

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Кириленко Ігор Ігорович**

УДК 524.6-327, 524.6-34

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**«ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ МАЛИХ ТІЛ  
СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ»**

Спеціальність 104 Фізика та астрономія  
(Галузь знань 10 Природничі науки)

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ І.І. Кириленко

Науковий керівник: **Круглий Юрій Миколайович**, кандидат  
фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Харків – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Кириленко І. І.* Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія (Галузь знань 10 Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

*Дисертація присвячена* вивченню динамічної еволюції вибраних груп малих тіл Сонячної системи за допомогою чисельних моделювань. Дослідження спрямовані на вивчення орбітального руху астероїдів Головного поясу, астероїдів, що наближаються до Землі, та метеороїдів з метою аналізу їх еволюції та пошуку тіл зі спільним походженням. Рух цих тіл вивчається з урахуванням гравітаційного впливу Сонця і планет та негравітаційних сил, таких як ефект Ярковського та ЯОРП-ефект, що дає змогу знаходити асоціації динамічно пов'язаних астероїдів і визначати джерела їх походження, а також надійно виявляти потенційно небезпечні тіла для оцінки ступеня їхньої загрози для Землі та розробки методів запобігання такій небезпеці.

Чисельне моделювання є одним із головних інструментів для аналізу траєкторій та прогнозування довготривалої еволюції малих тіл Сонячної системи. Використання чисельних методів дозволяє розв'язувати рівняння руху цих об'єктів, які, з огляду на нелінійний характер взаємодій та можливу чутливість до початкових умов, важко або неможливо дослідити аналітичними методами, що робить чисельні методи основним інструментом дослідження у даній роботі.

Хід дисертаційної роботи висвітлюється в 4 розділах

У *першому розділі* представлено огляд літературних джерел. Описано популяції малих тіл Сонячної системи, фізичні характеристики астероїдів,

гравітаційні та негравітаційні ефекти, що діють на малі тіла. Розглянуто методи і наявні результати пошуку асоціацій між тілами: проаналізовано метод дослідження астероїдних пар, зокрема критерії відбору кандидатів, методи визначення віку та механізми формування астероїдних пар; наведено способи та результати дослідження асоціацій метеороїдів із можливими батьківськими тілами.

У *другому розділі* дисертації представлено результати власного пошуку нових астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу. Описано методику пошуку пар, яка включає відбір кандидатів за їхніми орбітальними елементами, статистичну оцінку їхньої значущості та чисельне інтегрування орбіт астероїдів з урахуванням можливих похибок в орбітальних елементах. Верифіковано методику на вибірці пар із відомим віком формування. Представлено 50 вперше виявлених астероїдних пар та проаналізовано їхні динамічні та фізичні характеристики. Продемонстровано вплив гравітаційної взаємодії на динамічну еволюцію окремої астероїдної пари. Знайдено новий астероїдний кластер та проаналізовано його характеристики.

У *третьому розділі* дисертації наведено результати роботи з визначення джерел походження окремих метеороїдів. Представлено методи й результати використання інструментальних спостережень явища боліда для визначення траєкторії руху метеороїда в атмосфері, а відтак – і його доатмосферної орбіти. Орбіту метеороїда промодельовано в минуле для пошуку ймовірних джерел його походження, тісних зближень з планетами й можливої спорідненості з вибраними астероїдами. Відбір астероїдів проведено за критеріями близькості до орбіти метеороїда за відстанню у просторі орбітальних елементів та за параметром Тіссерана. Підхід використано для двох метеороїдів: батьківського тіла метеорита Адален (07.11.2020) та тіла, що спричинило так званий київський болід (19.04.2023). Наведено статистичні оцінки ймовірного джерела походження метеороїдів у Головному поясі астероїдів. Проведено порівняння визначених орбіт метеороїдів із

популяцією навколоземних астероїдів та з відомими орбітами інших метеороїдів, що призвели до падіння метеоритів.

У четвертому розділі дисертації представлено результати дослідження динамічної еволюції окремих малих тіл Сонячної системи. Для потенційно небезпечного астероїда (153201) 2000 WO107 розраховано ймовірності його тісних зближень із Землею та іншими планетами в минулому та майбутньому, для чого використано модель ефекту Ярковського з урахуванням форми й густини астероїда, що були уточнені за результатами власного аналізу кривих блиску. Проведено чисельне моделювання орбітальної еволюції навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та 2005 UD, за якими підтверджено спорідненість їхніх орбіт, що вказує на можливий еволюційний зв'язок між цими астероїдами. Досліджено задачу відхилення потенційно небезпечного астероїда та знайдено оптимальний напрям і мінімальну величину збурення в залежності від часу до зіткнення.

Головні наукові результати, що були отримані в роботі.

1. Проведено вичерпне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів на наявність раніше невідомих астероїдних пар із фазовою відстанню між компонентами  $d \leq 25$  м/с. У результаті аналізу виявлено 50 нових астероїдних пар. Оцінений вік формування відкритих пар знаходиться в межах від 2 тис. до 1 млн років.
2. Виявлено одну з наймолодших за віком астероїдних пар і на її прикладі запропоновано й обґрунтовано врахування взаємного гравітаційного впливу компонент для уточнення динамічної еволюції молодих астероїдних пар.
3. Виявлено новий астероїдний кластер у внутрішній частині Головного поясу, що складається із восьми астероїдів, з віком формування, оціненим у 70 – 100 тис. років.

4. Визначено орбітальні параметри першого залізного метеорита, падіння якого було інструментально зафіксовано в 2020 р. у Скандинавії. Проведено розрахунок динамічної еволюції метеороїда та пошук можливих батьківських тіл протягом 1 млн років у минуле. Показано, що метеороїд потрапив із внутрішньої частини Головного поясу до навколоземного простору як самостійне тіло через резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (89%) або резонанс за середнім рухом 3:1 з Юпітером (10%).
5. Вперше визначено форму, густину і параметри обертання потенційно небезпечного контактнo-подвійного астероїда (153201) 2000 WO107 за даними фотометричних і радарних спостережень в опозицію 2020 року. Астероїд може мати великий вміст металу. Показано, що динамічна еволюція астероїда визначається його високоексцентричною орбітою і взаємодією з планетами земної групи, і з точки зору астероїдної безпеки даний об'єкт не несе загрози для Землі в найближчі 10 тисяч років.
6. За результатами чисельних моделювань підтверджено спорідненість орбіт навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та 2005 UD, що вказує на можливий еволюційний зв'язок між цими астероїдами.
7. Визначено оптимальний напрямок і необхідну величину збурення для відхилення орбіти небезпечного астероїда та їх залежність від часу до моменту зіткнення за результатами модельного експерименту.

**Ключові слова:** динамічна еволюція, чисельне моделювання, астероїди, метеороїди, астероїдні пари, астероїдні кластери, потенційно небезпечні астероїди

## ABSTRACT

*Kyrylenko I.I.* Numerical simulations of the dynamic evolution of small bodies of the Solar system. – Qualification scholarly paper: a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Speciality 104 Physics and Astronomy (10 Natural Sciences). – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The thesis is devoted to the investigation of the dynamical evolution of selected groups of small bodies of the Solar System using numerical simulations. The research focuses on the orbital evolution of Main Belt asteroids, near-Earth asteroids, and meteoroids to analyze their dynamical history and identify bodies of common origin. The motion of these objects is studied under the combined influence of solar and planetary gravity, as well as non-gravitational forces such as the Yarkovsky and YORP effects. These mechanisms enable the identification of dynamically associated asteroid pairs and clusters and the determination of their potential source regions. In the context of the global problem of asteroid hazard, the research also contributes to the reliable identification of potentially hazardous objects, which is essential for risk assessment and the development of mitigation strategies.

Numerical modeling is one of the primary tools for analyzing trajectories and forecasting the long-term evolution of small Solar System bodies. The application of numerical integration methods allows one to solve the equations of motion of these bodies, whose complex and often chaotic dynamics are difficult or impossible to treat analytically due to nonlinearities and sensitivity to initial conditions. For this reason, numerical methods are the main methodological approach employed in this dissertation.

The progress of the dissertation work is covered in four sections.

In the *first chapter*, a review of the literature is provided. It presents an overview of the populations of small bodies in the Solar System, their orbital and physical characteristics, as well as the gravitational and non-gravitational effects influencing their dynamical evolution. The chapter also examines the methods and studies dedicated to identifying associations among these bodies. Particular attention is given to the investigation of asteroid pairs, including the criteria for candidate selection, age determination techniques, and the mechanisms responsible for pair formation. Additionally, it outlines the approaches and findings related to the identification of associations between meteoroids and their potential parent bodies.

The *second chapter* of the dissertation presents the results of the study of asteroid pairs in the inner part of the Main Belt. The methodology includes the selection of candidate pairs based on their orbital elements, a statistical assessment of their significance, and numerical orbit integration that accounts for uncertainties in the orbital parameters. The approach was validated using a test sample of known asteroid pairs with previously determined formation ages. A total of 50 newly identified asteroid pairs are presented, along with an analysis of their dynamical and physical properties. The influence of mutual gravitational interactions on the dynamical evolution of an individual asteroid pair is demonstrated. Additionally, a new asteroid cluster has been discovered, and its properties are examined in detail.

The *third chapter* of the dissertation presents the results of the work on identifying the source regions of individual meteoroids. It describes the methods and outcomes of utilizing instrumental observations of fireballs to reconstruct their atmospheric trajectories and their pre-atmospheric heliocentric orbits. The orbits were numerically integrated backward in time to search for potential source regions, close planetary encounters, and possible dynamical associations with selected asteroids. Candidate asteroids were selected based on proximity in orbital element space and similarity in Tisserand parameters. This approach was applied to the Adalen meteorite event (07 November 2020) and the Kyiv fireball (19 April

2023). Statistical estimates of the likely origin of these meteoroids in the Main Asteroid Belt are presented. The derived meteoroid orbits are compared with the population of near-Earth asteroids and with other known meteoroid orbits associated with meteorite falls.

In the *fourth chapter* of the dissertation, the results of the investigation into the dynamical evolution of selected small bodies of the Solar System are presented. For the potentially hazardous asteroid (153201) 2000 WO107, the probabilities of close encounters with Earth and other planets, both in the past and future, were computed using a Yarkovsky effect model that incorporates the asteroid's shape and density, refined through the analysis of light curves. Numerical simulations confirmed the orbital association between the near-Earth asteroids (3200) Phaethon and 2005 UD, suggesting a possible evolutionary relationship between these objects. Additionally, the problem of deflecting a potentially hazardous asteroid was examined, and the optimal deflection direction and minimum required perturbation were determined as functions of the time remaining before a possible impact.

**The main scientific results obtained in the work are as follows.**

1. A comprehensive investigation of the inner region of the Main Asteroid Belt was conducted to identify previously unknown asteroid pairs with phase-space distances of  $d \leq 25$  m/s. As a result of the analysis, 50 new asteroid pairs were discovered. The estimated formation ages of these pairs range from 2,000 to 1 million years.
2. One of the youngest known asteroid pairs was identified. Based on this case, the inclusion of mutual gravitational interactions between components was proposed and substantiated as a necessary factor in refining the dynamical evolution of young asteroid pairs.

3. A new asteroid cluster consisting of eight members was discovered in the inner Main Belt, with an estimated formation age of 70 – 100 thousand years.
4. The orbital parameters of the first iron meteorite with a documented fall observed instrumentally (in 2020 over Scandinavia) were determined. A backward numerical integration of the meteoroid's orbit over 1 million years was carried out to search for potential parent bodies. The results show that the meteoroid likely entered near-Earth space from the inner Main Belt either via the  $\nu_6$  secular resonance with Saturn (89%) or the 3:1 mean-motion resonance with Jupiter (10%).
5. For the first time, the shape, density, and rotational parameters of the potentially hazardous contact-binary asteroid (153201) 2000 WO107 were determined using photometric and radar observations during its 2020 opposition. The asteroid appears to contain a significant metallic component. It was shown that the asteroid's dynamical evolution is governed by its highly elongated orbit and interactions with terrestrial planets, and that it poses no threat to Earth over the next 10,000 years.
6. Based on the results of numerical simulations, the orbital similarity between the near-Earth asteroids (3200) Phaethon and 2005 UD has been confirmed, indicating a possible evolutionary relationship between these objects.
7. A model experiment on the deflection of a potentially hazardous asteroid was carried out. The optimal direction and minimum required perturbation for deflection were determined, along with their dependence on the time remaining before a potential impact.

**Keywords:** dynamics, numerical modeling, asteroids, meteoroids, asteroid pairs, asteroid clusters, potentially hazardous asteroids

**Список публікацій здобувача за темою дисертації  
Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати  
дисертації**

**Публікації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить  
до міжнародної наукометричної бази Scopus**

1. Kyrylenko I., Krugly Yu. N., Golubov O. Asteroid pairs: method validation and new candidates // Astron. Astrophys. 2021. Vol. 655. Art. A14. (Scopus, Q1)

**Key words:** minor planets, asteroids: general – celestial mechanics

DOI: [10.1051/0004-6361/202140365](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140365)

URL: [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2021/11/aa40365-21/aa40365-21.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2021/11/aa40365-21/aa40365-21.html)

e-ISSN: 1432-0746

2. Kyrylenko I., Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Yu., Belskaya I., Shevchenko V. The first instrumentally documented fall of an iron meteorite: Orbit and possible origin // Astrophys. J. 2023. Vol. 953(1). Art. A20. (Scopus, Q1)

**Key words:** Iron meteorites, Meteorites, Meteoroids, Meteors, Fireballs, Asteroids, Celestial mechanics, Astronomical simulations

DOI: [10.3847/1538-4357/acdc21](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acdc21)

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/acdc21/pdf>

ISSN: 1538-4357

3. Kyrylenko I., Krugly Yu. N., Golubov O. Asteroid pairs: Survey of the inner main belt // Astron. Astrophys. 2024. Vol. 689. Art. A291. (Scopus, Q1)

**Key words:** celestial mechanics – minor planets, asteroids: general

DOI: [10.1051/0004-6361/202450725](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450725)

URL: <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2024/09/aa50725-24.pdf>

e-ISSN: 1432-0746

## Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. **Kyrylenko I. I.**, Krugly Yu. M., Golubov O. A. New Asteroid Pair Candidates in the Main Belt. *52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPI Contribution No. 2548, March 15–19 2021*: abstr. Held virtually, 2021. P. 2741. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2741.pdf>.
5. Golubov O., **Kyrylenko I.**, Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y. N., Belskaya I., Shevchenko V. G. Search for the parent body of the recently fallen iron meteorite, *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022*, EGU22-12472, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12472>, 2022.
6. **Kyrylenko I.**, Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y. N., Belskaya I., Shevchenko, V. G. (2022, March). Possible Origin of the First Iron Meteorite with an Instrumentally Documented Fall. *In 53rd Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 2678, p. 2655). <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/2655.pdf>
7. **Kyrylenko I.**, Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y.N. Orbit and dynamic origin of the recently recovered iron meteorite, *IAUS 374: Astronomical Hazards for Life on Earth, Busan, the Republic of Korea on August 2-11, 2022*, Abstract No. 2869.
8. Slyusarev I., **Kyrylenko I.**, Golubov O., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Yu., Belskaya I., Shevchenko V. Orbital elements and dynamical history of the 07.11.2020 iron meteoroid. *Int. Conf. Meteoroids 2022, June 13-17, 2022* (virtual).
9. Krugly Y., Belskaya I., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Slyusarev I., Shevchenko V., Inasaridze R., Ayvazian V., Donchev Z., Bonev T., Ergashev K., Burkhonov O., Ehgamberdiev S., Kouprianov V., Haislip J., Reichart D. Photometric monitoring of near-Earth asteroids. *XXXII IAU General Assembly 2024. Abstract 2969 at FM3 "Follow-up observations of small*

*bodies in the Solar System in the era of large discovery surveys*”, 6-15 August 2024, Cape Town, South Africa.

10. Slyusarev I., Belskaya I., Shevchenko V., Krugly Y., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Sergeyev A., Mikhalchenko O. A contemporary view on M-type asteroids. *XXXII IAU General Assembly 2024. Abstract 1875 at FM3 “Follow-up observations of small bodies in the Solar System in the era of large discovery surveys”*, 6-15 August 2024, Cape Town, South Africa
11. Panasiuk A., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Simulation of deflection of hazardous asteroids; *24-th Gamow International Astronomical Conference “Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, astroparticle physics, radio astronomy, astrobiology and genetics”*, 19-23 August, 2024, Odesa, Ukraine, p.42  
[https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2024/09/Abstracts-2024\\_and\\_Program.pdf](https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2024/09/Abstracts-2024_and_Program.pdf)

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b>	<b>14</b>
<b>ВСТУП</b>	<b>15</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	<b>22</b>
<b>ДИНАМІКА МАЛИХ ТІЛ</b>	<b>22</b>
<b>(Огляд літератури)</b>	<b>22</b>
1.1. Динамічні класи малих тіл Сонячної системи	22
1.2. Фізичні характеристики астероїдів	26
1.3. Збурений рух астероїдів під дією гравітаційних та негравітаційних ефектів	31
1.3.1. Гравітаційні резонанси	32
1.3.2. Ефект Ярковського	35
1.3.3. ЯОРП-ефект	39
1.4. Астероїдні пари	42
1.4.1. Відкриття астероїдних пар	42
1.4.2. Механізми утворення астероїдних пар	47
1.5. Джерела походження метеоритів	50
1.6. Проблема астероїдної небезпеки	53
Висновки до розділу	57
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>АСТЕРОЇДНІ ПАРИ</b>	<b>59</b>
2.1. Критерії відбору	59
2.1.1. d-критерій	59
2.1.2. Статистичні методи	60
2.2. Чисельне моделювання	63
2.2.1. Створення клонів астероїдних пар	63
2.2.2. Моделювання орбіт за допомогою REBOUND	64
2.2.3. Моделювання орбіт за допомогою GENGA	67
2.2.4. Визначення тісних зближень	70
2.3. Результати пошуку нових астероїдних пар	71
2.3.1. Аналіз відомих астероїдних пар	72
2.3.2. Нові астероїдні пари	74
2.4. Аналіз взаємного гравітаційного впливу у молодих пар	88
2.5. Пошук пар серед астероїдів М-типу	90
2.6. Пошук астероїдних кластерів	95
Висновки до розділу	100
<b>РОЗДІЛ 3</b>	

<b>ПОШУК ДЖЕРЕЛ ПОХОДЖЕННЯ МЕТЕОРИТА АДАЛЕН</b>	<b>102</b>
3.1. Метеорит Адален	103
3.1.1. Визначення орбіти метеороїда	104
3.1.2. Моделювання орбітальної еволюції	107
3.1.3. Статистична оцінка області походження	111
3.2. Порівняння з іншими метеороїдами	118
Висновки до розділу	126
<b>РОЗДІЛ 4</b>	<b>128</b>
<b>ДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ АСТЕРОЇДІВ</b>	<b>128</b>
4.1. Навколоземний астероїд (153201) 2000 WO107	128
4.1.1. Фотометричні спостереження	128
4.1.2. Модель форми	130
4.1.3. Динамічна еволюція	134
4.2. Спорідненість орбіт астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD	137
4.3. Моделювання зміни орбіти небезпечних астероїдів	141
Висновки до розділу	146
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>148</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>152</b>
<b>ДОДАТОК А</b>	<b>164</b>
<b>ДОДАТОК Б</b>	<b>166</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$a.o.$  – астрономічна одиниця  
зор.вел. – зоряна величина  
 $a$  – велика піввісь орбіти астероїда  
 $da/dt$  – зміна великої півосі з часом  
 $e$  – ексцентриситет орбіти  
 $i$  – нахил орбіти  
 $n$  – середній рух астероїда  
 $q$  – перигелійна відстань  
 $Q$  – афелійна відстань  
 $R$  – середній радіус астероїда  
 $\omega$  – кутова частота осьового обертання астероїда  
 $\varepsilon$  – нахил осі обертання астероїда  
 $M_{\odot}$  – маса Сонця  
 $G$  – гравітаційна стала  
 $A$  – сферичне альbedo астероїда  
 $p$  – геометричне альbedo астероїда  
 $c$  – швидкість світла у вакуумі  
 $\epsilon$  – випромінювальна здатність поверхні  
 $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана  
 $\theta$  – тепловий параметр ґрунту астероїда  
 $\Gamma$  – теплова інерція ґрунту  
 $\rho$  – густина астероїда

MOID – Minimum orbit intersection distance (мінімальна відстань перетину орбіт)

АНЗ – астероїд, що наближається до Землі (навколоземний астероїд)

HCM – Hierarchical Clustering Method (метод ієрархічної кластеризації)

NASA – National Aeronautics and Space Administration (Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору, США)

JPL – Jet Propulsion Laboratory (Лабораторія реактивного руху, NASA)

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Малі небесні тіла, такі як астероїди, комети та об'єкти поясу Койпера, є ключовими об'єктами для дослідження динамічної еволюції нашої планетної системи. Їхній орбітальний рух визначається гравітаційними впливами планет, резонансами, негравітаційними силами (такими, наприклад, як ефект Ярковського та ЯОРП-ефект, активна втрата речовини тощо), та робить ці об'єкти надзвичайно цікавими для вивчення.

Чисельне моделювання є одним із головних інструментів для аналізу орбітального руху та прогнозування довготривалої еволюції малих тіл. Використання методів чисельного інтегрування дозволяє розв'язувати системи диференціальних рівнянь, що описують рух цих об'єктів під впливом гравітаційної взаємодії Сонця, планет та інших чинників. З огляду на нелінійний характер гравітаційного впливу та можливу чутливість до початкових умов, чисельне моделювання забезпечує змогу отримувати прогнози та аналізувати явища, які важко або неможливо дослідити аналітичними методами.

Дослідження динаміки малих тіл має важливе значення для кількох напрямів науки. По-перше, це допомагає зрозуміти механізми формування та еволюції Сонячної системи. По-друге, воно має прикладне значення для оцінки ризиків зіткнення Землі з потенційно небезпечними об'єктами. Нарешті, аналіз динаміки малих тіл є основою для планування міжпланетних місій, спрямованих на дослідження цих об'єктів.

Отже, чисельне моделювання динаміки малих тіл є не лише ключовим інструментом для теоретичних досліджень, але й важливою **актуальною** складовою прикладних задач астрономії та планетології.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних НДР:

- «Динаміка і кінематика навколоземних астероїдів під дією негравітаційних сил», № держ. реєстрації 0121U109815, 01.04.2021-31.12.2023 (здобувач – виконавець);
- «Металеві астероїди: пошук батьківських тіл залізних метеоритів, джерел позаземних ресурсів», № держ. реєстрації: 0120U105122, 0121U111507, 0124U002907, 03.11.2020-15.11.2024 (здобувач – виконавець);
- «Фізичні та динамічні властивості навколоземних астероїдів: небезпека для Землі та використання як джерел корисних копалин», № держ. реєстрації 0124U000967, 02.01.2024-31.12.2026 (здобувач – виконавець);
- «Динамічна еволюція астероїдів поблизу люків Кірквуда з урахуванням шорсткості і теплофізичних властивостей поверхні», № держ. реєстрації 0124U000969, 02.01.2024-31.12.2026 (здобувач – відповідальний виконавець);

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертації є моделювання динамічної еволюції вибраних груп малих тіл Сонячної системи. Дослідження спрямовані на вивчення та моделювання динаміки малих тіл у майбутнє та в минуле під дією як гравітаційних збурень, так і негравітаційних сил, з метою розуміння їх еволюції та пошуку тіл зі спільним походженням. Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні ключові завдання:

- Пошук астероїдних пар методом їх моделювання в минуле під дією як гравітаційних збурень, так і під дією негравітаційних сил.
- Пошук батьківських тіл окремих метеоритів за допомогою чисельних моделювань.
- Моделювання динамічної еволюції потенційно небезпечних астероїдів

**Об'єктом дослідження** є малі тіла Сонячної системи.

**Предметом дослідження** є орбітальна динаміка малих тіл.

**Методи дослідження.** Для дослідження орбітальної динаміки малих тіл Сонячної системи було використано чисельні методи розрахунку орбіт малих тіл Сонячної системи, порівняльний аналіз, статистичні методи.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Під час виконання роботи отримано такі наукові результати.

**Вперше:**

1. Проведено повне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів на наявність раніше невідомих астероїдних пар із фазовою відстанню між компонентами  $d \leq 25$  м/с. Виявлено 50 нових астероїдних пар. Оцінений вік формування відкритих пар знаходиться в межах від 2 тис. до 1 млн років.
2. Виявлено одну з наймолодших за віком астероїдних пар і на її прикладі запропоновано й обґрунтовано важливість врахування взаємного гравітаційного впливу компонент для уточнення динамічної еволюції молодих астероїдних пар.
3. Виявлено новий астероїдний кластер у внутрішній частині Головного поясу, що складається з восьми астероїдів, з віком формування близько 70 – 100 тис. років.
4. Визначено орбітальні параметри першого залізного метеорита, падіння якого було інструментально зафіксовано в 2020 р. у Скандинавії. Проведено розрахунок динамічної еволюції метеороїда та пошук можливих батьківських тіл протягом 1 млн років у минуле. Показано, що метеороїд потрапив із внутрішньої частини Головного поясу до навколоземного простору як самостійне тіло через резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (89%) або резонанс за середнім рухом 3:1 з Юпітером (10%).
5. Вперше визначено форму, густину і параметри обертання потенційно небезпечного контактано-подвійного астероїда (153201) 2000 WO107 за даними фотометричних і радарних спостережень в опозицію 2020 року. Астероїд може мати великий вміст металу. Показано, що динамічна

еволюція астероїда визначається його високоексцентричною орбітою і взаємодією з планетами земної групи, і з точки зору астероїдної небезпеки даний об'єкт не несе загрози для Землі в найближчі 10 тисяч років.

6. Визначено оптимальний напрямок і необхідну величину збурення для відхилення орбіти небезпечного астероїда та їх залежність від часу до моменту зіткнення за результатами модельного експерименту.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати вивчення динамічної еволюції астероїдів, що одержані в даній роботі, можуть бути використані для уточнення уявлень про будову та еволюцію малих тіл і Сонячної системи в цілому. Отримані результати з визначення нових астероїдних пар увійшли до міжнародних баз даних та поліпшують розуміння механізмів їхнього утворення та еволюції. Виконані моделювання орбітальної динаміки точніше визначають рівень загрози, яку становлять деякі потенційно небезпечні астероїди. Робота сприятиме плануванню космічних місій до астероїдів з метою їх дослідження та видобутку мінеральної речовини, зокрема металів – заліза, нікелю, платини та ін.

### **Особистий внесок автора.**

Особистий внесок автора є визначальним на всіх етапах, і полягає в активній участі у формулюванні та розв'язанні поставлених задач. Автором було здійснено розробку та програмну реалізацію алгоритмів для виявлення астероїдних пар, пошуку можливих батьківських тіл метеоритів, та аналізу орбітальної еволюції потенційно небезпечних астероїдів. Автор також зробив основний внесок в аналіз та інтерпретацію отриманих результатів, підготовку публікацій за темою досліджень та представлення результатів на міжнародних конференціях.

## Апробація результатів дисертації.

Результати дисертаційної роботи були представлені у 8 доповідях на таких зарубіжних та вітчизняних наукових конференціях:

1. **Kyrylenko I. I.**, Krugly Yu. M., Golubov O. A. New Asteroid Pair Candidates in the Main Belt. *52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPI Contribution No. 2548, March 15–19 2021*: abstr. Held virtually, 2021. P. 2741. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2741.pdf>.
2. Golubov O., **Kyrylenko I.**, Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y. N., Belskaya I., Shevchenko V. G. Search for the parent body of the recently fallen iron meteorite, *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022*, EGU22-12472, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12472>, 2022.
3. **Kyrylenko I.**, Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y. N., Belskaya I., Shevchenko, V. G. (2022, March). Possible Origin of the First Iron Meteorite with an Instrumentally Documented Fall. *In 53rd Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 2678, p. 2655). <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/2655.pdf>
4. **Kyrylenko I.**, Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y.N. Orbit and dynamic origin of the recently recovered iron meteorite, *IAUS 374: Astronomical Hazards for Life on Earth, Busan, the Republic of Korea on August 2-11, 2022*, Abstract No. 2869.
5. Slyusarev I., **Kyrylenko I.**, Golubov O., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Yu., Belskaya I., Shevchenko V. Orbital elements and dynamical history of the 07.11.2020 iron meteoroid. *Int. Conf. Meteoroids 2022, June 13-17, 2022* (virtual).
6. Krugly Y., Belskaya I., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Slyusarev I., Shevchenko V., Inasaridze R., Ayvazian V., Donchev Z., Bonev T., Ergashev K., Burkhonov O., Ehgamberdiev S., Kouprianov V., Haislip J., Reichart D. Photometric monitoring of near-Earth asteroids. *XXXII IAU General*

*Assembly 2024. Abstract 2969 at FM3 "Follow-up observations of small bodies in the Solar System in the era of large discovery surveys", 6-15 August 2024, Cape Town, South Africa.*

7. Slyusarev I., Belskaya I., Shevchenko V., Krugly Y., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Sergeyev A., Mikhalchenko O. A contemporary view on M-type asteroids. *XXXII IAU General Assembly 2024. Abstract 1875 at FM3 "Follow-up observations of small bodies in the Solar System in the era of large discovery surveys", 6-15 August 2024, Cape Town, South Africa*
8. Panasiuk A., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Simulation of deflection of hazardous asteroids; *24-th Gamow International Astronomical Conference "Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, astroparticle physics, radio astronomy, astrobiology and genetics", 19-23 August, 2024, Odesa, Ukraine, p.42*  
[https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2024/09/Abstracts-2024\\_and\\_Program.pdf](https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2024/09/Abstracts-2024_and_Program.pdf)

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 11 наукових працях, серед яких 3 статті в закордонних періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus і належать до першого квартилю за рейтинговою системою Scimago, та 8 тез доповідей на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінки (8 авторських аркушів), з них текст основної частини становить 134 сторінки (6 авторських аркушів). Вона містить 56 рисунків, 16 таблиць. Список використаних джерел містить 163 найменувань.

## Подяка

Автор вдячний науковому керівнику к.ф.-м.н., с.н.с. Круглому Юрію Миколайовичу за допомогу у постановці, розв'язанні задач, за плідну співпрацю та мотивацію довершити роботу; своєму вчителю, д. ф.-м. н., н.с. Голубову Олексію Андрійовичу за допомогу у виборі шляху, за надання знань, та всеосяжну підтримку на всіх етапах навчання та дослідження. Висловлюю велику подяку колективу НДІ астрономії та колективу відділу малих тіл Сонячної системи за обговорення, підтримку та допомогу в проведенні досліджень, підготовці публікацій та дисертації.

Дякую дружині Ользі та батькам, які завжди підтримували мене в моїх прагненнях, були поруч під час всього навчання та процесу захисту.

Висловлюю особливу подяку воїнам Збройних Сил України та всім тим, хто боронить нашу країну від окупаційних військ РФ, чим дають змогу й надалі займатися наукою.

# РОЗДІЛ 1

## ДИНАМІКА МАЛИХ ТІЛ

### (Огляд літератури)

#### 1.1. Динамічні класи малих тіл Сонячної системи

Малі тіла Сонячної системи – це категорія астрономічних об’єктів, до якої належать усі природні тіла в Сонячній системі, що не є планетами, карликовими планетами, або їх супутниками (МАС, 2006). За цим визначенням до малих тіл належать астероїди, комети, метеороїди та транснептунові об’єкти.

Астероїди розподіляються в Сонячній системі нерівномірно, формуючи окремі групи з різними орбітальними характеристиками. Переважна більшість відкритих астероїдів розміщені в межах орбіт Марса та Юпітера, на відстані приблизно від 2.05 до 3.3 астрономічних одиниць, утворюючи зону, відому як Головний пояс (рис. 1.1). Структура Головного поясу неоднорідна і містить прогалини, відомі як люки Кірквуда, які виникають внаслідок резонансів між середніми орбітальними частотами астероїдів та планет. Резонанси поділяють пояс на три великі зони: внутрішню (2.05 – 2.5 а.о.), середню (2.5 – 2.8 а.о.) та зовнішню (2.8 – 3.3 а.о.) частини Головного поясу.

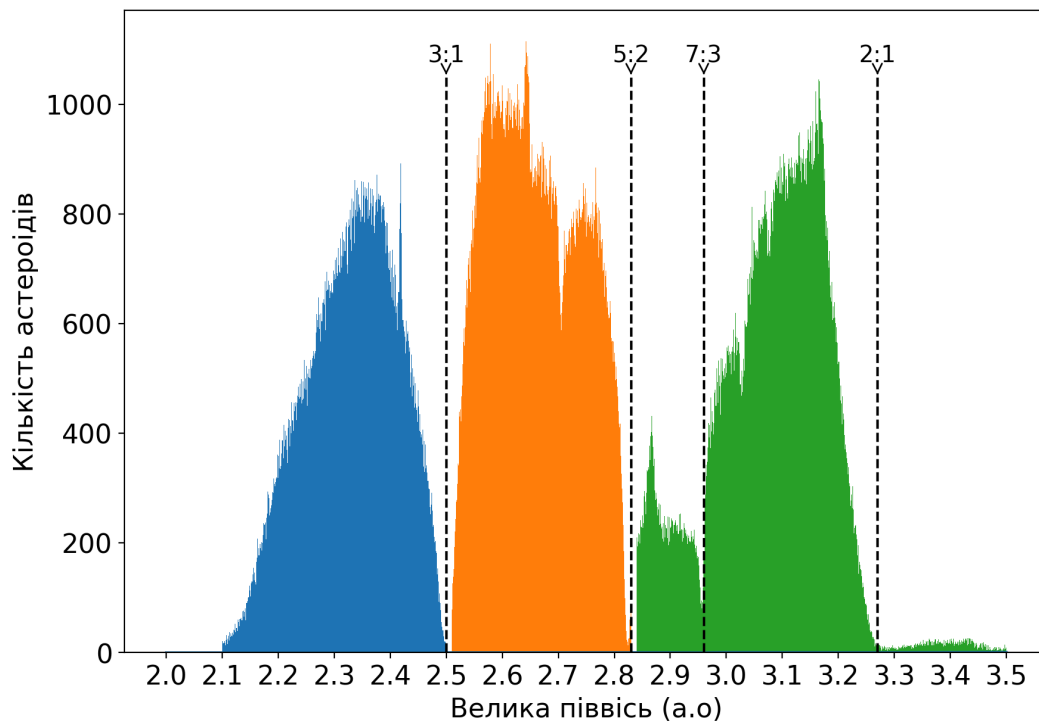


Рисунок 1.1 Розподіл великих півосей  $a$  астероїдів у Головному поясі. Показано резонанси середнього руху з Юпітером, у яких збурення мають дестабілізуючий ефект.

Окрім Головного поясу, астероїди також утворюють окремі резонансні групи (рис. 1.2). Прикладом можуть слугувати астероїди, орбіти яких проходять поблизу або перетинають орбіту Землі. За визначенням, до навколоземних астероїдів, або АНЗ (астероїди, що наближаються до орбіти Землі), відносять астероїди з перигелійною відстанню  $q \leq 1.3$  а.о. Вони поділяються на окремі групи Атона, Аполлона, Амура та Атіри залежно від параметрів орбіт. Так, орбіти астероїдів групи Атіри повністю знаходяться в межах орбіти Землі ( $Q < 0.983$  а.о.), в той час як орбіти Амурів лежать ззовні ( $q > 1.017$  а.о.), а інші дві групи перетинають її. Астероїди розміром понад 140 метрів, які наближаються до Землі на відстань менше 0.05 а.о. (приблизно 7.5 млн км), класифікуються як потенційно небезпечні астероїди. Наразі відомо понад 30000 навколоземних астероїдів, серед яких близько 2300 класифіковані як потенційно небезпечні (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>). Їхня динаміка визначається тісними зближеннями з планетами земної групи, а також віковими резонансами.

Час перебування астероїдів на навколоземних орбітах зазвичай не перевищує 10–100 мільйонів років, після чого вони або падають на Сонце чи планети, або викидаються за межі внутрішньої Сонячної системи (Bottke et al., 2015). Оскільки АНЗ перебувають на своїх орбітах обмежений час, мають існувати механізми для поповнення популяції. Найповніші на сьогодні моделі розподілу орбіт і розмірів навколоземних астероїдів запропоновані в роботах Bottke et al. (2002), Granvik et. al (2018) та Morbideli et al. (2020). Згідно з цими моделями, популяція АНЗ здебільшого поповнюється за рахунок астероїдів, які потрапляють із внутрішніх частин Головного поясу до околиць Землі через резонанс 3:1 середнього руху з Юпітером або віковий резонанс  $\nu_6$  (коли частота прецесії перигелію астероїда дорівнює середній частоті прецесії перигелію Сатурна). Дія резонансів призводить до зростання ексцентриситетів орбіт астероїдів до дуже високих значень, після чого, під дією гравітаційних збурень планетами земної групи, вони потрапляють до навколоземного простору.

Цікавою з точки зору динаміки є група об'єктів, відомих як *троянці*. Це астероїди, що рухаються навколо Сонця по орбіті планети, випереджаючи її або відстаючи від неї приблизно на  $60^\circ$  за довготою, перебуваючи в точках Лагранжа L4 і L5. Найбільш відомими є троянці Юпітера (резонанс 1:1,  $a \approx 5.2$  а.о.), які формують дві групи: «греки» (попереду Юпітера в точці L4) і «троянці» (позаду Юпітера в точці L5). Наразі відомо понад 7000 троянців Юпітера. Відомо про існування троянців Нептуна та Марса (Emery et al. 2015), а також відкрито декілька астероїдів-троянців у Землі (de la Fuente Marcos, 2021).

Малі тіла, орбітальні параметри яких мають перигелії та великі півосі, що лежать між орбітами Юпітера та Нептуна, носять назву *кентаврів*. Це перехідна популяція тіл, що динамічно пов'язує транснептунові об'єкти (ТНО) з кометами сімейства Юпітера. Чисельні моделювання показують, що кентаври зазвичай перебувають на своїх орбітах лише протягом кількох

мільйонів років, після чого викидаються на гіперболічні орбіти або мають зіткнення з планетами (di Sisto et al., 2007). Ці часові масштаби набагато менші за вік Сонячної системи, що вказує на те, що кентаври є перехідною популяцією, яка має джерело поповнення в іншій зоні системи. Ймовірними джерелами кентаврів вважаються кілька динамічних груп поясу Койпера за орбітою Нептуна (di Sisto et al., 2010).

Популяція малих тіл за орбітою Нептуна має подібну динамічну структуру до поясу астероїдів (Morbidelli & Nesvorný 2020). Зокрема, існує ядро динамічно стабільних орбіт, відоме як пояс Койпера. Також у цій зоні присутні резонансні групи, наприклад, *плутино*, які перебувають у резонансі 3:2 з Нептуном. Окрім цього, велика кількість об'єктів має орбіти з великими ексцентриситетами та значними нахилами, які зближуються з орбітою Нептуна. Ця популяція відома як *розсіяний диск*, і вважається основним джерелом короткоперіодичних комет. Кожен із цих регіонів має свої унікальні динамічні особливості, зумовлені впливом гравітації планет-гігантів, сонячного випромінювання та інших факторів (рис. 1.2).

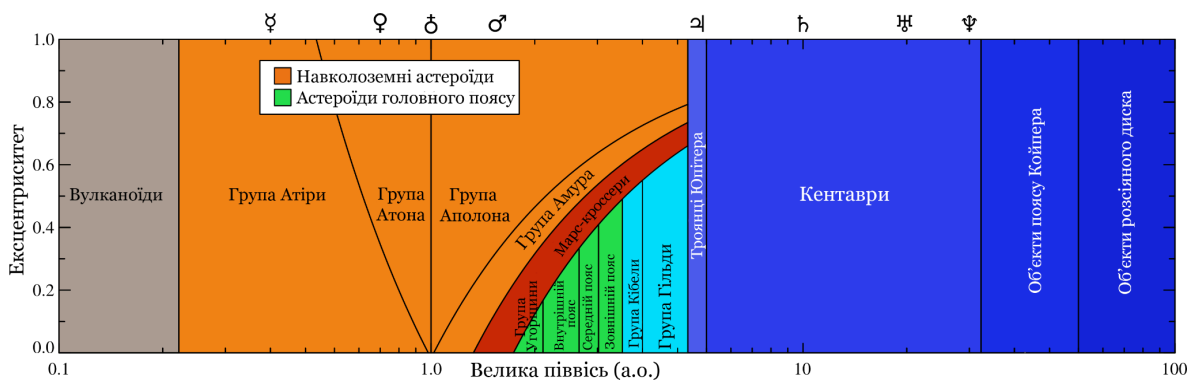


Рисунок 1.2 Схема розташування популяцій малих тіл у Сонячній системі за великою піввіссю орбіт (Джерело: <https://ssp.imcce.fr/webservices/skybot/> ).

Зацікавленість у вивченні зони, де, як відомо, розташований Головний пояс астероїдів, почалася із випадкового відкриття Церери – першого з відомих астероїдів – італійським астрономом Джузеппе Піацці 1 січня 1801 року під час спостережень для оновлення зоряного каталогу. Спочатку

Цереру вважали новою планетою, але згодом відкриття інших подібних об'єктів у тому ж регіоні – Паллади, Юнони та Вести – дало підстави віднести ці тіла до нової категорії небесних тіл. Термін ‘астероїд’ (від грецького «зореподібний») ввів Вільям Гершель у 1802 році через схожість цих об'єктів із зорями в телескопічних спостереженнях внаслідок їх малих видимих діаметрів, але при цьому відмічаючи наявність видимого руху.

Справжній прорив у відкритті астероїдів стався у кінці ХХ століття з розвитком електронної фотографії та комп'ютеризованих спостережень. Космічні оглядові телескопи, такі як NEOWISE, та наземні автоматизовані огляди неба (Spacewatch, LONEOS, LINEAR, Catalina, Pan-STARRS) значно прискорили цей процес. На початок 2000-х років було відкрито понад 100 000 астероїдів, а на сьогодні відомо понад 1.4 мільйона малих тіл з визначеними орбітами (рис. 1.3).

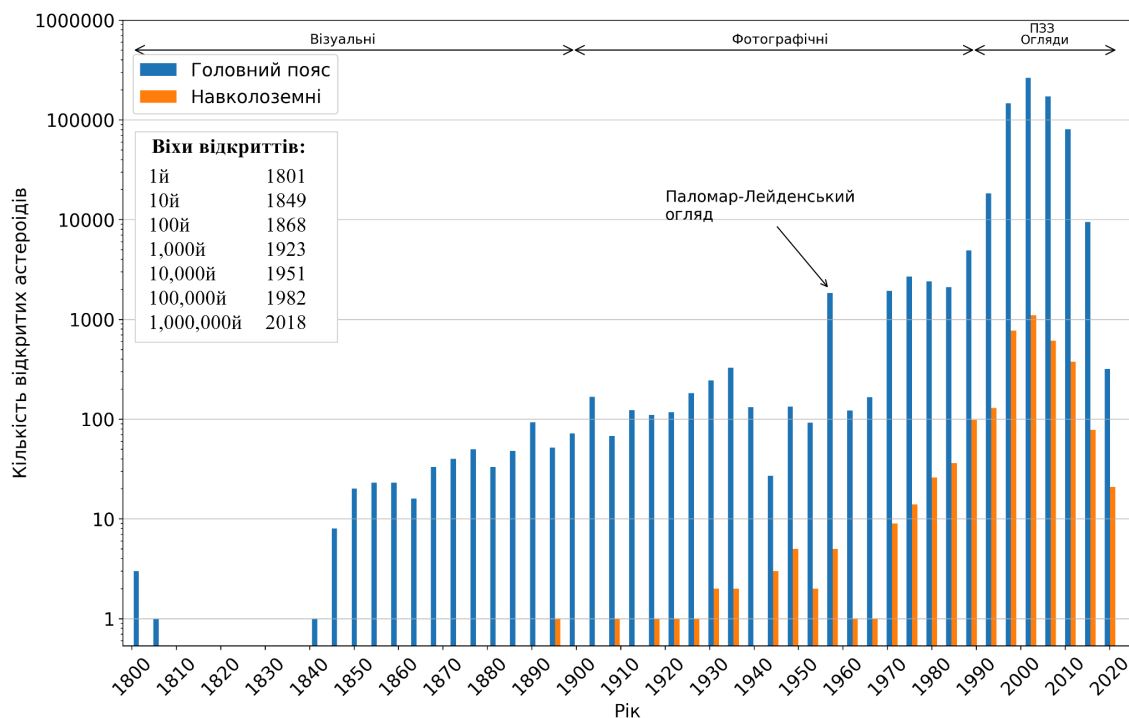


Рисунок 1.3 Статистика відкриття астероїдів від початку ХІХ століття дотепер

## 1.2. Фізичні характеристики астероїдів

Вважається, що астероїди є залишками будівельного матеріалу, з якого близько 4.6 мільярда років тому сформувалися планети Сонячної системи.

Тому астероїди зберігають інформацію про первинний склад і умови газо-пилового диска, що існував у той період. Розуміння фізичних характеристик астероїдів важливе для правильного врахування гравітаційних та негравітаційних ефектів, що впливають на еволюцію астероїдних орбіт.

Фізичні характеристики астероїдів включають: розміри, форми, параметри обертання, склад поверхонь, внутрішню структуру, густину і масу. Різні за розмірами астероїди мають різну форму, різну внутрішню структуру і структуру поверхні. Оскільки більшість астероїдів занадто малі, щоб під дією власних гравітаційних сил набути наближеної до сферичної форми, вони мають різноманітні неправильні форми, яких набули в результаті зіткнень з іншими астероїдами або під впливом відцентрових сил в періоди надшвидкого обертання. Найбільші астероїди – (1) Церера, (4) Веста, (2) Паллада та (10) Гігея – мають діаметри понад 400 км і містять основну масу астероїдів Головного поясу. Церера, яка має діаметр близько 940 км, також класифікується як карликова планета.

Розподіл астероїдів Головного поясу за розмірами має степеневу залежність з показником степеня близько 2.3 для найбільших тіл і дещо меншим показником для менших тіл, що таким чином визначає існування близько декількох мільйонів малих тіл з діаметрами понад 1 км ([Morbidelli et al., 2009](#)). В основі сучасних даних про розміри астероїдів лежать спостереження інфрачервоного супутника WISE (близько 150 тис. об'єктів, [Mainzer et al., 2015](#)).

Розподіл астероїдів за періодами обертання також залежить від їхніх розмірів (рис. 1.4). Розподіл суттєво змінюється від максвеллівського для найбільших тіл з розмірами понад 50 км, які сформувалися після первинної епохи інтенсивних взаємних зіткнень, до майже рівномірного для кілометрових тіл з окремими групами астероїдів зі швидким обертанням (періоди обертання від 2.2 до 4 год) і з дуже повільним обертанням (періоди

більше 12 год). Мінімальний період обертання близько 2.2 год визначається межею руйнування астероїда під впливом відцентрових сил, припускаючи, що астероїд складається з “купи каміння” і не має структурної міцності (Walsh, 2018). Швидкість осьового обертання астероїдів з діаметрами менше 40 км визначається не тільки їхньою історією утворення, а й еволюцією під дією ЯОРП-ефекту (див. Розділ 1.3.3), який може повільно змінювати швидкість обертання тіл як у бік прискорення, так і в бік уповільнення. Особливе обертання мають тіла з розмірами від кількох сотень метрів до кількох метрів. Завдяки високій структурній цілісності (зокрема, монолітній будові), що дозволяє витримувати значні відцентрові сили без руйнування, частина цих тіл обертається дуже швидко – з періодами менше 2 год.

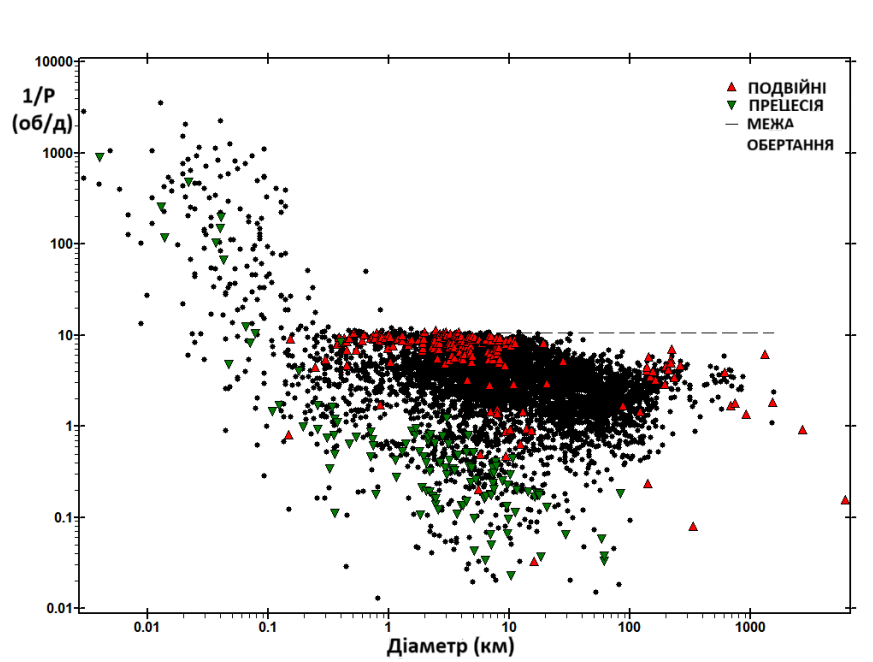


Рисунок 1.4 Залежність швидкості обертання астероїдів від діаметрів (Джерело: [https://minplanobs.org/alcdef/php/alcdef\\_aboutLightcurves.html](https://minplanobs.org/alcdef/php/alcdef_aboutLightcurves.html)).

Астероїди класифікують за спектральними характеристиками поверхонь. Історично були сформовані декілька систем таксономічної класифікації астероїдів за спектрами відбиття, показниками кольору та альbedo поверхонь: класифікація Толена за 8-колірною фотометрією ECAS (Eight-Color Asteroid Survey, Tholen, 1989), що включає 14 таксономічних

типів; більш сучасна класифікація SMASS (Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey, [Bas & Binzel, 2002](#)), що налічує 24 класи; оновлена система “Bus-DeMeo” ([DeMeo et al., 2009](#)), що визначає 25 класів. Хоча сучасна класифікація є досить різноманітною, астероїди в більшості відносяться до двох основних таксономічних комплексів: С-комплекс, астероїди якого мають темну поверхню та багаті на вуглець, та S-комплекс, які мають яскравішу поверхню та багаті на силікатні породи й метали.

Окремий інтерес представляють астероїди Х-комплексу – об’єкти, спектри яких дуже подібні, але значення альбедо може сильно варіюватись від низького (Р-тип) до високого (Е-тип). Астероїди М-типу, які вважаються багатими на залізо та нікель, маючи середні значення альбедо, також входять до Х-комплексу за спектрами, що ускладнює пошук металевих астероїдів.

Таблиця 1.1 Середні значення геометричного альбедо для різних таксономічних типів ([DeMeo & Carry, 2013](#)).

Таксономічний тип	Геометричне альбедо	Таксономічний тип	Геометричне альбедо
A	$0.20 \pm 0.03$	S	$0.23 \pm 0.02$
B	$0.14 \pm 0.04$	V	$0.35 \pm 0.01$
C	$0.06 \pm 0.01$	E	$0.45 \pm 0.21$
D	$0.06 \pm 0.01$	M	$0.13 \pm 0.05$
K	$0.14 \pm 0.02$	P	$0.05 \pm 0.01$
L	$0.13 \pm 0.01$		

Сучасні дослідження також виявляють астероїди зі складом, який може бути унікальним або змішаним внаслідок зіткнень. Типові значення альбедо тісно пов’язані з поверхневим складом: вуглецеві астероїди мають низьке альбедо, тоді як силікатні – значно вище (табл. 1.1). Розподіл астероїдів за альбедо носить бімодальний характер: спостерігаються дві виражені групи низькоальбедних та високоальбедних астероїдів ([Masiero et al., 2011](#)) (рис. 1.5).

Густина астероїдів значною мірою залежить від їхнього таксономічного типу: вуглецеві (С-типу) мають густини близько  $1.4 \text{ г/см}^3$ , силікатні (S-типу) –  $2.7 \text{ г/см}^3$ , а багаті на метал (М-типу) –  $5.3 \text{ г/см}^3$  (Krasinsky et al., 2002). Ці значення для густин вказують на значну пористість речовини, та для деяких астероїдів може перевищувати 50%, що узгоджується з їхньою моделлю як «купою каміння». Густина великих астероїдів (діаметрами в десятки і сотні км) визначають за спричиненими ними гравітаційними збуреннями на рух інших астероїдів або планет, густини малих астероїдів (кілометрового розміру) – за порівнянням спостережуваного ефекту Ярковського з теоретичними передбаченнями (див. підрозділ 1.3.2), густини подвійних астероїдів – за періодами їхнього обертання. Майже завжди визначення мас і густин пов'язані з високими похибками, так що досі надійно відомі маси для невеликої кількості найбільш досліджених астероїдів (Vernazza et al., 2021).

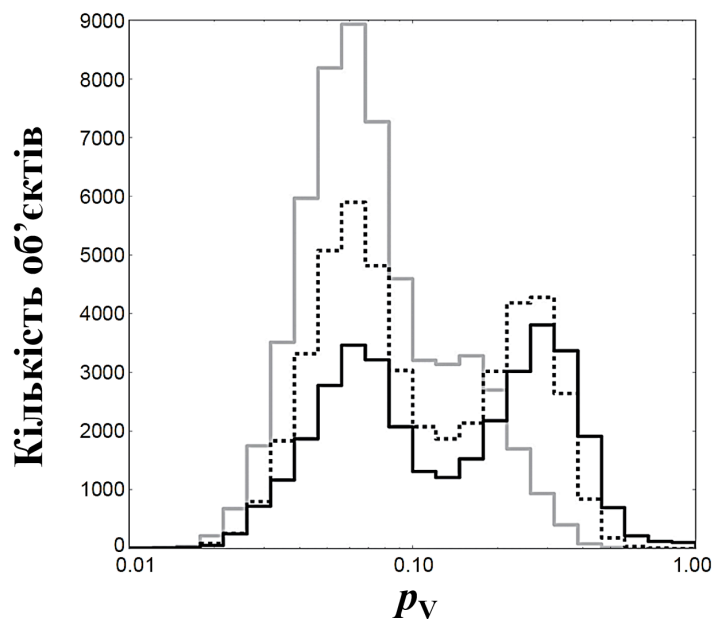


Рисунок 1.5 Розподіл геометричного альbedo  $p_v$  для астероїдів у Головному поясі за даними ІЧ-телескопа WISE (Masiero et al., 2011): чорна суцільна лінія – внутрішня частина поясу ( $a = 1.8 - 2.5 \text{ а. о.}$ ), чорна пунктирна лінія – середня частина ( $a = 2.5 - 2.82 \text{ а. о.}$ ), сіра лінія – зовнішня частина ( $a = 2.82 - 3.6 \text{ а. о.}$ ).

### 1.3. Збурений рух астероїдів під дією гравітаційних та негравітаційних ефектів

Рух небесних тіл навколо Сонця описується кеплерівськими орбітами. Кеплерівська орбіта є розв'язком класичної задачі двох тіл, які взаємодіють під дією сили, обернено пропорційної квадрату відстані між ними. Форма такої орбіти визначається одним із конічних перетинів, а її розмір, форма та орієнтація однозначно задаються шістьма параметрами, що отримали назву елементів орбіти. На рис. 1.6 подано схему визначення основних кеплерівських елементів орбіти. П'ять із них – велика піввісь ( $a$ ), ексцентриситет ( $e$ ), нахил ( $i$ ), довгота висхідного вузла ( $\Omega$ ) та аргумент перигелію ( $\omega$ ) – описують форму та орієнтацію орбіти. Останній елемент, істинна аномалія ( $\nu$ ), визначає положення тіла на орбіті в конкретний момент часу. Для характеристики орбіт астероїдів також часто використовують перигелійну ( $q$ ) та афелійну ( $Q$ ) відстані, що відповідають мінімальній та максимальній відстані тіла до Сонця. Вони є важливими характеристиками орбіти і можуть бути обчислені на основі кеплерівських елементів.

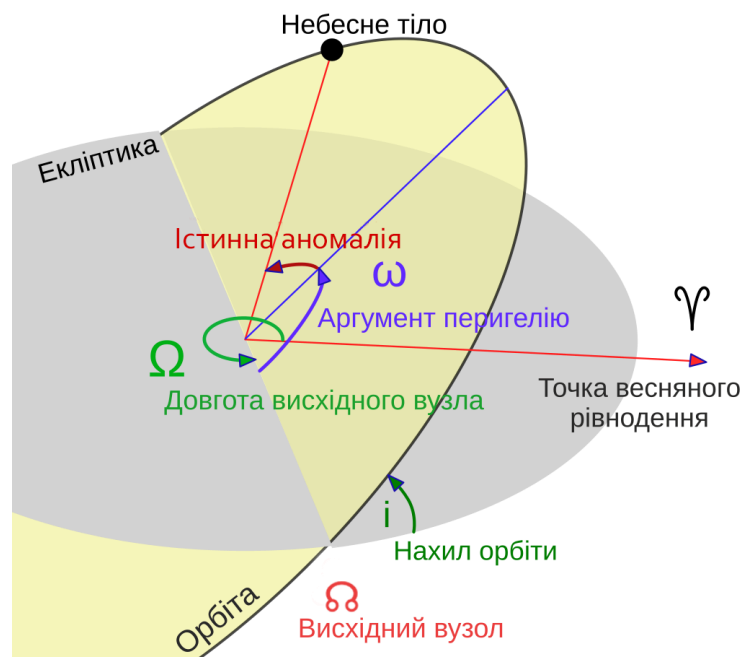


Рисунок 1.6 Кеплерівські елементи орбіти.

Внаслідок присутності додаткових тіл, які створюють збурення, параметри орбіти змінюються з часом. Орбіту тіла в такому разі можна охарактеризувати окремим набором орбітальних елементів на кожен момент часу в припущенні відсутності подальших збурень. Така орбіта називається оскулюючою, а її параметри – оскулюючими елементами орбіти. Крім гравітаційних збурень з боку інших масивних тіл, причиною зміни орбіт малих тіл є релятивістські ефекти та такі негравітаційні ефекти, як ефект Ярковського, ефект Пойнтінга-Робертсона або втрата речовини.

### **1.3.1. Гравітаційні резонанси**

За збурення орбіт малих тіл в найбільшій мірі відповідальними є великі планети Сонячної системи. Ці збурення можуть мати періодичний або неперіодичний характер. До неперіодичних належать тісні проходження малих тіл повз планети, які миттєво змінюють їхні орбітальні елементи.

Періодичні збурення виникають, коли орбітальні періоди небесних тіл співвідносяться як малі натуральні числа. Наприклад, коли за два оберти Юпітера навколо Сонця мале тіло здійснює три оберти, це означає, що тіло знаходиться в резонансі 3:2 з Юпітером. У такому випадку збурення є регулярними й періодичними, що призводить до накопичення їхнього впливу на орбітальний рух малого тіла. Такі явища називаються резонансами середнього руху, що можуть як стабілізувати, так і дестабілізувати орбіти тіл. Стабілізація відбувається в резонансах, де орбіти синхронізовані таким чином, що небесні тіла ніколи не наближаються на близьку відстань. До прикладів стабілізуючих резонансів належать резонанси з Юпітером J1:1, J3:2, J4:3, у яких розташовані астероїди групи троянців, групи Гільди та Туле відповідно. Натомість дестабілізуючими є резонанси, що передбачають регулярні тісні зближення тіл. Типовими прикладами є резонанси J3:1, J5:2, J7:3 з Юпітером. В цьому випадку вплив його призводить до значних збурень ексцентриситету орбіт, зменшення перигелійної відстані і збільшення афелійної. При цьому орбітальний період тіла залишається незмінним, так що

вплив резонансу зберігається. Така видовжена орбіта астероїда починає перетинатись з орбітами планет, тісні проходження повз які призводять до викидання тіла з Головного поясу астероїдів (рис. 1.7). Силу резонансу визначають як співвідношення середнього значення функції збурення до її мінімального значення для конкретного резонансу.

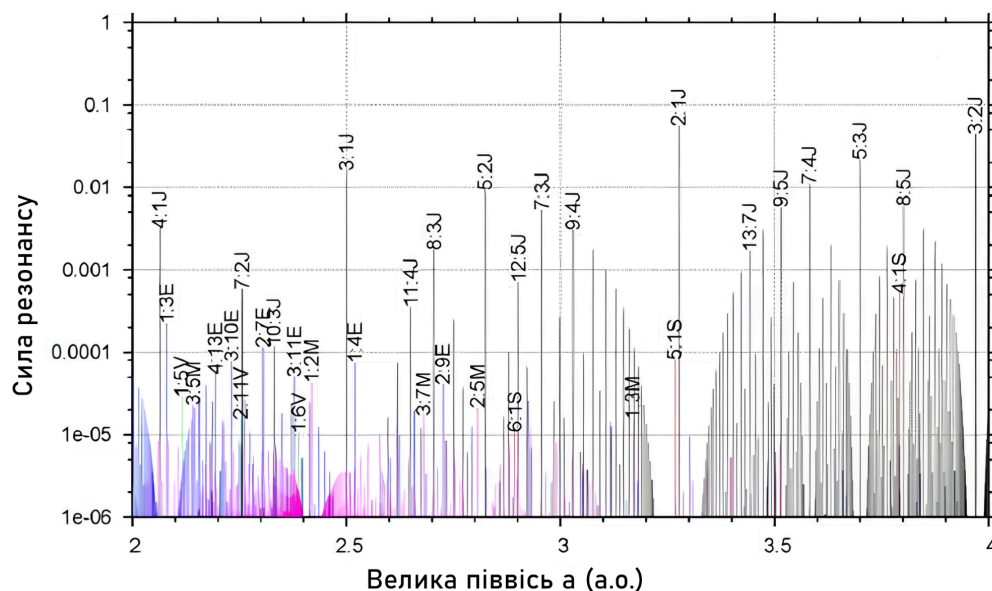


Рисунок 1.7 Мапа резонансів середнього руху з Землею (E), Венерою (V), Юпітером (J), та Сатурном (S) у зоні для Головного поясу астероїдів (Gallardo, 2006).

Віковими резонансами прийнято називати орбітальні резонанси, що виникають між тілами, у яких швидкості прецесії власних орбітальних кутів (аргументів перигелію  $\omega_p$  або довготи висхідного вузла  $\Omega_p$ ) перебувають у певному співвідношенні (Murray & Dermott, 1999). Це призводить до зміни нахилу та ексцентриситету орбіти тіла за проміжки часу, набагато більші за орбітальний період (мільйони років). Сила резонансів зменшується зі збільшенням порядку резонансу. Таким чином, найсильнішими резонансами є резонанси першого порядку, або лінійні вікові резонанси. Резонанси, які пов'язані зі швидкістю прецесії довготи перигелію, позначають  $\nu_j$ , а пов'язані зі швидкістю прецесії довготи висхідного вузла –  $\nu_{1j}$ , де  $j$  – порядковий номер планети. Одним з головних вікових резонансів є резонанс  $\nu_6$  астероїдів із Сатурном (рис. 1.8), який відмежовує астероїди Головного поясу від планет

земної групи. Резонанси  $\nu_6$  разом з  $\nu_5$  є відповідальними за збурення орбіт астероїдів, що перетинають орбіту Марса ( $e > 0.3$ ) у межах резонансу J3:1, який призводить до подальшого зростання їх ексцентриситету до високих значень за кілька мільйонів років та подальшого видалення із резонансу. Ті самі ефекти впливу  $\nu_6$  та  $\nu_5$  справедливі і для резонансів J4:1, J5:2, J7:3 (Nesvorný et al., 2002).

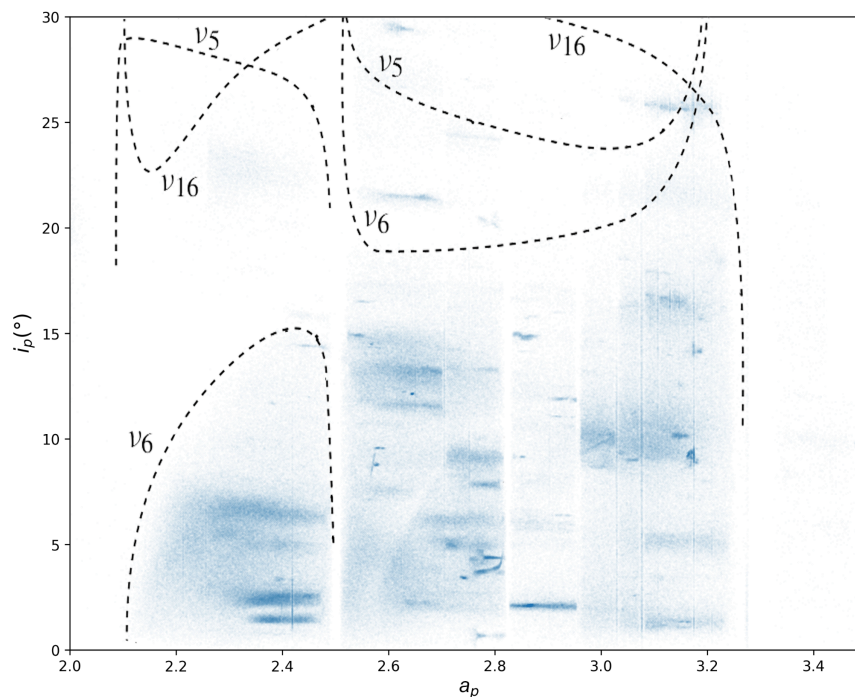


Рисунок 1.8 Розташування лінійних вікових резонансів у Головному поясі у просторі власних орбітальних елементів (для значення ексцентриситету  $e_p = 0.1$ ).

Резонанси з планетами, – як вікові, так і резонанси середнього руху, – визначають форми орбіт астероїдів у Головному поясі, у якому знаходиться більшість з відомих нам астероїдів (рис. 1.1). Так, віковий резонанс  $\nu_6$  та резонанс J3:1 окреслюють внутрішню частину Головного поясу між 2 а. о. та 2.5 а. о. Середня частина Головного поясу лежить між резонансами J3:1 та J5:2, на відстанях 2.5 а. о. та 2.83 а. о. від Сонця. Зовнішня частина простягається від J5:2 на 2.83 а. о. до J2:1 на 3.28 а. о. Вікові резонанси обмежують знаходження орбіт астероїдів на деяких значеннях

ексцентриситету та нахилу орбіти або на деяких їх співвідношеннях (рис. 1.8).

### 1.3.2. Ефект Ярковського

Окрім гравітаційних, на астероїди також діють негравітаційні сили. Вони можуть виникати через сонячний вітер, міжпланетний газ або втрату речовини з поверхні астероїда. Проте найсуттєвіший вплив має світлове випромінювання.

Ефект Ярковського належить до ключових негравітаційних явищ, що впливають на динаміку малих тіл Сонячної системи. Цей ефект-проявляється у повільній зміні орбітальних параметрів астероїдів внаслідок анізотропного перевипромінювання з їхньої поверхні теплової енергії, отриманої від Сонця (Bottke et al., 2006). Згідно з законом збереження імпульса, кожен фотон, випромінений поверхнею тіла, передає тілу невеликий імпульс у протилежному напрямку. Оскільки через обертання астероїд неоднорідно нагрівається сонячним випромінюванням та асиметрично перевипромінює теплову енергію, виникає результуюча сила, яка постійно діє на астероїд і за тривалий час може призвести до значних змін його орбітальних елементів (Rubincam, 1995). Врахування даного ефекту має важливе значення для розуміння динамічної еволюції астероїдів, наприклад, для пояснення поповнення популяції навколоземних астероїдів, а також для оцінки потенційних ризиків зіткнення таких об'єктів із Землею.

Залежно від причини виникнення, ефект Ярковського поділяють на добовий та сезонний (рис. 1.9). Добовий ефект Ярковського з'являється внаслідок наявності теплової інерції речовини та обертання тіла. Коли астероїд обертається навколо своєї осі, його поверхня нерівномірно нагрівається під дією сонячного випромінювання. Через теплообмін з

глибшими шарами ґрунту найвищої температури поверхня досягає не в момент максимального освітлення опівдні, а з певним запізненням. У результаті вечірня півкуля астероїда нагрівається сильніше, ніж ранкова, що зумовлює інтенсивніше інфрачервоне випромінювання з вечірнього боку. Як наслідок, найбільше теплове перевипромінювання з поверхні астероїда відбувається не в напрямку Сонця, а під кутом до орбіти, що створює результуючу реактивну силу, яка діє в напрямку руху астероїда або проти нього, залежно від напрямку його осьового обертання (Botke et al., 2006).

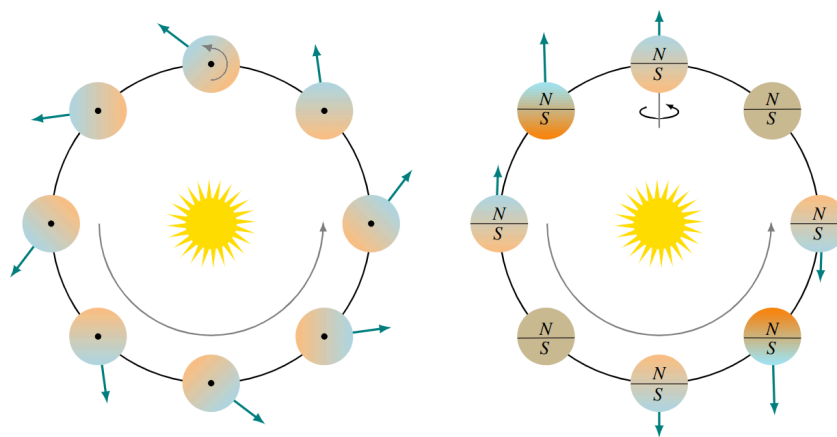


Рисунок 1.9 Ілюстрація добового (ліворуч) і сезонного (праворуч) ефектів Ярковського. Літерами *N* та *S* позначено відповідно північну та південну півкулі.

Напрямок обертання астероїда навколо своєї осі визначає напрямок дії ефекту Ярковського. Якщо в астероїда пряме, або проградне, обертання (нахил осі обертання менше  $90^\circ$ ), то теплове випромінювання з вечірньої півкулі спрямоване в напрямку, протилежному до орбітального руху. Це спричиняє збільшення орбітального моменту імпульсу, що поступово призводить до зміщення астероїда на більш віддалену від Сонця орбіту. У разі зворотного, або ретроградного, обертання (нахил осі перевищує  $90^\circ$ ) теплове випромінювання з вечірньої півкулі спрямоване по напрямку орбітального руху, що сприяє зменшенню великої півосі орбіти.

Рівняння для зміни великої півосі астероїда під дією добового ефекту Ярковського можна записати як (Vokrouhlický et al., 2015):

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}} = -\frac{8(1-A)R^2F}{9nmc}W(R_\omega, \Theta_\omega)\cos\gamma, \quad (1.1)$$

де  $a$  – велика піввісь орбіти,  $n$  – середній рух,  $\gamma$  – нахил осі обертання,  $A$  – сферичне альbedo,  $F$  – потік сонячного випромінювання на орбіті астероїда,  $R$  – середній радіус астероїда,  $m$  – маса астероїда,  $c$  – швидкість світла, а  $W$  – безрозмірний коефіцієнт, який характеризує ступінь асиметрії перевипромінювання світла астероїдом і визначається його тепловою моделлю.  $W$  залежить від двох безрозмірних параметрів:  $R_\omega$  та  $\Theta_\omega$ .  $R_\omega$  пропорційний радіусу астероїда, поділеному на довжину теплової хвилі; цей параметр характеризує те, наскільки добре теплові хвилі здатні поширюватись наскрізь через всю глибину астероїда.  $\Theta_\omega$  називають тепловим параметром; він пропорційний квадратному кореню з кутової швидкості осьового обертання астероїда  $\omega$ :  $\Theta_\omega \gg 1$  означає таке швидке обертання, що температура кожної точки астероїдної поверхні майже не встигає змінитись протягом одного оберту астероїда навколо своєї осі, а  $\Theta_\omega \ll 1$  означає таке повільне обертання, що кожна точка поверхні знаходиться майже в тепловій рівновазі (див. [Vokrouhlický et al. \(2015\)](#) для точного визначення  $W$ ,  $R_\omega$  та  $\Theta_\omega$ ). Якщо нахил осі обертання дорівнює  $90^\circ$ , добовий компонент ефекту Ярковського зникає, однак у цьому випадку максимального впливу набуває його сезонний компонент.

Сезонний ефект Ярковського виникає внаслідок зміни умов освітлення протягом орбітального періоду. Він проявляється, коли вісь обертання тіла не перпендикулярна до площини орбіти, викликаючи сезонну зміну освітлення північної та південної півкуль астероїда. Кожна півкуля влітку нагрівається сильніше, ніж узимку, але температура досягає свого максимуму із запізненням відносно літнього сонцестояння через теплову інерцію. Теплове випромінювання з нагрітої півкулі створює силу, спрямовану проти орбітального руху, у результаті спричиняючи зменшення великої півосі орбіти

астероїда. На відміну від добового ефекту, сезонний ефект завжди призводить до зменшення великої півосі орбіти, незалежно від напрямку обертання тіла.

Максимального впливу сезонний ефект сягає, коли вісь обертання лежить у площині орбіти (нахил осі обертання  $90^\circ$ ), а сезонна зміна температури – максимальна. Сезонний ефект відсутній для астероїдів, чия вісь обертання орієнтована перпендикулярно до площини орбіти ( $0^\circ$  або  $180^\circ$ ), оскільки в такому випадку середня температура на кожній широті залишається незмінною протягом орбітального руху. Вплив сезонного ефекту на велику піввісь орбіти астероїда можна описати наступним рівнянням (Vokrouhlický et al., 2015):

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{seasonal}} = \frac{4(1-A)R^2F}{9nmc} W(R_n, \Theta_n) \sin^2 \gamma, \quad (1.2)$$

де  $R_n$  та  $\Theta_n$  мають той саме сенс, що й раніше, але з підстановкою кутової швидкості орбітального руху  $n$  замість осьового обертання.

Ефект Ярковського можна виміряти шляхом порівняння спостережного руху астероїда, отриманого за допомогою радарних або астрометричних методів, зі значеннями, розрахованими за чисельним моделюванням, яке враховує всі гравітаційні збурення, що діють на астероїд. Вперше значення ефекту Ярковського вдалося виміряти у 2003 році для астероїда (6489) Golevka (Chesley et al., 2003). Станом на сьогодні ефект Ярковського виміряно приблизно для 300 астероїдів, хоча точність таких визначень різниться (Greenberg et al., 2020; Dziadura et al., 2023). Для типового астероїда діаметром 1 км на відстані 1 а.о. від Сонця, зміна великої півосі  $\Delta a$  становить порядку  $10^{-4}$  а.о./млн років (Bottke et al., 2006).

Ефект Ярковського є важливою негравітаційною силою, що впливає на орбітальну динаміку малих тіл Сонячної системи. Хоча величина цього ефекту є малою, його кумулятивний вплив за тривалі проміжки часу призводить до значних змін орбітальних параметрів астероїдів та

метеороїдів. Саме ефект Ярковського часто виявляється важливим невідомим фактором, врахування якого необхідне для точного передбачення зіткнення потенційно небезпечних астероїдів із Землею на часових проміжках в десятки й сотні років. Змінюючи велику піввісь орбіти астероїда, ефект Ярковського приводить астероїди в люки Кірквуда, звідки вікові гравітаційні збурення можуть викидати їх із Головного поясу, поповнюючи, в тому числі, популяцію АНЗ. Ефект Ярковського, діючи по-різному на астероїди зі спільним походженням, але з різними параметрами обертання та розмірами, сприяє тому, щоб орбіти членів астероїдних пар, кластерів або сімейств із часом ставали все більш відмінними. Його врахування важливе для правильного розрахунку віку утворення таких динамічних груп.

### 1.3.3. ЯОРП-ефект

Ефект Ярковського-О'Кіфа-Радзієвського-Паддака (ЯОРП) є одним із важливих негравітаційних механізмів, що впливає на обертальний стан астероїдів (Rubincam, 2000). Цей ефект, вперше теоретично описаний Радзієвським (1954) і пізніше розвинений Паддаком (1969) та О'Кіфом (1976), виникає через анізотропне теплове випромінювання з поверхні тіла, що обертається, і здатний змінювати як швидкість обертання, так і напрямок осі обертання астероїда. Ефект ЯОРП виникає завдяки двом основним факторам: асиметричній формі астероїда та тепловій інерції матеріалу. Як і для ефекту Ярковського, внаслідок нагрівання поверхні астероїда сонячним випромінюванням відбувається перевипромінювання теплової енергії, яке створює реактивну силу. Через наявність глобальних нерівностей поверхні або в цілому через неправильну форму тіла виникає крутний момент, що змінює параметри осьового обертання астероїда (рис. 1.10).

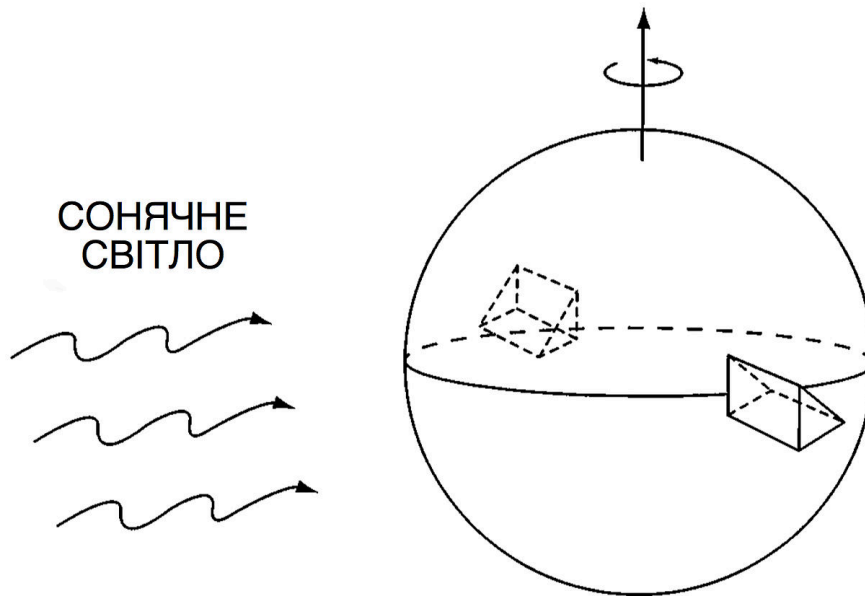


Рисунок 1.10 Зміна періоду обертання астероїда з асиметрією форми під дією ефекту ЯОРП. Астероїд моделюється як сфера з двома клиноподібними виступами на екваторі .

Для більшості астероїдів вплив ефекту ЯОРП на зміну швидкості обертання  $\omega$  та нахилу осі  $\varepsilon$  із задовільною точністю можна описати наступними формулами (Golubov & Scheeres, 2019):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Phi R^3}{cI_z} C_z \left( \cos 2\varepsilon + \frac{2}{3} \right), \quad (1.3)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2\Phi R^3}{3cI_z\omega} C_z \sin 2\varepsilon. \quad (1.4)$$

де  $I_z$  – момент інерції астероїда,  $c$  – швидкість світла,  $\Phi$  – сонячна стала на орбіті астероїда,  $R$  – середній радіус астероїда,  $C_z$  – безрозмірний ЯОРП-коефіцієнт, який характеризує міру асиметрії форми астероїда.

Ці формули втрачають точність для астероїдів із дуже повільним обертанням, які перестають обертатись навколо головної осі свого еліпсоїда інерції і входять у режим нутацій (т.зв. тамблінг). В іншому крайньому випадку, для астероїдів із дуже швидким обертанням відцентрові сили можуть спричиняти зсуви ґрунту, втрату маси, і, як наслідок, зміну ЯОРП-коефіцієнту  $C_z$ . Розв'язком рівнянь для еволюції обертального стану

астероїда виявляються так звані ЯОРП-цикли, в кожному з яких астероїд починає свою динамічну еволюцію від дуже повільного обертання на межі тамблінгу, потім прискорюється, після чого або повертається назад в режим тамблінгу, або досягає критичної швидкості обертання і змінює форму або втрачає частину маси, та зрештою сповільнюється і знову повертається в тамблінг, починаючи звідти новий ЯОРП-цикл. Під час втрати маси астероїдом можливо утворення подвійної системи і подальша еволюція під впливом ЯОРП-ефекту, припливних сил і зовнішніх гравітаційних збурень і, в кінцевому підсумку, або злиття подвійної системи у контактну-подвійний астероїд, або її розпад на два гравітаційно непов'язані астероїди (так звану астероїдну пару, [Vokrouhlický & Nesvorný, 2008](#)).

Окремі астероїди можуть демонструвати складнішу еволюційну поведінку, ніж передбачають спрощені рівняння (1.3, 1.4), зокрема, знаходячи стани рівноваги з нульовим сумарним ЯОРП-ефектом, зупиняючи в них свою еволюцію і, таким чином, надовго вибуваючи з ЯОРП-циклів ([Golubov & Scheeres 2019](#); [Golubov, Unukovych, & Scheeres 2021](#)). Також теоретично передбачено, що подвійні астероїди можуть уникати як розпаду, так і злиття, знаходячи свої стани стійкої рівноваги ([Jacobson & Scheeres 2011](#); [Golubov & Scheeres 2016](#); [Golubov, Scheeres & Unukovych 2018](#)). Таким чином ЯОРП-ефект визначає розподіл невеликих астероїдів за нахилами осі, періодами обертання, а через руйнування астероїдів в ЯОРП-циклах – також за розмірами й формами.

Крім того, змінюючи нахил і період обертання астероїда, ЯОРП-ефект може впливати на величину ефекту Ярковського. Однак, ми не будемо брати до уваги цей вплив надалі під час розгляду ефекту Ярковського в наших моделюваннях орбітальної динаміки астероїдів. Це пов'язано з тим, що ми розглядаємо динаміку астероїдів лише на коротких за космогонічними масштабами проміжках часу до 1 млн років, які є значно меншими за характерний часовий масштаб ЯОРП-ефекту, який становить близько десяти мільйонів років для астероїдів кілометрового розміру ([Rubincam, 2000](#)).

## 1.4. Астероїдні пари

### 1.4.1. Відкриття астероїдних пар

Астероїдною парою вважають два астероїди, які знаходяться на близьких геліоцентричних орбітах, мають спільне походження, але не пов'язані гравітаційно. Історія відкриття астероїдних пар почалася з того, що дослідники помітили неймовірну подібність між орбітами деяких астероїдів – набагато більшу, ніж можна було б очікувати для випадково розподілених орбіт. Використовуючи метрику в просторі кеплерівських орбітальних елементів (Nesvorný & Vokrouhlický, 2006), у роботі Vokrouhlický & Nesvorný (2008) було обчислено фазову відстань  $d$  від кожної з відомих орбіт у Головному поясі до найближчої сусідньої орбіти у просторі оскулюючих орбітальних елементів. При побудові кумулятивної кількості пар орбіт,  $N(<d)$ , як функції  $d$ , було виявлено, що їхній розподіл для фазових відстаней  $d \lesssim 30$  м/с не підпорядковується степеневому закону  $N(<d) \propto d^5$ , який би можна було очікувати для випадкового розподілу точок у 5-вимірному просторі (рис.1.11).

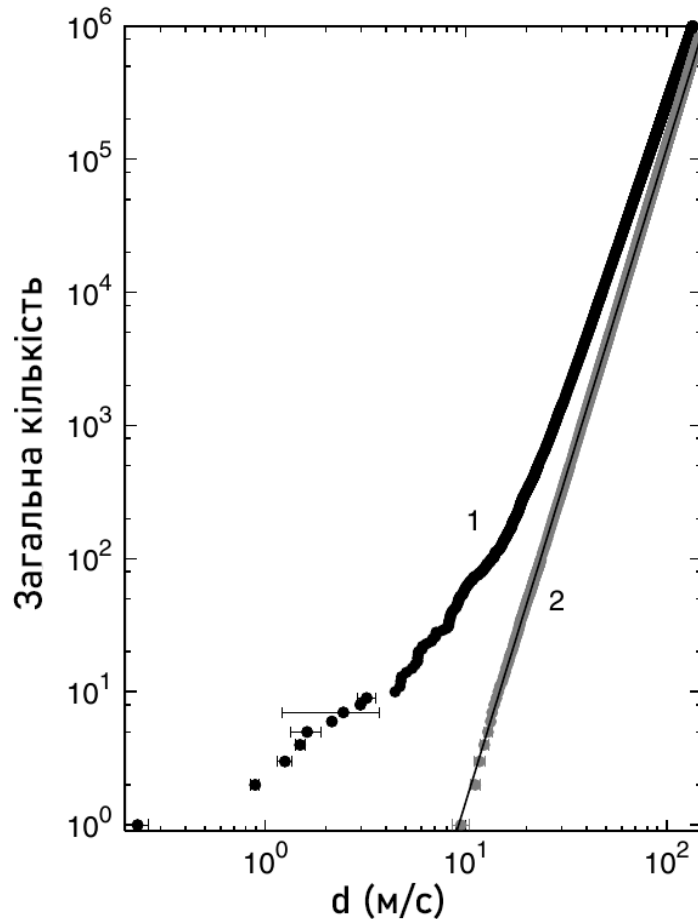


Рисунок 1.11 Сукупна кількість пар  $N(<d)$  як функція відстані  $d$ . Чорні символи (1) відображають розподіл для реальних астероїдів, сірі символи (2) показують розподіл для 370 000 випадкових синтетичних орбіт у діапазоні  $1.7 \text{ а.о.} < a < 3.61 \text{ а.о.}$

За допомогою статистичних оцінок у роботі [Vokrouhlický & Nesvorný \(2008\)](#) було показано, що таке відхилення є значущим, оскільки в разі випадкового розподілу 370 000 орбіт у заданій області ймовірність отримати одну пару орбіт із  $d \leq 10 \text{ м/с}$  є меншою в 60 разів у порівнянні з реальним розподілом, а для  $d \leq 4.5 \text{ м/с}$  – у 500 разів (рис. 1.11). На основі аналізу орбітальних даних було виявлено 60 астероїдних пар (27 у внутрішній частині Головного поясу) із відстанню  $d \leq 10 \text{ м/с}$ . Важливим досягненням роботи є відкриття астероїдної пари (6070) Rheinland – (54827) 2001 NQ8, для якої за допомогою чисельних моделювань орбітальної еволюції вдалося отримати тісні зближення між компонентами з дуже малими відносними швидкостями (відстань  $D \approx 250 \text{ км}$ , швидкість  $v_{\text{rel}} \approx 0.5 \text{ м/с}$ ), із оціненим віком

формування у 17 тис. років (Vokrouhlický & Nesvorný (2008), Vokrouhlicky et al., 2017).

Робота Pravec & Vokrouhlicky (2009) розвинула статистичні підходи до визначення астероїдних пар. Був запропонований підхід до оцінки рівномірності фонові популяції навколо пари на основі підрахунку кількості орбіт у фазових об'ємах та оцінки очікуваної щільності орбіт. Підхід дозволяє ідентифікувати пари, які знаходяться в зонах з підвищеною щільністю орбіт, що може свідчити про наявність більшої групи в околиці пари, – наприклад, астероїдного кластера або астероїдного сімейства. Другий підхід дозволяє оцінити статистичну значущість пари через оцінку ймовірності випадкового розташування двох еволюційно не пов'язаних астероїдів на близькій фазовій відстані. Використовуючи статистичні підходи, у роботі було проаналізовано 558 кандидатів у астероїдні пари, із яких 73 виявилися статистично значущими. Автори наголошують, що дані методики є додатковими індикаторами якості отриманих пар, і що перевірка пар на наявність зближень між компонентами є основним інструментом верифікації. За результатами було помічено відмінність між статистично значущими та випадковими парами. Статистично значущі пари мають характерний розподіл різниці за абсолютною зоряною величиною між компонентами (рис. 1.12, ліва панель), який збігається із розподілом пар, підтверджених за допомогою моделювань. Випадкові ж пари здебільшого утворюються між астероїдами, які є найчисельнішими у вибірці, і тому типові різниці зоряних величин між компонентами є значно меншими (рис. 1.12, права панель).

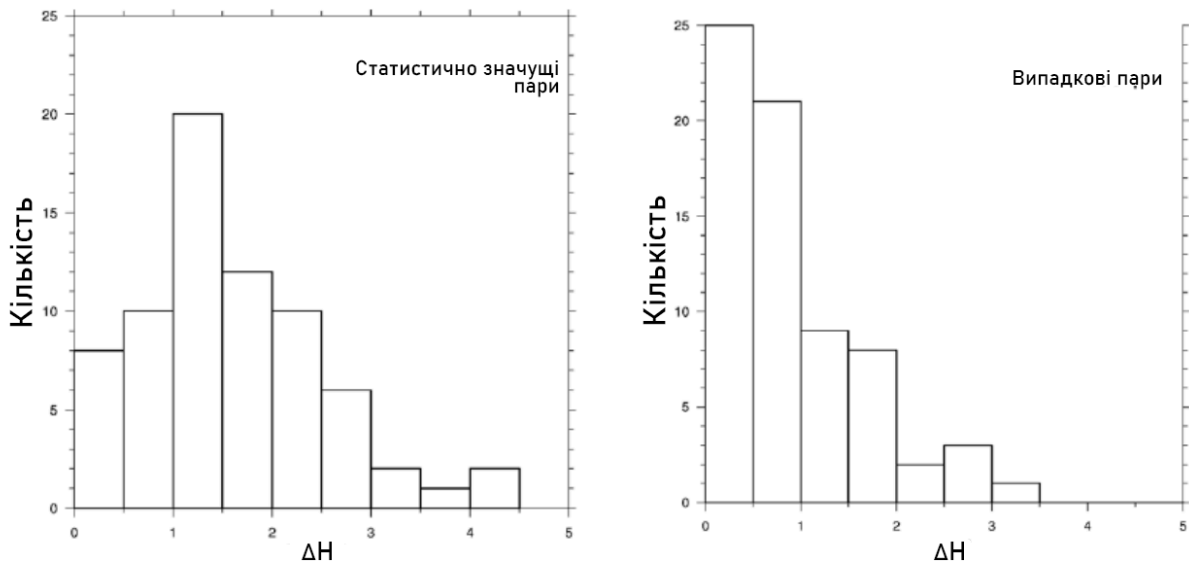


Рисунок 1.12 Розподіл кандидатів статистично значущих (ліворуч) та відкинутих (праворуч) кандидатів в астероїдні пари за різницею абсолютних зоряних величин між компонентами (Pravec & Vokrouhlicky, 2009).

У роботі Vokrouhlický (2009) досліджено потрійний астероїд (3749) Valam, який утворює пару з астероїдом (312497) 2009 BR60, що стало першим відомим випадком складної системи як із гравітаційно пов'язаними, так і непов'язаними вторинними компонентами. Polishook (2014) встановив, що компоненти пари (2110) Moore-Sitterly – (44612) 1999 RP27 мають однаковий ретроградний напрям осьового обертання, що свідчить про утворення пари найімовірніше внаслідок обертального поділу батьківського тіла. У роботі Žižka et al. (2016) було досліджено астероїдну пару (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49 і встановлено, що найімовірніший вік формування цієї пари становить  $7.4 \pm 0.3$  тис. років, що робить її однією з наймолодших серед відомих пар.

У роботі Pravec et al. (2019) фотометричним методом було досліджено 93 астероїдні пари, оцінений вік утворення яких знаходиться в межах від 7 тис. років до кількох мільйонів років. Одним з головних результатів роботи стало визначення періодів обертання для всіх головних компонент пар та для деяких вторинних тіл, що разом із визначенням абсолютних зоряних величин дозволило оцінити масові відношення пар. Визначені фізичні параметри дали

змогу оцінити залежності, які стали важливим фактором у розумінні механізмів формування астероїдних пар, про які йде мова в наступному підрозділі.

У роботі [Fatka et al. \(2023\)](#) було ідентифіковано та вивчено астероїдну пару 2019 PR2 – 2019 QR6. Пара є цікавою тим, що до її складу входять навколоземні астероїди. Аналіз орбіт виявив, що як чисто гравітаційна модель, так і модель із урахуванням ефекту Ярковського не можуть пояснити їхні поточні орбіти, тому для однієї із компонент припускається кометоподібна активність. Чисельне моделювання динаміки астероїдів із врахуванням безперервної активності одного з них після розділення оцінює вік утворення пари у  $300_{-70}^{+120}$  років, а за моделлю з короткотривалою активністю оцінений вік становить  $272 \pm 7$  років.

Наймолодшою ж відомою астероїдною парою є (458271) 2010 UM26 – 2010 RN221, яка сформувалася всього лише 20–60 років тому ([Vokrouhlický et al., 2022](#)). Пара також особлива тим, що врахування гравітаційної взаємодії між компонентами суттєво впливає на дослідження її орбітальної еволюції. За певних комбінацій параметрів гравітаційна взаємодія призводить до тимчасового захоплення компонент на взаємні орбіти у минулому тривалістю 40–50 років, під час якого система стає квазі-подвійною.

На початок виконання дисертаційної роботи було відомо 257 астероїдних пар, серед яких є як самостійні пари, так і такі, що входять до складу астероїдних кластерів та сімейств. Оскільки в останні два десятиріччя постійно відкривають нові астероїди, а для вже відомих – уточнюють орбіти, список відкритих астероїдних пар постійно поповнюється. На даний момент не існує централізованої бази даних астероїдних пар, але відомості про них збираються з наукових публікацій у базу даних Johnston Archive <https://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidpairs.html>, та доступні в базі даних IMCCE <https://ssp.imcce.fr/webservices/ssodnet/>.

### 1.4.2. Механізми утворення астероїдних пар

Вважають, що астероїдні пари можуть утворюватися в результаті зіткнення астероїдів (Vokrouhlický and Nesvorný 2008), обертального поділу (Pravec et al. 2010) та розпаду подвійних систем (Cuk 2007). В залежності від параметрів зіткнення астероїдів можуть утворюватися астероїдні кластери або цілі сімейства астероїдів, із яких найбільші та найближчі спостережні компоненти можуть бути в подальшому охарактеризовані як астероїдна пара. Моделювання на основі гідродинаміки згладжених частинок показують, що під час катастрофічних зіткнень можуть утворюватися фрагменти зі схожими подальшими орбітами та невеликими взаємними швидкостями  $v \sim 1-20 v_{\text{esc}}$  (Nesvorný et al., 2006, Durda et al., 2007). Втім дослідження сімейств астероїдів, сформованих у результаті зіткнень, показують, що для них характерними масовими відношеннями є  $\mu \ll 0.1$  між найбільшим та іншими фрагментами (Durda et al., 2007), у той час як більшість відомих пар мають масове співвідношення  $0.001 < \mu \leq 0.2$  (Pravec et al. 2019) (рис. 1.13). Це є певним, хоч і не вирішальним, аргументом на користь того, що пари можуть здебільшого утворюватися за відмінним від зіткнень механізмом.

Розділення під впливом ЯОРП-ефекту та розпад подвійних систем є тісно пов'язаними процесами. В залежності від параметрів обертання та морфології форми астероїди, які досягають критичних швидкостей обертання під дією ЯОРП-ефекту, можуть або формувати подвійні системи, або напругу розпадатися на гравітаційно непов'язані фрагменти (Scheeres, 2007). Пари, утворені внаслідок розпаду під дією ЯОРП-ефекту, повинні мати майже ідентичні нахили орбіт. Це пов'язано з тим, що найпоширенішими кінцевими станами обертання під дією ефекту ЯОРП є нахили осі обертання  $\varepsilon = 0^\circ$  або  $180^\circ$ . Відповідно, фрагменти, що відділяються від батьківського тіла під дією відцентрової сили, повинні залишатися в тій самій орбітальній площині та мати подібні значення нахилу орбіти  $i$ . На користь цього механізму свідчать результати моделювання астероїдної пари (6070) Rheinland – (54827) 2001

NQ8 ([Vokrouhlický and Nesvorný 2008](#), [Vokrouhlický and Nesvorný 2017](#)), для якої швидкість зближення між компонентами у напрямку, перпендикулярному до орбіти, є майже нульовою. Ретроградний напрям обертання обох компонент пари (2110) Moore-Sitterly – (44612) 1999 RP27 також може свідчити про обертальний поділ батьківського тіла ([Polishook, 2014](#)).

Велика кількість подвійних систем була виявлена серед малих астероїдів Головного поясу та навколоземних астероїдів ([Pravec & Harris, 2007](#)). Подвійні системи, утворені внаслідок дії ЯОРП-ефекту, можуть у подальшому розпадатися на астероїдні пари через подальшу дію ефекту ЯОРП, який змінює швидкість обертання системи, або гравітаційні збурення з боку інших тіл.

Важливим аспектом у розумінні механізмів формування астероїдних пар стало вивчення масових співвідношень компонент пари  $\mu = m_1 / m_2$  та їхніх періодів обертання  $P$ . Фотометричні дослідження 32 астероїдних пар виявили, що головні компоненти в астероїдних парах із масовим співвідношенням  $\mu \ll 0.2$  мають періоди обертання, близькі до критичних ([Pravec et. al., 2010](#)). Подальше дослідження ([Pravec et. al. 2019](#)) на основі аналізу 93 астероїдних пар показало, що більшість пар формуються через обертальний поділ, і цей процес залежить від масового співвідношення компонент пари. На основі теорії еволюції подвійних систем ([Sheeres, 2007](#)) ці дані стали важливим свідченням на користь того, що астероїдні пари формуються через обертальний поділ батьківського астероїда з утворенням прото-подвійної системи, яка згодом розпадається під впливом власної внутрішньої динаміки невдовзі після формування.

Так, системи з  $\mu$ , меншими за  $\sim 0.2$ , мають додатну вільну енергію (визначається як повна енергія за вирахуванням власних гравітаційних енергій зв'язку кожної компоненти) і можуть розпадатися під дією внутрішньої динаміки, тоді як системи з більшими масовими

співвідношеннями мають від’ємну вільну енергію і не здатні до розпаду. По мірі наближення масового співвідношення системи до цієї межі кінетична енергія, яка необхідна для відділення вторинної компоненти, вилучається із обертальної енергії первинної, що в свою чергу призводить до уповільнення її обертання. Це означає, що первинні компоненти пар із  $\mu \ll 0.2$  мають обертатися зі швидкостями, близькими до критичних, натомість при наближенні масового співвідношення до 0.2 обертання первинної компоненти уповільнюється. Поза цією межею розпад подвійної системи стає неможливим.

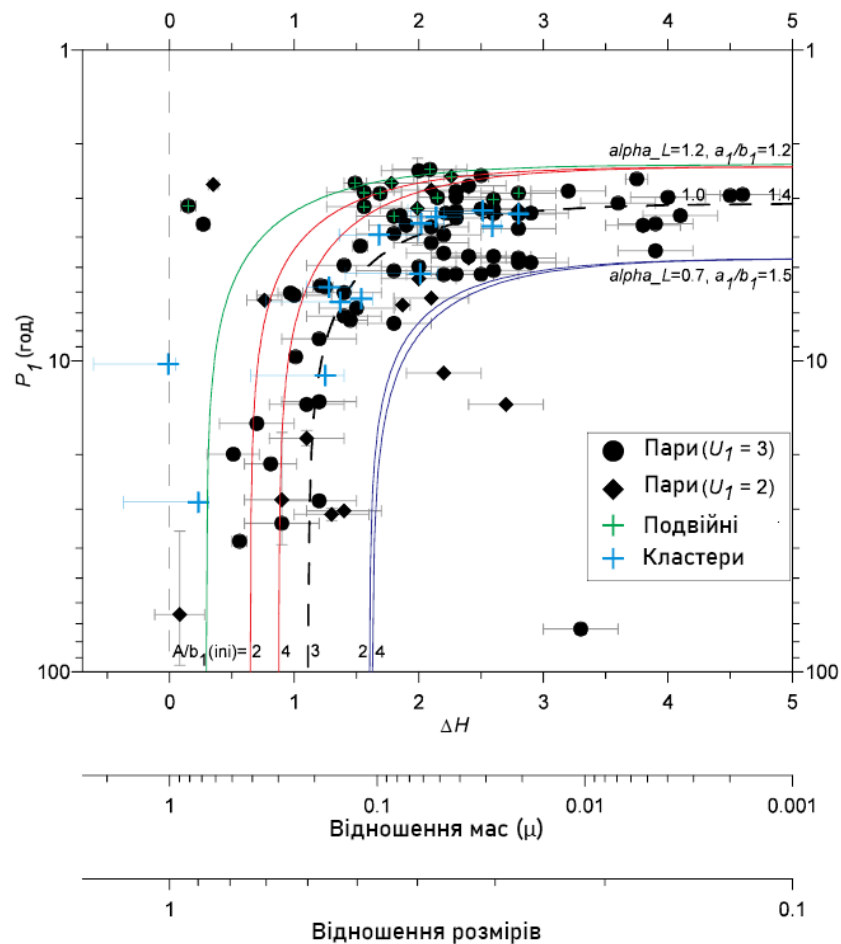


Рисунок 1.13 Період обертання головних компонент та відношення мас компонент астероїдних пар.  $\alpha_L$  – нормований момент імпульсу системи,  $a_1/b_1$  – видовженість головної компоненти системи,  $U$  – якість визначення періоду осьового обертання головної компоненти.

Із 93 досліджених астероїдних пар 89 узгоджуються із залежністю “ $P_1 - \mu$ ”, отриманою на основі теорії утворення астероїдних пар внаслідок обертового поділу (рис. 1.13). Якщо масове співвідношення мале, вторинна компонента віддаляється, і формується астероїдна пара, тоді як при високому масовому співвідношенні система залишається подвійною.

### 1.5. Джерела походження метеоритів

Метеорити являють собою унікальне джерело інформації про формування та еволюцію Сонячної системи. Особливу цінність мають метеорити, для яких є наявні дані фото- та відеофіксації відповідних метеорних явищ, за якими можливо обчислити доатмосферну орбіту батьківських метеороїдів, що у свою чергу дає змогу встановити прямий зв'язок метеорита з його джерелом походження в космосі. Окрім того, дослідження метеоритів дозволяє краще зрозуміти не лише їхнє походження, але й процеси формування речовини в ранній Сонячній системі, а також еволюцію астероїдів та їхніх популяцій у Головному поясі.

Визначення орбіт метеороїдів перед їхнім падінням на Землю в якості метеорита є складним завданням, яке потребує розгорнутої мережі камер спостереження та сучасних обчислювальних методів. У 1959 році в Чехословаччині було зафіксовано падіння метеорита Příbram, що увійшов в історію як перший об'єкт, для якого вдалося визначити орбіту за допомогою інструментальних спостережень, та який став важливим етапом у розвитку метеорної астрономії (Cepplecha, 1961). Наступним вагомим досягненням стало визначення орбіти метеорита Lost City, що впав у США в 1970 році, і падіння якого було зафіксоване камерами мережі Prairie Network. Подальші визначення орбіт включали метеорити Innisfree (1977, Канада) та Peekskill (1992, США). З того часу кількість метеоритів з відомими орбітами постійно зростає завдяки розширенню мереж спостереження за болідами, таких як: European Fireball Network, FRIPON (Fireball Recovery and Inter-Planetary

Observation Network), The Nordic Meteor Network – у Європі; Desert Fireball Network в Австралії; NASA All-Sky Fireball Network у США (Borovička et al., 2015).

Станом на сьогодні кількість метеоритів із визначеними орбітами нараховує більше 70 зразків. Таблиця 2 в Jenniskens & Devillepoix (2024) надає список посилань на 75 метеоритів, орбіти яких були визначені на основі даних, отриманих спеціалізованими мережами спостереження за болідами або іншими засобами спостереження. Список із 55 орбітами, які були опубліковані в наукових працях, наведений у <https://www.meteoriteorbits.info/>.

Одним із методів, який дозволяє кількісно оцінити подібність орбіт, є метод оцінки величини за  $D_{SH}$  – критерієм, запропонованим для порівняння орбіт метеорних потоків (Southworth i Hawkins, 1963). Він базується на обчисленні різниці орбітальних елементів: перигелійної відстані, ексцентриситету, нахилу, аргументу перигелія та довготи висхідного вузла. Існує низка варіацій та модифікацій оригінального критерію (Drummond, 1981; Jopek, 1993; Jopek et al. 1999), які широко застосовуються для пошуку і відбору астероїдів і комет із орбітами, подібними до орбіт метеороїдів. Так,  $D_{SH}$ -критерій був використаний для визначення можливої асоціації між розрахованою орбітою метеороїда Cavezzo та навколосемним астероїдом 2013 VC10 (Gardiol et al., 2021). Також на основі  $D_{SH}$ -критерію астероїди 2011 EO40 або (86039) 1999 NC43 були запропоновані як можливі батьківські астероїди для челябінського метеорита (Borovička et al., 2013; de La Fuente Marcos & de La Fuente Marcos, 2014).

Однією з важливих проблем є те, що орбіти малих тіл змінюються з часом через збурення, тому ступінь подібності орбіт за  $D_{SH}$ -критерієм на момент визначення орбіти метеороїда не обов'язково свідчить про спільне походження. Тому для встановлення можливого зв'язку між орбітами

метеороїдів та астероїдів додатково використовують чисельні методи моделювання орбітальної еволюції. У таких моделюваннях досліджують або поведінку критерію у часі, або відносну відстань та швидкість, намагаючись знайти кандидати з мінімальними відхиленнями від метеороїда. Так,  $D_{SH}$ -критерій був використаний для пошуку та відбору потенційних батьківських тіл метеорита Annama, а за результатами чисельних моделювань орбітальної еволюції було вказано на його можливу асоціацію з астероїдом (672457) 2014 UR116 (Trigo-Rodríguez et al., 2015). У роботі Hlobik, & Tóth (2024) було проведено дослідження динамічної стабільності 40 метеоритів із визначеними орбітами і, крім того, перевірено результати попередніх досліджень із пошуку їхніх можливих батьківських тіл. Для 27 метеороїдів із стабільною орбітальною еволюцією було запропоновано три кандидати в батьківські тіла за  $D_{SH}$ -критерієм. Важливим висновком роботи стало те, що зі зростанням кількості відомих астероїдів і уточненням їх орбіт пошук батьківських тіл метеоритів може потребувати повторного аналізу. Так, для 7 метеоритів із вибірки було запропоновано кращі кандидати у споріднені тіла на основі  $D_{SH}$ -критерію, оскільки альтернативні кандидати було відкрито вже після публікації оригінальних робіт. Для трьох метеороїдів було зафіксовано зростання значення  $D_{SH}$  для оригінальних кандидатів із часом у моделюваннях їхньої еволюції в минуле, що дає підстави вважати початкову близькість кандидатів за метрикою випадковою.

Ці результати вказують на важливість чисельних моделювань для перевірки відібраних кандидатів та збільшення їх надійності. Хоча відбір за подібністю орбіт дозволяє окреслити потенційні батьківські тіла, їх чисельне моделювання надає додаткову інформацію і теоретично дозволяє встановити надійніший зв'язок метеоритів із їхнім джерелом походження в космосі. Водночас, як правило, низька точність визначення орбіти метеороїдів у порівнянні з астероїдами та складна динаміка малих тіл поблизу планет та резонансів ускладнюють виявлення таких асоціацій.

## 1.6. Проблема астероїдної небезпеки

Астероїдна небезпека є однією з ключових загроз для Землі, оскільки зіткнення з астероїдами хоч і відносно рідкісні, але можуть мати катастрофічні наслідки. Відомим історичним прикладом є Тунгуська подія 1908 року, викликана входом у земну атмосферу ймовірно 50-метрового тіла. У результаті вибуху тіла в атмосфері на висоті близько 8 км було знищено ліс на площі 25×40 км (Foschini et al., 2018, Jenniskens et al., 2019). Іншим відомим прикладом астероїдної небезпеки є вибух 20-метрового астероїда над Челябінськом у 2013 році, що спричинив ударну хвилю, яка пошкодила будівлі і поранила близько 1500 людей (Brown et al., 2013). Одним із головних факторів вимирання 75% всіх видів живих істот на Землі 65 млн років тому стало падіння тіла, названого Чиксулуб, розміром 10-14 км (Morgan et al., 1997).

Потенційно небезпечними об'єктами вважають тіла, які мають мінімальну міжорбітальну відстань із Землею, меншу за 0.05 а.о. (приблизно 7.5 млн км), а їхні розміри достатні, щоб спричинити значні руйнування у разі зіткнення. Критерій розміру задають через абсолютну зоряну величину  $H \leq 22$  зор.вел., що відповідає діаметру  $\geq 140$  м для астероїдів з типовими значеннями альbedo  $p = 0.14$ . За оцінками, астероїди розміром 140 м і більше можуть завдати значних руйнувань континентального масштабу, а кілометрові і більші – призвести до глобальних наслідків, таких як кліматичні зміни, вимирання та знищення людської цивілізації (рис. 1.14) (Morrison, 2004).

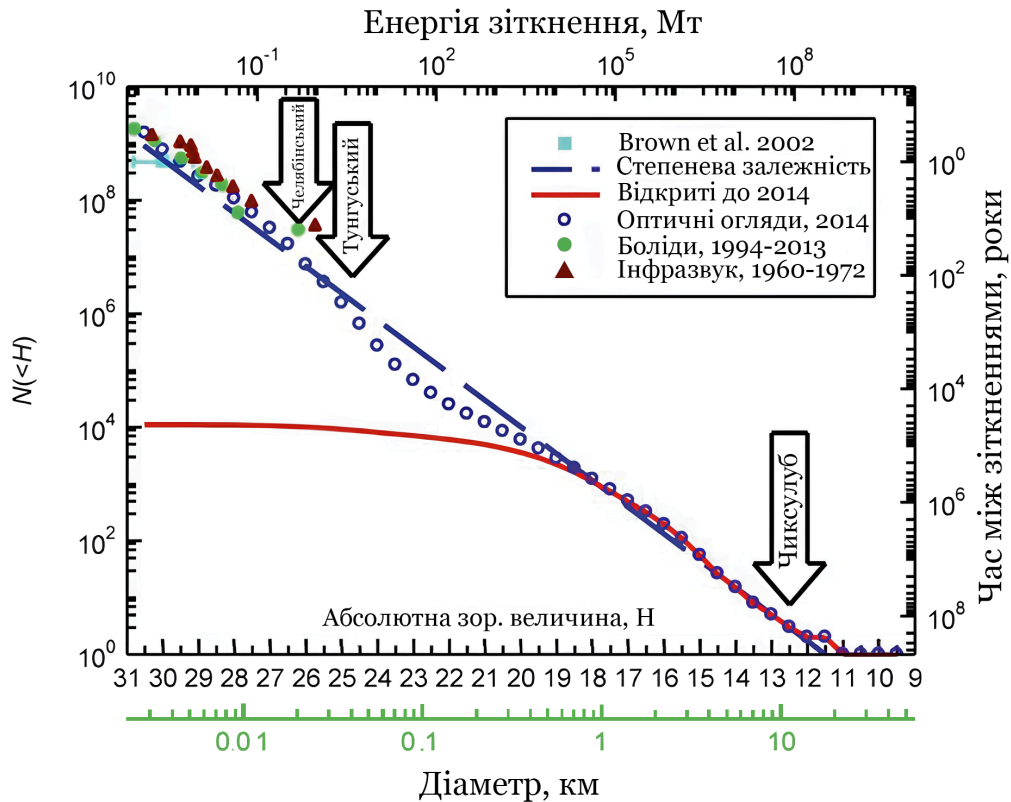


Рисунок 1.14 Інтервал між зіткненнями із Землею та загальна кількість малих тіл в залежності від їхнього розміру/абсолютної зоряної величини/енергії зіткнення (Harris & D’Abramo, 2015).

Початок систематичному пошуку АНЗ поклали ініціативи на зразок Spaceguard Survey, рекомендованої Конгресом США у 1998 році, метою якої було виявити  $\geq 90\%$  АНЗ діаметром понад 1 км за наступні 10 років (<https://nap.nationalacademies.org/read/12842/chapter/2>). Хоча ціль не була досягнута у визначені строки, впродовж останніх років великі огляди неба (Catalina, Pan-STARRS, ATLAS) значно збільшили кількість відкритих АНЗ (рис. 1.15), інфрачервона космічна спостережна програма NEOWISE поліпшила знання про їхні розміри і теплові властивості, а дані космічного телескопу Gaia покращили точність визначення їхніх орбіт. Також неодноразово уточнювались оцінки загальної кількості АНЗ. Оцінки на основі інфрачервоних спостережень NEOWISE (Mainzer et al., 2011) та на основі методів статистичного моделювання (Harris & D’Abramo, 2015); Harris & Chodas, 2021) вказують на те, що загальна кількість АНЗ із діаметром  $D > 1$

км має становити близько 940 ( $\pm 10$ ), з яких  $\sim 90\%$  вже відкрито. Таким чином, найбільші астероїди, які могли б становити глобальний ризик у разі зіткнення, наразі майже всі відомі. Натомість із астероїдів у діапазоні середніх розмірів 140 м – 1 км, кількість яких за оцінками (Mainzer et al., 2012; Harris & D’Abramo, 2015; Granvik et al., 2018) становить близько 30 тисяч об’єктів, відкрито приблизно 38% (Grav et al., 2023). Тобто більшість таких астероїдів залишаються неідентифікованими. Перспективним проектом найближчих років має стати космічна місія NASA NEO Surveyor – інфрачервоний космічний телескоп наступного покоління, спеціально призначений для пошуку астероїдів діаметром  $\sim 50\text{--}140$  м. Очікують, що NEO Surveyor дозволить за десятиліття знайти  $>90\%$  АНЗ розміром понад 140 м, що має суттєво знизити невизначеність в оцінках астероїдної небезпеки.

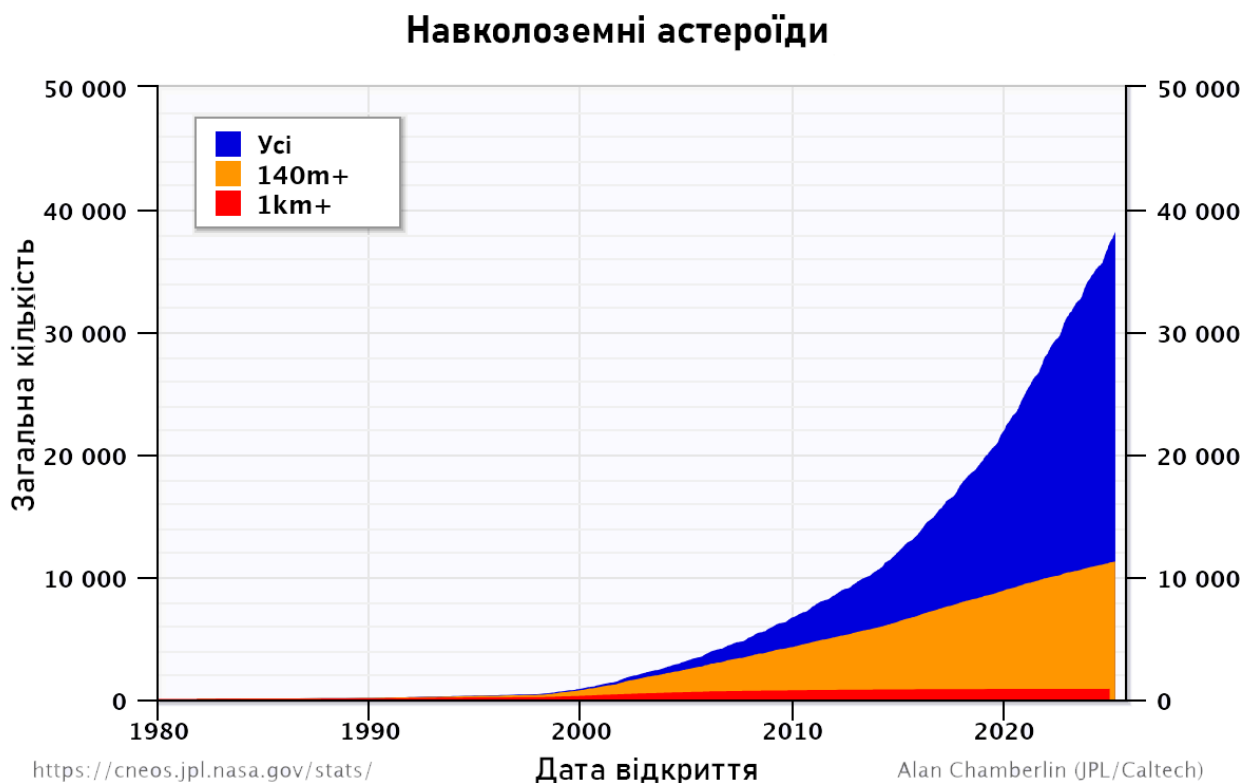


Рисунок 1.15 Сукупна кількість відкритих навколоземних астероїдів розміром: понад 1 км (червоний колір), від 140 м до 1 км (помаранчевий) і менше 140 м (синій).

З відомих АНЗ, близько 2500 відносяться до потенційно небезпечних, із них невелика кількість (близько 30) має кумулятивну ймовірність  $> 0.001$  зіткнення із Землею впродовж наступного століття (<https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>). Як правило, з новими спостереженнями орбіти таких об'єктів уточнюються, звужуючи їхні можливі еволюційні шляхи, що призводить до зменшення їхньої потенційної загрози. Проте на більших масштабах часу (століття й більше) гравітаційні збурення, ефект Ярковського та інші чинники можуть зрештою змінити орбіти деяких астероїдів і підвищити ризик зіткнення в майбутньому. Саме тому проблему астероїдної небезпеки розглядають у довгостроковій перспективі, що вимагає постійного моніторингу орбіт астероїдів.

Космічні місії до малих тіл відіграють важливу роль у дослідженні астероїдної небезпеки. Так, апарат місії NEAR Shoemaker (NASA) вперше в історії вийшов на орбіту АНЗ (433) Eros та здійснив м'яку посадку на його поверхню. За отриманими з місії даними, пористість астероїда була оцінена у 20-30% ([Wilkison et al., 2002](#)). Японська місія Hayabusa вперше доправила на Землю зразки з астероїда (25143) Itokawa, а розрахована густина з аналізу даних місії показала високу пористість речовини у  $\sim 40\%$  ([Fujiwara et al., 2006](#)). Ці місії стали першими підтвердженнями, що багато АНЗ є не монолітними тілами, а великою купою окремих каменів, які зібрані до купи під дією взаємної гравітації, що має суттєві наслідки для вибору стратегії планетарного захисту. Місія OSIRIS-REx дослідила потенційно небезпечний астероїд (101955) Bennu, зібравши зразки ґрунту й уточнивши його орбіту з безпрецедентною точністю. Завдяки цим даним було розраховано ефект Ярковського й отримано найточнішу оцінку ймовірності зіткнення Бенну із Землею у наступні століття ( $\sim 0.057\%$  до 2300 року) ([Farnocchia et al., 2021](#)). Першу практичну демонстрацію технології захисту від астероїдів здійснила місія DART (Double Asteroid Redirection Test), яка 26 вересня 2022 року в результаті зіткнення із малим супутником астероїда (65803) Didymos –

Dimorphos змінила його період обертання на 32 хвилини, що експериментально довело дієвість кінетичного методу відхилення як засобу планетарного захисту (Cheng et al., 2023). Аналіз показав, що викид великої кількості фрагментів в результаті удару підвищив ефективність поштовху астероїда космічним апаратом у кілька разів, що надзвичайно важливо для прогнозування результатів подібних засобів у майбутньому (Daly et al., 2023).

## Висновки до розділу

Кеплерівські елементи орбіт малих тіл не є статичними, а змінюються під впливом гравітаційних та негравітаційних ефектів. Основними проявами гравітаційного впливу є резонанси середнього руху та вікові резонанси, які можуть змінювати та дестабілізувати орбіти малих тіл та призводити до міграції тіл між динамічними групами. Ефект Ярковського за тривалі проміжки часу призводить до змін орбіт астероїдів та метеороїдів, врахування чого є критично важливим для дослідження динаміки астероїдних пар та пояснення механізмів доставки метеоритів на Землю. ЯОРП-ефект є головним чинником зміни періодів осьового обертання невеликих астероїдів, що може призводити до їх надкритичного обертання й руйнування, формування подвійних систем та утворення астероїдних пар. Характерний часовий масштаб впливу ЯОРП-ефекту становить близько десяти мільйонів років для астероїдів кілометрового розміру.

Астероїдна пара може утворитися в результаті катастрофічного зіткнення астероїдів, безпосереднього обертального поділу астероїда під дією ЯОРП-ефекту або в результаті розпаду подвійної системи. Результати досліджень вказують на те, що розпад подвійних систем є основним джерелом утворення астероїдних пар. Кандидати в астероїдні пари відбирають на основі подібності орбітальних елементів астероїдів, а потім верифікують шляхом чисельного моделювання їхніх орбіт у минуле. Головним критерієм парності є наявність у минулому тісних зближень між компонентами пари із малими відносними відстанями і швидкостями. Відомі

астероїдні пари мають оцінений вік формування від кількох десятків до кількох мільйонів років.

Метеорити з інструментальними спостережними даними про траєкторію метеороїда в атмосфері дають унікальну можливість визначати їхню доатмосферну орбіту та встановлювати зв'язки з астероїдами у космосі. Відбір астероїдів з близькими до метеороїда орбітальними елементами й моделювання їхньої динаміки в минуле дозволяють шукати батьківські тіла метеороїдів, але обмежена точність орбіт метеороїдів і гравітаційні збурення від тісних прольотів повз планети ускладнюють цю задачу. Падіння астероїдів і метеороїдів на Землю становить важливу проблему астероїдної небезпеки. Сучасні дослідження цієї проблеми охоплюють огляди неба для пошуку тіл на небезпечних орбітах, покращення точності моделювань орбіт для визначення рівня загрози та розробку методів відхилення небезпечних астероїдів.

## РОЗДІЛ 2

### АСТЕРОЇДНІ ПАРИ

#### 2.1. Критерії відбору

##### 2.1.1. $d$ -критерій

Для виявлення астероїдів, які можуть бути потенційними компонентами астероїдних пар застосовується метрика, яка обчислює фазову відстань  $d$  між двома астероїдами на основі їхніх оскулюючих орбітальних елементів за наступною формулою (Nesvorný & Vokrouhlický, 2006):

$$d = na \sqrt{k_a \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + k_e (\delta e)^2 + k_i (\delta \sin i)^2 + k_\Omega (\delta \Omega)^2 + k_\varpi (\delta \varpi)^2}. \quad (2.1)$$

Тут велика піввісь  $a$ , ексцентриситет  $e$ , нахил  $i$ , довгота висхідного вузла  $\Omega$  і довгота перигелію  $\varpi$  є елементами Кеплера,  $(\delta a, \delta e, \delta \sin i, \delta \varpi, \delta \Omega)$  – різниця орбітальних елементів двох астероїдів,  $n$  – середній рух астероїда.

Коефіцієнти метрики підібрані таким чином, щоб приблизно зрівняти внесок за кожним параметром у результуючу відстань  $d$ . Значення коефіцієнтів  $k_a = 5/4$ ,  $k_e = k_i = 2$  визначені емпіричним шляхом (Nesvorný & Vokrouhlický, 2006). Оскільки швидкість вікової прецесії  $\Omega$  та  $\varpi$  є близькою для астероїдів Головного поясу, можна прийняти  $k_\Omega \simeq k_\varpi$  (Brouwer & Clemence 1961). Очікувані відмінності  $\delta \Omega$  і  $\delta \varpi$  складають кілька градусів, а типові значення  $(\delta a/a) \sim \delta e \sim \delta \sin i \sim 0.001 - 0.1$ , тому коефіцієнти приймаються на рівні  $k_\Omega = k_\varpi = 10^{-4}$  (Pravec & Vokrouhlický 2009).

Використання оскулюючих орбітальних елементів забезпечує виявлення потенційно молодих пар астероїдів із віком до 1 мільйона років (Nesvorný & Vokrouhlický, 2006). За більший проміжок часу гравітаційні збурення та негравітаційні сили мали б здебільшого знищити схожість між

оскулюючими орбітами. Для розрахунку відстані використовуються оскулюючі орбітальні елементи астероїдів, отримані за допомогою системи JPL Horizons (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>). Значення орбітальних елементів наведені для однієї й тієї ж епохи. За результатом обчислення відстаней формується список астероїдів із фазовою відстанню  $d$  менше заданого порогового значення.

### 2.1.2. Статистичні методи

Для оцінки надійності відібраних кандидатів використовують статистичні методи. Так, за допомогою підходу, запропонованого в роботі [Pravec & Vokrouhlicky \(2009\)](#) можна оцінити рівномірність розподілу фонові популяції, розрахувавши щільність орбіт астероїдів в околиці вибраного астероїда у просторі орбітальних елементів. Для цього обраховуються три об'єми, у центрі яких знаходиться кандидат в астероїдні пари. Розміри найбільшого об'єму розраховуються за 5 оскулюючими елементами як

$$\Delta a = \sqrt{\frac{10^{-5}}{k_a}} a \Delta \Omega, \Delta e = \sqrt{\frac{10^{-5}}{k_e}} a \Delta \Omega, \Delta \sin i = \sqrt{\frac{10^{-5}}{k_i}} \Delta \Omega. \quad (2.2)$$

При цьому припускається, що астероїди рівномірно розподілені за кутовими елементами  $\Delta \omega = \Delta \Omega = 2\pi$ . Менші об'єми визначаються як  $V_{1/2} = V_1 / 2^5 = V_1 / 32$ ,  $V_{1/4} = V_1 / 4^5 = V_1 / 1024$ , де  $V_1$  – це перший об'єм. Наступним кроком визначається кількість орбіт  $N_1, N_{1/2}, N_{1/4}$ , які потрапляють у кожний з трьох об'ємів. Для оцінки статистичної значущості мають значення лише астероїди з абсолютною зоряною величиною, яка дорівнює або є більшою за величину вторинного компонента, тому враховуються лише астероїди з абсолютною зоряною величиною  $H < H_2 + 0.5$ , де  $H_2$  – це абсолютна зоряна величина вторинної компоненти пари. Запас у  $\pm 0.5$  зоряних величин відносно  $H_2$  додається через типову невизначеність абсолютного блиску для астероїдів. На основі даних

про кількість орбіт, що потрапляють у найбільший об'єм  $V_1$ , локальна щільність орбіт навколо відібраного кандидата оцінюється як  $\eta = N_1 / V_1$ , а очікувана щільність у менших об'ємах задається як  $\eta V_{1/2}$  та  $\eta V_{1/4}$ . Тоді, за припущенням про рівномірний розподіл орбіт у заданому об'ємі, ймовірність  $P_b$  того, що в об'ємі знаходиться  $N_b$  або більше орбіт, задається біноміальним розподілом:

$$P_{1/2} = 1 - \sum_{i=0}^{(N_b-2)-1} \binom{N_1-2}{i} p_V^i (1 - p_V)^{N_1-2-i}, \quad (2.3)$$

де  $b=1/2$  та  $1/4$  для двох вкладених об'ємів,  $p_V = b^5$  є відношенням цих об'ємів до найбільшого (1/32, 1/1024). Значення задаються як  $(N_b - 2)$  та  $(N_1 - 2)$ , оскільки не враховуються орбіти самої астероїдної пари. За порогові значення ймовірності  $P_{1/2}$ , за яких нуль-гіпотеза про рівномірний розподіл орбіт може бути відкинута, обираються значення 0.01 для астероїдних пар із фазовою відстанню  $d < 10$  м/с, та 0.05 для астероїдних пар із  $d > 10$  м/с. Тобто, якщо ймовірність  $P_{1/2}$  низька, то спостережна кількість орбіт у фазовому просторі є несумісною із початковим припущенням про рівномірний розподіл орбіт у найбільшому об'ємі, на основі якої оцінювалася щільність  $\eta$ . Перевищення отриманої кількості орбіт у порівнянні з очікуваннями може свідчити про можливе існування більших структур в околиці пари, таких як астероїдні кластери та сімейства.

Оцінити ймовірність випадкової близькості орбіт двох астероїдів можна за методикою, запропонованою в роботах [Pravec & Vokrouhlicky \(2008\)](#), [Pravec & Vokrouhlicky \(2009\)](#). Так, ймовірність того, що дві орбіти опиняться в одному об'ємі  $V$  із щільністю орбіт  $\eta$  задається Пуассонівським розподілом та обчислюється як

$$P_2(V) = \frac{v^2}{2} e^{-v}, \quad (2.4)$$

де  $v = \eta V = \left(\frac{d}{R_0}\right)^5$  – очікувана кількість орбіт у заданому об’ємі.

Радіус 5-вимірної сфери  $d$  у просторі орбітальних елементів задається наступною формулою:

$$d = \left(\frac{8}{15}\pi^2 \frac{1}{v}\right)^{-1/5}, \quad (2.5)$$

а характерна відстань  $R_0$  між об’єктами за заданої щільності орбіт  $\eta$ :

$$R_0 = \left(\frac{8}{15}\pi^2 \eta\right)^{-1/5}. \quad (2.6)$$

Підставляючи (2.5) та (2.6) у (2.4), отримуємо наступну формулу для очікуваної кількості випадкових астероїдних пар із фазовою відстанню між компонентами не більше  $d$  у популяції:

$$P_2(V) = P_2(d) = \frac{N}{2} \left(\frac{d}{R_0}\right)^5 e^{-\left(\frac{d}{R_0}\right)^5}. \quad (2.7)$$

Астероїдна пара вважається статистично значущою, якщо кількість пар астероїдів із нормованою відстанню  $d/R_0$  значно менша за кількість таких пар, знайдених у популяції. Якщо відношення  $P_2/N_p \ll 1$ , то пара вважається статистично значущою. Тобто пари із малими фазовими відстанями, розташовані у зонах з низькою густиною орбіт, матимуть вищу статистичну значущість. При значеннях  $P_2/N_p \sim 0.1$ , очікується деяка кількість випадкових пар, які мають малу фазову відстань між компонентами, але при цьому не мають спільного походження.

## 2.2. Чисельне моделювання

Для перевірки отриманих потенційних пар застосовується чисельне моделювання. Принцип перевірки полягає у зворотному моделюванні орбіт компонент пари з метою виявити їхні взаємні тісні зближення, які характеризуються малими відносними швидкостями та відстанями. Через те, що кількість відібраних кандидатів є значною, для ефективної їхньої перевірки застосовується наступна двоетапна схема: спершу проводиться швидка попередня перевірка кандидатів із малою кількістю клонів, щоб оцінити наявність та час тісних зближень у минулому; після цього, для отримання остаточних результатів, проводиться моделювання із великою кількістю клонів та підвищеною точністю.

### 2.2.1. Створення клонів астероїдних пар

У моделюваннях компоненти пар представляються частинками (клонами), які мають початкові параметри в межах невизначеності орбітальних елементів астероїда. У даній роботі клони створюються за принципом, запропонованим у [Vokrouhlický et al. \(2017\)](#). Так, для отримання початкових орбітальних елементів клонів  $\Sigma$ , використовується коваріаційна матриця орбітальних параметрів, яка має наступний вигляд:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

де  $\sigma_{ij} = \text{Cov}(X_i, X_j)$  – коваріації відповідних орбітальних елементів. Коваріаційна матриця використовується для опису взаємозв'язків між величинами в багатовимірному просторі. Вона містить інформацію про дисперсії кожної з величин та їхні попарні коваріації. За допомогою методу

розкладу Холецкого можна отримати нижню трикутну матрицю  $T$ , яка задовольняє умові  $TT^T = \Sigma$ , де  $\Sigma$  – нормальна матриця. В такому випадку початкові стани клонів у межах невизначеності орбітальних елементів можуть бути отримані наступним чином:

$$E = T^T z + E_*, \quad (2.9)$$

де  $z$  – шестивимірний вектор, компоненти якого є випадковими нормованими відхиленнями від нормального розподілу, а  $E_*$  – номінальне рішення для орбітальних елементів. Номінальні орбітальні параметри астероїдів та їхні коваріаційні матриці отримують за допомогою інтерфейсів бази даних [JPL Horizons](#).

### 2.2.2. Моделювання орбіт за допомогою REBOUND

Для чисельного моделювання орбіт ми використовували ([Kyrylenko et al., 2021](#)) пакет REBOUND доступний для мов програмування Python та C ([Rein & Liu, 2012](#)). Він надає можливість використовувати різноманітні інтегратори задачі  $N$  тіл, серед яких були обрані інтегратори WHFast і IAS15. Інтегратор WHFast ([Rein & Tamayo, 2015](#)) використано переважно для пар із однозначними та унікальними зближеннями, а інтегратор IAS15 ([Rein & Spiegel, 2015](#)) було застосовано для пар зі складною динамічною поведінкою. Вибір обґрунтований тим, що попри те, що IAS15 суттєво повільніший, його високий порядок точності з адаптивним кроком інтегрування за часом забезпечує оптимальні результати з похибками, близькими до машинної точності. Величина кроку інтегрування складала 1–3.65 діб для інтегратора WHFast, тоді як мінімально допустимий крок інтегрування за часом для IAS15 обмежувався 0.1 доби. Часовий крок підбирався індивідуально для кожної пари залежно від радіуса сфери Гілла найбільшого компонента пари та взаємної швидкості клонів під час зближень.

Для точного розрахунку еволюції пари, особливо під час тісних зближень між компонентами пари, важливо враховувати їхню взаємну гравітаційну взаємодію. Моделювання клонів із урахуванням їхньої маси унеможливорює симуляцію більше ніж двох клонів для однієї пари в рамках однієї симуляції. Проте цей підхід може забезпечити точніші результати у випадках, коли відбувається декілька тісних зближень між компонентами пари, оскільки взаємодія під час першого зближення може вплинути на подальшу динамічну еволюцію. У разі, якщо маса астероїда невідома, у першому наближенні вона оцінюється з радіуса астероїда  $R$  і його густини  $\rho$  за формулою:

$$m_{ast} = 4/3\pi R^3 \rho, \quad (2.10)$$

де густина приймається рівною  $2 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , якщо інше значення не вказане у системі JPL HORIZONS.

Для астероїдів із невідомим радіусом його значення обчислюється за абсолютною зоряною величиною астероїда  $H$  і його геометричним альбедо  $p_v$  за наступною формулою (Harris & Harris, 1997):

$$R_{ast} = \frac{1329}{\sqrt{p_v}} \cdot 10^{-0.2H} [km]. \quad (2.11)$$

У разі якщо альбедо астероїда невідоме, його значення припускається як 0.15.

Модель для обчислень включає всі планети Сонячної системи та три наймасивніші астероїди в Головному поясі астероїдів: Цереру Весту та Палладу. Як було показано в роботі Galad (2012), гравітаційні збурення від цих малих тіл можуть істотно впливати на динаміку астероїдів. Планети з супутниками представлені їхніми барицентрами. Моделювання також враховує вплив ефекту Ярковського, основним проявом якого є збільшення великої півосі для астероїдів із прямим обертанням, або її зменшення у

випадку ретроградного обертання. Оскільки фізичні та орбітальні параметри астероїдів часто є не точними, достатньо використовувати спрощену формулу для опису ефекту Ярковського.

Для оцінки ефекту Ярковського, що впливає на астероїд, було використано підхід, запропонований у роботі [Golubov et al. \(2016\)](#). Для цього було застосовано рівняння (41) даної роботи до сферичного тіла, що призводить до наступного виразу для сили Ярковського:

$$F_{Yark} = (1 - A)\Phi R^2 \frac{-\pi}{c} \int_0^{2\pi} \cos \Psi p_{\tau}^{Yark} d\Psi. \quad (2.12)$$

Безрозмірний тиск Ярковського  $p_{\tau}^{Yark}$  визначається на основі чисельних моделювань, представлених на Рисунок 4 в [Golubov et al. \(2016\)](#). Використовуючи апроксимацію за зеленими лініями у трьох правих панелях цього рисунка, отримуємо приблизний вираз для  $p_{\tau}^{Yark}$  при тепловому параметрі  $\theta = 1$ ,

$$p_{\tau}^{Yark} \approx 0.033 \cos \varepsilon \cos^2 \Psi. \quad (2.13)$$

Для теплових параметрів  $\theta$ , що значно відрізняються від одиниці,  $p_{Yark}$  може бути суттєво меншим. Однак з Таблиці 1 в [Golubov & Krugly \(2012\)](#) можна побачити, що для астероїдів Головного поясу, вкритих реголітом, типовим є значення  $\theta \sim 1$ , отже  $p_{\tau}^{Yark}$  близький до або дещо менший за рівняння (A.2) з апендиксу [Golubov & Krugly \(2012\)](#). Підставляючи рівняння (A.2) з апендиксу в рівняння з апендиксу (A.1), виконуючи інтегрування та припускаючи нахил осі обертання  $\varepsilon=0$ , отримуємо:

$$F_{Yark0} \approx 0.033 \frac{8\pi}{3} \frac{(1 - A)\Phi R^2}{c} = 0.28 \frac{(1 - A)\Phi R^2}{c}, \quad (2.14)$$

де  $R$  – радіус астероїда,  $c$  – швидкість світла,  $\Phi = \Phi_0 \frac{a_0^2}{a^2}$  – сонячна стала на орбіті астероїда,  $\Phi_0$  – сонячна стала при  $a_0 = 1$  а.о.,  $a$  – велика піввісь орбіти астероїда. Якщо  $\varepsilon$  є великим або  $\theta$  значно відрізняється від одиниці, фактичне значення ефекту Ярковського може бути в діапазоні від  $-F_{Yark0}$  до  $F_{Yark0}$ .

Щоб визначити напрям цієї сили, також необхідно знати напрямок обертання астероїда навколо його осі, який для більшості астероїдів вибірки є невідомим. З цієї причини для кожного клона, який представляє один з можливих станів астероїда, генерується випадкове значення сили Ярковського, розраховане за формулою (2.14), помноженої на постійну величину з рівномірним розподілом у межах  $[-1,1]$ . Ефект ЯОРП не враховується, оскільки в роботі шукаються пари з віком  $\leq 1$  млн років, що набагато менше типових часових масштабів, на яких вплив ефекту ЯОРП є суттєвим (Golubov & Scheeres, 2019).

### 2.2.3. Моделювання орбіт за допомогою GENGA

У подальшому ми (Kyrylenko et al., 2024) використовували поєднання двох пакетів для розрахунку еволюції орбіт: REBOUND і Gravitational Encounters with GPU Acceleration (GENGA) (Grimm & Stadel, 2014; Grimm et al., 2022), обидва з відкритим вихідним кодом. Таке поєднання було продиктоване особливостями роботи даних пакетів: REBOUND здатний швидко обраховувати орбітальну еволюцію невеликої кількості тіл, але значно сповільнюється при зростанні їх кількості, у той час як GENGA програє у швидкодії REBOUND для малої кількості тіл, але набагато краще масштабується зі зростанням їхньої кількості. Тому REBOUND був використаний для попередніх розрахунків, а GENGA використовувалася для отримання основних результатів із великою статистикою. Такий підхід став можливим завдяки переходу на графічні процесори, що дозволило значно покращити ефективність розрахунків. У цьому підході REBOUND

використано для проведення моделювань на 1 мільйон років у минуле з 10000 парами клонів для кожного обраного кандидата в пари. Моделювання проводилися за допомогою інтегратора Mercurius, який використовує симплектичний інтегратор Wisdom-Holman (Rein і Tamayo, 2015) для загальної динаміки та перемикається на інтегратор IAS15 (Rein і Spiegel, 2015) з адаптивним кроком інтегрування для коректного обчислення тісних зближень.

Модель для обчислень включає всі планети Сонячної системи та три наймасивніші астероїди в Головному поясі астероїдів: Цереру, Весту та Палладу. Модель також включає спрощені поправки загальної теорії відносності для гравітаційних сил (Tamayo et al., 2020) і негравітаційного ефекту Ярковського, які реалізовані в бібліотеці REBOUNDx (<https://reboundx.readthedocs.io>). Ефект Ярковського використовується в його спрощеній формі (Veras et al., 2019) і обчислює верхню межу дрейфу великої півосі для тіла із заданими параметрами: густиною  $\rho$ , радіусом тіла  $R_{\text{ast}}$  і геометричним альбедо  $p_v$ . Отримані значення рівномірно розподіляються між додатним і від'ємним дрейфом великої півосі.

Попередні моделювання використовувались для аналізу відібраних кандидатів на наявність тісних зближень між компонентами пари, їхньої відносної швидкості та відстані, а також розподілу зближень у часі. У разі, якщо кандидат у пари демонструє тісні зближення на першому кроці, його орбітальна еволюція повторно моделюється за допомогою пакету GENGA. GENGA – це інтегратор  $N$  тіл, написаний мовою CUDA-C, що використовує графічні прискорювачі. Основна перевага графічних прискорювачів полягає в тому, що вони дозволяють ефективно інтегрувати системи, які містять велику кількість масивних тіл та пробних частинок. У нашому випадку компоненти астероїдної пари представлені пробними частинками, які гравітаційно не взаємодіють з іншими пробними частинками в системі, але на які гравітаційно впливають масивні тіла та інші негравітаційні сили. Кожна з компонент пар представлена 2000 клонів, що дає  $4 \cdot 10^6$  попарних комбінацій

клонів. Усі кандидати в астероїдні пари були проінтегровані на 1 мільйон років у минуле, за винятком тих, для яких були зареєстровані зближення близько до цієї межі часу, у разі чого час їхнього моделювання було продовжено до моменту припинення реєстрації зближень, або ж до обмеження у 1.5 мільйона років.

Моделювання проводилися з кроком інтегрування за часом 1–3.65 діб інтегратором шостого порядку. Модель включає в себе поправки загальної теорії відносності та ефект Янковського в його повній версії на основі [Vokrouhlický et al. \(2000\)](#). Оскільки повна версія потребує дані про швидкість осьового обертання астероїда, астероїди з невідомою частотою обертання були представлені клонами з рівномірним розподілом від  $0.5 \text{ год}^{-1}$  до  $0.04 \text{ год}^{-1}$  год. Це приблизно відповідає реальному розподілу для астероїдів із діаметрами  $0.2 \text{ км} \leq D \leq 2 \text{ км}$ , яких більшість у нашій вибірці. Для астероїдів з невідомими полюсними рішеннями нахил осі обертання вважався рівномірно розподіленим. Значення інших необхідних параметрів за замовчуванням, якщо вони невідомі, такі: випромінювальна здатність поверхні  $\epsilon = 0.9$ , густина  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ , питома теплоємність  $C = 500 \text{ Дж кг}^{-1}\text{K}^{-1}$ , альbedo  $p_v = 0.15$  і теплопровідність  $K = 1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Для того щоб зареєструвати тісні зближення, симуляції за допомогою пакету GENGA проводилися в спеціальному режимі, в якому тестові частинки, що представляють компоненти пари, поділяються на окремі групи ([Grimm et al., 2022](#)). В цьому режимі зближення між членами однієї і тієї ж групи не відслідковуються, що значно прискорює чисельні обрахунки. Зближення між різними групами відстежуються за допомогою вбудованої функціональності GENGA, яка базується на деревоподібному пошуку зближень на основі ієрархії обмежувальних об'ємів (BVH – bounding volume hierarchy), і в разі наявності зближення були записані для подальшого аналізу.

#### 2.2.4. Визначення тісних зближень

Зближення між тілами можна охарактеризувати у відносних відстанях та швидкостях, виражаючи їх в одиницях сфери Гілла та другої космічної швидкості. Сфера Гілла – це радіус сфери впливу, у межах якої гравітаційний вплив тіла сильніший за вплив Сонця. Радіус сфери Гілла можна обчислити за формулою:

$$R_{Hill} = a \sqrt[3]{\frac{m}{3M}}, \quad (2.15)$$

де  $a$  – велика піввісь орбіти,  $m$  – маса основного тіла,  $M$  – маса Сонця.

Друга космічна швидкість є мінімальною швидкістю, необхідною для виходу з-під гравітаційного впливу даного тіла. Її можна обчислити за формулою:

$$v_{esc} = \sqrt[3]{\frac{2Gm}{R}}, \quad (2.16)$$

де  $m$  – маса головного тіла,  $R$  – його радіус.

Оскільки для обчислення радіуса сфери Гілла та другої космічної швидкості необхідне значення маси тіла, вона розраховується через відомий або оцінений радіус тіла та його середню густину за формулою (2.10). Якщо немає інформації про густину або спектральний клас тіла, густина тіла задається як  $\rho = 2 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Для астероїдів із невідомим радіусом він визначається із абсолютної зоряної величини та геометричного альбедо за формулою (2.11).

В ідеальному випадку, компоненти астероїдних пар як гравітаційно незв'язані тіла повинні мати зближення в межах  $1R_{Hill}$ ,  $1v_{esc}$ : або тісне зближення з відстанями  $d < 1R_{Hill}$  і достатньою швидкістю, щоб мати можливість покинути сферу впливу головної компоненти ( $v > 1v_{esc}$ ), або мати

зближення з дуже малою відносною швидкістю  $v < 1v_{esc}$  і близькою відстанню до межі сфери Гілла. Оскільки орбіти астероїдів, а також сили, які діють на тіла, відомі з деяким ступенем невизначеності, виявити такі ідеальні зближення для більшості пар малоймовірно. Таким чином, ми вважаємо, що пара має тісні зближення, якщо взаємна відстань  $d \leq 5R_{Hill}$  та взаємна швидкість  $v \leq 2v_{esc}$  для компоненти з найбільшою масою. У випадках, коли пара демонструє гіршу збіжність, ці умови розширюються до  $10 - 20R_{Hill}$  та  $4 - 8v_{esc}$  (Pravec et al., 2019). Вік формування астероїдної пари розраховується як медіанний час розподілу зареєстрованих зближень, що задовольняють обрані умови. Похибки визначення віку формування визначаються як 5-й та 95-й процентилі розподілу.

### 2.3. Результати пошуку нових астероїдних пар

У якості зони пошуку та дослідження було обрано внутрішню частину Головного поясу астероїдів (від 2.0 до 2.5 а.о.). Вибір зони обумовлений тим, що це найбільш повно вивчена зона Головного поясу з високою щільністю орбіт астероїдів. За рахунок близького розташування до Землі (у порівнянні з іншими зонами поясу), у внутрішній частині відомо багато малих астероїдів, які утворюють пари завдяки обертовому поділу під впливом ефекту ЯОРП. Також ближче розташування до Сонця призводить до коротших ЯОРП-циклів, що є каталізатором утворення пар. Всі ці фактори у порівнянні з іншими зонами підвищують шанси знайти нові астероїдні пари.

З використанням метрики (2.1) було відібрано 500 потенційних кандидатів в астероїдні пари з фазовою відстанню  $d$  до 100 м/с. Для перевірки працездатності даного підходу була підрахована кількість відомих пар, що потрапили до вибірки. Для зіставлення отриманих кандидатів із відомими парами були використані база даних відомих пар Johnston Archive (Johnston, 2021), а також невеликі каталоги з Pravec et al. (2019). Із 500 знайдених кандидатів у пари 67 були ідентифіковані як уже відомі пари, що

становить понад 90 відсотків (67 із 72) пар у внутрішній частині Головного поясу астероїдів. Кандидати у пари, не наведені в жодному із джерел, були відібрані для подальшої перевірки.

### 2.3.1. Аналіз відомих астероїдних пар

Для перевірки ефективності й точності запропонованого підходу було проведено чисельні моделювання вибірки з 17 астероїдних пар з відомим віком формування, що були виявлені в ході дослідження, та оцінено час їхнього формування. Порівняння результатів з даними з літератури наведено на рис. 2.1 та в табл. 2.1. Отримані результати знаходяться в межах похибок, хоча самі похибки можуть відрізнятись від наведених у літературі для пар, для яких наявні тісні зближення, що сильно рознесені за часом. Деяка розбіжність може бути викликана зміною або уточненням орбіт астероїдів з моменту попередніх результатів, а також різними підходами до моделювання орбітального руху та врахування ефекту Ярковського.

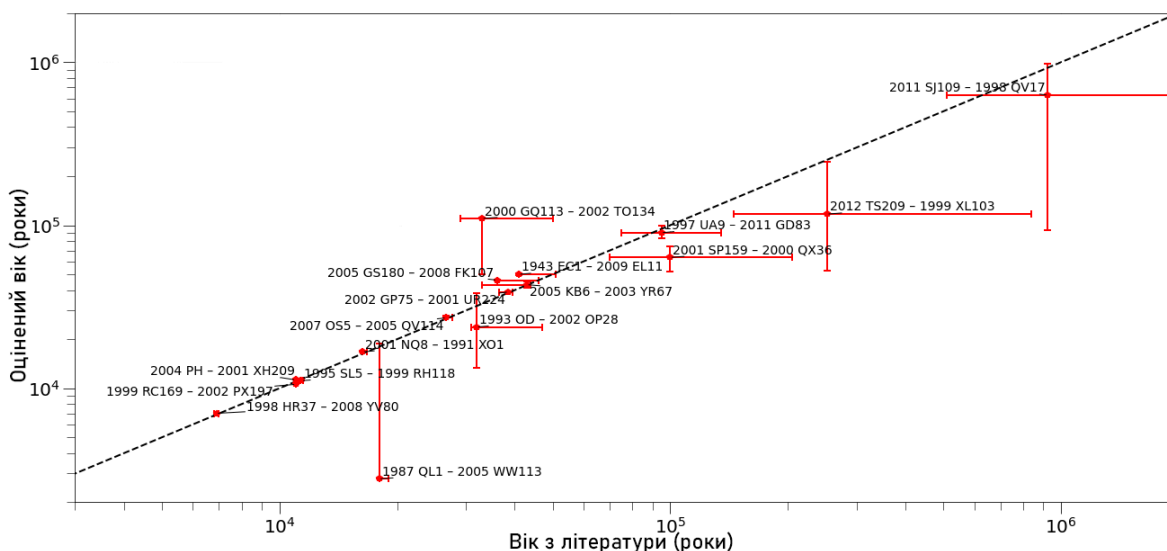


Рисунок 2.1 Порівняння обчисленого віку формування астероїдних пар із даними з літератури. На осі  $X$  відкладено час формування цих пар, взятий з літератури, а на осі  $Y$  – відповідний час, розрахований за нашим алгоритмом. Червоні лінії позначають межі похибок для обох випадків. Пунктирна лінія відображає випадок, коли обидва результати повністю узгоджуються між собою.

Таблиця 2.1 Порівняння визначеного віку формування пар із даними з літератури, показане на рис. 2.1.

№	Астероїд 1	Астероїд 2	Вік з літератури (тис. років)	Оцінений вік (тис. років)
1	1998 HR37	2008 YV80	$6.9^{+0.1}$	$7.0^{+0.1}_{-0.1}$
2	1999 RC169	2002 PX197	$11^{+0.1}_{-0.1}$	$10.8^{+0.1}_{-0.1}$
3	2004 PH	2001 XH209	11.1	$11.2^{+0.3}_{-0.1}$
4	1995 SL5	1999 RH118	$11.4^{+0.1}_{-0.1}$	$11.1^{+0.1}_{-0.1}$
5	1991 XO1	2001 NQ8	$16.34^{+0.04}$	$16.3^{+0.3}_{-0.5}$
6	1987 QL1	2005 WW113	$18^{+1.0}$	$18.0^{+1.0}_{-0.3}$
7	2007 OS5	2005 QV114	$26.7^{+0.8}_{-0.2}$	$27.0^{+1.0}_{-0.4}$
8	1993 OD	2002 OP28	$32.0^{+15.1}_{-1.0}$	$23.7^{+14.5}_{-16.3}$
9	2000 GQ113	2002 TO134	$33.0^{+17.5}_{-4.0}$	$114.1^{+1.0}_{-0.7}$
10	2005 GS180	2008 FK107	$36.0^{+10}_{-0.1}$	$46.1^{+0.3}_{-0.2}$
11	2002 GP75	2001 UR224	$40^{+10.2}$	$38.9^{+0.2}_{-0.1}$
12	1943 EC1	2009 EL11	$43.0^{+0.5}_{-0.2}$	$49.9^{+0.9}_{-0.7}$
13	2003 YR67	2005 KB6	$43.0^{+1.0}_{-1.3}$	$43.2^{+2.0}_{-1.7}$
14	1997 UA9	2011 GD83	$95.0^{+40.5}_{-20.2}$	$90.0^{+9.0}_{-6.0}$
15	2001 SP159	2000 QX36	$100.0^{+100.0}_{-30.0}$	$63.5^{+0.9}_{-0.2}$
16	2012 TS209	1999 XL103	$252.0^{+586}_{-107}$	$117.3^{+128.3}_{-64.2}$
17	2011 SJ109	1998 QV17	$925.0^{+1014}_{-416}$	$627.6^{+354.7}_{-533.9}$

### 2.3.2. Нові астероїдні пари

Наступним кроком було проведено чисельні моделювання для пошуку нових пар, які задовольняють умові тісних зближень. Результати цього пошуку представлені у двох статтях. У першій статті (Kyrylenko et al., 2021) ми використовували підхід до моделювання за допомогою REBOUND, описаний у підрозділі 2.2.2, і в якій було верифіковано метод на вибірці з відомих пар та знайдено 10 нових астероїдних пар. У другій нашій статті (Kyrylenko et al., 2024) моделювання виконано за допомогою програмного пакету GENGA, що описаний у підрозділі 2.2.3. Було знайдено 40 нових астероїдних пар, новий астероїдний кластер, а також було верифіковано результати для 10 пар, отриманих у попередній роботі (Kyrylenko et al., 2021).

Основні результати для 10 пар, отриманих у Kyrylenko et al. (2021), наведено на рис. 2.2, та у табл. 2.2. Розподіл тісних зближень між компонентами отриманих пар наведено на рис. 2.3. Використовуючи підходи, описані в підрозділі 2.1.2, виявлені пари були перевірені на рівномірність розподілу астероїдів фону та статистичну значущість (табл. 2.2). Усі пари пройшли тест на рівномірний розподіл астероїдів фону, однак пари 2003 RV20 – 2010 TH35 та 1999 WM4 – 2017 QD23 мали  $P_{1/2}$ , близький до граничних значень. Це може свідчити про те, що вони можуть бути частиною більших структур, таких як астероїдні кластери чи сімейства. Пара 1999 WM4 – 2017 QD23 також має високе значення показника  $P_2/N_p$ , що вказує на те, що ця пара може бути випадковою, але результати моделювань свідчать, що компоненти пари мають схожу орбітальну еволюцію та демонструють тісні зближення.

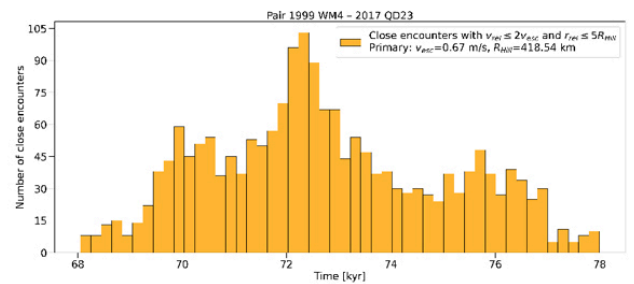
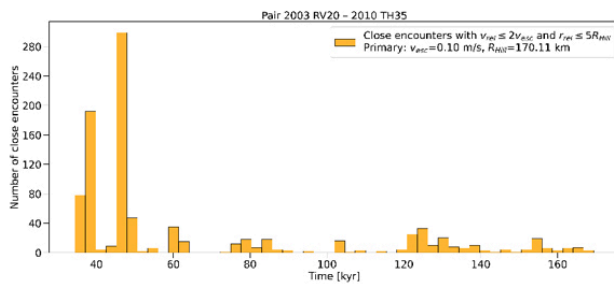
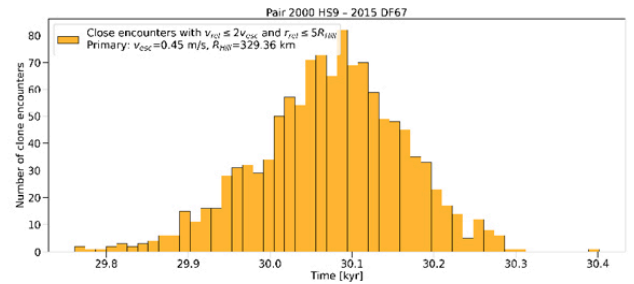
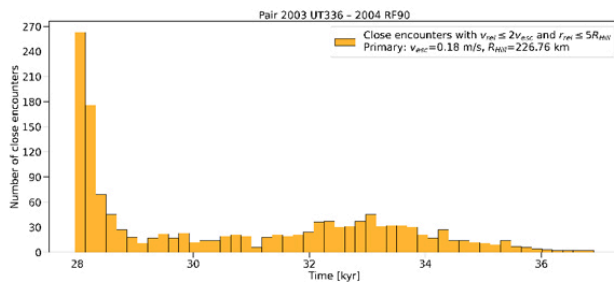
Оцінений вік формування 10 нових астероїдних пар знаходиться в межах 400 тис. років (рис. 2.2., табл. 2.2). Похибки оцінок віку обчислюються як 5-й та 95-й перцентилі розподілу віку формування і для даного інтервалу лежать в межах 10-20%. Достатньо молодий вік пар може бути пов'язаний з

використанням методики вибору кандидатів за оскулюючими елементами, малим значенням фазової відстані  $d$  між кандидатами, і також підсилюватися вимогою на тісні зближення перевірених клонів. Більшість пар у нашій вибірці містять хоча б один астероїд, відкритий впродовж останнього десятиліття, що може бути одним із пояснень, чому ці пари не були знайдені в попередніх дослідженнях.

Таблиця 2.2 Основні параметри нових астероїдних пар: показник кольору  $a^*$ ; абсолютна зоряна величина  $H$ ; співвідношення діаметрів  $D_2:D_1$  (меншого і більшого відповідно) астероїдів в парі; значення відстані у фазовому просторі  $d$ ; оцінка віку утворення пар; ймовірність числа орбіт, що оточують конкретну пару,  $P_{1/2}$ ; співвідношення  $P_2/N_p$ , яке дає ймовірність випадкового збігу орбіт двох неспоріднених астероїдів.

№	Ім'я астероїда	Показник кольору $a^*$	Абс. зор. вел. $H$	Відношення діаметрів	$d$ (м/с)	Вік формування (тис.років)	$P_{1/2}$	$P_2/N_p$
1	2004 RF90	$0.16 \pm 0.07$	17.1	1:2.2	13.5	$30.1^{+4.6}_{-2.0}$	1	0.068
–	2003 UT336	$0.19 \pm 0.13$	18.8	–	–	–		
2	2000 HS9	$0.10 \pm 0.04$	16	1:4.3	22.6	$30.1^{+0.15}_{-0.15}$	0.663	0.0003
–	2015 DF67	$-0.09 \pm 0.25$	19.2	–	–	–		
3	2003 RV20	–	17.7	1:1.5	9.39	$46.0^{+106.6}_{-8.3}$	0.012	0.047
–	2010 TH35	–	18.6	–	–	–		
4	1999 WM4	–	15.6	1:3.5	9.93	$72.4^{+4.1}_{-2.9}$	0.081	0.578
–	2017 QD23	–	18.3	–	–	–		
5	2002 CR55	–	15.9	1:3.6	6.94	$90.1^{+94.3}_{-31.3}$	0.423	0.002
–	2015 VP32	–	18.7	–	–	–		

6	2015 XO12	$-0.03 \pm 0.05$	17.8	1:1.3	1.86	$132.2^{+0.2}_{-0.4}$	1	8.00E-05
–	2001 WY4	–	18.4	–	–	–	–	–
7	2006 BJ193	$0.06 \pm 1.08$	17.5	1:2.1	23.5	$188.1^{+7.5}_{-9.3}$	0.154	0.071
–	2017 FE106	–	19.3	–	–	–	–	–
8	1981 VL	–	14.4	1:5	22.2	$263.7^{+16.3}_{-40.8}$	0.395	0.123
–	2013 CX44	–	17.9	–	–	–	–	–
9	1999 XF200	–	14.7	1:1.8	14.9	$265.8^{+37.7}_{-47.5}$	0.345	0.083
–	2008 EL40	$0.20 \pm 0.04$	16.3	–	–	–	–	–
10	2000 XH16	$0.14 \pm 0.03$	15	1:2	14.6	$291.8^{+70.1}_{-35.3}$	0.393	0.028



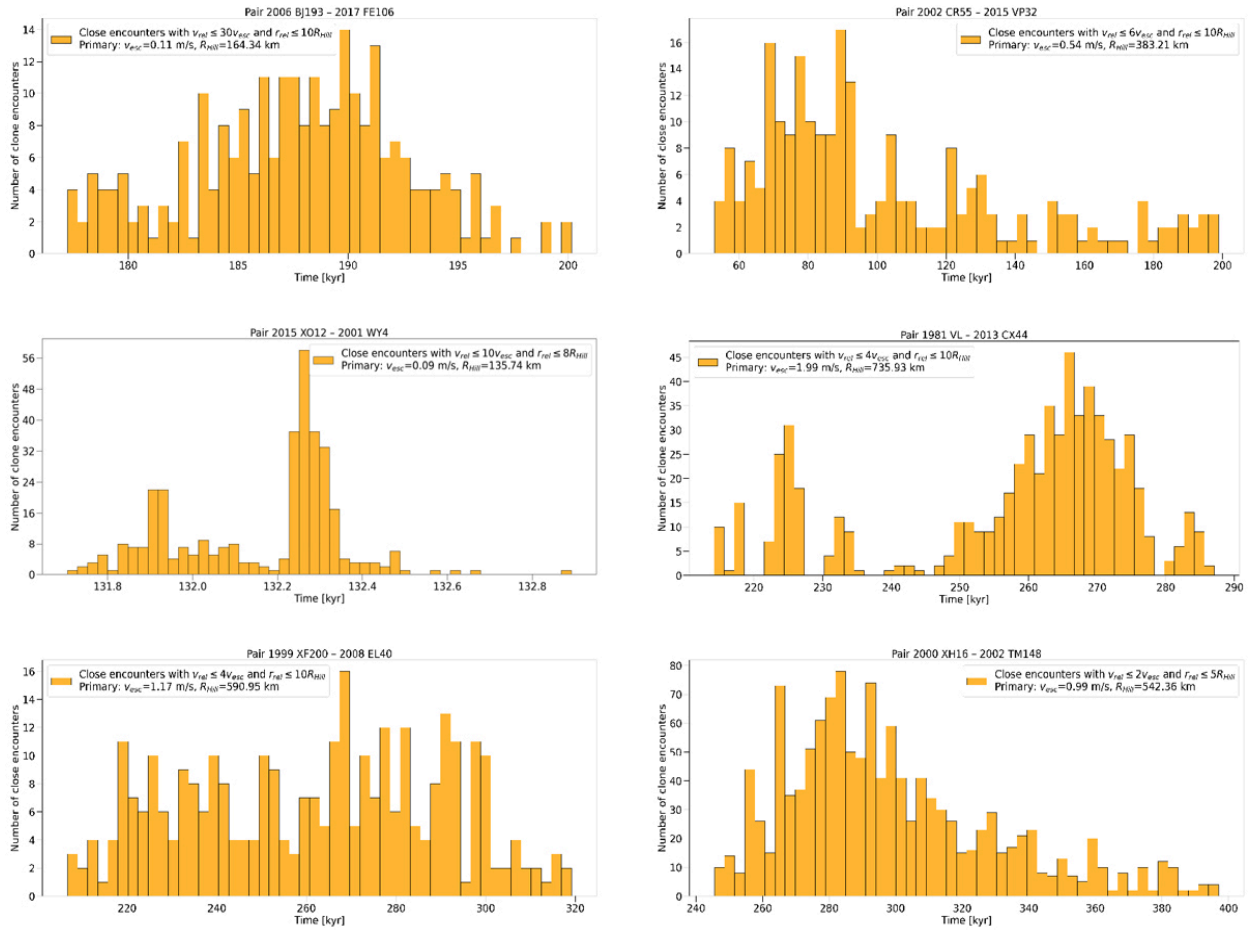


Рисунок 2.2 Гістограми розподілу оціненого віку формування виявлених астероїдних пар.

Використовуючи базу даних кольорів SDSS для малих тіл (Sergeyev & Carry, 2021), ми змогли отримати показники кольору для восьми астероїдів, чотири з яких є членами двох пар, що дозволило оцінити пари не лише за орбітальними, але й за оптичними характеристиками. Для цього було використано показник кольору  $a^*$  та  $(i - z)$  (Ivezic et al., 2001), або  $a^*$  і альbedo (Slyusarev, 2020), де  $a^*$  визначається як

$$a^* = 0.89 \cdot (g - r) + 0.45 \cdot (r - i) - 0.57. \quad (2.17)$$

Тут  $g$ ,  $r$  і  $i$  – це величини у відповідних фільтрах SDSS. Чим більш схожі параметри  $a^*$  та  $(i - z)$  для компоненти пари, тим ймовірніше, що вони належать до одного спектрального типу.

Використовуючи рівняння (2.17), для компонент пари (271685) 2004 RF90 – 2003 UT336 було оцінено  $a^*$ . 2003 UT336 має  $a^* = 0.18 \pm 0.13$  зор.вел., а 2004 RF90 має  $a^* = 0.16 \pm 0.07$  зор.вел. Хоча значення мають великі невизначеності, результат вказує, що компоненти можуть належати до одного спектрального типу й підвищує ймовірність того, що пара є реальною. Компоненти пари (30243) 2000 HS9 – 2015 DF67 мають значення  $a^* = 0.10 \pm 0.04$  зор.вел. і  $a^* = -0.09 \pm 0.25$  зор.вел. відповідно. Значення для вторинного компонента збігається з основним в межах похибок, але не є достатньо обмеженим для того, щоб робити висновки про склад на поверхні на основі оптичних властивостей. Хоча не було знайдено інформації про спектральні класи або показники кольору для решти кандидатів у пари, ми можемо припускати, що компоненти пари, ймовірно, належать до одного спектрального типу, а отже, мають однакове альbedo.

Кількість пар клонів, для яких були зареєстровані тісні зближення, становить від 2% до 20%, із середнім значенням у 10%. Більшість із знайдених астероїдних пар мають відносну швидкість та відстань між компонентами пари у межах  $2-4v_{esc}$  і  $5-10R_{Hill}$ . Хороша одночасна збіжність координат і швидкостей є індикатором, що більшість зі знайдених пар були утворені в результаті обертового поділу під дією ефекту ЯОРП.

Використовуючи підхід, описаний у підрозділі 2.2.3 (Kyrylenko et. al., 2024), ми провели додаткові чисельні моделювання даних астероїдних пар за допомогою пакету GENGA. Для всіх пар було промодельовано по 1000 клонів для кожної компоненти із  $10^6$  комбінацій клонів пар, що на порядок більше, ніж у попередній роботі. Всі десять пар задовольнили вимогам тісних зближень, та для більшості з них підтверджено попередні оцінки щодо їхнього віку формування (рис. 2.3, Додаток Б). Однак, за новими результатами, дві з пар: 2006 VJ193 – 2017 FE106 та 1981 VL – 2013 CX44 – демонструють дещо відмінний вік формування. Це пояснюється більш жорсткими вимогами до якості зближень, які дозволяє накласти краща

статистика, лишивши тільки найкращі клони. Якщо встановити обмеження, наведені в попередній роботі, то вигляд розподілу зближень стає схожим на первинні результати (рис. 2.4).

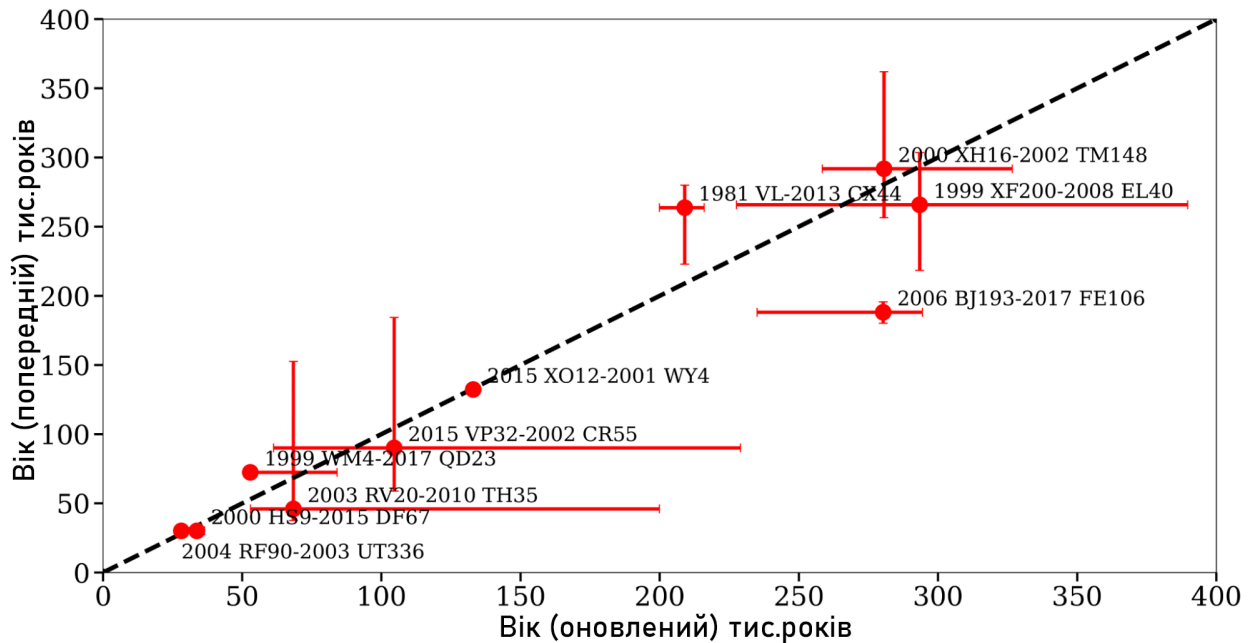


Рисунок 2.3 Порівняння оцінки віку формування астероїдних пар за новою та попередньою методикою.

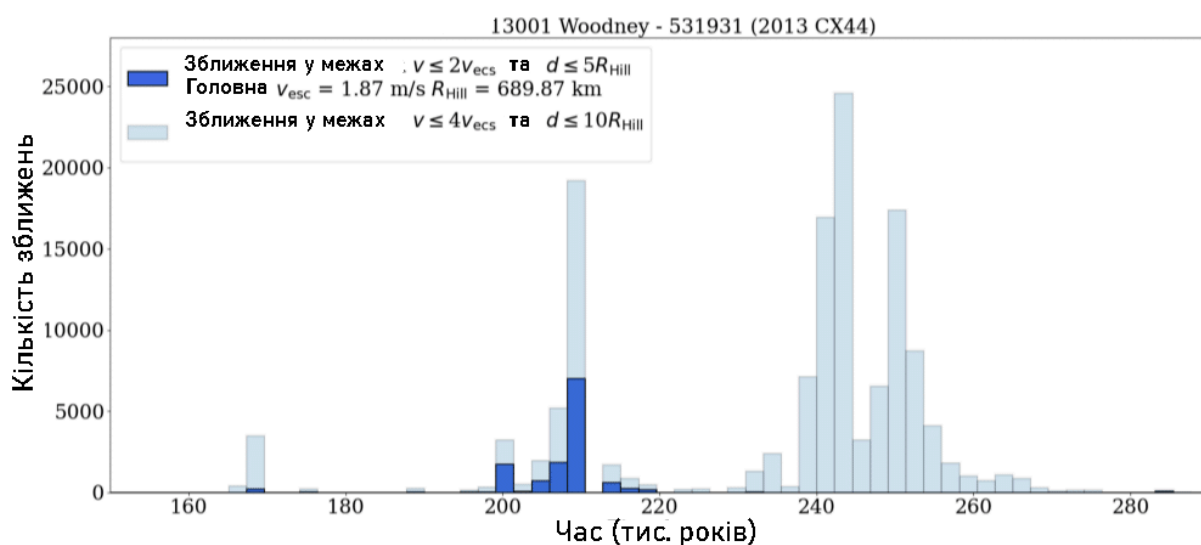
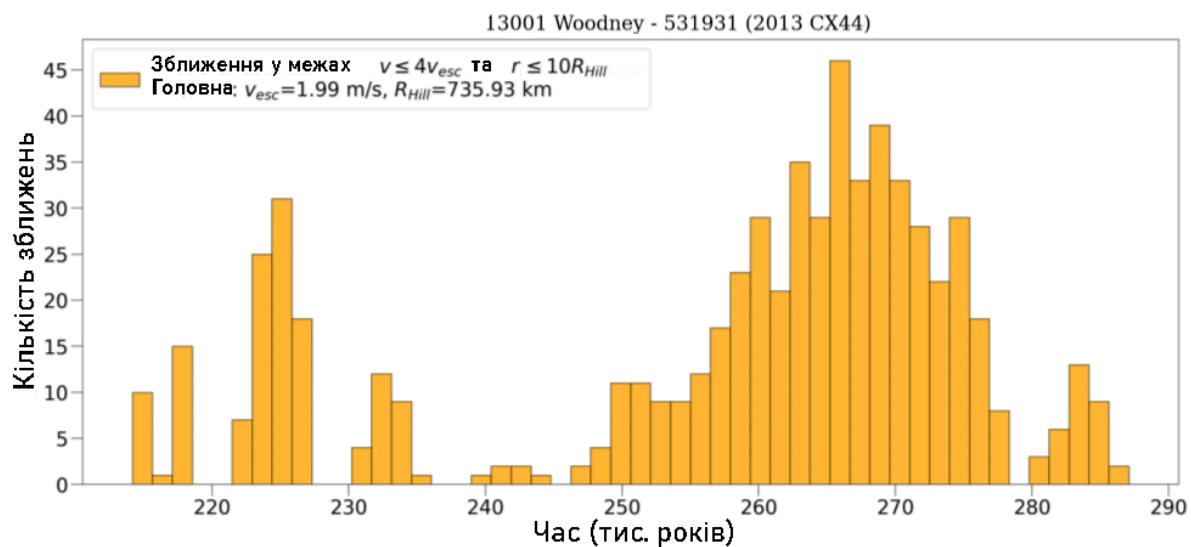


Рисунок 2.4 Порівняння результатів моделювання для пари 1981 VL – 2013 CX44 за старою схемою (верхня панель – помаранчевий) та новою (нижня панель – блакитний). Синім кольором позначено нові результати із сильнішими обмеженнями на якість зближень, блакитним позначено нові результати із попередніми обмеженнями.

Деякі з пар дещо перевищують встановлене обмеження за взаємною швидкістю у  $4-8v_{esc}$ . Так, для пари (204655) 2006 VJ193 – 2017 FE106 швидкість у тісних зближеннях становить величину порядку  $10v_{esc}$  у оновлених моделюваннях, в той час як пара 2015 XO12 – (524324) 2001 WY4 має взаємну швидкість у межах  $7v_{esc}$ . В абсолютному значенні ці швидкості невеликі, до 5 м/с, і, можливо, є наслідком недостатньо визначених параметрів орбіт або ефекту Ярківського. Пари демонструють тісні

зближення між компонентами пари, і, ймовірно, еволюційно пов'язані. Тест на рівномірність розподілу фону астероїдів показує, що для пари (80245) 1999 WM4 – (540161) 2017 QD23 він становить  $P_{1/2} = 0.08$ , що близько до граничного значення 0.05. Це може означати, що пара знаходиться в регіоні з деяким перевищенням щільності орбіт і може бути частиною більшої структури. Вона також має високе співвідношення  $P_2/N_p$ , але оскільки 15% клонів мають зближення в межах  $2v_{esc}$  і  $5R_{Hill}$ , пара має подібну орбітальну еволюцію і також, ймовірно, має спільне походження.

Ми провели повне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів на наявність раніше невідомих астероїдних пар із фазовою відстанню між компонентами  $d \leq 25$  м/с (Kyrylenko et al., 2024). Щоб отримати інформацію про існуючі зв'язки між астероїдами, були використані загальнодоступні бази даних. Дані з порталу Asteroid Families Portal (AFP) (<http://asteroids.matf.bg.ac.rs>) та порталу AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>) використані для отримання інформації про приналежність астероїдів до сімейств, а інформація з бази даних Johnston Archive (<https://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidpairs.html>) – для виключення вже відомих пар астероїдів. Результатом первинного відбору за  $d$ -метрикою, описаною у підрозділі 2.1.1, стали 421 кандидати, які були перевірені за допомогою методики, описаної в підрозділі 2.2.3.

У результаті пошуку було виявлено 40 нових пар астероїдів, представлених у табл. 2.4. Для більшості нових пар другою компонентою є нещодавно відкритий астероїд, який був невідомий або мав погано визначені орбітальні параметри на момент попередніх пошуків астероїдних пар (Pravec et al., 2019; Kyrylenko et al., 2021). Для наочного представлення результатів для кожної пари було побудовано дві гістограми (рис. 2.5). Перша гістограма – це розподіл у часі всіх зареєстрованих зближень, які задовольняють умови. Друга гістограма є розподілом зближень як функції відносної швидкості та

відстані в одиницях другої космічної швидкості та радіуса сфери Гілла для головної компоненти, що дозволяє оцінити загальний характер зближень.

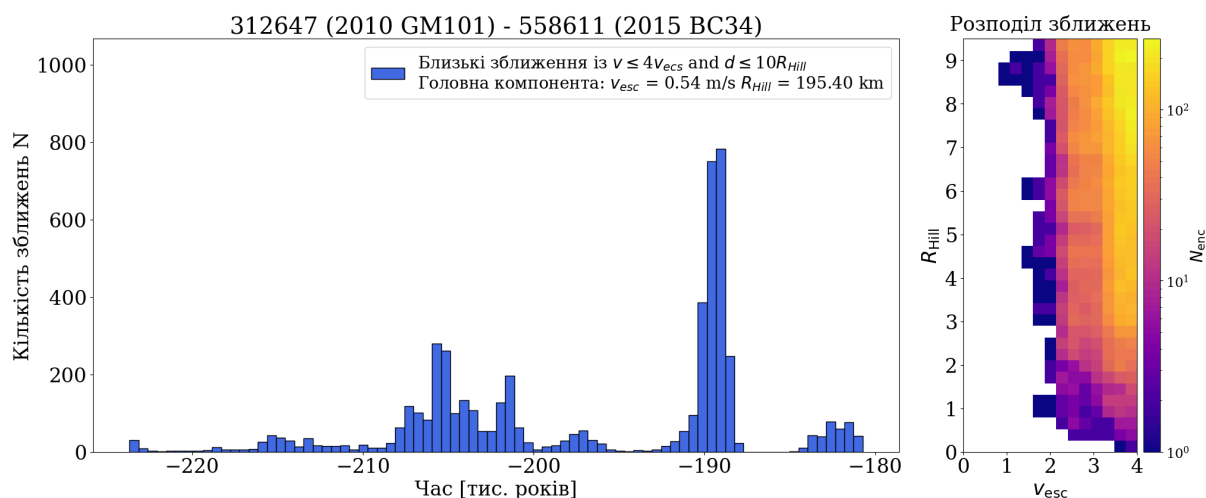


Рисунок 2.5 Розподіл тісних зближень для пари (312647) 2010 GM101 – (558611) 2015 BC34.

Ми визначаємо три межі для гістограм розподілу часу:  $1R_{Hill}$  і  $1v_{esc}$ ,  $5R_{Hill}$  і  $2v_{esc}$ ,  $10R_{Hill}$  і  $4v_{esc}$ , – і обираємо таку межу для кожної пари, що містить щонайменше 1000 зближень. Ми встановлюємо обмеження  $10R_{Hill}$  і  $4v_{esc}$ , якщо пара містить менше ніж 1000 зближень та більше ніж 100. Пари з менш ніж 100 зближеннями вважалися сумнівними і були виключені з подальшого аналізу. Із кожного графіка визначаються медіанний вік, а також 5-й і 95-й процентилі, які слугують як межі похибок. Отримані значення оцінок віку та їхні похибки наведені у табл. 2.5.

Медіанний вік знайдених пар варіюється від 2.6 до 858 тисяч років, причому для приблизно половини пар їхній вік не перевищує 200 тисяч років. Частка пар із віком понад 500 тис. років є відносно малою, оскільки старіші пари демонструють слабшу збіжність, а 1 млн років було встановлено як стандартну межу для наших моделювань. Це обмеження за часом було пом'якшено для деяких пар, якщо було виявлено, що тісні зближення між компонентами пари виходять за цю межу. П'ять нових пар мають співвідношення  $P_2/N_p$  між 0.145 і 0.39, що може бути індикатором

випадковості пари, але демонструють хорошу збіжність у чисельних моделюваннях еволюції. Ці пари потребують подальших спостережень із визначення їхнього спектрального типу та складу для підвищення надійності їхнього визначення як пар.

Отримані розподіли за часом тісних зближень між компонентами пар можна умовно поділити на наступні три класи:

- однозначний, добре виражений пік (наприклад, 44599 – 614882),
- декілька еквівалентних піків (наприклад, 211512 – 2014 PG94),
- суцільний розподіл або розподіл із дуже довгими хвостами, що простягаються далеко в минуле (наприклад, 81069 – 2014 WL523).

Підвид останнього випадку може мати немонотонну, «парканоподібну» структуру (наприклад, 111632 – 2018 QX15).

Таблиця 2.4. Характеристики нових астероїдних пар.

№	Primary component	Secondary component	H <sub>1</sub> [mag]	ΔH [mag]	d <sub>phase</sub> (m/s)	est.age [kyr]	P <sub>1/2</sub>	P <sub>2/N<sub>p</sub></sub>	note
1	14191 (1998 XR28)	574338 (2010 JY46)	13.97	4.42	9.6	143 <sup>+448</sup> <sub>-9</sub>	0.006	0.041	p
2	14593 Everett	2005 WQ213	15.44	2.83	9.11	22.8 <sup>+1.1</sup> <sub>-0.4</sub>	0.793	0.041	pb
3	44599 (1999 RA2)	614882 (2000 WS11)	15.95	2.35	23.73	203.0 <sup>+3</sup> <sub>-24</sub>	0.055	0.234	fb
4	44670 (1999 RQ183)	2015 RW129	16.6	3.35	0.97	85.9 <sup>+36</sup> <sub>-1</sub>	0.022	0	p
5	44938 (1999 VV50)	2009 SF406	15.25	3.64	3.66	62.3 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.2</sub>	0.013	0	c
6	70150 (1999 NS31)	2016 JC48	16.39	2.22	10.14	320.9 <sup>+38</sup> <sub>-22</sub>	0.004	0.016	c
7	81069 (2000 EW77)	2014 WL523	15.82	2.72	14.92	727.1 <sup>+191</sup> <sub>-112</sub>	0.168	0.016	pb
8	96658 (1999 JC6)	637279 (2015 EA16)	15.74	2.33	23.39	857.6 <sup>+509</sup> <sub>-349</sub>	1	0.091	b
9	107438 (2001 DK16)	2009 HL15	16.4	2.23	13.17	627.1 <sup>+323</sup> <sub>-456</sub>	0.438	0.036	b
10	111632 (2002 AB142)	2018 QX15	16.6	2.37	6.52	402.5 <sup>+49</sup> <sub>-21</sub>	0	0.006	pc
11	136924 (1998 KX5)	2009 TL53	16.28	2.49	23.39	143.7 <sup>+1</sup> <sub>-1</sub>	0.838	0.392	b
12	142377 (2002 RW249)	2016 GV293	16.82	1.97	16.34	159.0 <sup>+358</sup> <sub>-20</sub>	0.910	0.023	pb
13	148265 (2000 FQ37)	2015 FY305	16.29	2.36	20.1	406.1 <sup>+120</sup> <sub>-58</sub>	0	0.165	pc
14	156163 (2001 TF112)	2012 TJ110	16.16	2.04	10.5	190.4 <sup>+97</sup> <sub>-89</sub>	0.162	0.042	pb
15	178457 (1999 RS29)	531019 (2012 BM159)	15.91	1.97	9.68	216.6 <sup>+1</sup> <sub>-1</sub>	0.207	0.009	fb
16	189428 (1998 HB2)	2004 RU235	18.13	1.69	21.54	78.5 <sup>+65</sup> <sub>-22</sub>	0.290	0.033	pb
17	200973 (2002 CM95)	2017 BX191	17.06	2.04	8.11	23.1 <sup>+10</sup> <sub>-10</sub>	0	0.010	c
18	202035 (2004 RK77)	2018 SG19	16.89	1.91	10.79	554.9 <sup>+102</sup> <sub>-112</sub>	0.010	0.024	c
19	208497 (2001 VH105)	2019 SG147	17.86	1.94	5.79	203.7 <sup>+48</sup> <sub>-34</sub>	0.007	0.001	c
20	211512 (2003 QW43)	2014 PG94	17.3	2.2	9.27	114.8 <sup>+3</sup> <sub>-16</sub>	0.009	0.006	pc
21	215512 (2002 UF14)	2019 RS75	15.92	3.98	14.91	265.6 <sup>+63</sup> <sub>-58</sub>	0.497	0.003	pb
22	220222 (2002 VQ107)	2020 TT67	16.63	2.57	17.74	237.4 <sup>+32</sup> <sub>-33</sub>	0	0.145	fc
23	220241 (2002 XF25)	2018 AH65	16.88	2.05	3.34	215.7 <sup>+43</sup> <sub>-22</sub>	0	0	pc
24	231407 (2006 YU10)	2015 XN498	16.98	2.02	8.04	361.0 <sup>+29</sup> <sub>-26</sub>	0	0.007	pc
25	237761 (2001 YN148)	2019 JZ137	17.05	2.07	16.03	753.6 <sup>+212</sup> <sub>-235</sub>	0	0.050	fc
26	269964 (2000 SC291)	628959 (2017 XQ19)	18.11	1.17	2.43	100.8 <sup>+82</sup> <sub>-18</sub>	0.424	0.000	b
27	288902 (2004 RR320)	2015 OU175	16.89	1.72	4.24	213.6 <sup>+8</sup> <sub>-10</sub>	0.185	0.001	fbp
28	304000 (2006 BV229)	2011 BB69	17.89	0.98	12.85	97.3 <sup>+14</sup> <sub>-1</sub>	0.024	0.023	c
29	312647 (2010 GM101)	558611 (2015 BC34)	17.3	1.22	7.68	191.9 <sup>+32</sup> <sub>-9</sub>	0	0.009	c
30	329278 (1999 VA107)	2014 HC250	17.49	1.81	6.74	291.3 <sup>+50</sup> <sub>-21</sub>	1	0	pb
31	333128 (2011 WD76)	2021 VX9	17.35	2.75	6.66	36.6 <sup>+2.3</sup> <sub>-0.8</sub>	0.017	0.002	p
32	408807 (2000 SU248)	2009 QZ67	17.57	1.19	21.87	518.0 <sup>+307</sup> <sub>-123</sub>	0.065	0.159	p
33	418156 (2008 AW97)	2008 CR98	17.77	1.13	12.55	213.9 <sup>+52</sup> <sub>-53</sub>	0.017	0.034	fc
34	451414 (2011 QR46)	2019 RP93	17.13	2.03	22.06	295.4 <sup>+4</sup> <sub>-29</sub>	0	0.034	c
35	461548 (2003 VN3)	612428 (2002 QU107)	18.09	1.02	21	133.5 <sup>+64</sup> <sub>-10</sub>	0	0.067	pc
36	469759 (2005 QM29)	2016 QZ123	18.25	2.18	6.71	2.6 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.2</sub>	1	0	pb
37	487651 (2015 OY71)	2021 VA24	18.05	1.61	10.4	204.6 <sup>+237</sup> <sub>-112</sub>	0	0.007	pc
38	565005 (2017 BZ4)	2021 VW78	18.0	1.05	11.78	371.7 <sup>+77</sup> <sub>-44</sub>	1	0.001	b
39	2002 QN32	2021 TQ46	18.01	2.82	14.37	19.8 <sup>+37</sup> <sub>-11.7</sub>	1	0.016	b
40	2005 SK228	2019 RW47	18.88	1.5	13.28	62.5 <sup>+42</sup> <sub>-9</sub>	0.048	0.039	fbp

Примітки: p – доступні дані про фізичні властивості; c – зона з нерівномірною щільністю орбіт, можлива приналежність до кластера; f – член сімейства, b – зона з рівномірною щільністю орбіт, однозначно астероїдна пара.

З 40 нових астероїдних пар 8 містять один або обидва компоненти, які є членами астероїдних сімейств. Для тих пар, де лише одна з компонент є членом сімейства, ми очікуємо, що друга компонента також буде новим членом того самого сімейства. Для відкритих нових пар ми зібрали всі

доступні дані про фізичні параметри (див. табл. 2.5). Лише дві з пар мають визначені спектральні класи для обох компонент. Хоча доступних даних мало, вони дозволяють нам робити прогнози щодо фізичних властивостей компонент. Оскільки принаймні одна з компонент має дані про таксономічний клас, ми оцінили діаметри для основних компонент із використанням медіанного альбедо для відповідного класу (Mainzer et al. 2011). У випадках, коли названо кілька таксономічних класів, для нашої оцінки використовується той, який стоїть на першому місці.

Таблиця 2.5 Фізичні характеристики компонент нових астероїдних пар.

№	Primary component	Secondary component	albedo <sub>1</sub>	diameter <sub>1</sub> [km]	ast <sub>1</sub> SDSS	ast <sub>1</sub> SMSS	ast <sub>2</sub> SDSS
1	14191 (1998 XR28)	574338 (2010 JY46)	0.31 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.06</sub>	3.844 <sup>+0.158</sup> <sub>-0.158</sub>	S, V	B	-
2	14593 Everett	2005 WQ213	0.48 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.16</sub>	1.59 <sup>+0.227</sup> <sub>-0.227</sub>	X, V, S	-	-
3	44599 (1999 RA2)	614882 (2000 WS11)	0.36	1.43	-	-	V
4	44670 (1999 RQ183)	2015 RW129	0.21	1.39	V	S	-
5	44938 (1999 VV50)	2009 SF406	0.27 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.14</sub>	2.522 <sup>+0.672</sup> <sub>-0.672</sub>	-	-	-
6	81069 (2000 EW77)	2014 WL523	0.05	4.03	-	-	C
7	111632 (2002 AB142)	2018 QX15	0.36	1.07	V	V	-
8	142377 (2002 RW249)	2016 GV293	0.21	1.25	S, V	-	-
9	148265 (2000 FQ37)	2015 FY305	0.05	3.32	D	S	-
10	178457 (1999 RS29)	531019 (2012 BM159)	0.24 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.09</sub>	1.77 <sup>+0.28</sup> <sub>-0.28</sub>	-	-	-
11	189428 (1998 HB2)	2004 RU235	0.36	0.52	V	-	-
12	211512 (2003 QW43)	2014 PG94	0.21	1.0	-	S	-
13	215512 (2002 UF14)	2019 RS75	0.23 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.06</sub>	1.835 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.15</sub>	S	S	-
14	220241 (2002 XF25)	2018 AH65	0.05	2.54	D	-	-
15	231407 (2006 YU10)	2015 XN498	0.05	2.13	X	-	-
16	288902 (2004 RR320)	2015 OU175	0.21	1.22	-	S	-
17	329278 (1999 VA107)	2014 HC250	0.21	0.92	S, D	-	-
18	333128 (2011 WD76)	2021 VX9	0.36	0.75	V	-	-
19	408807 (2000 SU248)	2009 QZ67	0.21	0.89	S	-	V
20	469759 (2005 QM29)	2016 QZ123	0.36	0.50	V	-	-
21	487651 (2015 OY71)	2021 VA24	0.36	0.53	V	-	-
22	2005 SK228	2019 RW47	0.36	0.37	V, C	-	-

Для 4 із 50 нових астероїдних пар доступні дані щодо періоду обертання головної компоненти в базі даних SsODNet (<https://ssp.imcce.fr/webservices/ssodnet/>). На основі доступних фізичних даних для цих пар було також розраховано масові співвідношення  $\mu$  у припущенні однакової густини для обох компонент пар. Так, пара 1999 XF200 – 2008

EL40 має період обертання головної компоненти  $P_1 = 4.903$  год, а масове співвідношення  $\mu = 0.13$ ; (44938) 1999 VV50 – 2009 SF406 має  $P_1 = 3.957$  год,  $\mu = 0.008$ ; (156163) 2001 TF112 – 2012 TJ110 має  $P_1 = 4.015$  год,  $\mu = 0.044$ ; (131747) 2001 YJ133 – (624674) 2003 UP430 має  $P_1 = 28.4207$  та  $\mu = 0.008$ . Ці дані добре узгоджуються зі спостережною залежністю “ $P_1 - \mu$ ”, та припущенням про те, що обертальний поділ є основним механізмом формування астероїдних пар (Pravec et al. 2019). Характер розподілу нових астероїдних пар за різницею абсолютних зоряних величин між головною та вторинною компонентою (рис. 2.6) узгоджується з отриманими даними для статистично значущих астероїдних пар (Pravec & Vokrouhlicky, 2009).

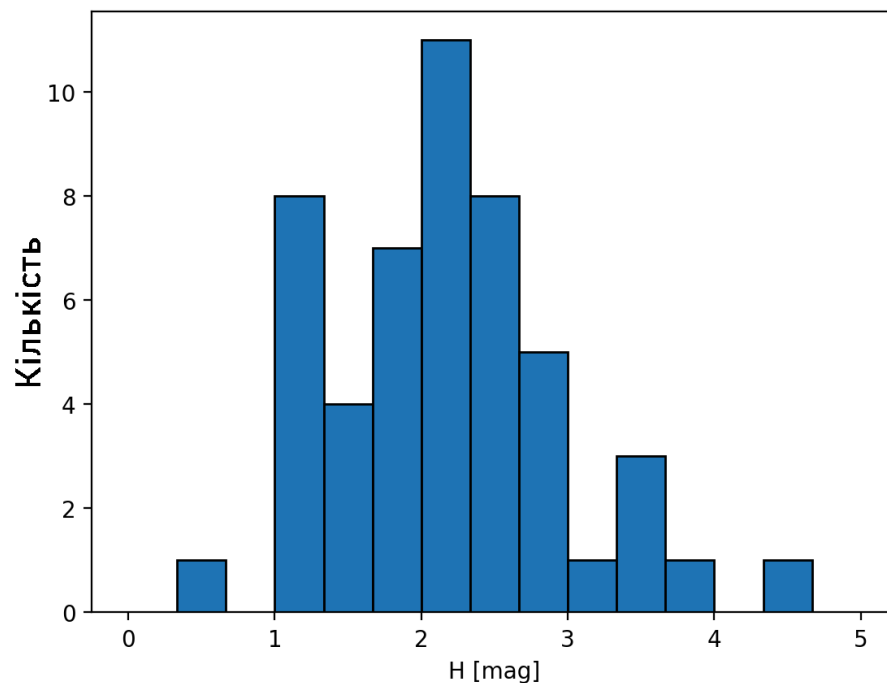


Рисунок 2.6 Розподіл нових астероїдних пар за різницею абсолютної зоряної величини між головною та вторинною компонентами.

Розподіл нових астероїдних пар за розрахованими фазовими відстанями та віком формування узгоджуються з параметрами вже відомих пар (рис. 2.7). Простежується деяка залежність оціненого віку формування від фазової відстані між компонентами пари, для якої апроксимація дає наступний вигляд:

$$t_{age} = 74.62 \cdot d_{phase}^{0.51} \quad (2.18)$$

Така залежність може бути пояснена наступним чином: гравітаційні та негравітаційні збурення призводять до зростання початкових розбіжностей та їх накопичення, тож фазова відстань є також деяким маркером часу, що пройшов від моменту утворення пари. Тому відстань за метрикою може бути не тільки критерієм відбору в пари, а й деяким показником щодо можливого віку утворення пари. В загальному випадку, швидкість віддалення орбіт залежить від початкових параметрів поділу компонент пари, таких як швидкість компонент при поділі, а також напрямку поділу відносно напрямку орбітального руху.

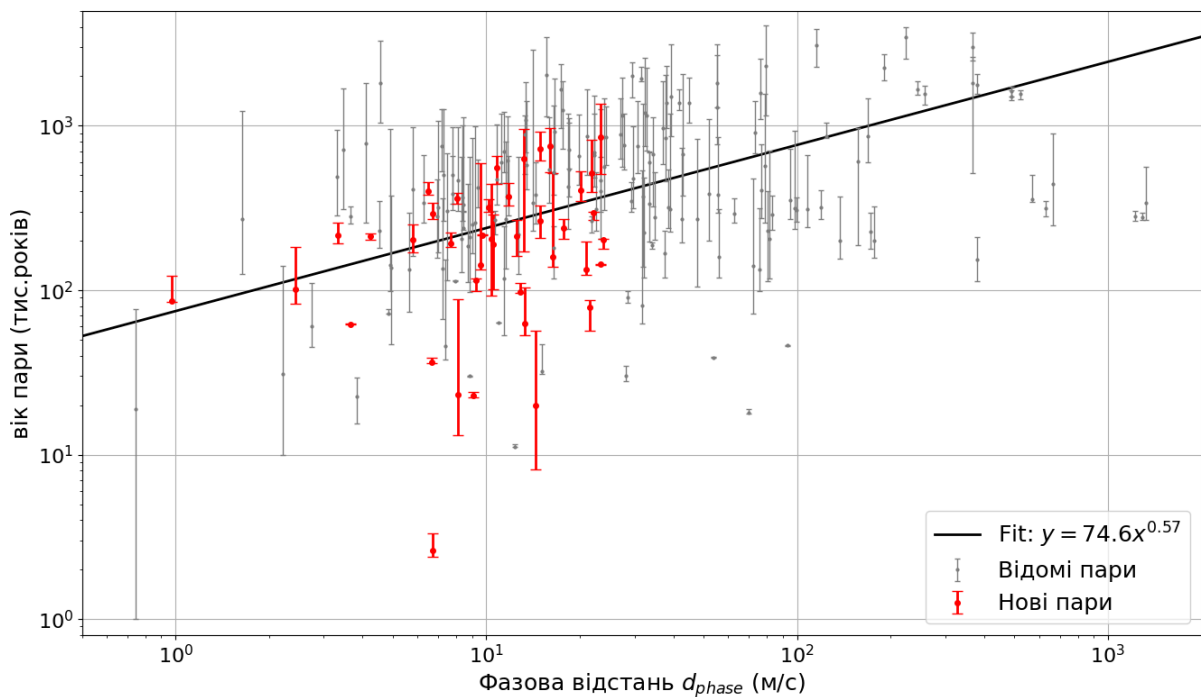


Рисунок 2.7 Залежність оціненого віку астероїдних пар від фазової відстані  $d_{\text{phase}}$  за оскулюючими елементами орбіти.

На даний момент ідентифіковано 312 астероїдних пар. Деякі з цих пар є частиною більших структур, таких як кластери або сімейства. База даних Johnston Archive (<https://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidpairs.html>) з часом доповнює список відомих астероїдних пар актуальною інформацією. Якщо побудувати розподіл віднайдених пар за віком формування (рис. 2.7), можна побачити, що більшість з них молодші за один мільйон років. Це

пояснюється як загальною методикою відбору кандидатів у пари, яка надає перевагу молодшим утворенням, так і складністю відслідкувати зближення в далекому минулому через накопичення невизначеності параметрів та чисельних похибок у моделюваннях.

## 2.4. Аналіз взаємного гравітаційного впливу у молодих пар

Наймолодша із ідентифікованих нами нових пар, (469759) 2005 QM29 – 2016 QZ123 із оціненим віком формування  $2.6_{-0.2}^{+0.7}$  тис. р., наразі є третьою наймолодшою з усіх відомих астероїдних пар, а також характеризується наявністю дуже тісних зближень між компонентами у межах  $1R_{Hill}$  і  $1v_{esc}$  (рис. 2.8.). Під час зближень, компоненти пари перебувають у зоні взаємного гравітаційного впливу достатній час, і оскільки вони мають малі взаємні швидкості, гравітаційна взаємодія може суттєво впливати на орбітальну еволюцію пари. Для перевірки цього припущення було проведено 1000 моделювань за допомогою пакету GENGA, де в кожному окремому моделюванні брали участь тільки по одному клону кожного з астероїдів із оціненими масами за формулою (2.10) із врахуванням гравітаційного впливу між компонентами. Маса астероїдів були розраховані в припущенні однакового таксономічного класу V із альbedo 0.36. Моделювання проводилися з використанням інтегратора IAS15, із мінімальним кроком інтегрування в одну годину.

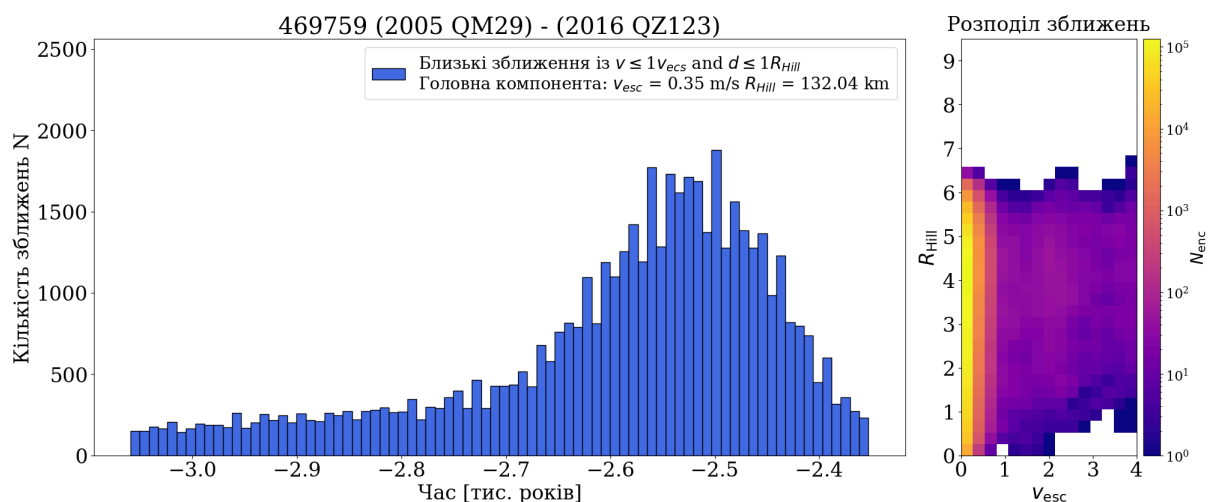


Рисунок 2.8 Розподіл тісних зближень для пари (469759) 2005 QM29 – 2016 QZ123.

Аналіз результатів моделювань виявив, що деякі комбінації клонів зазнають гравітаційного захоплення, обертаючись навколо центру мас протягом 2-3 орбітальних періодів (рис. 2.9). Цей ефект спостерігається для ~1% клонів. Для деякої частини моделювань, де таке захоплення не відбулося, гравітаційна взаємодія призводить до відхилення траєкторії вторинної компоненти. Тісні зближення із захопленням знаходяться між 2660 та 2760 роками у минуле, тобто за 50-100 років за максимумом розподілу зближень.

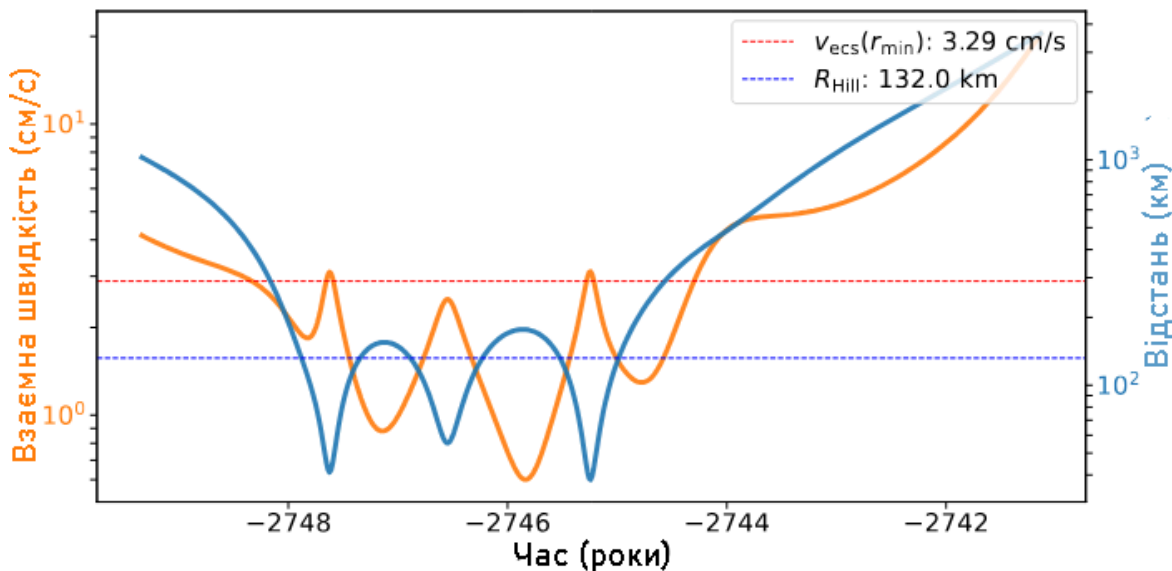


Рисунок 2.9 Приклад тісного зближення між клонами пари (469759) 2005 QM29 – 2016 QZ123 із гравітаційним захопленням та обертанням навколо спільного центру мас протягом 2-3 орбітальних періодів.

Врахування гравітаційної взаємодії не впливає на основний пік, але дещо впливає на другорядні зустрічі в старшому віці (рис. 2.10). Можливим поясненням є те, що взаємні збурення астероїдів під час першого зближення змінюють орбіти таким чином, що дозволяють частіші тісні зближення в подальшому минулому, на відміну від незбурених орбіт. Хоча ці старіші піки є менш ймовірними, вони все ще забезпечують альтернативні можливі шляхи

утворення пари. Наявність же таких гравітаційних захоплень компонент є додатковим аргументом щодо справжності цієї астероїдної пари.

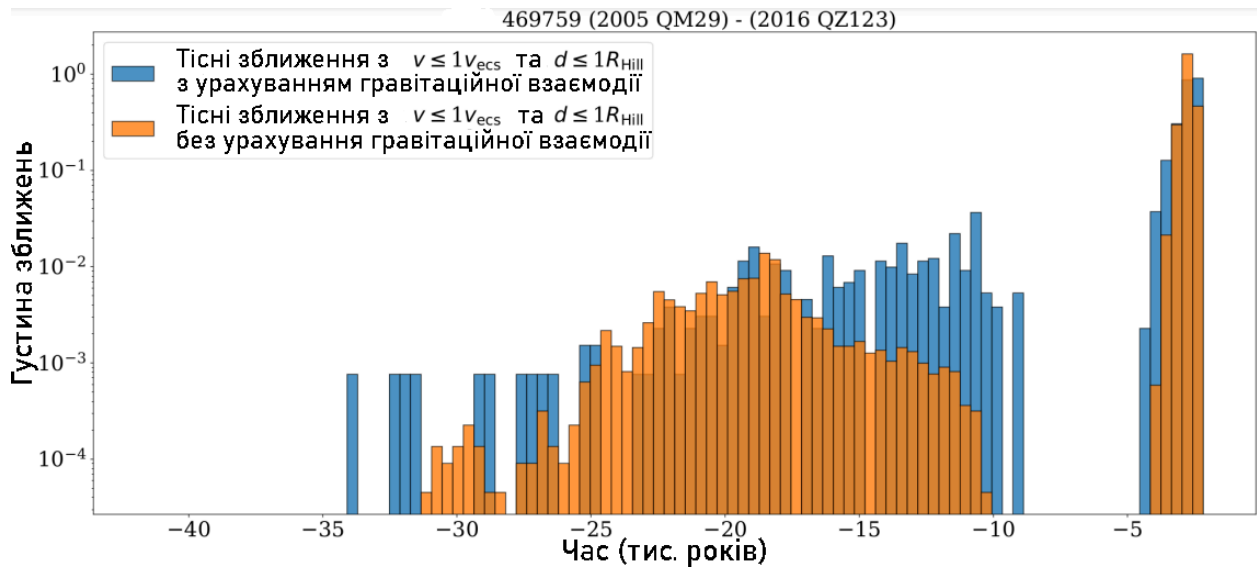


Рисунок 2.10 Густина розподілу тісних зближень для пари (469759) 2005 QM29 – 2016 QZ123 з урахуванням взаємодії (блакитний) і без урахування взаємодії (помаранчевий) між компонентами пари.

## 2.5. Пошук пар серед астероїдів М-типу

До цього часу серед астероїдів М-типу, які вважаються батьківськими тілами залізних метеоритів, не було виявлено жодної пари. На рис. 2.11 представлений розподіл відомих астероїдних пар за таксономічними класами S, C, V та X. Як видно з рис. 2.12, розподіл пар за цими класами приблизно відповідає фоновому населенню внутрішньої частини поясу астероїдів. Водночас, якщо серед астероїдів X-комплексу відібрати за величиною альbedo астероїди М-типу, то ми отримаємо близько 3% таких астероїдів у фоновій популяції, але жодної відомої пари.

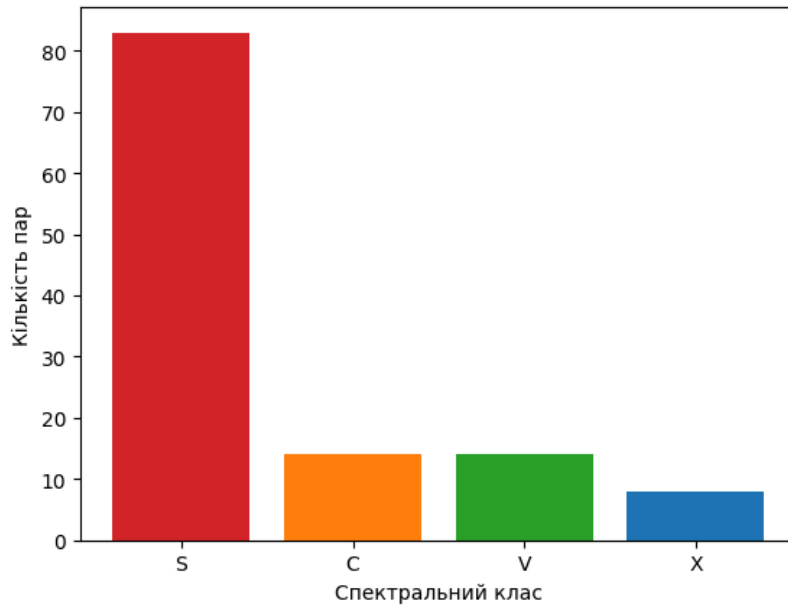


Рисунок 2.11 Розподіл відомих астероїдних пар за таксономічними класами.

У рамках аналізу приналежності астероїдів М-типу до астероїдних пар була проведена оцінка очікуваної кількості представників за аналізом таксономії астероїдних пар. Для цього було порівняно відносну кількість астероїдів різних таксономічних комплексів у внутрішньому поясі астероїдів серед пар із кількістю цих же комплексів серед усіх астероїдів внутрішнього поясу. Дані про таксономічні класи та альbedo були отримані з робіт [Sergeyev & Carry \(2021\)](#) та [Sergeyev et al. \(2022\)](#) за допомогою бібліотеки `rocks` ([Berthier et al. 2023](#)). Інформація про пари астероїдів була взята з Johnston Archive з урахуванням 50 астероїдних пар, які були виявлені під час виконання дослідження. Дані були об'єднані в чотири таксономічні комплекси (рис. 2.12) (комплекс S, який включає також класи A та L, комплекс C, комплекс X і клас V), на основі яких було побудовано відносну кількість представників класів серед пар астероїдів внутрішнього поясу ( $f_{\text{pair}}$ ) і серед усіх астероїдів внутрішнього поясу ( $f_{\text{ast}}$ ).

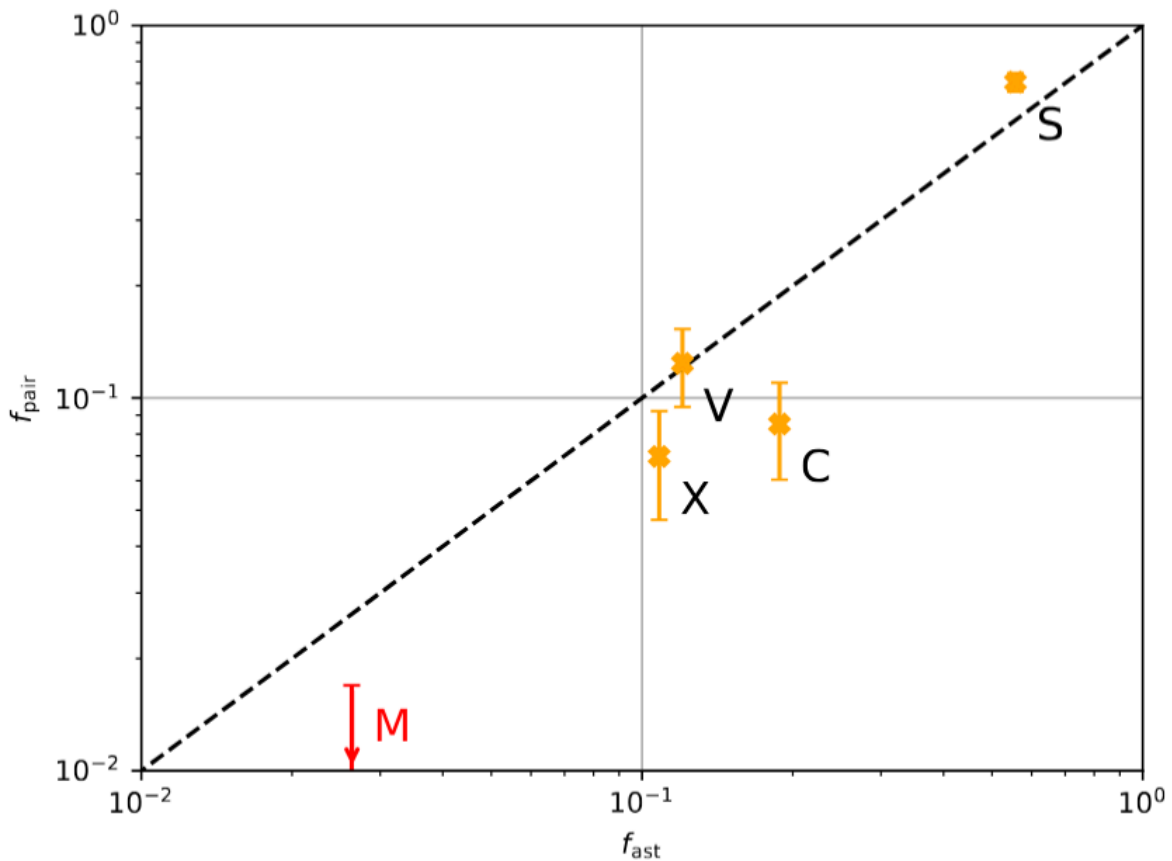


Рисунок 2.12 Відносна кількість астероїдів різних таксономічних типів серед астероїдів Головного поясу у порівнянні з астероїдними парами.

Ми виділили М-тип як підклас астероїдів Х-типу з помірним альбедо ( $0.1 \leq p_v \leq 0.3$ ). Оскільки 46% усіх астероїдів Х-типу мають відомі альbedo, ми ділимо як  $f_{ast}$ , так і  $f_{pair}$  для М-типу на 0.46, щоб компенсувати цю нерівномірність. Для більшості типів і комплексів значення  $f_{ast}$  та  $f_{pair}$  є порівняними. Однак серед пар немає відомих астероїдів М-типу, хоча статистично було очікувано виявити 1–2 астероїди М-типу (математичне очікування становить 1.5 астероїда, що передбачає ймовірність приблизно 20% спостерігати нуль пар М-типу).

Для аналізу приналежності М-астероїдів до астероїдних пар було відібрано 19 астероїдів із достатньою кількістю інформації, яка дозволила класифікувати ці астероїди як М-тип. За великою піввісю  $a$  дані астероїди розподілені між 2.21 а.о. та 2.47 а.о., із оціненими діаметрами від 3.6 до 12 кілометрів. Для кожного відібраного астероїда ми виконали пошук

найближчих сусідів за підходом, наведеним у підрозділі 2.1.1. Оскільки жоден із астероїдів не мав сусідів у межах фазової відстані  $d < 25$  м/с, пошук був розширений до 100 м/с. Результати відбору кандидатів наведені у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 Характеристики відібраних кандидатів в астероїдні пари М-типу.

Астероїд 1	Астероїд 2	$d_{\text{phase}}$ (м/с)	$H_1$ (зор.вел.)	$H_2$ (зор.вел.)	$v$ (км/с)
1110	2001 QP210	109.6	11.67	18.6	0.9
3007	2015 OV116	133.1	12.83	18.71	3.5
4839	277262	150.1	13.13	16.89	2.3
5058	505384	83.6	13.97	18.26	0.4
5058	2021 UL26	85.9	13.97	19.71	0.4
5160	340114	105.7	13.54	17.02	1.3
6182	2014 NP37	96.1	14.33	18.68	0.1
6245	374740	147.9	13.39	17.95	3.0
7517	276797	78.1	13.92	16.66	4.0
9146	2010 SM48	71.2	13.61	18.47	0.1
16698	2022 QC159	127.4	13.71	19.34	1.9
17402	2019 UV98	78.8	14.45	19.44	1.5
18866	159740	153.7	13.95	16.67	0.9
20301	196277	144.9	14.14	16.58	0.4
21452	283446	101.3	14.24	16.39	0.8
26526	2015 PT362	77.2	14.3	19.27	0.1
33107	575195	59.3	14.18	17.82	1.0
34061	427361	143.2	14.07	17.21	2.0
52264	221017	105.3	14.07	17.09	3.6
53164	1995 SR59	137.4	14.1	16.66	3.7
53516	447142	120.7	13.84	17.29	1.9
93028	496552	111.6	13.92	17.12	1.2

Відібрані кандидати в пари було чисельно промодельовано в минуле на 1 млн років з метою пошуку тісних зближень між компонентами пари. Аналіз моделювань показав, що більшість із відібраних кандидатів у пари мають взаємні швидкості близько 1-2 км/с на великих відстанях, що свідчить про неспорідненість тіл. Деякі кандидати, такі як (9146) Tulikov – 2010 SM48 та (26526) 2000 CP86 – 2015 PT362, мали тісні зближення в межах  $10R_{\text{Hill}}$ , але при цьому мали високі взаємні швидкості в межах  $45-70 v_{\text{esc}}$ , що значно вище за стандартний критерій для астероїдних пар у межах  $2-4 v_{\text{esc}}$  для обертового механізму формування (рис. 2.13, рис. 2.14).

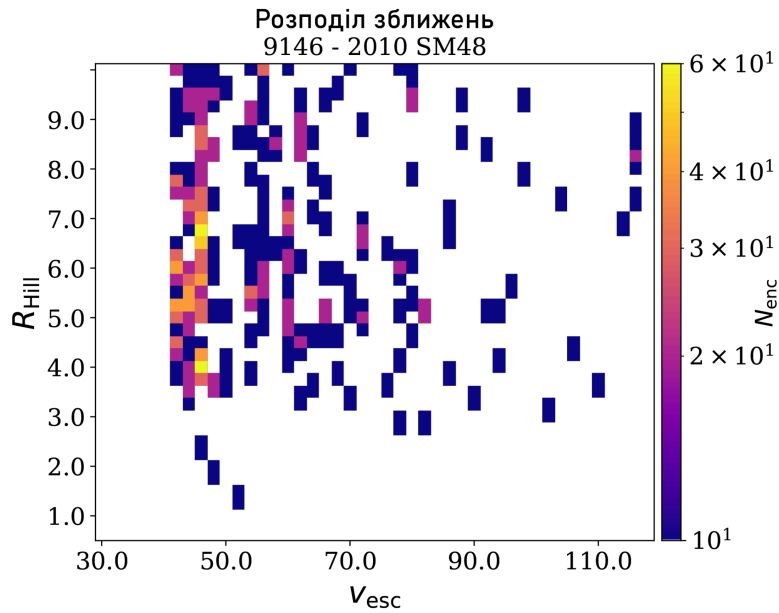


Рисунок 2.13 Розподіл тісних зближень для кандидата в пари М-типу (9146) Tulikov – 2018 SM48.

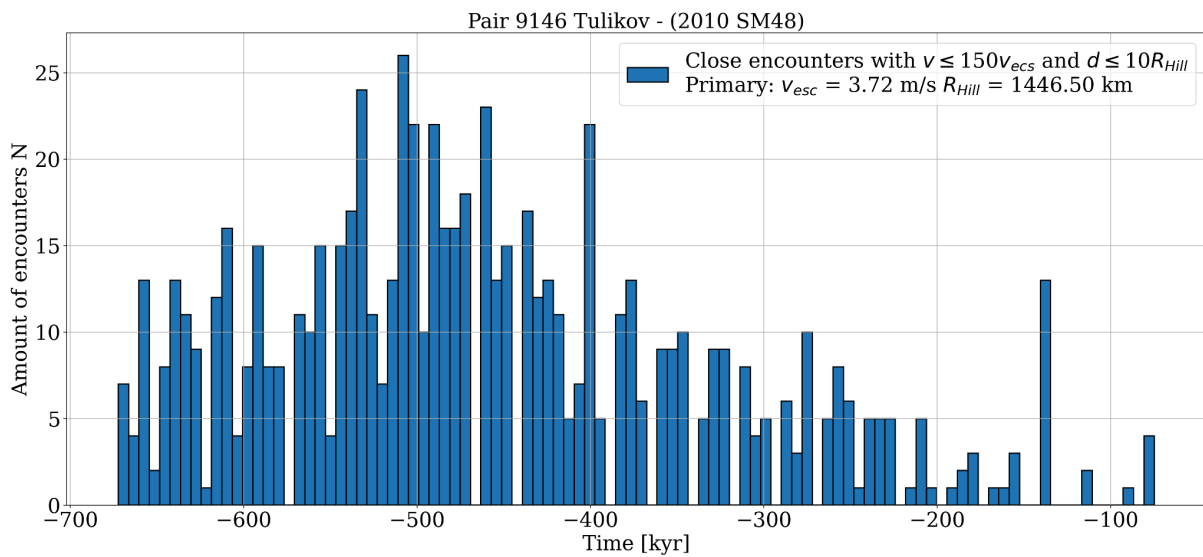


Рисунок 2.14 Розподіл тісних зближень за часом для кандидата в пари М-типу (9146) Tulikov – 2018 SM48.

Хоча існує можливість того, що ці пари були сформовані в результаті катастрофічних зіткнень, які в теорії можуть мати високі взаємні швидкості компонент, у даний час неможливо відрізнити їх від випадкових тісних прольотів неспоріднених тіл. Таким чином, серед відібраних кандидатів астероїдних пар не було виявлено. Ця нестача астероїдних пар М-типу все ще може бути випадковим наслідком малої статистики, однак вона також може

свідчити і про меншу ймовірність утворення пар астероїдами М-типу через їхню вищу густину й більшу структурну міцність, що зменшує вплив ЯОРП-ефекту та зіткнень на їхнє утворення.

## 2.6. Пошук астероїдних кластерів

Астероїдні кластери є малими групами астероїдів, що мають подібні орбітальні параметри та спільне походження. Вони займають проміжне положення між астероїдними парами та астероїдними сімействами в ієрархії груп малих тіл Сонячної системи. Це, як правило, дуже молоді скупчення астероїдів, що складаються з кількох або десятків членів, і які, на відміну від давніх астероїдних сімейств, сформувалися приблизно  $10^5$  –  $10^6$  років тому (Pravec, et al., 2018). Перші кластери із головними тілами (1270) Datura, (14627) Emilkowalski, (16598) Brugmansia та (21509) Lucascavin були виявлені в роботах Nesvorný et al. (2006) та Nesvorný and Vokrouhlický (2006). Згодом було ідентифіковано ще п'ять скупчень, основними тілами яких є (6825) Irvine, (10321) Rampo, (18777) Hobson, (39991) Iochroma та (81337) 2000 GP36 (Pravec and Vokrouhlický, 2009). Подальші детальні дослідження кластерів (1270) Datura та (2384) Schulhof були виконані Vokrouhlický et al. (2016, 2017), де було проведено додаткові оцінки їхнього віку та визначено дані щодо характеристик обертання, форми та кутового моменту цих тіл.

На початку досліджень кластерів вважалося, що вони, як і астероїдні сімейства, утворилися внаслідок зіткнень. Для кластера Datura було висловлено припущення, що він утворився в результаті зіткнення малого об'єкта з первинним тілом, яке перебувало в стані майже критичного обертання, що призвело лише до кратерування, а не руйнування тіла (Vokrouhlický et al., 2017). У роботі Pravec, et al. (2018) за результатами відкриття 3 нових кластерів та дослідження 10 вже відомих, було висунуто альтернативну модель утворення кластерів, згідно з якою вони утворилися внаслідок поділу батьківського тіла при досягненні ним критичної швидкості

обертання. Таким чином, за механізмом утворення молоді кластери астероїдів подібні до астероїдних пар, але містять більше однієї вторинної компоненти.

Оскільки астероїдні кластери є подібними до астероїдних пар за принципом формування, до них можуть бути застосовані ті самі методи пошуку та ідентифікації, що і для астероїдних пар. На етапі відбору кандидатів у пари за фазовими відстанями ми помітили, що деякі з астероїдів пов'язані більше ніж з одним сусідом. Ми знайшли шість астероїдів, які мали попарні зв'язки у межах  $d \leq 25$  м/с. Один із астероїдів, а саме (481085) 2005 SA135, належить до пари, опублікованої [Pravec et al. \(2019\)](#), і тому до розгляду була включена і друга компонента пари (21028) 1989 TO. У спробі знайти більше членів потенційного кластера ми збільшили відстань пошуку до  $d \leq 50$  м/с і отримали три додаткових астероїди (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 Параметри членів нового кластера. Діаметри розраховані в припущенні, що всі астероїди мають альbedo головної компоненти (21028) 1989 TO  $p_V = 0.252_{-0.05}^{+0.05}$ , дані про яке отримані з [Lagoa & Delbo \(2017\)](#).

№	Назва астероїда	Абс.зор.вел. H	Діаметр (км)
1	(21028) 1989 TO	13.20	$6.07_{-0.5}^{+0.7}$
2	(481085) 2005 SA135	17.01	$1.05_{-0.1}^{+0.13}$
3	2016 BZ110	18.6	$0.5_{-0.05}^{+0.06}$
4	2023 RS41	19.04	$0.41_{-0.03}^{+0.04}$
5	2015 BC576	19.1	$0.40_{-0.04}^{+0.05}$
6	2019 AF88	19.22	$0.38_{-0.04}^{+0.05}$
7	2022 QJ231	19.6	$0.32_{-0.03}^{+0.04}$
8	2016 CH236	19.8	$0.29_{-0.03}^{+0.04}$

Для чисельного моделювання була використана модель, описана у підрозділі 2.2.3. Кожен із відібраних астероїдів був представлений 1000 клонів, для яких враховувався ефект Ярковського. Оскільки альbedo відоме тільки для головної компоненти, воно було використане для всіх компонент у припущенні їхнього спільного походження. Орбітальна еволюція всіх клонів була промодельована на 1 млн років у минуле з кроком інтегрування 3.65 доби. Зближення між групами клонів відстежувалися за допомогою вбудованої функціональності GENGA.

Моделювання показало наявність зближень між більшістю астероїдів (рис. 2.15), особливо з головною компонентою (21028) 1989 TO, більшість із яких відбулася  $75_{-25}^{+15}$  тис. років тому (рис. 2.16). Час розподілу попарних зближень узгоджується з традиційним методом пошуку спорідненості та визначенням віку формування кластерів, який проводиться за пошуком збіжності компонент за довготою висхідного вузла  $\Omega$  або аргумента перигелію  $\omega$  (рис. 2.16). Важливо відмітити, що хоча астероїд 2017 DC128 демонстрував пов'язаність з іншими астероїдами у фазовому просторі, у чисельних моделюваннях він не мав тісних зближень з іншими членами кластера. Також астероїд має інакшу еволюцію орбітальних елементів у порівнянні з іншими членами кластера, і тому не був включений до його складу. Це показує важливість чисельних моделювань орбітальної еволюції у відборі членів таких утворень.

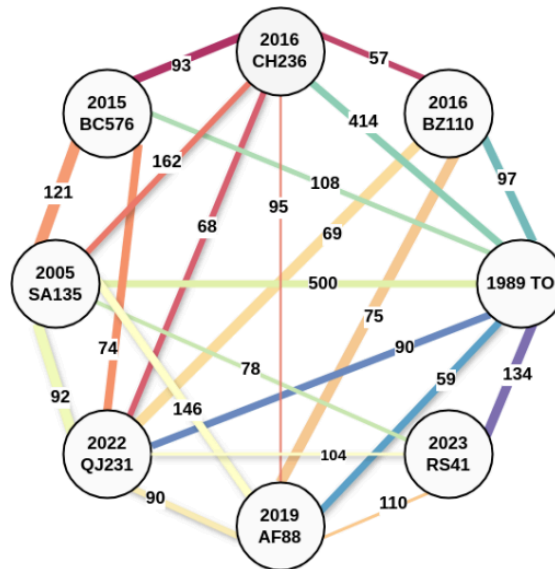


Рисунок 2.15 Взаємозв'язок між компонентами кластера. Кольори зв'язків відповідають кольорам гістограми, представленої на рис. 2.16, а їхня ширина ілюструє кількість зіткнень між компонентами. Числа на лініях позначають медіанне значення розподілу часу зближень між компонентами.

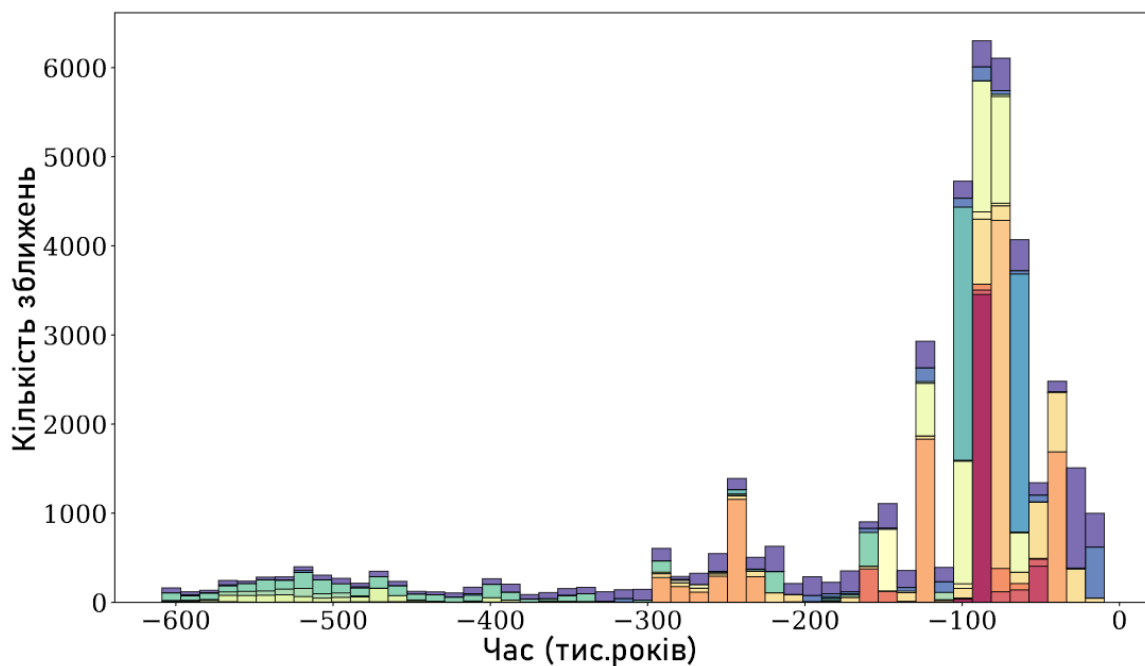


Рисунок 2.16 Попарний розподіл зближень між компонентами кластера за часом. Кольори відповідають зображенням на рис. 2.15.

Значення альbedo відоме для найбільшого астероїда (21028) 1989 TO, але ми припускаємо, що інші члени кластера мають альbedo, близьке до нього. За розрахунками, (21028) 1989 TO містить 98.8 % загальної маси

кластера, а всі інші відомі члени кластера разом складають лише 1.2 % маси. Основний представник кластера належить до сімейства Phocaea (Pravec et al., 2019), і, оскільки всі члени кластера дуже близькі з точки зору їхніх орбітальних елементів, ми можемо вважати, що весь кластер входить у сімейство Phocaea. Так як головний астероїд сімейства, (25) Phocaea, є астероїдом S-типу, ми припускаємо цей тип для всіх восьми членів кластера.

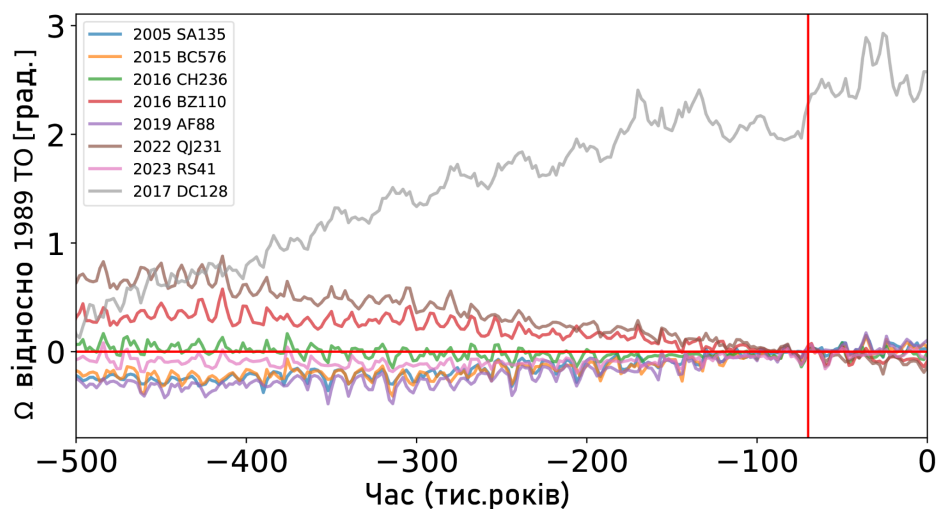


Рисунок 2.17 Еволюція довготи висхідного вузла  $\Omega$  компонент кластера (21028) 1989 TO за часом. Зона перетину у 50–100 тис. років тому збігається з оцінкою за попарними тісними зближеннями (див. рис. 2.16).

Період обертання (21028) 1989 TO становить 3.66 години (Pravec et al., 2019), і навряд чи він суттєво змінився з часу формування кластера, оскільки необхідний час впливу ЯОРП-ефекту для астероїда діаметром 6 км у Головному поясі приблизно на три порядки довший за оцінений вік кластера (Golubov & Scheeres 2019). Під час процесу формування кластера вторинні компоненти не могли суттєво уповільнити обертання головної компоненти, оскільки їхня сукупна маса на два порядки менша за масу (21028) 1989 TO. Таким чином, у момент формування кластера, період обертання астероїда був набагато довший, ніж критичний період обертання для астероїдів S-типу, що виключає обертальне руйнування як можливий механізм формування

кластера. Цей факт визначає зіткнення астероїдів як найімовірніший механізм його утворення.

## Висновки до розділу

У рамках задачі виявлення астероїдних пар було розроблено алгоритм для їх пошуку, який враховує гравітаційні збурення від усіх планет Сонячної системи, найбільших тіл Головного поясу астероїдів, а також негравітаційний ефект Ярковського. Надійність розробленого алгоритму було верифіковано на вибірці із 17 відомих пар астероїдів, і для всіх них оцінений нами вік за результатами моделювання узгодився в межах похибок із літературними даними.

За допомогою розробленого алгоритму було проведене повне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів на наявність раніше невідомих астероїдних пар із фазовою відстанню між компонентами  $d \leq 25$  м/с. За результатами чисельних моделювань виявлено 50 нових астероїдних пар, досліджено та проаналізовано їхні характеристики. Аналіз тісних зближень між компонентами отриманих пар дає підстави характеризувати більшість з них як такі, що були сформовані внаслідок оберտального руйнування або розпаду подвійних систем. Оцінений вік формування нових пар знаходиться в межах від 2 тисяч до 1 млн років.

Для наймолодшої пари у вибірці, (469759) 2005 QM29 – 2016 QZ123, було досліджено і показано вплив гравітаційної взаємодії між компонентами на динамічні характеристики пари. Зареєстровані випадки гравітаційного захоплення компонент та обертання навколо спільного центру мас протягом декількох орбітальних періодів є додатковим аргументом щодо достовірності визначення астероїдної пари.

У процесі пошуку астероїдних пар було ідентифіковано новий астероїдний кластер із восьми астероїдів, із оціненим віком формування у  $75_{-25}^{+15}$  тис.років, який найімовірніше входить у сімейство астероїдів Phocaea.

Період обертання головної компоненти кластера (21028) 1989 TO набагато довший, ніж критичний період обертання для астероїдів S-типу, що виключає обертальне руйнування як можливий механізм формування кластера.

## РОЗДІЛ 3

### ПОШУК ДЖЕРЕЛ ПОХОДЖЕННЯ МЕТЕОРИТА АДАЛЕН

Надзвичайно важливим кроком у виявленні зв'язків астероїдів із залізними метеоритами є визначення орбіт метеороїдів, що призвели до падіння залізних метеоритів. Залізні метеорити вважаються фрагментами металевих ядер, що утворилися в диференційованих і згодом зруйнованих планетезималях.

Хімічний та ізотопний аналіз залізних метеоритів дозволяє поділити їх на 14 груп, які, ймовірно, походять із різних планетезималей. Чотири найбільші групи містять 75% усіх залізних метеоритів, тоді як близько 15% некласифікованих залізних метеоритів походять щонайменше з 50 інших батьківських тіл (Burbine et al., 2002). Це робить залізні метеорити однією з найрізноманітніших груп метеоритів. Тим не менш, місце розташування та розміри батьківських тіл залізних метеоритів, а також їхня подальша динамічна еволюція залишаються предметом дискусій (Bottke et al., 2006).

Серед більше ніж 77000 відомих метеоритів, лише 1414 метеоритів класифіковані як залізні метеорити (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.cfm>). За всю історію людства спостерігалися 49 падінь залізних метеоритів, але для жодного з цих падінь не було достатньо спостережних даних для обчислення точної орбіти.

У ранню еру візуальних спостережень було зафіксовано падіння шести залізних метеоритів та було оцінено характер їхніх геліоцентричних орбіт (Pickering, 1910). Пізніше ця робота була продовжена Астаповичем (1939), але даних було недостатньо для надійного визначення орбіт. Окремо можна виділити лише падіння Сіхоте-Алінського метеорита 1947 року, для якого було отримано орбіту зі значною невизначеністю за опитуванням великої кількості очевидців (Fesenkov, 1951). За останні 40 років було зафіксовано кілька падінь залізних метеоритів, включаючи Сокото (2008, Нігерія), Каварпура (2006, Індія), Бан Ронг Ду (1993, Таїланд) та Стерлітамак (1990,

СРСР), останній мав масу 325 кг і був найбільшим зібраним залізним метеоритом після Сіхоте-Алінського.

### 3.1. Метеорит Адален

Відсутність точно визначених орбіт залізних метеороїдів довго ускладнювала визначення джерела залізних метеоритів у Головному поясі астероїдів. Ситуація змінилася після того, як 7 листопада 2020 року о 21:27:04 UTC яскравий болід був зафіксований над Швецією з кількох скандинавських країн ([https://fireballs.imo.net/members/imo\\_view/event/2020/6403](https://fireballs.imo.net/members/imo_view/event/2020/6403)).

Під час пошуків було знайдено фрагмент метеорита масою 13.8 кг неподалік села Адален у Швеції. Хоча детальний хімічний та ізотопний аналіз метеорита ще не проведено через суперечки щодо права власності, його металевий склад не викликає сумнівів ([Gritsevich et al., 2021](#); [Moilanen & Gritsevich, 2022](#)). Завдяки численним спостереженням боїда в Данії, Фінляндії та Норвегії вдалося визначити його траєкторію ([Moilanen & Gritsevich, 2021](#)). Звукові сигнали також були зафіксовані п'ятьма станціями Міжнародної системи моніторингу Організації з Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань, а також зареєстровані в базі даних JPL Fireball and Bolide Data як подія потужністю 0.33 кілотонни. Діаметр метеороїда був оцінений у 1.5 метри (<https://www.imo.net/swedish-nov-7-fireball-as-bright-as-full-moon/>).

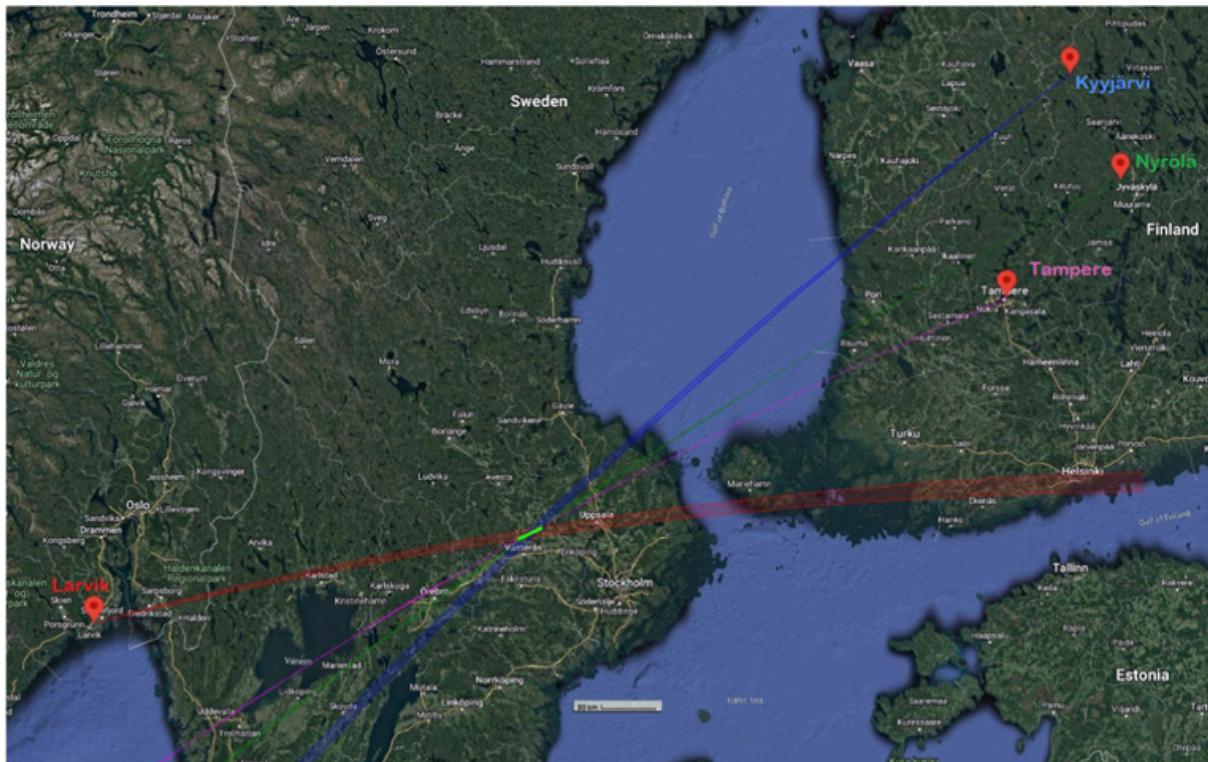


Рисунок 3.1 Триангуляція траєкторії боліда. Залізний метеорит рухався з південного заходу на північний схід із нахилом траєкторії понад  $73^\circ$ . Із усіх станцій лише чотири надали точні дані: Ларвік у Норвегії (Norsk Meteornettverk), а також Кююярві, Нюроля та Тампере (Фінська мережа спостереження болідів). Жодна зі станцій не змогла спостерігати кінцеву точку траєкторії боліда через велику відстань та низьку висоту.

### 3.1.1. Визначення орбіти метеороїда

Детальні інструментальні записи боліда були отримані мережею фінських камер спостереження болідів та норвезькою мережею метеорних камер (рис. 3.1). Болід спостерігався на великій відстані – щонайменше на 720 км (Moilanen & Gritsevich, 2021). Початковий аналіз був проведений у наступні дні після події, використовуючи методи, описані в Lyytinen & Gritsevich (2013, 2016a), з урахуванням реальних атмосферних умов (Lyytinen & Gritsevich, 2016b), а також виконано моделювання Монте-Карло «темного польоту» (Moilanen & Gritsevich, 2021) для визначення можливого місця падіння метеорита.

Аналіз атмосферної траєкторії вказав на гарантоване падіння метеорита (Sansom et al., 2019; Moreno-Ibáñez et al., 2020; Peña-Asensio et al., 2021; Boaca et al., 2022; Peña-Asensio et al., 2023). Низьке значення параметра втрати маси  $\beta$ , яке склало лише  $\sim 0.5$  (отримане за методикою, описаною в Gritsevich, 2009), також вказувало на залізний склад об'єкта.

Таблиця 3.1 Характеристичні значення траєкторії боліда у результаті тріангуляції. Кінцеві значення відповідають останній спостережній точці боліда. Швидкість входу в атмосферу визначена як 17.52 км/с.

Параметр	Початок	Кінець
Широта (°)	59.74	59.82
Довгота (°)	16.51	16.84
Висота (км)	81.53	11.28

За цими даними було визначено найбільш вірогідну орбіту метеороїда та зроблено оцінки похибок орбіти (табл. 3.1). Пошук траєкторії метеороїда проводився за допомогою новітнього програмного забезпечення FireOwl, що використовується для обробки даних метеорних мереж (Visuri & Gritsevich 2021). Для перевірки надійності отриманих результатів також використовувалася програма Meteor Toolkit (Dmitriev et al. 2015). Для оцінки невизначеності орбіти були взяті до уваги всі можливі комбінації основних похибок, такі як роздільна здатність камери, кутова роздільна здатність калібрування, точність вимірювання траєкторії та швидкості боліду. Визначені орбітальні параметри та їхні похибки наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Орбітальні елементи метеороїда на епоху JD 2459160.5 (07.11.2020).

Параметр орбіти	Значення	Похибка
Велика піввісь $a$ , а.о.	1.9	0.025
Ексцентриситет $e$	0.53	0.006
Нахил $i$ , °	15.22	0.14
Довгота вузла $\Omega$ , °	226.189	0.0004
Аргумент перигелію $\omega$ , °	223.91	0.5
Середня аномалія $M$ , °	347.72	0.5

Хоча отримані орбітальні елементи чутливі лише до реконструйованого напрямку та швидкості траєкторії боліда, доступні спостережні дані обмежують точність цих елементів. Довготу висхідного вузла визначено з найбільшою точністю, оскільки її значення природно впливає з положення Землі на її орбіті в момент зіткнення з метеороїдом. Інші орбітальні елементи визначені з меншою відносною точністю, однак вони все ще є достатньо точними для оцінки їхньої еволюції в минулому у статистичному сенсі.

Отримана орбіта дозволяє віднести метеороїд до навколомних астероїдів групи Аполлона (рис. 3.2), тобто до таких астероїдів, які мають велику піввісь орбіти  $a > 1$  а. о. та перигелійну відстань  $q < 1.017$  а. о. Оскільки орбіта метеороїда перетинає орбіту Землі, ми перевірили, чи він мав зближення із Землею в нещодавньому минулому. Для охарактеризування цих зближень було обчислено мінімальну відстань зближень метеороїда із Землею.

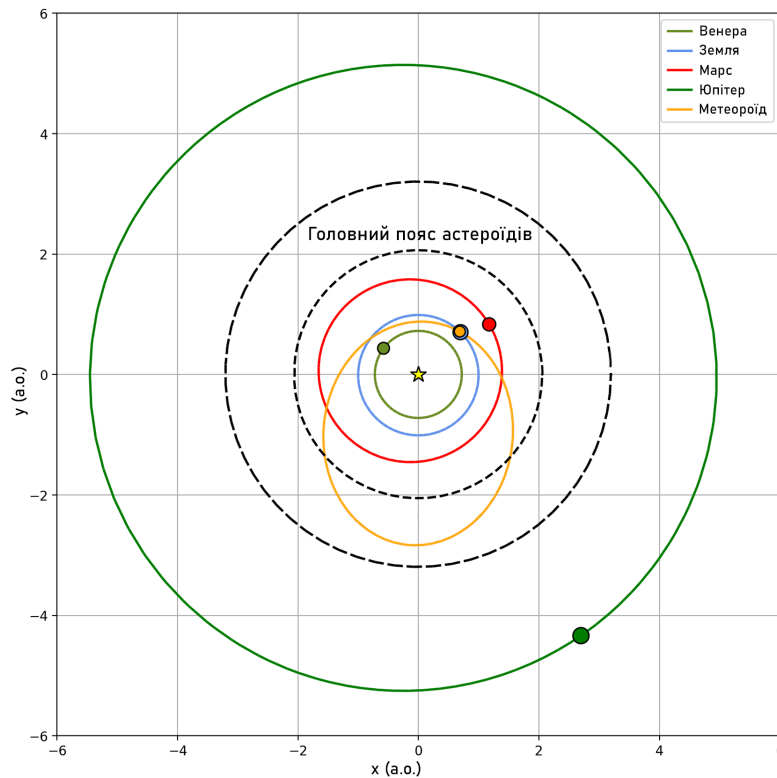


Рисунок 3.2 Орбіта метеороїда Адален на епоху JD 2459160.5

### 3.1.2. Моделювання орбітальної еволюції

Для зворотного чисельного інтегрування орбіт ми використовували пакет GENGA (Grimm & Stadel 2014). Метеороїд був представлений 1000 клонів, які були промодельовані на 1 млн років у минуле з кроком в 1 добу. Отримані дані про еволюцію орбіт клонів метеороїда показують, що він, можливо, мав тісні зближення із Землею протягом своєї орбітальної еволюції (рис. 3.3). Вплив гравітаційних збурень під час кожного зближення із Землею призводить до розтягування еліпсоїда невизначеності параметрів орбіти метеороїда. У цьому випадку можна вивчати орбітальну еволюцію метеороїда тільки статистично, чисельно моделюючи велику кількість його потенційних станів, які представлені різними клонами. Окрім цього, ефект Ярковського, який був врахований у моделюваннях, також вносить додаткові похибки у відтворення орбітальної еволюції.

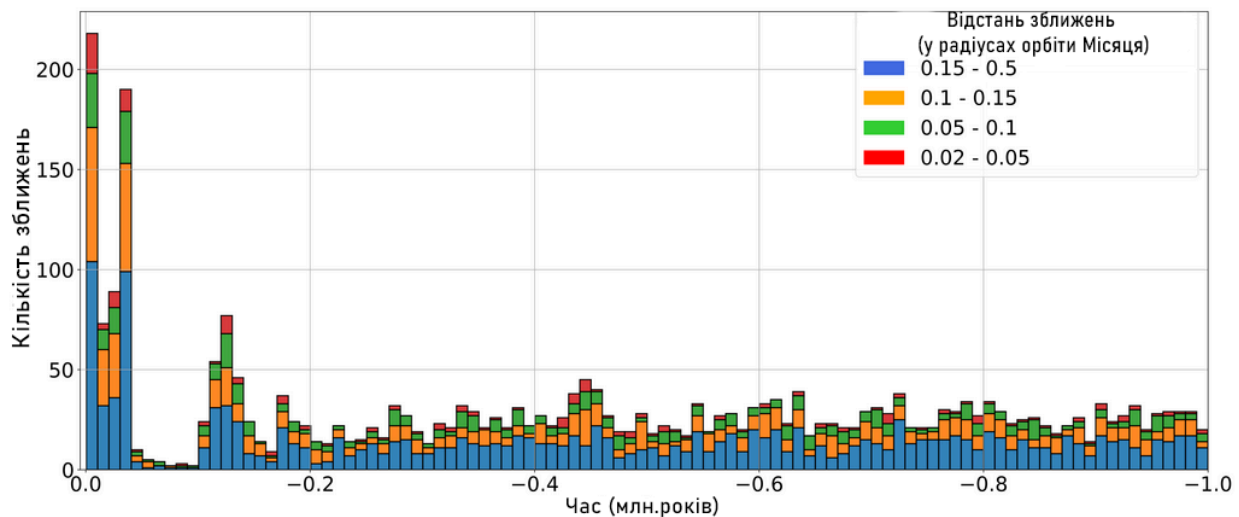


Рисунок 3.3 Розподіл клонів метеороїда Адален за найменшою відстанню до Землі у тісних зближеннях протягом мільйона років у минуле. Відстані зазначені в середній відстані Місяця до Землі.

Пошук кандидатів на роль батьківського тіла метеороїда розпочався з припущення, що метеороїд відокремився від іншого навколосемного астероїда в недалекому минулому, і їхні орбіти можуть зберігати схожість за своїми параметрами. Проте метеороїд міг зазнати збурень від Землі під час тісних наближень, які, безсумнівно, відбувалися (рис. 3.3). Якщо орбіта здебільшого зазнає збурень лише від однієї планети, орбітальні елементи змінюються, проте їхня комбінація, відома як параметр Тіссерана, залишається майже незмінною. Ця властивість дозволяє відстежувати об'єкти зі схожими значеннями параметра Тіссерана та порівнювати миттєві орбіти, які були змінені внаслідок гравітаційних збурень.

Параметр Тіссерана визначається як (Murray & Dermott 1999):

$$T_E = \frac{a_E}{a} + 2 \cos i \sqrt{\frac{a}{a_E} (1 - e^2)}, \quad (3.1)$$

де  $a$ ,  $e$  та  $i$  – велика піввісь, ексцентриситет та нахил орбіти астероїда відповідно;  $a_E$  – велика піввісь орбіти Землі, а  $T_E$  – параметр Тіссерана відносно Землі.

Якщо походження метеороїда достатньо нещодавнє, можна очікувати подібність між орбітами метеороїда та його батьківського тіла, а отже, й невелику відстань між їхніми орбітальними елементами. З огляду на це, ми використали метрику, запропоновану [Nesvorný & Vokrouhlický \(2006\)](#) та описану у Розділі 2, для обчислення фазової відстані  $d$  між двома тілами в просторі оскулюючих орбітальних елементів. Так, у роботі [Rožek et al. \(2011\)](#) було показано, що дана метрика підходить для відбору кандидатів за подібністю орбіти так само, як і традиційні  $D$ -критерії, і демонструє порівняні результати.

Ми використали як параметр Тіссерана  $T_E$ , так і фазову відстань у просторі орбітальних елементів  $d$  для попереднього відбору сусідніх тіл як кандидатів на роль можливих батьківських тіл. Очікується, що параметр Тіссерана буде краще зберігатись, але має вищу ймовірність випадкового збігу, тоді як відстань між орбітальними елементами більш чутлива до збурень. У нашому пошуку ми обмежилися найближчими сусідами, оскільки астероїди, що знаходяться далі з меншою ймовірністю матимуть тісні зближення. Однак існує можливість, що батьківське тіло може мати орбітальні параметри, що значно відрізняються від параметрів метеороїда, оскільки його орбіта змінилася через сильне гравітаційне збурення. Відстань у просторі орбітальних параметрів  $d$  та параметр Тіссерана  $T_E$  найближчих 35 сусідів метеороїда показані на рис. 3.4.

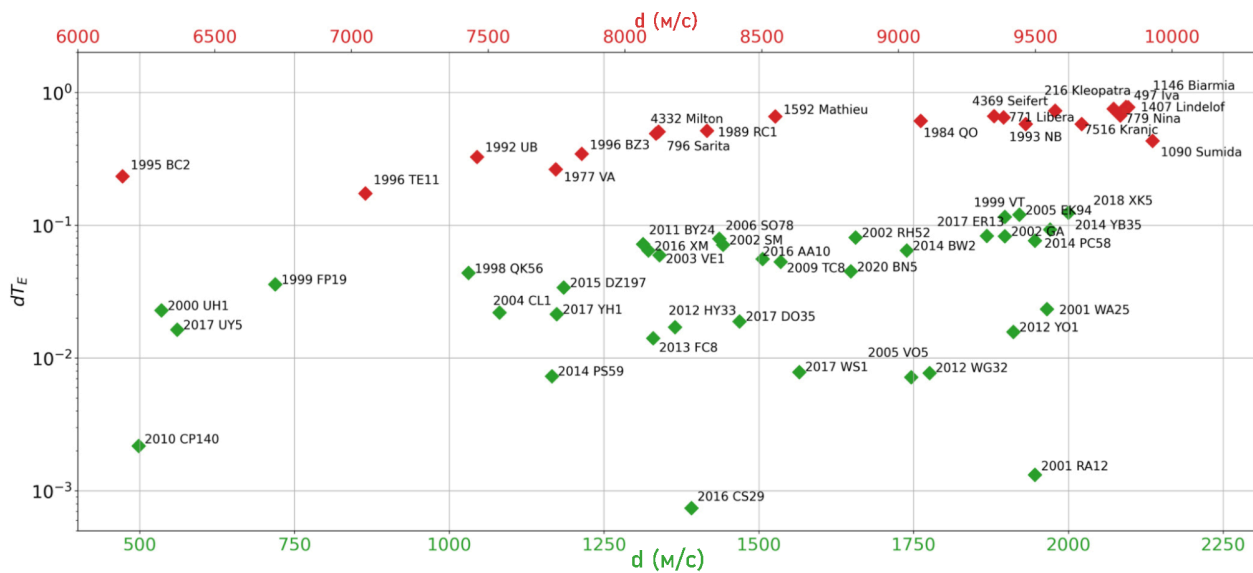


Рисунок 3.4 Фазова відстань  $d$  та різниця параметра Тіссера на між метеороїдом та сусідніми астероїдами (позначених зеленим, більшість з яких ще не класифіковані) та відомих астероїдів типу М (позначених червоним).

Моделювання були побудовані на основі підходів, описаних у підрозділі 2.3.2. Кожен із відібраних кандидатів у батьківське тіло був представлений 500 тестовими частинками в моделюванні. Метеороїд був представлений 10000 клонами, що в перерахунку дає  $5 \cdot 10^6$  унікальних пар для кожного кандидата. Отримані клони були чисельно промодельовані назад у часі, відслідковуючи відносні відстані та швидкості між кандидатами і клонами метеороїда. Зближення між клонами відслідковувалися за допомогою вбудованого функціоналу пакету GENGA, що базується на деревоподібному пошуку зближень на основі ієрархії обмежувальних об'ємів (BVH – bounding volume hierarchy), і записувалися для подальшого аналізу. Оскільки одним із ймовірних шляхів утворення метеороїда є катастрофічні зіткнення, які характеризуються високими взаємними швидкостями утворених уламків, моделювання проводилися з кроком інтегрування за часом 12 годин і вісьмома підкроками для інтегратора, що дозволяє виявляти тісні проходження метеороїда повз батьківське тіло на відстані до 1000 км при відносній швидкості 1–5 км/с (Bottke et al. 2015).

Із даних чисельних моделювань нами виявлено, що метеороїд не мав достатньо тісних зближень з жодним із кандидатів за попередній мільйон

років (рис. 3.5). Такий результат може вказувати на те, що батьківське тіло не присутнє серед відібраних кандидатів, або відокремлення сталося поза межами цього часу. Той факт, що більшість кандидатів мають порівняно високі відносні відстані та швидкості на момент їх зближення, підтверджує це припущення. Також було проведено пошук тісних зближень між клонами метеороїда та найближчими астероїдами М-типу. Астероїди М-типу, ймовірно, мають залізний склад і могли б бути потенційними батьківськими тілами таких залізних метеороїдів. Усього був обраний 21 кандидат для перевірки, але жоден із них не продемонстрував достатньо тісних зближень з клонами метеороїда (рис. 3.5).

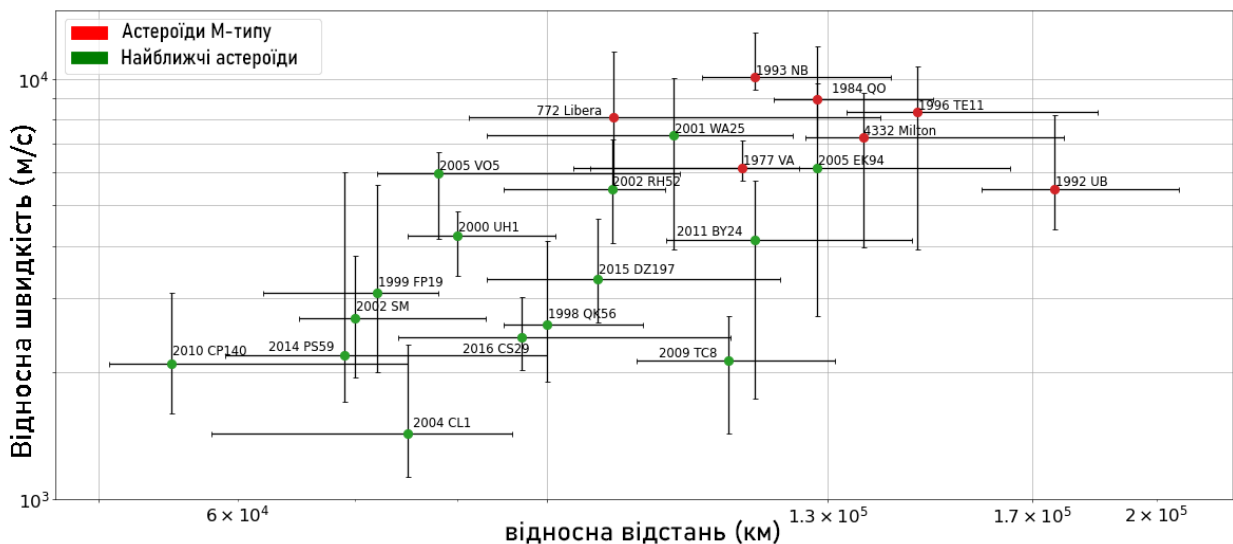


Рисунок 3.5 Зареєстровані найтісніші зближення між клонами метеороїда та відібраними кандидатами.

### 3.1.3. Статистична оцінка області походження

За результатами моделювань, метеороїд, найбільш ймовірно, прийшов із Головного поясу астероїдів як окреме тіло. Основним механізмом руйнування малих астероїдів та метеороїдів є негравітаційний ЯОРП-ефект, який через асиметричне розсіювання та перевипромінювання сонячного випромінювання призводить до прискорення обертання малих тіл аж до їх

подальшого руйнування відцентровими силами. Момент сил, який діє на метеороїд внаслідок ЯОРП-ефекту, можна розрахувати за наступною формулою (Golubov et al., 2016; Marzari et al., 2020):

$$T = \frac{\Phi C r^3}{c a^2 \sqrt{1-e^2}}. \quad (3.2)$$

Тут  $\Phi = 1361 \text{ Вт/м}^2$  сонячна стала на відстані у 1 а.о. ,  $e$  – ексцентриситет,  $c$  – швидкість світла,  $r$  – радіус метеороїда,  $C$  – безрозмірний ЯОРП-коефіцієнт. Для більшості форм астероїдів коефіцієнт  $C$  лежить в межах 0.002–0.02 (Marzari et al., 2020), і очікується, що для метеороїда він знаходиться у цих самих межах. Цей момент сил призводить до появи кутового прискорення  $d\omega/dt = T/I$ , де  $I$  – момент інерції. У припущенні сферичної форми метеороїда  $I$  можна розрахувати як

$$I = \frac{8}{15} \pi \rho r^5, \quad (3.3)$$

де  $\rho$  – густина речовини метеороїда. Критичну частоту обертання для невеликого тіла із міцністю на розтяг  $\sigma$  можна оцінити (Sanchez & Scheeres, 2014) як:

$$\omega \approx \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho r^2}}. \quad (3.4)$$

Міцність на розтяг для залізних метеоритів знаходиться між 43 МПа та 483 МПа, із середнім значенням 340 МПа (Pohl & Britt, 2020). Із цих оцінок можна отримати наступний вираз для часу, необхідного ЯОРП-ефекту для руйнування тіла:

$$t \approx \frac{8\pi r c a^2 \sqrt{1-e^2}}{15\Phi C} \sqrt{2\sigma\rho}. \quad (3.5)$$

При підстановці значень для метеорита, припускаючи розмір метеороїда  $r \approx 0.75 \text{ м}$  (IMO), ми отримуємо значення для часу життя під дією ЯОРП-ефекту від 2 до 20 млн років. Цього часу достатньо для того, щоб метеороїд потрапив із резонансу до навколоземного регіону як самостійне тіло. Оцінений час має той самий порядок величини, що й типовий час життя астероїдів і метеороїдів на навколоземних орбітах, який становить близько 10

мільйонів років (Granvik & Brown, 2018; Bottke et al., 2002). Оскільки зони резонансів є динамічно хаотичними, перехід із резонансу стирає інформацію про початкову орбіту тіла і значно ускладнює пошук батьківського тіла метеороїда.

За визначеними елементами орбіти метеороїда (табл. 3.2), за допомогою програмного забезпечення NEOPOP (Granvik & Brown, 2018) було зроблено статистичну оцінку джерела походження метеороїда. Результати вказують на віковий резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (89%) або резонанс за середнім рухом 3:1 з Юпітером (10%) як на можливі джерела походження метеороїда із Головного поясу астероїдів (табл. 3.3). Ці резонанси відповідальні за доставку більшості навколосемних астероїдів (Bottke et al., 2002; Granvik & Brown, 2018). Зона, що межує з цими резонансами, включає велику кількість слабших резонансів середнього руху з Землею, Марсом та Венерою (Gallardo, 2006), які можуть сприяти міграції орбіти метеороїда до одного із сильніших резонансів. Із цього результату можна зробити висновок, що метеороїд походить із внутрішньої частини Головного поясу.

Таблиця 3.3 Ймовірність джерела походження залізного метеороїда, що обчислена за допомогою програмного забезпечення NEOPOP

Джерело походження	Ймовірність (%)
Віковий резонанс $\nu_6$	89
Резонанс середнього руху J3:1	10
Резонанс середнього руху J5:2	<1

На рис. 3.6 наведено розподіл нахилу орбіти та великої півосі для клонів метеороїда при інтегруванні їхніх орбіт у минуле на 1 млн років. За весь час інтегрування значення нахилу орбіти астероїда було більшим за  $7.5^\circ$ ,

що вказує на те, що метеороїд, найімовірніше, походить із фонових астероїдів М-типу.

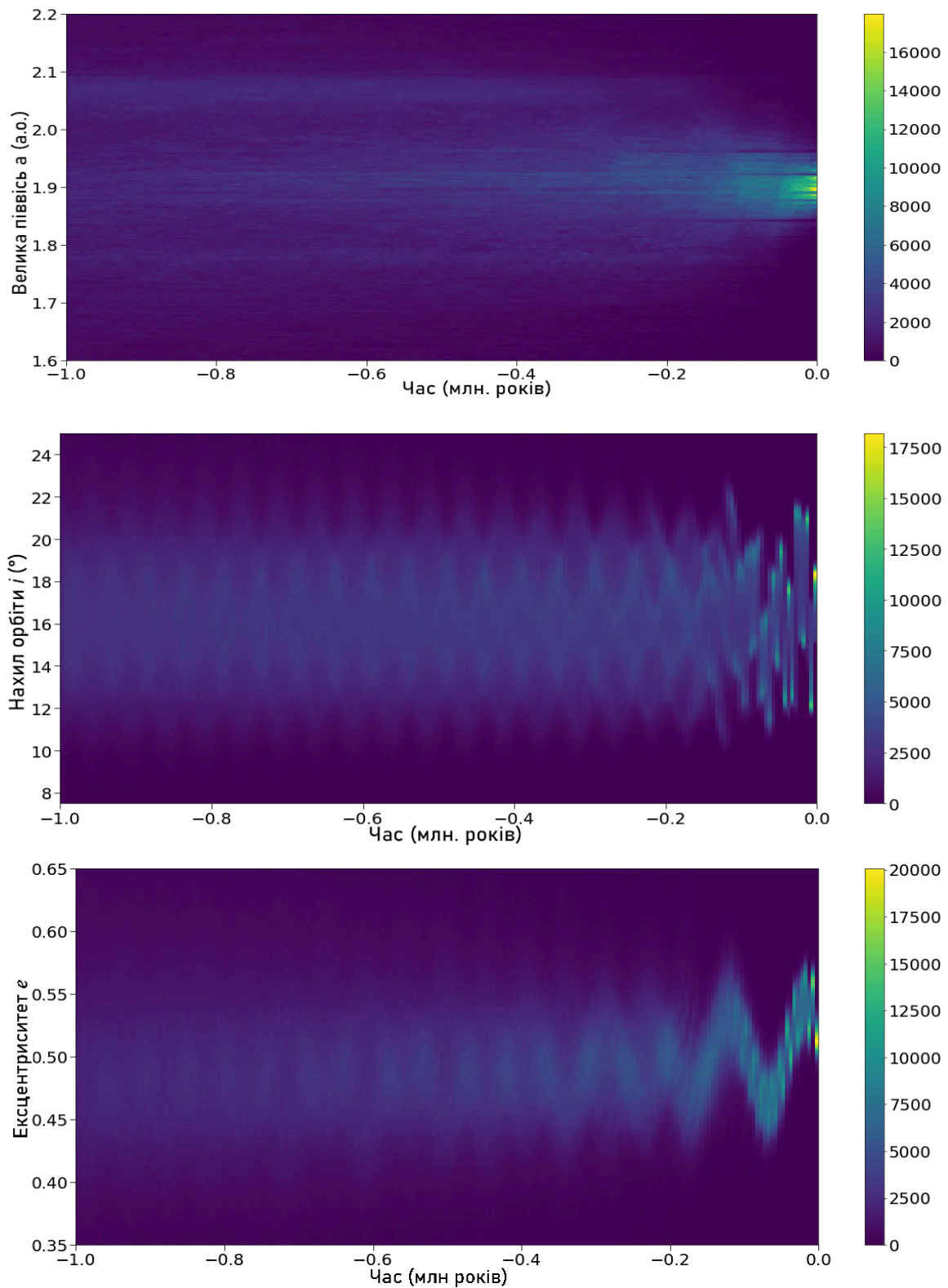


Рисунок 3.6 Розподіл великої півосі, нахилу та ексцентриситету орбіти для клонів метеороїда при інтегруванні їхніх орбіт у минуле на 1 млн років.

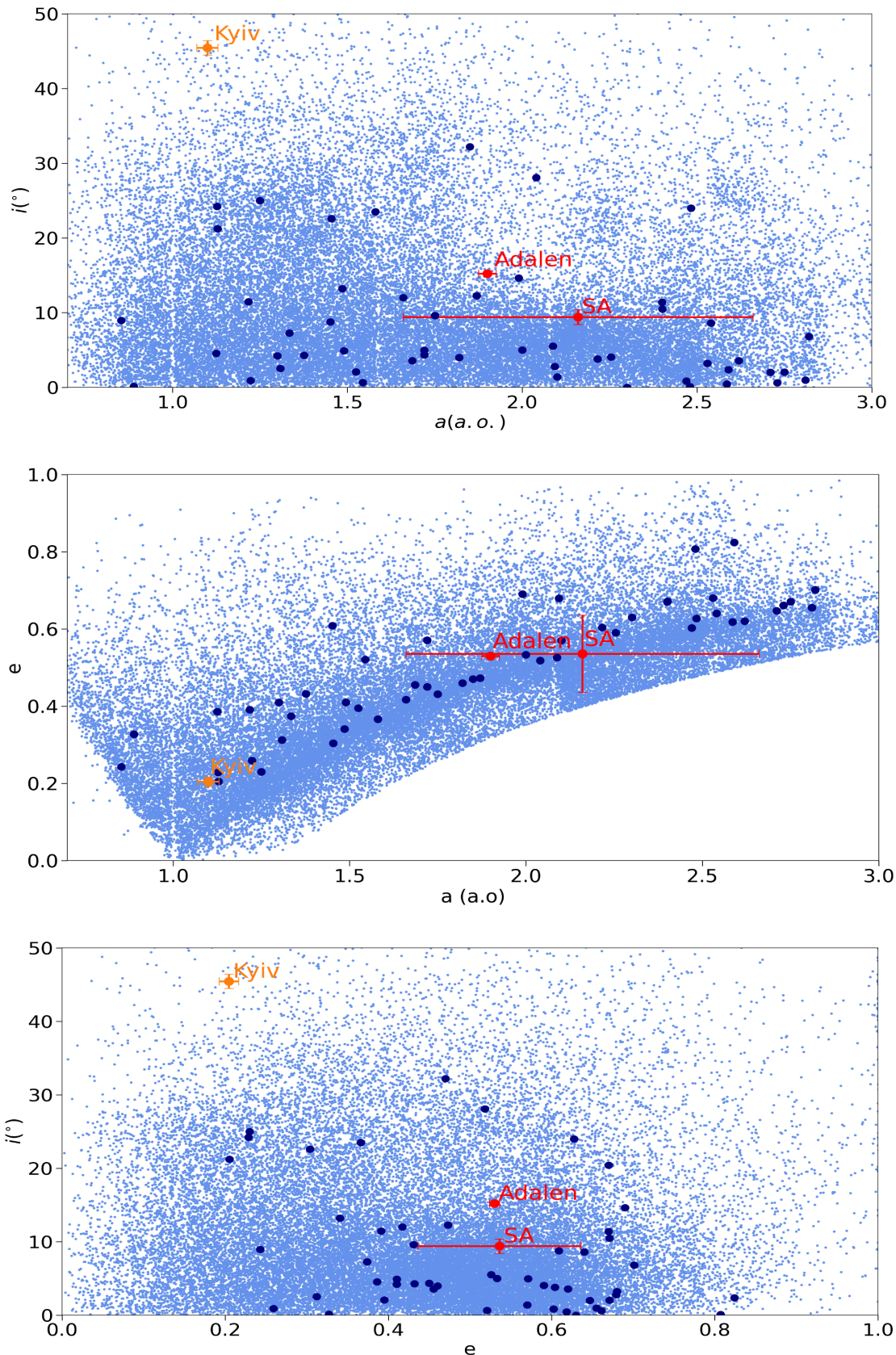


Рисунок 3.7 Порівняння елементів орбіти залізного метеороїда (**Adalen**) і київського метеороїда (**Kyiv**) (див. наступний підрозділ) з орбітами навколомних астероїдів і метеороїдів із відомими геліоцентричними орбітами (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/>). Також показані орбітальні елементи Сіхоте-Алінського метеороїда за даними **Fesenkov (1951)** (**SA**).

Сусідня частина внутрішнього Головного поясу є місцерозташуванням найбільших астероїдних сімейств – Вести, Флори та комплексу Ніси-Полани (Nesvorný 2015). Оцінено, що 85% астероїдів у внутрішній частині Головного поясу можуть походити із зазначених найбільших сімейств (Dermott et al, 2018). Хоча Веста є диференційованим тілом із металевим ядром (Russell et al., 2012), її сімейство складається переважно із силікатних матеріалів, оскільки зіткнення, яке створило сімейство, не було достатньо енергійним, щоб вплинути на її ядро. Однак сімейства Вести та Ніси-Полани відомі наявністю деяких ідентифікованих астероїдів М-типу. Сімейство Баптистини, що також розташоване у внутрішньому Головному поясі, переважно складається з М-астероїдів (Slyusarev & Shymkiv, 2017; Slyusarev, 2018). Тим не менш, у всіх цих сімейств невеликі нахили ( $2^{\circ}$ – $7^{\circ}$ ) порівняно з метеороїдом, що робить малоімовірним походження метеороїда з одного з цих сімейств. Найімовірніше, метеороїд походить із фонових астероїдів М-типу, розсіяних у цій зоні внутрішнього Головного поясу. Десятки астероїдів М-типу мають близькі до метеороїда значення нахилу ( $12^{\circ}$ – $17^{\circ}$ ) та великої півосі (2.0–2.5 а.о.).

На рис. 3.7 видно, що орбітальні параметри залізного метеорита мало відрізняються від орбіт метеороїдів, що призвели до падіння метеоритів інших типів. Орбіта залізного метеороїда також є досить типовою в порівнянні із орбітами астероїдів груп Аполлона та Амура. Орбіта Сихоте-Алінського метеороїда, визначена на основі свідчень очевидців, має схожу велику піввісь і ексцентриситет з орбітою метеороїда Адален ( $a = 2.16$  а.о.;  $e = 0.536$ ), при цьому її нахил майже у два рази менший ( $i = 9.4^{\circ}$ ) (Fesenkov 1951).

Хоча можна бути досить впевненим, що матеріал, який складає метеороїд, прибув із внутрішнього Головного поясу, це залишає відкритими можливості щодо того, де метеороїд покинув своє батьківське тіло. По-перше, матеріал метеороїда міг покинути Головний пояс як частина

більшого, але ще не відкритого, астероїда і нещодавно відколотися від нього. По-друге, метеороїд міг відколотися від батьківського тіла ще в Головному поясі і досягти орбіти поблизу Землі вже у своїй теперішній формі. У будь-якому разі, метеороїд не міг існувати як окреме тіло занадто довго, оскільки такі малі тіла мають обмежений час життя, постійно руйнуються, і їх популяція поповнюється через розпад більших тіл.

Відокремлення метеороїда від більшого тіла могло статися або в результаті зіткнення батьківського тіла з іншим астероїдом, або через надкритичне обертання батьківського тіла та його подальше руйнування через відцентрові сили. Необхідна обертальна швидкість може бути створена ефектом ЯОРП (наприклад, [Vokrouhlický et al., 2015](#)). Як ефект ЯОРП, так і зіткнення можуть суттєво сприяти руйнуванню малих астероїдів Головного поясу на менші частини, в той час як ефект ЯОРП є єдиним домінуючим механізмом, який може руйнувати астероїди поблизу Землі, оскільки цей регіон є малонаселеним астероїдами, що робить зіткнення рідшими у порівнянні із Головним поясом.

Метеороїд, створений в результаті такого розпаду, піддається тим самим двом процесам руйнування, які обмежують його час життя і визначають, наскільки далеко його орбіта може еволюціонувати. Оцінений розмір метеороїда складає близько 1 м. Для таких малих об'єктів ЯОРП-ефект є домінуючим процесом дезагрегації, навіть в Головному поясі, і посилюється для астероїдів поблизу Землі. Проте залізні метеороїди відомі своєю високою міцністю на розтяг ([Pohl & Britt, 2020](#)), що дозволяє їм витримувати великі відцентрові сили і збільшує час, необхідний для того, щоб метеороїд був зруйнований ефектом ЯОРП. Оцінений час руйнування метеороїда становить порядку 10 мільйонів років. Це довше за типовий час для неметалевих тіл такого ж розміру, що дає метеороїду достатньо часу, щоб почати свій шлях з Головного поясу й досягти теперішньої орбіти. Час життя під впливом ЯОРП-ефекту є того ж порядку величин, що і час життя

астероїдів та метеороїдів на орбітах поблизу Землі, який складає близько 10 мільйонів років (Bottke et al., 2002; Granvik & Brown, 2018).

Основну інформацію про історію метеороїда можна отримати з часу впливу космічних променів CRE (cosmic ray exposure age). Цей метод датування вимірює вміст космогенних нуклідів у зразку і дозволяє обчислити період, протягом якого зразок був під впливом космічних променів. У випадку метеороїда це відповідає проміжку часу після відокремлення від батьківського тіла і до моменту входу в атмосферу Землі. Не очікується, що метеороїд буде молодшим за 1 мільйон років, оскільки жодне батьківське тіло не було знайдено в моделюваннях у межах цього часу. У той же час, оцінка часу ЯОРП для метеороїда з наших розрахунків становить близько 20 мільйонів років, що встановлює верхню межу його віку. Тому ми очікуємо, що вік метеороїда за методом CRE повинен бути в межах від 1 до 20 мільйонів років. Подальший лабораторний аналіз метеороїда може надати інформацію про його вік за методом CRE і перевірити нашу гіпотезу щодо того, що метеороїд пережив довгу подорож від внутрішньої частини Головного поясу астероїдів до орбіти поблизу Землі без руйнування.

### **3.2. Порівняння з іншими метеороїдами**

19 квітня 2023 року о 18:57:20 UTC над територією Києва та навколишніх областей було зафіксовано яскравий спалах у небі, який за своїми параметрами був класифікований як болід. За даними спостережень, спалах було зафіксовано кількома незалежними системами відеоспостереження та очевидцями в Україні, а також за допомогою камер Європейської болідної мережі. Тривалість видимого явища становила приблизно 5 секунд, що характерно для болідів високої яскравості. Початкове входження метеороїда в атмосферу було зафіксовано на висоті ~98 км над територією селища Велика Димерка, після чого тіло пройшло над Києвом на

висоті 80 км і завершило свій рух розпадом на уламки на висоті ~35 км (табл. 3.4). Для зручності ми називатимемо цей метеороїд київським.

Розрахунки на основі аналізу яскравості спалаху та моделей розпаду тіл при вході в атмосферу, вказують на те, що початкова маса метеороїда знаходилася в діапазоні 200–300 кг. Діаметр об'єкта, за оцінками, складав близько 0.5 м. Високий вхідний кут і швидкість (~27 км/с) сприяли інтенсивному нагріву метеороїда внаслідок аеродинамічного опору, що призвело до його фрагментації та часткового розпаду (табл. 3.5). (<https://www.imo.net/april-19-superbolide-over-ukraine/>)

Таблиця 3.4 Характеристичні значення траєкторії боліда. Кінцеві значення відповідають останній спостережуваній точці боліда, висота якої перевищує фактичну кінцеву висоту світного польоту.

Параметр	Початок	Кінець
Широта (°)	50.61	49.98
Довгота (°)	31.02	29.69
Висота (км)	94.99	35.6

Таблиця 3.5 Параметри топоцентричного радіанта на момент 2023-04-19T18:57:20.00:

Параметр	Значення	Похибка
Азимут (°)	53.79	0.6
Висота (°)	26.82	0.6
Швидкість (км/с)	26.7	0.5

Використовуючи дані точки входу та швидкості метеороїда, за допомогою програми MeteorToolkit були отримані доатмосферні параметри орбіти метеороїда (див. табл. 3.6).

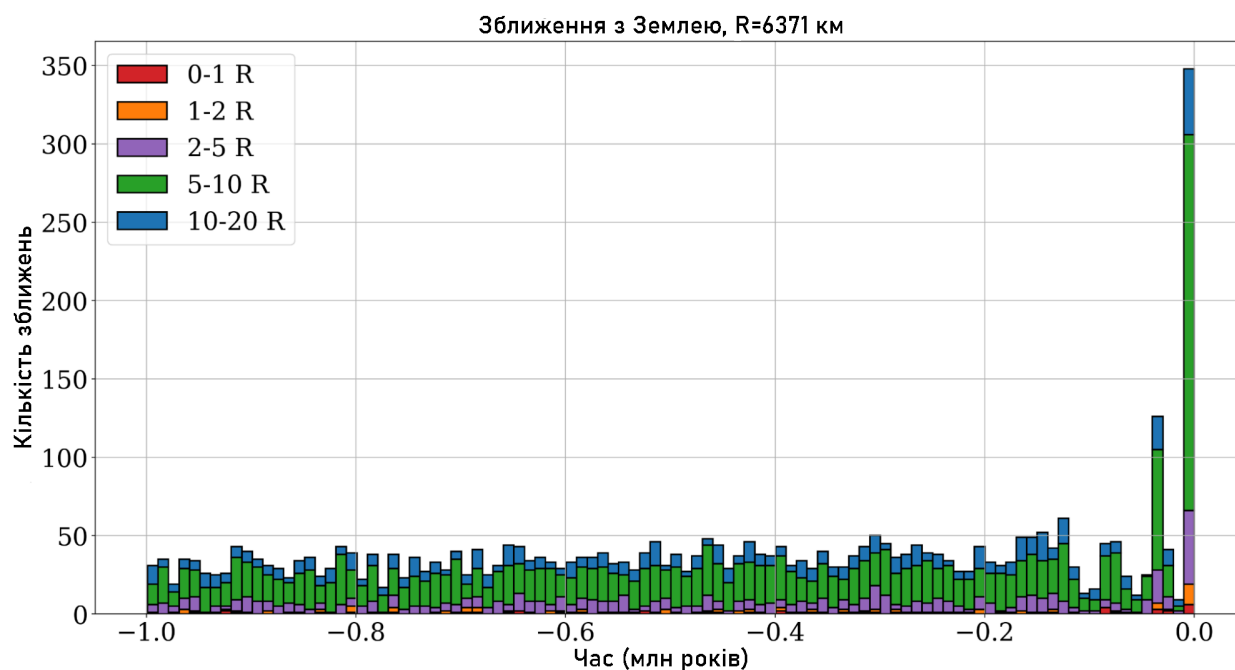
За розрахованими орбітальними параметрами метеороїд відноситься до навколоземних астероїдів групи Аполлона, тобто до таких астероїдів, які мають велику піввісь орбіти  $a > 1$  а. о. та перигелійну відстань  $q < 1.017$  а. о. (табл. 3.6) Більшість об'єктів групи Аполлона вважаються астероїдами, що потрапили в околиці Землі з Головного поясу через гравітаційні резонанси або інші збурення. Розрахований нахил орбіти метеороїда у  $45^\circ$  не є типовим для більшості астероїдних сімейств у Головному поясі, проте цілком можливий для об'єктів, що зазнали суттєвих динамічних збурень. Такі нахили рідко, але зустрічаються серед навколоземних астероїдів (рис. 3.7).

Таблиця 3.6 Орбітальні елементи київського метеороїда на епоху JD 2460053.5: (19.04.2023).

Параметр орбіти	Значення	Похибка
Велика піввісь $a$ , а.о.	1.1	0.03
Ексцентриситет $e$	0.2	0.012
Нахил $i$ , $^\circ$	45.4	0.96
Довгота вузла $\Omega$ , $^\circ$	29.1456	0.0001
Аргумент перигелію $\omega$ , $^\circ$	256.08	5.66
Середня аномалія $M$ , $^\circ$	305.02	6.04

Оскільки орбіта метеороїда перетинає орбіти планет земної групи, було перевірено, чи він мав зближення з ними у нещодавньому минулому. Для охарактеризування таких зближень було обчислено мінімальну відстань

перетину між найближчими прольотами метеороїда до планет. Отримані дані про еволюцію орбіт клонів метеороїда показують, що він, можливо, у перші десятки тисяч років мав тісні зближення із Землею, і в подальшому минулому – з Землею та Венерою у приблизно однаковому співвідношенні на відстанях 5-10 радіусів планет (30-60 тис. км) протягом своєї орбітальної еволюції (рис. 3.8). Вплив гравітаційних збурень під час кожного зближення із планетами призводить до розтягування еліпсоїда невизначеності параметрів орбіти метеороїда. Внаслідок цього, орбітальну еволюцію метеороїда можна вивчати тільки статистично, моделюючи велику кількість його потенційних станів, представлених клонами.



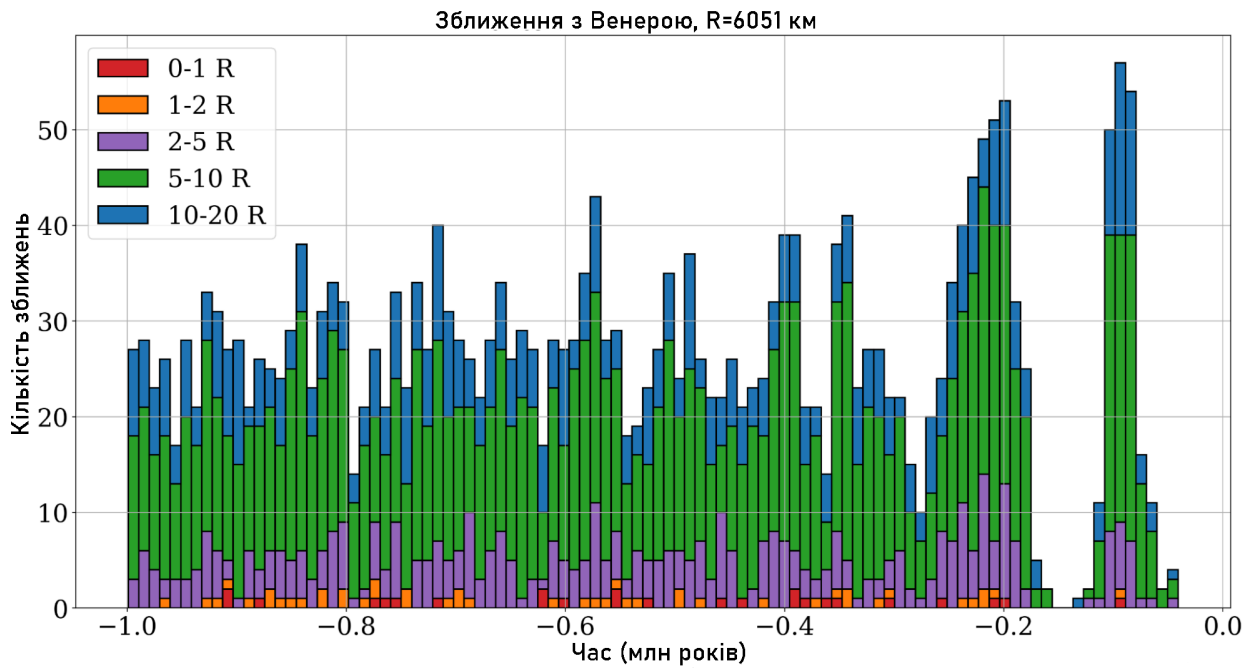


Рис. 3.8. Розподіл клонів київського метеороїда за найменшою відстанню до Землі та Венери у тісних зближеннях протягом мільйона років у минуле.

Відстані виражені в радіусах відповідних планет.

Отримані густини розподілу орбітальних параметрів змодельованих клонів відображають активну еволюцію метеороїда (рис. 3.9). Більшість клонів перебуває на подібних орбітах, утворюючи певний тренд – орбітальний коридор. Статистично, реальний метеороїд, ймовірно, рухався аналогічною орбітою. За великого нахилу понад  $40^\circ$  може проявлятися так званий механізм Лідова-Козаї, який призводить до пов'язаних змін ексцентриситету та нахилу орбіти: коли зменшується  $i$ , зростає  $e$ , і навпаки. Розпорошення елементів орбіт є наслідком дії як ефекту Ярковського, так і гравітаційних збурень, що також пояснює вибране обмеження за часом моделювання в минуле значенням в 1 млн років.

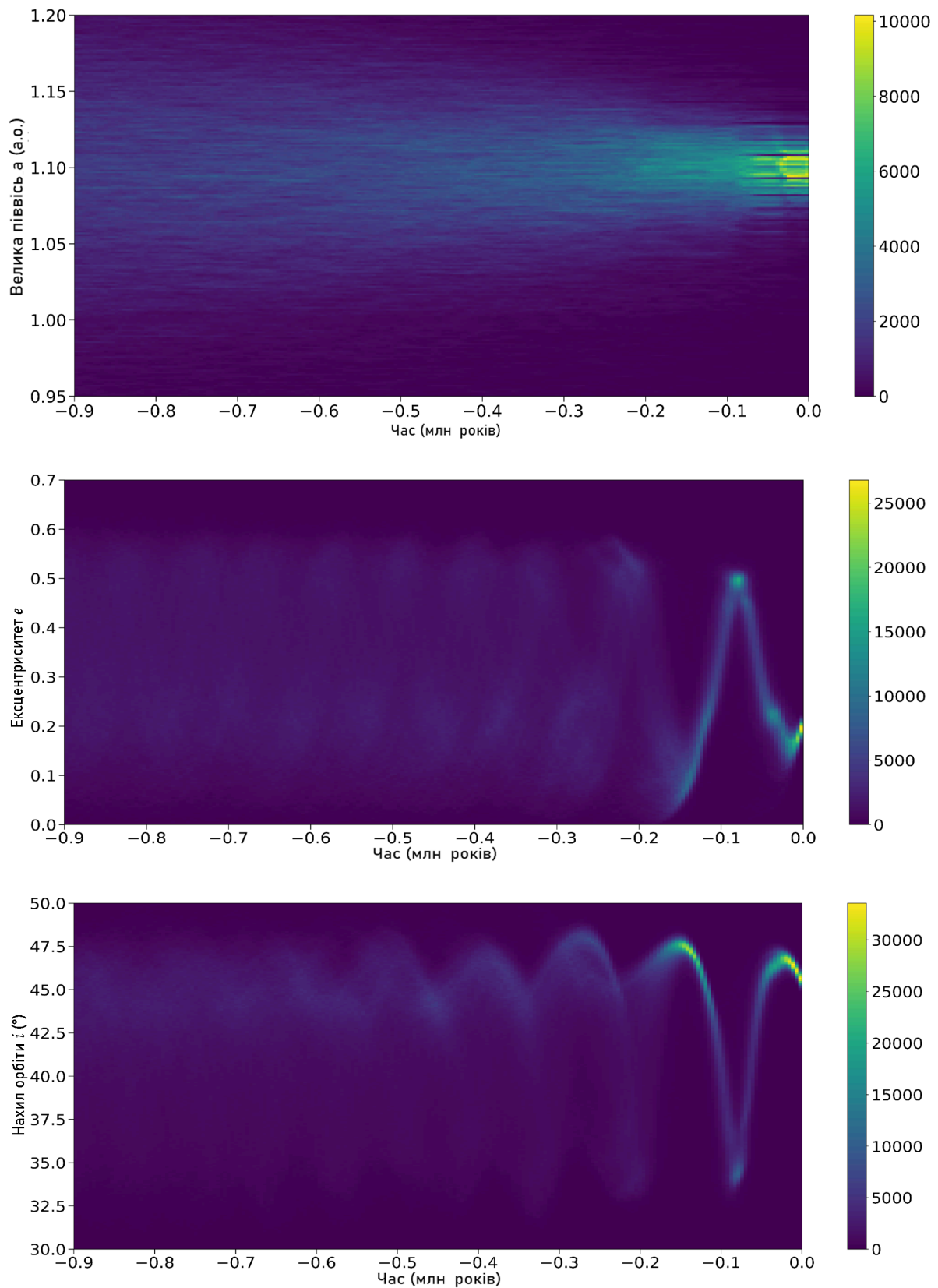


Рисунок 3.9 Розподіл нахилу орбіти, великої півосі та ексцентриситету для клонів київського метеороїда при інтегруванні їхніх орбіт у минуле на 1 млн років.

Для попереднього відбору кандидатів у потенційні батьківські тіла метеорита було використано параметр Тіссерана  $T_E$  та фазову відстань у просторі орбітальних елементів  $d$ . У нашому пошуку ми обмежилися найближчими сусідами, оскільки астероїди, що знаходяться далі з меншою ймовірністю матимуть тісні зближення. Однак існує можливість, що батьківське тіло може мати орбітальні параметри, що значно відрізняються від параметрів метеороїда, оскільки його орбіта змінилася через сильне гравітаційне збурення. Відстані між визначеною орбітою метеороїда та найближчими 35 астероїдами в просторі орбітальних параметрів  $d$  та параметра Тіссерана  $T_E$  наведені на рис. 3.10.

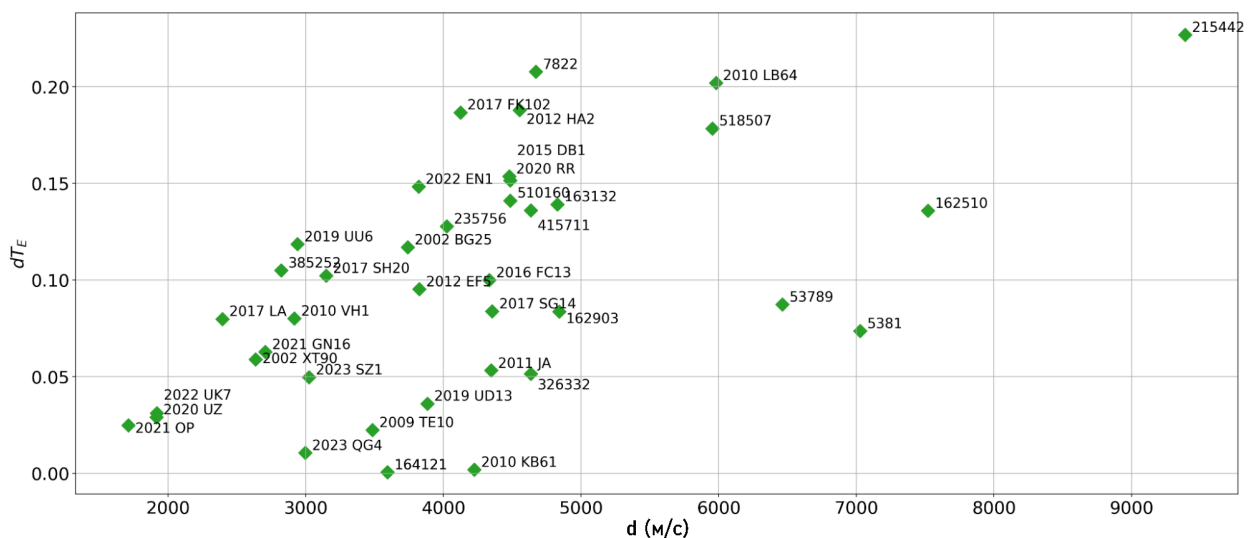


Рисунок 3.10 Фазова відстань  $d$  та різниця параметра Тіссерана між кийвським метеороїдом та сусідніми орбітами астероїдів.

З метою пошуку зближень із метеороїдом відібрані кандидати були чисельно промодельовані на 1 млн років у минуле. Кожен кандидат був представлений 200 клонами, в той же час метеороїд був представлений 10000 клонами, що в перерахунку дає  $2 \times 10^6$  комбінацій клонів метеороїда з кожним з кандидатів. Як і у випадку з метеороїдом Адален, ймовірним шляхом утворення кийвського метеороїда є катастрофічні зіткнення, які характеризуються високими взаємними швидкостями утворених уламків,

тому моделювання проводилося з малим кроком інтегрування у 12 годин і вісьмома підкроками для інтегратора.

Результати моделювань показують, що метеороїд має порівняні параметри прольотів з усіма відібраними кандидатами, зі швидкостями порядку 5-10 км/с, та не має тісних зближень із жодним із кандидатів за попередній мільйон років (рис. 3.11). Такий результат може вказувати на те, що батьківське тіло метеороїда не присутнє серед відібраних кандидатів або відокремлення сталося поза межами цього часу.

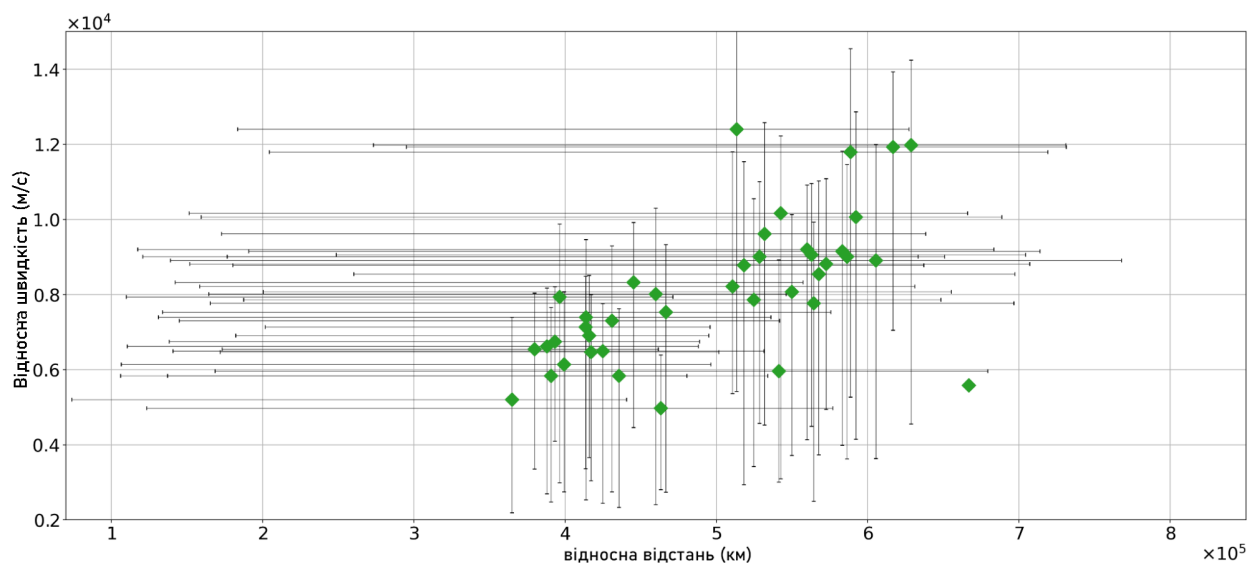


Рисунок 3.11 Найближчі зареєстровані в моделюваннях прольоти між клонами київського метеороїда та відібраними астероїдами.

За допомогою програмного забезпечення NEOPOP (Granvik & Brown, 2018) було здійснено статистичну оцінку джерела походження метеороїда. Результати вказують на такі можливі джерела у Головному поясі астероїдів: віковий резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (50%), резонанс середнього руху 3:1 з Юпітером (19%) та походження із групи астероїдів Угорщини (38%). Астероїди групи Угорщини знаходяться у внутрішній частині Головного поясу астероїдів та мають великі нахили орбіт  $i$  від 16 до 34 градусів (Warner et al., 2009). Характеристики групи формуються резонансом 4:1 з Юпітером, віковим резонансом  $\nu_6$  із Сатурном, а також резонансами 4:3 та 3:2 із Марсом. У результаті впливу ефекту Ярковського, астероїди потрапляють в один із цих

резонансів, після чого можуть перейти до навколоземного простору (Forgács-Dajka et al., 2021). Більшість астероїдів цієї групи належать до спектрального класу E, який характеризується достатньо високим альбедо 0.30. Вважають, що ці астероїди є джерелом метеоритів типу енстатитових ахондритів.

Резонанси J3:1 та  $v_6$  відповідальні за доставку більшості навколоземних астероїдів з Головного поясу (Bottke et al., 2002; Granvik & Brown, 2018). Зона, що межує з цими резонансами, включає велику кількість слабших резонансів середнього руху з Землею, Марсом та Венерою (Gallardo 2006), які можуть сприяти міграції орбіти метеороїда до навколоземного простору. Із цього результату можна зробити висновок, що київський метеороїд також походить із внутрішньої частини Головного поясу.

Таблиця 3.7 Ймовірність джерела походження київського метеороїда, обчислена за допомогою програмного забезпечення NEOPOP

Джерело походження	Ймовірність (%)
Віковий резонанс $v_6$	50
Астероїди групи Угорщини	38
Резонанс середнього руху J3:1	19

### Висновки до розділу

Метеорити із наявними інструментальними даними атмосферного шляху мають високу наукову цінність, оскільки це дозволяє обчислити їхню доатмосферну орбіту та дає шанс встановити їхнє джерело походження у космосі.

Перше інструментально зафіксоване падіння залізного метеорита надало унікальну можливість дослідити джерело походження металевих

астероїдів у Сонячній системі. Інструментальні дані дозволили обчислити орбіту метеороїда і віднести його до групи Аполлона. Розрахована орбіта залізного метеорита не має істотних відмінностей порівняно з раніше зареєстрованими падіннями кам'яних метеоритів і є типовою для навколоземних астероїдів.

Результати чисельних моделювань у минуле вказують на те, що досліджений метеороїд ймовірно залишив своє батьківське тіло не пізніше, ніж 1 мільйон років тому. Статистична модель вказує, що можливими джерелами походження метеороїда є віковий резонанс  $\nu_6$  з Сатурном (89%) та резонанс 3:1 з Юпітером (10%), які є основними постачальниками й інших навколоземних астероїдів. Оцінка часу життя під дією ЯОРП-ефекту для залізного метеороїда становить близько 20 мільйонів років. Цей часовий масштаб є достатнім для того, щоб метеороїд потрапив з Головного поясу астероїдів до навколоземного простору як окреме тіло.

Орбіта київського боліда за визначеними орбітальними параметрами також відноситься до групи Аполлона. Високий нахил орбіти вирізняє його з-поміж відомих падінь метеоритів, але є характерним для деяких навколоземних астероїдів. Протягом попередніх 1 млн років орбіта даного метеороїда ймовірно була збурена тісними прольотами повз Венеру та Землю, а результати моделювань показують, що метеороїд не мав тісних зближень з жодним із відібраних кандидатів у батьківські тіла. Статистична модель вказує віковий резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (50%), групу астероїдів Угорщини (38%), та резонанс середнього руху 3:1 з Юпітером (19%), як можливі джерела походження метеороїда у внутрішній частині Головного поясу.

## РОЗДІЛ 4

### ДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ АСТЕРОЇДІВ

#### 4.1. Навколоземний астероїд (153201) 2000 WO107

Астероїд (153201) 2000 WO107 є навколоземним астероїдом, що за своїми орбітальними характеристиками належить до групи Атона. Через велике значення ексцентриситету  $e = 0.7807$  його орбіта перетинає орбіти всіх планет земної групи, а астероїд класифікується як потенційно небезпечний для Землі. За своїми спектральними характеристиками астероїд належить до Х-типу (Binzel et al., 2004), а приймаючи до уваги величину альbedo  $0.129 \pm 0.058$  (Mainzer et al., 2011), – ймовірно відноситься до М-типу і може мати багатий вміст металу. Проведені радарні спостереження обсерваторією Голдстоун виявили, що астероїд найімовірніше є контактнo-подвійним (Benner, 2020). Через свою контактнo-подвійну структуру, високоексцентричну орбіту та фізичні характеристики, (153201) 2000 WO107 є цікавим об'єктом для детальних досліджень.

##### 4.1.1. Фотометричні спостереження

Згідно з даними інфрачервоного космічного телескопа NEOWISE (Mainzer et al., 2019), середній діаметр астероїда становить  $D = 510 \pm 83$  м. Через відносно малі розміри об'єкта, можливість його спостереження з наземних телескопів виникає лише під час тісних зближень із Землею, які трапляються приблизно кожні 20 років. Наприкінці 2020 року астероїд (153201) 2000 WO107 наблизився до Землі на мінімальну відстань 0.029 а.о., а його видима зоряна величина сягала 13.2 зор. вел. (аспект спостережень і блиск астероїда попередньо були розраховані за даними MPC IAU, <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>).

У період зближення астероїд спостерігався за умов швидкої зміни кутів освітлення і спостереження, що було зумовлено переміщенням відносно

Сонця та Землі. Фазовий кут, що визначає освітлену частину поверхні астероїда, змінювався від понад  $100^\circ$  до  $3^\circ$  поблизу опозиції. Така різноманітність геометричних умов створює сприятливі можливості для отримання кривих блиску при різному розташуванні осі обертання, що, у свою чергу, дозволяє побудувати модель форми тіла астероїда.

Фотометричні спостереження проводилися в період з 28 листопада по 8 грудня в межах кооперації між НДІ астрономії і партнерськими обсерваторіями в Грузії, Узбекистані і Словаччині. На момент початку спостережень параметри обертання та форма астероїда 2000 WO107 залишалися невідомими. Протягом цього часу об'єкт пройшов значну дугу по небесній сфері: аспектний кут змінився на  $60^\circ$ , а фазовий кут – від  $5^\circ$  до  $70^\circ$ .

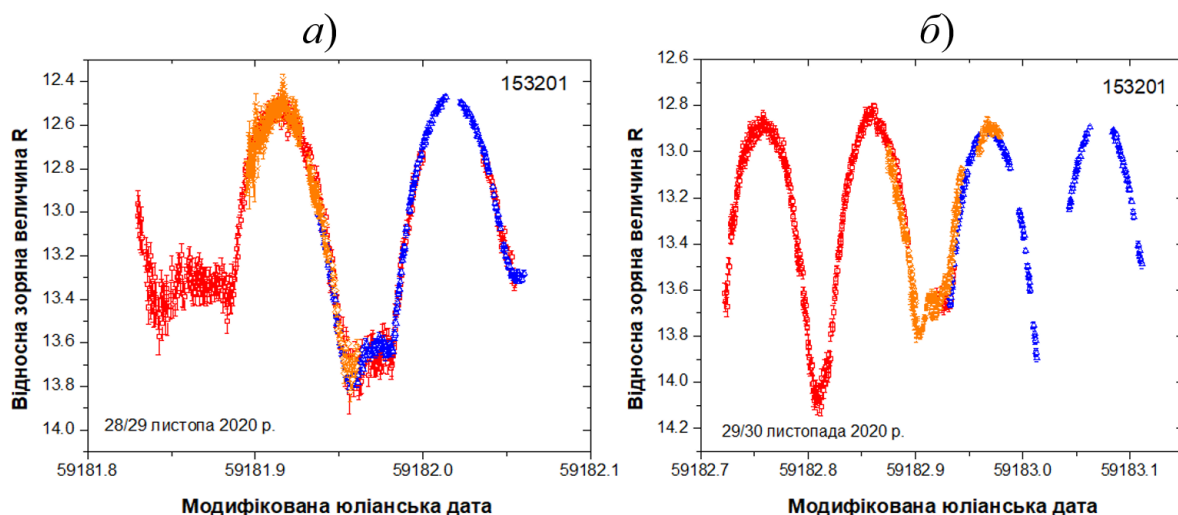


Рисунок 4.1 Складена крива блиску астероїда (153201) 2000 WO107 за спостереженнями 28/29 листопада (а) та 29/30 листопада (б) 2020 року.

На основі отриманих кривих блиску було визначено період обертання астероїда, який становить  $P = 5.025 \pm 0.003$  год (рис. 4.1). Обчислення проводилися методом апроксимації кривої блиску рядом Фур'є за методикою, близькою до підходів, описаних у працях (Harris et al, 1989; Magnusson & Lagerkvist, 1990). Визначене значення добре узгоджується з опублікованими результатами щодо періоду обертання об'єкта (Franco et al., 2021; Warner & Stephens, 2020). Максимальна амплітуда кривої блиску, зареєстрована при

фазовому куті  $5^\circ$ , становить  $1.0 \pm 0.05$  зоряних величин. Наявність отриманих нами детальних високоточних фотометричних спостережень астероїда (153201) 2000 WO107 та його радарних зображень, отриманих у ті ж самі дати (Benner, 2020), дали змогу поєднати їх і використати для моделювання форми астероїда та визначення його густини.

#### 4.1.2. Модель форми

Для опису форми астероїда ми використовували контактну-подвійну модель, у якій астероїд складається з двох еліпсоїдальних частин з півосями  $a_1 > b_1 > c_1$  і  $a_2 > b_2 > c_2$ , найдовші півосі яких  $a_1$  і  $a_2$  лежать на одній прямій, а  $c_1$  і  $c_2$  – паралельні до осі обертання астероїда (рис. 4.2). Астероїд обертається з періодом  $P$  навколо осі обертання з екліптичними координатами полюса ( $\lambda$ ,  $\beta$ ). Фаза обертання в початкову епоху становить  $\varphi_0$ .

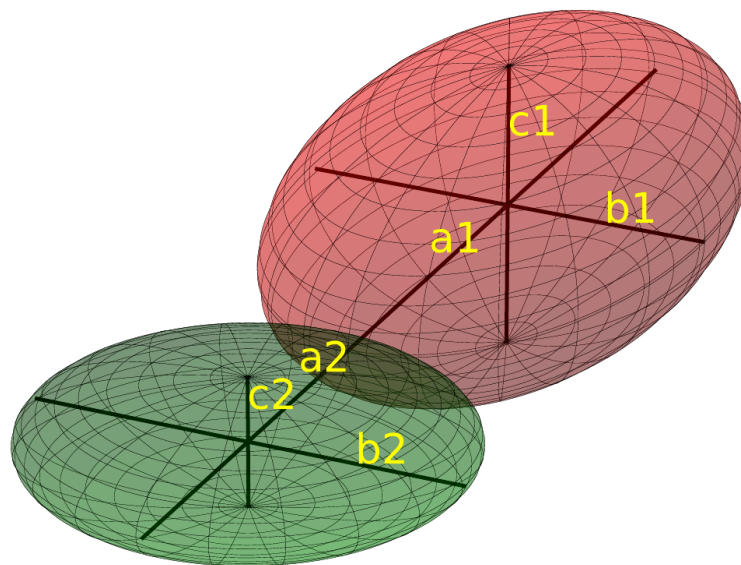


Рисунок 4.2 Модель форми астероїда (153201) 2000 WO107.

Координати астероїда, відстані від астероїда до Сонця і Землі, та фазовий кут на момент спостережень були взяті з бази даних JPL HORIZONS (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>). Шляхом моделювання окремих сонячних

променів, що приходять на поверхню астероїда й розсіюються нею, було розраховано яскравість астероїда, яку видно на момент спостережень із поверхні Землі. У якості закону розсіювання світла поверхнею астероїда використано комбінацію законів Ломмеля-Зелігера (90%) та Ламберта (10%) (Durech et al., 2010). Розрахунок сумарної яскравості всіх елементів астероїдної поверхні повторюється для кожної точки кривої блиску (тобто на момент кожного спостереження), і потім обчислюється розбіжність між модельною та спостережною кривими блиску:

$$\chi_{\text{phot}}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N^{\text{lc}}} \sum_{j=1}^{N_i^{\text{p}}} \frac{(m_{ij}^{\text{th}} - m_{ij}^{\text{obs}} - s_i)^2}{\Delta m_{ij}^2}. \quad (4.1)$$

Тут  $m_{ij}^{\text{th}}$  – модельна видима зоряна величина, визначена за світловим потоком за формулою Погсона,  $m_{ij}^{\text{obs}}$  – спостережна видима зоряна величина,  $\Delta m_{ij}$  – похибка спостережень. Індекс  $i$  перераховує всі  $N^{\text{lc}}$  спостережні криві блиску, а індекс  $j$  перераховує всі  $N^{\text{p}}$  точки для кожної кривої блиску. Оскільки всі спостереження отримані у відносній фотометрії, кожна крива блиску зсувається вертикально на значення  $s_i$ , визначене таким чином, щоб мінімізувати  $\chi^2$ , тобто з умови  $\partial\chi^2/\partial s_i=0$ .

В доповнення до наших фотометричних спостережень було використано радарні спостереження, виконані на Голдстоунському 70-м радарі (Benner, 2020), які дають розподіл відбитого радіосигналу в довільних одиницях як функцію часової затримки  $\Delta t$  і доплерівського зсуву частоти  $\Delta\nu$ . Програма трасування променів була також модифікована для розрахунку радарних зображень: у цьому випадку напрямок вхідного та вихідного променів збігаються з напрямком «астероїд – Земля», а перед підсумовуванням потоку усіх променів їх розділено за значеннями  $\Delta t$  і  $\Delta\nu$ , щоб знайти яскравість кожного пікселя радарного зображення.

Змодельоване радіолокаційне зображення попільсьельно порівнюється зі спостережним, і обчислюється  $\chi_{\text{rad}}^2$  як сума квадратів різниць між

яскравостями всіх пікселів. Міра неузгодженості радарних зображень  $\chi_{rad}^2$  використовується в програмі разом із неузгодженістю фотометричних кривих блиску  $\chi_{phot}^2$ . Застосування методів оптимізації до даних виконується шляхом мінімізації суми  $\chi_{phot}^2 = k\chi_{rad}^2 + \chi_{phot}^2$ , де коефіцієнт  $k$  вводиться для урівнювання внеску неузгоджень. У результаті моделювання отримано розподіл вільних параметрів найкращої моделі, які наведені в таблиці 4.1. Оскільки розподіл значень у моделюванні не обов'язково відтворює справжній розподіл похибок, ми оцінюємо останній за допомогою методу бутстрепінгу. Метод полягає у знаходженні рішення на зменшеній вибірці даних, у яких випадковим чином відкидається половина точок на кривих блиску і половина радарних зображень. Розподіл результатів достатньої кількості бутстрепів дозволяє оцінити межі невизначеності вільних параметрів.

Таблиця 4.1 Параметри моделі астероїда (153201) 2000 WO107.

Параметр	Значення
$a_1$	0.34±0.04 км
$b_1$	0.19±0.05 км
$c_1$	0.18±0.06 км
$a_2$	0.20±0.06 км
$b_2$	0.20±0.03 км
$c_2$	0.08±0.05 км
$\lambda$	94.0°±59.5°
$\beta$	-77.6°±2.4°
$\varphi_0$	110.5°±53.41°
$P$	5.017±0.001 год

Розгляд стійкості контактної-подвійного астероїда дозволяє визначити його густину. Умова рівноваги гравітаційного тяжіння й відцентрового відштовхування двох частин астероїда дає наступну формулу для густини:

$$\rho = \frac{3\pi(a_1 + a_2)^3}{GP^2(a_1b_1c_1 + a_2b_2c_2)}. \quad (4.2)$$

Це рівняння було застосовано до форм астероїда й періодів обертання, отриманих на кожному кроці нашого алгоритму, результати представлено на рис. 4.3. Густина для найкращої за  $\chi^2$  моделі для повної вибірки даних показана товстою вертикальною червоною лінією, яка приймається за номінальне значення. Невизначеність густини визначається як 17-й та 83-й процентилі розподілу результатів за бутстрепами. Таким чином, густина, оцінена за формою астероїда, становить  $\rho = 4.57^{+0.65}_{-0.76}$  г/см<sup>3</sup>, що вказує на високий вміст металів і добре узгоджується з можливим таксономічним типом астероїда M.

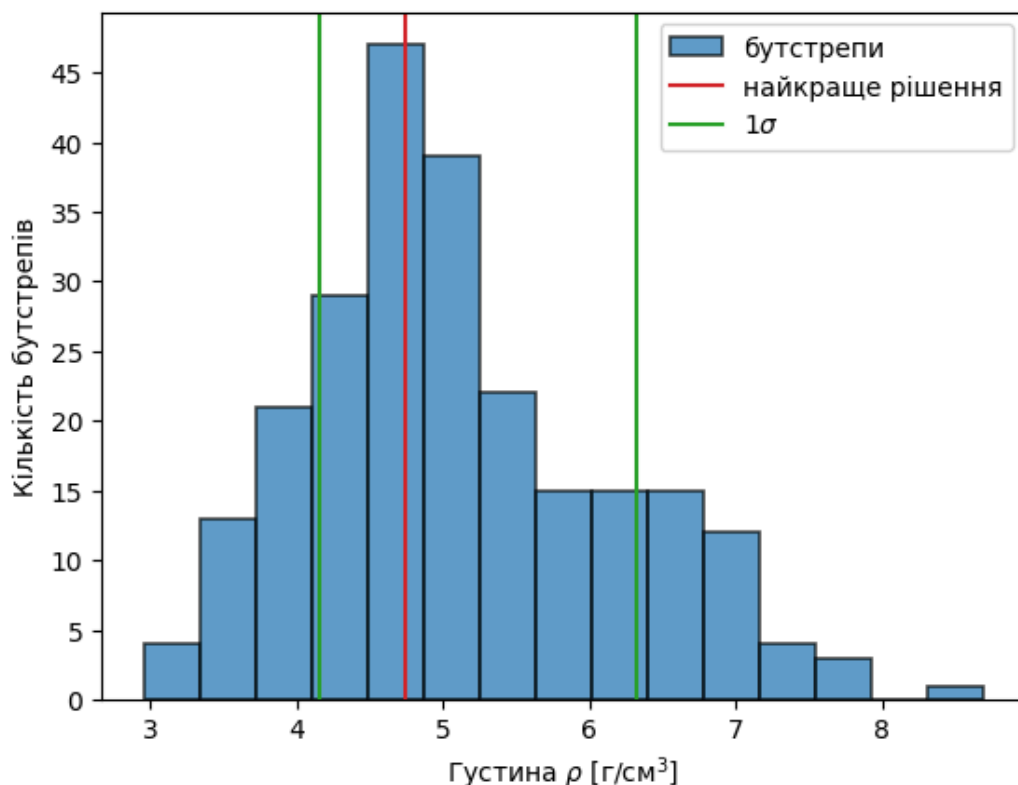


Рисунок 4.3 Оцінки густини для астероїда (153201) 2000 WO107. Синя гістограма показує розподіл густин для окремих підвбірок у методі бутстрепінгу. Червона лінія – оцінка густини за найкращою моделлю астероїда для повного набору даних, а зелені лінії – діапазон невизначеності густини.

### 4.1.3. Динамічна еволюція

Для дослідження орбітальної еволюції астероїда (153201) 2000 WO107 було проведено чисельне моделювання. Астероїд був представлений 5000 клонів, еволюцію яких було промодельовано на 1 млн років у минуле, та 200000 клонів, які було промодельовано на 10 тис. років у майбутнє. Обчислення проводилися за допомогою програмного пакету GENGA. Розраховані фізичні параметри було використано для врахування ефекту Ярковського на еволюцію астероїда. Оскільки астероїд має малу перигелійну відстань  $q \sim 0.2$  а.о., моделювання також враховували релятивістські поправки.

Результати моделювання показують, що 2000 WO107 зазнав численних тісних зближень із планетами земної групи впродовж своєї орбітальної історії, що є наслідком високої ексцентричності його орбіти (рис. 4.4).

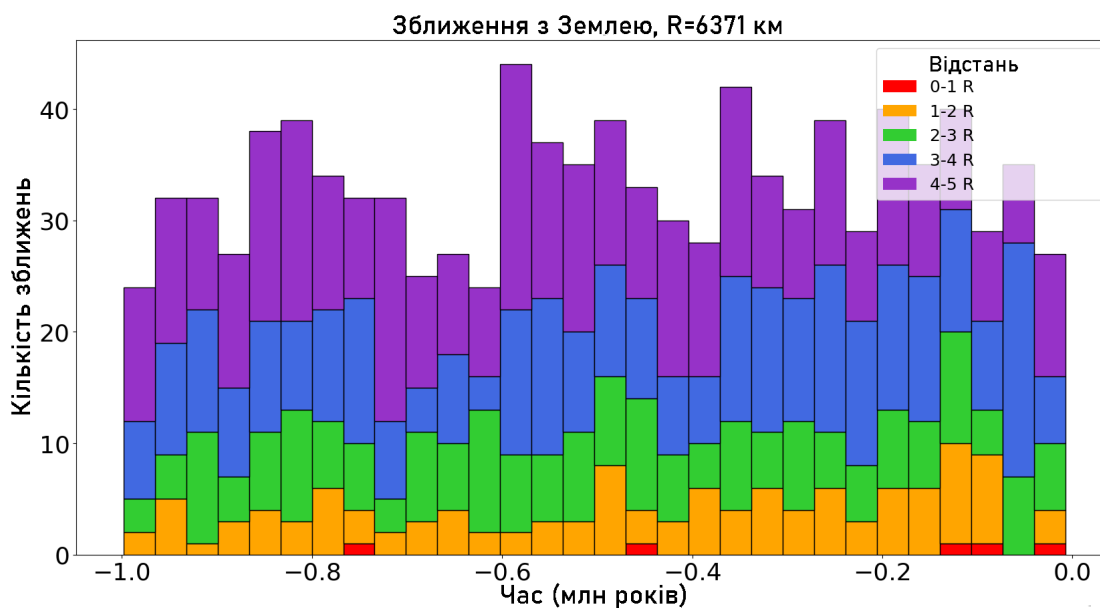


Рисунок 4.4 Зближення астероїда (153201) 2000 WO107 із Землею у моделюваннях на 1 млн років у минуле

Протягом наступних 200 років моделювання вказують на гравітаційні збурення Меркурієм та Землею, які дещо збурюють орбіту частини клонів астероїда. Як видно на рис. 4.5, зміни великої півосі орбіти астероїда відбуваються саме в моменти найближчих прольотів повз Меркурій і Землю.

Подальші тісні зближення прогнозуються з Венерою через 500 років, з Меркурієм – через 1200 років, з Венерою – через 2700 років, із Землею – у проміжку 5600–6000 років, а також із Марсом – у період 7000–10000 років (рис. 4.5).

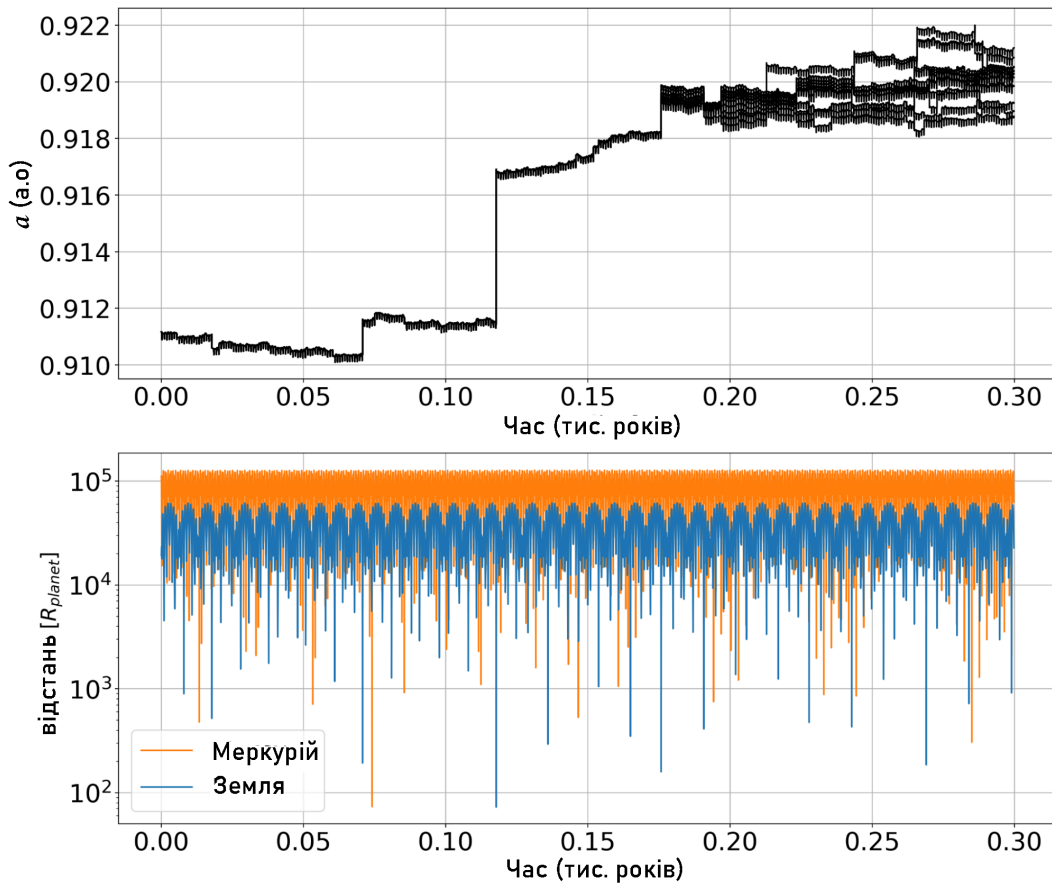


Рисунок 4.5 Демонстрація гравітаційного впливу з боку Землі та Меркурія на орбіту астероїда (153201) 2000 WO107.

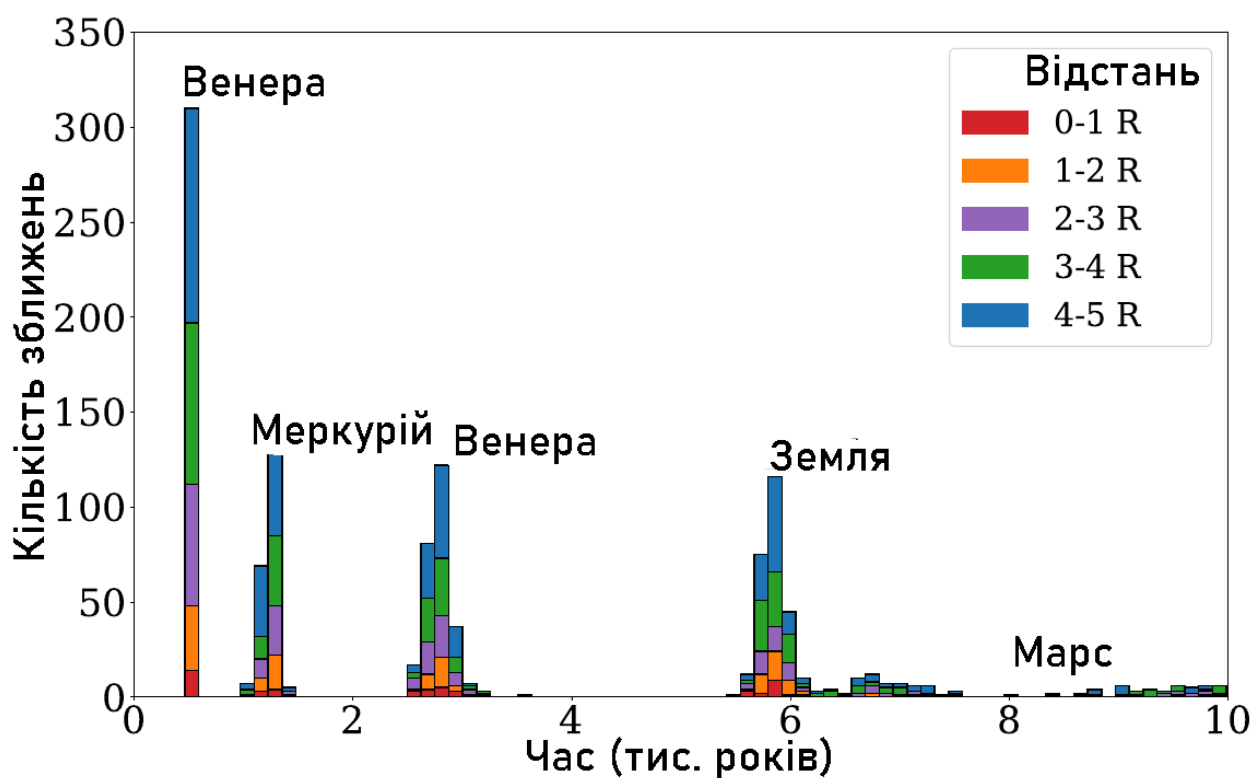


Рисунок 4.6 Зближення астероїда (153201) 2000 WO107 із планетами земної групи у наступні 10 тис. років.

Проведений аналіз небезпеки з боку астероїда 2000 WO107 для Землі протягом наступних 10 тис. років показує, що лише 250 із 200 000 клонів (0.1%) проходять на відстанях  $R \leq 5R_e$  (32 тис. км, що ближче ніж орбіта геостационарних супутників), і всього 14 клонів (0.007%) стикаються із Землею ( $\leq R_e$ ) (рис. 4.6). Із цього результату можна зробити висновок, що астероїд наразі не несе прямої загрози, але потребуватиме повторного аналізу з уточненням його орбіти в майбутньому.

Для отримання інформації щодо можливого джерела походження астероїда в Головному поясі астероїдів, було використано програмне забезпечення NEOPOP, яке базується на моделі розподілу навколоземних астероїдів (Granvik & Brown, 2018). Модель вказує на віковий резонанс із Сатурном  $\nu_6$  як єдине можливе джерело цього астероїда. Віковий резонанс  $\nu_6$  є одним з основних джерел поповнення популяції навколоземних астероїдів та

є відповідальним приблизно за 25% тіл, що перебувають на високоексцентричних орбітах, подібних до орбіти 2000 WO107 (Nesvorný et al., 2023).

#### 4.2. Спорідненість орбіт астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD

Астероїди (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD є навколоземними астероїдами, які привертають увагу своїм потенційним зв'язком. Обидва об'єкти вважаються можливими джерелами метеорного потоку Гемініди. Окрім того Фаетон демонструє активність, яка, ймовірно, безпосередньо поповнює вказаний метеорний потік.

У роботі Ohtsuka et al. (2006) вперше було проведено моделювання орбітальної еволюції цих об'єктів у минуле на 20 тис. років та було виявлено, що їхні орбіти залишаються близькими протягом усього досліджуваного періоду. На основі цієї схожості орбітальних елементів було запропоновано спорідненість між астероїдами (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD із зсувом за часом у  $\sim 4600$  років (рис. 4.7). Зокрема, обидва астероїди характеризуються високим нахилом орбіти ( $i > 22^\circ$ ), подібним екстремальним ексцентриситетом ( $e \approx 0.88$ ) та періодом обертання навколо Сонця ( $P_{\text{орб}} \approx 1.43$  роки). Припущення про спорідненість також підтримується тим фактом, що такі об'єкти спектрального типу В рідко зустрічаються серед навколоземних астероїдів (Jewitt & Hsieh, 2006). Крім того, раніше виявлена неоднорідність кольору поверхні (155140) 2005 UD може свідчити про наявність свіжого матеріалу, можливо, через недавнє відокремлення фрагментів.

Особливо цікавим аспектом є зв'язок обох астероїдів із метеорним потоком Гемініди. Вважається, що (3200) Phaethon є батьківським тілом даного потоку, проте включення 2005 UD до цієї системи створює складнішу картину еволюції цього динамічного комплексу. На основі динамічного аналізу (Hanuš et al., 2016; MacLennan et al., 2021) було висунуто припущення, що астероїди 2005 UD та Фаетон у минулому могли відокремитися від

більшого батьківського тіла, розпад якого і призвів до утворення метеорного потоку.

Дослідження метеорного потоку Денні Секстантиди, який вважається спорідненим із метеорним потоком Фаетон-Гемініди (Kipreos et al., 2022), дозволило оцінити масу потоку у  $10^{16}$  г, що за порядком величин збігається з оціненою масою 2005 UD. Оскільки потік є занадто масивним, щоб бути результатом утворення метеороїдів тільки із 2005 UD, припускається, що (155140) 2005 UD, (3200) Phaethon та сам метеорний потік могли утворитися внаслідок спільної події руйнування.

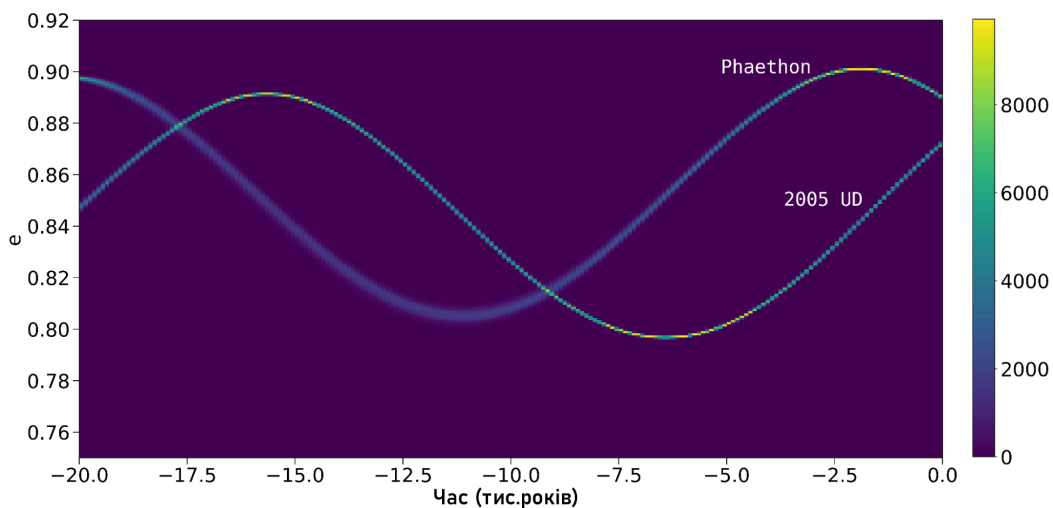


Рисунок 4.7 Порівняння еволюції ексцентриситету астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD.

Для дослідження орбітальної еволюції та спорідненості астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD було проведено чисельне моделювання. Кожен із астероїдів був представлений 1000 клонів, методика утворення яких описана у Розділі 2. Оскільки обидва астероїди мають високоексцентричну орбіту та малу перигелійну відстань, врахування ефекту Ярковського дуже важливе для коректного моделювання орбітальної еволюції даних тіл. Моделювання проводилися за допомогою пакету GENGA, що включає ефект Ярковського, розрахований відповідно до наявних даних про фізичні параметри, а тривалість моделювань складала 500 тис. років у минуле.

Незважаючи на те, що (3200) Phaethon відноситься до потенційно небезпечних астероїдів, він не несе прямої загрози Землі у найближчі 10 тис. років, і не має зближень ближче ніж 0.01 а.о. Астероїд матиме зближення з Марсом у період 1200-1400 років у майбутнє на відстанях порядку  $10^{-4}$  а.о. ( $\sim 20 R_{\text{Марс}}$ ). Моделювання в минуле вказують на те, що (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD не мали тісних зближень між собою у попередні 100 тис. років (рис. 4.8). Період зближень припадає на проміжок 150–300 тис. років тому. Швидкість визначених зближень знаходиться у межах  $2.3_{-1.3}^{+3.7}$  км/с. Така швидкість є індикатором того, що в разі спільного походження, астероїди сформувалися у результаті катастрофічного зіткнення, оскільки швидкість є занадто високою для механізмів обертового поділу подвійної системи або обертового поділу під впливом ЯОРП-ефекту. Зближення відбуваються між малою кількістю клонів обох астероїдів ( $\sim 10\%$ ), причому майже кожен клон має зближення тільки з одним клоном іншого астероїда. Це свідчить про деяку унікальність сценаріїв їхньої орбітальної еволюції.

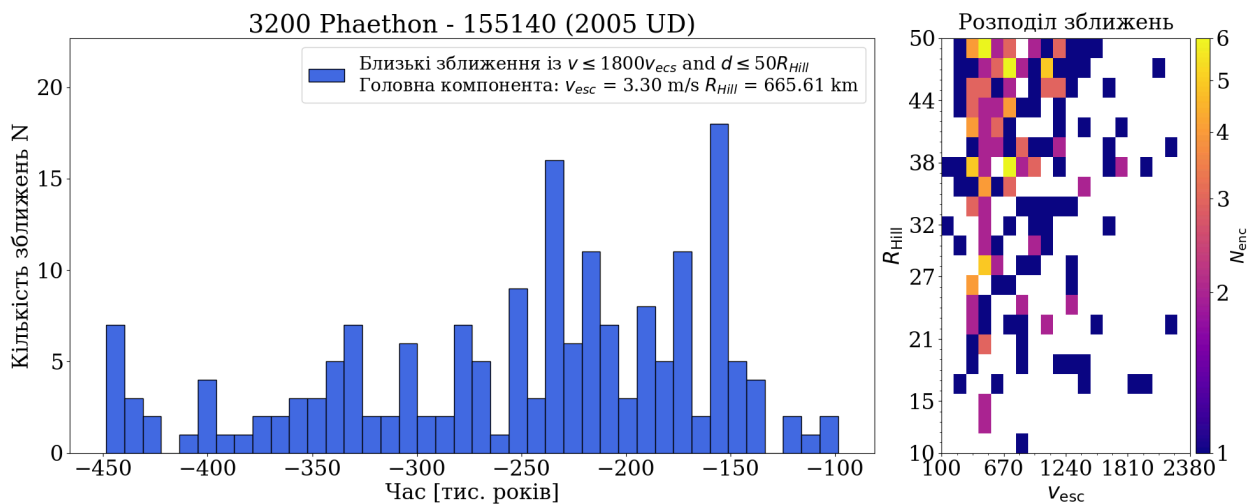


Рисунок 4.8 Зареєстровані зближення між клонами астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD.

Еволюція орбітальних елементів астероїдів демонструє, що зближення між астероїдами не відбувалися в минулі 100 тис. років. Так, аналіз орбітальних кутів, – довготи висхідного вузла  $\Omega$  та аргумента перигелію  $\omega$ , – показує, що в перші 100 тис. років за цими параметрами для астероїдів

зберігається зсув за часом, який був визначений у роботі [Ohtsuka et al. \(2006\)](#). Поступово цей зсув зменшується до досягнення мінімуму різниці в проміжку 200-300 тис. років у минуле (рис. 4.9). Кути відповідальні за орієнтацію орбіти в просторі і найдовше зберігають інформацію про початкову орбіту тіла у разі її зміни під дією збурень або зіткнень. Пошук збіжності кутів є одним з основних методів ідентифікації та оцінки віку формування астероїдних кластерів (Розділ 2).

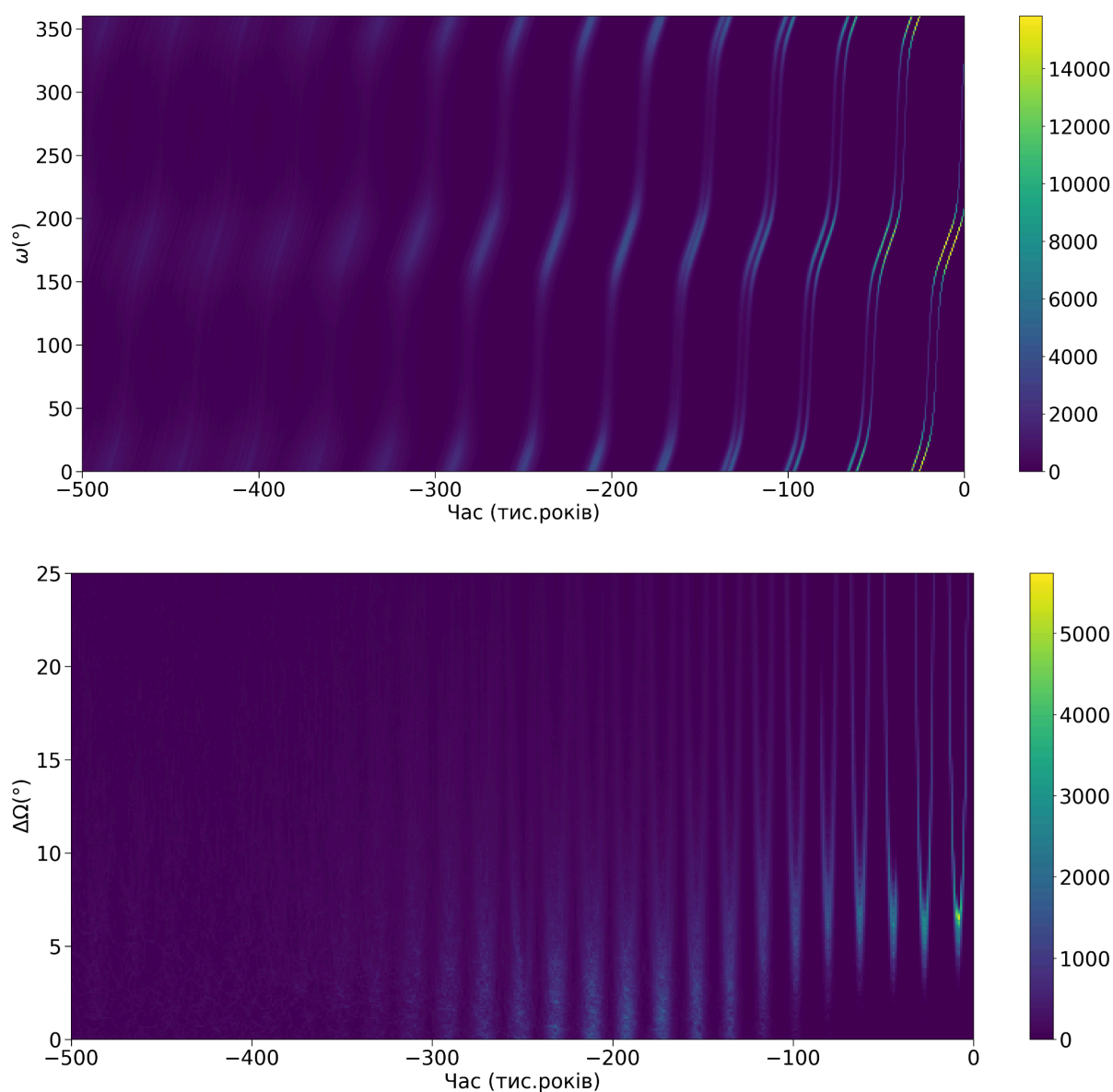


Рисунок 4.9 Еволюція аргументу перигелію та різниця довгот висхідного вузла для клонів астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD.

Збіг фаз орбітальних елементів може повторюватися з періодичністю, яка залежить від відношення періодів вікової прецесії елементів. Хоча точність визначення параметрів орбіт (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD є високою ( $10^{-10}$  для  $a$ ,  $e$ ,  $i$ ) та ( $10^{-7}$  для  $\Omega$  та  $\omega$ ), розпилення елементів під дією гравітаційних збурень та ефекту Ярковського обмежують проміжок часу, на якому елементи зберігають первинну інформацію. Можна побачити, що зі збільшенням часу моделювання межі між двома астероїдами розмиваються, перетворюючись у майже однорідний фон (рис. 4.9).

Альтернативним сценарієм утворення (3200) Phaethon та 2005 UD може бути спільне походження у Головному поясі астероїдів, після якого вони потрапили в навколоземний простір уже як окремі тіла зі схожими орбітами. За допомогою програми NEOPOP була проведена статистична оцінка можливих джерел походження цих тіл, яка вказує на віковий резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (64%), резонанс середнього руху 3:1 з Юпітером (15%) та астероїди групи Угорщини (19%). Оскільки орбітальні параметри тіл подібні, оцінки для них майже ідентичні. Із цих результатів можна зробити висновок, що вказані астероїди походять із внутрішньої частини Головного поясу.

Узагальнюючи, з аналізу чисельних моделювань можна зробити висновок, що поділ астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD відбувся не менше ніж 100 тис. років тому, оскільки не було зареєстровано зближень між астероїдами в цьому інтервалі. Цей висновок підтверджується аналізом еволюції орбітальних параметрів, які досягають максимальної подібності в проміжок 150–300 тис. років у минуле. Зареєстровані зближення відбуваються в той самий часовий інтервал, а швидкість зближень вказує на катастрофічні зіткнення як на можливий механізм формування астероїдів у разі їх спорідненості.

### 4.3. Моделювання зміни орбіти небезпечних астероїдів

Астероїдна небезпека є актуальною проблемою існування людства. На сьогодні запропоновано різноманітні концепції уникнення зіткнень із астероїдами (Shmidt, 2018), які здебільшого зводяться до зміни швидкості небезпечного тіла для відхилення його подальшої траєкторії. В рамках дисертаційної роботи було проведено дослідження необхідної величини та напрямку збурення швидкості потенційно небезпечного астероїда для подальшого уникнення його зіткнення із Землею. Оскільки на сьогодні немає відомих астероїдів, які б несли пряму загрозу зіткнення в найближчі роки, у роботі вивчено відхилення тіл на штучно створених орбітах. Для цього на основі бібліотеки REBOUND було реалізовано алгоритм, який за заданими швидкістю та напрямком зіткнення із Землею, створює штучний астероїд із відповідними параметрами орбіти. Після цього орбіта даного тіла моделюється назад у часі, для того щоб отримати орбітальні параметри тіла, яке гарантовано матиме зіткнення із Землею із заданими параметрами через бажаний проміжок часу.

Для визначення максимального часу, на який можливо проводити моделювання у минуле із можливістю відтворити зіткнення, була запропонована наступна схема. Спочатку орбітальна еволюція астероїда моделюється в минуле, після чого моделюється в майбутнє з ідентичним кроком інтегрування до визначеного моменту зіткнення із Землею. У процесі розраховується різниця за швидкістю та відстанню між прямою та оберненою орбітами, що має надати інформацію про накопичення похибок у моделюваннях. Оскільки моделювання проводяться від моменту зіткнення із Землею, тобто в сильному гравітаційному потенціалі, навіть невеликі відхилення через обмежену точність інтегратора призводять до швидкого накопичення похибок (рис. 4.10). Час збереження детермінованості моделювань залежить від додаткових чинників, таких як швидкість астероїда у момент зіткнення та напрямок удару, оскільки це визначає результуючу

орбіту та наявність збурень від інших планет, які можуть перетинати орбіту астероїда.



Рисунок 4.10 Графік різниці координат і швидкостей для зворотнього та прямого моделювання.

Наступним кроком є визначення оптимального напрямку збурення швидкості астероїда, яке має призвести до максимального відхилення траєкторії астероїда за фіксованої величини збурення. Для цього створюються клони, для яких за базові параметри приймаються параметри штучного астероїда, і до них прикладаються рівномірно та сферично-симетрично розподілені збурення з фіксованою величиною  $\Delta v$ . За максимальним значенням відхилення в кінцевий момент часу (момент зіткнення) від початкової траєкторії визначається оптимальний напрямок збурення (рис. 4.11). Після визначення оптимального напрямку збурення, обчислюється необхідна його величина. Для цього методом бісекції підбирається така мінімальна величина збурення, якої достатньо, щоб переспрямувати траєкторію астероїда по дотичній до поверхні Землі.

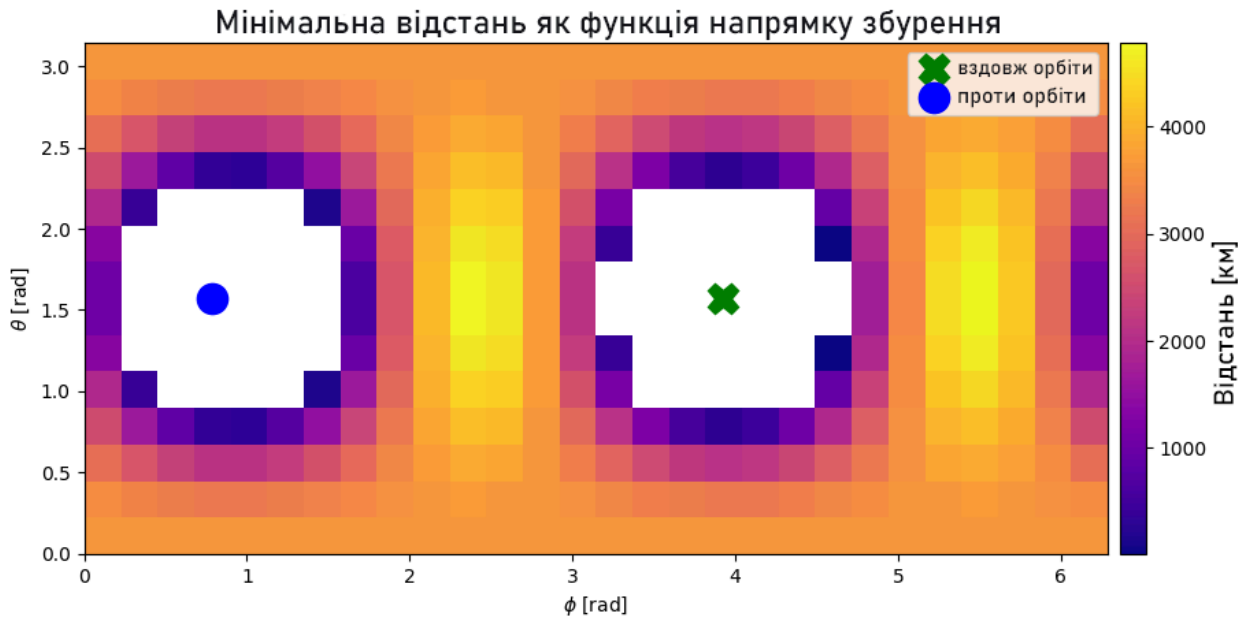


Рисунок 4.11 Залежність відстані прольоту збуреного тіла від напрямку прикладення збурення в симуляції тривалістю 1 рік.

Описаний підхід був застосований для знаходження оптимального напрямку та необхідної величини збурення для діапазону часу до моменту зіткнення від кількох секунд до 20 років. Оскільки відрізки часу відрізняються на декілька порядків, для візуалізації отриманих величин необхідних збурень запропоновано ввести знерозмірене збурення, яке визначається як

$$\Delta \tilde{v}(t) = \Delta v \cdot \frac{t}{R}, \quad (4.3)$$

де  $R$  – відстань до центру Землі,  $t$  – час до зіткнення,  $\Delta v$  – величина збурення.

На рис. 4.12 продемонстровано залежність величини знерозміреного збурення як функцію часу в логарифмічному масштабі. Графік умовно ділиться на декілька областей із відмінною поведінкою. Так, в області лінійного зростання (до години), величина збурення, необхідна для уникнення зіткнення з астероїдом, прямує до константи, коли час до зіткнення прямує до нуля. Оскільки у знерозміренні величина збурення множиться на час до зіткнення  $t$ , це призводить до лінійного зростання його величини. Таким чином, видиме в цій області зростання є артефактом обраного нормування.

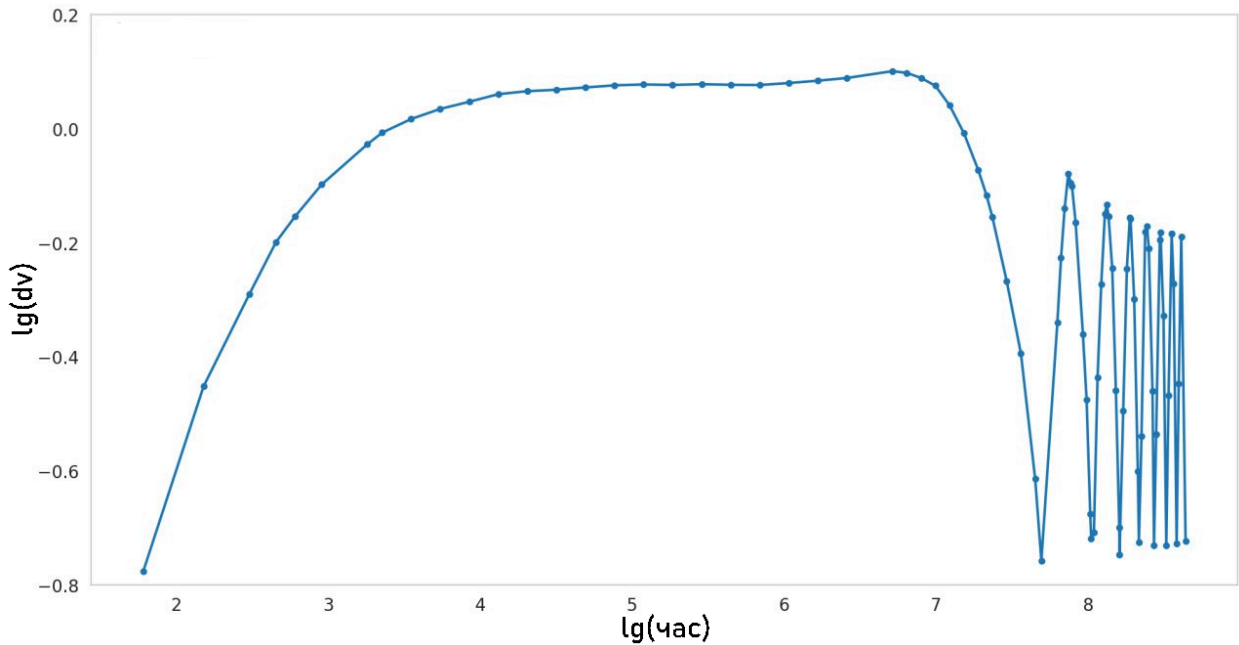


Рисунок 4.12 Значення знерозміреного збурення в залежності від часу до зіткнення.

Область плато простягається від однієї доби до одного місяця перед зіткненням. Область містить величини, які за порядком значно перевищують час прольоту астероїдом радіуса Землі, та водночас значно менші за період обертання навколо Сонця. У цій області збурення задається таким чином, щоб повернути астероїд на певний кут. У такому разі збурення буде обернено пропорційне відстані до Землі та прямо пропорційне її розміру. Враховуючи знерозмірення, отримуємо константу.

В область осциляцій (від місяця до десятків років) коливання мають період, близький до періоду обертання астероїда навколо Сонця, що показано на рис. 4.13. Величина необхідного збурення залежить від положення астероїда на орбіті і є мінімальною, коли астероїд знаходиться в перигелії орбіти.

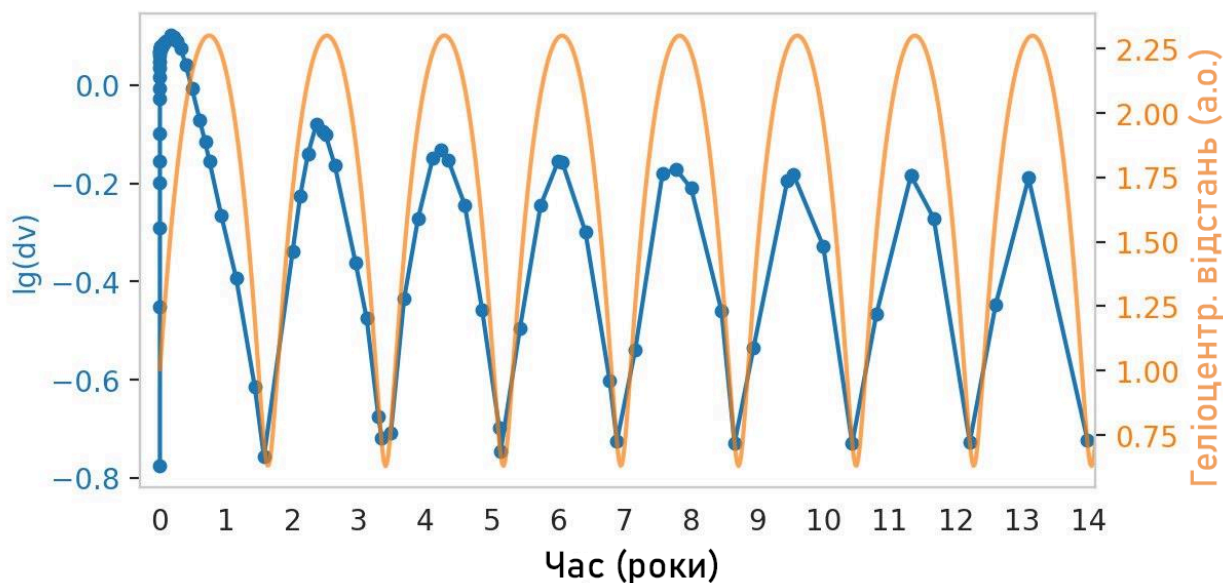


Рисунок 4.13 Залежність знерозміреного збурення від часу (синя лінія) та геліоцентрична відстань астероїда (помаранчева лінія).

За результатами моделювань, на малих часах до зіткнення оптимальний напрямок збурення швидкості астероїда є перпендикулярним до початкової швидкості відносно Землі, а на великих – вздовж або протилежно вектору початкової швидкості відносно Сонця. Графік знерозміреного збурення не сильно відхиляється від одиниці, що, у свою чергу, обґрунтовує доцільність знерозмірення. Таким чином, в нульовому наближенні потрібно прикласти збурення, пропорційне відстані до Землі  $R$ , та зворотньо пропорційне часу до гіпотетичного зіткнення  $t$ . Через особливість нормування, область лінійного зростання не відповідає цьому правилу. Однак ця область є нецікавою з практичних міркувань астероїдного захисту, оскільки довести космічний апарат до об'єкта за лічені хвилини до зіткнення з Землею є складною задачею.

## Висновки до розділу

У рамках задачі дослідження еволюції потенційно небезпечних астероїдів було вивчено навколосемний астероїд (153201) 2000 WO107, який характеризується значною ексцентричністю орбіти, що перетинає орбіти всіх планет земної групи. Аналіз радарних та фотометричних спостережень

дозволив розрахувати модель форми цього астероїда та визначити його фізичні параметри, зокрема густину, що становить  $4.57_{-0.76}^{+0.65}$  г/см<sup>3</sup>. Це вказує на високий вміст металів і відповідає астероїдам М-типу. За допомогою чисельних моделювань орбітального руху для (153201) 2000 WO107 розраховано ймовірності його тісних зближень із Землею та іншими планетами в минулому та майбутньому, для чого використано модель ефекту Ярковського з урахуванням форми й густини астероїда. Результати моделювань демонструють, що хоча астероїд належить до потенційно небезпечних, ймовірність зіткнення із Землею у найближчі 10 тисяч років є вкрай малою – лише 0.007%. Результати статистичного аналізу показали, що найімовірнішим джерелом астероїда є віковий резонанс  $\nu_6$  із Сатурном, який активно постачає об'єкти на високоексцентричні орбіти у навколоземний простір.

Досліджено можливу спорідненість орбіт потенційно небезпечного астероїда (3200) Phaethon та астероїда (155140) 2005 UD. Чисельне моделювання орбітальної еволюції цих тіл у минуле на 500 тисяч років показало, що найтісніші зближення між ними відбувалися у проміжку від 150 до 300 тисяч років тому зі швидкостями, характерними для катастрофічних зіткнень. Аналіз орбітальних елементів підтвердив, що у проміжку 200-300 тисяч років тому спостерігається максимальна схожість орбіт. Альтернативно було розглянуто варіант їх окремого походження з внутрішніх частин Головного поясу астероїдів через резонанси  $\nu_6$  із Сатурном, 3:1 з Юпітером та астероїди групи Угорщини. За результатами аналізу підтверджено спорідненість орбіт навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та (155140) 2005 UD, що вказує на можливий еволюційний зв'язок між цими астероїдами.

Досліджено задачу відхилення потенційно небезпечного астероїда за допомогою збурень його швидкості. Для цього було розроблено модель із створення штучного астероїда із заданими часом та параметрами зіткнення.

Визначено оптимальні напрямки і мінімально необхідну величину збурення швидкості астероїда для уникнення зіткнення. Проаналізовано поведінку залежності необхідного збурення від часу до зіткнення.

## ВИСНОВКИ

В межах дисертаційної роботи, на основі результатів чисельних моделювань динаміки малих тіл було отримано ряд результатів, важливих для розуміння особливостей еволюції малих тіл Сонячної системи.

У роботі розроблено новий підхід для пошуку астероїдних пар, за допомогою якого проведено найбільш повний пошук астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу астероїдів. Було зроблено повну вибірку кандидатів у астероїдні пари із фазовою відстанню між компонентами до  $d \leq 25$  м/с. З аналізу відібраних кандидатів у пари, було відкрито 50 нових пар, які відповідають умовам тісних зближень та статистичної значущості. За допомогою чисельних моделювань був оцінений вік формування отриманих пар, який лежить в межах від 2 тис. до 1 млн років. Отримані результати збільшили загальну кількість відомих астероїдних пар на 20% з 262 до 312. На прикладі наймолодшої у вибірці астероїдної пари запропоновано враховувати вплив гравітаційної взаємодії між компонентами пари на її динамічну еволюцію. За результатами моделювання було ідентифіковано новий астероїдний кластер, що складається із 8 компонент. Запропонований метод оцінки віку формування за покомпонентними зближеннями узгоджується із традиційним методом оцінки, і становить 70-100 тис. років.

Для інструментально зафіксованого падіння залізного метеорита вперше було обчислено орбіту метеороїда до його входу в атмосферу. За допомогою чисельних моделювань було досліджено динаміку метеороїда та проведено пошук кандидатів у його батьківське тіло. Статистична модель вказує, що найімовірнішими шляхами потрапляння цього метеороїда в навколосемний простір виявляються віковий резонанс  $\nu_6$  з Сатурном (89%) та резонанс 3:1 з Юпітером (10%), які є основними постачальниками й інших астероїдів до навколосемного простору. Результати числових моделювань вказують, що металевий метеороїд ймовірно залишив своє батьківське тіло не пізніше ніж 1 мільйон років тому, при цьому складна еволюційна динаміка в

околиці Землі та біля резонансів  $\nu_6$  і 3:1 з Юпітером ускладнюють надійне визначення батьківського тіла у подальшому минулому. Оцінка часу ЯОРП для метеороїда становить близько 20 мільйонів років. Цей часовий масштаб є достатньо довгим, щоб метеороїд пережив подорож з Головного поясу астероїдів до орбіти поблизу Землі. Довгий часовий масштаб ЯОРП підтримує висновки з чисельних моделювань про відсутність тісних зближень між метеороїдом і вибраними астероїдами поблизу Землі.

За результатами дисертаційної роботи зроблено наступне:

1. Проведено повне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів на наявність раніше невідомих астероїдних пар із фазовою відстанню між компонентами  $d \leq 25$  м/с. Виявлено 50 нових астероїдних пар. Оцінений вік формування відкритих пар знаходиться в межах від 2 тис. до 1 млн років.
2. Виявлено одну з наймолодших за віком астероїдних пар і на її прикладі запропоновано й обґрунтовано важливість врахування взаємного гравітаційного впливу компонент для уточнення динамічної еволюції молодих астероїдних пар.
3. Виявлено новий астероїдний кластер у внутрішній частині Головного поясу, що складається із восьми астероїдів, з віком формування близько 70 – 100 тис. років.
4. Визначено орбітальні параметри першого залізного метеорита, падіння якого було інструментально зафіксовано в 2020 р. у Скандинавії. Проведено розрахунок динамічної еволюції метеороїда та пошук можливих батьківських тіл протягом 1 млн років у минуле. Показано, що метеороїд потрапив з внутрішньої частини Головного поясу до навколоземного простору як самостійне тіло через резонанс  $\nu_6$  із Сатурном (89%) або резонанс за середнім рухом 3:1 з Юпітером (10%).

5. Вперше визначено форму, густину і параметри обертання потенційно небезпечного контактано-подвійного астероїда (153201) 2000 WO107 за даними фотометричних і радарних спостережень в опозицію 2020 року. Астероїд може мати великий вміст металу. Показано, що динамічна еволюція астероїда визначається його високоексцентричною орбітою і взаємодією з планетами земної групи, і з точки зору астероїдної безпеки даний об'єкт не несе загрози для Землі в найближчі 10 тисяч років.
6. За результатами чисельних моделювань підтверджено спорідненість орбіт навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та 2005 UD, що вказує на можливий еволюційний зв'язок між цими астероїдами.
7. Визначено оптимальний напрямок і необхідну величину збурення для відхилення орбіти небезпечного астероїда та їх залежність від часу до моменту зіткнення за результатами модельного експерименту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Astapovich, I. S. (1939). *AZh*, 16, 15.
2. SpaceDyS. (2024). AstDys database. <https://newton.spacedys.com/astdys/>
3. University of Belgrade. (2024). Asteroid Families Portal (AFP). <http://asteroids.matf.bg.ac.rs>
4. Benner L. A. M. Goldstone Radar Observations Planning: (7753) 1988 XB, 2017 WJ16, and 2000 WO107. NASA JPL database “Asteroid Radar Research”. Last updated: 07.12.2020. URL: <https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/1988XB/1988xb.2020.goldstone.planning.html>
5. Berthier, J., Carry, B., Mahlke, M., & Normand, J. (2023). SsODNet: Solar system Open Database Network. *Astronomy & Astrophysics*, 671, A151.
6. Binzel, R. P., Perozzi, E., Rivkin, A. S., Rossi, A., Harris, A. W., Bus, S. J., ... & Slivan, S. M. (2004). Dynamical and compositional assessment of near-Earth object mission targets. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(3), 351-366.
7. Boaca, I., Gritsevich, M., Birlan, M., Nedelcu, A., Boaca, T., Colas, F., ... & Vernazza, P. (2022). Characterization of the fireballs detected by all-sky cameras in Romania. *The Astrophysical Journal*, 936(2), 150.
8. Borovička, J., Spurný, P., Brown, P., Wiegert, P., Kalenda, P., Clark, D., & Shrbený, L. (2013). The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature*, 503(7475), 235-237.
9. Borovička, J., Spurný, P., & Brown, P. (2015). Small near-Earth asteroids as a source of meteorites. arXiv preprint arXiv:1502.03307.
10. Bottke Jr, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J. M., Levison, H. F., Michel, P., & Metcalfe, T. S. (2002). Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects. *Icarus*, 156(2), 399-433.
11. Bottke, W. F., Nesvorný, D., Grimm, R. E., Morbidelli, A., & O'Brien, D. P. (2006). Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region. *Nature*, 439(7078), 821-824.
12. Bottke, 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, 157-191.
13. 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. *Asteroids IV*, 1, 701-724.
14. Bottke, W. F., DeMeo, F. E., & Michel, P. (2015). Small near-Earth asteroids as a source of meteorites. In *Asteroids IV* (pp. 257-280). University of Arizona

- Press.
15. Bottke Jr, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J. M., Levison, H. F., Michel, P., & Metcalfe, T. S. (2002). Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects. *Icarus*, 156(2), 399-433.
  16. Brouwer, D., & Clemence, G. M. (1961). Orbits and masses of planets and satellites. *Planets and Satellites*, 31.
  17. Brown, P. (2013). A preliminary report on the Chelyabinsk fireball/airburst. *J. Int. Meteor Organ*, 41, 22.
  18. Burbine, T. H., McCoy, T. J., Meibom, A., Gladman, B., & Keil, K. (2002). In *Asteroids III*, ed. W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Tucson, AZ: University of Arizona Press), 653.
  19. Bus, Schelte J.; Binzel, Richard P. (July 2002). "Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy". *Icarus*. 158 (1): 146–177. Bibcode: 2002Icar..158..146B. doi:10.1006/icar.2002.6856.
  20. NASA Jet Propulsion Laboratory. (2025). Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS). <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>
  21. Ceplecha, Z. (1961). Multiple fall of Příbram meteorites photographed. 1. Double-station photographs of the fireball and their relations to the found meteorites. *Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia*, vol. 12, p. 21, 12, 21.
  22. Cheng, A. F., Agrusa, H. F., Barbee, B. W., Meyer, A. J., Farnham, T. L., Raducan, S. D., ... & Zanotti, G. (2023). Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos. *Nature*, 616(7957), 457-460.
  23. Chesley, S. R., Ostro, S. J., Vokrouhlický, D., Capek, D., Giorgini, J. D., Nolan, M. C., ... & Chamberlin, A. B. (2003). Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka. *Science*, 302(5651), 1739-1742.
  24. Čuk, M. (2007). Formation and destruction of small binary asteroids. *The Astrophysical Journal*, 659(1), L57.
  25. Daly, R. T., Ernst, C. M., Barnouin, O. S., Chabot, N. L., Rivkin, A. S., Cheng, A. F., ... & Zhang, Y. (2023). Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence. *Nature*, 616(7957), 443-447.
  26. *Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies* (2010) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2010. *Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12842>., <https://nap.nationalacademies.org/read/12842/chapter/2>
  27. de La Fuente Marcos, C., & de La Fuente Marcos, R. (2014). Reconstructing

- the Chelyabinsk event: pre-impact orbital evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 443(1), L39-L43.
28. de la Fuente Marcos, R. (2021). Transient terrestrial Trojans: comparative short-term dynamical evolution of 2010 TK7 and 2020 XL5. *Research Notes of the AAS*, 5(2), 29.
  29. DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., & Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202(1), 160-180.
  30. DeMeo, F. E., & Carry, B. (2013). The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. *Icarus*, 226(1), 723-741.
  31. Dermott, S. F., Christou, A. A., Li, D., Kehoe, T. J., & Robinson, J. M. (2018). The common origin of family and non-family asteroids. *Nature Astronomy*, 2(7), 549-554.
  32. Di Sisto, R. P., & Brunini, A. (2007). The origin and distribution of the Centaur population. *Icarus*, 190(1), 224-235.
  33. Di Sisto, R. P., Brunini, A., & De Elia, G. C. (2010). Dynamical evolution of escaped plutinos, another source of Centaurs. *Astronomy & Astrophysics*, 519, A112.
  34. Dmitriev, V., Lupovka, V., & Gritsevich, M. (2015). Orbit determination based on meteor observations using numerical integration of equations of motion. *Planetary and Space Science*, 117, 223-235.
  35. Drummond, J. D. (1981). A test of comet and meteor shower associations. *Icarus*, 45(3), 545-553.
  36. Durda, D. D., Bottke Jr, W. F., Nesvorný, D., Enke, B. L., Merline, W. J., Asphaug, E., & Richardson, D. C. (2007). Size–frequency distributions of fragments from SPH/N-body simulations of asteroid impacts: Comparison with observed asteroid families. *Icarus*, 186(2), 498-516.
  37. Ďurech, J., Sidorin, V., & Kaasalainen, M. (2010). DAMIT: a database of asteroid models. *Astronomy & Astrophysics*, 513, A46.
  38. Dziadura, K., Oszkiewicz, D., Spoto, F., Carry, B., Tanga, P., & Bartczak, P. (2023). The Yarkovsky effect and bulk density of near-Earth asteroids from Gaia DR3. *Astronomy & Astrophysics*, 680, A77.
  39. Emery, J. P., Marzari, F., Morbidelli, A., French, L. M., & Grav, T. J. A. I. (2015). The complex history of Trojan asteroids. *Asteroids IV*, 203.
  40. Farnocchia, D., Chesley, S. R., Takahashi, Y., Rozitis, B., Vokrouhlický, D., Rush, B. P., ... & Lauer, D. S. (2021). Ephemeris and hazard assessment for near-Earth asteroid (101955) Bennu based on OSIRIS-REx data. *Icarus*, 369, 114594.
  41. Fatka, P., Moskovitz, N. A., Pravec, P., Micheli, M., Devogèle, M., Gustafsson, A., ... & Bressi, T. (2022). Recent formation and likely cometary activity of

- near-Earth asteroid pair 2019 PR2–2019 QR6. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(4), 6033-6049.
42. Fatka, P., Vokrouhlický, D., Moskovitz, N. A., Micheli, M., Pravec, P., Devogèle, M., ... & Bressi, T. (2023). Extremely Young Asteroid Pairs. *LPI Contributions*, 2851, 2170.
  43. Fesenkov, V. G. (1951). The orbit of Sikhote-Alin meteorite. *Meteoritics*, 9, 27-31.
  44. Foschini, L., Gasperini, L., Stanghellini, C., Serra, R., Polonia, A., & Stanghellini, G. (2018). The atmospheric fragmentation of the 1908 Tunguska Cosmic Body: reconsidering the possibility of a ground impact. arXiv preprint arXiv:1810.07427.
  45. Franco, L., Scarfi, G., Marchini, A., Aceti, P., Banfi, M., Papini, R., ... & Rocchetto, M. (2021). Collaborative Asteroid Photometry from UAI: 2020 July-September. *Minor Planet Bulletin*, 48(1), 20-22.
  46. Fujiwara, A., Kawaguchi, J., Yeomans, D. K., Abe, M., Mukai, T., Okada, T., ... & Uesugi, K. (2006). The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 312(5778), 1330-1334.
  47. Gallardo, T. (2006). Atlas of the mean motion resonances in the Solar System. *Icarus*, 184(1), 29-38.
  48. Galád, A. (2012). Effect of main belt perturbors on asteroid-pair age estimation. *Astronomy & Astrophysics*, 548, A25.
  49. Gardiol, D., Barghini, D., Buzzoni, A., et al. (2021). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501, 1215.
  50. Golubov, O., & Krugly, Y. N. (2012). Tangential component of the YORP effect. *The Astrophysical Journal Letters*, 752(1), L11.
  51. Golubov, O., Kravets, Y., Krugly, Y. N., & Scheeres, D. J. (2016). Physical models for the normal YORP and diurnal Yarkovsky effects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458(4), 3977-3989.
  52. Golubov, O., & Scheeres, D. J. (2016). Equilibrium rotation states of doubly synchronous binary asteroids. *The Astrophysical Journal Letters*, 833(2), L23.
  53. Golubov, O., & Scheeres, D. J. (2019). Systematic structure and sinks in the YORP effect. *The Astronomical Journal*, 157(3), 105.
  54. Golubov, O., Unukovich, V., & Scheeres, D. J. (2021). Limiting behavior of asteroid obliquity and spin using a semi-analytic thermal model of the YORP effect. *The Astronomical Journal*, 162(1), 8.
  55. Granvik, M., & Brown, P. (2018). Identification of meteorite source regions in the Solar System. *Icarus*, 311, 271-287.
  56. Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., ... & Michel, P. (2018). Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for

- near-Earth objects. *Icarus*, 312, 181-207.
57. Grav, T., Mainzer, A. K., Masiero, J. R., Dahlen, D. W., Spahr, T., Bottke, W. F., & Masci, F. J. (2023). The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model. *The Planetary Science Journal*, 4(12), 228.
  58. 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), 92.
  59. Grimm, S. L., & Stadel, J. G. (2014). The GENGA code: gravitational encounters in N-body simulations with GPU acceleration. *The Astrophysical Journal*, 796(1), 23.
  60. Grimm, S. L., Stadel, J. G., Brasser, R., Meier, M. M., & Mordasini, C. (2022). GENGA. II. GPU Planetary N-body Simulations with Non-Newtonian Forces and High Number of Particles. *The Astrophysical Journal*, 932(2), 124.
  61. Gritsevich, M. I. (2009). Determination of parameters of meteor bodies based on flight observational data. *Advances in Space Research*, 44(3), 323-334.
  62. Gritsevich, M., Nissinen, M., Moilanen, J., et al. (2021). *Journal of Interplanetary Meteoroid Organization*, 49, 52.
  63. Gritsevich, M., & Moilanen, J. (2021, April). A composite luminous and dark flight model allowing strewn field prediction. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-15687).
  64. Hanuš, J., Delbo, M., Vokrouhlický, D., Pravec, P., Emery, J. P., Alí-Lagoa, V., ... & Warner, B. D. (2016). Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 592, A34.
  65. Harris, A. W., Young, J. W., Bowell, E., Martin, L. J., Millis, R. L., Poutanen, M., ... & Zeigler, K. W. (1989). Photoelectric observations of asteroids 3, 24, 60, 261, and 863. *Icarus*, 77(1), 171-186.
  66. Harris, A. W. (1997). On the revision of radiometric albedos and diameters of asteroids. *Icarus*, 126(2), 450-454.
  67. Harris, A. W., & D'Abramo, G. (2015). The population of near-Earth asteroids. *Icarus*, 257, 302-312.
  68. Harris, A. W., & Chodas, P. W. (2021). The population of near-earth asteroids revisited and updated. *Icarus*, 365, 114452.
  69. Hlobik, F., & Tóth, J. (2024). Orbital evolution and possible parent asteroids of 40 instrumentally observed meteorites. *Planetary and Space Science*, 240, 105827.
  70. International Astronomical Union Resolution, 2006 General Assembly, [https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution\\_GA26-5-6.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf)
  71. International Meteor Organization. (2021). Fireball event 2020-6403.

[https://fireballs.imo.net/members/imo\\_view/event/2020/6403](https://fireballs.imo.net/members/imo_view/event/2020/6403)

72. Ivezić, Ž., Tabachnik, S., Rafikov, R., Lupton, R. H., Quinn, T., Hammergren, M., ... & York, D. G. (2001). Solar system objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data. *The Astronomical Journal*, 122(5), 2749.
73. Jacobson, S. A., & Scheeres, D. J. (2011). Long-term stable equilibria for synchronous binary asteroids. *The Astrophysical Journal Letters*, 736(1), L19.
74. Jenniskens, P., Utas, J., Yin, Q. Z., Matson, R. D., Fries, M., Howell, J. A., ... & Creston Meteorite Consortium). (2019). The Creston, California, meteorite fall and the origin of L chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(4), 699-720.
75. Jenniskens, P., & Devillepoix, H. A. (2024). Review of asteroid, meteor, and meteorite-type links. *Meteoritics & Planetary Science*.
76. Jewitt, D., & Hsieh, H. (2006). Physical observations of 2005 UD: A mini-Phaethon. *The Astronomical Journal*, 132(4), 1624.
77. Johnston, W. R. Asteroid pairs and clusters. Retrieved from <https://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidpairs.html>
78. Jopek, T. J. (1993). Remarks on the meteor orbital similarity D-criterion. *Icarus*, 106(2), 603-607.
79. Jopek, T. J., Valsecchi, G. B., & Froeschlé, C. (1999). Meteoroid stream identification: a new approach—II. Application to 865 photographic meteor orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304(4), 751-758.
80. JPL HORIZONS // NASA JPL on-line solar system data and ephemeris computation service. Updated daily. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>
81. Kipreos, Y., Campbell-Brown, M., Brown, P., & Vida, D. (2022). Characterizing the daytime sextantids meteor shower and unveiling the nature of the phaethon-geminid stream complex. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516(1), 924-941.
82. Krasinsky, G. A., Pitjeva, E. V., Vasilyev, M. V., & Yagudina, E. I. (2002). Hidden mass in the asteroid belt. *Icarus*, 158(1), 98-105.
83. Kyrylenko, I., Krugly, Y. N., & Golubov, O. (2021). Asteroid pairs: method validation and new candidates. *Astronomy & Astrophysics*, 655, A14.
84. Kyrylenko, I., Golubov, O., Slyusarev, I., Visuri, J., Gritsevich, M., Krugly, Y. N., ... & Shevchenko, V. G. (2023). The first instrumentally documented fall of an iron meteorite: Orbit and possible origin. *The Astrophysical Journal*, 953(1), 20.
85. Kyrylenko, I., Krugly, Y. N., & Golubov, O. (2024). Asteroid pairs: Survey of the inner main belt. *Astronomy & Astrophysics*, 689, A291.
86. Alí-Lagoa, V., & Delbo, M. (2017). Sizes and albedos of Mars-crossing asteroids from WISE/NEOWISE data. *Astronomy & Astrophysics*, 603, A55.

87. Lyytinen, E., & Gritsevich, M. (2013). In Proc. International Meteor Conference, ed. M. Gyssens & P. Roggemans (Hove: International Meteor Organization), 155.
88. Lyytinen, E., & Gritsevich, M. (2016a). In Proc. International Meteor Conference, ed. A. Roggemans & P. Roggemans (Hove: International Meteor Organization), 159.
89. Lyytinen, E., & Gritsevich, M. (2016b). *Planetary and Space Science*, 120, 35.
90. Lunar and Planetary Institute. (n.d.). *Meteoritical Bulletin Database*. <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.cfm>
91. MacLennan, E., Marshall, S., & Granvik, M. (2022). Evidence of surface heterogeneity on active asteroid (3200) Phaethon. *Icarus*, 388, 115226.
92. Magnusson, P., & Lagerkvist, C. I. (1990). Analysis of asteroid lightcurves. I-Data base and basic reduction. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* (ISSN 0365-0138), vol. 86, no. 1, Nov. 1990, p. 45-51., 86, 45-51.
93. Mainzer A., Bauer J., Cutri R. et al. NEOWISE Diameters and Albedos V2.0. urn:nasa:pds:neowise\_diameters\_albedos::2.0. // NASA Planetary Data System. Last updated: 11.03.2019. DOI: 10.26033/18S3-2Z54
94. Mainzer, A., Grav, T., Masiero, J., et al. (2011). NEOWISE studies of spectrophotometrically classified asteroids: Preliminary results. *The Astrophysical Journal*, 741(2), 90.
95. Mainzer, A., Bauer, J., Grav, T., Masiero, J., Cutri, R. M., Wright, E., ... & Masci, F. (2014). The population of tiny near-Earth objects observed by NEOWISE. *The Astrophysical Journal*, 784(2), 110.
96. Mainzer, A., Usui, F., & Trilling, D. E. (2015). Space-based thermal infrared studies of asteroids. *Asteroids IV*, 8, 9-106.
97. Marzari, F., Rossi, A., Golubov, O., & Scheeres, D. J. (2020). Evolution of an asteroid family under YORP, Yarkovsky, and collisions. *The Astronomical Journal*, 160(3), 128.
98. Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Grav, T., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Dailey, J., ... & Wilkins, A. (2011). Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters. *The Astrophysical Journal*, 741(2), 68.
99. Moilanen, J., Gritsevich, M., & Lyytinen, E. (2021). Determination of strewn fields for meteorite falls. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 503(3), 3337-3350.
100. Moilanen, J., & Gritsevich, M. (2022, March). A Jump of an Iron Meteorite. In 53rd Lunar and Planetary Science Conference (Vol. 2678, p. 2933).
101. Morbidelli, A., Bottke, W. F., Nesvorný, D., & Levison, H. F. (2009). Asteroids were born big. *Icarus*, 204(2), 558-573.
102. Morbidelli, A., & Nesvorný, D. (2020). Kuiper belt: formation and

- evolution. The trans-neptunian solar system, 25-59.
103. Morbidelli, A., Delbo, M., Granvik, M., Bottke, W. F., Jedicke, R., Bolin, B., ... & Vokrouhlicky, D. (2020). Debiased albedo distribution for near earth objects. *Icarus*, 340, 113631.
  104. Morgan, J., Warner, M., Chicxulub Working Group, Brittan, J., Buffler, R., Camargo, A., ... & Trejo, A. (1997). Size and morphology of the Chicxulub impact crater. *Nature*, 390(6659), 472-476.
  105. Moreno-Ibáñez, M., Gritsevich, M., Trigo-Rodríguez, J. M., & Silber, E. A. (2020). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 494, 316.
  106. Morrison, D., Chapman, C. R., Steel, D., & Binzel, R. P. (2004). Impacts and the public: communicating the nature of the impact hazard. *Mitigation of hazardous comets and asteroids*, 252-390.
  107. Murray, C. D., & Dermott, S. F. (1999). *Solar System Dynamics* (Cambridge: Cambridge University Press), 72.
  108. National Research Council, Division on Engineering, Physical Sciences, Aeronautics, Space Engineering Board, Space Studies Board, ... & Hazard Mitigation Strategies. (2010). *Defending planet earth: Near-Earth-Object surveys and hazard mitigation strategies*. National Academies Press.
  109. Nesvorný, D., Bottke Jr, W. F., Dones, L., & Levison, H. F. (2002). The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature*, 417(6890), 720-721.
  110. Nesvorný, D., Brož, M., & Carruba, V. (2015). Identification and dynamical properties of asteroid families. *Asteroids IV*, 29, 7-321.
  111. Nesvorný, D., & Vokrouhlický, D. (2006). New candidates for recent asteroid breakups. *The Astronomical Journal*, 132(5), 1950.
  112. Nesvorný, D., Enke, B. L., Bottke, W. F., Durda, D. D., Asphaug, E., & Richardson, D. C. (2006). Karin cluster formation by asteroid impact. *Icarus*, 183(2), 296-311.
  113. Nesvorný, D., Deienno, R., Bottke, W. F., Jedicke, R., Naidu, S., Chesley, S. R., ... & Bolin, B. T. (2023). NEOMOD: a new orbital distribution model for near-Earth objects. *The Astronomical Journal*, 166(2), 55.
  114. Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Kinoshita, D., Watanabe, J. I., Ito, T., Arakida, H., & Kasuga, T. (2006). Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon?. *Astronomy & Astrophysics*, 450(3), L25-L28.
  115. Peña-Asensio, E., Trigo-Rodríguez, J. M., Gritsevich, M., & Rimola, A. (2021). Accurate 3D fireball trajectory and orbit calculation using the 3D-FIRETOC automatic Python code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(4), 4829-4840.
  116. Peña-Asensio, E., Trigo-Rodríguez, J. M., Rimola, A., Corretgé-Gilart, M.,

- & Koschny, D. (2023). Identifying meteorite droppers among the population of bright ‘sporadic’bolides imaged by the Spanish Meteor Network during the spring of 2022. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520(4), 5173-5182.
117. Pickering, W. H. (1910). The orbits of meteorites. *Popular Astronomy*, vol. 18, pp. 262-276, 18, 262-276.
  118. Pohl, L., & Britt, D. T. (2020). Strengths of meteorites—An overview and analysis of available data. *Meteoritics & Planetary Science*, 55(4), 962-987.
  119. Polishook, D. (2014). Spin axes and shape models of asteroid pairs: Fingerprints of YORP and a path to the density of rubble piles. *Icarus*, 241, 79-96.
  120. Pravec, P., & Harris, A. W. (2007). Binary asteroid population: 1. Angular momentum content. *Icarus*, 190(1), 250-259.
  121. Pravec, P., & Vokrouhlický, D. (2009). Significance analysis of asteroid pairs. *Icarus*, 204(2), 580-588.
  122. Pravec, P., Fatka, P., Vokrouhlický, D., Scheeres, D. J., Kušnirák, P., Hornoch, K., ... & Molotov, I. E. (2018). Asteroid clusters similar to asteroid pairs. *Icarus*, 304, 110-126.
  123. Pravec, P., Fatka, P., Vokrouhlický, D., Scheirich, P., Ďurech, J., Scheeres, D. J., ... & Molotov, I. E. (2019). Asteroid pairs: a complex picture. *Icarus*, 333, 429-463.
  124. Pravec, P., Vokrouhlický, D., Polishook, D., et al. (2010). Formation of asteroid pairs by rotational fission. *Nature*, 466(7310), 1085–1088.
  125. Rein, H., & Liu, S.-F. (2012). REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. *Astronomy & Astrophysics*, 537, A128.
  126. Rein, H., & Spiegel, D. S. (2015). IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(2), 1424–1437.
  127. Rein, H., & Tamayo, D. (2015). WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom–Holman integrator for long-term gravitational simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(1), 376–388.
  128. Rožek, A., Breiter, S., & Jopek, T. J. (2011). Orbital similarity functions—application to asteroid pairs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(2), 987-994.
  129. Rubincam, D. P. (1995). Asteroid orbit evolution due to thermal drag. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 100(E1), 1585-1594.
  130. Rubincam, D. P. (2000). Radiative spin-up and spin-down of small asteroids.

- Icarus, 148(1), 2-11.
131. Russell, C. T., Raymond, C. A., Coradini, A., McSween, H. Y., Zuber, M. T., Nathues, A., ... & Titus, T. N. (2012). Dawn at Vesta: Testing the protoplanetary paradigm. *Science*, 336(6082), 684-686.
  132. Sánchez, P., & Scheeres, D. J. (2014). The strength of regolith and rubble pile asteroids. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(5), 788-811.
  133. Sansom, E. K., Gritsevich, M., Devillepoix, H. A., Jansen-Sturgeon, T., Shoer, P., Bland, P. A., ... & Hartig, B. A. (2019). Determining fireball fates using the  $\alpha$ - $\beta$  criterion. *The Astrophysical Journal*, 885(2), 115.
  134. Scheeres, D. J. (2007). Rotational fission of contact binary asteroids. *Icarus*, 189(2), 370-385.
  135. Schmidt, N. (Ed.). (2018). *Planetary defense: Global collaboration for defending earth from asteroids and comets*. Springer.
  136. Sentry: Earth Impact Monitoring <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>
  137. Sergeev, A. V., & Carry, B. (2021). A million asteroid observations in the Sloan Digital Sky Survey. *Astronomy & Astrophysics*, 652, A59.
  138. Sergeev, A. V., Carry, B., Onken, C. A., Devillepoix, H. A. R., Wolf, C., & Chang, S. W. (2022). Multifilter photometry of solar system objects from the skymapper southern survey. *Astronomy & Astrophysics*, 658, A109.
  139. Slyusarev, I., & Shymkiv, D. (2017). In *European Planetary Science Congress 2017* (Göttingen: Copernicus), 909.
  140. Slyusarev, I. G. (2018). In *Proc. IAU 14, Astronomy in Focus XXX*, ed. M. Teresa Lago (Cambridge: Cambridge University Press), 21.
  141. Southworth, R. B., & Hawkins, G. S. (1963). Statistics of meteor streams. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, Vol. 7, p. 261-285, 7, 261-285.
  142. Spurný, P. (2023). Meteorite orbits database. <https://www.meteoriteorbits.info/>
  143. SsODNet, Solar system Open Database Network, <https://ssp.imcce.fr/webservices/ssodnet/>
  144. Tamayo, D., Rein, H., Shi, P., & Hernandez, D. M. (2020). REBOUNDx: a library for adding conservative and dissipative forces to otherwise symplectic N-body integrations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(2), 2885-2901.
  145. Tholen, D. J. (1989). "Asteroid taxonomic classifications". *Asteroids II*. Tucson: University of Arizona Press. pp. 1139-1150. ISBN 978-0-8165-1123-5.
  146. Trigo-Rodríguez, J. M., Lyytinen, E., Gritsevich, M., et al. (2015). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 2119.
  147. Veras, D., Higuchi, A., & Ida, S. (2019). Speeding past planets? Asteroids

- radiatively propelled by giant branch Yarkovsky effects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485(1), 708-724.
148. Vernazza, P., Ferrais, M., Jorda, L., Hanuš, J., Carry, B., Marsset, M., ... & Socha, L. (2021). VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids: Final results and synthesis. *Astronomy & Astrophysics*, 654, A56.
  149. Visuri, J. J., & Gritsevich, M. (2021, August). Introducing the FireOwl: Data Processing Software of the Finnish Fireball Network. In 84th Annual Meeting of the Meteoritical Society, LPI Communications (Vol. 2609, p. 6093).
  150. Vokrouhlický, D., & Farinella, P. (1999). The Yarkovsky seasonal effect on asteroidal fragments: A nonlinearized theory for spherical bodies. *The Astronomical Journal*, 118(6), 3049-3060.
  151. Vokrouhlický, D., Milani, A., & Chesley, S. R. (2000). Yarkovsky effect on small near-Earth asteroids: Mathematical formulation and examples. *Icarus*, 148(1), 118-138.
  152. Vokrouhlický, D., & Nesvorný, D. (2008). Pairs of asteroids probably of a common origin. *The Astronomical Journal*, 136(1), 280.
  153. Vokrouhlický, D. (2009). (3749) Balam: A very young multiple asteroid system. *The Astrophysical Journal*, 706(1), L37.
  154. Vokrouhlický, D., Ďurech, J., Pravec, P., Kušnirák, P., Hornoch, K., Vraštil, J., ... & Nesvorný, D. (2016). The Schulhof family: Solving the age puzzle. *The Astronomical Journal*, 151(3), 56.
  155. Vokrouhlický, D., Pravec, P., Ďurech, J., Bolin, B., Jedicke, R., Kušnirák, P., ... & Nesvorný, D. (2017). The young Datura asteroid family-Spins, shapes, and population estimate. *Astronomy & Astrophysics*, 598, A91.
  156. Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., et al. (2015). In *Asteroids IV*, ed. Patrick Michel, F. E. DeMeo, & W. F. Bottke (Tucson, AZ: University of Arizona Press), 509.
  157. Vokrouhlický, D., Pravec, P., Ďurech, J., Hornoch, K., Kušnirák, P., Galád, A., ... & Colazo, C. A. (2017). Detailed analysis of the asteroid pair (6070) Rheinland and (54827) 2001 NQ8. *The Astronomical Journal*, 153(6), 270.
  158. Vokrouhlický, D., Fatka, P., Micheli, M., Pravec, P., & Christensen, E. J. (2022). Extremely young asteroid pair (458271) 2010 UM26 and 2010 RN221. *Astronomy & Astrophysics*, 664, L17.
  159. Walsh, K. J. (2018). Rubble pile asteroids. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1), 593-624.
  160. Warner, B. D., Harris, A. W., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., & Bottke, W. F. (2009). Analysis of the Hungaria asteroid population. *Icarus*, 204(1), 172-182.
  161. Warner, B. D., & Stephens, R. D. (2020). Near-Earth Asteroid Lightcurve

- Analysis at the Center for Solar System Studies: 2019 September-2020 January. *The Minor Planet Bulletin* (ISSN 1052-8091). Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers, Vol. 47, No. 2, pp. 105-120 (2020), 47, 105-120.
162. Wilkison, S. L., Robinson, M. S., Thomas, P. C., Veverka, J., McCoy, T. J., Murchie, S. L., ... & Yeomans, D. K. (2002). An estimate of Eros's porosity and implications for internal structure. *Icarus*, 155(1), 94-103.
163. Žižka, J., Galád, A., Vokrouhlický, D., Pravec, P., Kušnirák, P., & Hornoch, K. (2016). Asteroids 87887–415992: the youngest known asteroid pair?. *Astronomy & Astrophysics*, 595, A20.

## ДОДАТОК А

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації  
Публікації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить  
до міжнародної наукометричної бази Scopus

1. Kyrylenko I., Krugly Yu. N., Golubov O. Asteroid pairs: method validation and new candidates // *Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 655. Art. A14. (Scopus, Q1)  
**Key words:** minor planets, asteroids: general – celestial mechanics  
DOI: [10.1051/0004-6361/202140365](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140365)  
URL: [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2021/11/aa40365-21/aa40365-21.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2021/11/aa40365-21/aa40365-21.html)  
e-ISSN: 1432-0746
2. Kyrylenko I., Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Yu., Belskaya I., Shevchenko V. The first instrumentally documented fall of an iron meteorite: Orbit and possible origin // *Astrophys. J.* 2023. Vol. 953(1). Art. A20. (Scopus, Q1)  
**Key words:** Iron meteorites, Meteorites, Meteoroids, Meteors, Fireballs, Asteroids, Celestial mechanics, Astronomical simulations  
DOI: [10.3847/1538-4357/acdc21](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acdc21)  
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/acdc21/pdf>  
ISSN: 1538-4357
3. Kyrylenko I., Krugly Yu. N., Golubov O. Asteroid pairs: Survey of the inner main belt // *Astron. Astrophys.* 2024. Vol. 689. Art. A291. (Scopus, Q1)  
**Key words:** celestial mechanics – minor planets, asteroids: general  
DOI: [10.1051/0004-6361/202450725](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450725)  
URL: <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2024/09/aa50725-24.pdf>  
e-ISSN: 1432-0746

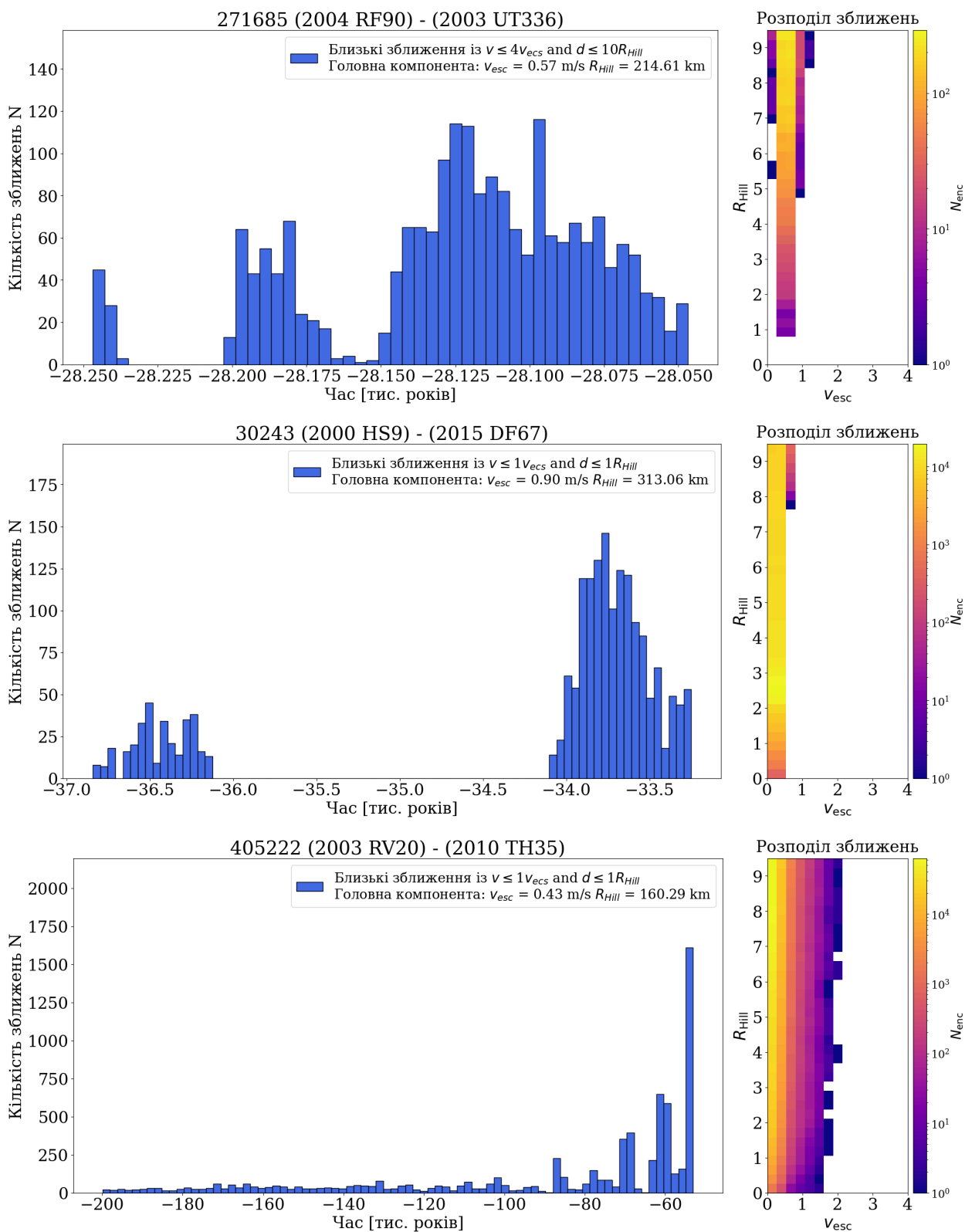
### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

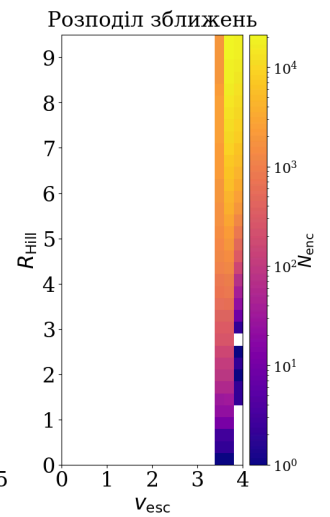
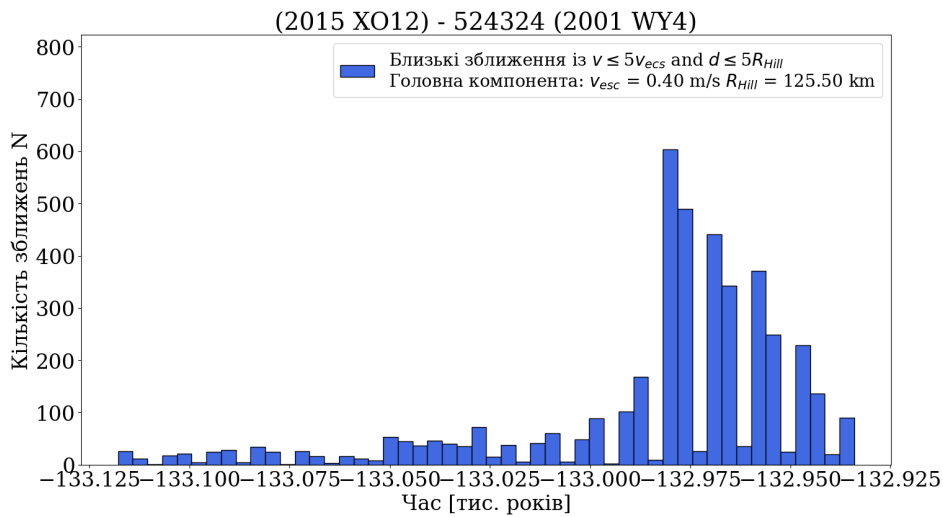
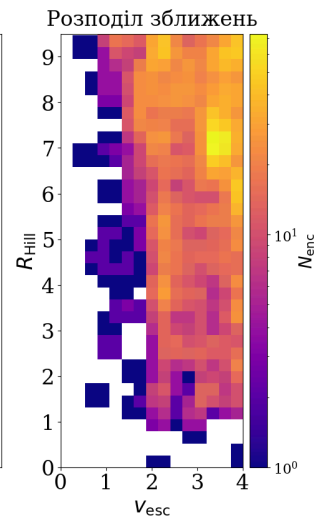
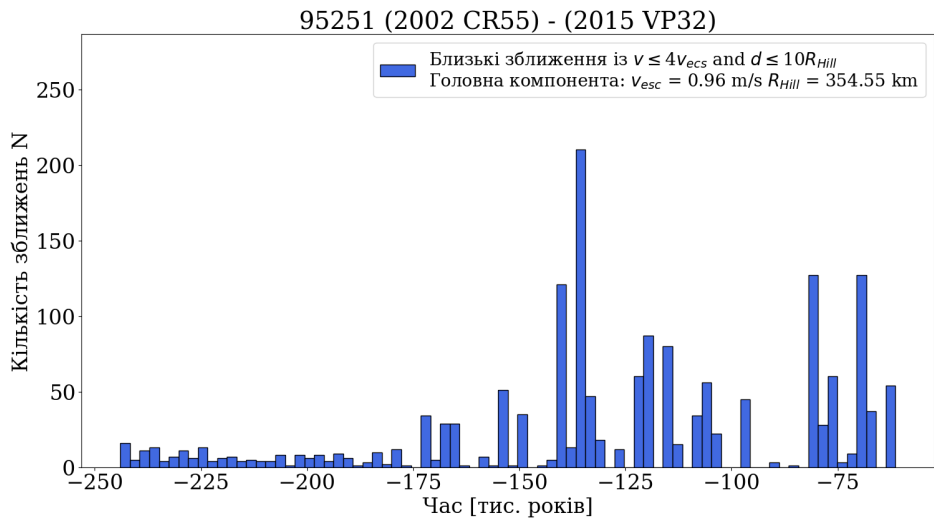
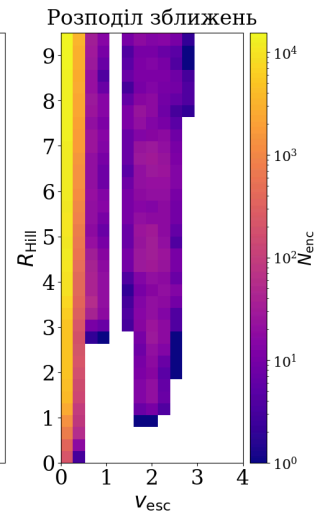
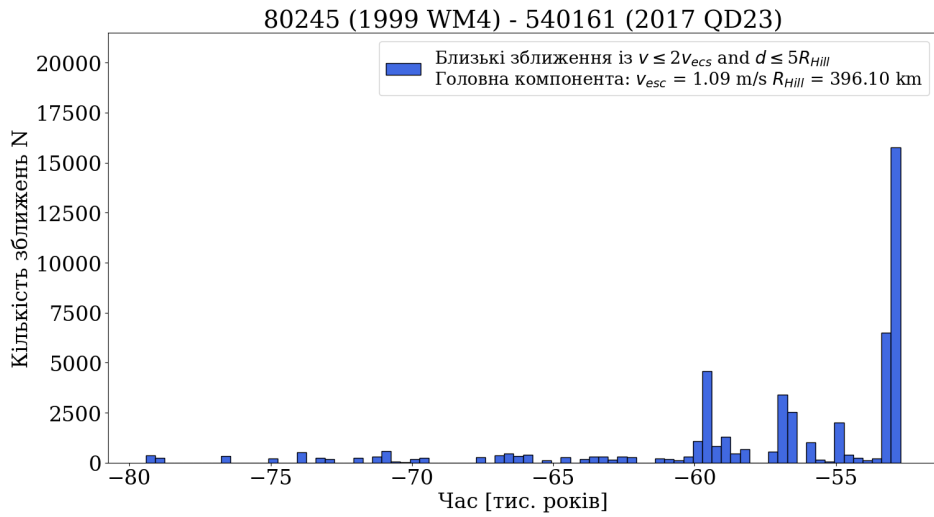
4. **Kyrylenko I. I.**, Krugly Yu. M., Golubov O. A. New Asteroid Pair Candidates in the Main Belt. *52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPI Contribution No. 2548, March 15–19 2021*: abstr. Held virtually, 2021. P. 2741. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2741.pdf>.
5. Golubov O., **Kyrylenko I.**, Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y. N., Belskaya I., Shevchenko V. G. Search for the parent body of the recently

- fallen iron meteorite, *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022*, EGU22-12472, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12472>, 2022.
6. **Kyrylenko I.**, Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y. N., Belskaya I., Shevchenko, V. G. (2022, March). Possible Origin of the First Iron Meteorite with an Instrumentally Documented Fall. *In 53rd Lunar and Planetary Science Conference (Vol. 2678, p. 2655)*.  
<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/2655.pdf>
  7. **Kyrylenko I.**, Golubov O., Slyusarev I., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Y.N. Orbit and dynamic origin of the recently recovered iron meteorite, *IAUS 374: Astronomical Hazards for Life on Earth, Busan, the Republic of Korea on August 2-11, 2022*, Abstract No. 2869.
  8. Slyusarev I., **Kyrylenko I.**, Golubov O., Visuri J., Gritsevich M., Krugly Yu., Belskaya I., Shevchenko V. Orbital elements and dynamical history of the 07.11.2020 iron meteoroid. *Int. Conf. Meteoroids 2022, June 13-17, 2022 (virtual)*.
  9. Krugly Y., Belskaya I., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Slyusarev I., Shevchenko V., Inasaridze R., Ayvazian V., Donchev Z., Bonev T., Ergashev K., Burkhonov O., Ehgamberdiev S., Koupryanov V., Haislip J., Reichart D. Photometric monitoring of near-Earth asteroids. *XXXII IAU General Assembly 2024. Abstract 2969 at FM3 “Follow-up observations of small bodies in the Solar System in the era of large discovery surveys”, 6-15 August 2024, Cape Town, South Africa*.
  10. Slyusarev I., Belskaya I., Shevchenko V., Krugly Y., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Sergeyev A., Mikhalchenko O. A contemporary view on M-type asteroids. *XXXII IAU General Assembly 2024. Abstract 1875 at FM3 “Follow-up observations of small bodies in the Solar System in the era of large discovery surveys”, 6-15 August 2024, Cape Town, South Africa*
  11. Panasiuk A., Golubov O., **Kyrylenko I.**, Simulation of deflection of hazardous asteroids; *24-th Gamow International Astronomical Conference "Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, astroparticle physics, radio astronomy, astrobiology and genetics", 19-23 August, 2024, Odesa, Ukraine, p.42*  
[https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2024/09/Abstracts-2024\\_and\\_Program.pdf](https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2024/09/Abstracts-2024_and_Program.pdf)

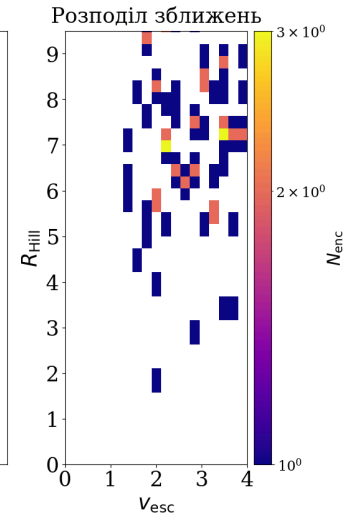
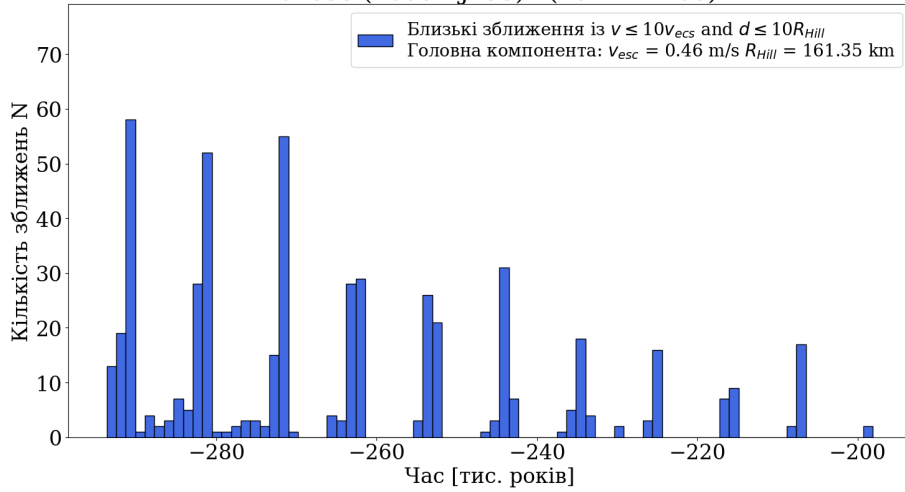
## ДОДАТОК Б

### Розподіл тісних зближень для 50 нових астероїдних пар, отриманих у роботі

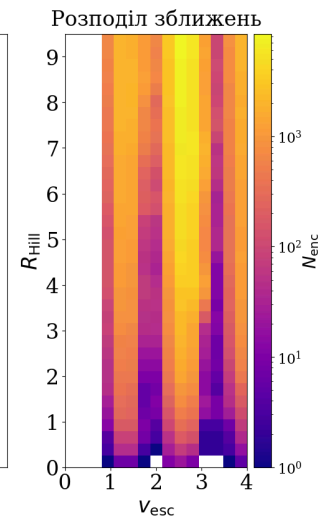
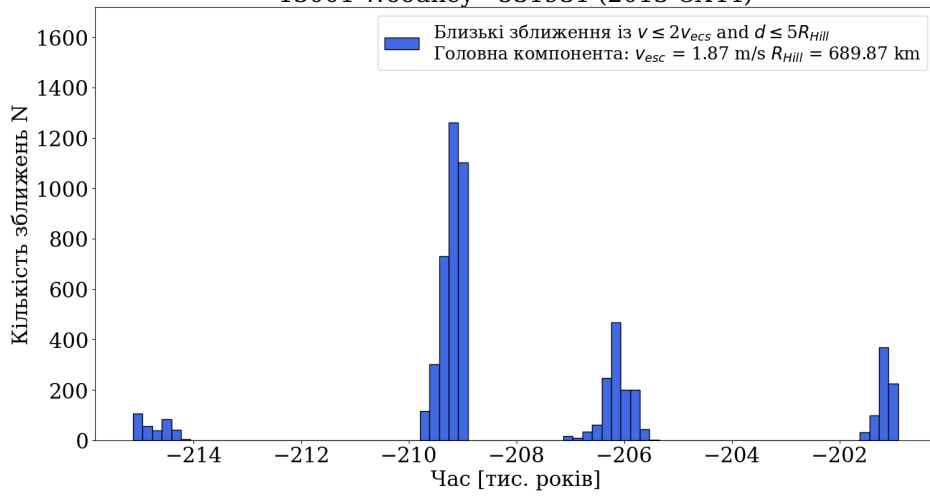




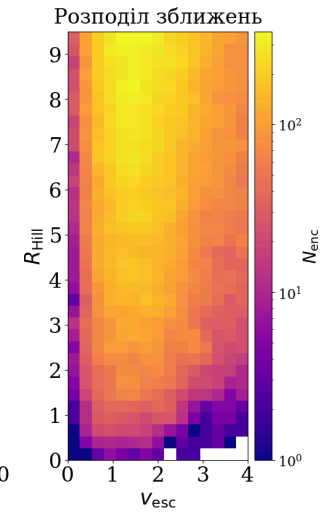
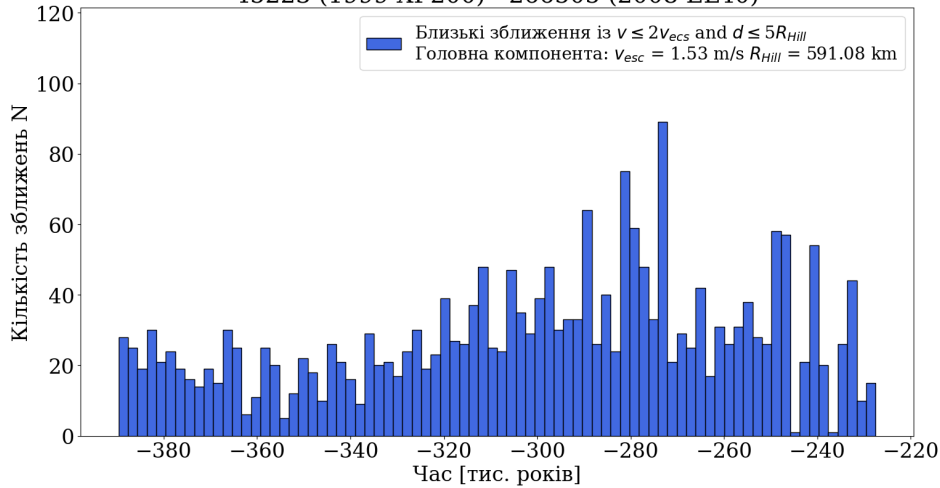
204655 (2006 VJ193) - (2017 FE106)

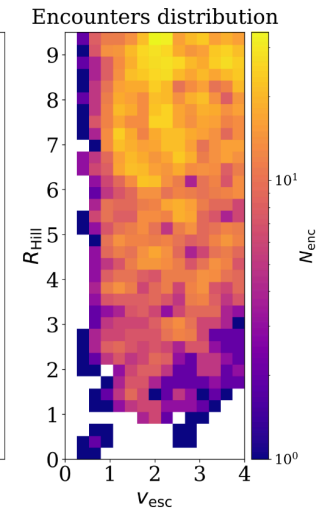
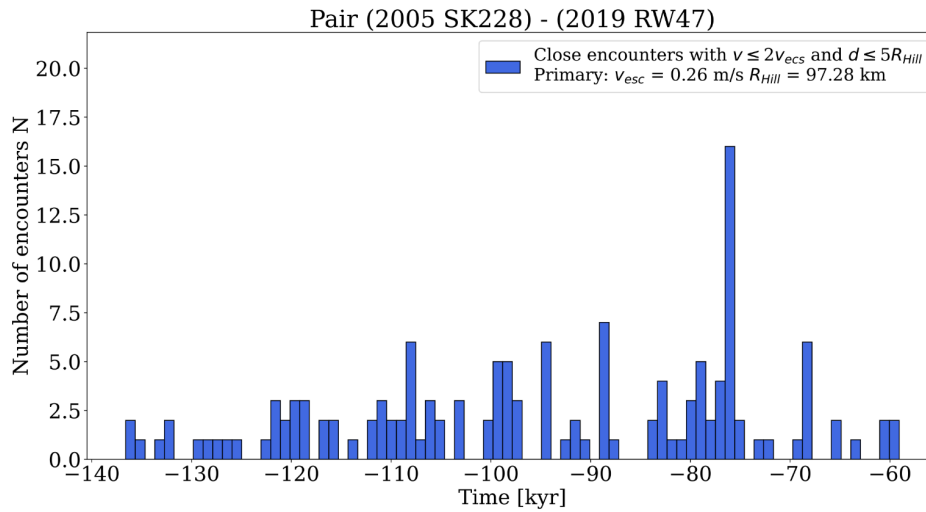
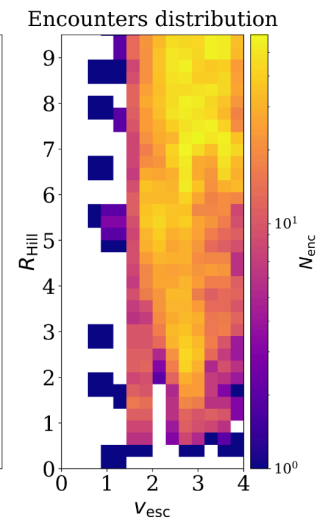
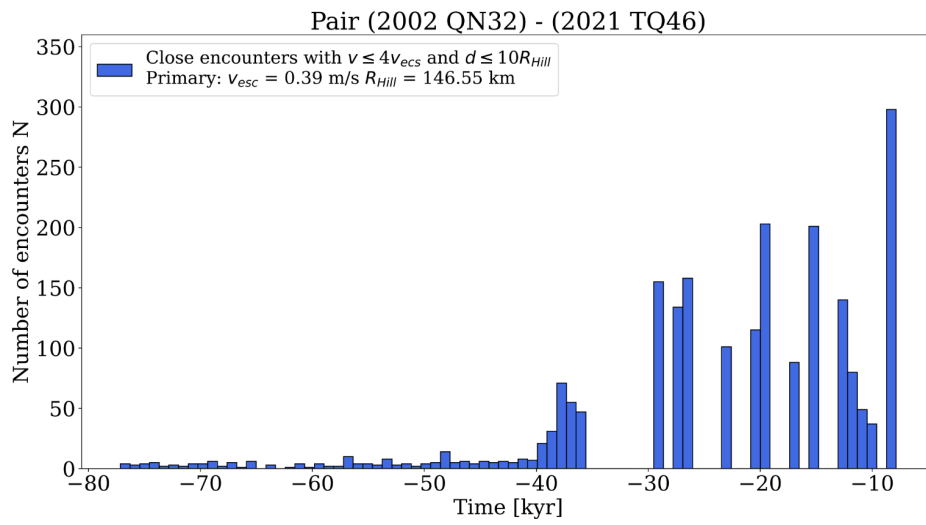
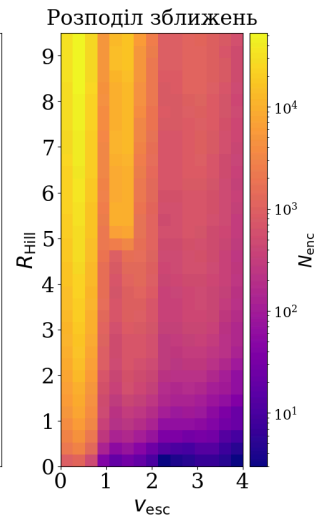
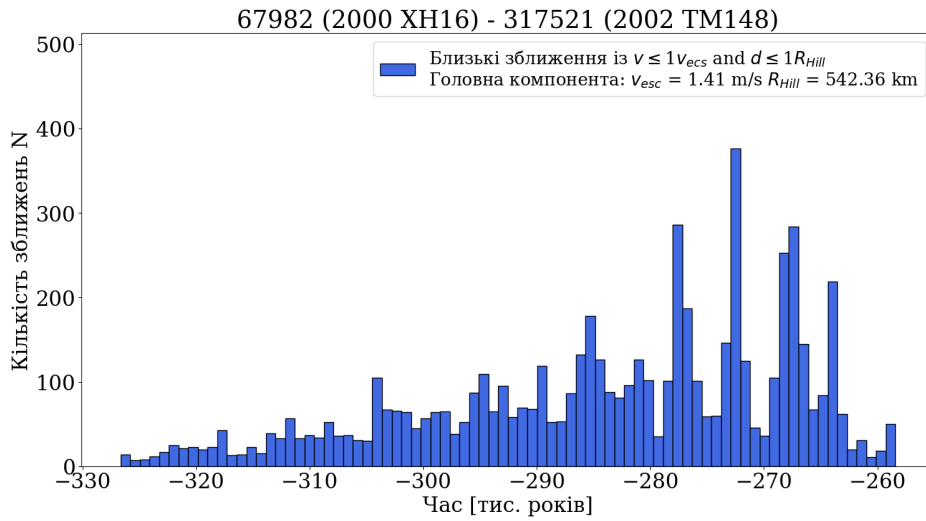


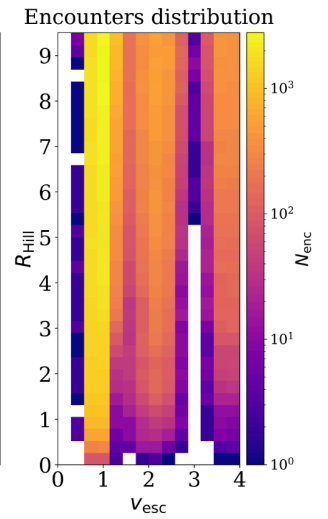
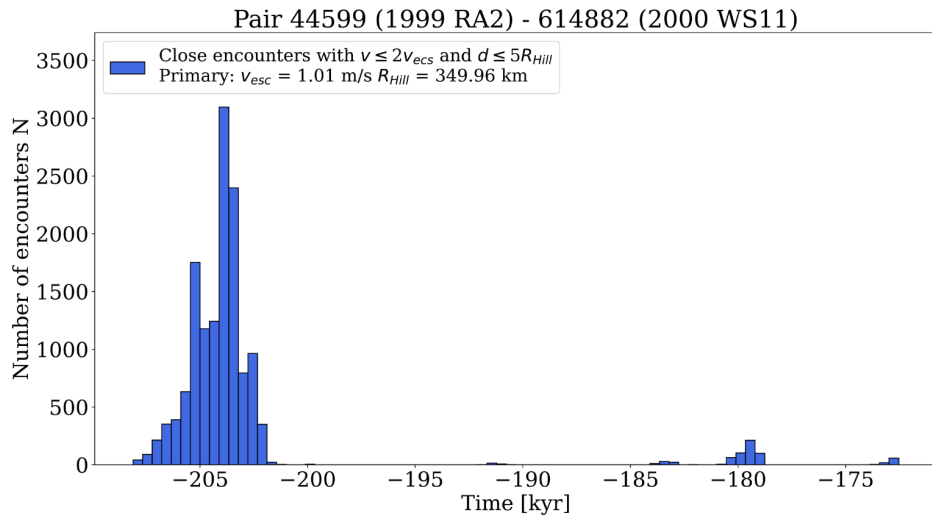
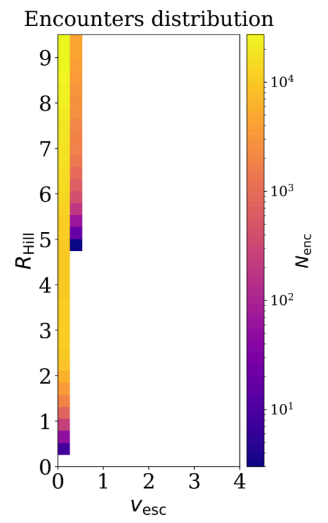
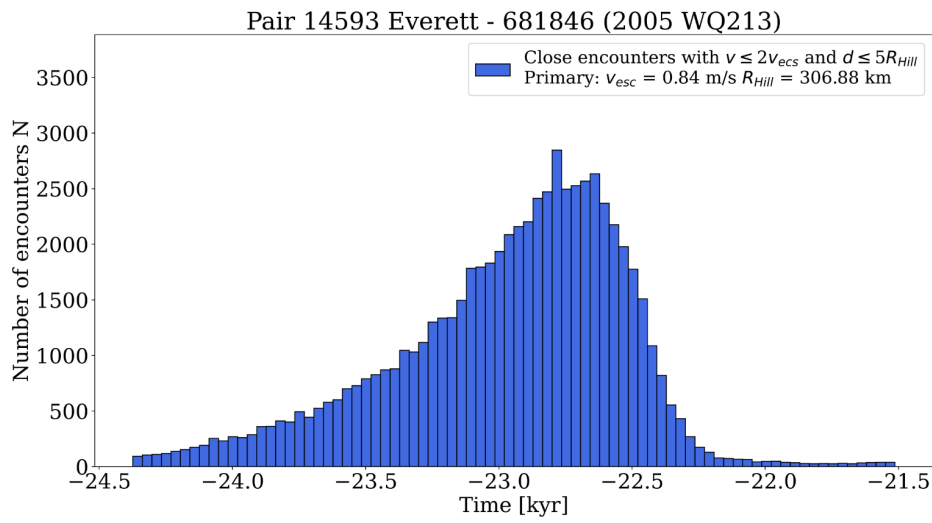
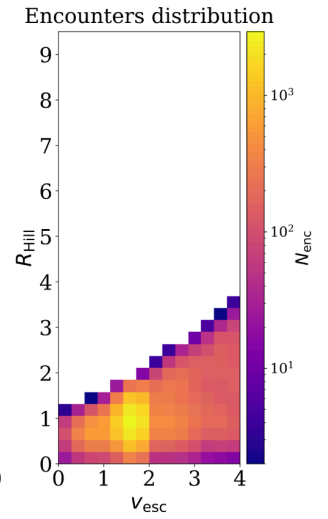
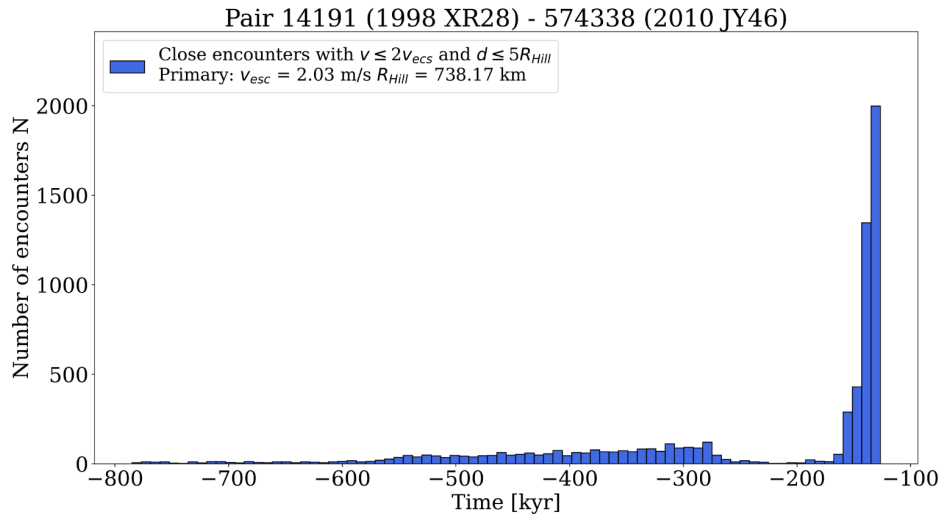
13001 Woodney - 531931 (2013 CX44)

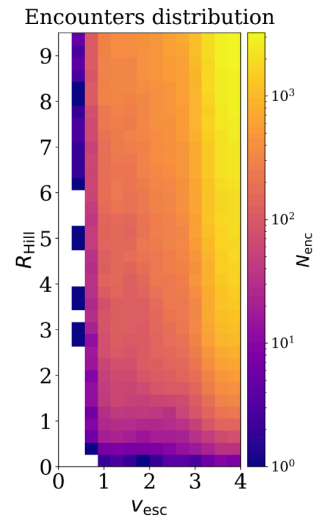
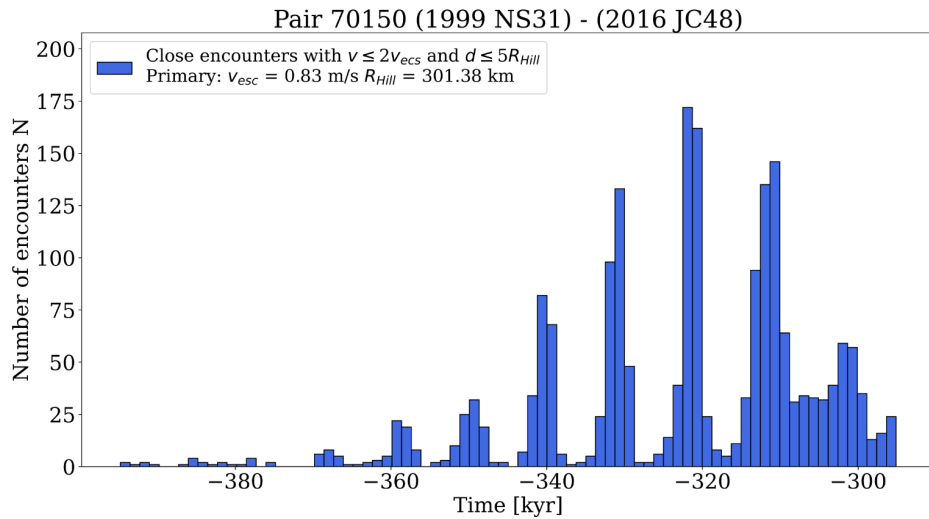
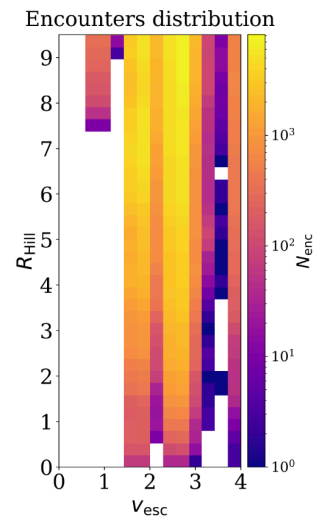
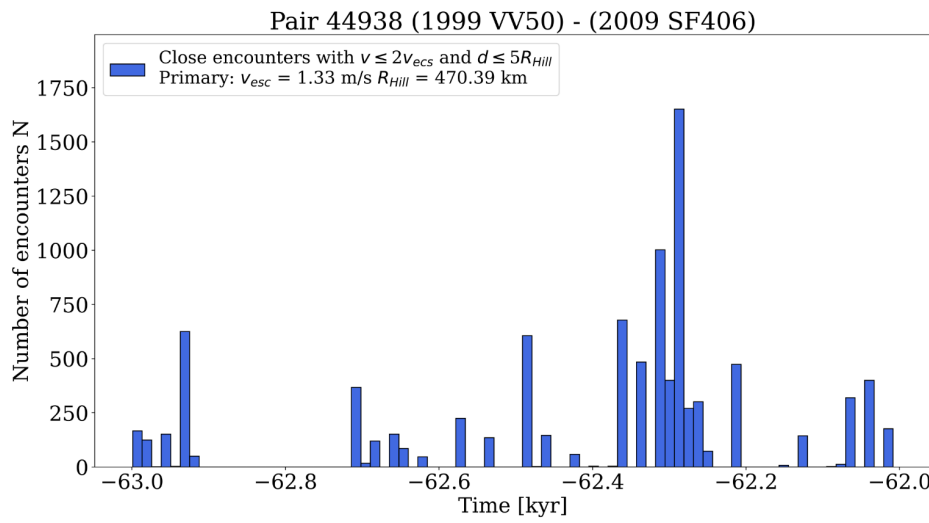
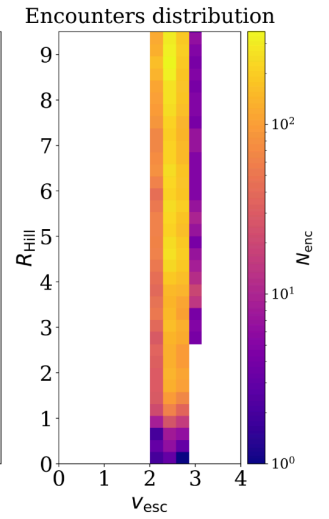
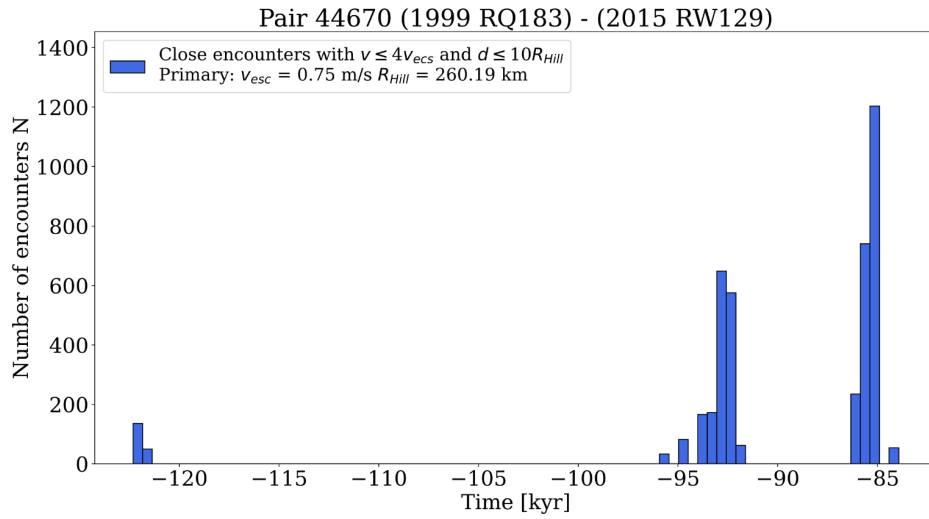


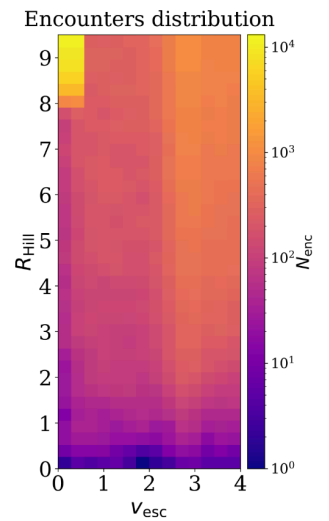
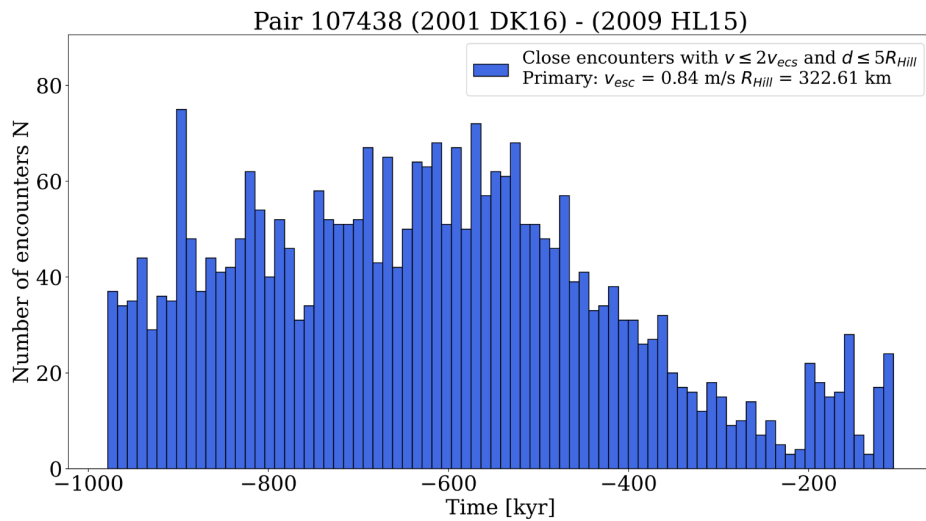
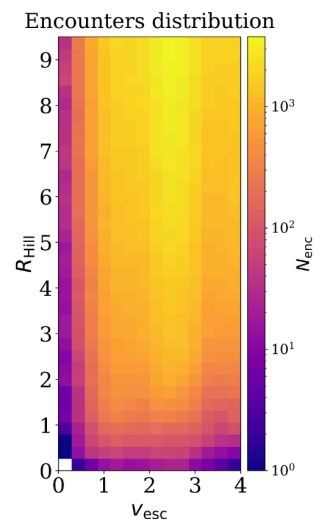
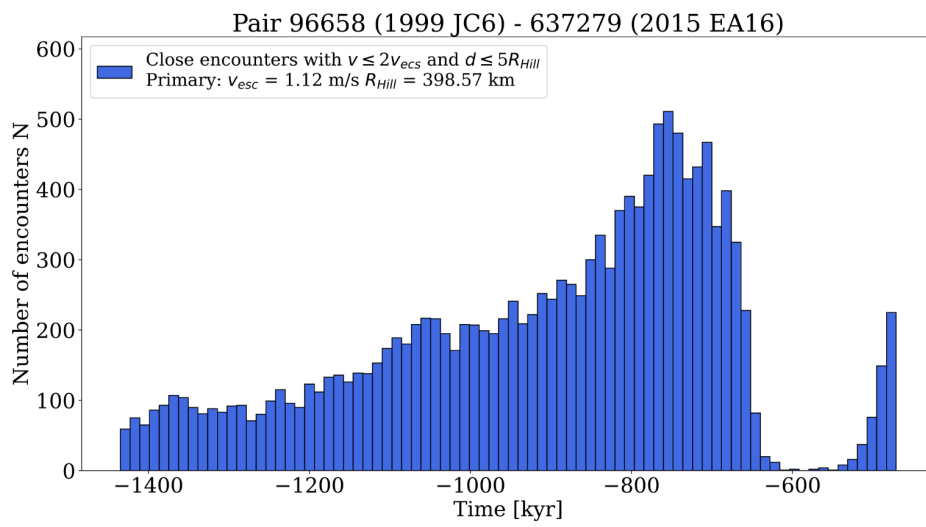
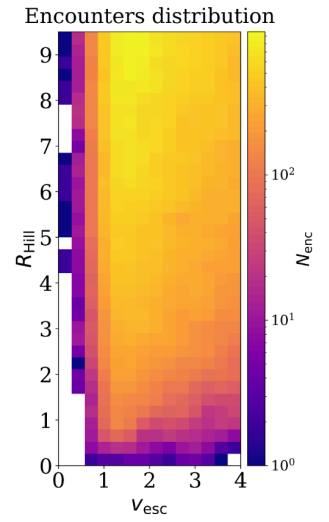
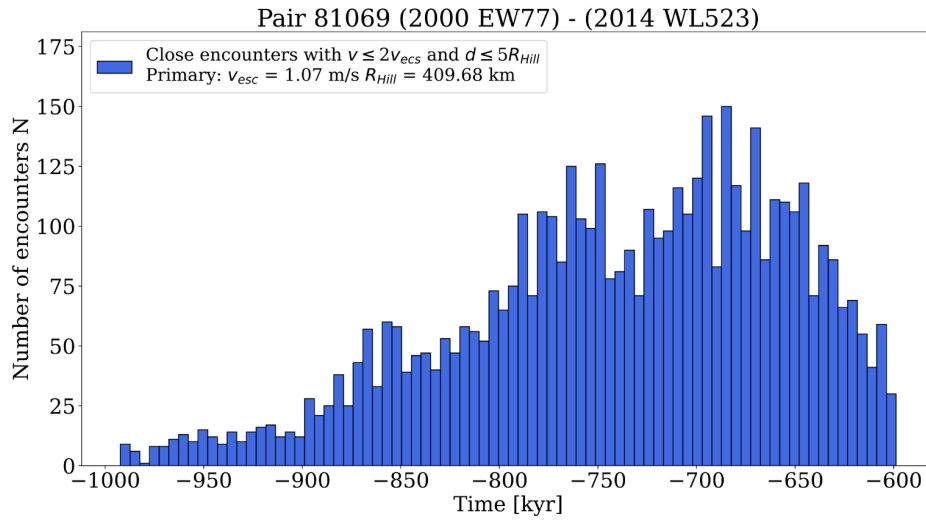
45223 (1999 XF200) - 266505 (2008 EL40)

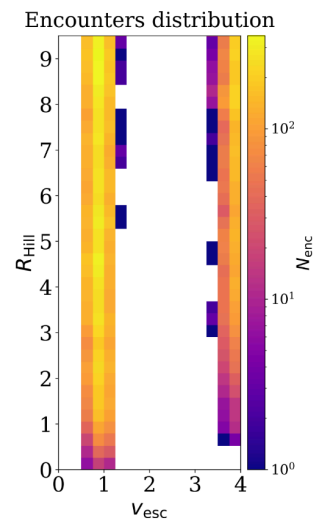
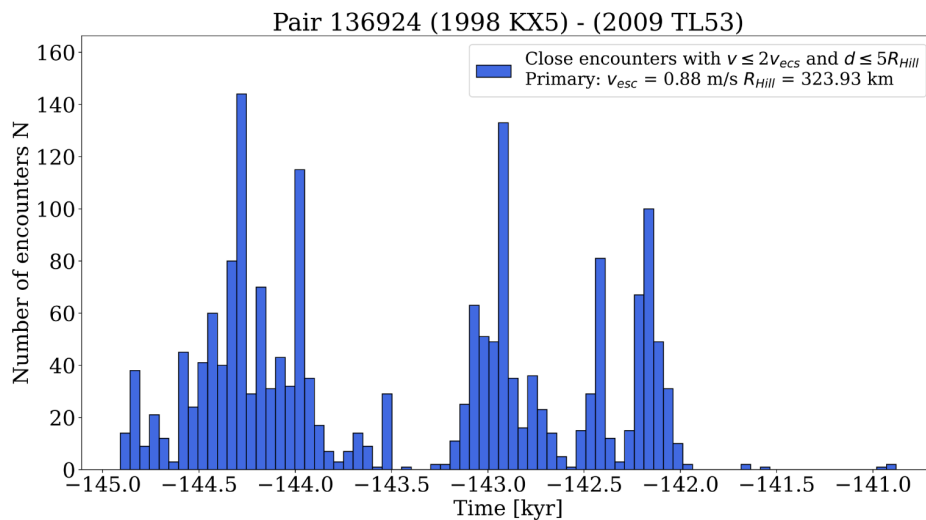
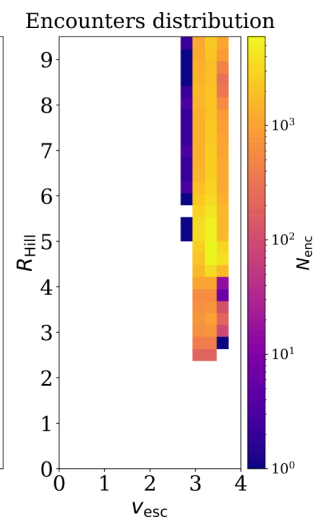
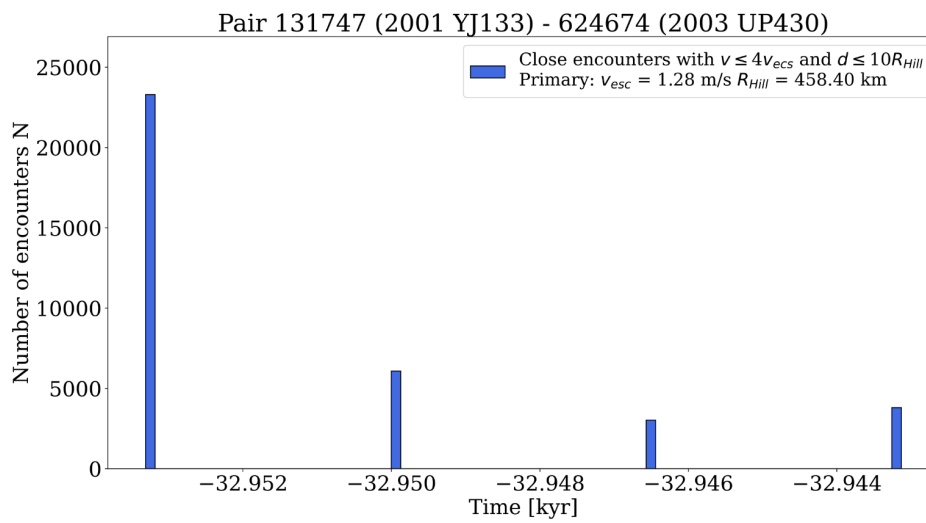
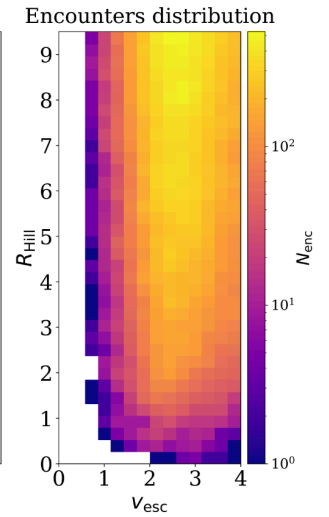
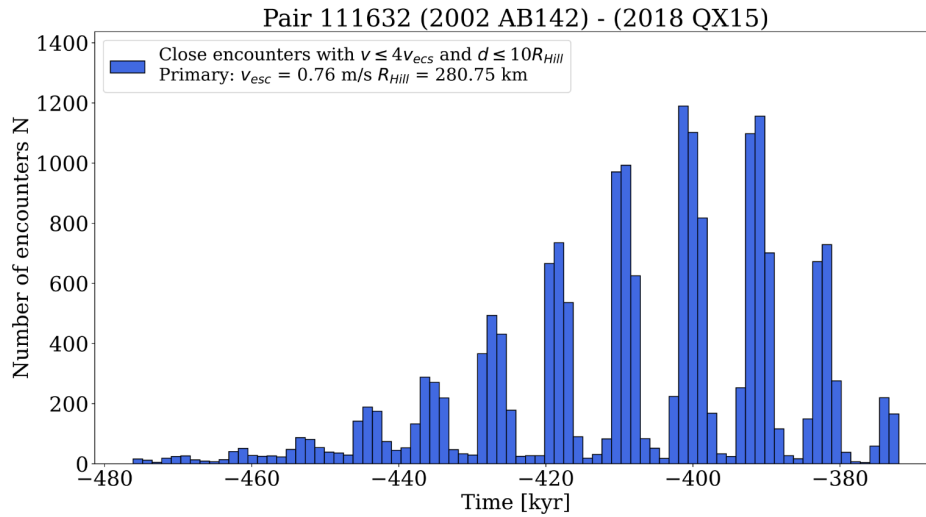


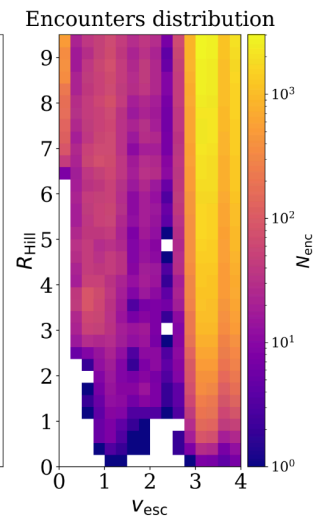
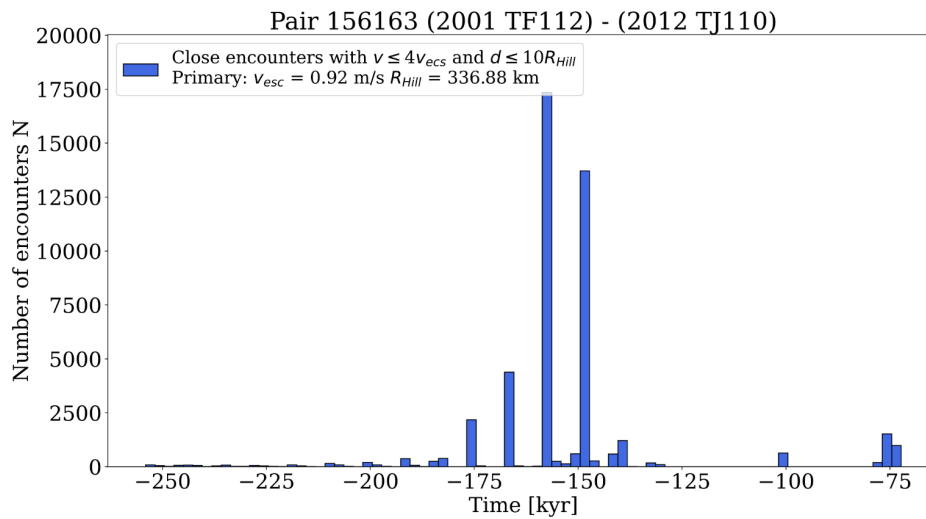
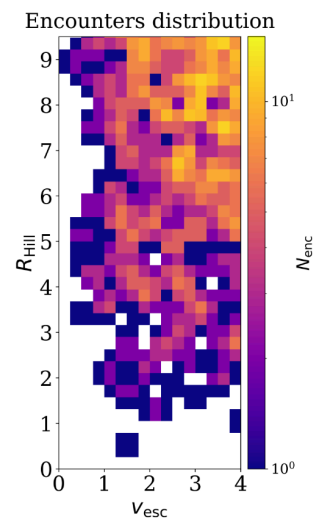
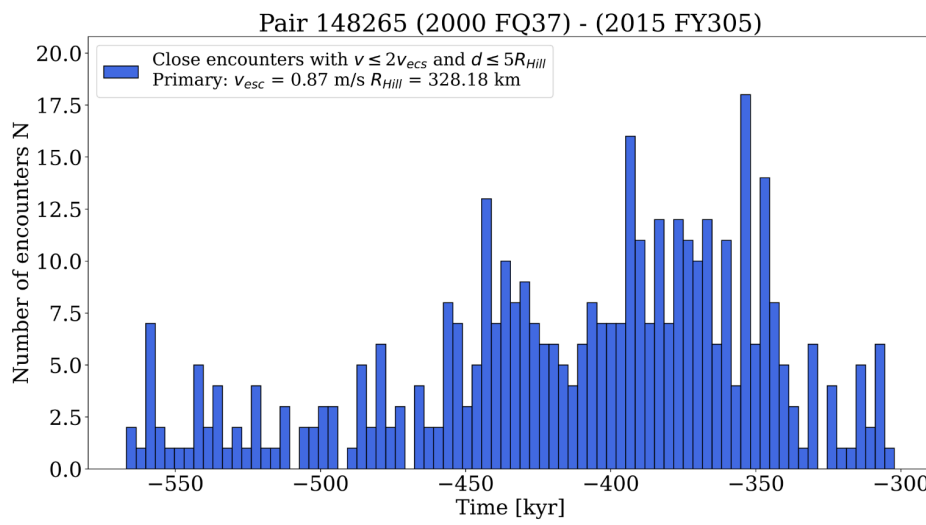
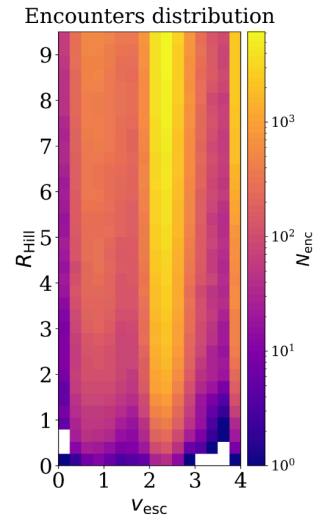
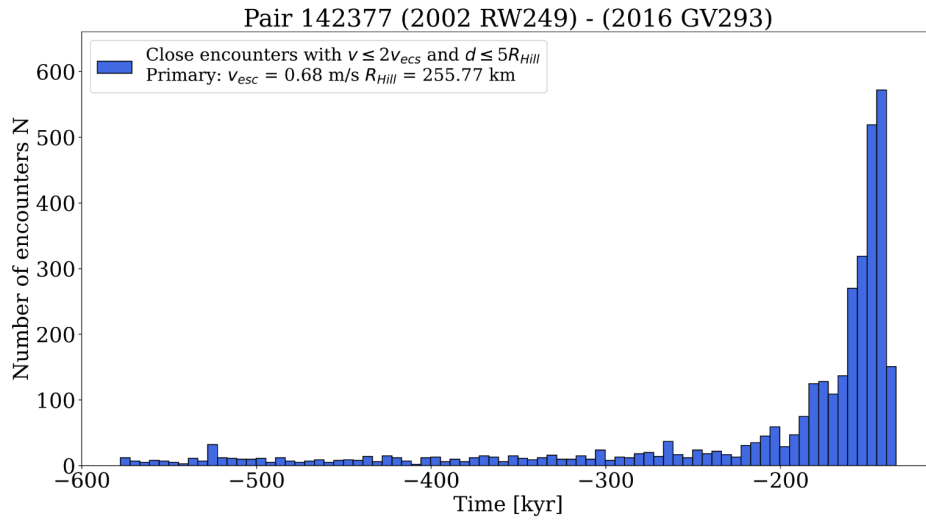


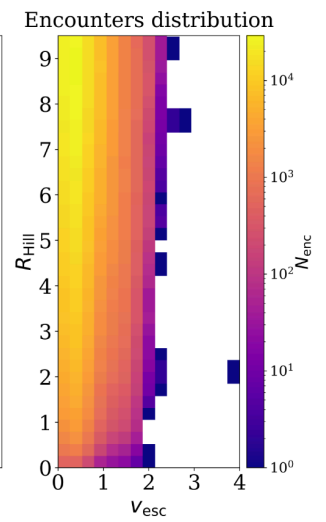
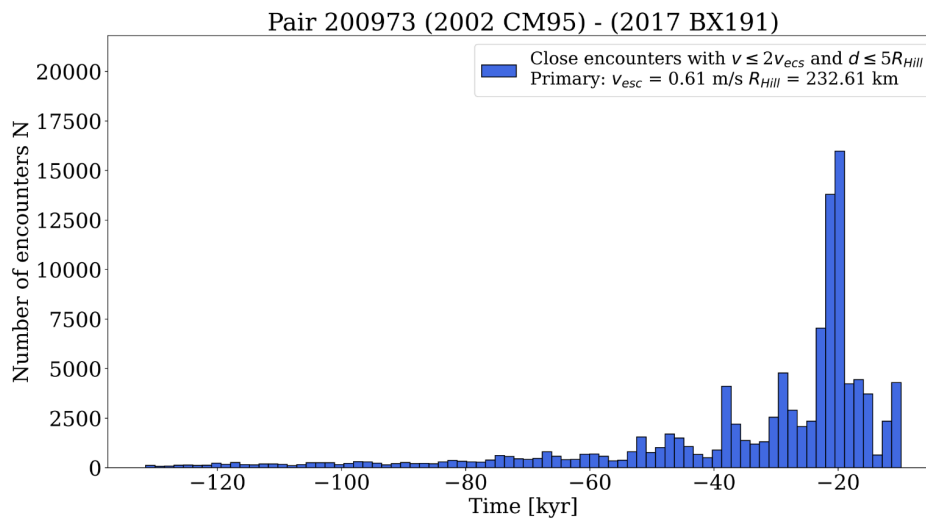
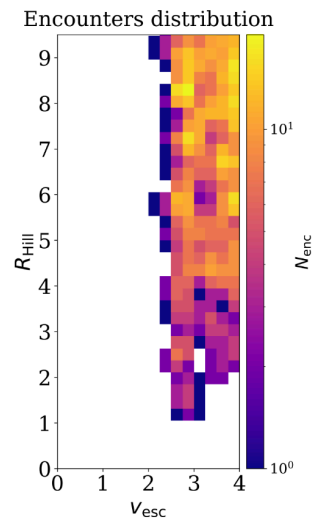
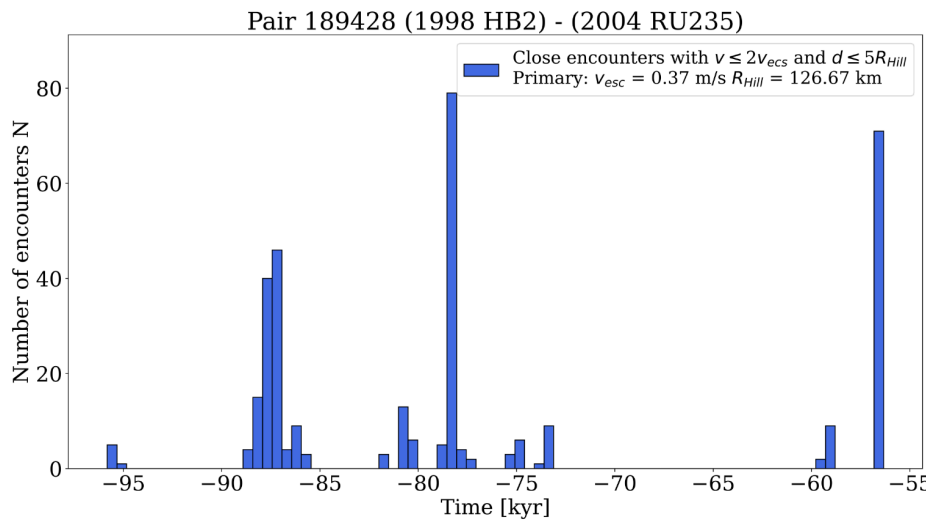
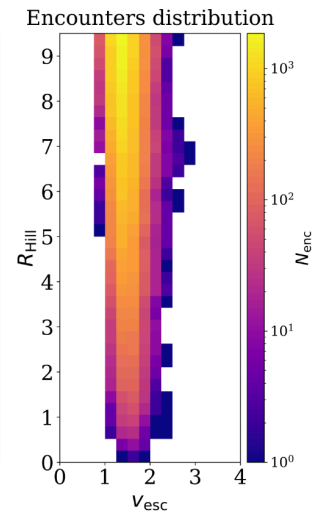
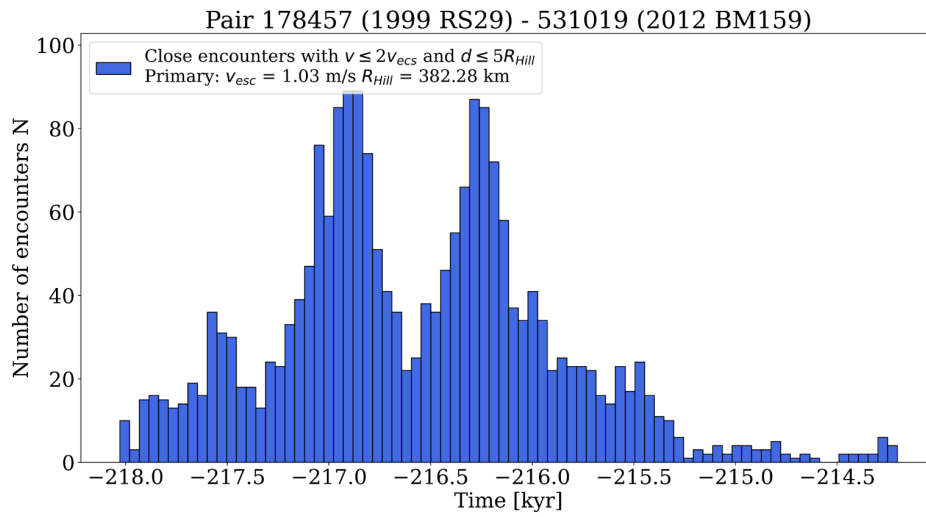


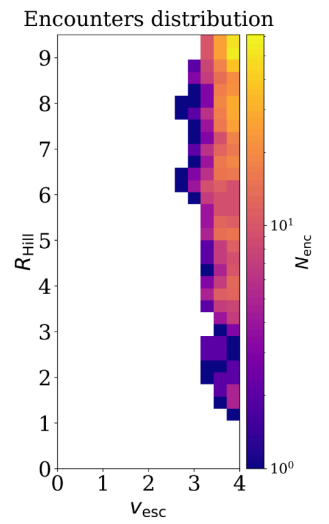
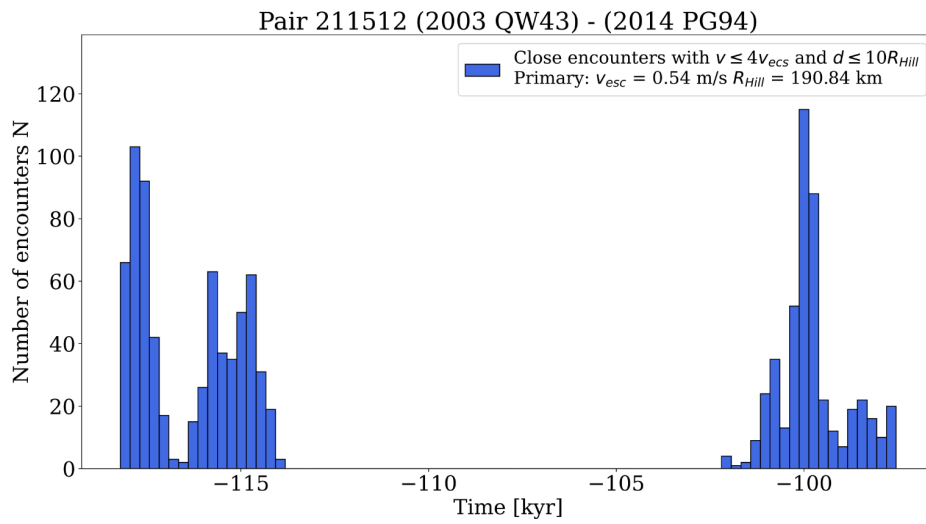
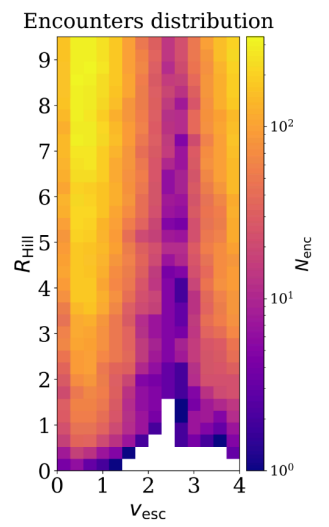
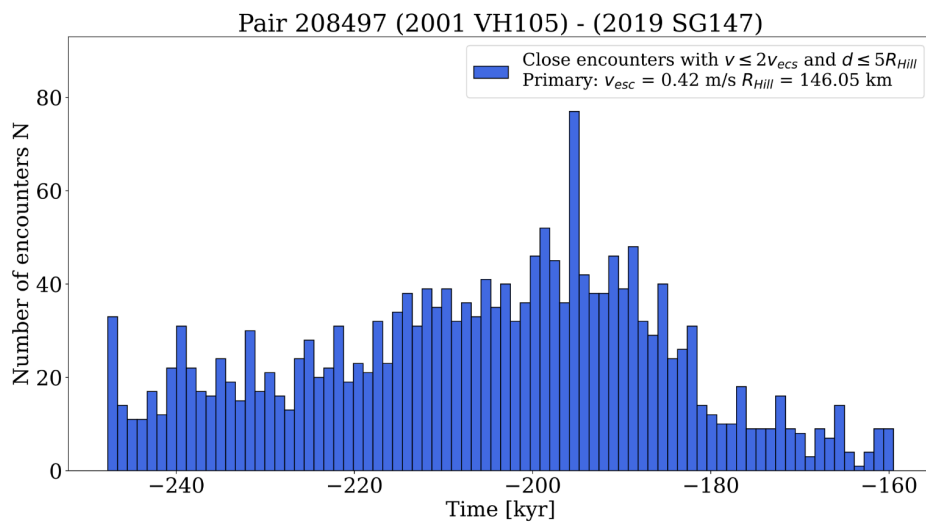
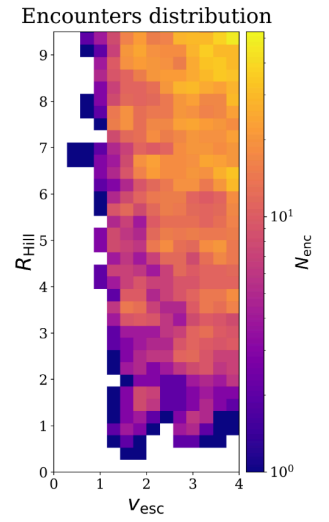
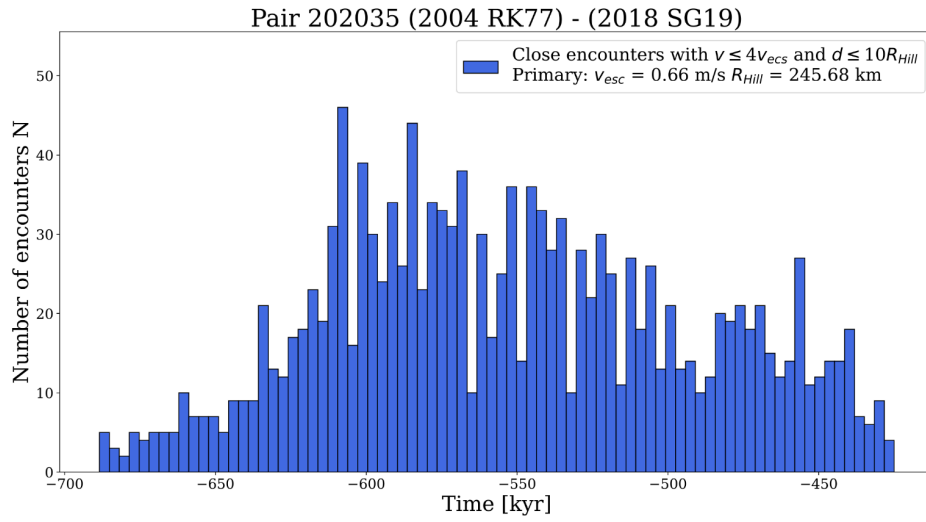


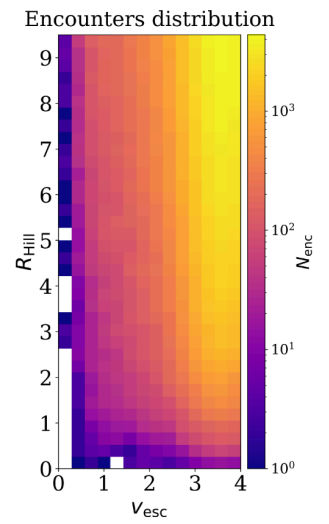
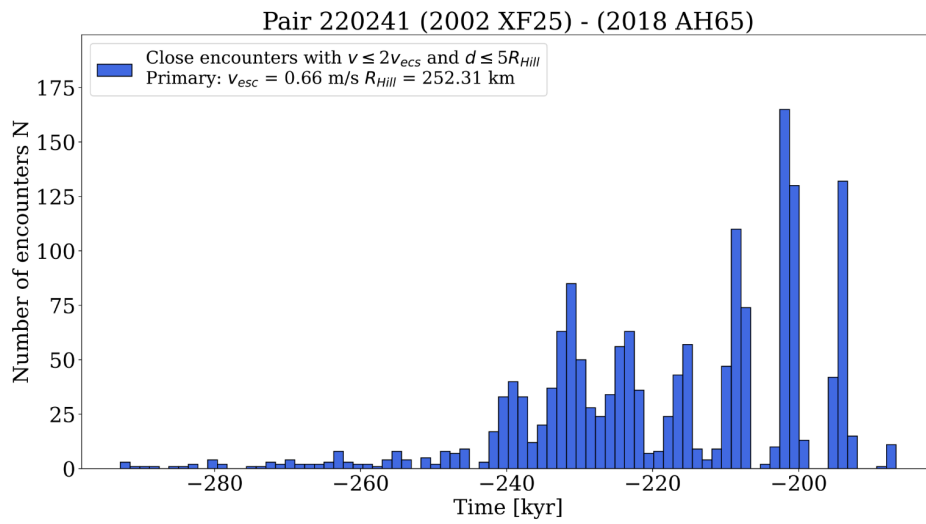
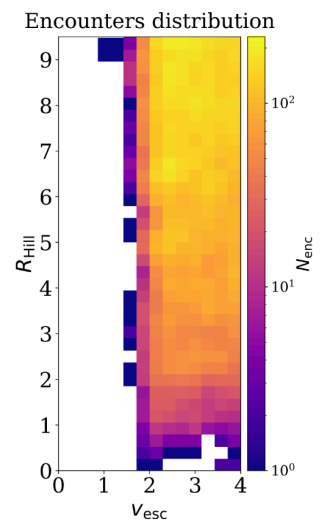
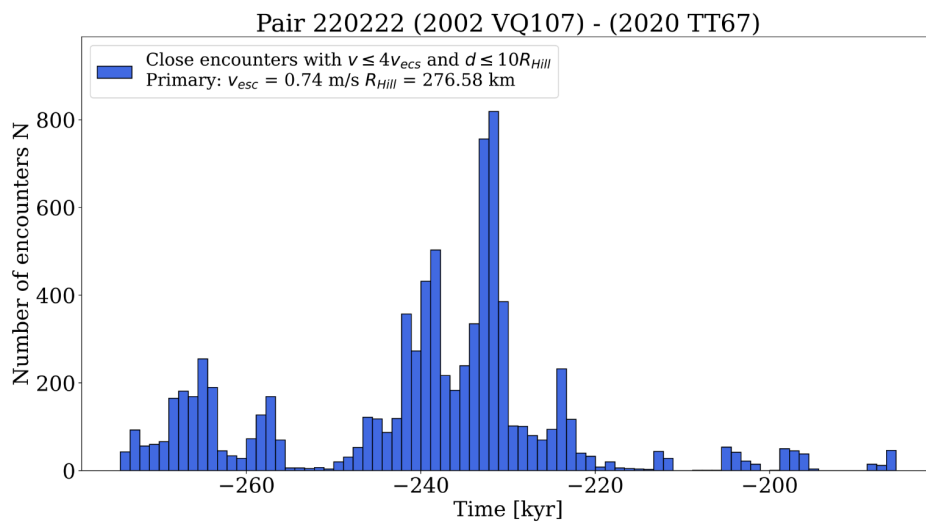
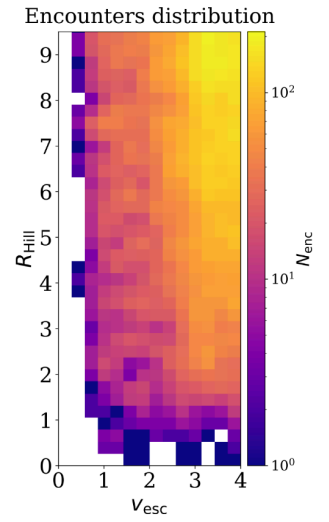
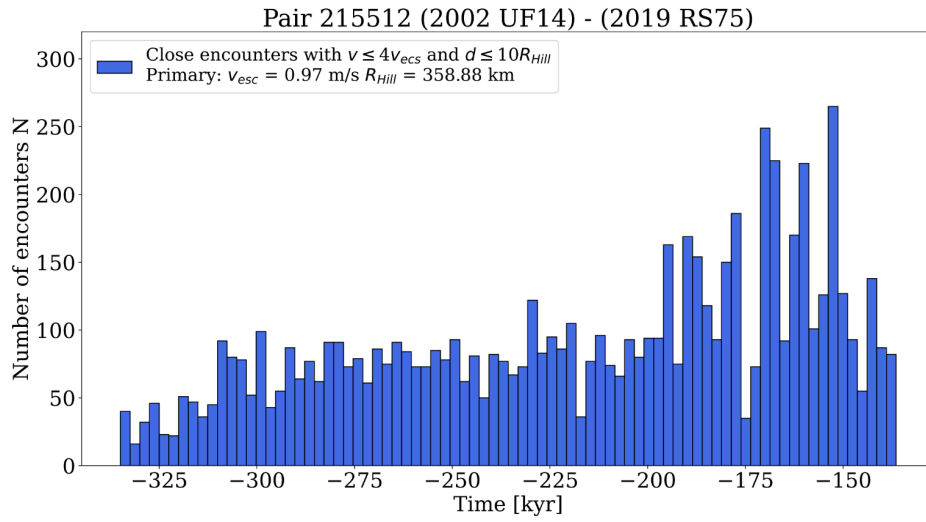


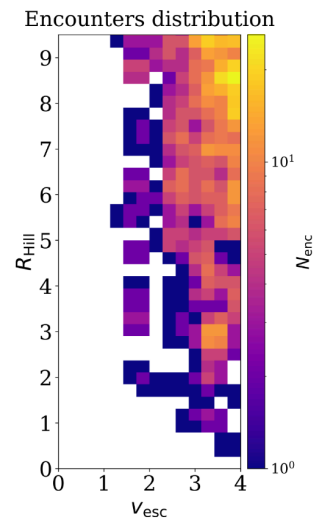
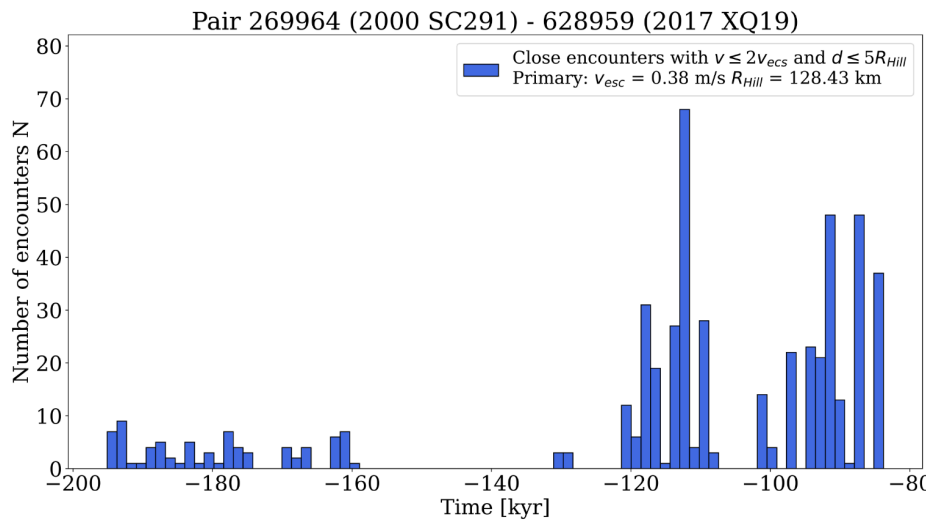
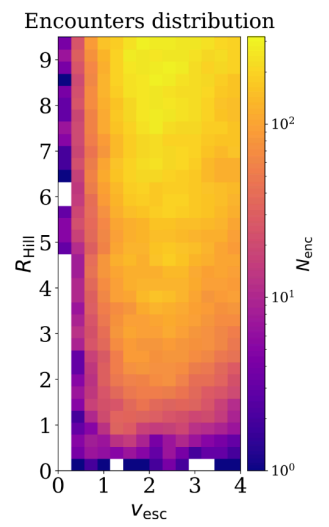
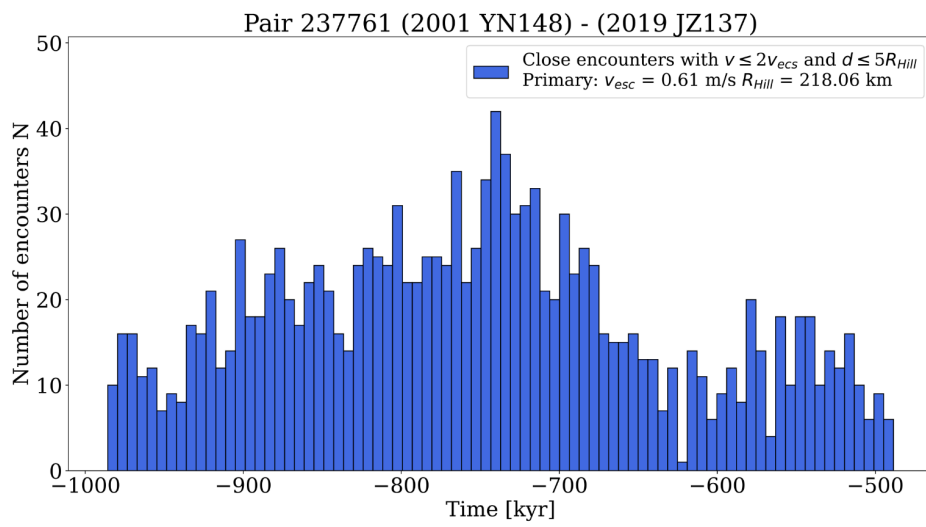
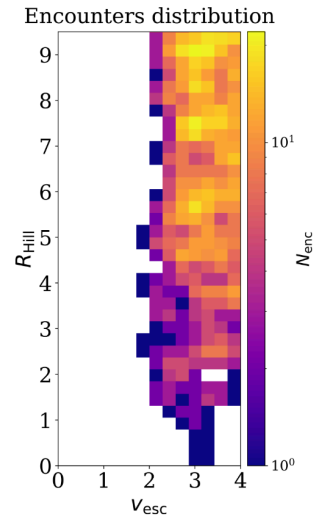
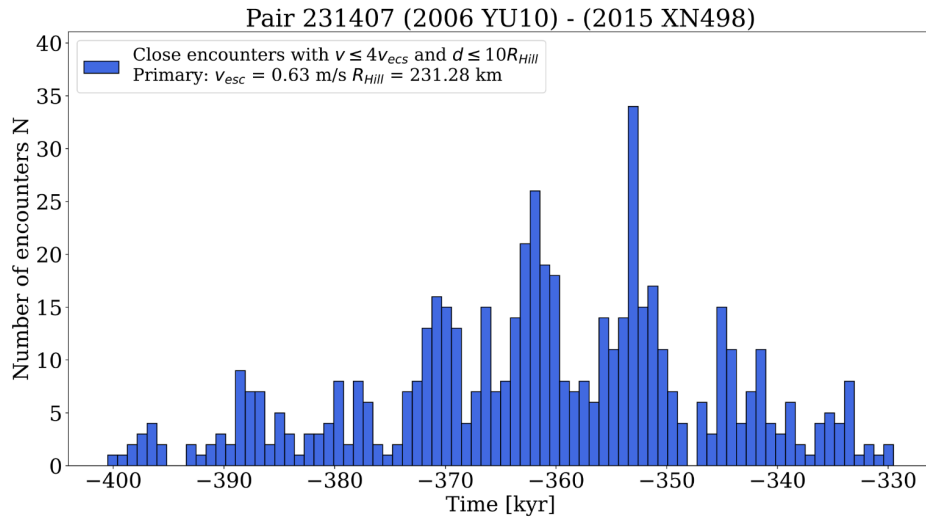


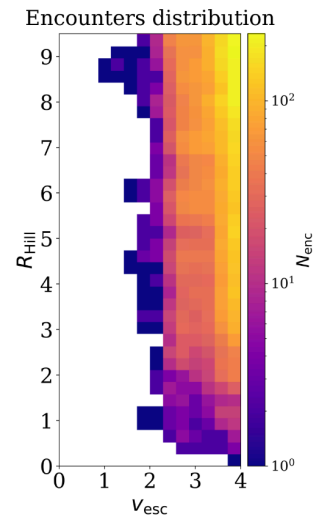
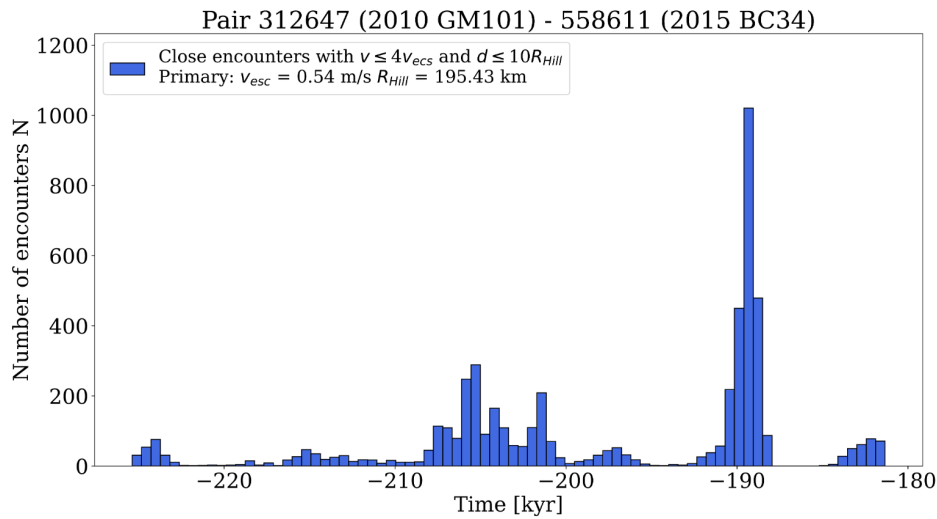
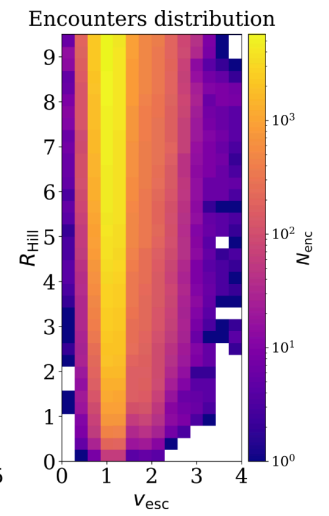
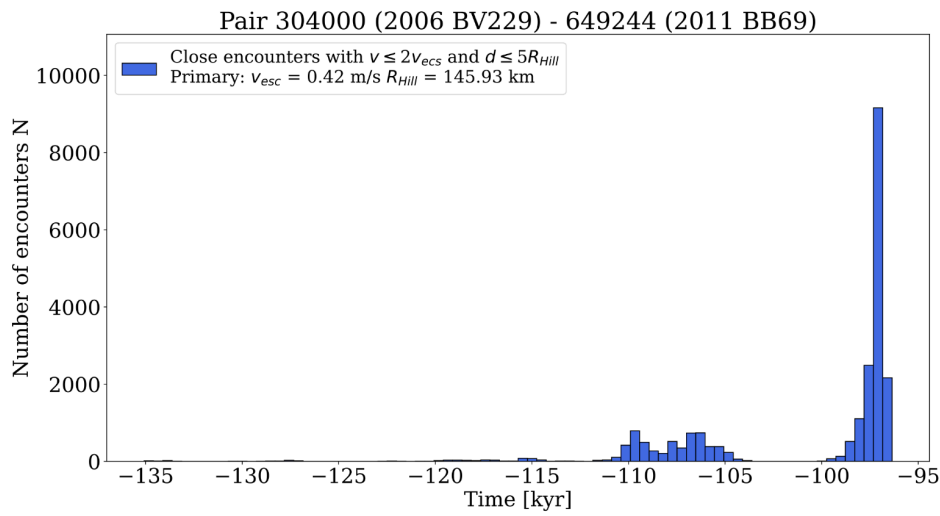
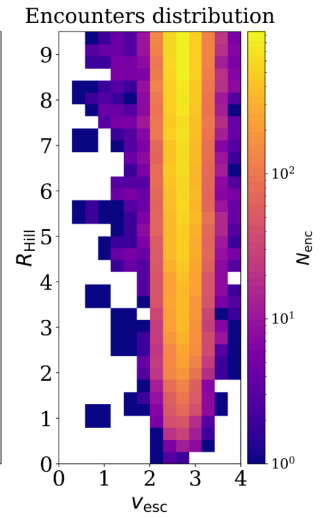
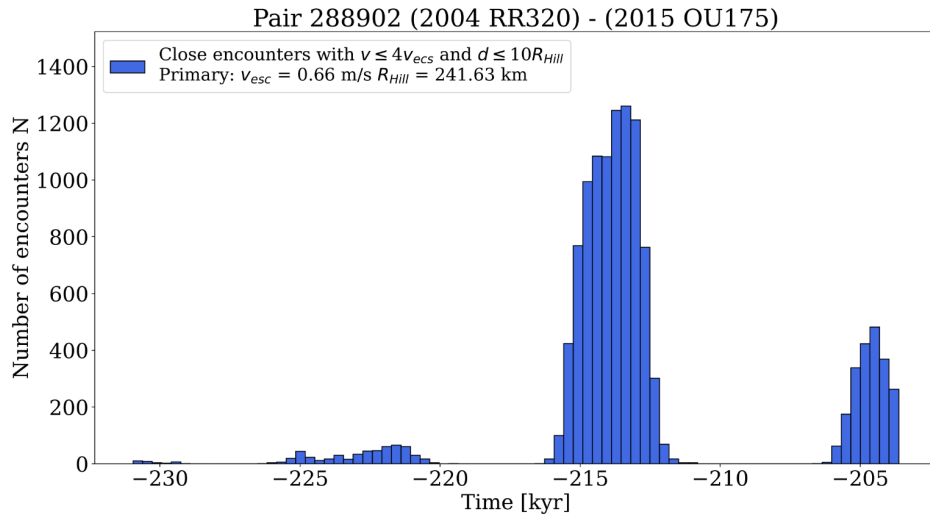


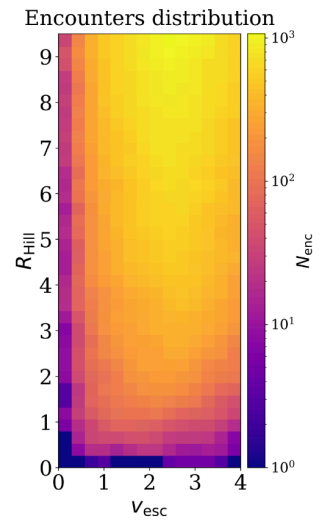
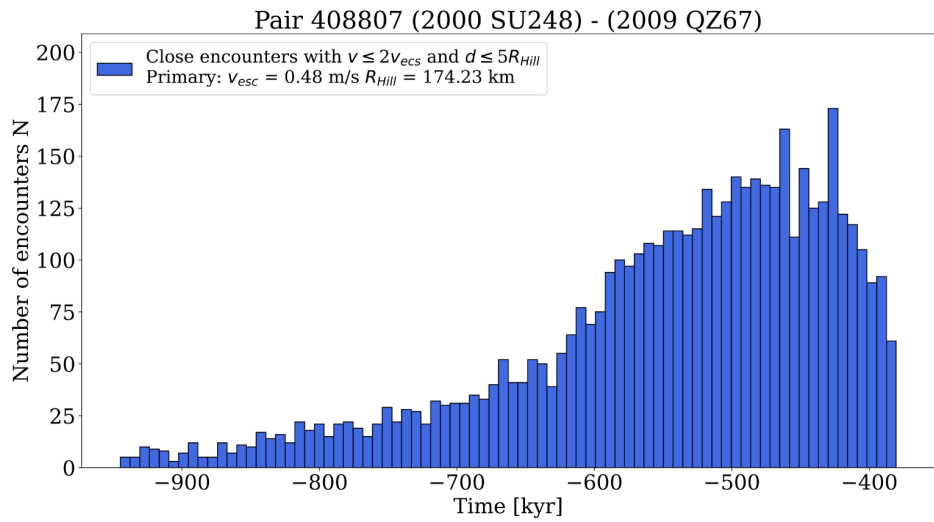
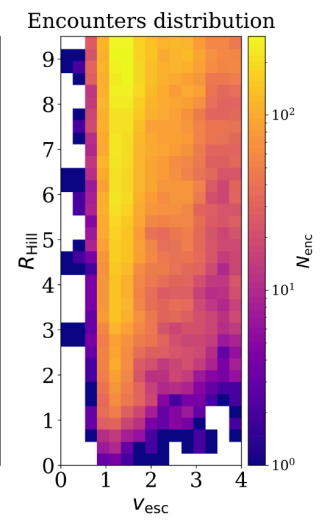
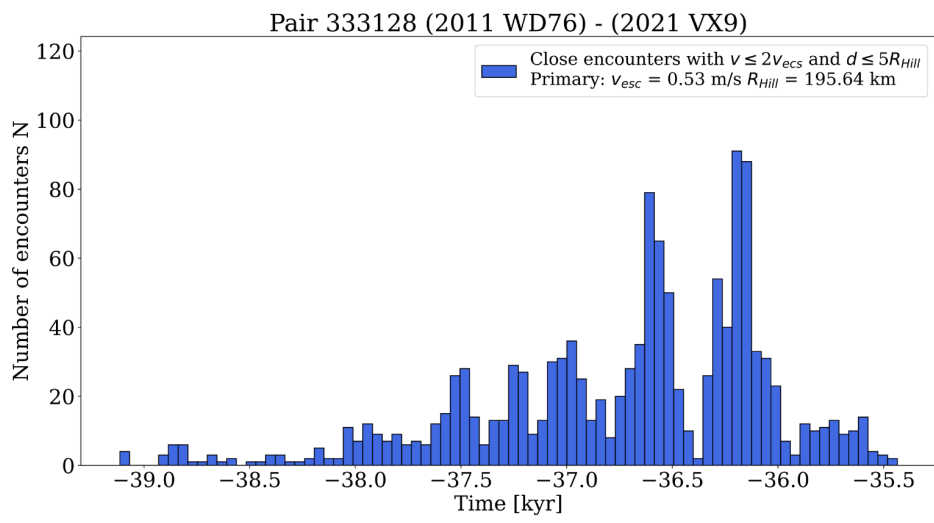
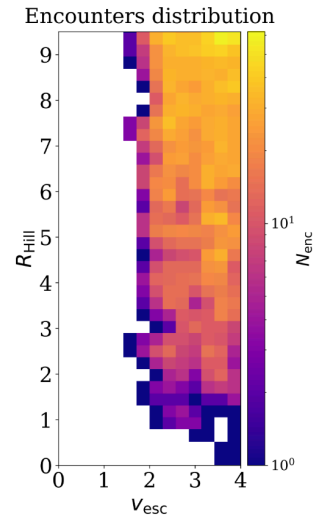
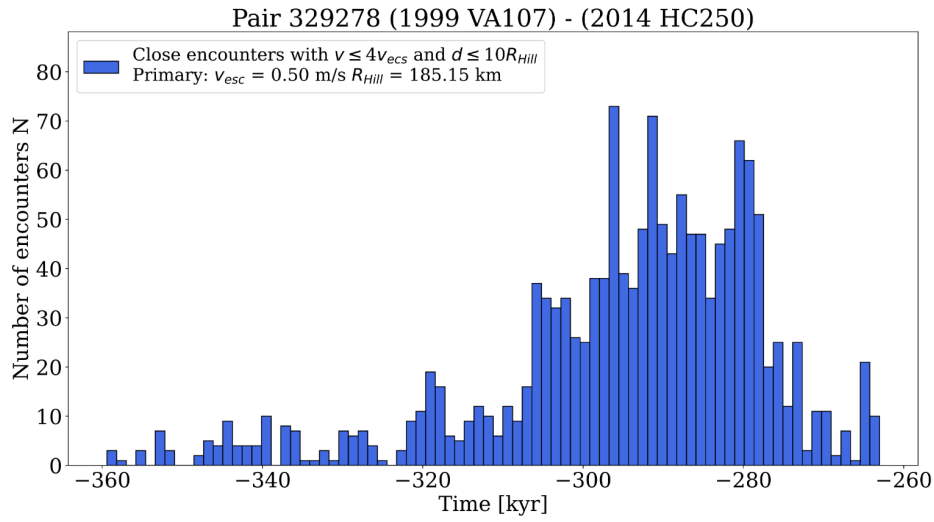


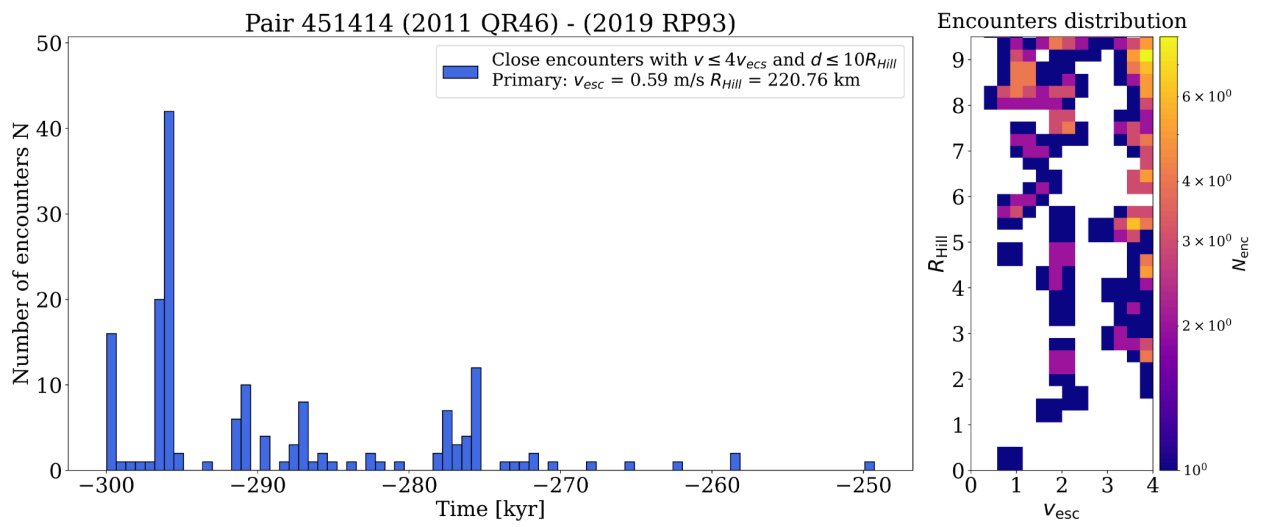
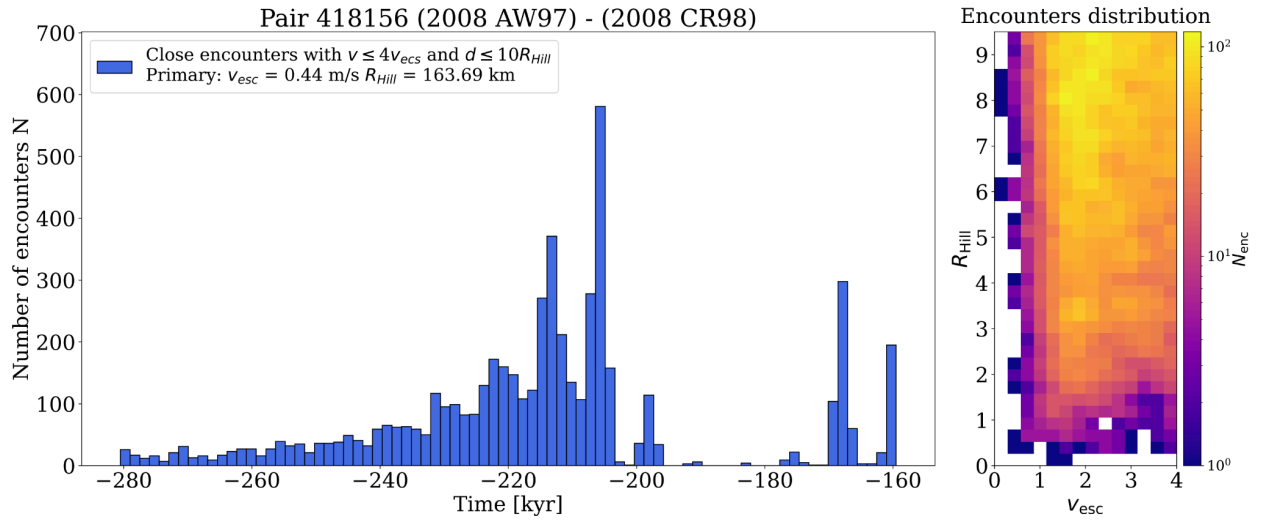


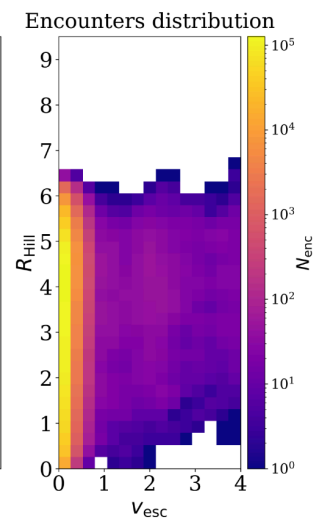
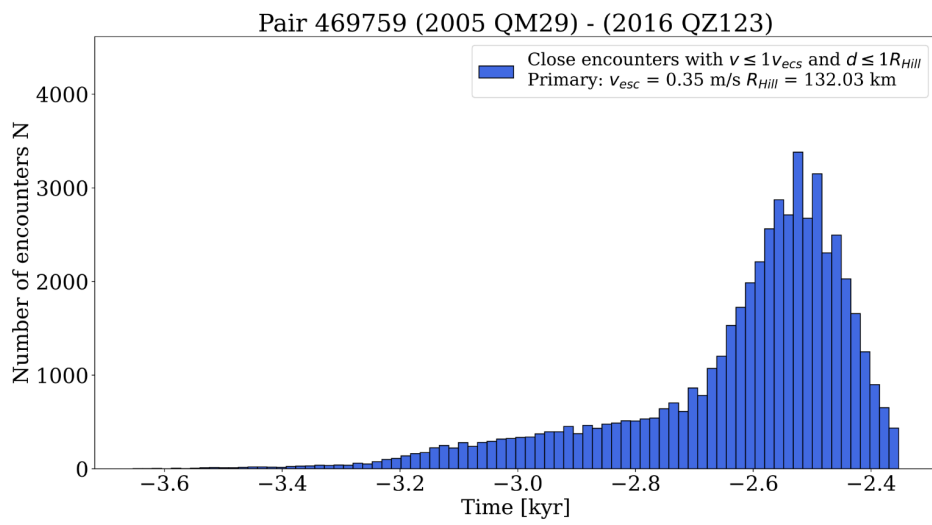
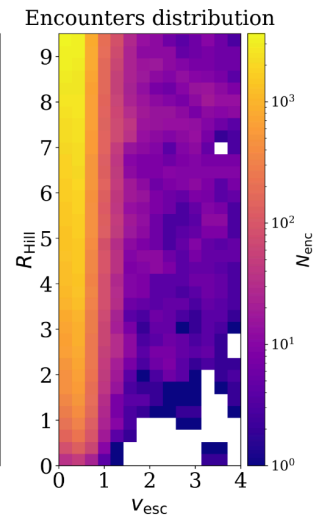
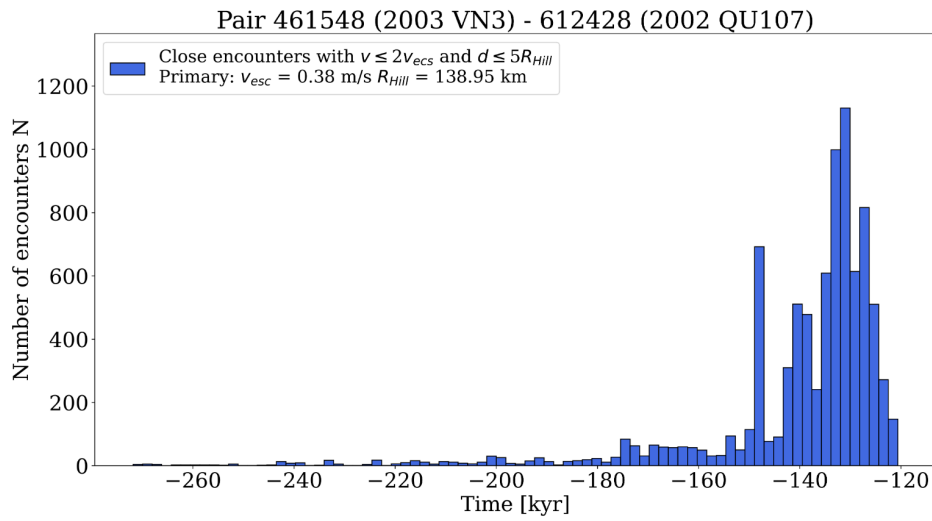


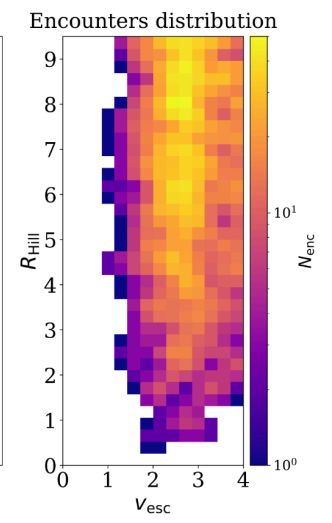
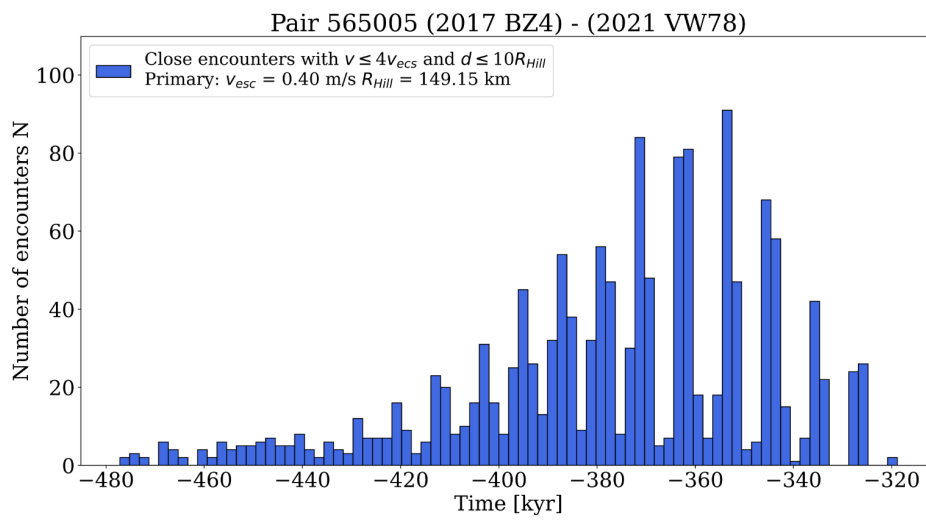
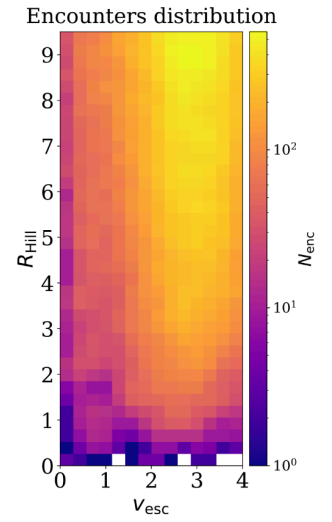
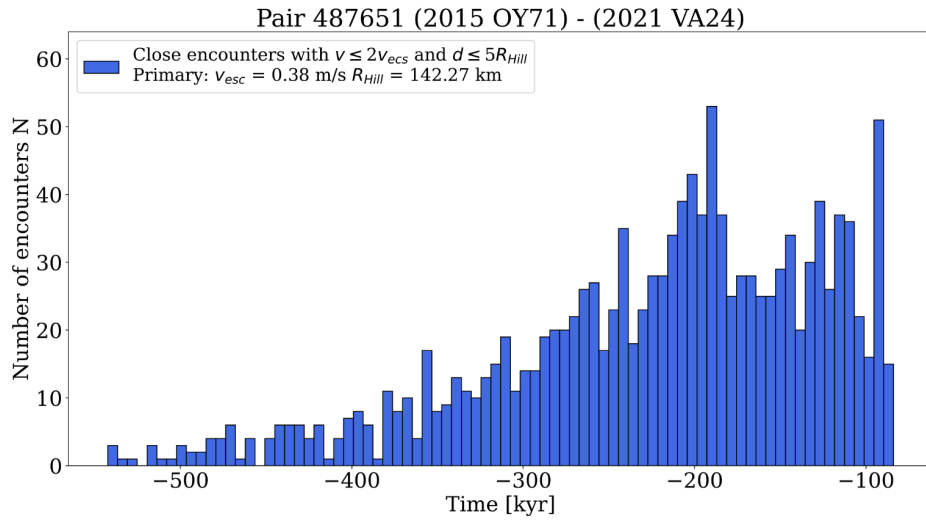












Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 17:11:57 12.05.2025

Назва файлу з підписом: Дисертаційна робота Кириленко 12.05.pdf.p7s  
Розмір файлу з підписом: 17.2 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Дисертаційна робота Кириленко 12.05.pdf  
Розмір файлу без підпису: 24.0 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: КИРИЛЕНКО ІГОР ІГОРОВИЧ

П.І.Б.: КИРИЛЕНКО ІГОР ІГОРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 3451404691

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 17:11:57 12.05.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000754C180125324D06

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в окремих файлах (CAAdES detached)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00