

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

Кафедра фізики та астрономії

---

**Кваліфікаційна робота**

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**«Визначення орбіти тимчасового супутника Землі астероїду 2024 PT5»**

“Determining the orbit of the temporary Earth satellite of asteroid 2024 PT5 ”

Виконав: здобувач денної форми навчання  
спеціальність: 104- Фізика та астрономія

Освітня програма Фізика та астрономія

Карастан Микита Дмитрович

Керівник к.ф.-м.н., доц. Базей О.А. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент с.н.с. Кошкін М.І.

Рекомендовано до захисту:  
протокол засідання кафедри  
фізики та астрономії  
№ \_\_\_ від \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 20 \_\_\_\_ р.

Захищено на засіданні ЕК № \_\_\_\_\_  
протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 20 \_\_\_\_ р.

Оцінка \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
(за національною шкалою, шкалою ECTS, бали)

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ  
(підпис) (прізвище, ім'я)

Голова ЕК  
\_\_\_\_\_ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ  
(підпис)

Одеса 2025

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>1. МАЛІ ТІЛА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ – АСТЕРОЇДИ</b> .....	4
<b>1.1. Малі тіла</b> .....	4
<b>1.2. Астероїди</b> .....	6
<b>2. НАВКОЛОЗЕМНІ АСТЕРОЇДИ. ВІДКРИТТЯ АСТЕРОЇДА 2024 PT5</b> .....	8
<b>2.1. Навколоземні об’єкти</b> .....	8
<b>2.2. Вплив Сонця, Місяця та планет на рух навколоземних астероїдів</b> .....	10
<b>2.3. Вплив ефекту Ярковського на рух навколоземних астероїдів</b> ....	12
<b>2.4. Відкриття астероїду 2024 PT5</b> .....	13
<b>2.5. Тимчасові супутники землі</b> .....	15
<b>3. СИСТЕМА JPL HORIZONS</b> .....	18
<b>3.1. Історія створення системи Horizons</b> .....	18
<b>3.2. Функціональні можливості сервісу Horizons</b> .....	18
<b>3.3. Технічна основа</b> .....	20
<b>3.4. Наукова значущість і приклади використання</b> .....	21
<b>4. МЕТОДИ</b> .....	23
<b>4.1. Збір астрометричних даних і орбітальних елементів</b> .....	23
<b>4.2. Визначення моментів захоплення та відльоту</b> .....	24
<b>4.3. Побудова траєкторії в геоцентричній системі</b> .....	24
<b>4.4. Аналіз зміни механічної енергії</b> .....	24
<b>РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ</b> .....	26
<b>Додаток А. Таблиця 1. Геоцентричні орбітальні елементи</b> .....	35
<b>Додаток Б. Таблиця 2. Розраховані відстані <math>r</math> швидкості <math>v</math> гінетичні <math>T</math> та потенціальні <math>U</math> енергії та різниця енергій <math>E^*</math></b> .....	37

## ВСТУП

У сучасній астрономії вивчення динаміки малих тіл, зокрема навколоземних астероїдів і тимчасових супутників Землі, набуло особливої актуальності. Ці об'єкти, залишившись свідками раннього етапу формування Сонячної системи, можуть не тільки пролітати повз Землю, але й на певний час захоплюватися її гравітаційним полем. Завдяки цьому вони створюють унікальну можливість для спостережень і досліджень, що допомагають пролити світло на загальні механізми динамічного захоплення, а також розширити наші знання про популяцію малих тіл поблизу Землі. У цьому контексті особливо цікавим став випадок астероїда 2024 PT5, який улітку 2024 р. вперше було виявлено під час спостережень програми ATLAS Sutherland і який незабаром перетворився на тимчасового геоцентричного супутника.

У роботі ми маємо на меті визначити параметри орбіти 2024 PT5 у період його тимчасового захоплення Землею, простежити, коли і чому астероїд «звільнився» від гравітаційного поля Землі й знову перейшов на геліоцентричну траєкторію. Використовуючи астрометричні данні із сервісу JPL Horizons, маємо змогу з високою точністю зчитати геоцентричні координати та орбітальні елементи, обчислити кінетичну, потенційну та повну механічну енергію астероїда, а також показати її еволюцію в часі та залежність від відстані до Землі. В результаті роботи ми бачимо чітке корелювання моменту, коли ексцентриситет геоцентричної орбіти падає нижче одиниці, із переходом повної енергії у від'ємну область, що й визначає фазу тимчасового захоплення.

Науковий внесок цієї дипломної роботи полягає в побудові уточненої моделі руху 2024 PT5 у геоцентричній системі й у кількісній оцінці енергетичних аспектів його захоплення та звільнення. Отримані дані

сприятимуть кращому розумінню загальних механізмів «мінімісяців» та їхньої ролі у динаміці навколоземного простору. Окрім того, результати дослідження відкривають перспективи для практичних застосувань: своєчасне виявлення таких об'єктів, оцінка їхньої небезпечності, а також розробка стратегій для можливого проведення роботизованих місій зі збору зразків.

## **1. МАЛІ ТІЛА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ – АСТЕРОЇДИ**

### **1.1. Малі тіла**

Малими тілами в астрономії називають будь-який природний об'єкт Сонячної системи, крім Сонця, планет, карликових планет та їх супутників. Малі тіла населяють Сонячну систему у величезних кількостях і включають у себе скелясті астероїди, крижані комети та їх уламки. Іноді термін «Мале тіло» обмежують об'єктами які можна спостерігати в телескоп, перебуваючи поза земною атмосферою, що призводить до нижньої межі діаметрів малих тіл у кілька метрів [1].

Хоча малі тіла зустрічаються по всій Сонячній системі, більшість з відомих зосереджені в кількох регіонах. Регіони в яких вони подорожують на досить стабільних орбітах включають: Головний Пояс астероїдів (область між орбітами Юпітера та Марса), гравітаційно стабільні точки (Точки Лагранжа) вздовж орбіт Юпітера, Марса, Землі, Урана та Нептуна, об'єкти в цих областях називають троянськими астероїдами, Пояс Койпера (дископодібна зона крижаних тіл що знаходиться за орбітою Нептуна, члени якої також називаються транснептуновими об'єктами), і Хмара Оорта.

Інші малі тіла рухаються по нестабільних орбітах, що перетинають орбіти однієї або декількох планет. Такі об'єкти поділяють на: комети, навколоземні астероїди (перетинають орбіту Землі або Марса, а деякі з орбітами які переважно повністю лежать всередині орбіти Землі), Кентаври (крижані тіла що рухаються між орбітами Юпітера та Нептуна) та на окремі унікальні тіла, що перетинають орбіти планет, наприклад астероїд Ідальго, який рухається між внутрішньою межею поясу астероїдів та ділянкою відразу за орбітою Сатурна. Усі такі об'єкти з часом або втрачають стабільність своєї орбіти й стикаються з Сонцем чи планетою, або ж викидаються з Сонячної системи, хоча деякі завдяки стабілізуючим резонансам зберігають свої орбіти протягом сотень мільйонів років. [1].

Сучасні дослідження малих тіл передбачають не лише їхню класифікацію за орбітальними параметрами, але й за фізико-хімічними характеристиками, які визначаються спектроскопічними методами. Так, у класифікаційній схемі виділяється понад 25 класів астероїдів, кожен з яких має характерні спектральні ознаки у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні. Найпоширенішими є типи S (силікатні), C (вуглецеві) та X (металічні або невизначені). Тип S зустрічається переважно у внутрішній частині Головного Поясу, тип C — у зовнішній частині, а X — у широкому діапазоні орбіт. [2]

Подальші дослідження продемонстрували еволюцію складу астероїдів уздовж великої піввісі. Було виявлено, що розподіл таксономічних типів є не випадковим, а відображає градієнт температур і складового розшарування в протопланетному диску. Наприклад, силікатні об'єкти з високим альбедо трапляються ближче до Сонця, а темні вуглецеві — далі, що підтверджує гіпотезу міграції великих планет і змішування малих тіл у ранній період історії Сонячної системи. [3]

Таким чином, малі тіла не лише відіграють важливу роль у формуванні планет, але й залишаються ключовими свідками еволюції

Сонячної системи. Їх дослідження, зокрема в контексті навколоземних об'єктів, має важливе значення як для фундаментальної науки, так і для прикладних задач планетарного захисту.

## 1.2. Астероїди

Астероїди – це малі кам'янисті або металеві тіла, діаметром близько 1000 км і менше, які обертаються переважно між орбітами Юпітера та Марса та в точках Лагранжа вздовж орбіт Землі, Марса, Юпітера, Урана та Нептуна.

Переважає більшість відомих астероїдів рухається по орбітах між Марсом і Юпітером. Більшість із цих орбіт, у свою чергу, мають велику напіввісь, або середню відстань від Сонця, між 2,06 і 3,28 астрономічних одиниць (а.о.), ця область зветься Головним Поясом. Середні відстані в поясі астероїдів розподілені нерівномірно утворюючи зони зменшеної кількості об'єктів, або «прогалини». Ці так звані прогалини Кірквуда зумовлені резонансами середнього руху з періодом обертання Юпітера. Наприклад, астероїд із середньою відстанню від Сонця 2,50 а.о. робить три оберти навколо Сонця за час, необхідний Юпітеру, середня відстань якого становить 5,20 а.о., щоб зробити один оберт. Таким чином, кажуть, що астероїд знаходиться на орбіті з резонансом у співвідношенні три до одного (пишеться 3:1) з Юпітером. Отже, один раз на кожні три оберти Юпітер і астероїд на такій орбіті знаходитимуться в однакових відносних положеннях, і астероїд відчуватиме силу тяжіння у фіксованому напрямку. Повторна дія цієї сили зрештою змінить середню відстань цього астероїда, а також інших астероїдів на схожих орбітах таким чином утворюючи прогалину на відстані 2,50 а.о. Основні прогалини виникають на орбітах з середніми відстанями від Сонця, які відповідають резонансам з Юпітером 4:1, 3:1, 5:2, 7:3 і 2:1, з відповідними середніми відстанями 2,06, 2,50, 2,82,

2,96 і 3,28. Головна прогалина при резонансі 4:1 визначає найближчу межу Головного Поясу астероїдів, а прогалина при резонансі 2:1 його найвіддаленішу межу

Деякі резонанси середнього руху, замість того щоб розсіювати астероїди, навпаки, їх накопичують. За межами головного поясу астероїди групуються поблизу резонансів 5:1 (на відстані 1,78 а.о., група Гунгарія), 7:4 (на 3,58 а.о., група Кібеле), 3:2 (на 3,97 а.о., група Гільда), 4:3 (на 4,29 а.о., група Туле) і 1:1 (на 5,20 а.о., троянські астероїди). Наявність інших резонансів, званих секулярними резонансами, ускладнює ситуацію, особливо на внутрішній (ближчій до Сонця) межі поясу. Секулярні резонанси, у яких дві орбіти взаємодіють через рух висхідних вузлів, перигеліїв або обох цих параметрів, діють протягом мільйонів років, змінюючи ексцентриситет і нахил орбіт астероїдів. Поєднання резонансів середнього руху та секулярних резонансів може призводити як до довготривалої стабілізації орбіт астероїдів на певних резонансах середнього руху (що спостерігається у групах Гунгарія, Кібеле, Гільда та троянських астероїдів), так і до еволюції орбіт у бік виходу з резонансу, що проявляється у формуванні прогалин Кірквуда [4].

## 2. НАВКОЛОЗЕМНІ АСТЕРОЇДИ. ВІДКРИТТЯ АСТЕРОЇДА 2024 PT5

### 2.1. Навколоземні об'єкти

У межах навколоземного простору виділяють три основні типи коорбітального руху малих тіл, пов'язаних із планетою. Такі астероїди не залишають околиці Землі після зближення, а певний час перебувають у стійких орбітальних конфігураціях поблизу неї. Їхній рух формується під впливом резонансної взаємодії із Землею та демонструє цікаві особливості в системі відліку, що обертається разом із планетою. Попри наявність збурень, які з часом змінюють елементи орбіти, в межах одного оберту навколо Сонця траєкторії астероїдів близькі до кеплерівських. Така орбітальна поведінка становить інтерес для дослідження динаміки руху малих тіл у гравітаційному полі Землі. Крім того, подібні об'єкти є зручними мішенями для телескопічних і радарних спостережень, а їх порівняно низька відносна швидкість робить їх перспективними цілями для космічних місій, зокрема для місій зі збору зразків.

Перший тип становлять троянські орбіти («пуголовкові» або *tadpole*), при яких мале тіло здійснює лібрації навколо точок Лагранжа L4 або L5, випереджаючи чи відстаючи від планети на  $60^\circ$ . Ці об'єкти поділяють орбіту із Землею, але залишаються стабільно розташованими в околиці лагранжевих точок.

Другий тип — підковоподібні орбіти (*horseshoe*, HS). У цьому випадку мале тіло рухається по траєкторії, подібній до підкови, в системі відліку, що обертається разом із Землею. Орбіта астероїда охоплює точки Лагранжа L4 і L5, але він ніколи не перетинає положення планети — натомість «відскакує» в момент максимального зближення.

Третій тип — квазісупутникові орбіти (*quasi-satellite*, QS). Такі об'єкти перебувають у тимчасовій близькості до планети, рухаючись по розімкнених петлях навколо неї. При цьому вони залишаються поза сферою Гілла та не є істинними супутниками, адже не перебувають у гравітаційному зв'язку із Землею. Проміжок часу коли об'єкт перебуває на Квазісупутниковій орбіті може тривати від кількох років до кількох тисяч років, після чого об'єкт зазвичай повертається до підковоподібної орбіти.

На рис. 1 зображено приклади всіх трьох типів коорбітального руху: троянська (TP), підковоподібна (HS) та квазісупутникова (QS) орбіти. Для ілюстративних цілей було використано масу планети  $m = 10^{-3} M_{\odot}$  для TP та HS, а для моделювання QS,  $m = 3 \times 10^{-6} M_{\odot}$ , що наближено до маси Землі. Для спрощення орбіту планети було прийнято круговою, з великою піввіссю, що дорівнює 1 а.о., а мале тіло знаходиться в її площині. Аналогічно, для частинки було задано початкові значення, що відповідають низькому ексцентриситету.[5]

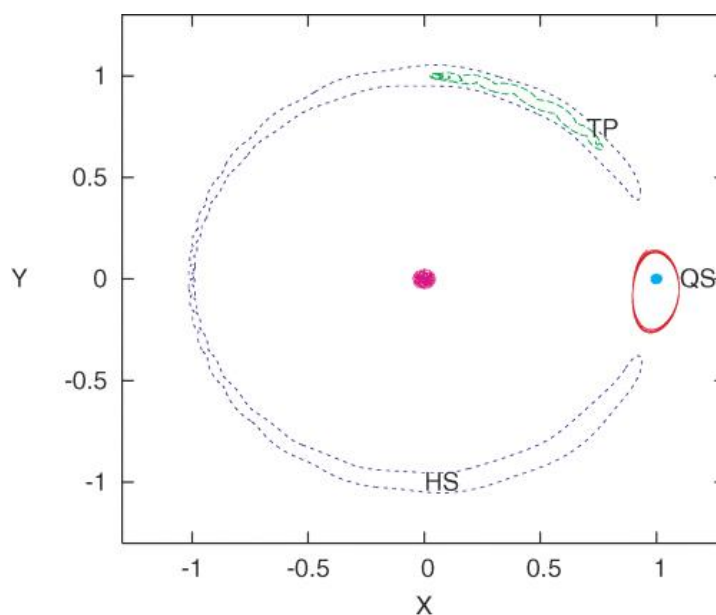


Рис. 1. Зображено приклади всіх трьох типів коорбітального руху: троянська (TP), підковоподібна (HS) та квазісупутникова (QS) орбіти.

За останні десятиліття розвиток телескопічних оглядових програм, таких як ATLAS, Pan-STARRS, Catalina Sky Survey та NEOWISE, значно збільшив кількість виявлених NEO. Згідно з даними Центру малих планет (MPC), станом на 2025 рік відомо понад 35 000 навколоземних астероїдів, з яких понад 900 мають діаметр більше одного кілометра. Деякі з них віднесені до категорії потенційно небезпечних об'єктів (PHO), які мають мінімальну орбітальну відстань до Землі (MOID) менше 0,05 а.о. та діаметр понад 140 м.[6]

Детально проаналізовано природу, динамічну поведінку та перспективи виявлення міні-місяців. В середньому принаймні один об'єкт подібного типу перебуває на геоцентричній орбіті в будь-який момент часу. Ці об'єкти не повністю гравітаційно зв'язані із Землею, але можуть здійснювати кілька обертів навколо планети перед тим, як знову перейти на геліоцентричну орбіту. Їх вивчення є важливим як для оцінки ризиків, так і з погляду потенційного використання для короткотермінових дослідницьких місій. [7]

## **2.2. Вплив Сонця, Місяця та планет на рух навколоземних астероїдів**

У чисельному моделюванні руху навколоземних астероїдів основною точкою відліку є геліоцентрична система координат, в якій враховуються як центральний гравітаційний вплив Сонця, так і збурення від інших тіл Сонячної системи. Загальна форма рівнянь руху малого тіла записується так:

$$\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2} + k^2(m_0 + m_i)\frac{\vec{r}_i}{r_i^3} = -k^2 \sum_{j=1}^{10} m_j \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{r_{ji}^3}$$

$$-k^2 \sum_{j=1}^{10} m_j \frac{\vec{r}_j}{r_{j0}^3} + \frac{\partial U}{\partial \vec{r}} + k^2 m_0 \beta \frac{\vec{r}_i}{r_i^3}, i \neq j$$

де

$\vec{r}_i$  – вектор положення астероїда відносно Сонця,  $r_i = \|\vec{r}_i\|$ ;

$k$  – гауссова гравітаційна стала;  $m_0$  – маса Сонця;  $m_i$  – маса астероїда;

$m_j, \vec{r}_j$  – маси і геліоцентричні вектори інших збурюючих тіл (вісім великих планет, Плутон та Місяць);

$\frac{\partial U}{\partial \vec{r}}$  – збурювальне прискорення через сплюснутість Землі;

останній доданок відповідає фотогравітаційному збуренню від тиску сонячного випромінювання ( $\beta$  – баллістичний коефіцієнт).

Центральний гравітаційний вплив Сонця на орбіту астероїда задається таким доданком:

$$k^2 m_0 \frac{\vec{r}_i}{r_i^3}$$

Він задає кеплерівську основу траєкторії та домінує в регіоні, віддаленому від впливу Землі, та визначає основну форму орбіти астероїда у відсутності сторонніх збурень.

Збурення від планет і Місяця задаються суммою:

$$- \sum_{j=1}^{10} k^2 m_j \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{r_{ji}^3}$$

де  $k^2 m_j$ , відповідає гравітаційному впливу восьми великих планет, Плутона та Місяця. Положення цих тіл береться з високоточної чисельної теорії DE405, що дозволяє інтегрувати траєкторії астероїда без додаткового рішення рівнянь руху планет на кожному кроці інтегрування.

Через нерівномірність розподілу маси Землі вноситься додаткове збурення:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = - \frac{3k^2 m_3 R_3^2}{2r^7} J_2 x (x^2 + y^2 - 4z^2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = - \frac{3k^2 m_3 R_3^2}{2r^7} J_2 y (x^2 + y^2 - 4z^2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = - \frac{3k^2 m_3 R_3^2}{2r^7} J_2 z (3(x^2 + y^2) - 2z^2)$$

де  $m_3$  і  $R_3$  — маса та екваторіальний радіус Землі,  $J_2$  — коефіцієнт сплюснутості. Цей термін відповідає за поступовий дрейф вузлів та аргументу перигею у геоцентричних обертах, а також спричиняє квазі-реверсії в орбітальних елементах при тривалому моделюванні. [8]

### 2.3. Вплив ефекту Ярковського на рух навколоземних астероїдів

Ефект Ярковського — це слабка негравітаційна сила, спричинена анізотропним випромінюванням теплової енергії, що накопичується під час сонячного нагрівання обертового тіла. Він має дві складові: діурнальну (пов'язану з обертанням навколо осі) та сезонну (пов'язану з нахилом осі обертання). Діурнальний ефект зазвичай є домінуючим і

залежить від таких фізичних параметрів астероїда, як швидкість обертання, розмір, маса, форма, термічні властивості та шорсткість поверхні. Для субкілометрових навколоземних астероїдів типове значення прискорення, зумовленого ефектом Ярковського, лежить у межах  $10^{-15}$ – $10^{-13}$  а.о./день<sup>2</sup>.

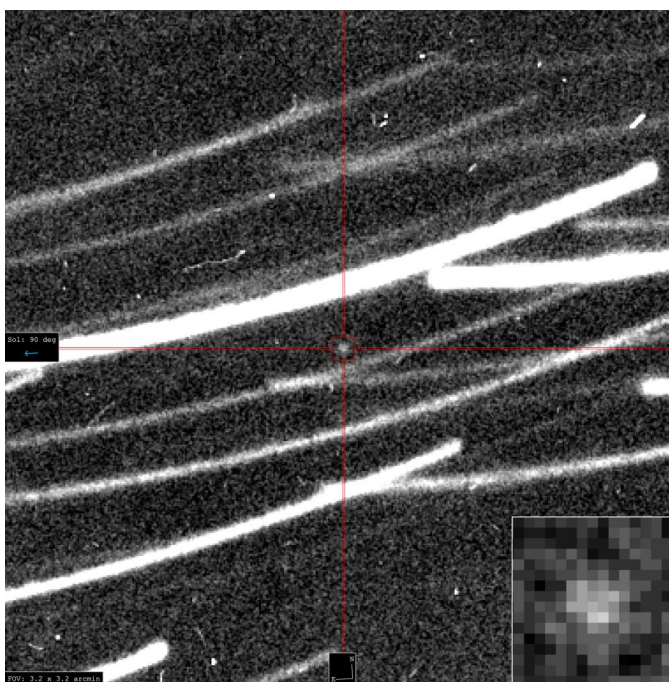
На прикладі квазісупутника Землі (469219) Камооалева вперше було надійно виявлено ефект Ярковського яким зумовлене зміщення великої піввісі. Оцінений параметр невказаної сили уздовж поперечного до радіус-вектора напрямку ( $A_2$ ) склав  $(-1.434 \pm 0.410) \times 10^{-13}$  а.о./день<sup>2</sup>, що відповідає дрейфу  $\frac{da}{dt} = (-6.155 \pm 1.758) \times 10^{-3}$  а.о. за мільйон років. Від'ємне значення  $\frac{da}{dt}$  свідчить про ретроградний оберт об'єкта.

Чисельні експерименти із клонованими орбітами показали, що ефект Ярковського майже не впливає на короткострокову динаміку ( $\pm 5$  тисяч років): астероїд продовжує переходити між підковоподібною та квазісупутниковою конфігураціями без помітних змін. Натомість у довгостроковій перспективі ( $\pm 5$  мільйонів років) дрейф викликаний ефектом Ярковського суттєво скорочує час перебування в резонансі 1:1 з Землею: 81% клонів залишають цю зону менш ніж за 1 мільйон років, а 77% увійшли до неї пізніше ніж за 1 мільйон років тому. Отже, навіть незначне Сонячне випромінювання серйозно змінює довгострокову стабільність навколоземних астероїдів і має враховуватися при прогнозуванні їхньої еволюції. [9]

## 2.4. Відкриття астероїду 2024 PT5

Астероїд 2024 PT5, було вперше виявлено 7 серпня 2024 р. під час автоматичного огляду неба, що виконується в рамках програми Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System (ATLAS). Попередні розрахунки

показали, що його геліоцентрична велика піввісь становить  $\approx 1,01$  а.о., а перигелій  $\approx 0,99$  а.о. Після первинного відкриття орбітальні розрахунки засвідчили, що 2024 PT5 було захоплено гравітаційним полем системи “Земля–Місяць” 29 вересня 2024 р. і воно залишалося поблизу Землі до 25 листопада 2024 р. [10]



*Рис. 2. Зображення 2024 PT5 (у центрі, точкове джерело), отримане за допомогою телескопа ТТТІ. Це зображення є комбінацією послідовності окремих кадрів, кожен з яких був зроблений у режимі сидеричного наведення. Астероїд залишається нерухомим на сумарному зображенні, оскільки воно було зведене з використанням ефемерид 2024 PT5, отриманих з вебсайту Minor Planet Center. Фонові зорі утворюють сліди через рух астероїда. У нижньому правому куті показано збільшений фрагмент із точковим зображенням об'єкта [11].*

На основі спектроскопічних та динамічних досліджень було встановлено, що астероїд 2024 PT5 має місячне походження. По-перше, 16 серпня 2024 р. об'єкт спостерігали в видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах зі спектрографами Lowell Discovery Telescope

та NASA IRTF. Отриманий спектр відзначався характерними смугами, властивими піроксену – основному мінералу місячних порід, тоді як астероїди із подібною “червоністю” спектра зазвичай мають оливінову мінералізацію. Спектр 2024 PT5 ідеально збігався зі спектрами місячних зразків, але не відповідав жодному відомому астероїдному типу.

По-друге, автори проаналізували вплив сонячного випромінювання на траєкторію 2024 PT5. Для штучних об’єктів із малою щільністю (наприклад, ступенів ракети) величина прискорення, зумовленого тиском сонячного світла, мала б бути на порядки вищою. Натомість спостережуване відхилення траєкторії 2024 PT5 було значно меншим, що вказує на щільний, кам’яний склад тіла – ще одна ознака природного походження і, зокрема, походження з місячної речовини.

Поєднання цих двох фактів – видимий спектр, що ідентичний місячним породам, і низький коефіцієнт дії сонячного тиску – дозволило дослідникам однозначно відкинути гіпотезу “штучного” походження і висунути висновок, що астероїд 2024 PT5 є уламком, викинутим із поверхні Місяця під час удару метеорита. Таким чином, 2024 PT5 став другим відомим навколоземним об’єктом із достовірно доведеним місячним походженням, що відкриває нові перспективи для вивчення процесів ударного викиду та популяції таких “міні-місяців” поблизу Землі [12].

## **2.5. Тимчасові супутники землі**

Тимчасові супутники Землі (англ. Temporary Captured Objects, TCOs), або «міні-місяці», становлять окрему динамічну підгрупу навколоземних об’єктів, які на короткий проміжок часу (від кількох днів до кількох місяців або років) переходять на тимчасову орбіту навколо Землі. Їхній рух

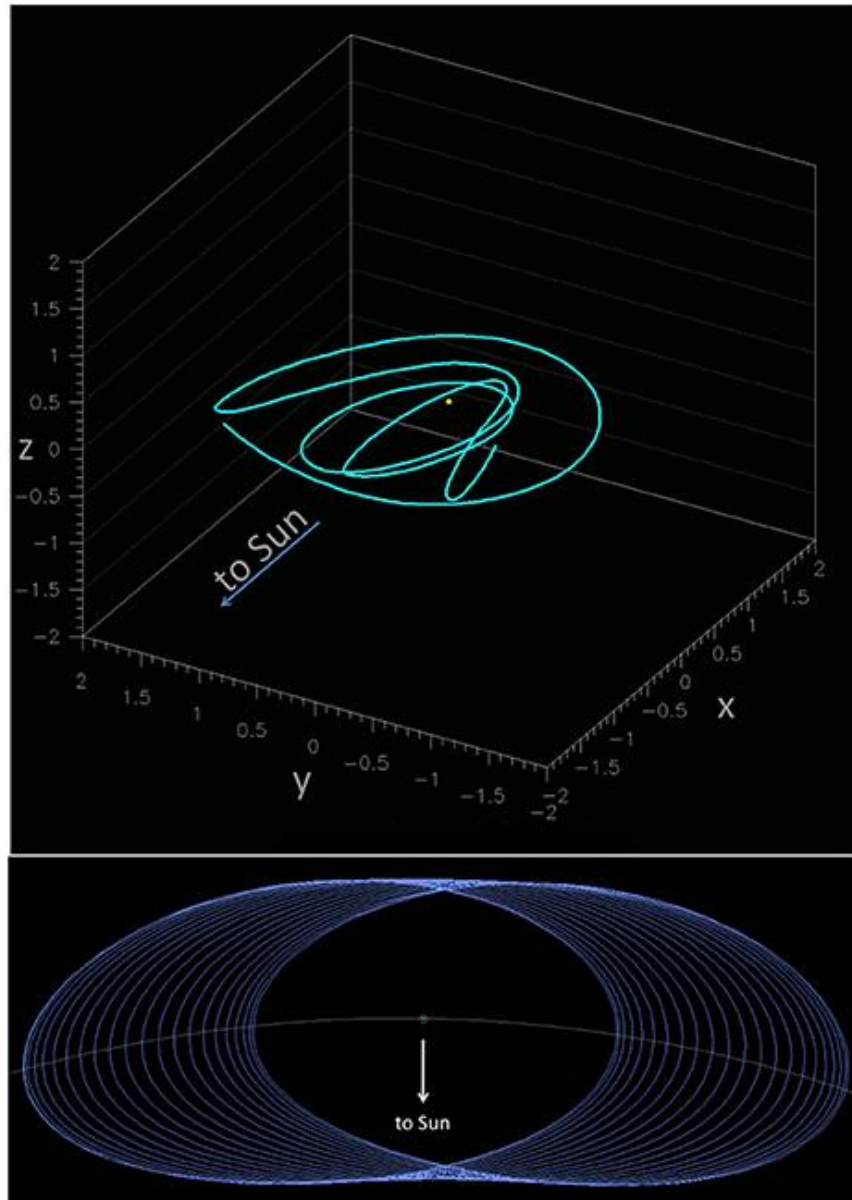
не є стабільним у довготривалому сенсі, оскільки вони перебувають поза сферою Гілла, тобто за межами зони, відносно прискорення до Землі переважає над відносним прискоренням до сонця Сонця. Їхнє вивчення є важливим як для оцінки потенційних загроз, так і з огляду на можливість використання для короткотермінових місій — зокрема для тестування технологій зближення з малою ціллю та збирання зразків.

Реальні приклади таких об'єктів включають добре задокументовані випадки:

- 2006 RH120, що перебував у тимчасовій орбіті близько 11 місяців;
- 2020 CD3, захоплений у 2018 р. та покинув околиці Землі у 2020 р.;
- 2024 PT5, відкритий телескопом ATLAS у серпні 2024 р. та перебував біля Землі до листопада того ж року.

Варто зазначити, що реєстрація подібних об'єктів є складним завданням через їхню малу яскравість, високу швидкість на небі та непередбачувану динаміку. За оцінками, лише  $\approx 1$  із 1000 тимчасово захоплених об'єктів може бути фактично виявлений сучасними телескопами, якщо його діаметр менше за 1 метр [7].

Незважаючи на це, ТСО становлять особливий інтерес для практичної астрономії. Завдяки своїй близькості до Землі та низькій відносній швидкості, такі об'єкти є доступними мішенями для роботизованих космічних апаратів, які можуть здійснювати короткотермінові місії з дослідження поверхні, збору зразків або навіть захоплення об'єкта. Дослідження таких міні-місяців може суттєво доповнити наші знання про механізми захоплення малих тіл, походження деяких з них (зокрема, місячне або астероїдне), а також надати практичну цінність для майбутніх програм планетарної оборони та освоєння ресурсів ближнього космосу [7].



**Рис. 3. (Вгорі)** Траєкторія мінімісяця 2006 RH120 під час його захоплення в системі Земля–Місяць у 2006–2007 роках. Земля зображена жовтою точкою в центрі системи координат, прив’язаної до середнього екватора та рівнодення епохи J2000.0. **(Внизу)** Траєкторія квазісупутника Землі 2016 HO3, показана синім кольором, спроектована на площину ecliptic  $x$ – $y$  в синодичній системі відліку. Земля позначена зеленою точкою в центрі, орбіта Місяця – білим колом. Орбіта Землі показана білою дугою зліва направо; напрямок на Сонце – донизу [7].

## 3. СИСТЕМА JPL HORIZONS

### 3.1. Історія створення системи Horizons.

Система JPL HORIZONS була розроблена в рамках групи Solar System Dynamics (SSD) при Лабораторії реактивного руху (JPL) Каліфорнійського технологічного інституту за контрактом з NASA. Перший інтерактивний доступ до ефемерид Сонячної системи було реалізовано у середині 1990-х років через протокол Telnet, а згодом – через веб-інтерфейс. Й. Дж. Джорджіні, Д. К. Йеманс та інші фахівці SSD описали це рішення як «онлайн-сервіс даних про Сонячну систему», який включає зорієнтовані на користувача інструменти генерувати високоточні ефемериди, орбітальні елементи та фізичні характеристики об'єктів. З моменту запуску сервіс став основним джерелом астрономічних ефемерид для NASA. Національна адміністрація аеронавтики та дослідження космосу офіційно підтримує і обслуговує цей сервіс через JPL SSD, забезпечуючи постійну актуалізацію даних і коду. З часом Horizons еволюціонував: додано доступ по електронній пошті, REST API та інтерфейс SPICE, а також інтегровано нові каталоги малих тіл, оновлені ефемериди та інші можливості.

### 3.2. Функціональні можливості сервісу Horizons

Сервіс HORIZONS надає розширені можливості для розрахунку ефемерид і пов'язаних даних по різним категоріям об'єктів Сонячної системи. Підтримуються 561 485 астероїдів, 3099 комет, 171 природний супутник планет, 8 планет, Сонце, точки Лагранжа L1 та L2, окремі космічні апарати та центра мас (барицентрів) [13]. Для кожного об'єкта

сервіс дозволяє одержати набір більш ніж 70 орбітальних і фізичних параметрів (вектор стану, орбітальні елементи, швидкість, радіус, освітленість тощо) за довільний проміжок часу. Результатом є високоточні ефемериди у вибраній системі відліку (наприклад, у системі J2000/ICRF або FK4/1950) і часовій шкалі (TDB, TT або UTC) [14].

- Орбітальні елементи. HORIZONS здатен видавати миттєві та середньо-орбітальні елементи (наприклад, напіввісь, ексцентриситет, нахил, аргумент перигелію, довготу вузлів, середню аномалію) для заданої епохи.
- Ефемериди положення. Користувач може отримати таблицю координат (прямого сходження й деклінації або інших компонент) і відстаней об'єкта від центру спостереження у вибрані моменти часу. Наприклад, геоцентричні або топоцентричні координати астероїда з заданим кроком по часу.
- Наближення і спостережні умови. Система обчислює та виводить кутові діаметри, фазові кути, інтегральні видимі величини, освітлені фракції та інші характеристики освітленості. Можна отримати планетографічні довготи і широти субсолярних і субастрономічних точок на поверхні тіл. Крім того, HORIZONS автоматично визначає явища місячного затемнення, транзити, оклюзії між планетами, їхніми супутниками та об'єктом (наприклад, транзит Венери чи Місяця по диску Сонця тощо) [14].
- Підтримка обсерваторій. Можна задавати як «центр спостереження» довільне місце на Землі (або штучний супутник, обсерваторію з кодом NAIF). Система рахує ефемериди з урахуванням паралаксу та рефракції («спостережні координати») для даного місця на поверхні Землі або в космосі.
- Різноманітні формати даних. Вихідний файл може бути ASCII-таблицею з опціональною розміткою (CSV) та вивантажуватися

через веб-інтерфейс, електронну пошту чи API. Дані можуть включати позиційні компоненти, відстань до Сонця або Землі, швидкість зближення, величину ймовірнісні параметри.

Таким чином, Horizons є дуже гнучким інструментом для отримання ефемерид та координат небесних тіл. Цей сервіс постійно оновлюється і формується за сучасними даними JPL, тому для планет, їхніх супутників, астероїдів і комет він забезпечує високу точність астрометричних величин [14].

### 3.3. Технічна основа

Технічним ядром Horizons є набір ефемерид JPL Development Ephemeris (DE). Наприклад, до 2013 року використовували DE431, з 2021 року – DE440/441 [15]. Ці ефемериди одержані шляхом числового інтегрування повного динамічного рівняння руху тіл Сонячної системи з урахуванням гравітаційних впливів планет, Місяця, 343 великих астероїдів та інших тіл [16], а також релятивістських поправок. Після інтегрування орбіт всі позиції та швидкості інтерполюються за допомогою поліномів Чебишова на відрізках по  $\sim 32$  доби і зберігаються у форматі SPK (вміст SPICE/NAIF) [16]. Таким чином, коли користувач запитує значення координат для певного часу, система підвантажує відповідні фрагменти SPK-файлів і виконує інтерполяцію.

Точність ефемерид залежить від якості вимірювань і моделі руху. Для Меркурія, Венери та Землі поточна точність становить субкілометрову (субметрову) за орбітальними координатами завдяки даним радіотрекінгу і лазерних вимірювань (для Місяця) [16]. Орбіти Юпітера і Сатурна уточнені до десятків кілометрів завдяки радіодальномірним спостереженням космічних апаратів Juno і Cassini [15]. Найменш точно

відомі орбіти Урана, Нептуна, Плутона — на тисячі кілометрів (через обмежену кількість оптичних спостережень) [15]. Усе це дає високу надійність прогнозів позицій.

У 2021 році JPL випустив нові ефемериди DE440 та DE441 [15]. У цих ефемерид нові довгі ряди спостережень, зокрема радіодальномірні з місії Juno (Юпітер) і Cassini (Сатурн), а також виміри зоряних затемнень Плутоном з каталогу Gaia. DE441 використовується для довготривалих інтегрувань (–13 200...+17 191 рр.), тоді як DE440 орієнтований на високу точність у нашій епосі (1550–2650 рр.) [15]. Horizons автоматично використовує ці оновлені ефемериди для планет і супутників, а також відповідає сучасній моделі розподілу мас Головного Поясу (масив Койпера тощо) [15].

Таким чином, основа роботи Horizons – це надійна математична модель руху Сонячної системи та інтерполяція за сучасними ефемеридами JPL. Враховуються гравітаційні збурення від усіх значущих тіл, а обчислення виконуються з урахуванням релятивістських ефектів [15]. Користувач може бути впевнений в тому, що результати (позиції, швидкості, відстані) є такими ж точними, які застосовуються в навігації космічних місій і наукових дослідженнях.

### **3.4. Наукова значущість і приклади використання**

Система Horizons стала канонічним джерелом ефемерид у науковій астрономії. Вона використовується для аналізу траєкторій астероїдів і комет, підготовки спостережень, оцінки небезпечних зближень та багатьох інших задач. Науковці регулярно цитують HORIZONS як джерело точних розрахунків руху тіл. Наприклад, HORIZONS використовували для побудови номінальної еволюції орбіти небезпечного астероїда 2023 DZ2

[16]. У цій роботі HORIZONS на пряму обчислював позиції DZ2 в минулому й майбутньому [16]. Інший приклад – інструменти обробки астрономічних зображень: автоматизована програма фотометричного аналізу TCS/MuSCAT2 отримує ефемериди малих тіл через модуль HORIZONS і використовує їх для ідентифікації об'єктів на знімках [16]. Таким чином, HORIZONS дозволяє визначати, в який бік та з якою швидкістю рухається небесне тіло.

Значущість цієї системи також підкреслюють публікації інших дослідників. Вона згадувалася у численних статтях як стандартний сервіс: наприклад, в оглядах орбіт планет (де вказано, що з 2021 р. використовується DE440/441 [15]) або в описі каталогів спостережень супутників планет [16]. Без HORIZONS багато сучасних досліджень руху тіл просто не були б можливі на практиці через величезну кількість обчислень, що вимагаються. Завдяки ньому вчені можуть швидко й надійно отримувати необхідні дані для проведення моделей, кореляції спостережень та перевірки гіпотез. Це підтверджує факт широкого використання сервісу в роботах із планетарної науки і динаміки малих тіл [16].

## 4. МЕТОДИ

### 4.1. Збір астрометричних даних і орбітальних елементів

Використовуємо веб-інтерфейс JPL Horizons, оскільки сервіс надає високоточні геоцентричні ефемериди та миттєві орбітальні елементи. Наш об'єкт — «2024 PT5»; центр спостереження для геоцентричних даних — код 500 (Geocenter).

Далі налаштовуємо часові параметри. За початок інтервалу вибираємо дату за кілька місяців до першого очікуваного захоплення (наприклад, 2024-06-01 00:00 UTC). Кінець інтервалу – кілька місяців після завершення фази захоплення (наприклад, 2025-01-01 00:00 UTC). Крок часу задаємо достатньо дрібним (1 доба або 12 годин), щоб коректно зафіксувати початок і кінець захоплення.

Після цього щоб отримати миттєві орбітальні елементи. У Horizons у вкладці Table Settings змінюємо Ephemeris Type на Elements Osculating Elements. У списку Quantity залишаємо тільки:

1. Epoch (дата-час епохи)
2.  $a$  (велика піввісь)
3.  $e$  (ексцентриситет)
4.  $i$  (нахил)
5.  $\Omega$  (довгота висхідного вузла)
6.  $\omega$  (аргумент перигелію)
7.  $M$  (середня аномалія)

Генеруємо список орбітальних елементів для кожного моменту часу. Результат зберігаємо як ASCII-файл (.txt або .csv).

## 4.2. Визначення моментів захоплення та відльоту

За концепцією небесної механіки, тимчасове захоплення відбувається тоді, коли геоцентричний ексцентриситет  $e$  орбіти стає меншим за 1 (еліптична орбіта довкола Землі). І навпаки,  $e > 1$  означає, що тіло знову перебуває на геліоцентричній траєкторії.

## 4.3. Побудова траєкторії в геоцентричній системі

Спочатку отримуємо декартові координати. Для цього повторно виконуємо запит у Horizons, але цього разу у Table Settings → Vector Table залишаємо тільки параметри:

1. Observer-centric X (км)
2. Observer-centric Y (км)
3. Observer-centric Z (км)

Часові інтервали залишаємо такі самі. Після генерації зберігаємо таблицю з координатами.

Імпортуємо масиви X, Y, Z, у середовище (Python, MATLAB тощо). Та будемо 3D-траєкторію та 2D проекцію на вісі X, Y.

## 4.4. Аналіз зміни механічної енергії

Отримаємо ще й проекції швидкості  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ , та переходимо до обчислення механічної енергії, так як маса астероїда не відома будемо обчислювати питому кінетичну та потенціальну енергії, тобто енергії на одиницю маси

$$T = \frac{1}{2}v^2, \quad U = G \frac{M_3}{r}$$

$$E = T + U$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad v = \sqrt{Xv^2 + Yv^2 + Zv^2}$$

$$GM_3 = 3.986004418(9) \times 10^{14}$$

Момент захоплення Землею відбудеться тоді коли потенціальна енергія гравітаційної взаємодії з Землею зрівняється з кінетичною енергією астероїда, тому для зручності ми ще визначемо різницю енергій  $E^* = T - U$ . Після обчислювань будемо графіки  $T(t)$ ,  $U(t)$ ,  $E^*(t)$  та  $E^*(r)$ .

## РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Ми отримали детальний опис динаміки астероїда 2024 PT5 у період з 25 вересня по 30 листопада 2024 року, спираючись на астрометричні дані та обчислені орбітальні елементи (табл. 1). З аналізу значень ексцентриситету  $e$  бачимо, що наприкінці вересня  $e$  різко зменшився нижче одиниці, що свідчить про момент початку тимчасового захоплення астероїда гравітаційним полем Землі. Разом з тим нахил  $i$ , довгота висхідного вузла  $\Omega$  й аргумент перигелію  $\omega$  змінювалися відносно плавно, демонструючи мінімальні коливання під час етапу, коли  $e < 1$ . Ми маємо впевненість, що саме ці зміни в орбітальному параметрі  $e$  є ключовими для виявлення моменту захоплення та наглядного порівняння з моментом, коли астероїд знову ставав геліоцентричним (коли  $e$  знову перевищило 1).

На рисунку 4 зображена траєкторія астероїда в геоцентричних координатах  $X, Y, Z$  за інтервал 27 червня 2024 р.—31 січня 2025 р. Маємо повне уявлення про форму руху до, під час та після захоплення. У площині  $X - Y$  добре видно характерну підковоподібну конфігурацію, коли астероїд наближався до Землі, а потім повертався на геліоцентричну траєкторію. Рисунок 5 демонструє детальну побудову орбіти за звуженим діапазоном від 30 вересня до 25 листопада 2024 р., коли астероїд перебував у зоні  $e < 1$ .

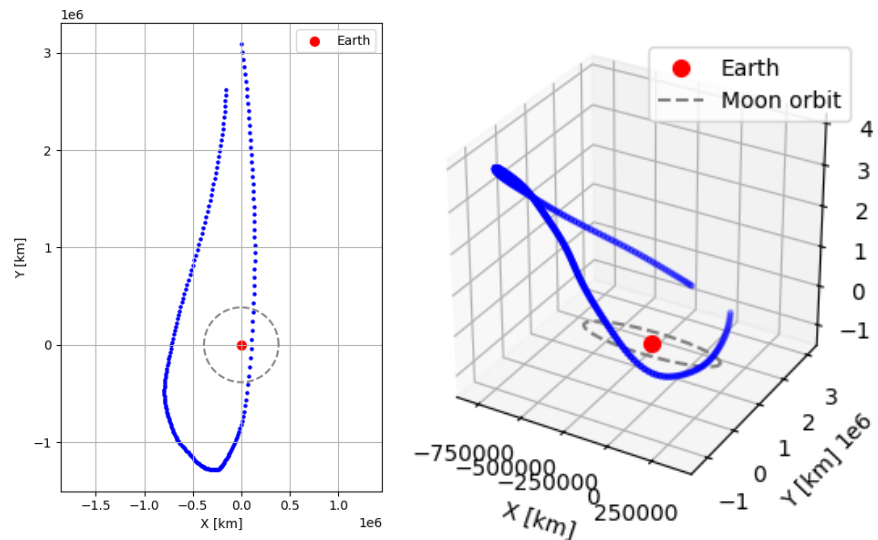


Рис. 4. Повна геоцентрична орбіта астероїда 2024 PT5 у проміжку 27.06.2024–31.01.2025. (Ліворуч): проєкція орбіти на площину  $X$ – $Y$  із позначенням геоцентричної орбіти Місяця (пунктир) і положенням Землі (червона крапка). (Праворуч): тривимірне зображення траєкторії.

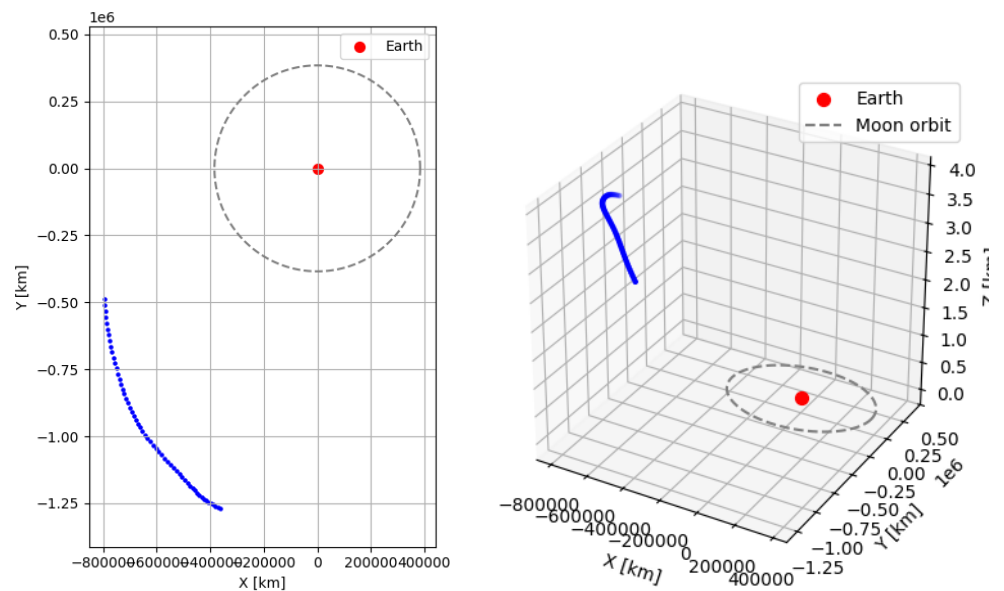


Рис. 5. Геоцентрична орбіта астероїда 2024 PT5 під час фази захоплення 30.09.2024–25.11.2024. (Ліворуч): проєкція орбіти на площину  $X$ – $Y$  із позначенням геоцентричної орбіти Місяця (пунктир) і положенням Землі (червона крапка). (Праворуч): тривимірне зображення траєкторії.

У таблиці 2 наведено розбіжність відстаней  $r$ , швидкостей  $v$ , кінетичної енергії  $T$ , потенціальної енергії  $U$  та різниці енергій  $E'$  за період з 25 вересня по 30 листопада 2024 р. Ми маємо чіткі дані про те, як змінювалася відстань до Землі від приблизно 3 280 000 км до близько 4 030 000 км, в той час як швидкість зменшувалась із 0.55 км/с до 0.18 км/с у фазі максимального захоплення. Бачимо, що кінетична енергія  $T$  та потенціальна  $U$  перетинаються біля точки, коли різниця енергій  $E'$  набуває від'ємних значень.

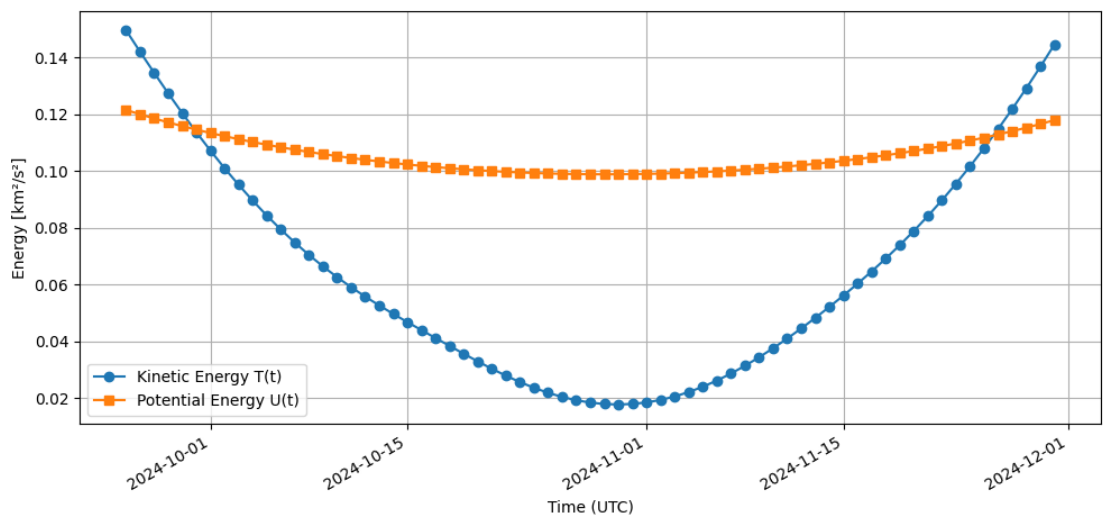


Рис. 6. Кінетична  $T(t)$  (синя) та потенціальна  $U(t)$  (помаранчева) енергії у період 25.09–30.11.2024.

Рисунок 6 ілюструє динаміку  $T(t)$  та  $U(t)$  у зазначеному періоді. Ми отримали, що до 29 вересня  $T$  було більше за  $U$ , але вже на початку захоплення потенціальна енергія переважила, через що  $E'$  стало від'ємним. Це підтверджує момент, коли астероїд увійшов в еліптичну геоцентричну траєкторію. На рисунку 7 представлено графік зміни різниці енергій з часом  $E'(t)$ . Бачимо, що  $E'$  перетинає нульову лінію саме 29–30 вересня, що співпадає з даними з орбітальних елементів, та залишається негативним

до 26 листопада, коли енергія повертається у позитивну область — момент відльоту астероїда.

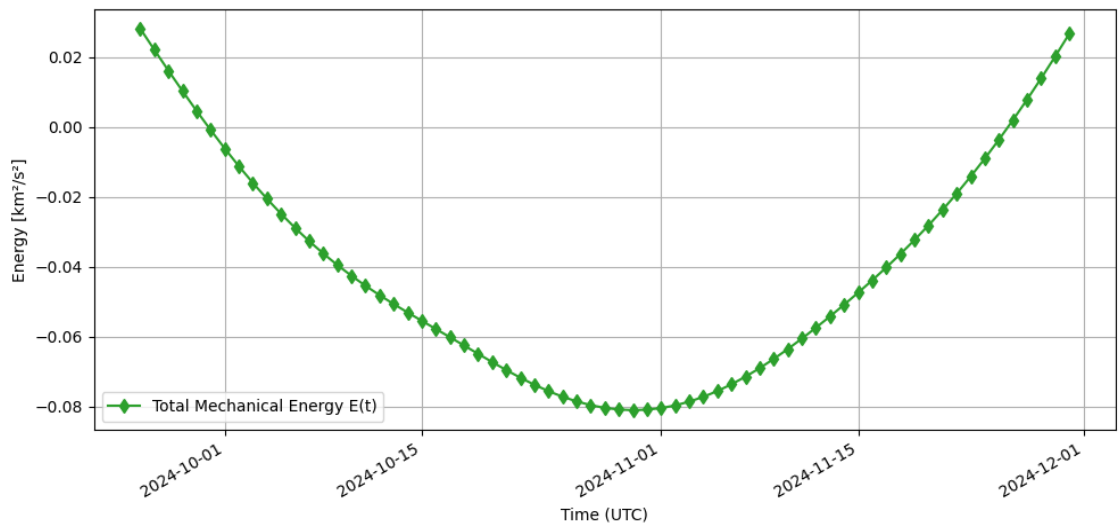


Рис. 7. Різниця енергій  $E(t)$  у період 25.09–30.11.2024.

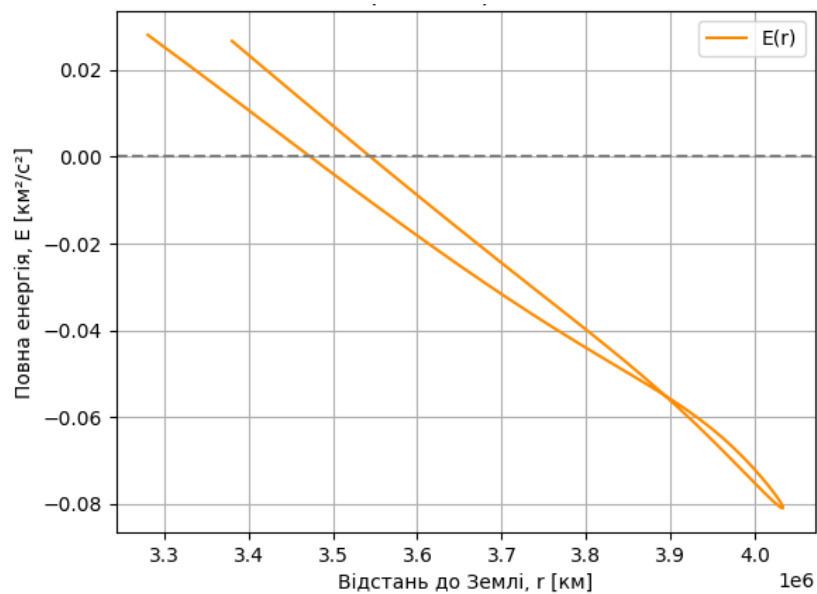


Рис. 8. Залежність різниці енергій  $E$  від відстані  $r$ .

Графік  $E^{\circ}(r)$ , наведений на рисунку 8, демонструє залежність повної енергії від відстані до Землі. Ми маємо характерну криву, яка підтверджує, що значення  $E^{\circ}$  було негативним у діапазоні  $r$  приблизно від 3 280 000 км до близько 4 030 000 км, а коли  $r$  перевищило цей інтервал,  $E^{\circ}$  стало позитивним, що однозначно вказує на кінець тимчасового захоплення. Цей підхід дав змогу нам кількісно визначити діапазон відстаней, у якому астероїд «залишався» поблизу Землі, і точні межі моментів входження та виходу.

У загальній сукупності отримані дані дають повне уявлення про етапи руху астероїда 2024 PT5: момент, коли ексцентриситет впав нижче одиниці, відповідає початку захоплення, яке підтверджується від'ємною повною енергією. Ми маємо чіткі значення параметрів  $i$ ,  $\Omega$  та  $\omega$  під час цього періоду, що демонструє слабкі коливання кута нахилу та вузла, але суттєву трансформацію форми траєкторії. Після 25 листопада астероїд повернувся на геліоцентричну орбіту, що відповідає відновленню  $e > 1$  та позитивному значенню  $E^{\circ}$ .

У висновку можна стверджувати що, по-перше, ми отримали точне визначення моменту захоплення 2024 PT5 — це 29 вересня 2024 р., коли геоцентричний ексцентриситет астероїда впав нижче одиниці, а різниця кінетичної та потенціальної енергій стала від'ємною. По-друге, на основі геоцентричних координат побудували 3D-траєкторію та її проекцію на площину  $X$ – $Y$ , за допомогою чого підтвердили підковоподібну конфігурацію руху навколо Землі до середини листопада. По-третє, ми встановили, що фаза захоплення тривала приблизно 57 днів, до 25 листопада 2024 р., коли астероїд набув  $E^{\circ} > 0$  та  $e > 1$ . У період захоплення параметри  $i$ ,  $\Omega$  і  $\omega$  зазнали лише незначних зміщень, що вказує на те, що головні зміни стосувалися форми еліпса та енергії руху.

Загалом, отримані результати надали змогу краще розуміти динаміку тимчасових супутників Землі, конкретно механізми захоплення та звільнення, а також кількісні межі їх орбіт. Це дозволяє прогнозувати подальшу еволюцію астероїда та оцінювати можливість повторних наближень у майбутньому.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Edward F. Tedesco. Small Solar System Body [Електронний ресурс] / Edward F. Tedesco. – Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/small-body> (дата звернення: 30.05.2025).
2. Bus S. J., Binzel R. P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: A Feature-Based Taxonomy // *Icarus*. – 2002. – Vol. 158, No 1. – P. 146–177. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103502968569> (дата звернення: 30.05.2025).
3. DeMeo F. E., Carry B. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt // *Astronomy & Astrophysics*. – 2014. – Vol. 568. – A92. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1408.2787> (дата звернення: 30.05.2025).
4. Edward F. Tedesco. Asteroid [Електронний ресурс] / Edward F. Tedesco. – Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/asteroid> (дата звернення: 30.05.2025).
5. Mikkola S., Innanen K., Wiegert P., Connors M., Brassier R. Stability limits for the quasi-satellite orbit // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2006. – Vol. 369, No 1. – P. 15–24. – Режим доступу: <https://academic.oup.com/mnras/article/369/1/15/1050899> (дата звернення: 30.05.2025).
6. MPC (Minor Planet Center) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://minorplanetcenter.net/> (дата звернення: 30.05.2025).
7. Jedicke R., Bolin B., Granvik M. et al. Earth's Minimoons: Opportunities for Science and Technology // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2018. – Vol. 5. – Art. 13. – Режим доступу: <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space->

- [sciences/articles/10.3389/fspas.2018.00013/full#B20](https://www.researchgate.net/publication/377066234_Temporary_capture_of_a_small_body_into_a_geocentric_orbit) (дата звернення: 30.05.2025).
8. Bazyey Olexander, Tokovenko A., Troianskyi Volodymyr. Temporary capture of a small body into a geocentric orbit // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. – 2023. – Vol. 53. – P. 61–70. – DOI: 10.31577/caosp.2023.53.2.61. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/377066234\\_Temporary\\_capture\\_of\\_a\\_small\\_body\\_into\\_a\\_geocentric\\_orbit](https://www.researchgate.net/publication/377066234_Temporary_capture_of_a_small_body_into_a_geocentric_orbit) (дата звернення: 30.05.2025).
  9. Liu Lu, Yan Jianguo, Ye Mao, Yu Liangliang, Chen Yihao, Qiu Denggao, Zheng Chong, Barriot Jean-Pierre. Yarkovsky effect detection from ground-based astrometric data for near-Earth asteroid (469219) Kamo'oalewa // Astronomy & Astrophysics. – 2022. – Vol. 667. – A150. – Режим доступу: [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2022/11/aa44488-22/aa44488-22.html#S2](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/11/aa44488-22/aa44488-22.html#S2) (дата звернення: 30.05.2025).
  10. Bolin B. T., Denneau L., Abron L.-M., Jedicke R., Chiboucas K., Ingerbretsen C., Lemaux B. C. The discovery and characterization of minimoon 2024 PT<sub>5</sub> [Препринт]. – 2024. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2411.08029> (дата звернення: 30.05.2025).
  11. de la Fuente Marcos R., de Leon J., Serra-Ricart M., de la Fuente Marcos C., Alarcon M. R., Licandro J., Geier S., Tejero A., Perez Romero A., Perez-Toledo F., Cabrera-Lavers A. Basaltic quasi-minimoons: Characterizing 2024 PT<sub>5</sub> with the 10.4 m Gran Telescopio Canarias and the Two-meter Twin Telescope [Подано до друку]. – 2025. – Режим доступу: [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2025/02/aa52713-24/aa52713-24.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2025/02/aa52713-24/aa52713-24.html) (дата звернення: 30.05.2025).

12. Karetka T. et al. On the Lunar Origin of Near-Earth Asteroid 2024 PT5 [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2412.10264> (дата звернения: 30.05.2025).
13. NASA JPL. Horizons On-Line Ephemeris Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/> (дата звернения: 30.05.2025).
14. Giorgini J. D., Yeomans D. K. et al. JPL's On-Line Solar System Data Service // BAAS. – 1996. – Vol. 28. – P. 1158. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/234316633\\_JPL's\\_On-line\\_solar\\_system\\_data\\_service](https://www.researchgate.net/publication/234316633_JPL's_On-line_solar_system_data_service) (дата звернения: 30.05.2025).
15. Park R. S., Folkner W. M., Williams J. G., Boggs D. H. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 // The Astronomical Journal. – 2021. – Vol. 161. – Art. 105. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/349188880\\_The\\_JPL\\_Planetary\\_and\\_Lunar\\_Ephemerides\\_DE440\\_and\\_DE441](https://www.researchgate.net/publication/349188880_The_JPL_Planetary_and_Lunar_Ephemerides_DE440_and_DE441) (дата звернения: 30.05.2025).
16. Popescu M. M. et al. Discovery and physical characterization of near-Earth asteroid 2023 DZ2 // Astronomy & Astrophysics. – 2024. – Vol. 676. – A126. – Режим доступа: [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2023/08/aa46751-23/aa46751-23.html#:~:text=theoretically%20possible%20in%20the%20absence,to%20past%20and%20future%20close](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/08/aa46751-23/aa46751-23.html#:~:text=theoretically%20possible%20in%20the%20absence,to%20past%20and%20future%20close) (дата звернения: 30.05.2025).

Додаток А. Таблиця 1. Геоцентричні орбітальні елементи

Date	e	i [deg]	$\Omega$ [deg]	$\omega$ [deg]
2024 09 25	1.1015035328	95.3071123191	283.8155335051	332.4108580551
2024 09 26	1.0789762293	95.2831061537	284.5532298077	331.2732535787
2024 09 27	1.0571470756	95.2583271226	285.1784285995	330.0987207652
2024 09 28	1.0361500465	95.2343002514	285.6967931669	328.9163423865
2024 09 29	1.0160313087	95.2121323359	286.1172460579	327.752507803
2024 09 30	0.9967642306	95.1924630657	286.4518240594	326.6308806585
2024 10 01	0.9782629997	95.1754198187	286.7156973626	325.5721461106
2024 10 02	0.9603953325	95.1605845683	286.9270938446	324.5935376603
2024 10 03	0.9429950273	95.146985569	287.1069503738	323.7082620486
2024 10 04	0.9258746747	95.1331224952	287.2782356714	322.9249843839
2024 10 05	0.9088382412	95.1170240779	287.4650201902	322.2475029159
2024 10 06	0.8916928974	95.0963267567	287.6914635128	321.6746488153
2024 10 07	0.8742595537	95.0683568067	287.9809112603	321.2003237853
2024 10 08	0.8563820837	95.0302004837	288.3552304099	320.8134775813
2024 10 09	0.8379359496	94.9787576536	288.8343852398	320.497762922
2024 10 10	0.818837633	94.9107923131	289.4361062677	320.2306125151
2024 10 11	0.7990566502	94.8230151712	290.1753746238	319.9815920531
2024 10 12	0.7786317026	94.7122541643	291.0633771145	319.7101476722
2024 10 13	0.757691313	94.5757786608	292.1056407701	319.363359543
2024 10 14	0.7364766715	94.4118236428	293.2993116058	318.8750459196
2024 10 15	0.7153602206	94.2202870654	294.6300627598	318.1682885266
2024 10 16	0.6948486513	94.0034406057	296.0697995258	317.1634587849
2024 10 17	0.6755566195	93.7663558389	297.5767453165	315.7921404478
2024 10 18	0.6581426475	93.5167327451	299.0990162593	314.0138205976
2024 10 19	0.643214136	93.264030227	300.5812453048	311.8288404721
2024 10 20	0.6312277933	93.0181558849	301.972087087	309.2811891111
2024 10 21	0.6224198898	92.7882051131	303.2299294144	306.4493906214
2024 10 22	0.6167879691	92.5816577443	304.3252891446	303.4297038227
2024 10 23	0.6141208467	92.4041419949	305.2401450449	300.3185828111
2024 10 24	0.6140556413	92.2596102033	305.9655656847	297.1996845803
2024 10 25	0.6161385479	92.1506783318	306.4990594235	294.1371123066
2024 10 26	0.6198750742	92.0789289383	306.8425531732	291.1738224811
2024 10 27	0.6247659898	92.0450718395	307.0013319633	288.3331419048
2024 10 28	0.6303318218	92.0489378458	306.9838832409	285.6216150573
2024 10 29	0.6361308912	92.0893350768	306.8023857783	283.0321108935
2024 10 30	0.6417752171	92.1638319769	306.4734864267	280.5467522347
2024 10 31	0.646946739	92.2685530066	306.0189690913	278.1396259925
2024 11 01	0.6514142158	92.3980799102	305.4659390237	275.7794030042
2024 11 02	0.6550494211	92.5455353645	304.8462474296	273.4320120778
2024 11 03	0.6578402388	92.7028823702	304.1950755851	271.063448825
2024 11 04	0.6598981522	92.8614112753	303.5488412172	268.6427220469
2024 11 05	0.6614583034	93.0123312311	302.9427887321	266.1448940352
2024 11 06	0.6628713221	93.1473619244	302.4086816457	263.5541632574

Date	e	i [deg]	$\Omega$ [deg]	$\omega$ [deg]
2024 11 07	0.6645868193	93.2592476316	301.9728952116	260.8669276235
2024 11 08	0.6671283332	93.3421774698	301.6549667093	258.0946768936
2024 11 09	0.6710586407	93.3921630961	301.4664199839	255.2663177625
2024 11 10	0.6769335824	93.4074639038	301.4095642122	252.4291212638
2024 11 11	0.68524343	93.3891319197	301.4760623596	249.6470340833
2024 11 12	0.6963450524	93.3416569329	301.6454029873	246.994973115
2024 11 13	0.7103960053	93.2735332426	301.8839228465	244.5484518237
2024 11 14	0.7273101417	93.1974028195	302.1454742343	242.3697684448
2024 11 15	0.7467565368	93.1293868361	302.3747864317	240.4944267708
2024 11 16	0.7682130184	93.087434477	302.5136961796	238.9227509295
2024 11 17	0.7910641599	93.0889683092	302.508969347	237.6201489469
2024 11 18	0.8147139316	93.1485100798	302.3193764248	236.525580028
2024 11 19	0.8386792609	93.2760023728	301.9199288862	235.5641887248
2024 11 20	0.8626442687	93.4761692645	301.302587519	234.6592553752
2024 11 21	0.8864745068	93.7487860629	300.4742377258	233.740475335
2024 11 22	0.9102035778	94.0894659881	299.4533863836	232.7481259982
2024 11 23	0.9340071006	94.4905840476	298.2668198289	231.634271855
2024 11 24	0.9581747075	94.9421158954	296.9468648688	230.3625101528
2024 11 25	0.9830847857	95.4323293726	295.529361737	228.9073937686
2024 11 26	1.0091820203	95.9483632089	294.05215853	227.2541243373
2024 11 27	1.0369552086	96.4767596774	292.5538449054	225.3986524922
2024 11 28	1.0669120303	97.0040078924	291.0724789145	223.3480080569
2024 11 29	1.0995481388	97.5171230471	289.6441625172	221.1204936072
2024 11 30	1.1353098519	98.0042489005	288.3014522174	218.7453024699

**Додаток Б. Таблиця 2. Розраховані відстані  $r$  швидкості  $v$  гінетичні  $T$   
та потенціальні  $U$  енергії та різниця енергій  $E'$**

Time (UTC)	$r$ [km]	$v$ [km/s]	$T$ [km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$U$ [km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$E'$ [km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
2024-09-25	3281023.30071	0.5469	0.14955	0.12149	0.02806
2024-09-26	3323050.8816	0.53285	0.14196	0.11995	0.02201
2024-09-27	3363938.30431	0.51874	0.13455	0.11849	0.01606
2024-09-28	3403669.85225	0.50465	0.12734	0.11711	0.01023
2024-09-29	3442232.13938	0.49062	0.12036	0.1158	0.00456
2024-09-30	3479614.11594	0.47672	0.11363	0.11455	-0.00092
2024-10-01	3515807.0315	0.46299	0.10718	0.11337	-0.00619
2024-10-02	3550804.35966	0.44949	0.10102	0.11226	-0.01124
2024-10-03	3584601.67987	0.43626	0.09516	0.1112	-0.01604
2024-10-04	3617196.51154	0.42334	0.08961	0.1102	-0.02059
2024-10-05	3648588.09967	0.41077	0.08437	0.10925	-0.02488
2024-10-06	3678777.15701	0.39858	0.07943	0.10835	-0.02892
2024-10-07	3707765.56901	0.38679	0.0748	0.1075	-0.0327
2024-10-08	3735556.06447	0.37543	0.07047	0.1067	-0.03623
2024-10-09	3762151.84417	0.36449	0.06643	0.10595	-0.03952
2024-10-10	3787556.14503	0.35397	0.06265	0.10524	-0.04259
2024-10-11	3811771.70282	0.34385	0.05912	0.10457	-0.04545
2024-10-12	3834800.0709	0.33408	0.0558	0.10394	-0.04814
2024-10-13	3856640.76865	0.32459	0.05268	0.10335	-0.05068
2024-10-14	3877290.28854	0.31527	0.0497	0.1028	-0.05311
2024-10-15	3896741.09342	0.306	0.04682	0.10229	-0.05547
2024-10-16	3914980.86491	0.29664	0.044	0.10181	-0.05782
2024-10-17	3931992.34624	0.28708	0.04121	0.10137	-0.06017
2024-10-18	3947754.0506	0.27725	0.03843	0.10097	-0.06254
2024-10-19	3962241.83412	0.26715	0.03568	0.1006	-0.06492
2024-10-20	3975430.97908	0.25688	0.03299	0.10027	-0.06727
2024-10-21	3987298.23099	0.24658	0.0304	0.09997	-0.06957
2024-10-22	3997823.32129	0.23646	0.02796	0.0997	-0.07175
2024-10-23	4006989.79285	0.22675	0.02571	0.09948	-0.07377
2024-10-24	4014785.22069	0.21767	0.02369	0.09928	-0.07559
2024-10-25	4021201.05256	0.20946	0.02194	0.09912	-0.07719
2024-10-26	4026232.28945	0.20236	0.02047	0.099	-0.07853
2024-10-27	4029877.15333	0.19656	0.01932	0.09891	-0.07959
2024-10-28	4032136.81135	0.19228	0.01849	0.09886	-0.08037
2024-10-29	4033015.16706	0.18965	0.01798	0.09883	-0.08085
2024-10-30	4032518.69506	0.18881	0.01782	0.09885	-0.08102
2024-10-31	4030656.28015	0.18978	0.01801	0.09889	-0.08088
2024-11-01	4027439.02013	0.19256	0.01854	0.09897	-0.08043
2024-11-02	4022879.95873	0.19707	0.01942	0.09908	-0.07967
2024-11-03	4016993.72865	0.20315	0.02064	0.09923	-0.07859
2024-11-04	4009796.09983	0.21064	0.02219	0.09941	-0.07722

Time (UTC)	r [km]	v [km/s]	T [km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	U [km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	E' [km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
2024-11-05	4001303.43929	0.21935	0.02406	0.09962	-0.07556
2024-11-06	3991532.09335	0.22906	0.02623	0.09986	-0.07363
2024-11-07	3980497.69782	0.23959	0.0287	0.10014	-0.07144
2024-11-08	3968214.41238	0.25074	0.03144	0.10045	-0.06901
2024-11-09	3954694.0707	0.26236	0.03442	0.10079	-0.06638
2024-11-10	3939945.25185	0.27429	0.03762	0.10117	-0.06355
2024-11-11	3923972.32614	0.28641	0.04102	0.10158	-0.06056
2024-11-12	3906774.61601	0.29862	0.04459	0.10203	-0.05744
2024-11-13	3888345.92216	0.31084	0.04831	0.10251	-0.0542
2024-11-14	3868674.73609	0.32303	0.05217	0.10303	-0.05086
2024-11-15	3847745.40123	0.33519	0.05617	0.10359	-0.04742
2024-11-16	3825540.23406	0.34735	0.06032	0.10419	-0.04387
2024-11-17	3802042.24642	0.35957	0.06464	0.10484	-0.04019
2024-11-18	3777237.83445	0.37191	0.06916	0.10553	-0.03637
2024-11-19	3751118.8197	0.38445	0.0739	0.10626	-0.03236
2024-11-20	3723683.53378	0.39722	0.07889	0.10704	-0.02815
2024-11-21	3694937.01587	0.41025	0.08415	0.10788	-0.02373
2024-11-22	3664890.63012	0.42354	0.08969	0.10876	-0.01907
2024-11-23	3633561.44745	0.4371	0.09553	0.1097	-0.01417
2024-11-24	3600971.64502	0.45092	0.10166	0.11069	-0.00903
2024-11-25	3567148.05234	0.46496	0.10809	0.11174	-0.00365
2024-11-26	3532121.87146	0.4792	0.11482	0.11285	0.00197
2024-11-27	3495928.53388	0.49363	0.12183	0.11402	0.00782
2024-11-28	3458607.62183	0.5082	0.12913	0.11525	0.01389
2024-11-29	3420202.76605	0.52289	0.13671	0.11654	0.02017
2024-11-30	3380761.43176	0.53767	0.14455	0.1179	0.02664