

**Міністерство освіти і науки України**  
**Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна**  
**Фізичний факультет**

**Кафедра астрономії та космічної інформатики**

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри астрономії та  
космічної інформатики  
проф. Юрій ШКУРАТОВ

14.06.2024 р.



Оцінка « задовільно »

Голова ЕК  
проф. Віктор ТИШКОВЕЦЬ

21.06.2024 р.



Дюкова Вікторія Ігорівна

**Залежність ЯОРП-ефекту від розміру астероїда за результатами обробки  
даних DAMIT**

Кваліфікаційна робота на здобуття  
освітньо-кваліфікаційного рівня  
«Бакалавр» спеціальність  
104 – «фізика та астрономія»  
освітньо-професійна програма  
«астрономія»



(підпис студента)

Науковий керівник – професор кафедри  
астрономії та космічної інформатики  
Голубов О.А.



(підпис керівника)

Рецензент – провідний співробітник  
НДІ астрономії  
XXXX

(підпис рецензента)

**Харків 2024**

# Зміст

<b>Вступ</b> .....	3
<b>Розділ 1. Загальні відомості про ЯОРП ефект</b> .....	5
1.1 Історія відкриття ефекту Ярковського та ЯОРП ефекту .....	5
1.2 Огляд відомостей про ефект Ярковського та ЯОРП .....	6
1.3 Фізичні основи та теорія ЯОРП ефекту .....	10
1.4 Компоненти ЯОРП (YORP) ефекту .....	13
<b>Розділ 2. Спостережні дані про ЯОРП ефект на основі бази даних DAMIT</b> .....	17
2.1 Огляд бази даних DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques) .....	17
2.2 Опис спостережень, зібраних в базі даних .....	19
2.3 Розгляд методології збору та обробки даних .....	21
<b>Розділ 3. Аналіз спостережних даних</b> .....	23
3.1 Збір та обробка спостережних даних .....	23
3.2 Створення таблиці з відомостями про астероїди, для яких відомий вимірний ЯОРП ефект .....	25
<b>Розділ 4. Вплив ЯОРП-ефекту на еволюцію астероїдів</b> .....	28
4.1 Дослідження впливу ЯОРП на траєкторії руху астероїдів .....	28
4.2 Аналіз активності астероїдів, що пов'язана з ЯОРП-ефектом .....	31
4.3 Розгляд можливих наслідків для динаміки астероїдів у сонячній системі .....	37
<b>Висновок</b> .....	40
<b>Список використаних джерел</b> .....	42

## Вступ

Вивчення астероїдів завжди було і залишається важливим, тому що астероїди є залишками ранньої Сонячної системи і дозволяють краще зрозуміти формування планет і походження нашої Сонячної системи. Вони також становлять потенційну небезпеку зіткнення із Землею, тому розуміння їх властивостей та орбіт має вирішальне значення для планетарного захисту. Дослідження астероїдів сприяють технологічному прогресу і пробуджують інтерес до науки. Ефекти Ярковського та ЯОРП мають велике значення для сучасної астрономії та астрофізики. Вони використовуються для точного прогнозування орбіт астероїдів, що є особливо важливим для оцінки потенційних загроз зіткнення з Землею. Розуміння цих ефектів дозволяє вченим як передбачати довгострокові зміни у орбітах астероїдів, а й розробляти стратегії запобігання можливих ударів. **Метою** даної дипломної роботи було проаналізувати залежність ЯОРП-ефекту від розміру астероїда за результатами обробки даних DAMIT

Для реалізації поставленої мети маємо виконати такі **завдання**: Дослідити історію відкриття ефекту Ярковського та ЯОРП ефекту.

- Провести детальний огляд наукової літератури щодо ефектів Ярковського та ЯОРП, включаючи їх фізичні основи та сучасні дослідження.
- Провести огляд бази даних DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques).
- Створити таблицю з відомостями про астероїди, для яких відомий вимірний ЯОРП ефект.
- Провести аналіз активності астероїдів, що пов'язана з ЯОРП-ефектом та Дослідити вплив ЯОРП на астероїди.
- Розглянути можливі наслідки для динаміки астероїдів у сонячній системі.

**Актуальність даної теми** полягає у тому, що тема вираження комічного в художніх творах залишається однією з домінуючих і найбільш дискусійних в сучасному літературознавстві.

**Об'єктом дослідження** виступають астероїди, для яких виміряно ефекти Ярковського та ЯОРП, зокрема ті, які представлені в базі даних DAMIT

**Предмет дослідження** – є ефекти Ярковського та ЯОРП (Ярковського-О'Кіфа-Радзієвського-Падака) та їх вплив на динаміку астероїдів, зокрема залежність ЯОРП-ефекту від розміру астероїда на основі обробки даних з бази даних DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques).

**Новизна роботи** полягає в тому, що в ній були використовує новітні дані з бази DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques), що дозволяє отримати найсвіжіші та найточніші дані про астероїди та їх характеристики.

**Теоретичне значення** роботи полягає в тому, що вона сприяє розвитку наукових знань про динаміку астероїдів. Отримані результати можуть бути використані для уточнення існуючих теорій щодо ефектів Ярковського та ЯОРП, а також для розробки нових моделей, що враховують ці ефекти.

**Практичне значення** роботи полягає у тому, що отримані результати можуть бути використані у майбутніх дослідженнях для покращення моделей прогнозування орбіт астероїдів.

**Структура** дипломної роботи. Дана робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

## Розділ 1. Загальні відомості про ЯОРП ефект.

### 1.1 Історія відкриття ефекту Ярковського та ЯОРП ефекту.

Наприкінці XIX століття польський інженер Іван О. Ярковський (1844–1902) розробив гіпотезу про світлоносний ефір. Він припустив, що планети можуть накопичувати цей ефір під час руху в космосі. Ярковський стверджував, що опинившись усередині, ефір конденсувався, твердів і ставав матерією. Це було раннє, хоч і помилкове, розуміння еквівалентності маси та енергії.[23]

Згодом він доповнив свою концепцію, стверджуючи, що при обертанні планети навколо Сонця ефір накопичується на передній стороні планети, що викликає легкий поштовх, коли планета рухається в потоці ефіру. У 1901 році інженер опублікував брошуру під назвою «Щільність світлоносного ефіру та опір, який він надає руху». Тут він використовував цю модель, щоб пояснити, як планета може вічно проходити крізь ефір, не сповільнюючись, а світло Сонця - це двигун, який протидіє гальмуванню планет, коли вони рухаються крізь нього. [23]

Хоча його роботи не отримали широкого визнання за життя, ідея Ярковського дуже вплинула на подальші дослідження. Згодом, роботи Івана Ярковського помічає естонський астроном Ернст Епik (1893–1985). Він пише статтю про ймовірність зіткнення частинок та планет у Сонячній системі, у якій згадує публікацію Ярковського і називає його засновником концепції ефекту Ярковського.

Ефект Ярковського став основою для ефекту ЯОРП. В його основу покладені праці чотирьох вчених разом з вище згаданим Ярковським, а саме: Джон О'Кіфа, Володимир Радзієвський, Стівен Паддак.

Американський фізик Джон О'Кіф (1916–2000) зробив значний внесок у розуміння того, як сонячне випромінювання може впливати на обертання та орбітальні параметри астероїдів. Він досліджував вплив неоднорідного

нагрівання поверхні астероїду сонячним випромінюванням, що призводить до зміни його обертання та орбітального руху. Його роботи стали важливим кроком для розуміння ефекту ЯОРП.

У 1952 році Володимир Радзієвський (1925–2020) вивчає, наскільки неоднорідне альbedo на астероїдах можуть змінити їх показники ротації.

В 1969 Стівен Педдак (1930–1993) провівши експеримент припустив, що асиметрія форми може бути більш електронною, ніж варіація альbedo.

Девід Рубінкам у 2000 році, об'єднавши праці вчених запропонував концепцію – вторинного процесу, який може впливати на астероїди через їх неправильну форму та склад поверхні, яка має назву ефект ЯОРП (Ярківський-О'Кіф-Радзієвський-Педдак), який включає вплив як сонячного випромінювання, так і теплового випромінювання з поверхні астероїда.[22]

Ефекти Ярковського та ЯОРП мають велике значення для сучасної астрономії та астрофізики. Вони використовуються для точного прогнозування орбіт астероїдів, що є особливо важливим для оцінки ризиків їх зіткнення з Землею. Наприклад, для астероїдів малого розміру, для яких облік ефекту Ярковського є критичним для точного визначення їх траєкторій. Сучасні методи вимірювання та моделювання ефектів ЯОРП включають використання інфрачервоних телескопів та космічних місій, таких як OSIRIS-REx. Ці дослідження допомагають покращити наше розуміння динаміки малих тіл у Сонячній системі та розробляти більш точні моделі їхнього руху.

## 1.2 Огляд відомостей про ефект Ярковського та ЯОРП.

Ефект Ярковського та ефект ЯОРП (Ярковського-О'Кіфа-Радзієвського-Педдака) представляють собою сили теплового випромінювання, які суттєво впливають на динаміку малих небесних тіл, таких як астероїди. Ці ефекти необхідні для розуміння довгострокової еволюції та поведінки цих об'єктів у Сонячній системі. Ці ефекти часто вивчаються разом, оскільки обидва вони виникають у результаті взаємодії сонячного випромінювання з цими тілами,

але впливають на різні аспекти їх руху і обертання. Розуміння цих ефектів має вирішальне значення для розуміння довгострокової еволюції малих тіл у Сонячній системі, для подальшого прогнозування їх траєкторій та оцінки потенційних ризиків зіткнення із Землею.[22]

Ефект Янковського описує силу, що виникає внаслідок анізотропного випромінювання теплового випромінювання тілом, що обертається, з ненульовою тепловою інерцією. Коли невелике тіло, наприклад, астероїд, поглинає сонячне світло, воно нагрівається, а потім повторно випромінює цю енергію у вигляді теплового випромінювання. Якщо поверхня тіла має змінну температуру і воно обертається, перевипромінювання не є рівномірним по всій поверхні. Ця асиметрія теплового випромінювання призводить до виникнення сумарної сили, яка може змінити орбіту тіла. Ефект Янковського має дві основні складові: добову та сезонну. Добовий компонент виникає через добове обертання астероїда, внаслідок чого одна сторона тепліша за іншу. Сезонна складова обумовлена нахилом осі обертання астероїда, що призводить до змін температури на його орбіті навколо Сонця. Обидва компоненти призводять до змін великої півосі астероїда, які можуть збільшуватися, так і зменшуватися в залежності від його обертання і характеристик орбіти. [1]

Ефект ЯОРП, відноситься до змін швидкості обертання та орієнтації полюсів невеликого тіла через повторне випромінювання поглиненого сонячного світла. На відміну від ефекту Янковського, який насамперед впливає на орбіту, ефект ЯОРП впливає на стан обертання астероїда. Цей ефект викликаний неправильною формою астероїда, що призводить до нерівномірного теплового випромінювання, що створює крутні моменти, які можуть збільшувати або зменшувати швидкість обертання і змінювати орієнтацію осі. З часом ефект ЯОРП може призвести до значних змін обертання, наприклад, розкручування астероїда до точки поділу або зміни його осі обертання. [22]

Спільне вивчення ефектів Ярковського та ЯОРП є важливим, оскільки вони представляють два взаємодоповнюючі аспекти того, як сонячне випромінювання впливає на малі тіла. Ефект Ярковського змінює орбітальну траєкторію астероїда, потенційно призводячи до змін його орбіти, які можуть наблизити його до Землі чи віддалити від неї. Ефект ЯОРП змінює стан його обертання, що може вплинути на його загальну стабільність та форму. Ці орбітальні зміни можуть вплинути реакцію на ефект Ярковського, оскільки теплові властивості і характер випромінювання впливають на стан обертання. Отже, всебічне розуміння динаміки малих тіл потребує інтеграції обох ефектів у моделі та симуляції. [1]

Теоретичні моделі та дані спостережень продемонстрували значущість цих ефектів. Наприклад, астероїд (6489) Голєвка продемонстрував вимірні зміни орбіти через ефект Ярковського, тоді як астероїд (54509) ЯОРП продемонстрував зміни обертання, що відповідають ефекту ЯОРП. Ці спостереження підтверджують теоретичні передбачення і наголошують на важливості цих сил у формуванні поведінки малих тіл у Сонячній системі. Постійне вивчення цих ефектів життєво важливе для покращення розуміння динаміки астероїдів, здатності передбачати їхнє майбутнє, становище та оцінки потенційних ризиків зіткнення. [16]

Досягнення у методах спостереження та теоретичному моделюванні значно покращили наше розуміння цих ефектів. Прямі виявлення ефектів Ярковського та ЯОРП були зроблені для кількох астероїдів, що надало емпіричні дані, що підтверджують теоретичні прогнози. Ці відкриття демонструють значну роль цих невеликих сил у формуванні динаміки малих тіл у Сонячній системі. Можливість спостерігати та вимірювати ці ефекти дозволяє вченим уточнювати моделі та прогнози поведінки астероїдів, сприяючи нашому ширшому розумінню еволюції Сонячної системи.

Вплив ефекту Ярковського на орбіту астероїда особливо значуще в тривалих часових масштабах. Навіть невелика сила при постійному

застосуванні протягом мільйонів років може призвести до істотних змін орбіти астероїда. Цей ефект особливо важливий для навколоземних астероїдів, оскільки він може змінити їх траєкторії настільки, що приведе їх до зіткнення з Землею, або виштовхне на більш безпечні орбіти. Ефект Ярковського також є ключовим фактором у потраплянні астероїдів на Землю, оскільки він може обурювати орбіти астероїдів у головному поясі, змушуючи їх виходити на траєкторії, що перетинають Землю. [22]

Вплив ефекту ЯОРП на стан обертання астероїда може призвести до різних результатів. Швидкі зміни швидкості обертання можуть призвести до зміщення поверхневого матеріалу, що може призвести до зсувів або навіть розпаду астероїда, якщо швидкість обертання стане занадто високою. Зміни осі обертання можуть змінити теплові властивості поверхні астероїда, впливаючи на те, як він поглинає та перевипромінює сонячну радіацію. Ці зміни можуть створити петлі зворотного зв'язку, у яких ефект ЯОРП змінює обертання астероїда, що, своєю чергою, впливає на з його орбіту під впливом ефекту Ярковського.

Розуміння сукупного ефекту Ярковського та ЯОРП необхідне для розробки точних довгострокових моделей динаміки астероїдів. Ці моделі мають вирішальне значення для прогнозування майбутніх положень потенційно небезпечних астероїдів та планування місій щодо їх відхилення, якщо це необхідно. Вивчення цих ефектів також дає уявлення про фізичні властивості астероїдів, таких як їх теплова інерція, шорсткість поверхні та внутрішня структура. Аналізуючи, як ці властивості впливають на ефекти Ярковського та ЯОРП, вчені можуть зробити докладні висновки про склад та історію астероїдів.

Безперервні дослідження ефектів Ярковського та ЯОРП залишаються динамічною та важливою областю науки, що спонукається як теоретичними досягненнями, так і проривами у спостереженнях. Майбутня робота має бути зосереджена на вдосконаленні методів спостереження, уточненнях моделей та

вивченні ширших наслідків цих ефектів для еволюції малих тіл у Сонячній системі. У міру того, як наше розуміння цих сил покращуватиметься, це розширить наші можливості прогнозувати поведінку астероїдів, оцінювати ризики зіткнення та розробляти ефективні стратегії захисту планети. [1],[26]

### 1.3 Фізичні основи та теорія ЯОРП ефекту.

Довгий час вважалося, що зміна руху астероїдів, відбувається тільки під час їх випадкової взаємодії один з одним. Зіткнення викликають різку зміну кутової швидкості, в той час як припливні взаємодії викликають поступову зміну внаслідок гравітаційного впливу великих планет. Однак ефект Ярковського-О'Кіфа-Радзієвського-Паддака (ЯОРП) має значний вплив на обертання малих астероїдів. Про це вперше і пише Девід Рубінкам у своїй статті. Він стверджує, що цей ефект складається з двох компонентів: відбиття сонячного світла і теплового випромінювання. Невеликі поштовхи від відбитого сонячного світла можуть поступово змінювати обертання астероїдів, особливо якщо вони неправильної форми. Створивши теоретичний експеримент, під час якого він створив моделі сферичного астероїда з клинами на екваторі, що достатньо ясно демонструє принцип дії ЯОРП. В його моделі сонячні промені, що потрапляють на вертикальні і похилі поверхні клинів, створюють асиметричні сили, що призводять до чистого імпульсу, що і прискорює обертання астероїда.

Для більш точного аналізу Рубінкам створив серію гіпотетичних астероїдів під назвою Псевдо-Гаспра, Псевдо-Іда, Псевдо-Ерос, Псевдо-Фобос і Псевдо-Деймос. Ці астероїди були змодельовані з реальних небесних тіл і розміщені на кругових орбітах навколо Сонця. Розрахунки теплового моменту проводилися шляхом оцінки сили, що діє на дрібні елементи поверхні астероїда. Використовуючи сферичні гармоніки для опису псевдо-астероїдних форм, Рубінкам обчислив теплові сили і моменти, що діють на кожен елемент

поверхні. Таким чином, ці розрахунки показали, як малі теплові сили можуть значно змінити обертання астероїдів з інтервалом у мільйони років. В основу теорії ЯОРП Ефекту покладена теорія ефекту Ярковського, тому спершу необхідно розділити ці два поняття. Під дією ЯОРП ефекту змінюється швидкість та наклон осі обертання, ефект Ярковського викликає зміну великої полуосі орбіти астероїда. Отже ефект Ярковського впливає на зміну орбітального руху, а ЯОРП на зміну осьового руху.

Жоден астероїд не є ідеально круглим або рівномірним за складом і текстурою, різні частини нагріваються і повторно випромінюють тепло з різною швидкістю. Результатом є чистий тепловий дисбаланс, який розкручує астероїд. Залежно від напрямку моменту цього розкручення, він може змусити астероїд обертатися швидше, що в кінцевому підсумку розкручує астероїд настільки швидко, що астероїд розпадається, утворюючи подвійну систему. Або навпаки, це може уповільнити астероїд і в кінцевому підсумку змінити напрямок обертання або викликати хаотичне обертання. Вже відомо, що ЯОРП ефект є ефективним для астероїдів малого розміру. Вперше ЯОРП був виміряний у 2007 році на навколоземному астероїді діаметром 57 метрів (54,509) 2000 RH5, цьому астероїду згодом дали назву ЯОРП.

Ефект ЯОРП – це явище зміни швидкості обертання невеликих астероїдів неправильної форми під дією сонячного світла.[1]

ЯОРП-ефект, як і ефект Ярковського, є силою віддачі  $df$ , що діє на елемент поверхні  $dS = n_a dS$  в результаті теплового відображення та повторного випромінювання поглиненого сонячного світла. Момент ЯОРП це сума моментів, створюваних трикутними елементами поверхні. Основною невідомою величиною в  $T = \int r \times df$  температура поверхні  $T$ , яка залежить від кількох факторів: падіння сонячного випромінювання на кожен елемент поверхні, що залежить від таких факторів, як орбіта астероїда, форма і т.д.;

відбивна здатність тіла в оптичному діапазоні, виражена коефіцієнтом альbedo  $A$ . [1]

Припускаючи, що астероїд обертається навколо короткої осі інерції тензора (з моментом інерції  $C$ ), ми визначаємо  $L=C\omega e$  як кутовий момент тіла. Тут  $\omega$  - це кутова швидкість обертання, а  $e$  – одиничний вектор осі обертання. Швидкість зміни  $L$  в інерційній системі відліку дорівнює прикладеному моменту сили  $T = \frac{dL}{dt}$ .

При постійній  $C$ , з цього рівняння можна розділити на

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T \cdot e}{C} = \frac{T_s}{C},$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{T - (T \cdot e)e}{C\omega} X$$

Де  $\omega$  — кутова швидкість;  $e$  — одиничний вектор осі обертання;  $T$  – момент сили;  $T_s$  – складова частина моменту сил, що діє вздовж осі обертання та викликає зміну періоду обертання астероїда;  $C$  – момент Інерції.

Виявлення ефекту YORP пов'язане з точним вимірюванням фази

$\phi$  яка залежить від періоду обертання астероїду. Це пояснюється тим, що частота обертання  $\omega$  змінюється лінійно згідно із законом, відомим як лінійна зміна частоти обертання:

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\omega}{dt} t,$$

За умов, що  $\frac{d\omega}{dt}$  є функцією часу. Відповідно, фаза  $\phi$  збільшується в часі за квадратичним законом:

$$\phi(t) = \phi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \frac{d\omega}{dt} t^2$$

Далі, малі добавки  $\omega_0$  зростають лінійно у фазовій площині обертання астероїда, бо у моделі  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  ефект виступає як похибка до частоти  $\omega_0$ . Навіть слабкі нутації не настільки помітні, щоб спростувати наявність ЯОРП.

#### 1.4 Компоненти ЯОРП (YORP) ефекту

##### Нормальний ЯОРП (Н-ЯОРП).

Нормальний ефект ЯОРП відноситься до ефекту ЯОРП, створеного силами віддачі світлового тиску, що діє перпендикулярно до загальної поверхні асиметричного астероїда.[1]

Іншим компонентом ефекту ЯОРП є тангенціальний ЯОРП, або TYORP (англ. Tangential YORP). Порівняно від звичайного ефекту ЯОРП, на цей крутний момент не впливає асиметрія астероїда, і він може виникнути навіть на симетричних астероїдах. Обертання астероїда порушує цю симетрію.

Ефект TYORP генерується силами теплової емісії, які діють по дотичній до поверхні астероїда. Це відбувається через асиметричне нагрівання та охолодження поверхні астероїда під час його обертання. Тангенціальна складова сили виникає внаслідок теплопровідності всередині матеріалу астероїда та різниці в нагріванні між ранковою та денною сторонами астероїда. На відміну від звичайного ефекту YORP, який залежить від загальної асиметрії астероїда, ефект TYORP може виникати навіть у симетричних валунах на симетричних астероїдах. Критичним фактором для TYORP є обертання астероїда, яке порушує теплову симетрію. Коли астероїд обертається, різні частини його поверхні піддаються сонячному світлу в різний час, що призводить до градієнтів температури.

Вранці, коли сонце сходить, східна сторона кожного валуна на астероїді нагрівається. Протягом дня теплопровідність переносить цю енергію через валун на західну сторону. У другій половині дня, коли Сонце нагріває західну сторону, вона вже попередньо нагріта попередньою провідністю. Це призводить до того, що вранці на західній стороні температура досягає вищої, ніж на східній стороні. Відповідно до закону Стефана-Больцмана, кількість теплового випромінювання, що випромінюється поверхнею, зростає із зростанням її температури в четвертому ступені. Таким чином, вища температура на західній стороні вдень створює більше теплового

випромінювання порівняно зі східною стороною вранці. Це диференціальне випромінювання призводить до сумарної сили віддачі, яка діє по дотичній. Загальне теплове випромінювання із західного боку чинить тангенціальну силу на валун, штовхаючи його на схід. Ця дотична сила сприяє прискоренню обертання астероїда. Згодом кумулятивний ефект TYORP може призвести до значних змін у швидкості обертання астероїда.

Ефект TYORP відіграє значну роль у динаміці обертання малих астероїдів. Це може призвести до зміни швидкості обертання та орієнтації осі, подібно до нормального ефекту YORP, або до складної обертальної поведінки та сприяти загальній еволюції стану обертання астероїда. Дотичні сили від TYORP також можуть впливати на еволюцію поверхні астероїдів. Змінюючи швидкість обертання, TYORP може призвести до перерозподілу матеріалу на поверхні, потенційно спричиняючи зсуви або інші геологічні процеси. У подвійних астероїдних системах ефект TYORP може взаємодіяти з ефектом BYORP, впливаючи на динаміку як первинних, так і вторинних тіл. Розуміння цих взаємодій має вирішальне значення для моделювання еволюції подвійних астероїдних систем. Кумулятивний вплив TYORP протягом тривалого часу може значно змінити обертальні властивості астероїдів. Це має наслідки для довгострокової стабільності та еволюції популяції астероїдів у Сонячній системі. Точне термічне моделювання має важливе значення для прогнозування ефектів TYORP. Це передбачає детальне моделювання процесів теплопровідності та тепловипромінювання на поверхні астероїда. Покращені моделі можуть допомогти зрозуміти та кількісно визначити ефект TYORP для різних типів астероїдів.

Ефект тангенціального YORP (TYORP) є критичним компонентом ширшого явища YORP, що впливає на динаміку обертання астероїдів через тангенціальні теплові сили. Розуміючи механізми та наслідки TYORP, вчені можуть отримати глибше розуміння складної поведінки астероїдів та їхньої довгострокової еволюції. Ці знання необхідні для вдосконалення нашого

розуміння динаміки Сонячної системи та для розробки стратегій пом'якшення потенційних ударів астероїдів.

YORP-ефект може діяти не тільки на одинарні, а й на подвійні астероїди. Такий ефект називають BYORP (англ. binary YORP), він призводить до зміни параметрів орбіти подвійної системи, результатом чого може бути злиття або розпад подвійного астероїда.

Подібно до ефекту YORP, ефект BYORP виникає внаслідок анізотропного випромінювання теплового випромінювання. Однак у цьому випадку сили діють на вторинний астероїд (супутник) через його неправильну форму та те, як він поглинає та повторно випромінює сонячну енергію. Ефект BYORP може викликати значні зміни в орбіті супутного астероїда навколо основного астероїда. Залежно від орієнтації та форми супутного астероїда, ефект BYORP може призвести до розширення або звуження подвійної орбіти.

На ефект BYORP сильно впливає обертовий стан супутника. Взаємодія між обертанням супутника та його орбітальним рухом може призвести до складної динамічної поведінки, включаючи зміни швидкості обертання супутника та загальну стабільність подвійної системи. Крім теплових сил, припливна взаємодія між первинним і вторинним тілами також відіграє роль в еволюції подвійної системи. Комбінований вплив BYORP і приливних сил може призвести до широкого діапазону результатів, від стабілізації подвійної орбіти до остаточного відділення супутного астероїда від основного. [25]

Докази спостережень ефекту BYORP походять від ретельного моніторингу подвійних астероїдних систем протягом тривалих періодів. Зміни орбітальних параметрів вторинного тіла, таких як велика напіввісь і ексцентриситет, можуть вказувати на наявність сил, викликаних BYORP. Обчислювальні моделі та чисельне моделювання використовуються для прогнозування довгострокової еволюції подвійних астероїдних систем під впливом ефекту BYORP. Ці моделі допомагають зрозуміти, як різні фактори, такі як форма та теплові властивості місяця, впливають на подвійну динаміку.

Конкретні подвійні системи астероїдів, такі як (66391) 1999 KW4 і (617) Патрокл, були детально вивчені, щоб зрозуміти вплив ефекту BYORP. Ці дослідження передбачають аналіз орбітальної еволюції та обертових станів супутників, щоб зробити висновки про силу та напрямок сил BYORP.[25]

Ефект BYORP відіграє вирішальну роль в еволюції популяції подвійних астероїдів. Це може призвести до дисоціації подвійних систем або стабілізації певних орбітальних конфігурацій, впливаючи на загальний розподіл і характеристики подвійних астероїдів у Сонячній системі. Розуміння ефекту BYORP є важливим. У разі потенційного зіткнення з астероїдом подвійні системи можуть створити унікальні проблеми, а знання динаміки BYORP може допомогти вжити заходів щодо їх пом'якшення. Ефект BYORP дає змогу зрозуміти процеси формування та еволюції астероїдів.

## **Розділ 2. Спостережні дані про ЯОРП ефект на основі бази даних DAMIT**

### 2.1 Огляд бази даних DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques).

База даних DAMIT це обширний ресурс знань створений на методі інверсії с кривої блиску та фотометричних досліджень, який містить у собі данні про кілька тисяч астероїдів. Для кожного астероїда, що міститься у базі DAMIT записані: відомості основних фізичних характеристик астероїдів - швидкість обертання, орієнтація осі обертання, форма, розмір, маса, спектральний тип, період бокового обертання, напрямок обертання та фотометричні дані. [4]

DAMIT була створена командою астрономів та дослідників під керівництвом Йозефа Дуреха (Josef Āurech), який працює в Астрономічному інституті Чеського Технічного Університету у місті Прага. Команда складається з фахівців у галузі астероїдної астрономії, які зосереджені на вивченні форми, обертання та фізичних властивостей астероїдів. Мета для реалізації посприяло бажання створити для астрономів базу знань про сучасні відомості астероїдів зібрану в одному місці, отриманих за допомогою методу світлових кривих та інших методів інверсії, а також до вихідних кодів для вирішення прямих та зворотних завдань. До кожного астероїда в базі даних вказані основні фізичні параметри: модель форми, орієнтація осі обертання та період обертання. База даних постійно оновлюється, коли з'являються нові моделі, або коли вже відомі моделі оновлюються або робляться уточнення. Крім того, DAMIT містить інформацію про модель розсіювання світла, яка використовується у процесі інверсії. Світлові криві, на основі яких були отримані моделі, можуть бути завантажені у вигляді файлів даних, а інші джерела даних, такі як зображення,

отримані за допомогою адаптивної оптики, цитуються та включаються як допоміжні файли, коли це доречно. Кожна модель або її оновлення посилаються на публікацію. Завжди дається посилання на статтю, в якій було опубліковано модель (або оновлення).[4]

Однак деякі рішення DAMIT значно відрізняються від опублікованих в оригінальних статтях, головним чином через оновлені набори даних або обмежений діапазон для пошуку сидеричного періоду, використаного в оригінальній роботі. У деяких випадках файли фотометричних даних були пошкоджені або неправильно прочитані, що призвело до перевірки та виправлення даних. Для одного астероїда може існувати кілька моделей, часто через обмежену геометрію (наприклад, астероїд, що обертається надто близько до екліптики, що вводить неоднозначність  $\lambda \pm 180^\circ$  в екліптичній довготі полюса). Також можуть існувати різні моделі, що відповідають різним методам інверсії, наприклад, опуклі та неопуклі моделі для одного і того ж астероїда. [4]

DAMIT також містить інформацію про модель розсіювання світла, яка використовується в інверсії.[4]

DAMIT – база даних MySQL, представляє собою веб-інтерфейс, який включає різноманітні дані та інструменти для роботи з цими моделями, і є доступною для всіх користувачів. Записи бази даних можуть бути завантажені у вигляді текстових файлів, придатних для подальшої обробки. Рішення формою також надаються у вигляді комп'ютерно-генерованих зображень у форматі PNG (Portable Network Graphics). DAMIT з усіма його компонентами розміщений та управляється Астрономічним інститутом Карлового університету.[4]

## 2.2 Опис спостережень, зібраних в базі даних.

Моделі форми астероїдів представлені багатогранниками із трикутними поверхневими гранями. Кожна модель представлена у вигляді одного файлу, що містить список декартових координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  вершин багатогранника, за яким слідує список граней. Вершини кожної трикутної грані перераховані в порядку проти годинникової стрілки, як видно ззовні тіла. Оскільки фотометрія сама не може визначити розмір, більшість моделей немає масштабу і довільно масштабуються до одиничного об'єму. Якщо модель масштабована до своїх реальних розмірів (коли, наприклад, доступні дані про затемнення, дані з високим кутовим роздільною здатністю або інфрачервоні вимірювання), це вказується у відповідному тегу, координати  $x$ ,  $y$ ,  $z$  наведені в кілометрах.

Модель астероїда завжди обертається навколо своєї осі  $z$ , яка зазвичай близька, але не точно збігається з максимальною головною віссю інерції тензора (за умови рівномірного розподілу щільності). Якщо ці дві осі значно різняться, модель формально добре відповідає даним, але обертання навколо осі фізично неможливе. Такі випадки обговорюються у базі даних. Нині у базі даних існує лише одна така модель: 167 Урда. Ось  $x$  не має спеціальної орієнтації щодо мінімальної головної осі тензора інерції. Вона зазвичай визначається опосередковано шляхом встановлення  $t_0$  у рівнянні

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix},$$

на мінімальну епоху юліанської дати у наборі даних світлових кривих, або найближче менше ціле значення.

На сьогоднішній день у базі даних DAMIT не міститься моделей астероїдів, що виконують нутацію, тобто астероїдів у збудженому стані обертання. Такі моделі астероїдів, розробники планують додати у

майбутньому, і першим прикладом стане модель астероїда 2008 TC<sub>3</sub>, отримана з фотометрії (Scheirich et al.). Крім того, у DAMIT не міститься інформації про моделі подвійні астероїдів. У випадках, коли супутник значно менший за основну компоненту, DAMIT включає моделі основних компонентів подвійних або множинних систем (наприклад, 87 Сільвія та 121 Герміона). Для синхронних подвійних систем, де є лише один період у світлових кривих, можна створити опуклу модель, яка добре відповідає даним.[4]

Кожна модель форми астероїда візуалізується та відображається в трьох напрямках: два види з екватора астероїда та один з його полюса. Ці види відповідають перспективам із позитивних осей  $x$ ,  $y$  та  $z$ . Модель розсіювання світла, що використовується для рендерингу, не має фізичного значення і була вибрана виключно для візуалізації за допомогою програмного забезпечення Matlab.

Більшість моделей форми астероїдів у DAMIT є опуклими. Як показали Дурех і Каасалаїнен у своєму дослідженні 2003 року, світлові криві, інтегровані по диску, містять мінімальну інформацію про неопуклості форми. Для виявлення невивпуклих особливостей світлових кривих необхідні спостереження при дуже високих фазових кутах, коли важливі ефекти затемнення. Більш того, неопуклі рішення не мають стабільності та унікальності, властивих опуклим. Надійні неопуклі моделі форми можуть бути отримані тільки при поєднанні світлових кривих з даними високої роздільної здатності, такими як зображення, отримані адаптивною оптикою. Це також означає, що не можливо точно визначити помилки неопуклості опуклої моделі форми. Точність відповідності опуклої моделі реальній формі може сильно відрізнятись: вона може бути дуже хорошою для майже опуклих тіл (наприклад, 2 Палади) або поганою для сильно неопуклих тіл (наприклад, 624 Гектор).[4]

### 2.3 Розгляд методології збору та обробки даних

Для збору та обробки даних використовують різні методології. Основним джерелом даних для цього дослідження є база даних DAMIT, що як було зазначено вище містить тривимірні моделі астероїдів, отримані методами фотометричної інверсії. Ці моделі дозволяють детально вивчити форму, розмір та ротаційні характеристики астероїдів. Додатково використовуються дані з наукових публікацій та спостережень, радарні спостереження та дані космічних місій, такі як місії Hayabusa та OSIRIS-REx, які допомагають уточнити форму та розміри астероїдів. Фотометричні дані збираються з використанням наземних телескопів та космічних апаратів. Спостереження проводять у різних часових інтервалах, що дозволяє отримати повні криві блиску астероїдів.

Методологія обробки даних включає кілька етапів. На першому етапі проводиться попередня обробка даних, що включає перевірку на наявність помилок та аномалій. Метод фотометричної інверсії - використовується для визначення форми, стану обертання і іноді поверхневих властивостей астероїда за кривими блиску. Файл кривої блиску включає дані про яскравості в одиницях інтенсивності для певних часових моментів (з урахуванням корекції на час проходження світла), а також інформацію про геометрію спостереження та освітлення. Для кожної точки даних наведено декартові екліптичні координати Сонця та Землі щодо астероїда. Файли кривих блиску можна використовувати безпосередньо як вхідні дані для програмного забезпечення інверсії. Дані з різних джерел завантажуються та об'єднуються. Проводиться перевірка даних на наявність помилок та аномалій для забезпечення їхньої якості та цілісності. Застосовуються методи фотометричної інверсії для створення моделей форми та обертання астероїдів. Цей процес включає моделювання кривих блиску на основі даних, що спостерігаються, оптимізацію параметрів моделі для мінімізації відмінностей

між спостерігаються і змодельованими кривими блиску, а також ітеративне уточнення параметрів моделі, поки змодельовані криві блиску не будуть максимально відповідати спостерігаються. Отримані моделі порівнюються з незалежними даними, такими як зображення з радіолокації або дані від космічних місій, для підтвердження їх точності і надійності.

Для кожного астероїда, що міститься у базі даних DAMIT надаються модель форми, сидеричний період обертання, напрямок осі обертання та фотометричні дані, використані для інверсії. Моделі форми представлені у вигляді поліедричних моделей із трикутними поверхнями, що дозволяє детально описати геометрію поверхні астероїда. Для опису відбивної здатності поверхні астероїдів використовується модель розсіювання Ломмеля-Зелігера та Ламберта. База даних постійно оновлюється з появою нових моделей або уточнення вже існуючих. [4]

Методологія збору та обробки даних, що використовується в базі даних DAMIT, забезпечує високу точність та надійність одержуваних моделей астероїдів. Ці моделі є важливим інструментом для вивчення фізичних властивостей малих тіл Сонячної системи, їх динаміки та еволюції. За допомогою моделей можна досліджувати такі аспекти, як обертання астероїдів, вплив ефекту ЯОРП, а також колізійні та гравітаційні взаємодії з іншими тілами Сонячної системи. База даних DAMIT продовжує розширюватися, надаючи все більше даних для наукових досліджень та практичних застосувань.

## Розділ 3. Аналіз спостережних даних

### 3.1 Збір та обробка спостережних даних

Точний збір та обробка даних є важливими кроками у розумінні оберտальних та динамічних характеристик астероїдів, на які впливає ефект Ярковського та ЯОРП ефект. Для більш детального розуміння, необхідно розібратись у методології, яка використовується для збору та аналізу даних про різні астероїди. Джерела інформації включають детальні спостережні дослідження та теоретичні моделі, які необхідні для створення комплексного розуміння ефектів ЯОРП на небесні тіла.

Наглядові дані для астероїдів збираються з використанням різних телескопів та інструментів, забезпечуючи високу точність та повне покриття. Значні джерела включають Nordic Optical Telescope (NOT), телескоп WIYN і Hubble Space Telescope (HST), використані. Ці телескопи надали високороздільні зображення та фотометричні дані, які були критично важливі для виявлення та аналізу викидів пилу та оберտальних станів астероїдів.

Високороздільні зображення були необхідні для ідентифікації та відстеження розвитку хвостів пилу у астероїдів. Наприклад, множинні хвости, що спостерігаються у 311P/PANSTARRS та (6478) Gault, були зафіксовані протягом декількох місяців, показуючи епізодичний характер викидів пилу [10],[11],[15]. Фотометричні спостереження надали деталізовані світлові криві, які використовувалися для визначення періодів обертання та варіацій яскравості. Ці світлові криві необхідні для розуміння обертальної динаміки і підтвердження наявності змін, викликаних ефектом ЯОРП. Наприклад, світлові криві (6478) Gault показали період обертання, близький до критичної межі для руйнування обертанням, що передбачає активність, спричинену ефектом ЯОРП.[12]

Методи інверсії кривих близьку використовуються для реконструкції опуклих моделей форми астероїдів та виявлення змін у їх швидкостях обертання. Цей підхід включає припасування кривих близьку до теоретичних моделей, які враховують форму астероїда, орієнтацію осі обертання і період обертання. Ďurech та інші. (2018) застосували цей метод до астероїдів (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger та (161989) Cacus, що дозволило виявити та підтвердити зміни, викликані ефектом ЯОРП, у їх швидкостях обертання. Моделювання опуклої форми включає створення тривимірного уявлення астероїда на основі його кривих близьку. Ця модель допомагає зрозуміти розподіл маси та властивості поверхні астероїда.[6]

Термофізичне моделювання поєднує спостережні дані з теоретичними моделями для оцінки теплових властивостей та обертальної динаміки астероїдів. Цей підхід необхідний для інтерпретації ефектів теплових сил випромінювання, таких як ефекти ЯОРП та ефект Ярковського на поведінку астероїдів. Теплова інерція та альbedo є ключовими параметрами для розуміння того, як астероїди поглинають та перевипромінюють сонячну енергію. Дані Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) надали оцінки цих параметрів, які використовувалися для уточнення. Моделі динаміки викиду пилу, такі як модель пилу Finson-Probststein (FP), використовувалися для аналізу траєкторій викинутих частинок і для оцінки їх розмірів і швидкостей. Це було важливо для розуміння епізодичних викидів пилу, що спостерігаються у 311P/PANSTARRS та (6478) Gault [10],[12].

Зібрані наглядові дані порівнювалися з теоретичними прогнозами для підтвердження виявлених ефектів ЯОРП та забезпечення комплексного розуміння основних механізмів. Зміни, що спостерігалися, у швидкостях обертання порівнювалися з теоретичними значеннями ЯОРП, отриманими з моделей. Це порівняння допомогло виявити розбіжності та уточнити теоретичні моделі для кращої відповідності спостережуваним даним. Наприклад, теоретичні значення ЯОРП для (1685) Toro та (161989) Cacus

виявилися більшими за значення, що спостерігаються, що вказує на необхідність поліпшення моделей [5]. Ефект Ярковського, який впливає на орбітальну динаміку астероїдів, був обмежений з використанням зібраних даних. Аналізуючи теплові властивості та об'ємні щільності, дослідники змогли встановити межі орбітальних змін, спричинених ефектом Ярковського. Це було особливо важливо для таких астероїдів, як Ra-Shalom (2100), де ефект Ярковського був добре виявлений, незважаючи на відсутність виявленого сигналу ЯОРП [5].

Збір та обробка наглядних даних є основними для розуміння орбітальних та динамічних характеристик астероїдів, на які впливає ефект ЯОРП. Високороздільні зображення, фотометрія, інверсія світлових кривих і термофізичне моделювання були ключовими методологіями, використаними в дослідженнях 311P/PANSTARRS, (6478) Gault, (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger та (161989) Ці методи надали деталізовані данні про орбітальні стани, динаміку викиду пилу та теплові властивості цих астероїдів, підкреслюючи значну роль ефекту ЯОРП у їхній активності. Інтеграція спостережних даних з теоретичними моделями дозволила підтвердити та уточнити наше розуміння ЯОРП, сприяючи ширшому знанню про динаміку та еволюцію астероїдів. [5]

3.2. Створення таблиці з відомостями про астероїди, для яких відомий вимірний ЯОРП ефект.

Під час написання дипломної роботи було створено таблицю, для більш глибокого аналізу впливу ефекту ЯОРП на астероїди, яка містить відомості про астероїди з вимірним ефектом Ярковського-О'Кіфа-Радзієвського-Педдака (ЯОРП) та загальні характеристики астероїдів, для яких для яких ефект ЯОРП був достовірно встановлений. У таблицю увійшли одинадцять астероїдів. Наявність деталізованої інформації про такі астероїди посприє у

майбутньому проводити комплексні дослідження та робити висновки про довгострокові процеси, що впливають на ці небесні тіла.

Таблиця 1. Астероїд для яких відомий ЯОРП

Назва	Рік, коли виміряно	швидкість обертання $\omega$ , $\nu = d\omega/dt$ , $[10^{-8}\text{rad d}^{-2}]$	Діаметр астероїда, км	Орбіта астероїда, велика піввісь, а	Альбедо	Період обертання, год.	Посилання
(54509) YORP	2007	$3.54 \pm 0.38$	0.12	1.00005	0,1	0.2029	[24]
(1862) Apollo	2007	$4.94 \pm 0.09$	1.5	1.4702	0,25	3.065	[14]
(1620) Geographos	2008	$1.14 \pm 0.03$	2.56 0.15	1.2453	0,3258	5.222	[5], [14]
(3103) Eger	2012	$1.1 \pm 0.5$	1.5	1.4044	0,64	5.710	[6], [7]
(25143) Itokawa	2014	$3.54 \pm 0.38$	0.32	1.3241	0,53	12.132	[18]
161989) Cacus	2018	$1.86 \pm 0.09$	1.0		0,09	3.7550527	[6], [7]
(101955) Bennu	2019	$6.34 \pm 0.91$	0.535	1.1264	0,154	4.296	[8], [19]
(1685) Toro	2022	$0.33 \pm 0.03$	3.5	1.3676	0,31	10.185	[5], [29]
(10115) 1992 SK	2022	$8.3 \pm 0.6$	1	1.2484	0,28, $0,318 \pm 0,214$	7.31	[29]
(1865) Cerberus	2012	$8 \times 10^{-9}$	1.2	1.0801	0,22	6.803286	[20]
(2100) Ra-Shalom	2012	$0.29 \pm 0.2$	2.3	124,476	0,13	19.820072	[6], [7]

Таблиця 1 містить ключові параметри астероїдів, для яких було виміряно ефект ЯОРП. Зокрема, таблиця включає дані про назву астероїда, рік вимірювання, швидкість обертання, діаметр, альбедо, орбіту (величина

великої півосі), період обертання та джерело інформації. Прикладом може бути астероїд (54509) YORP, для якого в 2007 році була виміряна швидкість обертання  $\omega = 3.54 \pm 0.38 (10^{-8} \text{ rad d}^{-2})$ , діаметр якого становить 0.12 км, орбітальний параметр  $a = 1.0000 \text{ а.}$ , альbedo 0.1 та період обертання 0.2029 годин. Дані взяті з дослідження Рубінкама у 2000 році.[22] Ці дані дозволяють детальніше вивчити вплив ефекту ЯОРП на еволюцію та динаміку астероїдів.

Для інших астероїдів, таких як (3103) Eger, (161989) Casus, та (2100) Ra-Shalom, також представлені аналогічні параметри. Наприклад, для астероїда (3103) Eger швидкість обертання становить  $1.1 \pm 0.5 (10^{-8} \text{ rad d}^{-2})$ , діаметр 1.4 км, орбіта 1.7895 а.е., альbedo 0.21 і період обертання 5.7 годин.[5]

Таким чином, таблиця з параметрами астероїдів, для котрих відомий виміряний ефект ЯОРП, необхідна для комплексного аналізу та розуміння довгострокових процесів, які впливають на еволюцію астероїдів у Сонячній системі. Вона надає важливі дані для дослідження динаміки обертання, орбітальних змін та структурних перетворень, спричинених ефектом ЯОРП, та є основою для подальших досліджень та спостережень.

## Розділ 4. Вплив ЯОРП-ефекту на еволюцію астероїдів

### 4.1 Дослідження впливу ЯОРП на траєкторії руху астероїдів

Хоча інтеграція ефектів Ярковського та ЯОРП у динамічні моделі астероїдів була дуже успішною, залишаються багато питань, що вимагають подальшого вивчення. Одним із значних завдань для майбутнього є точне поєднання прискорень Ярковського з ЯОРП, особливо через складні взаємодії між обертанням, швидкістю прецесії орбіти та швидкістю прецесії осі обертання. Крім того, як показали вчені, такі як Давид Вокрухлицький, Вільям Ф. Боттке, Стівен Р. Чеслі, Даніель Дж. Шерес та Томас С. Статлер, що резонанси між обертанням та орбітою можуть суттєво впливати на еволюцію способу осі обертання.[9] Ці фактори створюють складні механізми зворотного зв'язку, які можуть змінювати швидкість дрейфу астероїдів і швидкість їх обертання. Оскільки ефект ЯОРП чутливий до розміру, форми, матеріалу та розташування астероїда, цей ефект варіюватиметься від об'єкта до об'єкта. Незважаючи на досягнення в обчисленні хронології сімейств астероїдів, досягнення високоточних рішень вимагатиме значних зусиль. Майбутні дослідження ефекту ЯОРП також повинні враховувати теплову релаксацію та використовувати точніші термофізичні моделі. Крім того, необхідно краще зрозуміти кінцевий стан еволюції ЯОРП. Наприклад, якщо ЯОРП прискорює обертання астероїда досить швидко, може розпастися і, можливо, утворити супутник. З іншого боку, ЯОРП може також обмежити динамічну тривалість життя синхронно обертових бінарних систем (Čuk & Burns, 2005). Для астероїдів, уповільнених ЯОРП, деякі можуть увійти в хаотичний стан «перекидання», подібний до спостерігається у Тоутатиса та інших астероїдів (наприклад, Pravec & Harris, 2002).

Критичний період обертання ( $P_c$ ), коли обертальне прискорення дорівнює силі тяжкості на екваторі астероїда, задається формулою:

$$P_c = \left(\frac{3\pi}{G\rho}\right)^{1/2}$$

Де  $G$  – гравітаційна постійна, а  $\rho$  – густина астероїда. Для типового астероїда із щільністю  $1000 \text{ кг/м}^3$  цей період становить приблизно 3,3 години. Астероїди, які обертаються швидше за цей критичний період, ймовірно, зазнають втрати маси внаслідок обертання, коли матеріал з поверхні викидається через недостатнє гравітаційне утримання. Емпіричні дослідження показали, що більшість астероїдів, більше кількох сотень метрів у діаметрі, мають більш довші періоди обертання, ніж "бар'єрний" період - близько 2,2 годин, що вказує на те, що астероїди, що швидко обертаються, вже зазнали втрати маси внаслідок обертальної нестабільності. Спостереження активних астероїдів, таких як 311P та P/2013 R3, надають прямі докази втрати маси через обертальну нестабільність. Ці тіла демонструють хвости з пилу та уламків, що вказують на викид матеріалу з їх поверхонь через високі швидкості обертання. [9]

Прямі вимірювання ефекту ЯОРП були проведені на декількох астероїдах, надавши конкретні дані про те, як цей момент, що крутить, впливає на їх обертальні стани. Наприклад, Розітіс та Грін (2013) та Лоурі та ін. (2014) задокументували зміни у швидкостях обертання астероїдів, підтверджуючи теоретичні передбачення крутного моменту, ефекту ЯОРП.

Вплив ефекту ЯОРП на траєкторії астероїдів великий. Оскільки ЯОРП змінює швидкість обертання та орієнтацію осі, це може призвести до значних змін орбітальних елементів астероїду протягом тривалих часових інтервалів. Крутний момент від ЯОРП пропорційний розміру астероїда та відстані до Сонця, що призводить до складних динамічних поведінок.

Для астероїдів маленького розміру, особливо в навколосемному просторі, ефект ЯОРП може довести їх до критичних швидкостей обертання відносно швидко, призводячи до змін у їх траєкторіях у міру втрати маси. Ця втрата маси може змінити центр мас астероїда і, отже, його орбіту.

Перерозподіл маси внаслідок обертального скидання може призвести до секулярних змін великої півосі, ексцентриситету та нахил астероїду.

Емпіричні дослідження надали значні докази впливу ЯОРП на траєкторії астероїдів. Наприклад, спостереження астероїда (54509) ЯОРП показали зміни його швидкості обертання, надаючи прямі докази роботи крутного моменту. Аналогічно, астероїд (6489) Голівка продемонстрував зміни у своїй орбіті через комбінований вплив ефектів Ярковського та ЯОРП-індукованих змін у стані обертання. Поділ астероїда P/2013 R3 на кілька компонентів було приписано обертальній нестабільності, спричиненої ЯОРП. Уламки цього астероїда демонструють різні траєкторії, впливаючи на втрату маси та подальший перерозподіл моменту.

Вивчення ефекту ЯОРП є критично важливим не тільки для розуміння природної еволюції популяцій астероїдів, але і для стратегій захисту планети. Здатність передбачити зміни в траєкторіях астероїдів внаслідок ЯОРП необхідна для оцінки потенційної загрози, яка походить від навколоземних об'єктів. Розуміння механізмів прискорення обертання, індукованого ЯОРП, та подальшої втрати маси може допомогти у розробці методів пом'якшення, таких як навмисне зміна швидкості обертання астероїда для зміни його траєкторії.

Крім того, ефект ЯОРП відіграє значну роль у формуванні та еволюції сімейств астероїдів. Поступове прискорення обертання «батьківських» тіл може призвести до ротаційного поділу, коли великі фрагменти викидаються, формуючи нові астероїди з різними траєкторіями. Цей процес сприяє поширенню сімейств астероїдів та ймовірним потраплянням метеоритів на Землю.

Ефект ЯОРП є фундаментальним механізмом, що впливає на обертальну та орбітальну динаміку астероїдів невеликого розміру. Через анізотропне випромінювання теплового випромінювання крутні моменти ЯОРП можуть викликати значні зміни у швидкостях обертання та орієнтаціях осей,

призводячи до втрати маси внаслідок обертання та змін у траєкторіях. Показники досліджень, надані астраномами, наголошуючи на важливості включення ефектів ЯОРП у моделі динаміки астероїдів. Майбутні дослідження та спостереження продовжуватимуть уточнювати наші знання про ЯОРП та його наслідки для еволюції та оцінки загроз популяції астероїдів.

#### 4.2 Аналіз активності астероїдів, що пов'язана з ЯОРП-ефектом

Ефект Ярковського-О'Кіфа-Радзієвського-Педдака істотно впливає на динаміку обертання і, отже, на активність астероїда. Оскільки астероїд поглинає сонячне світло і повторно випромінює його у вигляді тепла, нерівна поверхня і форма створюють момент, що крутить, який може змінити швидкість його обертання і вісь. Неправильна форма та різні властивості поверхні (наприклад, варіації альbedo) астероїду мають вирішальне значення для ефекту ЯОРП. Валуні, кратери та хребти можуть створювати складні структури теплового випромінювання. Залежно від форми та осі обертання астероїда ефект ЯОРП може як збільшувати, так і зменшувати швидкість його обертання. Швидке обертання може призвести до структурної напруги або навіть розпаду, а уповільнення може призвести до скупчення сміття. Момент, що крутить, також може згодом змінити орієнтацію осі обертання астероїда, впливаючи на його сезонні цикли і теплове середовище. Зміни швидкості обертання можуть спричинити зсуви або зсуви в реголіті, оголюючи свіжий матеріал або приховуючи елементи поверхні. Це впливання може призвести до змін спектральних властивостей, що спостерігаються із Землі. Прискорене обертання може створити тріщини на поверхні, потенційно викидаючи пил і дрібні частинки в космос, сприяючи кометної активності, що спостерігається. Структурні зміни, спричинені ефектом ЯОРП, можуть спричинити дегазацію або викид пилу. Цю активність можна спостерігати як тимчасові хмари або сліди, які часто приймають за кометну активність. Протягом тривалих періодів часу ефект YORP може змінити орбіту астероїда через зміни динаміки його

обертання, що призведе до потенційних зіткнень або близьких зближень з іншими небесними тілами. Зміни яскравості астероїда, що спостерігаються за його кривою блиску, можуть свідчити про зміни обертання, спричинені ЯОРП ефектом. Періодичні зміни кривої блиску можуть вказувати на прискорення або уповільнення обертання. Спектроскопічні спостереження можуть виявити зміни у складі поверхні через події оновлення поверхні, спричинені ефектом ЯОРП.

Розглянемо детальніше на прикладах.

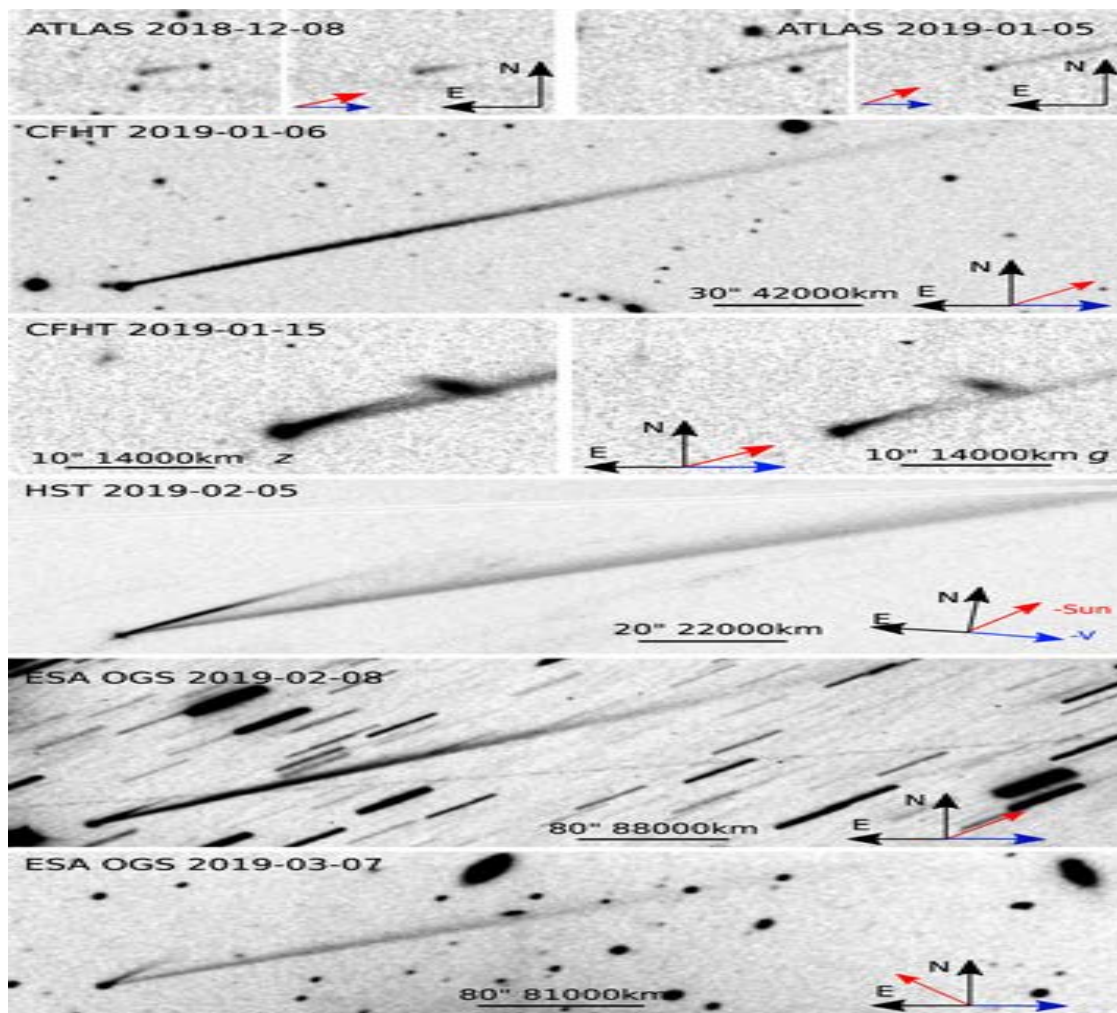


Рис 1. Еволюція хвоста пилу астероїда (6478) Голт з моменту його початкового відкриття даних ATLAS до першого візиту космічного телескопа Хаббла

Наприклад астрономи виявили, що астероїд Голт (6478 Gault) має два кометоподібні хвости, що стало об'єктом дослідження з використанням телескопа Hubble. Як проаналізовано Клейної та ін. (2019) та Джуїттом та ін. (2019), також демонструє значну активність. Перший викид пилу розпочався близько 28 жовтня 2018 року, за яким відбулися наступні події 31 грудня 2018 року та 10 лютого 2019 року. Кожна подія тривала приблизно 10-20 днів. Викинуті пилові частинки виявилися відносно великими, а швидкості викиду становили близько 0.15 метрів за секунду. Фотометричні дані показали, що період обертання Гаулта був близький до критичної межі для руйнування обертанням. Виникнення хвостів пов'язане з активними процесами, що призвели до викиду речовини з поверхні астероїду до космосу. Згідно з гіпотезою дослідників, основною причиною цього явища є ЯОРП-ефект. ЯОРП ефект призвів до слабкого реактивного імпульсу, що виникає внаслідок теплового випромінювання, поверхня астероїда нагрівалась вдень і остигала вночі, що надало йому додаткового прискорення. Цей ефект міг викликати прискорення обертання астероїда навколо своєї осі. В результаті, коли відцентрова сила почала перевищувати силу гравітації, об'єкт став нестабільним. Це призвело до зсуву на поверхні астероїда, що і викинуло уламки та пил у космічний простір. У дослідженні 2024 року показали що Голт (6478 Gault) мав довгий, тонкий хвіст без газу до червня 2020 року, після чого припинилися всі ознаки активності.[30]



Рис 2. Модель астероїда (1685) Торо. DAMIT

Астероїд (1685) Торо показав попереднє виявлення ефекту ЯОРП із зміною швидкості обертання  $\omega = (3.0) \times 10^{-9}$  рад/день<sup>2</sup>. Термофізичне моделювання, підтримане даними WISE, надало оцінки теплової інерції та альбедо Торо, які склали  $260 \text{ Дж м}^{-2} \text{ с}^{-0.5} \text{ К}^{-1}$  та 0.13 відповідно. Ці знахідки припускають, що ефект ЯОРП впливає на динаміку обертання Торо, хоча для підтвердження цього необхідні додаткові спостереження.[5].[29]

Астероїд 311P/PANSTARRS Цей об'єкт, втрачає реголіт внаслідок обертальної нестабільності, ймовірно спричиненої ефектом ЯОРП.[10]

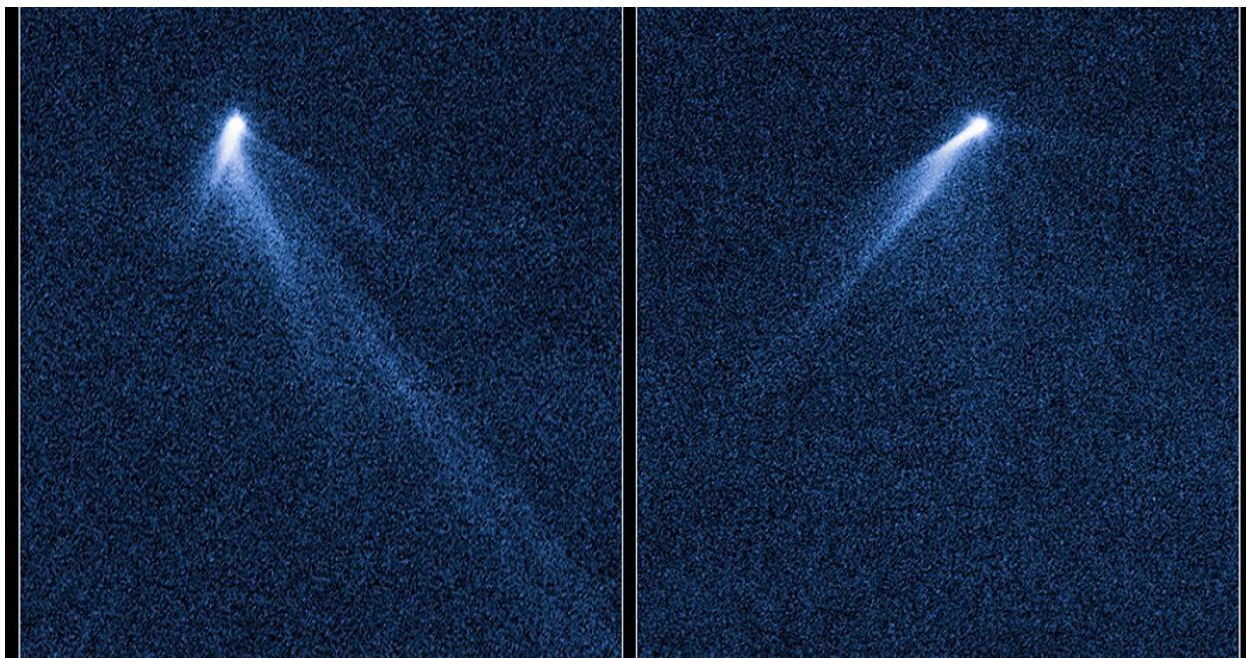


Рис 3. Астероїд 311P/PANSTARRS

Астероїд є переконливим прикладом активності, викликаній ефектом ЯОРП. Дослідження Джуїтта та ін. (2015) показало, що цей астероїд виявляв кілька хвостів, утворених у результаті епізодичних викидів уламків. Ядро з абсолютною величиною приблизно 18.98 відповідає радіусу близько 200 метрів. Викинуті частки варіювалися за розміром від 10 мікрометрів до 80 міліметрів, а швидкості викиду, що спостерігалися, були менше 1 метра в секунду. Множинні хвости пилу вказують на те, що активність викликана обертальною нестабільністю, а не впливом чи процесами сублімації. Швидке

обертання ядра, підтверджене фотометричними варіаціями тривалістю менше години, вказує на те, що ефект ЯОРП відповідає за прискорення обертання астероїда до точки, де поверхня стає нестабільною і матеріал викидається.

Дослідження Дурека та ін. (2018) зосередилося на обертальних станах чотирьох навколоземних астероїдів: (1685) Торо, (2100) Ра-Шалом, (3103) Егер та (161989) Какус. Для астероїда (3103) Егер попередні виявлення ефекту ЯОРП були підтверджені додатковими спостереженнями, оновивши зміну швидкості обертання до  $\omega = (1.1 \pm 0.5) \times 10^{-8}$  рад/день<sup>2</sup>. Це виявлення підтримує гіпотезу у тому, що на швидкість обертання (3103) Егер істотно впливає ефект ЯОРП. [6]



Рис 4. Модель астероїда (3103) Егер. DAMIT

Модель форми Егера залишалася узгодженою з попередніми знахідками, що ще раз підтверджує вплив ефекту ЯОРП на його обертальний стан.

Для астероїда (161989) Какус дослідження підтвердило зміну швидкості обертання, індуковане ефектом ЯОРП  $\omega = (1.9 \pm 0.3) \times 10^{-8}$  рад/день<sup>2</sup>.

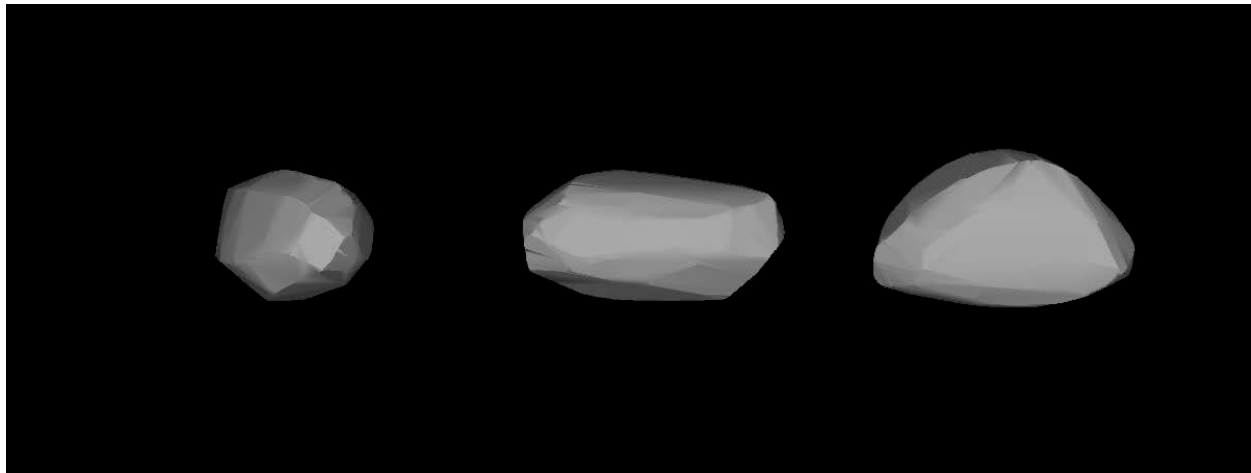


Рис 5. Модель астероїда (161989) Какус. DAMIT

Криві близьку та оцінки теплової інерції даних WISE надали повне розуміння обертального стану (161989) Какус, що сильно підтримує вплив ефекту ЯОРП. Форма і параметри обертання, отримані з дослідження, вказують на те, що Какус зазнає значних змін обертання через момент, що крутить, індукованого ефектом ЯОРП.[6]

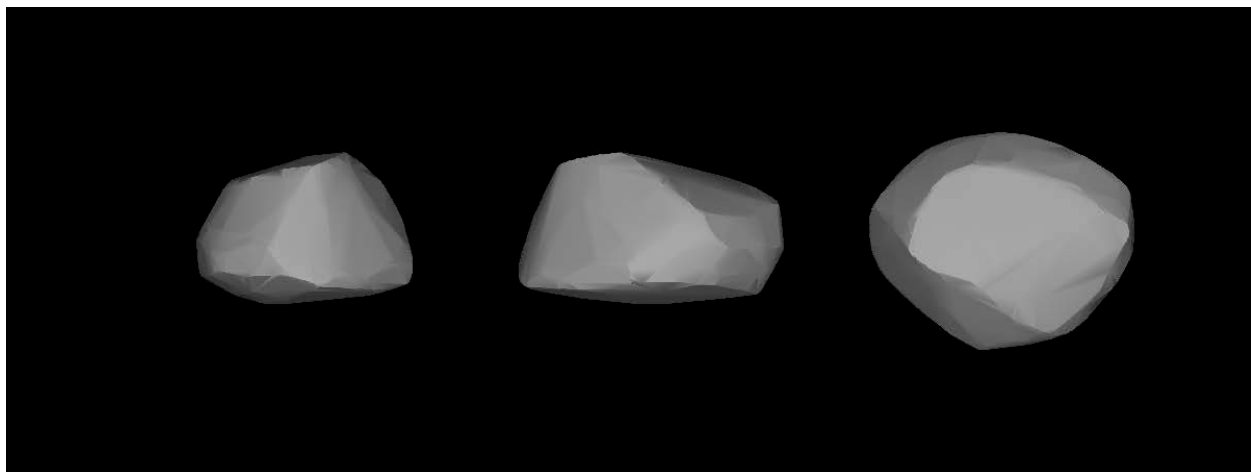


Рис 6. Модель астероїда (2100) Ra-Shalom. DAMIT

Астероїд (2100) Ра-Шалом не виявив виявленого сигналу ефекту ЯОРП, але дослідження надало жорсткіші обмеження на зміну швидкості обертання приблизно  $\omega = (-1.0) \times 10^{-8}, 1.5 \times 10^{-8}$  рад/день<sup>2</sup>. Незважаючи на відсутність підтвердженого виявлення ефекту ЯОРП, оновлена орієнтація полюса та параметри обертання пропонують кращий контекст для майбутніх спостережень та потенційного виявлення ефекту ЯОРП. [6]

Ці аналізи разом підкреслюють значну роль ефекту ЯОРП у зміні обертальної динаміки і пов'язаної з цим активності малих астероїдів.

Епізодичні викиди пилу, що спостерігаються у 311P/PANSTARRS та (6478) Голт, поряд із підтвердженими змінами швидкості обертання у (3103) Егер та (161989) Какус, демонструють різні способи, якими проявляється ефект ЯОРП у поведінці астероїдів. Продовження спостережень і теоретичного моделювання є критично важливим для уточнення нашого розуміння цих процесів і передбачення довгострокової еволюції популяцій астероїдів, схильних до впливу ефекту ЯОРП.[10]

Таким чином, ефект ЯОРП відіграє вирішальну роль в еволюційному шляху невеликих астероїдів, змінюючи їх стан обертання, що призводить до значних фізичних та спостережних змін. Ці зміни можуть виявлятися у збільшенні поверхневої активності, втраті маси і навіть структурному розпаді, що робить ефект ЯОРП ключовим фактором динамічних процесів, що управляють еволюцією астероїдів.

#### 4.3 Розгляд можливих наслідків для динаміки астероїдів у сонячній системі

Майбутнє астероїдів завжди цікавило людство. Науковий інтерес до динаміки астероїдів полягає в відкритті нових можливостей для прямого вивчення: активних астероїдів, руйнування астероїдів, утворення міжпланетного сміття, ймовірність зіткнення астероїда із Землею тощо. Отже під впливом ЯОРП ефекту можливі наступні наслідки. Прискорення обертання та структурні зміни. Одним із найважливіших наслідків ефекту ЯОРП є прискорення обертання астероїдів. Зі збільшенням швидкості обертання можуть виникати значні структурні напруження, що можуть призвести до поверхневих зсувів, утворення тріщин і навіть розпаду астероїда. Наприклад, астероїд 6478 Голт продемонстрував значну активність із епізодичними викидами пилу, що, ймовірно, були викликані ефектом ЯОРП. [12],[15] Ці викиди можуть бути наслідком поверхневих зсувів, коли відцентрова сила перевищує гравітацію, утримуючи матеріал на поверхні астероїда. В результаті таких процесів астероїди можуть втрачати масу і

змінювати свою форму, що в довгостроковій перспективі може призводити до їх фрагментації.

Зміна орбітальних параметрів. Ефект ЯОРП також може впливати на орбітальні параметри астероїдів. Зміни в обертовій динаміці астероїда можуть призводити до зміни його орбіти через зміну напрямку і величини радіаційних сил. Це може впливати на довгострокову стабільність орбіти астероїда і збільшувати ймовірність його зіткнення з іншими об'єктами в Сонячній системі, включаючи Землю. Наприклад, зміна орбіти через ефект ЯОРП може привести до більш частих близьких зближень з іншими небесними тілами, що потенційно збільшує ризик зіткнень.

Формування подвійних систем. Ефект ЯОРП може сприяти утворенню подвійних астероїдних систем. У міру прискорення обертання астероїда матеріал на його поверхні може відокремлюватися і формувати вторинні тіла, що обертаються навколо головного астероїда. Такі подвійні системи можуть виявляти складні динамічні взаємодії, що впливають на їх довгострокову стабільність і еволюцію. Наприклад, утворення подвійних систем може бути наслідком часткового розпаду астероїда під впливом відцентрових сил, викликаних ефектом ЯОРП.

Зміни у спектральних характеристиках. Зсуви на поверхні астероїда, викликані ефектом ЯОРП, можуть призводити до оголення свіжого матеріалу або приховування старих поверхневих елементів. Це може призводити до змін у спектральних характеристиках астероїда, які спостерігаються із Землі. Наприклад, вивільнення реголіту на поверхню може призводити до змін у відбитті світла і тепловому випромінюванні, що впливатиме на спектральні дані, які використовуються для вивчення складу і фізичних властивостей астероїда.

Дегазація та кометна активність. Під впливом ефекту ЯОРП астероїди можуть виявляти кометоподібну активність, таку як дегазація і викид пилу. Це може бути результатом структурних змін на поверхні астероїда, які

викликають вивільнення внутрішніх летючих речовин. Наприклад, астероїд 311P/PANSTARRS продемонстрував кілька хвостів пилу, які, ймовірно, були утворені внаслідок обертової нестабільності, викликані ефектом ЯОРП. [10] Такі явища можуть нагадувати кометну активність і бути помилково прийняті за неї при спостереженнях із Землі.

Розмірковуючи на довгострокову еволюцію, протягом тривалих періодів часу ефект ЯОРП може суттєво впливати на еволюцію астероїдів. Зміни у швидкості обертання і орієнтації осі обертання можуть призводити до істотних змін в орбітальних характеристиках і фізичному стані астероїдів. Це може вплинути на динамічну еволюцію популяцій астероїдів і сприяти формуванню нових структурних елементів у Сонячній системі. Наприклад, тривалі впливи ефекту ЯОРП можуть змінити орбіти астероїдів, що призведе до збільшення або зменшення ймовірності зіткнень з іншими небесними тілами.

## Висновки

Отже, підсумовуючи виконану роботу, можна зробити наступні висновки. Ефект Ярківського-О'Кіфа-Радзівського-Педдака (ЯОРП) істотно впливає на динаміку обертання та безпосередньо на активність астероїда. Ключом для розуміння ЯОРП ефекту є в тому, що не існує ідеально круглого, однорідного по складу та текстурі астероїда. Різні частини астероїда, можуть нагріватись і повнорно випромінювати енергію на різній швидкості. В результаті чого виникає частий дисбаланс теплого випромінювання астероїда. В залежності від напрямлення обертального моменту це може прискорювати або навпаки сповільнювати астероїд. Під час дослідження, було виявлено, що ЯОРП ефект найбільш ефективен для астероїдів маленького розміру. Ефект ЯОРП призводить до змін швидкості обертання та орієнтації осі астероїдів, що підтверджується спостереженнями та моделюванням. Під час роботи над дипломною роботою були зроблено наступне:

- Розглянуто історичні роботи та теоретичні основм, закладені Іваном Ярківським та подальшими дослідниками, які допомогли зрозуміти основні механізми впливу теплових ефектів на рух та обертання астероїдів. Це стало важливим підґрунтям для подальшого аналізу та моделювання.
- Було детально розглянуто, як нерівномірне нагрівання поверхні астероїдів сонячним випромінюванням призводить до змін у їхньому обертанні та орбітальних параметрах. Особлива увага приділялася тому, як ці зміни можуть впливати на довгострокову еволюцію астероїдів та їхню взаємодію з іншими космічними тілами.
- Огляд та використання бази даних DAMIT. Було проведено аналіз методів отримання моделей астероїдів за допомогою інверсійних технік, представлених у базі даних DAMIT. Це дозволило отримати важливу

інформацію про параметри розмірів, форми та обертання астероїдів, яка була використана для подальших досліджень.

- Було створити таблицю з відомостями про астероїди, для яких відомий вимірний ЯОРП ефект.
- Проведено аналіз активності астероїдів, що пов'язана з ЯОРП-ефектом та досліджено вплив ЯОРП на астероїди.
- Розглянуто можливі наслідки для динаміки астероїдів у сонячній системі.

В першому розділі були розглянуті основні відомості про ефект Ярковського та ефект ЯОРП, описано історію появи ефекту ЯОРП, та які вчені доклали зусиль для його виявлення. В другому розділі ми розглянули спостережні данні про ЯОРП ефект та зробили огляд на базу даних DAMIT. Третій розділ був присвячен практичній частині дипломної роботи. В четвертому розділі ми розглянули вплив ефекту ЯОРП можливих наслідків для динаміки астероїдів у сонячній системі.

Проведене дослідження дозволило глибше зрозуміти ефект ЯОРП та його вплив на динаміку астероїдів. Виявлено, що цей ефект є ключовим фактором, який визначає обертальні та орбітальні параметри малих астероїдів. Завдяки використанню даних бази DAMIT, вдалося отримати важливі результати, які підтверджують теоретичні моделі та спостереження.

Ефект ЯОРП має значний вплив на активність астероїдів, що може проявлятися у вигляді викидів пилу та інших матеріалів з поверхні. Це в свою чергу може призводити до змін у їхньому орбітальному русі, що має важливе значення для оцінки ризиків зіткнення з іншими космічними тілами, включаючи Землю.

Подальші дослідження у цій сфері мають важливе значення для поглиблення наших знань про динаміку астероїдів та їхню еволюцію. Розуміння механізмів впливу теплових ефектів, таких як ЯОРП, дозволить не тільки краще прогнозувати поведінку астероїдів, але й розробляти ефективні стратегії для захисту Землі від потенційно небезпечних об'єктів.

## Перелік використаної літератури

1. Battle, A., et al. (2024). Search for Mineralogical Changes on Active Asteroid (6478) Gault. *LPI Contributions*, 3040, 1659.
2. Bottke Jr, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. (2006). The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 157-191.
3. Āurech, J., Carry, B., Delbo, M., Kaasalainen, M., & Viikinkoski, M. (2015). Asteroid models from multiple data sources. *Asteroids IV*, 183-202.
4. Āurech, J., Kaasalainen, M. Photometric signatures of highly nonconvex and binary asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 404(2), 709-714.
5. Āurech, J., Sidorin, V., & Kaasalainen, M. (2010). DAMIT: a database of asteroid models. *Astronomy & Astrophysics*, 513, A46.
6. Āurech, J., Vokrouhlický, D., Kaasalainen, M., Higgins, D., Krugly, Y.N., Gaftonyuk, N., Shevchenko, V., Chiorny, V., Hamanowa, H., Reddy, V., et al. (2008). Detection of the YORP effect in asteroid (1620) Geographos. *Astronomy & Astrophysics*, 489(2), L25-L28.
7. Āurech, J., Vokrouhlický, D., Pravec, P., Hanuš, J., Farnocchia, D., Krugly, Y. N., ... & Warner, B. D. (2018). YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger, and (161989) Cacus. *Astronomy & Astrophysics*, 609, A86.
8. Āurech, J., Vokrouhlický, D., Pravec, P., Hanuš, J., Farnocchia, D., Krugly, Y. N., ... & Warner, B. D. (2018). YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger, and (161989) Cacus. *Astronomy & Astrophysics*, 611, A7.
9. Āurech, J., Vokrouhlický, D., Pravec, P., Krugly, Y., Polishook, D., Hanuš, J., ... & Slyusarev, I. (2024). Secular change in the spin states of asteroids due to radiation and gravitation torques-New detections and updates of the YORP effect. *Astronomy & Astrophysics*, 682, A93.

10. Ďurech, J., Vokrouhlický, D., Pravec, P., Krugly, Y.N., Kim, M.J., Polishook, D., Ayvazian, V., Bonev, T., Choi, Y.J., Datashvili, D., et al. (2022). Rotation acceleration of asteroids (10115) 1992 SK, (1685) Toro, and (1620) Geographos due to the YORP effect. *Astronomy & Astrophysics*, 657, A5.
11. Hergenrother, C., Maleszewski, C., Nolan, M., Li, J.Y., d'Aubigny, C.D., Shelly, F., Howell, E., Kareta, T., Izawa, M., Barucci, M., et al. (2019). The operational environment and rotational acceleration of asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx observations. *Nature Communications*, 10(1), 1-10.
12. Jewitt, D. (2012). The active asteroids. *The Astronomical Journal*, 143(3), 66.
13. Jewitt, D., Agarwal, J., Weaver, H., Mutchler, M., & Larson, S. (2015). Episodic Ejection from Active Asteroid 311P/PANSTARRS. *The Astrophysical Journal*, 798(109).
14. Jewitt, D., Hsieh, H., & Agarwal, J. (2015). The Active Asteroids. *Asteroids IV*, 221.
15. Jewitt, D., Kim, Y., Luu, J., Rajagopal, J., Kotulla, R., Ridgway, S., ... & Wainscoat, R. (2019). Episodically Active Asteroid 6478 Gault. *The Astrophysical Journal Letters*, 876(L19).
16. Kaasalainen, M., et al. (2004). Spin State and Shape of 1620 Geographos from Optical Data. *Nature*, 426, 530-533.
17. Kaasalainen, M., Ďurech, J., Warner, B.D., Krugly, Y.N., & Gaftonyuk, N.M. (2007). Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques. *Nature*, 446(7134), 420-422.
18. Kleyna, J. T., Hainaut, O. R., Meech, K. J., Hsieh, H. H., Fitzsimmons, A., Micheli, M., ... & Wainscoat, R. J. (2019). The Sporadic Activity of (6478) Gault: A YORP-driven Event? *The Astrophysical Journal Letters*, 874(L20).
19. Lowry, S. C., et al. (2007). Direct Detection of the YORP Effect in an Asteroid. *Science*, 316(5822), 272-274.
20. Lowry, S. C., Weissman, P., Duddy, S., Rozitis, B., Fitzsimmons, A., Green, S., Hicks, M., Snodgrass, C., Wolters, S., Chesley, S., et al. (2014). The internal

- structure of asteroid (25143) Itokawa as revealed by detection of YORP spinup. *Astronomy & Astrophysics*, 562, A48.
21. 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., & Loretta, D.S. (2019). Detection of rotational acceleration of Bennu using HST light curve observations. *Geophysical Research Letters*, 46(4), 1956-1962.
  22. Pravec, P., et al. (2013). The Tumbling Spin State of Asteroid (4179) Toutatis. *Astronomy and Astrophysics*, 507, 443-451.
  23. Pravec, P., et al. (2014). Binary Asteroid Population. 2. Anisotropic Distribution of Orbit Poles. *Icarus*, 233, 48-60.
  24. Rozitis, B., & Green, S. F. (2013). Physical Characterization of the Yarkovsky and YORP Effects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433(1), 603-621.
  25. Rubincam, D. P. (2000). Radiative spin-up and spin-down of small asteroids. *Icarus*, 148(1), 2-11.
  26. Shepard, M. K. (2015). *Asteroids Relics of Ancient Time*. Bloomsburg University: Cambridge University Press, 370.
  27. Taylor, P. A., et al. (2007). Radar and Optical Observations of Binary Near-Earth Asteroid (66063) 1998 RO1. *Icarus*, 212, 20-27.
  28. Taylor, P.A., Margot, J.L., Vokrouhlický, D., Scheeres, D.J., Pravec, P., Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., Nolan, M.C., Ostro, S.J., Benner, L.A., et al. (2007). Spin rate of asteroid (54509) 2000 PH5 increasing due to the YORP effect. *Science*, 316(5822), 274-277.
  29. Vokrouhlicky, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., & Statler, T. S. (2015). The Yarkovsky and YORP effects. arXiv preprint arXiv:1502.01249.
  30. Vokrouhlicky, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., & Statler, T. S. (2015). The Yarkovsky and YORP Effects. arXiv, 1502.01249v1.