

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Кириленка Ігоря Ігоровича

“Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи”

яка подається на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 Природничі науки

за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи

Аспірант Кириленко Ігор Ігорович виконав у повному обсязі Індивідуальний план Освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Аспірант успішно склав сім заліків та один екзамен з наступних дисциплін:

Заліки:

1. «Філософські засади та методологія досліджень» - 91 бал;
2. «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» - 100 балів;
3. «Планування, організація і проведення наукових досліджень» - 94 бали;
4. «Історія та методологія фізики та астрономії» - 95 балів;
5. «Методологія застосування сучасних інформаційних технологій для автоматизації наукових та навчальних експериментів» - 95 балів;
6. «Вибрані розділи сучасної астрономії та астрофізики» - 98 балів;
7. «Вибрані розділи сучасної оптики та лазерної фізики» - 96 балів;

Екзамен:

8. «Іноземна мова для аспірантів» (англійська мова) - 100 балів;

Всі заплановані види робіт було виконано своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. 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.

Метою дисертації є моделювання динамічної еволюції вибраних груп малих тіл Сонячної системи. Дослідження спрямовані на вивчення та моделювання малих тіл у майбутнє та у 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:

1. Пошук астероїдних пар методом їх моделювання в минуле під дією як гравітаційних збурень, так і під дією негравітаційних сил.
2. Пошук батьківських тіл окремих метеоритів за допомогою чисельних моделювань.
3. 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.

3. 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);

4. Особистий внесок дисертанта в отримання наукових результатів та їх новизна полягає в наступному:

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 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 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.

5. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації Кириленка І.І. забезпечена коректним застосуванням сучасних методів аналізу та розрахунку орбітальної еволюції малих тіл Сонячної системи, методів математичної статистики, а також ретельним співставленням одержаних результатів із широким колом першоджерел наукової літератури. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у наукових журналах індексованих наукометричною базою Scopus (Q1) та доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та 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.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Результати дисертації опубліковані у 3 наукових працях, усі у закордонних періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародної бази Scopus та 8 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. **Kyrylenko I.**, Krugly Yu. N., Golubov O. Asteroid pairs: method validation and new candidates. *Astronomy & Astrophysics*. 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

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. *The Astrophysical Journal*. 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. *Astronomy & Astrophysics*. 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

8. Апробації матеріалів дисертації

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

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. Abastract 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., Mikhalechenko O. A contemporary view on M-type asteroids. *XXXII IAU General Assembly 2024. Abastract 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

9. Дотримання академічної доброчесності.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатний інтернет системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертація виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

10. Оцінка мови та стилю дисертації

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступний для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійснення автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам відповідно постанови Кабінету Міністрів України “Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії” (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2017 р. №40 “Про затвердження вимог до оформлення дисертації” (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 року № 759).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича “Чисельне

модельовання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи” відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія. Здобувачем повністю виконана освітня та наукова складові освітньо-наукового рівня вищої освіти.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувач представив основні результати досліджень своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри астрономії та космічної інформатики Фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (Протокол № від 8 травня 2025 року) у форму презентації та наукової дискусії після її завершення. Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів, а також їх наукове та практичне значення, на розширеному засіданні кафедри було одностайно ухвалено рішення про рекомендацію дисертації Кириленко І.І. на тему “Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи” до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

В.о. завідувача кафедри
астрономії та космічної інформатики
фізичного факультету
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна
Доктор фізико-математичних наук,
професор

Юрій ШКУРАТОВ