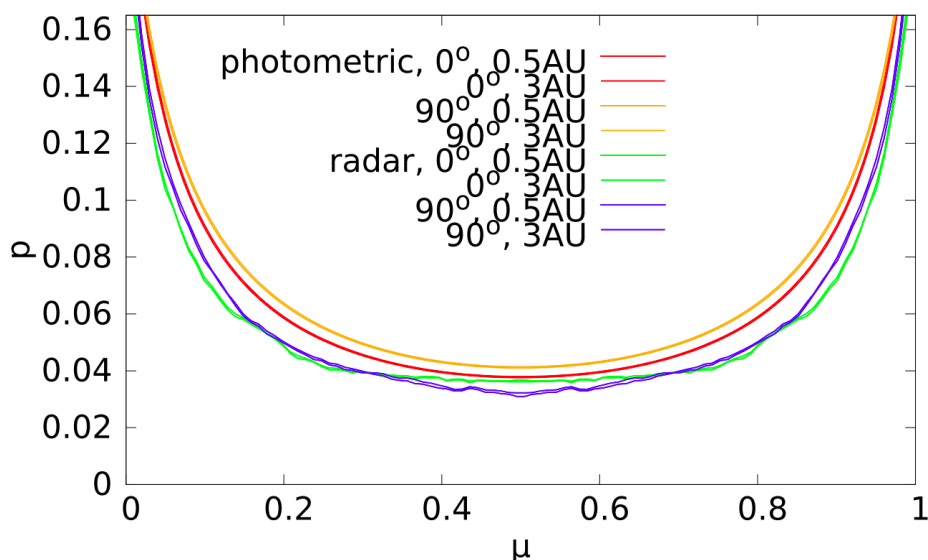


Рис. 19. Ймовірність існування стійкого стану рівноваги двосинхронних подвійних астероїдів у залежності від масової долі μ компонентів (0 – вся маса припадає на тіло А, 1 – на тіло Б, 0.5 – тіла А і Б мають рівну масу). Різні лінії відповідають різним геліоцентричним відстаням (0.5 або 3 астрономічні одиниці), різним нахилам орбіти подвійної системи навколо центра мас до орбіти навколо Сонця (0 і 90 градусів) і використанню фотометричних або радарних моделей форм.

Гілла. Знайдено, що для типових форм астероїдів ймовірність стійкої рівноваги складає кілька відсотків (див. рис. 19).

Голубов та ін. [4] розглянули складніший тип рівноваги, що може виникати за участю ЯОРП в односинхронних подвійних системах, тобто в таких, де період обертання системи «супутник – головне тіло» навколо центра мас збігається з періодом осьового обертання супутника, але відрізняється від періоду осьового обертання головного тіла.

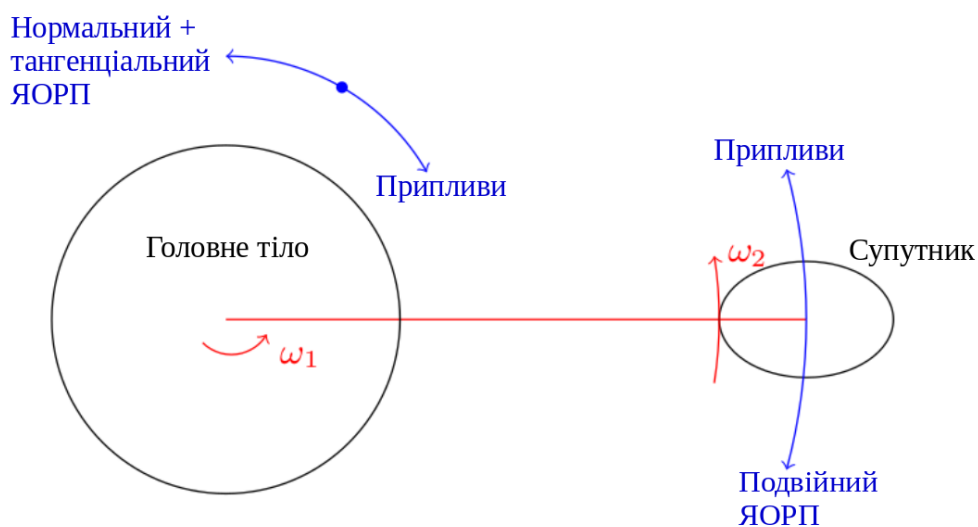


Рис. 20. Ілюстрація появи стану НТВт-рівноваги в однократно синхронній подвійній системі. На схемі зображено моменти сил, що діють на обидва астероїди.

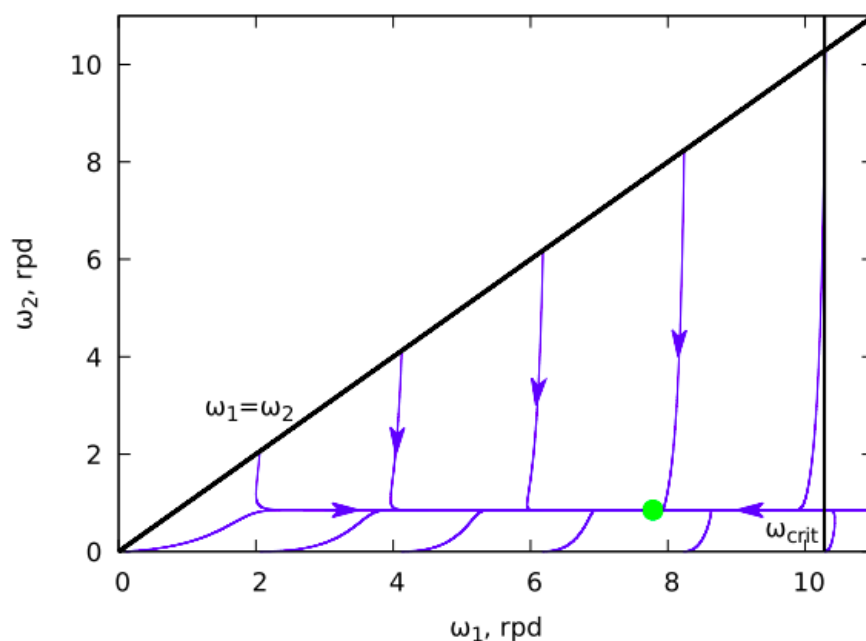


Рис. 21. Стрілками зображено релаксацію подвійної системи до стану рівноваги в залежності від початкових умов. Вздовж осей відкладено кутову швидкість головного компонента ω_1 і супутника ω_2 (в обертах на добу). Маленьким колом показаний стійкий стан рівноваги – кінцевий стан всіх траєкторій.

В цьому випадку між супутником та головним тілом діють припливні моменти, які забирають момент імпульсу у головного тіла та передають його супутнику (рис. 20). Якщо подвійний ЯОРП, що діє на супутник, від'ємний, то можлива рівновага супутника на певній відстані від головного тіла. Оскільки подвійний ефект ЯОРП збільшується з відстанню від головного тіла, а припливи – зменшуються, то рівновага виявляється стійкою. На головне тіло, в свою чергу, діють нормальний і тангенціальний ЯОРП, які за певних умов здатні компенсувати гальмівну дію припливів. Таким чином, і головне тіло, і супутник перебувають у рівновазі.

Голубов та ін. [4] провели моделювання такого стану рівноваги і знайшли, що він є атрактором для односинхронних подвійних систем з різними початковими умовами (рис. 21). Ймовірність існування такого стану рівноваги була чутливою до погано визначених фізичних параметрів астероїдів (теплова інерція, сила припливного тертя, щільність каміння на поверхні), але в більшості випадків змінювалася від 1% до 10%. За певних значень теплової інерції та припливного тертя, отриманий за результатами моделювань розподіл подвійних астероїдів за періодами виявляється подібним до спостережуваного.

Можливість існування таких станів рівноваги значно збагачує еволюційні можливості подвійних астероїдних систем. Утворившись внаслідок розпаду астероїда, розкрученого ЯОРП до критичної кутової швидкості, подвійна система, як виявляється, не приречена на швидке злиття або розпад під дією подвійного ЯОРП, а може знайти рівноважний стан і залишатись у ньому протягом тривалого часу.

У додатку А «Список опублікованих праць за темою дисертації» наведено перелік статей автора та тез конференцій за темою дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена дослідженню динаміки астероїдів під дією негравітаційних сил, зокрема ефектів Ярковського та ЯОРП. У процесі виконання досліджень за темою роботи виконано поставлені задачі та отримано наступні найбільш вагомні результати:

1. Розроблено нову напіваналітичну модель розрахунку ефектів Ярковського та ЯОРП для астероїдів, в якій ці ефекти виражено як інтеграли по поверхні тіла. Побудовано наближені аналітичні теорії для ефектів ЯОРП та Ярковського у граничних випадках великої і малої теплової інерції поверхні. Для локально пласкої поверхні доведено незалежність впливу ЯОРП на швидкість обертання астероїда від його теплової моделі.
2. Запропоновано нову концепцію тангенціального ефекту ЯОРП, який виникає завдяки нерівномірному нагріву каменів на поверхні астероїда, і досліджено цей ефект чисельно та аналітично. Чисельно промодельовано тангенціальний ЯОРП, створюваний пласкими високими каменями і сферичними каменями. Створено наближену аналітичну модель тангенціального ЯОРП для каменів довільної форми та виведено аналітичну формулу для його приблизного розрахунку, в тому числі у випадку ступеневого розподілу каменів за розмірами.
3. Розроблено модель еволюції обертального руху астероїдів під одночасним впливом нормального та тангенціального ЯОРП. За її допомоги побудовано аналітичні розв'язки рівнянь для фазових траєкторій астероїда у площині «нахил – кутова швидкість», що якісно співпадають з результатами чисельних моделювань.
4. Передбачено новий тип рівноваги обертального стану астероїда, в якому нормальний та тангенціальний ЯОРП взаємно компенсуються. Сформульовано умови існування цього стану рівноваги та показано, що ці умови можуть виконуватись для близько 10% астероїдів.
5. Описано новий тип стійкої рівноваги двосинхронних подвійних систем астероїдів, що виникає завдяки взаємній компенсації нормального і подвійного ефектів ЯОРП. Аналітично розраховано параметри рівноважного стану астероїдів. За допомогою чисельних моделювань для різних форм астероїдів доведено, що цей рівноважний стан може досягатися для кількох відсотків двосинхронних подвійних астероїдів.
6. Передбачено новий тип рівноваги односинхронних подвійних систем астероїдів, що виникає завдяки взаємній компенсації нормального, тангенціального ЯОРП і припливів, що діють на головне тіло, а також подвійного ЯОРП та припливів, що діють на супутник. Аналітично знайдено

параметри цього рівноважного стану. Чисельними моделюваннями доведено стійкість цього типу рівноваги, підтверджено можливість реалізації цього типу рівноваги для кількох відсотків односинхронних подвійних астероїдів та показано, що за певних значень параметрів розподіл односинхронних подвійних астероїдів за періодами обертання узгоджується зі спостережуваним розподілом.

7. Розроблено застосування моделі еволюції обертального стану астероїда до розрахунку еволюції орбіт астероїдних сімейств. Показано, що результати моделювань якісно узгоджуються зі спостережними даними, і розроблена модель може використовуватись для розрахунку розподілу орбітальних параметрів сімейств астероїдів.
8. За результатами аналізу даних космічної місії JAXA Hayabusa до астероїда (25143) Ітокава та місії NASA OSIRIS-REx до астероїда (101955) Бенну, розраховано прискорення цих астероїдів під дією нормального ЯОРП, знайдено значну розбіжність зі спостережними даними та показано, що причиною розбіжності може бути тангенціальний ЯОРП.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові праці (у реферованих журналах першого квартилю (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports):

1. Marzari, F., Rossi, A., **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., 2020. Evolution of an asteroid family under YORP, Yarkovsky, and collisions. *Astronomical Journal*, 160, p. 128 (9 pp.).
2. Nolan, M. C., Howell, E. S., Scheeres, D. J., McMahon, J. W., **Golubov, O.**, Hergenrother, C. W., Emery, J. P., Noll, K. S., Chesley, S. R., Lauretta, D. S., 2019. Detection of the YORP effect on Bennu using HST lightcurve observations. *Geophysical Research Letters*, 46, pp. 1956–1962.
3. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., 2019. Systematic structure and sinks in the YORP effect. *Astronomical Journal*, 157, p. 105 (10 pp.).
4. **Golubov, O.**, Unukovych, V., Scheeres, D. J., 2018. A new equilibrium state for singly synchronous binary asteroids. *Astrophysical Journal Letters*, 857, p. L5 (4 pp.).
5. **Golubov, O.**, 2017. Analytic model for tangential YORP. *Astronomical Journal*, 154, p. 238 (11 pp.).
6. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., 2016. Equilibrium rotation states of doubly synchronous binary asteroids. *Astrophysical Journal Letters*, 833, p. L23 (4 pp.).
7. Ševeček, P., **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., Krugly, Yu. N., 2016. Obliquity dependence of the tangential YORP. *Astronomy and Astrophysics*, 592, p. A115 (6 pp.).

8. **Golubov, O.**, Kravets, Y., Krugly, Yu. N., Scheeres, D. J., 2016. Physical models for the normal YORP and diurnal Yarkovsky effects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458 (4), pp. 3977–3989.
9. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., Krugly, Yu. N., 2014. A three-dimensional model of tangential YORP. *Astrophysical Journal*, 794 (1), p. 22 (9 pp.).
10. **Golubov, O.**, Krugly, Yu. N., 2012. Tangential component of the YORP effect. *Astrophysical Journal Letters*, 752, p. L11 (5 pp.).

Наукові праці, які додатково висвітлюють тему дисертації:

а) Наукові праці у реферованих журналах першого квартилю (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

11. Hromakina, T., Belskaya, I., Krugly, Yu., Rummyantsev, V., **Golubov, O.**, Kyrylenko, I., Ivanova, O., Velichko, S., Izvekova, I., Sergeev, A., Slyusarev, I., Molotov, I., 2021. Small Solar system objects on highly-inclined orbits: surface colours and lifetimes. *Astronomy and Astrophysics*, 647, p. A71 (14 pp.).
12. Laretta, D. S., DellaGiustina, D. N., Bennett, C. A., Golish, D. R., Becker, K. J., Balram-Knutson, S. S., Barnouin, O. S., Becker, T. L., Bottke, W. F., Boynton, W. V., Campins, H., Clark, B. E., Connolly, H. C., Jr., d'Aubigny, C. Y. Drouet, Dworkin, J. P., Emery, J. P., Enos, H. L., Hamilton, V. E., Hergenrother, C. W., Howell, E. S., Izawa, M. R. M., Kaplan, H. H., Nolan, M. C., Rizk, B., Roper, H. L., Scheeres, D. J., Smith, P. H., Walsh, K. J., Wolner, C. W. V., Highsmith, D. E., Small, J., Vokrouhlicky, D., Bowles, N. E., Brown, E., Hanna, K. L. Donaldson, Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Goriuss, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Schrader, D. L., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature*, 568 (7750), pp. 55–60.
13. Hergenrother, C. W., Maleszewski, C. K., Nolan, M. C., Li, J.-Y., d'Aubigny, C. Y. Drouet, Shelly, F. C., Howell, E. S., Kareta, T. R., Izawa, M. R. M., Barucci, M. A., Bierhaus, E. B., Campins, H., Chesley, S. R., Clark, B. E., Christensen, E. J., DellaGiustina, D. N., Fornasier, S., Golish, D. R., Hartzell, C. M., Rizk, B., Scheeres, D. J., Smith, P. H., Zou, X-D, Laretta, D. S., Highsmith, D. E., Small, J., Vokrouhlicky, D., Bowles, N. E., Brown, E., Hanna, K. L. Donaldson, Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Goriuss, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Schrader, D. L., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. The operational environment and rotational acceleration of asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx observations. *Nature Communications*, 10 (1), pp. 1–10.

14. Hamilton, V. E., Simon, A. A., Christensen, P. R., Reuter, D. C., Clark, B. E., Barucci, M. A., Bowles, N. E., Boynton, W., V. Brucato, J. R., Cloutis, E. A., Connolly, H. C., Jr., Hannah, K. L. Donaldson, Emery, J. P., Enos, H. L., Fornasier, S., Haberle, C. W., Hanna, R. D., Howell, E. S., Kaplan, H. H., Keller, L. P., Lantz, C., Li, J.-Y., Lim, L. F., McCoy, T. J., Merlins, F., Nolan, M. C., Praet, A., Rozitis, B., Sandford, S. A., Schrader, D. L., Thomas, C. A., Zou, X.-D., Lauretta, D. S., Highsmith, D. E., Small, J., Vokrouhlicky, D., Brown, E., Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Gorius, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Benu. *Nature Astronomy*, 3 (4), pp. 332–340.
15. DellaGiustina, D. N., Emery, J. P., Golish, D. R., Rozitis, B., Bennett, C. A., Burke, K. N., Ballouz, R.-L., Becker, K. J., Christensen, P. R., d'Aubigny, C. Y. Drouet, Hamilton, V. E., Reuter, D. C., Rizk, B., Simon, A. A., Asphaug, E., Bandfield, J. L., Barnouin, O. S., Barucci, M. A., Bierhaus, E. B., Binzel, R. P., Bottke, W. F., Bowles, N. E., Campins, H., Clark, B. C., Clark, B. E., Connolly, H. C., Jr., Daly, M. G., de Leon, J., Delbo', M., Deshapriya, J. D. P., Elder, C. M., Fornasier, S., Hergenrother, C. W., Howell, E. S., Jawin, E. R., Kaplan, H. H., Kareta, T. R., Le Corre, L., Li, J.-Y., Licandro, J., Lim, L. F., Michel, P., Molaro, J., Nolan, M. C., Pajola, M., Popescu, M., Rizos Garcia, J. L., Ryan, A., Schwartz, S. R., Shultz, N., Siegler, M. A., Smith, P. H., Tatsumi, E., Thomas, C. A., Walsh, K. J., Wolner, C. W., V. Zou, X.-D., Lauretta, D. S., Highsmith, D. E., Small, J., Vokrouhlicky, D., Brown, E., Hanna, K. L. Donaldson, Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Gorius, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Schrader, D. L., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Benu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis. *Nature Astronomy*, 3 (4), pp. 341–351.
16. Scheeres, D. J., McMahon, J. W., French, A. S., Brack, D. N., Chesley, S. R., Farnocchia, D., Takahashi, Y., Leonard, J. M., Geeraert, J., Page, B., Antreasian, P., Getzandanner, K., Rowlands, D., Mazarico, E. M., Small, J., Highsmith, D. E., Moreau, M., Emery, J. P., Rozitis, B., Hirabayashi, M., Sanchez, P., Van Wal, S., Tricarico, P., Ballouz, R.-L., Johnson, C. L., Al Asad, M. M., Susorney, H. C. M., Barnouin, O. S., Daly, M. G., Seabrook, J. A., Gaskell, R. W., Palmer, E. E., Weirich, J. R., Walsh, K. J., Jawin, E. R., Bierhaus, E. B., Michel, P., Bottke, W. F., Nolan, M. C., Connolly, H. C., Jr., Lauretta, D. S., Vokrouhlicky, D., Bowles, N. E., Brown, E., Hanna, K. L. Donaldson, Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Gorius, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Schrader, D. L., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. The

- dynamic geophysical environment of (101955) Bennu based on OSIRIS-REx measurements. *Nature Astronomy*, 3 (4), pp. 352–361.
17. Barnouin, O. S., Daly, M. G., Palmer, E. E., Gaskell, R. W., Weirich, J. R., Johnson, C. L., Al Asad, M. M., Roberts, J. H., Perry, M. E., Susorney, H. C. M., Daly, R. T., Bierhaus, E. B., Seabrook, J. A., Espiritu, R. C., Nair, A. H., Nguyen, L., Neumann, G. A., Boynton, W. V., Ernst, C. M., Nolan, M. C., Adam, C. D., Moreau, M. C., Rizk, B., D'Aubigny, C. Y. Drouet, Jawin, E. R., Walsh, K. J., Michel, P., Schwartz, S. R., Ballouz, R.-L., Mazarico, E. M., Scheeres, D. J., McMahon, J. W., Bottke, W. F., Sugita, S., Hirata, N., Hirata, N., Watanabe, S.-i., Burke, K. N., DellaGiustina, D. N., Bennett, C. A., Lauretta, D. S., Highsmith, D. E., Small, J., Vokrouhlicky, D., Bowles, N. E., Brown, E., Hanna, K. L. Donaldson, Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Gorius, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Schrader, D. L., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness. *Nature Geoscience*, 12 (4), pp. 247–252.
 18. Walsh, K. J., Jawin, E. R., Ballouz, R.-L., Barnouin, O. S., Bierhaus, E. B., Connolly, H. C., Jr., Molaro, J. L., Mccoy, T. J., Delbo', M., Hartzell, C. M., Pajola, M., Schwartz, S. R., Trang, D., Asphaug, E., Becker, K. J., Beddingfield, C. B., Bennett, C. A., Bottke, W. F., Burke, K. N., Clark, B. C., Daly, M. G., DellaGiustina, D. N., Dworkin, J. P., Elder, C. M., Golish, D. R., Hildebrand, A. R., Malhotra, R., Marshall, J., Michel, P., Nolan, M. C., Perry, M. E., Rizk, B., Ryan, A., Sandford, S. A., Scheeres, D. J., Susorney, H. C. M., Thuillet, F., Lauretta, D. S., Highsmith, D. E., Small, J., Vokrouhlicky, D., Bowles, N. E., Brown, E., Hanna, K. L. Donaldson, Warren, T., Brunet, C., Chicoine, R. A., Desjardins, S., Gaudreau, D., Haltigin, T., Millington-Veloza, S., Rubi, A., Aponte, J., Gorius, N., Lunsford, A., Allen, B., Grindlay, J., Guevel, D., Hoak, D., Hong, J., Schrader, D. L., Bayron, J., **Golubov, O.**, et al., 2019. Craters, boulders and regolith of (101955) Bennu indicative of an old and dynamic surface. *Nature Geoscience*, 12 (4), pp. 242–246.

б) Наукові праці у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Web of Science і Scopus:

19. **Golubov, O.**, Scheeres, D.J. and Krugly, Y.N., 2018. YORP equilibria: ways out of YORP cycles. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 14 (A30), pp. 15–15.
20. **Golubov, O.**, Krugly, Y.N., 2012. Influence of thermal models on the YORP effect. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 10 (H16), pp. 173–173.

в) Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

21. Pyrohova U., **Golubov O.**, 2015. The dependence of the YORP effect on an asteroid shape. *Astronomical School's Report*, 11 (2), pp. 135–138.

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

22. **Golubov, O.**, Unukovych, V., Scheeres, D. J., Kopatko, A. V., Strelchenko, A., 2021. Thermal models of YORP and Yarkovsky effects: Typical evolution and YORP equilibria. *LPI Contribution No. 2548*, p. 2670.
23. Kyrylenko, I. I., Krugly, Y. M., **Golubov, O. A.**, 2021. New asteroid pair candidates in the Main Belt. *LPI Contribution No. 2548*, p. 2741.
24. **Golubov, O.**, Ivashenko, O., Kopatko, A. V., Kyrylenko, I., Lipatova, V., Strelchenko, A., Unukovych, V., 2020. Search for metal asteroids via modeling asteroid dynamics and thermophysics. *Book of Abstracts of the International Churyumov readings «CAMMAC-2020» (17–19 November 2020, Vinnytsia, Ukraine)*, pp. 31–32.
25. **Golubov, O.**, Kopatko, A. V., Strelchenko, A., Kyrylenko, I., Unukovych, V., Krugly, Y. N., 2020. Yarkovsky effect for tumblers and non-convex shapes: Asteroid (99942) Apophis as a test case. *LPI Contribution No. 2242*, p. 2072.
26. **Golubov, O.**, Myhrvold, N., Ševeček, P., Özen, C., Sivam, D., 2019. Sensitivity of tangential YORP effect to shapes and arrangement of boulders. *EPSC-DPS Joint Meeting (15–20 September, 2019, Geneva, Switzerland)*, id. EPSC-DPS2019-969.
27. Marzari, F., Rossi, A., Paolicchi, P., Dell'Oro, A., Scheeres, D. J., **Golubov, O.**, 2019. YORP-Yarkowski evolution of asteroid families. *EPSC-DPS Joint Meeting (15–20, September 2019, Geneva, Switzerland)*, id. EPSC-DPS2019-264.
28. **Golubov, O.**, Kyrylenko, I., Scheeres, D. J., 2018. The structure of the Kirkwood gaps and their implication for the Yarkovsky effect. *American Astronomical Society, DPS meeting #50*, id. 111.07.
29. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., 2018. The systematic structure of YORP dynamics. *LPI Contribution No. 2083*, p. 2032.
30. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., 2017. New results on spin evolution due to the YORP effect. *American Astronomical Society, DPS meeting #49*, id. 100.07.
31. **Golubov, O.**, Lipatova, V., Scheeres, D. J., 2016. Modelling evolution of asteroid's rotation due to the YORP effect. *American Astronomical Society, DDA meeting #47*, id. 203.01.
32. **Golubov, O.**, 2014. Heat models of asteroids and the YORP effect. *Odessa astronomical publications*, 27(1), pp. 87–88.
33. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., Krugly, Y. N., 2013. 3-dimensional simulation of the tangential YORP effect. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2013*, id. P23A-1769.
34. **Golubov, O.**, Scheeres, D. J., Krugly, Y. N., 2013. Modeling the tangential YORP effect. *American Astronomical Society, DPS meeting #45*, id. 112.16.

35. Krugly, Yu. N., **Golubov, O.**, 2012. Tangential YORP. Proceedings of the conference «Asteroids, Comets, Meteors 2012» (16–20 May, 2012, Niigata, Japan), LPI Contribution No. 1667, id. 6375.
36. **Golubov, O.**, Krugly, Y. N., 2011. Influence of intermediate-scale structures on Yarkovsky and YORP effects. Planetary Defense Conference, From Threat to Action (9–12 May 2011, Bucharest, Romania), id. 37.
37. **Golubov, A.**, Krugly, Yu. N., 2010. YORP: influence on rotation rate. Proceedings of the International Conference «Asteroid-Comet Hazard-2009» (St.-Petersburg, Russia, 21–25 September, 2009), editors A. M. Finkelstein, W. F. Huebner, V. A. Shor, pp. 90–94.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

38. Радзиевский, В. В., 1952. О влиянии анизотропности переизлучения солнечной радиации на орбитальное движение астероидов и метеоритов. *Астрономический журнал*, 29 (2), с.162.
39. Янковский И. О., 1901. Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. Брянск, Типография Юдина.
40. Afonso, G. B., Gomes, R. S., Florczak, M. A., 1995. Asteroid fragments in Earth-crossing orbits. *Planetary and Space Science*, 43(6), pp. 787–795.
41. Albuja, A. A., Scheeres, D. J., Cognion, R. L., Ryan, W., Ryan, E. V., 2018. The YORP effect on the GOES 8 and GOES 10 satellites: A case study. *Advances in Space Research*, 61(1), pp. 122–144.
42. Bottke Jr, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., Nesvorný, D., 2006. The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, pp. 157–191.
43. Bottke, W. F., Brož, M., O’Brien, D. P., Campo Bagatin, A., Morbidelli, A., Marchi, S., 2015. The collisional evolution of the main asteroid belt. In *Asteroids IV* (P. Michel et al., eds.), pp. 701–724. Univ. of Arizona, Tucson.
44. Čuk, M., Burns, J. A., 2005. Effects of thermal radiation on the dynamics of binary NEAs. *Icarus*, 176(2), pp. 418–431.
45. Ďurech, J., Carry, B., Delbo, M., Kaasalainen, M., Viikinkoski, M., 2015. Asteroid models from multiple data sources. In *Asteroids IV* (P. Michel et al., eds.), pp. 183–202. Univ. of Arizona, Tucson.
46. Farinella, P., Vokrouhlický, D., Hartmann, W. K., 1998. Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift. *Icarus*, 132, pp. 378–387.
47. Farnocchia, D., Chesley, S. R., Chodas, P. W., Micheli, M., Tholen, D. J., Milani, A., Elliott, G. T., Bernardi, F., 2013. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. *Icarus*, 224 (1), pp. 192–200.
48. Greenberg, A. H., Margot, J. L., Verma, A. K., Taylor, P. A., Hodge, S. E., 2020. Yarkovsky drift detections for 247 near-Earth asteroids. *The Astronomical Journal*, 159 (3), p. 92 (21 pp.).
49. Keller, H. U., Mottola, S., Skorov, Y., Jorda, L., 2015. The changing rotation period of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko controlled by its activity. *Astronomy & Astrophysics*, 579, p. L5 (4 pp.).

50. Margot J.-L., Pravec P., Taylor P., Carry B., Jacobson S., 2015. Asteroid systems: Binaries, triples, and pairs. In *Asteroids IV* (P. Michel et al., eds.), pp. 355–374. Univ. of Arizona, Tucson.
51. Marzari, F., Rossi, A., Scheeres, D. J., 2011. Combined effect of YORP and collisions on the rotation rate of small Main Belt asteroids. *Icarus*, 214 (2), pp. 622–631.
52. Michel, P., Richardson, D. C., Durda, D. D., Jutzi, M., Asphaug, E., 2015. Collisional formation and modeling of asteroid families. In *Asteroids IV* (P. Michel et al., eds.), pp. 341–354. Univ. of Arizona, Tucson.
53. Morbidelli, A., Vokrouhlický, D., 2003. The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids. *Icarus*, 163 (1), pp. 120–134.
54. Muinonen, K., 2010. Introduction to light scattering by Gaussian random particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 111, pp. 1745–1747.
55. Nesvorný D., Brož M., Carruba V., 2015. Identification and dynamical properties of asteroid families. In *Asteroids IV* (P. Michel et al., eds.), pp. 297–321. Univ. of Arizona, Tucson.
56. O’Keefe, J. A., 1976. *Tektites and their origin*. Elsevier, New York.
57. Öpik E. J., 1951. Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, A54, pp. 165–199.
58. Nolan, M. C., Magri, C., Howell, E. S., Benner, L. A. M., Giorgini, J. D., Hergenrother, C. W., et al., 2013. Shape model and surface properties of the OSIRIS-REx target Asteroid (101955) Bennu from radar and lightcurve observations. *Icarus*, 226, pp. 629–640.
59. Paddack, S. J., 1969. Rotational bursting of small celestial bodies: Effects of radiation pressure. *Journal of Geophysical Research*, 74, pp. 4379–4381.
60. Paddack, S. J., 1973. Rotational bursting of small celestial bodies. Ph.D. thesis, Catholic University, Washington, D.C.
61. Paddack, S. J., Rhee, J. W., 1975. Rotational bursting of interplanetary dust particles. *Geophysical Research Letters*, 2, pp. 365–367.
62. Paolicchi, P., Knežević, Z., 2016. Footprints of the YORP effect in asteroid families. *Icarus*, 274, pp. 314–326.
63. Paolicchi, P., Spoto, F., Knežević, Z., Milani, A., 2019. Ages of asteroid families estimated using the YORP-eye method. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484 (2), pp. 1815–1828.
64. Pravec, P., Fatka, P., Vokrouhlický, D., Scheirich, P., Ďurech, J., Scheeres, D. J., Kušnirák, P., Hornoch, K., Galád, A., Pray, D. P., Krugly, Y. N., 2019. Asteroid pairs: A complex picture. *Icarus*, 333, pp. 429–463.
65. Pravec, P., Harris, A. W., Vokrouhlický, D., Warner, B. D., Kušnirák, P., Hornoch, K., Pray, D. P., Higgins, D., Oey, J., Galád, A., Gajdoš, Š., 2008. Spin rate distribution of small asteroids. *Icarus*, 197 (2), pp. 497–504.
66. Radzievskii, V. V., 1954. A mechanism for the disintegration of asteroids and meteorites. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 97, pp. 49–52.
67. Rubincam D. P., 1982. On the secular decrease in the semimajor axis of LAGEOS’s orbit. *Celestial Mechanics*, 26, pp. 361–382.

68. Rubincam D. P., 1995. Asteroid orbit evolution due to thermal drag. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 1585–1594.
69. Rubincam, D. P., 2000. Radiative spin-up and spin-down of small asteroids. *Icarus*, 148 (1), pp. 2–11.
70. Scheeres, D. J., Mirrahimi, S., 2008. Rotational dynamics of a solar system body under solar radiation torques. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 101 (1), pp. 69–103.
71. Spoto, F., Tanga, P., Mignard, F., Berthier, J., Carry, B., Cellino, A., Dell’Oro, A., Hestroffer, D., Muinonen, K., Pauwels, T., Petit, J. M., 2018. Gaia Data Release 2 – Observations of solar system objects. *Astronomy & Astrophysics*, 616, p. A13.
72. Steinberg, E., Sari R., 2011. Binary YORP effect and evolution of binary asteroids. *The Astronomical Journal*, 141 (2), p. 55 (10pp.).
73. Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., Statler, T. S., 2015. The Yarkovsky and YORP effects. In *Asteroids IV* (P. Michel et al., eds.), pp. 509–531. Univ. of Arizona, Tucson.
74. Vokrouhlický, D., Čapek, D., 2002. YORP-induced long-term evolution of the spin state of small asteroids and meteoroids: Rubincam's approximation. *Icarus*, 159 (2), pp. 449–467.
75. Walsh, K.J., Richardson, D.C., Michel, P., 2008. Rotational breakup as the origin of small binary asteroids. *Nature*, 454 (7201), pp. 188–191.
76. Zhou, W.H., 2020. ‘Oumuamua’s rotation with the mechanical torque produced by interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 899 (1), p. 42.

АНОТАЦІЯ

Голубов О. А. Динамічна еволюція астероїдів під дією негравітаційних сил. – Кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи. (10 – Природничі науки, 104 – Фізика та астрономія). – Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України, Харків; – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2021.

Робота присвячена дослідженню динаміки астероїдів під дією негравітаційних сил світлового тиску, вивченню впливу сил світлового тиску на орбітальний рух астероїда (ефект Ярківського) та його обертання (ефект Ярківського–О’Кіфа–Радзівєвського–Педдека, або ЯОРП) та аналізу еволюційних наслідків цих ефектів для окремих астероїдів і астероїдних сімейств.

Вперше запропоновано концепцію тангенціального ефекту ЯОРП, в якому сила світлового тиску має компонент, дотичний до глобальної поверхні астероїда завдяки дрібномасштабним нерівностям поверхні.

Створено напіваналітичну модель ефекту Ярківського та нормального ефекту ЯОРП, в якій сила та момент сил світлового тиску виражені як інтеграл по поверхні опуклого астероїда.

Аналітично й чисельно досліджено загальну еволюцію обертального стану астероїда під дією нормального й тангенціального ефектів ЯОРП.

Вперше описано три нових стійких стани рівноваги для астероїдів під дією різних компонентів ефекту ЯОРП.

Розвинуті моделі ефекту ЯОРП та еволюції обертального стану астероїда успішно застосовані до пояснення спостережуваних прискорень окремих астероїдів та еволюції астероїдних сімейств.

Ключові слова: астероїди, динаміка, світловий тиск, ефект Ярківського, ефект ЯОРП, сімейства астероїдів.

ANNOTATION

Golubov O. Dynamic evolution of asteroids under non-gravitational forces. – Qualification scientific work on the form of a scientific report.

Thesis for a Doctor of Sciences degree in Physics and Mathematics, speciality 01.03.03 – Heliophysics and physics of Solar System (10 – Natural Sciences; 104 – Physics and Astronomy). – Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The work is devoted to the study of the dynamics of asteroids under the action of non-gravitational forces, namely the influence of the light pressure forces on the orbital motion of an asteroid (the Yarkovsky effect) and its rotation (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack effect, or YORP). The general analytic theory of these effects has been constructed, a new component of the YORP effect has been found, which arises due to asteroid’s small-scale surface irregularities, and general models of the evolution of the rotation state of single and binary asteroids under the action of these effects have been developed.

A new theoretical model has been created, in which the Yarkovsky and YORP effects are expressed by an analytical formula as integrals over the surface of a convex asteroid, involving certain numerically defined functions. Numerical modeling of these functions has been performed in the general case, and the approximate theories for the cases of the high and low thermal inertia of the surface have been created. In the case of a locally flat surface, it has been theoretically proved that the angular acceleration of the asteroid under the action of YORP does not depend on the thermal properties of the surface and the angular velocity of the asteroid. A mathematical formalism has been constructed that generalizes the theory of YORP for elliptical orbits of asteroids, as well as for arbitrary light scattering laws of the surface.

For the first time, the concept of the tangential YORP effect has been proposed, in which, due to the small-scale surface irregularities, the light pressure force has a component tangential to the global surface of the asteroid. Tangential YORP has been studied numerically as a function of the relevant parameters, such as the thermal inertia of boulders, their size and location, as well as the obliquity of the asteroid's axis. It has been shown that the tangential YORP is always positive, i.e., accelerates the rotation of the asteroid.

An approximate analytical theory of tangential YORP has been created, which allows estimating the effect caused by boulders of arbitrary shape, and this theory has been confirmed by comparison with numeric calculations. The tangential YORP effect

has been integrated over all the boulder sizes, and an approximate expression has been obtained for the tangential YORP created by a population of boulders of different sizes. It has been also proved that the irregularities of regolith on the surface of the asteroid can create a tangential YORP of the same order of magnitude as the boulders.

It has been shown that the normal YORP effect, which occurs due to the large-scale asymmetry of the asteroid shape, and the tangential YORP, which occurs due to small-scale surface irregularities, can be of the same order of magnitude. For the asteroids (25143) Itokawa and (101955) Bennu, using their shape models, the value of the normal YORP has been theoretically calculated, and the value of the tangential YORP has been estimated. It has been shown that the acceleration caused merely by the large-scale asymmetry is inconsistent with the observational data, whereas the addition of the tangential YORP to the model makes it possible to obtain consistency of the theory with the observational data.

Based on the created theoretical model of the normal YORP, the dependence of the effect on the asteroid shape, obliquity, and its thermal properties is investigated. A study of the existing numerical shape models of asteroids has shown that for the majority of the asteroids simple analytical formulas give a satisfactory approximation for the values of YORP, and the shape determines only one coefficient of these dependencies.

The evolution of the rotation state of an asteroid has been investigated with the help of the analytical expressions derived for the YORP torques. Analytical solutions have been found for the relationship between the asteroid obliquity and its angular velocity. A satisfactory agreement has been observed between the derived analytic solutions and the results of numeric simulations.

For the first time, the existence of an equilibrium rotation state of an asteroid has been demonstrated, in which the normal and tangential YORP cancel each other. It has been shown that this equilibrium can be achieved for about 10% of asteroids. This equilibrium state allows asteroids to stop the evolution of their rotational state and avoid destruction by centrifugal forces for a long time.

A model of asteroid dynamics has been created, taking into account the Yarkovsky effect, normal and tangential components of YORP, and collisions. The expansion of the asteroid family along the semi-major axis under the influence of the Yarkovsky effect has been investigated using computer simulations of asteroids of different sizes.

The dynamics of binary asteroids under the action of various components of the YORP effect have been studied. A new equilibrium state has been found for two-synchronous binary asteroids, in which the normal YORP effect and the binary YORP effect mutually compensate each other. For singly synchronous binary asteroids, an equilibrium state has been found, in which the satellite and the main body interact with the help of tides, but on the satellite the tides are compensated by binary YORP, and on the main body by normal and tangential YORP. Numerical simulations have shown that both equilibrium states can be achieved for several percent of asteroids.

The results of analytical and numerical simulations performed in the dissertation, for the first time made it possible to (i) create an analytical theory of the YORP and Yarkovsky effects, which expresses the effects as integrals over the surface of the asteroid; (ii) to discover the tangential YORP effect, which arises due to the thermal conduction in small-scale structures on the surface of the asteroid, to confirm it by

numerical simulations, analytical calculations, and analysis of observational data; (iii) construct a general model of asteroid dynamics under the action of the YORP effect and successfully apply it to explain the evolution of asteroid families; (iv) prove the existence of a new type of dynamical equilibrium for single asteroids and two types of equilibria for binary asteroids.

Key words: asteroids, dynamics, light pressure, Yarkovsky effect, YORP effect, asteroid families.