

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
професору Петру ФЕДОРОВУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

ВІДГУК

офіційного опонента, доцента кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктора фізико-математичних наук Козак Людмили Володимирівни на дисертаційну роботу Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

1. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Дисертаційна робота Ігоря Ігоровича Кириленка присвячена важливому й актуальному напрямку сучасної астрономії – чисельному моделюванню динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи. Обрана тематика цілком обґрунтована як з наукової, так і з прикладної точки зору, оскільки вивчення астероїдів, метеороїдів і потенційно небезпечних об'єктів є одним із ключових напрямів світових досліджень у сфері планетології, динаміки Сонячної системи та космічної безпеки.

Формування та еволюція малих тіл безпосередньо пов'язані з фундаментальними питаннями походження Сонячної системи, розподілу маси в її ранні епохи та фізичних процесів, що впливали на трансформацію протопланетного диску. Крім того, малі тіла є носіями первинної речовини, з якої формувалися планети, тому їх динаміка становить інтерес як з точки зору теоретичної астрофізики, так і космохімії.

Тематика також має високий прикладний потенціал. Чисельне моделювання руху малих тіл дозволяє оцінювати ймовірність їхніх зіткнень із Землею, прогнозувати траєкторії потенційно небезпечних астероїдів, розробляти сценарії

їх відхилення. Це надзвичайно важливо для планування космічних місій дослідницького або оборонного характеру, таких як NASA DART або майбутні проєкти ESA. Також тема дотична до визначення джерел метеоритів, що потрапляють на Землю, і розробки систем раннього попередження про падіння фрагментів малих тіл.

Важливо, що дослідження виконується із застосуванням сучасних обчислювальних методів, які дозволяють проводити довготривалі чисельні інтегрування орбіт і враховувати широкий спектр впливів (у тому числі негравітаційних). Таким чином, робота перебуває на стику фундаментальних знань і технологічного інструментарію нового покоління.

Отже, вибір теми дисертаційної роботи є цілком виправданим. Вона відповідає сучасному стану науки, національним пріоритетам розвитку астрономії та забезпечує наукову й практичну значущість отриманих результатів.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертація Ігоря Ігоровича Кириленка «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» є завершеним науковим дослідженням, у якому розв'язано низку актуальних задач, пов'язаних з вивченням динаміки малих тіл за допомогою сучасних чисельних методів. Робота охоплює широкий спектр проблем, зокрема формування астероїдних пар, визначення джерел метеороїдів, дослідження потенційно небезпечних об'єктів та моделювання сценаріїв їхнього відхилення.

Структура дисертації включає вступ, чотири змістовних розділи, висновки, два додатки та список використаних джерел (163 найменування). Основний текст займає 134 сторінки з 183, і супроводжується 56 рисунками та 16 таблицями, що полегшує сприйняття результатів. Робота оформлена відповідно до вимог МОН України; мова викладу науково виважена, стиль – чіткий і послідовний.

Розділ 1. Містить аналітичний огляд літератури щодо динаміки малих тіл Сонячної системи. Розглянуто фізичні характеристики астероїдів, класифікацію популяцій, гравітаційні та негравітаційні чинники, що впливають на їхню еволюцію. Особливу увагу приділено методам дослідження астероїдних пар і джерел метеороїдів. Визначено підходи до виявлення споріднених об'єктів, описано методи оцінки їхнього віку та сценарії утворення.

Розділ 2. Присвячений власним результатам пошуку нових астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу. Докладно описано методологію: від

попереднього відбору об'єктів за орбітальними елементами до чисельного моделювання з урахуванням похибок. Представлено 50 раніше невідомих пар, досліджено їхню динаміку, взаємодію та фізичні властивості. Виявлено новий астероїдний кластер і проаналізовано його характеристики.

Розділ 3. Присвячено реконструкції орбіт метеороїдів та пошуку їхніх джерел. На прикладах метеорита Адален (2020) і київського боліда (2023) проаналізовано траєкторії тіл за спостереженнями, змодельовано їхній рух у зворотному часі для ідентифікації потенційних батьківських об'єктів. Застосовано критерії орбітальної подібності та параметр Тіссерана. Проведено статистичну оцінку ймовірності походження з Головного поясу.

Розділ 4. Охоплює дослідження динаміки потенційно небезпечних астероїдів. Зокрема, для об'єкта (153201) 2000 WO107 визначено фізичні параметри (форма, густина, обертання) та змодельовано його орбітальну еволюцію з урахуванням ефекту Ярковського. Для парних астероїдів (3200) Phaethon і 2005 UD підтверджено спорідненість орбіт. Крім того, виконано моделювання ефективного сценарію відхилення астероїда в разі загрози зіткнення із Землею.

Висновки. Підсумовують ключові результати, які мають наукову новизну, обґрунтовані чисельно та підтверджені аналізом спостережних даних.

Робота продемонструвала глибоке опанування теми, володіння сучасними методами дослідження та високу публікаційну активність.

Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

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. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендації, сформульованих у дисертації.

На основі аналізу змісту дисертації та наукових публікацій здобувача можна стверджувати, що всі представлені результати є обґрунтованими, достовірними й повною мірою відповідають поставленим у роботі меті та завданням. Робота характеризується чіткою структурою, логічною послідовністю викладу та аргументованістю наукових положень.

У дослідженні використано сучасні чисельні методи моделювання динаміки малих тіл, зокрема програмні інструменти REBOUND і GENGA, що забезпечили високу точність обчислень. Отримані результати підтверджено аналізом спостережних даних та зіставленням із відомими теоретичними й емпіричними моделями. Обґрунтованість методик побудови орбіт, оцінки віку астероїдних пар і визначення джерел метеороїдів відповідає сучасному рівню наукових досліджень у цій галузі.

Матеріал викладено послідовно й доступно, висновки супроводжуються аналітичними поясненнями та логічно впливають із наведених даних. Практичні рекомендації є логічним продовженням дослідження, повністю узгоджуються з його результатами та спрямовані на їх подальше прикладне використання. Усе це свідчить про високий рівень наукової підготовки здобувача та глибоке розуміння предмета дослідження.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

У дисертації Кириленка І.І. отримано низку важливих наукових результатів, які мають як фундаментальне, так і прикладне значення. До найсуттєвіших здобутків дослідження належать:

1. *Виявлення 50 нових астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу.* Проведено оцінку їхнього віку (від 2 тис. до 1 млн років), а також продемонстровано доцільність врахування взаємного гравітаційного впливу між компонентами в аналізі молодих пар.
2. *Відкриття нового астероїдного кластера,* що складається з восьми об'єктів із віком формування 70–100 тис. років, що є одним із наймолодших відомих утворень такого типу.
3. *Реконструкція орбіти залізного метеорита Адален,* падіння якого було інструментально зафіксовано у 2020 р. Визначено його динамічне походження з Головного поясу через резонансні механізми з Сатурном або Юпітером.
4. *Комплексне дослідження потенційно небезпечного астероїда (153201) 2000 WO107:* вперше визначено його форму, густину та параметри обертання. Показано, що, незважаючи на високу ексцентричність орбіти, загрози для Землі він не становить у найближчі 10 тис. років.
5. *Підтверджено еволюційний зв'язок між астероїдами (3200) Phaethon і 2005 UD* на основі моделювання їхньої орбітальної еволюції, що може мати значення для пояснення походження метеорного потоку Гемініди.
6. *Розроблено модель відхилення небезпечного астероїда:* чисельні експерименти дозволили визначити оптимальні параметри збурення орбіти в залежності від часу до прогнозованого зіткнення.

За результатами дослідження опубліковано 11 наукових праць, з яких 3 – у міжнародних фахових виданнях, індексованих у Scopus та Web of Science, та 8 – у матеріалах конференцій. Це свідчить про достатню апробацію результатів та їхню відповідність вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

6. Практичне значення отриманих результатів.

Результати динамічного аналізу, отримані в дисертаційній роботі, мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Вони можуть бути використані для поглиблення наукових уявлень про механізми формування та еволюцію популяцій малих тіл Сонячної системи, зокрема астероїдних пар, кластерів і метеороїдів.

У прикладному аспекті здобуті результати є цінними для: оцінки ризиків зіткнення Землі з потенційно небезпечними астероїдами та прогнозування їхньої орбітальної еволюції; планування міжпланетних космічних місій, орієнтованих на вивчення малих тіл, вибір цільових об'єктів та моделювання траєкторій зближення; розвитку теоретичних моделей динаміки малих тіл, зокрема з урахуванням впливу гравітаційних та негравітаційних сил; поповнення міжнародних баз даних (як-от MPC, JPL SBDB) новими та уточненими орбітальними параметрами об'єктів.

Таким чином, результати дослідження можуть бути використані як у подальших наукових дослідженнях, так і в практичній діяльності аерокосмічних агентств, зокрема щодо запобігання астероїдній небезпеці.

7. Дотримання академічної доброчесності

Дисертаційна робота Ігоря Ігоровича Кириленка відповідає принципам академічної доброчесності згідно з вимогами законодавства України, а саме Законів «Про освіту», «Про вищу освіту» та Кодексу академічної доброчесності.

У дисертації не виявлено фактів плагиату. Автор самостійно здійснив усі ключові етапи дослідження – від постановки наукових задач до чисельного моделювання, обробки результатів та їх інтерпретації. Використання чужих наукових ідей, методик та формулювань здійснюється з належними бібліографічними посиланнями, що свідчить про коректність цитування та дотримання етичних норм.

Особистий внесок здобувача чітко визначено в дисертації. Незважаючи на наявність публікацій у співавторстві з науковим керівником та іншими дослідниками, аналіз змісту цих праць вказує на провідну роль Кириленка І.І. у досягненні основних результатів.

Дослідження не містить ознак фальсифікації або штучного конструювання даних. Усі чисельні експерименти супроводжуються детальним описом

параметрів моделювання, а отримані результати узгоджуються з незалежними джерелами та базами даних. Це свідчить про належну якість виконаної наукової роботи.

Основні положення дисертації пройшли апробацію на авторитетних міжнародних конференціях та опубліковані в рецензованих фахових виданнях, у тому числі в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science. Це підтверджує відкритість та публічність наукової діяльності здобувача.

На підставі аналізу тексту дисертації, наукових публікацій автора, результатів перевірки на плагіат (виконано через систему Strikeplagiarism.com), можна зробити висновок, що дисертаційна робота виконана самостійно, без порушення академічної доброчесності та повною мірою відповідає чинним вимогам до наукових кваліфікаційних робіт.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

Дисертаційна робота вирізняється високим науковим рівнем виконання, але, звичайно є окремі зауваження, які мають рекомендаційний характер і не знижують загальної позитивної оцінки дослідження. Вони стосуються переважно можливостей для подальшого вдосконалення й розширення результатів:

- У низці випадків, зокрема при інтерпретації походження метеороїдів або встановленні спорідненості між астероїдами, автор подає логічно обґрунтовані гіпотези, разом із тим, розгляд декількох альтернативних сценаріїв міг би додатково підсилити аргументацію.
- Було б доцільно приділити більше уваги аналізу чутливості результатів до варіацій початкових умов та ключових параметрів моделей – зокрема, в розділах, де розглядаються ефекти Ярковського, реконструкція орбіт метеороїдів або динаміка парних астероїдів.
- У розділі, присвяченому моделюванню сценаріїв відхилення небезпечних об'єктів, доцільно було б розглянути приклади для кількох типових астероїдів із різними фізичними параметрами (розмір, густина, форма). Це дозволило б узагальнити результати й зробити їх більш придатними для практичного застосування.
- Автор застосовує сучасні інструменти чисельного моделювання, однак у роботі варто окремо зазначити потенційні обмеження застосованих підходів

(наприклад, урахування негравітаційних ефектів чи похибок спостережень) для кращого розуміння надійності висновків.

Ці зауваження не є критичними, не стосуються змістовного ядра дисертації та не знижують її наукової чи практичної цінності. Навпаки – вони вказують на потенційні напрями подальших досліджень, які логічно випливають із виконаної роботи.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

За актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Кириленко Ігор Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук,

доцент кафедри

астрономії та фізики космосу

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка

Людмила КОЗАК

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 11:49:39 23.07.2025

Назва файлу з підписом: Vidguk_KozakLV_23_07_2025.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 536.2 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Vidguk_KozakLV_23_07_2025.pdf
Розмір файлу без підпису: 547.5 КБ

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

Підписувач: КОЗАК ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА
П.І.Б.: КОЗАК ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА
Країна: Україна
РНОКПП: 2805018284
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 11:49:36 23.07.2025
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F040000008AEA4101B8A38006
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
професору Петру ФЕДОРОВУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Відгук

офіційного опонента, доцента кафедри математичного аналізу Одеського національного університету імені І.І. Мечникова, кандидата фізико-математичних наук Базєя Олександра Анатолійовича на дисертаційну роботу Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

1. 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 складною сукупністю впливів: гравітаційною дією з боку планет, ефектами орбітальних резонансів, а також низкою негравітаційних чинників, зокрема ефектом Ярковського, ЯОРП-ефектом і процесами втрати маси внаслідок активності.

Чисельні моделювання є ключовим інструментом у дослідженні орбітальної динаміки малих тіл, зокрема для аналізу їхньої довготривалої еволюції. Методи чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху, що враховують гравітаційний вплив Сонця, планет, а також додаткові збурення, дають змогу описувати поведінку системи з урахуванням її складної й нелінійної природи. З огляду на високу чутливість таких систем до початкових умов і неможливість отримання аналітичних розв'язків у більшості випадків, чисельне моделювання забезпечує ефективні засоби для прогнозування динаміки та виявлення особливостей еволюції малих тіл

Дослідження динаміки малих тіл має фундаментальне та прикладне значення. З одного боку, воно сприяє розумінню процесів формування та довготривалої еволюції Сонячної системи. З іншого є критично важливим для оцінки потенційних загроз зіткнення Землі з небезпечними об'єктами. Крім

того, точне моделювання орбіт є необхідною умовою для підготовки міжпланетних місій, спрямованих на вивчення таких тіл.

Отже, тема запропонованих досліджень динаміки малих тіл за допомогою чисельних методів є не лише ключовим інструментом для теоретичних досліджень, але й важливою актуальною складовою прикладних задач астрономії та планетології.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертація Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішений комплекс задач, пов'язаних з дослідженням динамічної еволюції малих тіл у Сонячній системі за допомогою чисельних методів. 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.

У першому розділі дисертаційної роботи представлено огляд сучасного стану досліджень у галузі динаміки малих тіл Сонячної системи. Розглянуто основні популяції астероїдів, їхні фізичні характеристики, а також гравітаційні та негравітаційні чинники, що впливають на їхній рух. Значну увагу приділено аналізу методів виявлення зв'язків між малими тілами, зокрема, пошуку астероїдних пар і кластерів, оцінці їхнього віку та механізмів формування, а також методам встановлення асоціацій між метеороїдами та можливими батьківськими тілами.

Другий розділ присвячено результатам самостійного пошуку нових астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу. Використано комплексну методику, яка включає відбір кандидатів за орбітальними параметрами, статистичне обґрунтування їхньої значущості та чисельне інтегрування орбіт з урахуванням похибок. У результаті виявлено 50 нових пар і проаналізовано їхні динамічні та фізичні характеристики. На прикладі наймолодшої пари показано вплив врахування гравітаційної взаємодії між компонентами та її орбітальну еволюцію. Також у цьому розділі охарактеризовано новий астероїдний кластер.

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. Такий підхід застосовано до двох об'єктів: метеорита Адален (2020) та боліда, що спостерігався над Києвом у 2023 році. Наведено статистичні оцінки ймовірного походження та виконано порівняння з відомими популяціями навколоземних астероїдів і метеороїдів.

Четвертий розділ присвячено аналізу динамічної еволюції окремих малих тіл. Для потенційно небезпечного астероїда (153201) 2000 WO₁₀₇ розраховано ймовірності зближень із Землею та іншими планетами, з урахуванням параметрів, отриманих із фотометричних спостережень. Також досліджено динамічний зв'язок між навколоземними астероїдами (3200) Phaethon та 2005 UD, що свідчить про їхню спільну еволюцію. Окрім того, у рамках моделювання розглянуто задачу відхилення небезпечного астероїда, визначено оптимальні параметри збурення в залежності від часу до потенційного зіткнення.

У Висновках наведено основні наукові результати, отримані в процесі виконання дисертаційного дослідження. Сформульовані положення є логічним узагальненням проведеної роботи та підтверджують досягнення поставленої мети. Список використаних джерел є репрезентативним і свідчить про ознайомлення автора як із сучасними науковими публікаціями, так і з класичними працями у сфері дослідження.

Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

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. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Детальне ознайомлення з текстом наукового дослідження і публікаціями Кириленка І.І. дозволяє стверджувати, що підхід дисертанта до аналізу предмета дослідження є фундаментальним й ґрунтовним. Дисертація має логічну структуру, яка дозволяє розкрити поставлені дослідницькі завдання та досягти поставленої мети. Дисертаційна робота чітку структуру, послідовність та аргументованість положень дисертації.

У роботі застосовано сучасні методи аналізу та чисельного моделювання, що відповідають актуальним науковим підходам у галузі астрономії. Отримані результати оброблено й інтерпретовано належним чином, а їх змістовний аналіз узагальнено у висновках, які чітко обґрунтовані та логічно впливають із основного змісту роботи. Все це свідчить про глибокі фахові знання стосовно питань, що досліджувались у дисертаційній роботі.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

Дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича на тему «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» є завершеною самостійною науковою роботою, у межах якої розв'язано комплекс актуальних задач, пов'язаних із аналізом орбітальної еволюції малих тіл у Сонячній системі. Дослідження виконано на високому науковому рівні із застосуванням сучасних методів чисельного моделювання, що дало змогу отримати низку нових результатів, які мають як теоретичне, так і прикладне значення.

Основні положення дисертації викладено в 11 наукових публікаціях, серед яких 3 статті опубліковано у міжнародних рецензованих виданнях, що індексуються у базах даних Scopus та Web of Science, а також 8 тез доповідей у матеріалах наукових конференцій.

У рамках проведеного дослідження було отримано наступні наукові результати:

1. Проведено комплексне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів з метою пошуку нових астероїдних пар із фазовою швидкістю між компонентами не більше 25 м/с. У результаті аналізу виявлено 50 раніше невідомих астероїдних пар, а їх вік оцінено в діапазоні від 2 тисяч до 1 мільйона років. Ідентифіковано одну з наймолодших на сьогодні астероїдних пар, на прикладі якої показано врахування взаємного гравітаційного впливу компонентів для більш точного моделювання динаміки молодих пар із тісними зближеннями.
2. Виявлено новий астероїдний кластер у внутрішній частині Головного поясу, що складається з восьми тіл. Оцінка віку його формування становить близько 70–100 тисяч років.
3. 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 ймовірні механізми доставки метеороїда з внутрішньої частини Головного поясу до навколоземного простору - через резонанс ν_6 із Сатурном (ймовірність 89%) або резонанс 3:1 з Юпітером (ймовірність 10%).
4. За результатами фотометричних та радарних спостережень в опозицію 2020 року вперше визначено форму, щільність і параметри обертання потенційно небезпечного, контактено-подвійного астероїда (153201) 2000 WO107. Показано, що попри високоексцентричну орбіту й активні гравітаційні взаємодії з планетами земної групи, цей об'єкт не становить загрози для Землі в найближчі 10 тисяч років.
5. За результатами чисельних моделювань підтверджено спорідненість орбіт навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та 2005 UD, що вказує на можливий еволюційний зв'язок між цими астероїдами.
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.

6. Дотримання академічної доброчесності

У результаті детального вивчення тексту дисертаційної роботи, проаналізованих наукових публікацій здобувача, а також на підставі Протоколу перевірки на наявність текстових запозичень, виконаної з використанням

антиплагіатної інтернет-системи Strikeplagiarism.com, встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату. Використані джерела належним чином оформлені відповідно до академічних стандартів цитування та посилань. Таким чином, дисертація Кириленка Ігоря Ігоровича не містить ознак плагіату, а її зміст відповідає чинним вимогам академічної доброчесності.

7. Практичне значення отриманих результатів.

Результати динамічного аналізу малих тіл, представлені в дисертаційній роботі, можуть бути використані для уточнення уявлень щодо механізмів формування та еволюції популяцій малих тіл Сонячної системи. Отримані наукові дані також мають важливе прикладне значення, зокрема, для оцінки потенційних ризиків зіткнення Землі з небезпечними навколоземними об'єктами, а також для планування міжпланетних космічних місій, спрямованих на дослідження малих тіл.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

Дисертацію написана науковою мовою, містить незначну кількість граматичних помилок і неточностей, на деякі з них варто вказати:

1. Всі підписи на рисунках повинні бути виконані однією мовою. Автор не завжди дотримується цього правила. Так на рис. 2.9 на стор. 89 розмірність величин вказано як українською так і англійською.

2. На стор. 105 йдеться про визначення найбільш вірогідної орбіти метеороїда та «оцінку похибок орбіти». Насправді мабуть були оцінені похибки елементів орбіти. Це підтверджують дані таблиці 3.2.

3. На стор. 119 у заголовку Таблиці 3.5 використаний нестандартний формат моменту часу «2023-04-19T18:57:20.00».

4. На стор. 149 у першому реченні другого абзацу потрібно читати «...найбільш повний пошук астероїдних пар...»

При ознайомленні із роботою виникло одне зауваження, яке пропонується обговорити в рамках наукової дискусії.

Автор виконав чисельне моделювання еволюції астероїдних пар. Модель включала всі великі планети Сонячної системи та три наймасивніші тіла в Головному поясі астероїдів. Планети з супутниками представлені їхніми барицентридами. Однак при моделюванні зближення астероїдної пари з системою Земля-Місяць такий підхід, на мою думку, веде до втрати точності отриманих

результатів. Маса найбільшого члена Головного поясу астероїдів, Церери, лише трохи перевищує 0,01 маси Місяця. Вважаю доречним у чисельній моделі розглядати вплив Землі та Місяця на астероїдну пару окремо. Принаймні під час зближень з ними.

Ці зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, не применшують її наукової і практичної цінності.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

З огляду на актуальність і новизну отриманих результатів, їх науковий рівень, обсяг, достовірність та обґрунтованість, а також з урахуванням наукового і прикладного значення виконаної роботи та відповідності вимогам до її оформлення, дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича на тему «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія», відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».. У зв'язку з вищезазначеним, вважаю, що Кириленко Ігор Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

Кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри математичного
аналізу Одеського національного
університету імені І.І. Мечникова

Олександр БАЗЄЙ

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 08:09:50 25.07.2025

Назва файлу з підписом: Відгук БАЗЕЙ.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 382.1 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Відгук БАЗЕЙ.pdf
Розмір файлу без підпису: 385.4 КБ

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

Підписувач: Базей Олександр Анатолійович
П.І.Б.: Базей Олександр Анатолійович
Країна: Україна
РНОКПП: 2438302134
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 08:09:44 25.07.2025
Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг
Серійний номер: 382367105294AF9704000000562C1900C7223C04
Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Кваліфікований
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAdES-X Long)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна
професору Петру ФЕДОРОВУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента, кандидата фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, виконуючого обов'язки директора Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Кайдаша Вадима Григоровича на дисертаційну роботу **Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи»** подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

1. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Дисертаційна праця Кириленка І.І. присвячена дослідженню динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи. Складна взаємодія гравітаційних сил, а також негравітаційних впливів, і чутливість до початкових умов обумовлюють вибір автором чисельного моделювання як основного методу дослідження динаміки таких тіл.

Методи чисельного інтегрування дозволяють точно розраховувати орбіти і передбачати довготривалу поведінку малих тіл, що неможливо зробити лише аналітичними підходами. Такі дослідження мають як фундаментальне значення — для розуміння формування та еволюції планетної системи, так і прикладне — для оцінки потенційної загрози зіткнень із Землею та планування міжпланетних місій.

З огляду на важливість фундаментальних та прикладних застосувань, вибір теми дисертаційного дослідження є обґрунтованим і сама тема є актуальною.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертація І.І. Кириленка є цілісним науковим дослідженням із чітко окресленими метою та завданнями, зрозумілими об'єктом, предметом та використаними методами. Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів представлені та обґрунтовані у тексті дослідження, що складається з 4 розділів, кожен з яких має підрозділи, містить загальні висновки та висновки до кожного підрозділу. Текст роботи залишає приємне враження як добре структурована робота, написана гарним науковим стилем на високому професійному рівні із дотриманням методології наукових досліджень. Наявні відповідні описи та посилання на методи, алгоритми, запозичення, які автор використовує у роботі, у той же час чітко окреслений особистий внесок автора у виконанні дослідження. Перелік використаної літератури включає 163 джерела, які відображають сучасний стан світових досліджень і високу обізнаність автора у вибраній галузі. Наявні додатки, а саме список публікацій здобувача за темою дисертації, та розподіл тісних зближень для 50 нових астероїдних пар, отриманих у роботі. Надані графічні матеріали та формули використаних рівнянь повною мірою ілюструють використані методи та отримані результати. Викладення матеріалу в тексті роботи є цілком логічним та відповідає структурі дослідження. Висновки дисертаційної роботи чітко та логічно пов'язані із метою, завданнями, та використаними методами та відповідають на поставлені завдання.

Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота Кириленка І.І. виконана в НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та є складовою

частиною декількох науково-дослідних робіт, фінансованих з коштів державного бюджету за результатами конкурсу Міністерства освіти та науки України:

– «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. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові положення дисертаційної роботи обґрунтовані їх ретельним порівнянням із доробком провідних наукових груп, вивченням існуючих матеріалів і методів досліджень динаміки та еволюції малих тіл Сонячної системи. Запропоновані автором нові методи (зокрема, для пошуку астероїдних пар, пошуку кандидатів у батьківське тіло метеороїдів) пройшли перевірку на статистичну достовірність та порівняння із існуючими методами. Висновки автора про деталі змодельованих еволюційних треків астероїдів під впливом гравітаційних та негравітаційних ефектів перевірені порівнянням із часовими масштабами таких ефектів і, відповідно, узгоджуються із фізичною природою впливу цих ефектів. Всі результати роботи знайшли своє відповідне відображення у публікаціях за участю автора. Таким чином, ознайомлення з текстом наукового дослідження і публікаціями І.І. Кириленка підтверджує фундаментальний та ґрунтовний підхід дисертанта до аналізу предмета дослідження, послідовність та аргументованість положень дисертації. Висновки дисертації логічно витікають із проведених досліджень у відповідності до поставлених дослідницьких завдань.

З методологічної точки зору основним засобом автора є чисельні методи розрахунку орбіт для дослідження орбітальної динаміки малих тіл Сонячної системи. У той же час автором застосований цілий ряд загальнонаукових та спеціальних підходів, зокрема порівняльний аналіз та статистичні методи. Порівняльний аналіз застосовано для аналізу існуючих баз спостережень, даних про спектральні особливості досліджуваних астероїдів, їх обертальні параметри, та фізичні властивості. Статистичні методи застосовані для обчислення похибок отриманих орбітальних параметрів, та оцінки достовірності отриманих результатів. Таким чином, можна стверджувати про високий рівень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

У роботі представлено низку унікальних наукових результатів, які мають важливе значення для досліджень у галузі планетної астрономії, зокрема динаміки астероїдів, метеорної небезпеки та формування малих тіл Сонячної системи. Зокрема, автором було вперше проведено систематичне дослідження внутрішньої частини Головного поясу астероїдів з метою виявлення раніше невідомих астероїдних пар із малою фазовою відстанню між компонентами. У результаті роботи ідентифіковано 50 нових пар, що значно розширює уявлення про поширеність таких систем. Для кожної пари було здійснено оцінку віку формування, який охоплює діапазон від 2 тисяч до 1 мільйона років, що дозволяє простежити еволюцію цих об'єктів у часі. Серед нововиявлених пар ідентифіковано одну з наймолодших систем, яка слугує прикладом для поглибленого аналізу динаміки. Вперше продемонстровано, що для молодих пар суттєвим чинником у моделюванні їхньої еволюції є взаємний гравітаційний вплив між компонентами, що раніше часто ігнорувалося. Це відкриває нові можливості для уточнення віку та походження подібних структур. У внутрішньому поясі виявлено новий кластер, який складається з 8 астероїдів із спільним походженням. Така знахідка є рідкісною і має значення для дослідження процесів фрагментації малих тіл. Уперше реконструйовано орбіту залізного метеорита, падіння якого було зафіксовано у 2020 році у Скандинавії. Проведено ретроспективний динамічний аналіз руху об'єкта протягом 1 мільйона років, що дало змогу визначити його походження з внутрішньої частини

Головного поясу. Показано, що його перенесення до навколоземного простору могло бути спричинене резонансом ν_6 із Сатурном (89% ймовірність) або резонансом 3:1 з Юпітером (10% ймовірність). Цей результат має важливе значення для розуміння шляхів міграції метеороїдів до Землі. Вперше проведено комплексну характеристику контактної-подвійної астероїда, який може містити значну кількість металу. Незважаючи на потенційно небезпечний статус, розрахунки автора показують, що він не становить загрози для Землі щонайменше протягом наступних 10 тисяч років. Розроблено модельний експеримент, у рамках якого визначено оптимальні параметри для змінення траєкторії потенційно небезпечного астероїда. Встановлено залежність необхідної величини збурення та напряду корекції орбіти від часу, що залишився до можливого зіткнення з Землею. Ці результати можуть мати прикладне значення для планування майбутніх місій із планетарного захисту.

6. Дотримання академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, рецензованих наукових праць здобувача, апробації результатів дисертації, та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

7. Практичне значення отриманих результатів.

Результати дослідження динаміки астероїдів мають важливе прикладне значення в кількох напрямках. Вони сприяють кращому розумінню будови та еволюції малих тіл Сонячної системи, а також уточнюють механізми утворення астероїдних пар. Виявлені нові пари вже внесені до міжнародних наукових баз даних, що підвищує достовірність глобальних моделей астероїдної популяції.

Моделювання орбітальної динаміки дозволяє точніше оцінити потенційну небезпеку від окремих астероїдів, що є суттєвим для систем раннього попередження про загрозу зіткнення із Землею. Одержані результати також можуть бути використані при плануванні космічних місій — як наукових, так і комерційних — для дослідження астероїдів і видобутку з них корисних копалин,

зокрема металів (заліза, нікелю, платини тощо).

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

1. В анотації при описі третього розділу дисертації автор зазначає, що його підхід використано для двох метеороїдів: батьківського тіла метеорита Адален (07.11.2020) та тіла, що спричинило так званий київський болід (19.04.2023). У той же час назвою розділу є “ПОШУК ДЖЕРЕЛ ПОХОДЖЕННЯ МЕТЕОРИТА АДАЛЕН”. Можливо необхідно було б згадати київський болід також у назві розділу.

2. Автор пропонує поділити отримані розподіли за часом тісних зближень між компонентами пар на три класи (стор. 83) і надає відповідні описи (добре виражений пік, декілька еквівалентних піків, суцільний розподіл або розподіл із дуже довгими хвостами, зокрема, немонотонна «парканоподібна структура»), але не наводить посилання на графічні розподіли для відповідних класів. Бажано було б навести посилання на відповідні графіки з додатку Б.

3. Автор пропонує виділити М-тип як підклас астероїдів Х-типу з помірним альбедо ($0.1 \leq pV \leq 0.3$) для пошуку пар серед астероїдів М-типу (стор. 92). На чому ґрунтується таке виділення (бажано б було надати відповідні оцінки або посилання) ?

4. При обговоренні рис. 2.15, 2.16 (стор. 97-98) зазначається наявність зближень між більшістю астероїдів кластера. Про що може казати відсутність попарних зближень між деякими астероїдами кластера? Їх віддаленість від центру мас кластера, мала маса, чи інші чинники?

5. На Рис. 3.4. вертикальна вісь зазначена як dT_E , але у поясненні в тексті (стор. 109) зазначається параметр Тіссерана найближчих астероїдів. Чи мається на увазі сам параметр або різниця у параметрі Тіссерана найближчих астероїдів?

6. На стор. 134 автор зазначає “Оскільки астероїд має малу перигелійну відстань $q \sim 0.2$ а.о., моделювання також враховували релятивістські поправки.” Чим обумовлений вибір саме цієї відстані для враховування впливу ефектів ЗТВ на орбіту? Чи враховувались автором ефекти ЗТВ для більших перигелійних відстаней?

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

Зміст дисертаційної роботи свідчить про те, що І.І. Кириленко здійснив самостійне й завершене наукове дослідження, у якому запропоновано власне вирішення поставлених наукових завдань. Авторські гіпотези, висновки та узагальнення обґрунтовані та підтверджені отриманими результатами.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» є завершеною самостійно виконаною науковою працею, а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія. Дисертація відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.). Дисертація оформлена згідно з вимогами Наказу МОН України від 12.01.2017 р. № 40 (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019 р.).

Офіційний рецензент:

Виконуючий обов'язки директора
Науково-дослідного інституту астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Вадим КАЙДАШ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 02:14:46 30.07.2025

Назва файлу з підписом: Рецензія_Кайдаш_ВГ_new.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 244.5 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Рецензія_Кайдаш_ВГ_new.pdf
Розмір файлу без підпису: 244.7 КБ

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

Підписувач: КАЙДАШ ВАДИМ ГРИГОРОВИЧ
П.І.Б.: КАЙДАШ ВАДИМ ГРИГОРОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 2621411573
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 02:14:46 30.07.2025
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000066A5B0132D33D06
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
професору Петру ФЕДОРОВУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Рецензія

офіційного рецензента, доцента кафедри астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук Ахметова Володимира Сабірджановича, на дисертаційну роботу Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

1. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Дисертаційна робота Ігоря Ігоровича Кириленка присвячена дослідженню динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи методами чисельного моделювання — одного з провідних напрямів сучасної астрономії. Обрана тематика вирізняється високим науковим значенням як у фундаментальному, так і в прикладному аспектах, оскільки дослідження астероїдів, метеороїдів і потенційно небезпечних об'єктів належить до пріоритетних завдань світової науки в контексті планетології, динаміки Сонячної системи та проблем космічної безпеки.

Процеси формування та еволюції малих тіл тісно пов'язані з ключовими питаннями походження Сонячної системи, зокрема з початковим розподілом маси, механізмами динамічного збурення та фізичними умовами, які визначали еволюцію протопланетного диска. Чисельне моделювання відіграє важливу роль у вивченні орбітальної динаміки таких об'єктів, особливо в контексті прогнозування їхньої довготривалої еволюції. Методи чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, що описують рух тіл під дією гравітаційного поля Сонця, планет і додаткових збурень, дають змогу враховувати складну та часто нелінійну природу динамічної системи.

Дослідження динаміки малих тіл є ключовим не лише для фундаментальної астрономії, а й для прикладних завдань, пов'язаних із плануванням космічних місій, оцінкою ризиків зіткнення з Землею та пошуком джерел метеоритів. У цьому контексті застосування чисельного моделювання для аналізу орбітальної еволюції є сучасним і надзвичайно ефективним інструментом. Обрана тема є науково значущою, своєчасною та повною мірою відповідає актуальним тенденціям розвитку динамічної астрономії.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» є завершеним науковим дослідженням, у якому комплексно розв'язано низку задач, пов'язаних з аналізом динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи з використанням чисельних методів.

Структура дисертації включає вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та два додатки. Загальний обсяг роботи становить 183 сторінки (8 авторських аркушів), з яких основний текст охоплює 134 сторінки (6 авторських аркушів). Дисертація містить 56 ілюстрацій і 16 таблиць. До списку літератури включено 163 джерела.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел. У ньому подано характеристику популяцій малих тіл Сонячної системи, їхніх фізичних властивостей, а також гравітаційних і негравітаційних ефектів, що впливають на їхню динамічну еволюцію. Розглянуто підходи до виявлення асоціацій між об'єктами, зокрема проаналізовано методику дослідження астероїдних пар: описано критерії відбору, методи оцінки віку та можливі механізми їхнього формування. Також висвітлено підходи до встановлення зв'язків між метеороїдами та потенційними батьківськими тілами.

Другий розділ присвячено результатам авторського пошуку нових астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу. Описано методику, що включає попередній відбір кандидатів за орбітальними елементами, статистичну перевірку значущості відібраних пар, а також чисельне інтегрування орбіт із урахуванням можливих похибок. У результаті виявлено 50 нових астероїдних пар, для яких охарактеризовано динамічні та фізичні параметри. Проаналізовано приклад впливу гравітаційної взаємодії на еволюцію окремої пари. Окрім того, виявлено та описано новий астероїдний кластер.

Третій розділ присвячено дослідженню походження окремих метеороїдів. Для цього автор використав інструментальні спостереження болідів та дані про траєкторії їхнього входу в атмосферу з метою визначення доатмосферних орбіт. Проведено чисельне моделювання орбітальної еволюції метеороїдів у минуле для виявлення можливих джерел їхнього походження та встановлення близьких зближень із планетами. Відбір імовірних батьківських тіл здійснено на основі критеріїв орбітальної близькості та параметра Тіссерана. Запропонований підхід застосовано до двох конкретних випадків: метеорита Адален (07.11.2020) та київського боліда (19.04.2023). Подано статистичні оцінки ймовірного джерела у Головному поясі астероїдів, а також порівняно реконструйовані орбіти з популяцією навколоземних астероїдів і відомими метеороїдами.

У четвертому розділі представлено дослідження динамічної еволюції окремих малих тіл Сонячної системи. Для потенційно небезпечного астероїда (153201) 2000 WO107 проаналізовано його орбітальну еволюцію та потенційну загрозу для Землі із застосуванням моделі ефекту Ярковського, параметри якої (зокрема форма та густина) були уточнені на основі аналізу кривих блиску. Проведено чисельне моделювання орбітальної еволюції навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та 2005 UD, результати якого підтверджують їхню динамічну спорідненість. Окрему увагу приділено задачі відхилення траєкторії потенційно небезпечного об'єкта: визначено оптимальний напрям впливу та мінімальне збурення, необхідне для уникнення зіткнення залежно від часу до можливої колізії.

У розділі «Висновки» узагальнено основні результати дослідження, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи. Обширний список використаних джерел свідчить про глибоке опрацювання як сучасної, так і класичної наукової літератури в обраній галузі.

Дисертація написана грамотною науковою мовою — зрозуміло, послідовно й водночас цікаво та яскраво. Невелика кількість орфографічних помилок не впливає на загальну якість викладу. Значна кількість ілюстрацій сприяє кращому засвоєнню матеріалу та глибшому розумінню викладеного змісту.

Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства

освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

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. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Детальний аналіз дисертаційної роботи та публікацій Кириленка І.І. засвідчує фундаментальність і глибину підходу автора до розв'язання обраної наукової проблематики. Дисертація відзначається чіткою логічною структурою, що забезпечує послідовне розкриття дослідницьких завдань і досягнення поставленої мети. Робота характеризується внутрішньою узгодженістю, логічністю викладу та аргументованістю основних положень.

У дослідженні застосовано сучасні наукові методи, зокрема програмні інструменти моделювання динаміки малих тіл — REBOUND і GENGA. Матеріал викладено у доступній формі, з належним рівнем наукової обґрунтованості висновків, що свідчить про високий рівень професійної підготовки здобувача та його глибоке розуміння досліджуваної тематики.

Сформульовані у роботі висновки є логічним підсумком проведеного дослідження, повною мірою відображають його зміст і надають обґрунтовані відповіді на поставлені в дисертації наукові питання.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

Дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича на тему «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у результаті якого отримано низку важливих наукових результатів, що були викладені у 11 наукових публікаціях, серед яких 3 статті опубліковано у рецензованих міжнародних виданнях, що індексуються у провідних наукометричних базах *Scopus* та *Web of Science*, а також 8 праць – у матеріалах наукових конференцій.

У рамках проведеного дослідження було отримано наступні наукові результати:

1. Проведено 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, вік формування яких оцінюється в межах від 2 тисяч до 1 мільйона років.
2. На прикладі наймолодшої із виявлених пар запропоновано й обґрунтовано враховувати взаємний гравітаційний вплив між компонентами пари для уточнення динамічної еволюції молодих астероїдних пар із тісними зближеннями.
3. Виявлено новий астероїдний кластер у внутрішній частині Головного поясу із віком утворення у 70 – 100 тис. років, до складу якого входять 8 астероїдів.
4. Реконструйовано орбітальну еволюцію першого залізного метеорита, падіння якого було інструментально зафіксовано в 2020 р. у Скандинавії. Проведено пошук можливих батьківських тіл протягом 1 млн років у минуле. Визначено, що метеороїд походить із внутрішньої частини Головного поясу, та найімовірніше потрапив до навколоземного простору через резонанс ν_6 із Сатурном (89%) або резонанс за середнім рухом 3:1 з Юпітером (10%).

5. Проведено дослідження потенційно небезпечного контактно-подвійного астероїда (153201) 2000 WO107, для якого було вперше визначено форму, густину і параметри обертання за даними фотометричних і радарних спостережень. Показано, що динамічна еволюція астероїда визначається його високоексцентричною орбітою і взаємодією з планетами земної групи, а з точки зору астероїдної небезпеки даний об'єкт не становить загрози для Землі в найближчі 10 тисяч років.
6. Підтверджено еволюційну спорідненість орбіт навколоземних астероїдів (3200) Phaethon та 2005 UD за результатами чисельних моделювань.
7. За допомогою модельного експерименту досліджено поведінку величини необхідного збурення та оптимального напрямку для відхилення орбіти небезпечного астероїда в залежності від часу до моменту зіткнення.

6. Дотримання академічної доброчесності

Із тексту дисертації Кириленка Ігоря Ігоровича, списку публікацій та апробації чітко видно, що автор самостійно виконав більшість етапів роботи: від моделювання до аналізу результатів. Особистий внесок здобувача є визначальним і повністю відповідає вимогам до написання наукових робіт. Можна зробити висновок, що дисертаційна робота виконана здобувачем самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

7. Практичне значення отриманих результатів.

Отримані в дисертаційній роботі результати динамічного аналізу малих тіл Сонячної системи мають істотне наукове значення для поглиблення уявлень про механізми їхнього формування та подальшої динамічної еволюції. Здобуті автором висновки становлять інтерес не лише з теоретичної точки зору, а й мають прикладне значення — зокрема, для оцінювання потенційних ризиків зіткнення Землі з небезпечними об'єктами, а також для підготовки та планування міжпланетних космічних місій, спрямованих на дослідження малих тіл.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

При ознайомленні із роботою виникли деякі питання, які пропонується обговорити в рамках наукової дискусії:

1. Основна частина дослідження пов'язана з використанням різних програмних пакетів для динамічного моделювання. У цьому контексті доцільно було б виконати аналіз точності чисельного інтегрування орбіт для застосованих методів. Зокрема, бажано було б побудувати графіки залежності відносної похибки повної енергії системи у випадку лише гравітаційної взаємодії при різних значеннях кроку інтегрування. Окрім того, корисним було б дослідити відносну похибку повного імпульсу, виконання віруального співвідношення та збереження параметра Тіссерана у задачі трьох тіл. Важливо також оцінити, як зазначені похибки впливають на точність визначення орбітальних параметрів пробних частинок.
2. Одним із методів оцінювання точності чисельного інтегрування є так званий тест оборотності у часі (time-reversibility test), коли проводиться інтегрування системи спочатку в прямому, а потім у зворотному напрямі. Різниця між початковими та фінальними координатами й швидкостями дозволяє отримати оцінки чисельних похибок та встановити нижню межу фазової відстані між траєкторіями. Ще одним джерелом похибок є точність початкових (ефемеридних) даних про положення й швидкості астероїдів, що, у свою чергу, накладає обмеження на інтервали достовірного моделювання. У цьому контексті важливо враховувати Ляпуновський час як характеристику хаотичності орбітальної еволюції. У дисертації не вказано, яким чином були визначені часові межі моделювання, зокрема, чи доцільно проводити інтегрування на інтервалі до 1 млн років у минуле для всіх розглянутих об'єктів з урахуванням зазначених джерел похибок.
3. З метою покращення розуміння впливу негравітаційних сил на результати динамічного моделювання орбіт астероїдів на довготривалих часових інтервалах доцільно було б виконати порівняльний аналіз результатів двох моделювань — з урахуванням ефекту Ярковського та без нього. Це дозволило б кількісно оцінити внесок ефекту Ярковського в зміну орбітальних параметрів залежно від тривалості моделювання.

4. У тексті дисертації зазначено, що в результаті проведених динамічних моделювань автор ідентифікував понад 90% (67 із 72) відомих астероїдних пар у внутрішній частині Головного поясу. Це є дуже добрим показником ефективності застосованого алгоритму пошуку пар. Водночас, не надано пояснень щодо причин, з яких решта п'яти відомих пар не були виявлені. Обговорення цього питання могло б надати додаткову інформацію про потенційні обмеження методики.
5. У дисертації використано програмний пакет GENGA, що працює з графічними процесорами (GPU), для моделювання орбітальної еволюції тіл. Проте не наведено обґрунтування обраної кількості пробних частинок з точки зору ефективного використання обчислювальних ресурсів GPU. Було б доцільно проаналізувати, чи забезпечується оптимальне співвідношення між кількістю частинок та обчислювальною потужністю, що використовується. Зокрема, постає питання, чи проводився аналіз продуктивності програмного коду та ефективності використання GPU з допомогою засобів на кшталт NVIDIA Nsight Systems. Такий аналіз дозволив би кількісно оцінити масштабованість обчислень і потенційні резерви оптимізації.

До менш істотних зауважень до оформлення дисертації належать наступні:

- Попри гарний загальний стиль тексту, він містить кілька орфографічних помилок та друкарських помилок: «0.04 год⁻¹ год» замість «0.04 год⁻¹» (с.69), «аргумента» замість «аргументу» (с.97), «перігелію» і «перігелійну» замість «перигелію» і «перигелійну»(с.106,118,140), «екцентриситету» замість «ексцентриситету» (с.123), «знерозміренні» замість «знерозмірені» (с.144), «зворотньо» замість «зворотно» (с.146), «фомування» замість «формування» (с.149).
- Іноді друкарські помилки суттєво ускладнюють розуміння викладеного матеріалу: 1. Сторінка 93 - “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.” присутня невідповідність, адже в таблиці 2.6 наведені дані по астероїдах з фазовою відстанню навіть до 153,7 м/с. Це може вводити в оману і потребує уточнення; 2. Сторінка 132 - ”Застосування методів оптимізації до даних виконується шляхом мінімізації суми $\chi^2_{phot} = k\chi^2_{rad} + \chi^2_{phot}$, де коефіцієнт k вводиться для урівнювання внеску неузгоджень.” При $k=0$ рівняння узгоджуються, що логічно суперечить задуму автора.

Імовірно, у формулі або описі допущена помилка, і необхідно уточнити правильний вираз.

Ці зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи, не применшують її наукової і практичної цінності.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

З огляду на актуальність і новизну отриманих результатів, їхній рівень, обсяг, достовірність та обґрунтованість, а також наукове й практичне значення і належне оформлення, дисертаційна робота Кириленка Ігоря Ігоровича «Чисельне моделювання динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Кириленко Ігор Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Рецензент,

Кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри астрономії
та космічної інформатики
фізичного факультету
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Володимир АХМЕТОВ

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 09:55:11 30.07.2025

Назва файлу з підписом: Рецензія дисертації Кириленка від Ахметова_signed_1.pdf.p7s
Розмір файлу з підписом: 223.7 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Рецензія дисертації Кириленка від Ахметова_signed_1.pdf
Розмір файлу без підпису: 206.4 КБ

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

Підписувач: АХМЕТОВ ВОЛОДИМИР САБІРДЖАНОВИЧ

П.І.Б.: АХМЕТОВ ВОЛОДИМИР САБІРДЖАНОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 3088409030

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 10:55:10 30.07.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F040000009A1C730119498506

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAAdES enveloped)

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

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00