

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 методiku 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 ν_6 із Сатурном (89%) або резонанс за середнім рухом 3:1 з Юпітером (10%).
5. Вперше визначено форму, густину і параметри обертання потенційно небезпечного контактно-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. 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 ν_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