

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І.
МЕЧНИКОВА

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра фізики та астрономії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

«Походження Об'єктів "Гарячої популяції" у Поясі Койпера»

«Origin of "hot population" objects in the Kuiper Belt»

Виконала: здобувачка денної форми навчання
спеціальності 104- Фізика та астрономія
(код, назва спеціальності)

Освітня програма Фізика та астрономія
(назва)

Охотко Ганна Костянтинівна
(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник к.ф.-м.н., Базєй О. А. _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к.ф.-м.н., Кошкін М. І.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
Фізики та астрономії
№ ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Завідувач кафедри
_____ Гоцульський Володимир
(підпис) (прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № ____
протокол № __ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК
_____ Гоцульський Володимир
(підпис) (прізвище, ім'я)

Одеса 2024

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Еволюція поясу Койпера	5
1.1. Вплив міграції планет-гігантів на утворення поясу Койпера	5
1.2. Популяції об'єктів поясу Койпера	8
1.3. Фізичні параметри об'єктів «гарячої» популяції	10
2. Чисельне інтегрування орбіт малих тіл Сонячної системи	14
2.1. Метод інтегрування Еверхарта	14
2.2 . Фундаментальні рівняння	16
2.3. Контроль точності методу	18
3. Походження об'єктів «гарячої» популяції поясу Койпера	19
3.1. Вибір об'єктів дослідження	19
3.2. Міграція обраних об'єктів «гарячої» популяції	22
3.3. Точність результату інтегрування	51
Результати роботи та висновки	51
Список використаних джерел	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

а.о. – астрономічна одиниця. $1 \text{ а.о.} = 149\,597\,870\,700 \text{ м.}$

e – ексцентриситет орбіти.

i – нахил орбіти.

a – велика піввісь орбіти.

ТНО – транснептунові об'єкти.

D – діаметр.

H – абсолютна величина.

p – геометричне альbedo.

P – період обертання тіла.

t – час.

Δa – дрейф великої піввісі.

ВСТУП

Пояс Койпера є однією з найбільших структур у нашій Сонячній системі, що простягається від ~ 30 а.о. до ~ 55 а.о. за орбітою планети-гіганта Нептуна. На даний момент в астрономічних каталогах та базах даних налічують понад 2000 транснептунових об'єктів, а це становить лише невелику частку від загальної кількості об'єктів, які можуть існувати в даній області Сонячної системи.

Дослідження поясу Койпера є актуальним питанням у сучасній астрономії, оскільки об'єкти, які знаходяться в цій області є залишками планетезималей прото-Сонячної системи. А значить ці об'єкти несуть цінну інформацію про процеси, які відбувалися на етапі формування та розвитку еволюції Сонячної системи. Це дозволить краще зрозуміти, як планети та інші небесні тіла були сформовані та еволюціонували.

Вивчення поясу Койпера актуальне в дослідженні різноманітності малих тіл Сонячної системи, оскільки в даній області налічуються тисячі об'єктів. Це дасть краще розуміння в класифікації об'єктів за їхніми характеристиками та властивостями.

Інтерес представляє вивчення орбітальної міграції «гарячої» популяції поясу Койпера. За останніми даними, ці об'єкти мігрували із внутрішньої частини Сонячної системи до теперішньої області, а значить можуть бути залишками первісних планетезималей. Проте дана теорія вимагає підтвердження.

Основною метою даної роботи є вивчення походження та побудова треків міграції об'єктів, які утворюють «гарячу» популяцію поясу Койпера. Об'єктом дослідження роботи є обрані астероїди «гарячої» популяції з добре визначеними елементами орбіти. Методом дослідження є чисельне моделювання та інтегрування методом Еверхарта 15-го порядку.

1. ЕВОЛЮЦІЯ ПОЯСУ КОЙПЕРА

1.1. Вплив міграції планет-гігантів на утворення поясу Койпера

Еволюцію поясу Койпера розглядають в рамках загальноприйнятої моделі Ніцци, вперше опублікованою в 2005 році у роботах [1-2]. Початкові умови моделі Ніцци спрямовані на відображення стану внутрішньої та зовнішньої Сонячної системи на момент, коли акреційний диск зник. У роботах [1-5] вважається, що планети-гіганти на той час перебували на майже кругових і компланарних орбітах, що відповідає очікуванням теорії їх формування. Передбачається, що первісна конфігурація планет Сонячної системи мала значно менші відстані порівняно з сучасними. Орбіти планет-гігантів перебували в межах приблизно від ~ 5.5 а.о. до ~ 14 а.о. [3]. Сатурн знаходився ближче до Юпітера, ніж їхній взаємний орбітальний резонанс 1:2, що є необхідною умовою для запобігання значній міграції під час існування акреційного диска [1-3].

Згідно з теорією еволюції, вважається, що за орбітами планет-гігантів знаходиться область планетезимального диску. Внутрішній край диска розташований на $\sim 15,5$ а.о. від Сонця, а зовнішній край диска простягається до відстані ~ 34 а.о., що було визначено у статті [3]. За такої конфігурації первісної Сонячної системи впродовж мільйонів років, гравітаційні взаємодії планет та планетезималей збурюють орбіти одне одного, що спричиняє міграцію планет до зовнішньої частини Сонячної системи. Міграція планет-гігантів відбувається надзвичайно повільно, що обумовлено низькою швидкістю міграції планетезималей з диска.

Через тривалий проміжок часу, від ~ 60 мільйонів до $\sim 1,1$ мільярда років, Юпітер і Сатурн перетинають свій взаємний орбітальний резонанс 1:2 [3]. Перетин цього резонансу призводить до збурення їхніх ексцентриситетів до високих значень. Дана зміна ексцентриситетів

Юпітера і Сатурна впливає на орбіти Урана і Нептуна. Як наслідок, крижані гіганти Уран і Нептун мігрують на орбіти з високим ексцентриситетом $e \approx 0.25-0.4$, що визначено у роботах [3-5].

Як видно з Рис.1, орбіта планети-гіганта Нептуна проникає в область планетезимального диска.

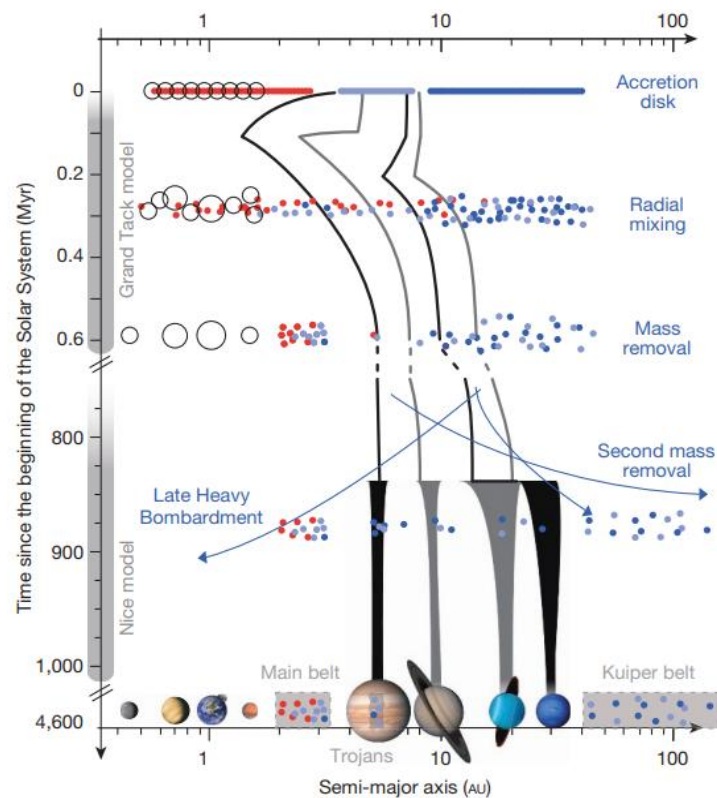


Рис.1. Зображення основних етапів еволюції Сонячної системи впродовж 4,6 мільярдів років. [6]

Гравітація крижаного гіганта Нептуна збурює планетезимальний диск, і частинки диску розсіюються в Сонячній системі та за її межі, як зображено на Рис.1.

У роботах [1-5] зазначено, що внаслідок гравітаційного впливу планетезимального диска, коли фаза взаємних зустрічей завершена, планети-гіганти поступово віддаляються одна від одної, продовжуючи

свою радіальну міграцію та зрештою досягають кінцевих орбіт, коли значна частина диска вже була усунена.

Детальніше розглянемо міграцію планетезимального диска, яка представлена на Рис.2 зі статті [7]. Частина малих тіл потрапляє на орбіти Юпітера і Сатурна, коли ці планети відходять від резонансу 1:2. Захоплені Юпітером у точках Лагранжа L4 та L5 планетезималі наразі утворюють популяцію троянських астероїдів.

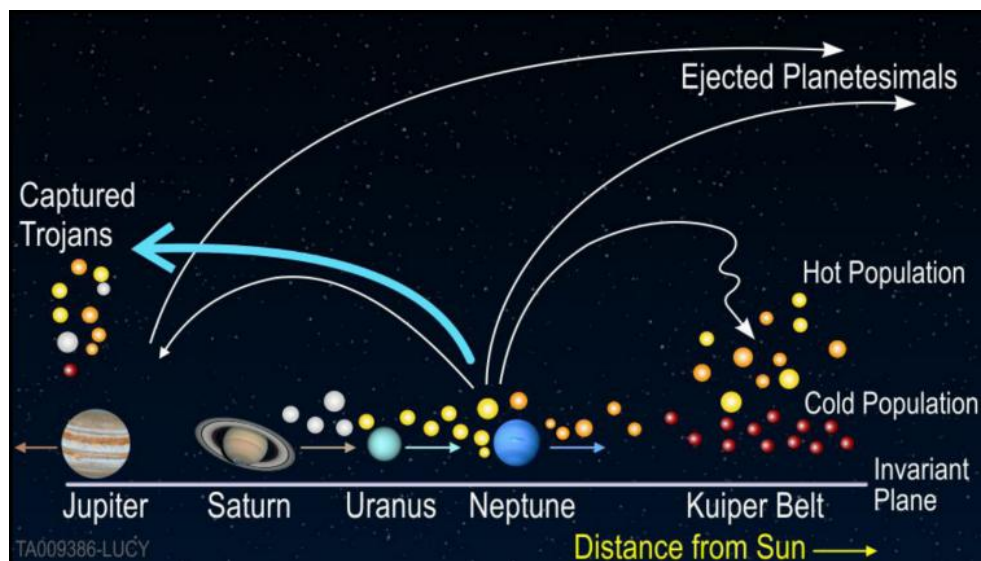


Рис.2. Зображення міграції планетезималей. [7]

Орбітальний розподіл захоплених троянців і їх загальна маса надзвичайно схожі на спостережувані розподіл і оцінену популяцію. Крім того, частинки диска можуть бути захоплені на орбіти навколо Сатурна, Урана та Нептуна під час фази взаємних зустрічей, що може пояснювати наявність деяких спостережуваних нерегулярних супутників у цих планет-гігантів.

На Рис.2 можна побачити, що значна частина планетезималей була висунута за межі Сонячної системи. Інша частина мігрувала до відстаней від ~ 30 а.о. до ~ 55 а.о. за орбітою Нептуна і утворила «гарячу» популяцію об'єктів в області поясу Койпера.

1.2. Популяції об'єктів поясу Койпера

Згідно з даними, описаними в роботах [7-9] в результаті процесу еволюції Сонячної системи за моделлю Ніцци, пояс Койпера налічує наразі дві популяції об'єктів – «гаряча» та «холодна». Незважаючи на загальне прийняття моделі Ніцци, вона вимагає уточнення утворення та еволюції поясу Койпера. Важливим аспектом моделі еволюції є те, що планетезимальний диск був обмежений до відстані $\sim 30\text{--}35$ а.о., інакше Нептун міг би мігрувати занадто далеко. Це узгоджується з гіпотезою, вперше висунутою у [10], що об'єкти «холодної» популяції поясу Койпера, які ми спостерігаємо, сформувалися всередині цієї області або за її межами, а «гаряча» популяція мігрувала впродовж мільярдів років до зовнішньої частини Сонячної системи під час еволюції планет.

У статті [10] було відмічено, що яскраві об'єкти, що належать до «гарячої» популяції, мають орбіти з великим нахилом на відміну від темніших, «холодних» об'єктів – це перша фізична відмінність. У статті [11] досліджується розподіл кольорів у поясі Койпера. За спостереженнями і результатами обробки, можна визначити дві кольорові групи: червоні (R) та дуже червоні (VR). Це відображає різницю в поверхневому складі двох груп, та, крім того, свідчить про те, що об'єкти поясу Койпера утворилися на досить широкому діапазоні відстаней. Спостереження кольору найкраще узгоджуються з гіпотезою, що об'єкти червоного кольору (R) утворилися на відстанях менше ~ 30 а.о., а дуже червоні об'єкти (VR) — на відстанях $\sim 30\text{--}40$ а.о. і більше. Відповідно, «гаряча» популяція налічує об'єкти червоного кольору (R), а «холодна» - дуже червоні об'єкти (VR), що є другою фізичною відмінністю між двома популяціями.

Також слід зауважити, що за астрономічними спостереженнями «холодна» популяція налічує велику кількість подвійних об'єктів, таких

як Arrokoth (486958). Даний тип об'єктів не зможе витримати близької зустрічі з Нептуном, бо гравітація планети-гіганта зруйнує подвійний астероїд. Це підтверджує припущення, що вірогідніше за все, «холодна» популяція утворилася в нинішній області поясу Койпера, а не мігрувала до нього [8]. На Рис.3 зображено розподіл за нахилами «гарячої» та «холодної» популяцій.

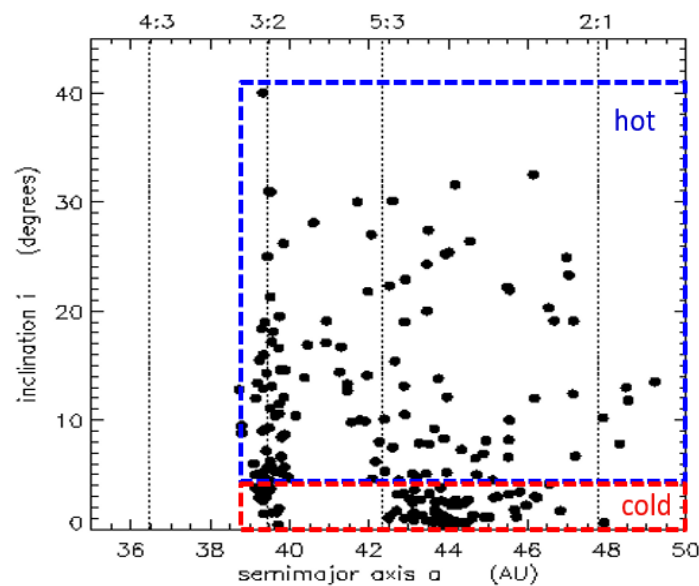


Рис.3. Зображення розподілу за нахилом від великої піввісі «гарячої» (синя) та «холодної» (червона) популяцій [12].

«Холодна» популяція характеризується невеликими нахилами, $i \leq 4^\circ$ і майже круговими орбітами. Орбіти «гарячої» популяції мають нахил в межах $4^\circ < i \leq 30^\circ - 40^\circ$ та високий ексцентриситет ($e > 0.07$). Через такий розкид нахилів та ексцентриситетів пояс Койпера не плоский, а має об'ємну форму [13].

Спираючись на дослідження, описані в роботах [9-13], можна зробити висновок, що орбітальні відмінності між «гарячими» та «холодними» об'єктами поясу Койпера вказують на те, що вони відрізняються не тільки фізично, а й динамічно також. Це є основою для

подальших досліджень формування «гарячої» популяції, що вона не була сформована в теперішній області поясу Койпера, а ймовірно за все, мігрувала до нього внаслідок гравітаційних взаємодій з планетою-гігантом.

1.3. Фізичні параметри об'єктів «гарячої» популяції

За даними орбітального розподілу об'єктів поясу Койпера з робіт [9-13], з всесвітніх баз даних було обрано групу об'єктів (41 об'єкт), які підходять під параметри орбіт «гарячої» популяції. А саме: $i > 4^\circ$; $e > 0.07$; $39.4 \text{ а.о.} \leq a \leq 55.8 \text{ а.о.}$; $D > 100 \text{ км.}$

Дослідження фізичних параметрів «гарячої» популяції було описано в бакалаврській роботі «Об'єкти "Гарячої популяції" у Поясі Койпера» та опубліковано у статті [14].

У роботі [14] було опубліковано фізичні параметри 41-го об'єкту, що належать до «гарячої» популяції поясу Койпера. Розподіл ексцентриситету від великої піввісі та нахилу від великої піввісі обраних об'єктів представлено на Рис.4 та Рис.5 відповідно.

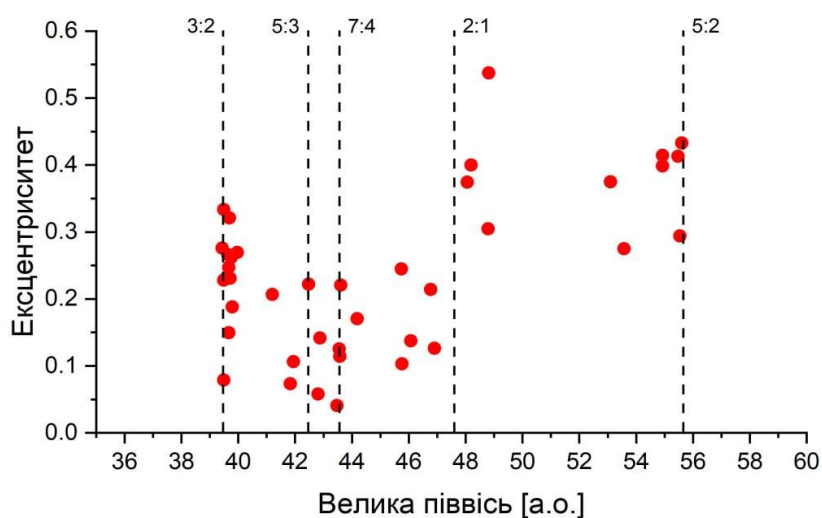


Рис.4. Розподіл 41 об'єкту «гарячої» популяції в координатах ексцентриситету від великої піввісі [14].

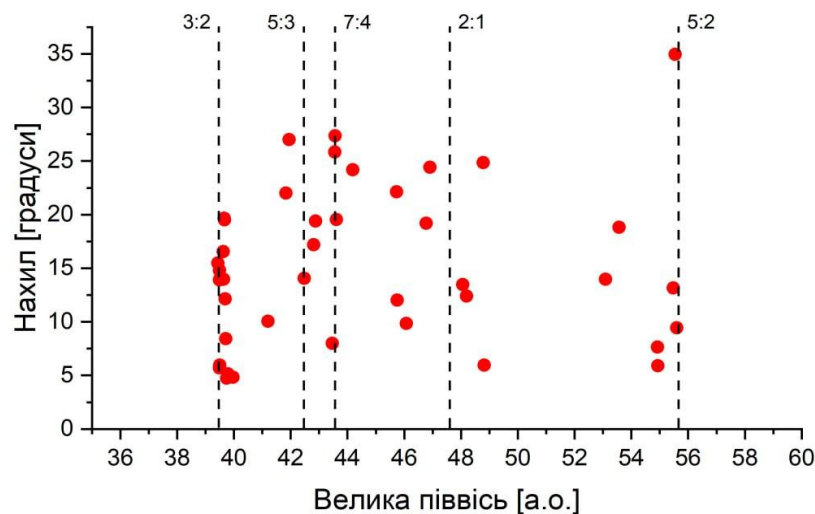


Рис.5 Розподіл 41 об'єкту «гарячої» популяції в координатах нахилу орбіти від великої піввісі [14].

На Рис.4 та Рис.5 орбітальний резонанс Нептуна з об'єктом (3:2, 5:3, 7:4, 2:1, 5:2) позначено пунктирними лініями. З графіків можна зробити висновок, що більшість об'єктів «гарячої» популяції знаходяться в резонансі 2:3 (тобто, об'єкт обертається навколо Сонця два рази за той час, як Нептун робить три обороти навколо Сонця).

За співвідношенням саме резонанс 2:3 наймінімальний, тому переважна більшість об'єктів перебуває саме в такій гравітаційній взаємодії з планетою-гігантом Нептуном. Це означає, що об'єкти зближаються з Нептуном частіше, ніж об'єкти, які знаходяться в орбітальних резонансах 5:3, 7:4, 2:1, 5:2, а тому і сильніше зазнають гравітаційного впливу від крижаного гіганта.

У роботі [14] представлено графіки залежності діаметру від абсолютної величини об'єктів «гарячої» популяції та альbedo від абсолютної величини, зображені на Рис.6 та Рис.7.

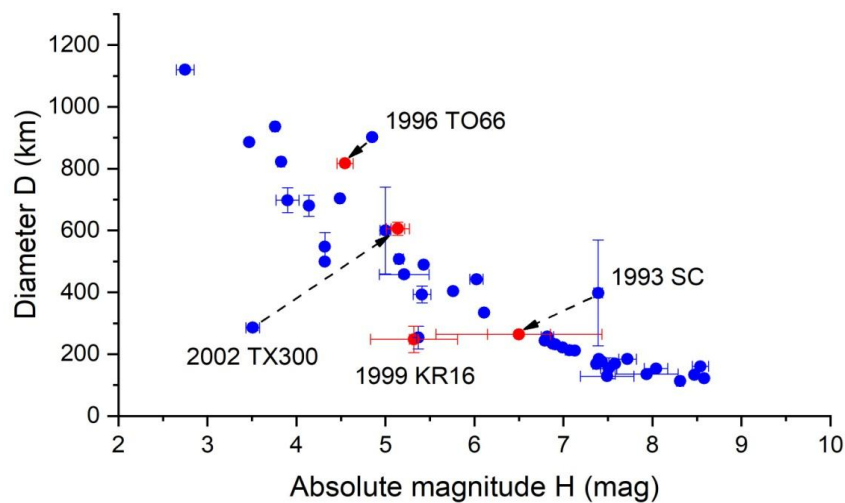


Рис.6. Графік залежності діаметру від абсолютної величини об'єктів «гарячої» популяції [14].

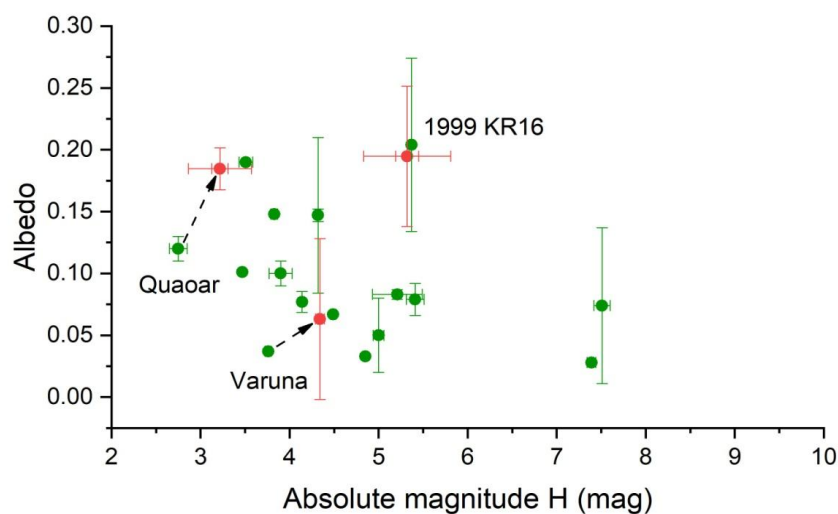


Рис.7. Графік залежності геометричного альбедо від абсолютної величини об'єктів «гарячої» популяції [14].

На графіку Рис.6 можна прослідкувати залежність близьку до логарифмічної. За даними, отриманими з бази даних «ALCDEF» [15], об'єкти 1993 SC, 1996 TO66, 1999 KR16, 2002 TX300 виходять за межі логарифмічної залежності. Тому у роботі [14] було проведено уточнення

значень діаметру та абсолютної величини для цих об'єктів. Нові перераховані значення позначено червоним кольором на графіку Рис.6.

Можна побачити, що нові точки наблизилися до логарифмічної залежності. Отже, можна зробити висновок, що нові отримані данні діаметру та абсолютної величини більш точні, ніж отримані з бази даних.

На графіку Рис.7 представлено залежність геометричного альбедо від абсолютної величини об'єктів «гарячої» популяції за даними отриманими з бази даних [15]. В залежність не входять об'єкти з геометричним альбедо $p = 0.057$. Оскільки це значення використовують як стандартну величину, в тому випадку, коли геометричне альбедо не визначено на пряму зі спостережень.

На Рис.7 логарифмічна залежність майже не прослідковується. Для уточнення, в роботі [14] були перераховані значення геометричного альбедо та абсолютної величини для об'єктів 1999 KR16, Quaoar, Varuna (позначено червоним на Рис.7).

З Рис.7 можна зробити висновок, що ми маємо недостатньо фотометричних даних для об'єктів «гарячої» популяції. Це відкрите питання для подальшого дослідження і спостережень.

Одною з важливих фізичних характеристик є визначення альбедо об'єктів. Це було визначено у статті [14], де розраховано середнє значення геометричного альбедо, яке дорівнює $p = 0.104 \pm 0.054$. Можна стверджувати, що популяція «гарячих» об'єктів поясу Койпера низькоальбедна.

До того ж, у роботі [14] розглядається період обертання об'єктів «гарячої» популяції. Період обертання відомий у 19 обраних об'єктів та представлено на Рис.8, де позначено червоним кольором.

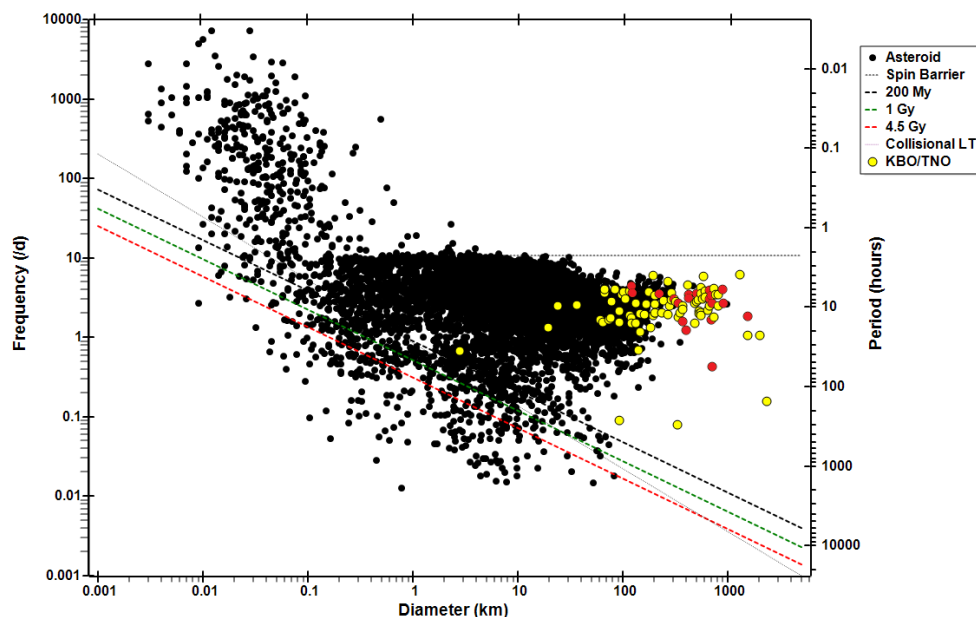


Рис.8. Залежність швидкості обертання від діаметра малих тіл Сонячної системи. Червоним кольором позначено об'єкти «гарячої» популяції. Жовтим кольором всі об'єкти ТНО [14].

З Рис.8 видно, що обрані об'єкти знаходяться області ТНО за розподілом та не перевищують спін-бар'єр в ~ 2.2 год. Діапазон відомих періодів обертання «гарячої» популяції в межах від ~ 4 год до ~ 60 год.

2. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОРБІТ МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Метод інтегрування Еверхарта

Метод інтегрування Еверхарта є чисельним методом, розробленим спеціально для інтегрування орбіт небесних тіл у завданнях небесної механіки, особливо для довгострокових обчислень у системах N тіл. Його розробив Едвард Еверхарт у 1974 році та описав у своїй роботі [16], як метод високого порядку, що дозволяє зберегти точність на великих інтервалах інтегрування. Метод Еверхарта широко застосовується в астрономії для моделювання орбіт астероїдів, комет та інших малих тіл

Сонячної системи, які рухаються під впливом гравітаційних збурень від великих планет.

Метод інтегрування Еверхарта має високий порядок точності, що може досягати 15-го порядку. Така висока точність дозволяє зменшити накопичення чисельних помилок навіть під час довготривалого інтегрування. Значення коефіцієнтів чисельного методу інтегрування розглядаються у статті [17].

Метод Еверхарта добре працює в задачах N тіл, де чисельні методи можуть стикатися з накопиченням помилок через вплив інших великих небесних тіл, як-от Сонце та великі планети. Цей метод дозволяє ~~досягти~~ врахувати всі гравітаційні взаємодії між тілами, що особливо корисно в задачах, де потрібно інтегрувати орбіти протягом багатьох століть.

Для малих тіл Сонячної системи, таких як астероїди, метод Еверхарта дозволяє обчислити їх орбіти з урахуванням впливу Сонця, гравітації великих планети і навіть світлового тиску. Завдяки високій точності, метод дозволяє також досліджувати довгострокову еволюцію орбіт астероїдів [16-19].

Метод Еверхарта став інструментом у теоретичних дослідженнях еволюції орбіт. Його використовують для дослідження періодичних та вікових змін в орбітальних параметрах, які мають велике значення для розуміння динамічної еволюції малих тіл Сонячної системи. В роботах [17-19] продемонстрована робота методу Еверхарта для даних досліджень.

Сонячна система має 8 великих планет, які відповідають таким умовам: перебувають на орбіті навколо Сонця, мають достатню масу, щоб їхня власна гравітація долала сили жорсткості, забезпечуючи форму гідростатичної рівноваги, і звільнили простір навколо своєї орбіти обертання навколо Сонця.

2.2. Фундаментальні рівняння методу Еверхарта

Диференціальні рівняння руху малого тіла розв'язуються в декартових координатах шляхом чисельного інтегрування методом Еверхарта 15-го порядку з автоматичним контролем кроку [16-18].

Як описано у роботі [16], в небесній механіці рівняння орбіти об'єкта має наступний вигляд:

$$\dot{x} = F(x, y, z, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, \dots, t), \quad (1)$$

де F – функція сили, яка залежить від часу t та положення тіла x, y, z , траєкторію якого треба інтегрувати, і також від положення інших тіл, які ідентифікуються індексами i, j .

Для кожного тіла існує три рівняння (1).

На початку інтегрування час скидається і позначається $t_1 = 0$. Відомі початкове положення об'єкта x_1 , швидкість $\dot{x}_1$ та сила F_1 . Тоді рівняння (1) можна записати в наступному вигляді:

$$\ddot{x} = F = F_1 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + \dots + A_N t^N. \quad (2)$$

Рівняння (2) – це розклад функції F у часовий ряд навколо нульового часу, де A – деякий коефіцієнт [16].

Інтегруємо рівняння (2) та отримуємо в результаті:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + \dot{x}_1 t + \frac{F_1 t^2}{2} + \frac{A_1 t^3}{6} + \dots + \frac{A_N t^{N+2}}{(N+1)(N+2)}, \\ x &= x_1 + F_1 t + \frac{A_1 t^2}{2} + \frac{A_2 t^3}{3} + \dots + \frac{A_N t^{N+1}}{(N+1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

F_n, x_n, t_n – це сила на одному з підкроків, t_n – час, x_n, t_n – положення тіла. Далі у статті [16] виводяться формули зв'язку значень A з F -значеннями, для цього треба зробити розширення:

$$F = F_1 + \alpha_1 t + \alpha_2 (t - t_2) + \alpha_3 (t - t_2)(t - t_3) + \dots. \quad (4)$$

Даний ряд (4) завершується відповідно до кількості доданків, що містяться в рівнянні (2).

Рівняння (4) скорочується в кожний момент часу t_n . Таким чином можна записати $F_2 = F_1 + \alpha_1 t$, $F_3 = F_1 + \alpha_1 t_3 + \alpha_1 t_3 t_3 - t_2$.

Використовуючи позначення $t_{nj} = t_n - t_j$, у роботі [16] отримано наступні рівняння:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{F_2 - F_1}{t_2}, \\ \alpha_2 &= \frac{\frac{(F_3 - F_1)}{t_3} - \alpha_1}{t_{32}}, \\ \alpha_3 &= \frac{\frac{\frac{(F_4 - F_1)}{t_4} - \alpha_1}{t_{42}} - \alpha_2}{t_{43}}, \\ \alpha_4 &= \frac{\frac{\frac{\frac{(F_5 - F_1)}{t_5} - \alpha_1}{t_{52}} - \alpha_2}{t_{53}} - \alpha_3}{t_{54}}.\end{aligned}\tag{5}$$

Значення α – розділена різниця, наприклад $\alpha_3 = 0, t_2, t_3, t_4$.

Стандартне позначення розділених різниць була б громіздкою, тому замість неї використовується компактне значення α [16]. Кожна нова сила F додає ще одне значення α , не змінюючи жодного з попередніх.

Зв'язок між значеннями α та значеннями A у [16] визначається шляхом прирівнювання одних і тих же степенів t у рівняннях (2) і (4). Результат:

$$\begin{aligned}A_1 &= \alpha_1 + -t_2 \alpha_2 + t_2 t_3 \alpha_3 + \dots = c_{11} \alpha_1 + c_{21} \alpha_2 + c_{31} \alpha_3 + \dots \\ A_2 &= \alpha_2 + -t_2 - t_3 \alpha_3 + \dots = c_{22} \alpha_2 + c_{32} \alpha_3 + \dots \\ A_3 &= \alpha_3 + \dots = c_{33} \alpha_3 + \dots\end{aligned}\tag{6}$$

c -коефіцієнти мають ті самі співвідношення, що й числа Стірлінга першого роду.

Отже:

$$\begin{aligned} c_{ii} &= 1, \\ c_{i1} &= -t_i c_{i-1,1}, & i > 1, \\ c_{ij} &= c_{i-1,j-i} - t_i c_{i-j,j}, & 1 < j < i. \end{aligned} \quad (7)$$

Вони також є коефіцієнтами багаточлена, вираженого через його корені. Таким чином отримуємо кубічне рівняння з коренями t_2, t_3, t_4 це

$$-t_2 t_3 t_4 + t_2 t_3 + t_3 t_4 + t_2 t_4 t + -t_2 - t_3 - t_4 t^2 + 1 t^3 = 0, \quad (8)$$

де в дужках вказані величини c_{41}, c_{42}, c_{43} та c_{44} .

В інтегруванні, описаному у [16], одне α -значення знаходиться з кожним підкроком. Коли кожне знайдено, з рівнянь (6) стає відомим інше A -значення, і кожне попереднє A -значення коригується.

2.3. Точність інтегрування рівнянь руху

У методі використовується автоматичний вибір довжини кроку, що дозволяє адаптуватися до складності гравітаційних збурень. Це особливо важливо для обчислення, де гравітаційна взаємодія між об'єктами змінюється з часом, наприклад, при зближенні небесних тіл.

Точність виводиться в оригінальному методі Еверхарта [16] та у статтях [17-19]. При використанні чисельного інтегрування рівнянь руху потрібен обов'язковий контроль збіжності моделі або так званий контроль кроку інтегрування. Це відбувається методами прямого-зворотного інтегрування рівнянь руху з подвоєнням кроку на певному обраному інтервалі, в результаті отримуємо величину розбіжності чисельної моделі.

Як критерій стійкості, використовується закон збереження енергії: в замкнутій системі N тіл, сума кінетичної (T) та потенційної (U) енергій постійна:

$$T - U = const. \quad (9)$$

Для зручності використання, запишемо вираз (9) у наступному вигляді:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i \left(x_i' - \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i'}{M} \right)^2 + \left(y_i' - \frac{\sum_{i=1}^N m_i y_i'}{M} \right)^2 + \left(z_i' - \frac{\sum_{i=1}^N m_i z_i'}{M} \right)^2 - G \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{m_i m_j}{r_{ij}} = const, \quad (10)$$

де $M = \sum_{i=1}^N m_i$. [18]

3. ПОХОДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ «ГАРЯЧОЇ» ПОПУЛЯЦІЇ В ПОЯСІ КОЙПЕРА

3.1. Вибір об'єктів дослідження

Для дослідження еволюції орбіт малих тіл поясу Койпера, з 41-го об'єкту «гарячої» популяції було обрано 19 об'єктів з добре відомими орбітами та фізичними параметрами. Орбітальні та фізичні параметри об'єктів були взяті з всесвітніх баз даних «ALCDEF»: Asteroid Lightcurve Data Exchange Format [15], «IAU Minor Planet Center» (MPC) [20].

Дані наведені в Таб.1, де червоним виділено об'єкти, значення діаметра, альbedo або абсолютної величини було уточнено в роботі [14] (представлено на Рис.6, Рис.7).

Таблиця 1.

Орбітальні та фізичні параметри обраних об'єктів «гарячої» популяції поясу Койпера

Назва	H [маг]	a [а.о.]	e	i [град]	p	P [год]	P error	D [км]	D error
1994 TB	7.93	39.8445	0.3232	12.1378	0.057	6.0	0.1	135.4	-
1996 TO66	4.55	43.6037	0.1125	27.3525	0.033	7.9	0.04	817.1	-
Varuna	4.34	42.9440	0.0567	17.1610	0.063	6.3	0.000006	936.0	-
1995 SM55	4.49	42.0797	0.1094	26.9894	0.067	8.1	0.02	704.0	-

Продовження табл.1

Назва	H [mag]	a [a.o.]	e	i [град]	p	P [год]	P error	D [км]	D error
1998 SM165	6.02	48.1162	0.3731	13.4666	0.057	8.0	0.02	385.1	-
1999 DE9	5.15	55.0139	0.4159	7.6265	0.057	24.0	-	507.7	-
1995 QY9	7.49	40.0550	0.2699	4.8297	0.057	7.0	0.1	128.7	-
Huya	5.21	39.2772	0.2733	15.4750	0.083	5.3	0.05	406.0	16
1999 KR16	5.32	48.5751	0.3016	24.8595	0.195	5.8	-	248.1	42.64
Lempo	5.41	39.8059	0.2321	8.4094	0.079	6.2	-	393.0	27
Quaoar	3.22	43.3126	0.0395	7.9913	0.185	17.7	0.05	871.6	0.99
2002 AW197	3.62	46.9818	0.1255	24.3880	0.101	8.8	0.05	886.0	-
2002 TX300	5.14	43.6137	0.1240	25.8401	0.190	8.2	0.05	605.8	21.2
2002 UX25	3.98	42.9901	0.1440	19.3805	0.100	16.8	-	698.0	40
1999 DF9	6.11	46.1043	0.1387	9.8351	0.057	6.7	-	333.9	-
2002 TC302	4.32	55.7661	0.2971	34.9515	0.147	56.1	0.2	499.0	5
2003 VS2	4.32	39.6241	0.0811	14.7925	0.147	7.4	0.001	548.0	45
1999 OY3	6.79	44.0766	0.1686	24.2159	0.057	18.0	0.02	244.1	-
2004 GV9	4.14	41.7472	0.0728	22.0313	0.077	5.9	0.03	680.0	34

Розподіл обраних 19 об'єктів «гарячої» популяції поясу Койпера за ексцентриситетом від великої піввісі та нахилом орбіти від великої піввісі представлено у вигляді графіків на Рис.9 та Рис.10. Пунктирними лініями на графіках позначено орбітальні резонанси з планетою-гігантом Нептуном (3:2, 5:3, 7:4, 2:1, 5:2).

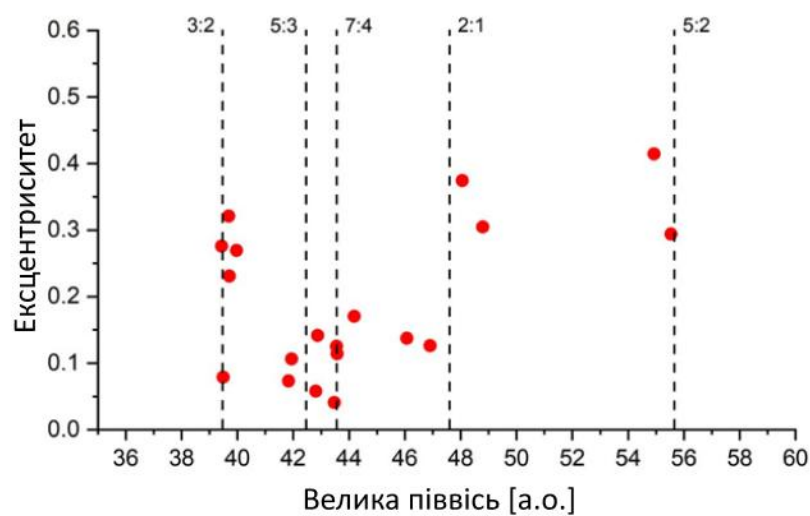


Рис.9. Розподіл 19 обраних об'єктів «гарячої» популяції в координатах ексцентриситету від великої піввісі.

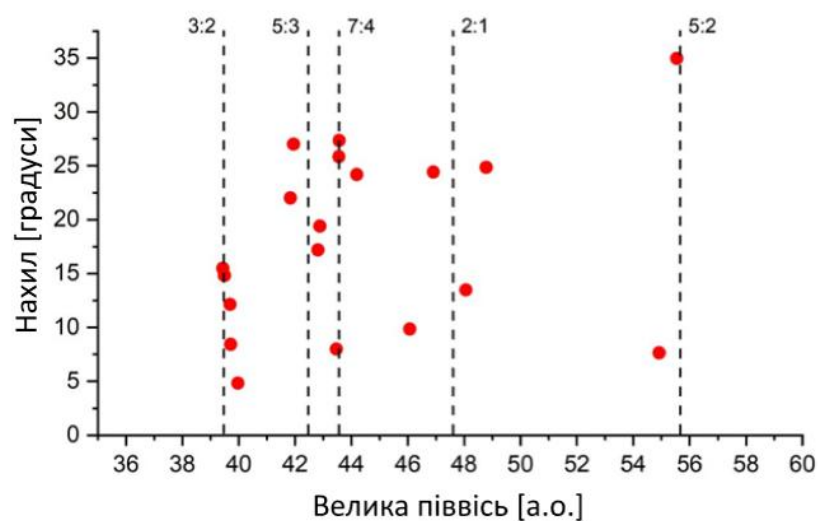


Рис.10. Розподіл 19 обраних об'єктів «гарячої» популяції в координатах нахилу орбіти від великої піввісі.

Як показано на Рис.9 та Рис.10 більшість об'єктів перебуває в орбітальному резонансі з Нептуном 3:2.

3.2. Міграція обраних об'єктів «гарячої» популяції

Дослідження міграції «гарячої» популяції було зроблено на інтеграторі Еверхарта 15-го порядку (описаний в розділі 2 та [16-19]). Замість стандартної моделі, використовувалась гравітаційна модель з Сонця, 7 великих планет: Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран та Нептун (Меркурій не було включено, оскільки його гравітація не впливає на міграцію об'єктів поясу Койпера), та Плутона.

Координати положення і швидкості об'єктів були обрані у всесвітньому сервісі «The JPL Horizons» [21].

The JPL Horizons» - це всесвітній сервіс з обчислення даних Сонячної системи. Налічує данні 1 420 925 астероїдів, 3 979 комет, 293 супутники планет (включаючи супутники карликової планети Плутон), 8 планет та Сонце, що зазначено в [21].

Початкові векторні координати положення та вектор швидкості об'єктів обиралися в координатній системі з центром у Сонці на дату 01.11.2024 з часом 00:00:00.0000 TDB.

Для того щоб показати напрямок тренду міграції об'єктів часового проміжку у ~32 тис. років цілком достатньо. Об'єкти «гарячої» популяції інтегрувалися методом Еверхарта 32100 років з кроком у 5000 секунд. В результаті отримано ~650 положень за елементами орбіти (a , e , i) для кожного з 19 об'єктів «гарячої» популяції.

Для кращого розуміння і візуалізації положень обраних об'єктів, результат інтегрування наведено у вигляді графіків в залежності ексцентриситету від великої піввісі та нахилу орбіти від великої піввісі і представлено на Рис.11 та Рис.12.

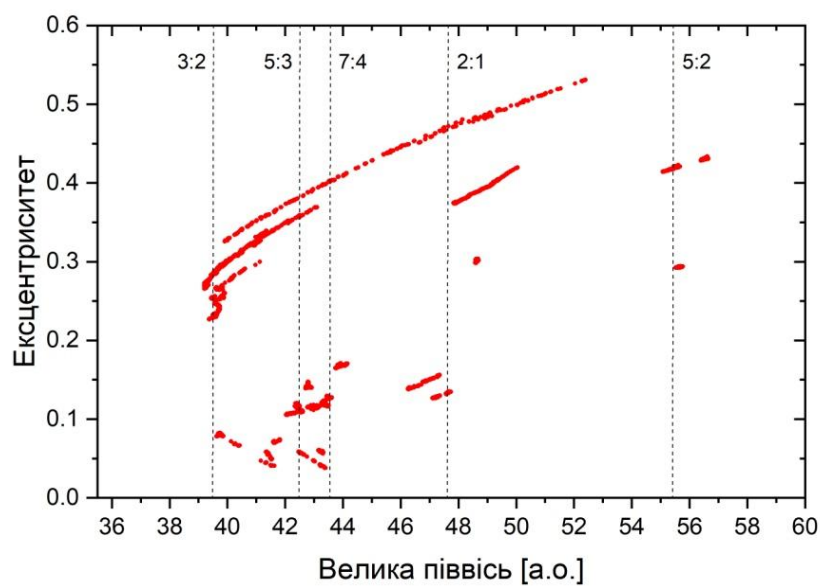


Рис.11. Еволюційні треки всіх 19-ти обраних об'єктів «гарячої» популяції в координатах ексцентриситету від великої піввісі.

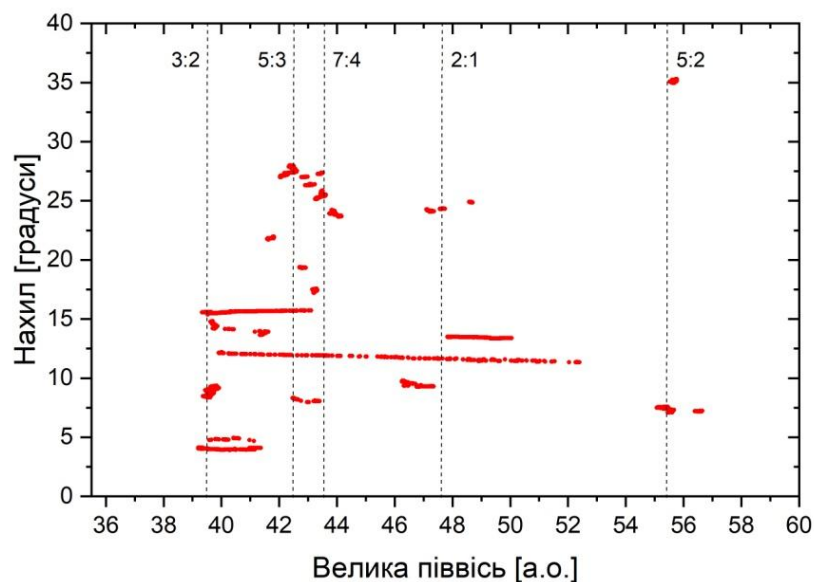


Рис.12. Еволюційні треки всіх 19-ти обраних об'єктів «гарячої» популяції в координатах нахилу орбіти від великої піввісі.

Об'єкт 1994 ТВ (15820) був відкритий 2 жовтня 1994 року в області поясу Койпера, як об'єкт, що перебуває в резонансі з Нептуном 3:2. [21] Результат інтегрування представлено на графіках Рис.13 та Рис.14.

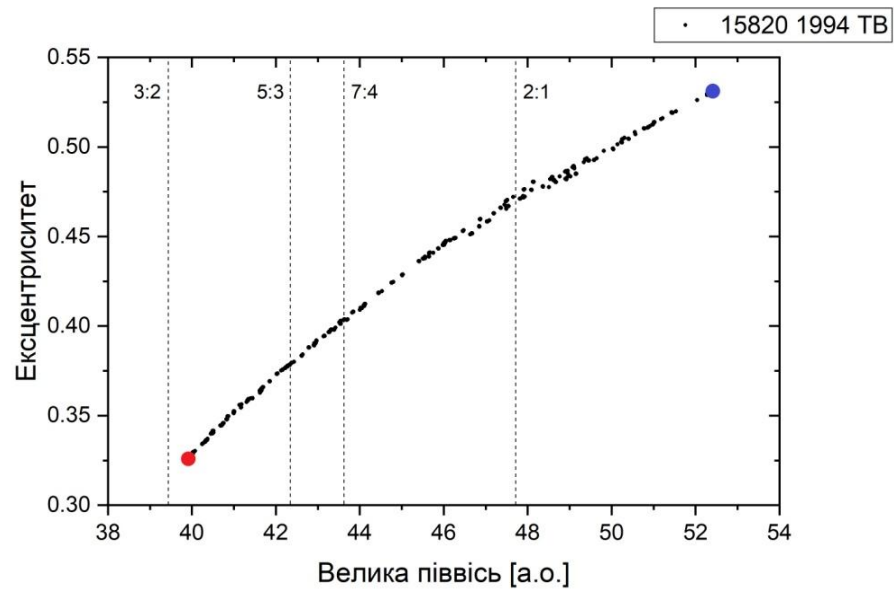


Рис.13. Еволюція орбіти 1994 ТВ (15820) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

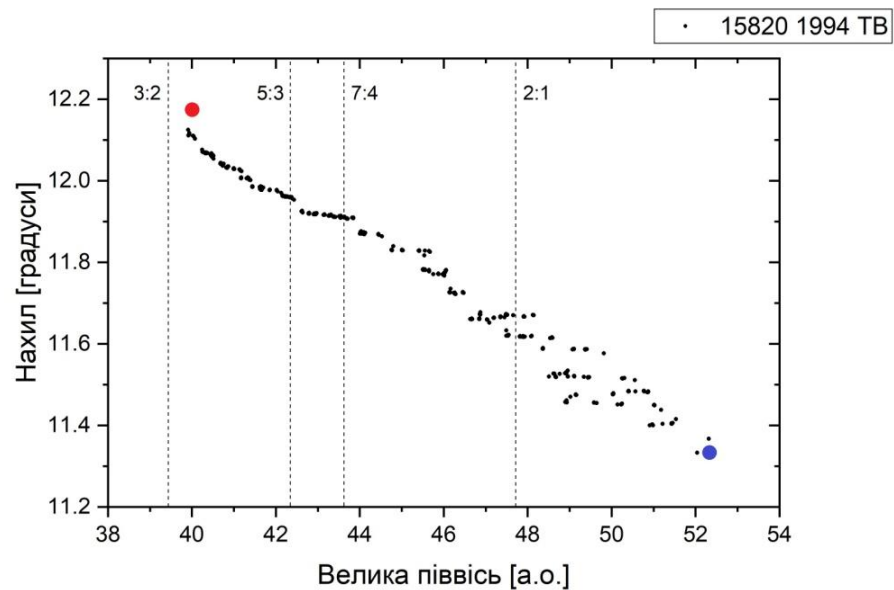


Рис.14. Еволюція орбіти 1994 ТВ (15820) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

З Рис.13 видно, що велика піввісь об'єкта збільшилася зі значення 39.8445 а.о. до 52.2830 а.о.. Це свідчить про те, що 1994 ТВ (15820) мігрує в зовнішню частину Сонячної системи, при цьому збільшуючи ексцентриситет орбіти до значення 0.5292. На Рис.13 показано, як зменшився нахил орбіти до значення 11.3314° .

Об'єкт 1996 ТО66 (19308) відкритий 12 жовтня 1996 року. Є одним з найбільших обраних об'єктів «гарячої» популяції і поясу Койпера загалом з $D = 817.1$ км. Астероїд перебуває в області між орбітальними резонансами 5:3 та 7:4 з Нептуном. [21]

Графіки міграції об'єкта представлено на Рис.15 та Рис.16.

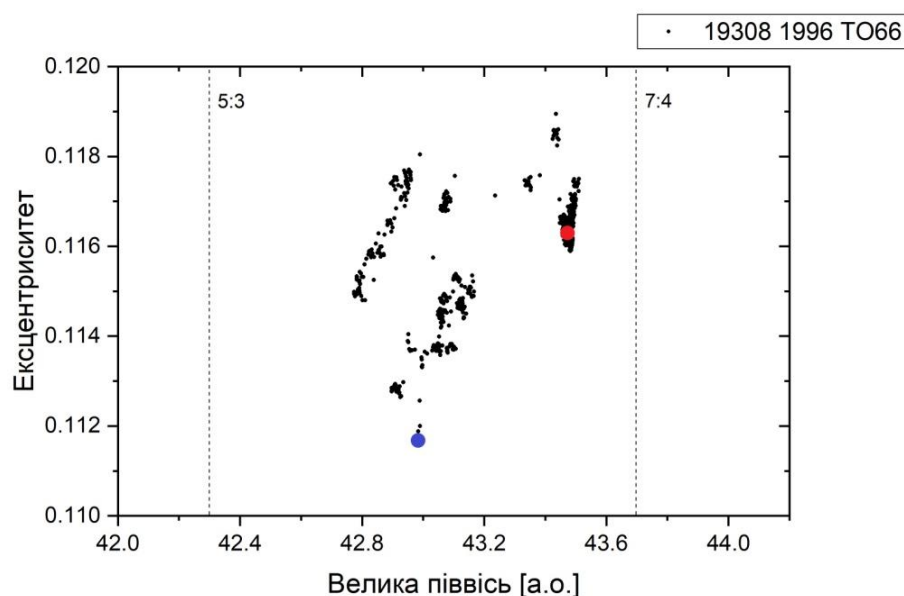


Рис.15. Еволюція орбіти 1996 ТО66 (19308) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

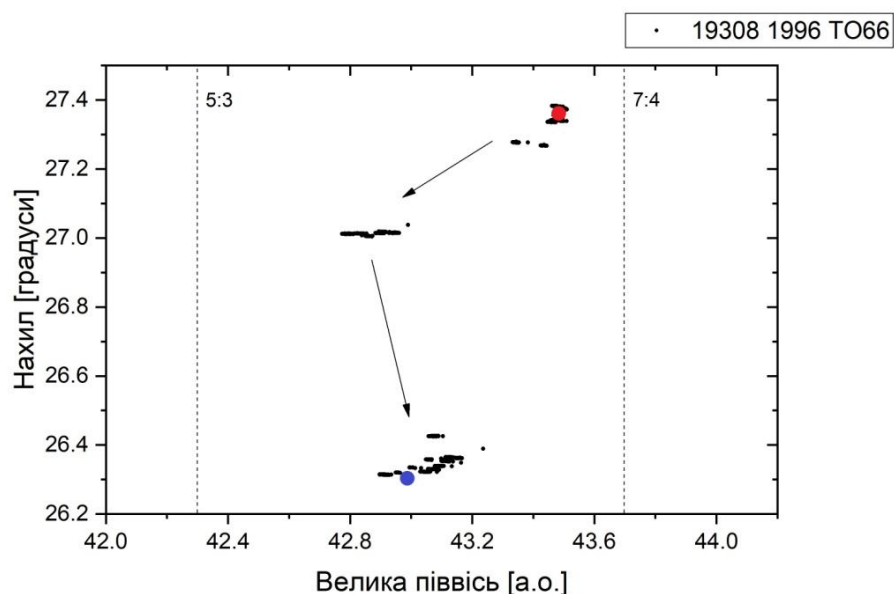


Рис.16. Еволюція орбіти 1996 TO66 (19308) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування. Стрілками показано напрямки зміни нахилу орбіти.

На Рис.15 та Рис.16 можна побачити, що велика піввісь зменшується до значення 42.9850 а.о., а значить, об'єкт мігрує у внутрішню частину Сонячної системи. Ексцентриситет зменшується до значення 0.1116. На Рис.16 видно, як нахил орбіти зменшується скачками до 26.3025° , на таку зміну впливають резонансні області з Нептуном.

Varuna (20000) – найбільший об'єкт «гарячої» популяції серед обраних і поясу Койпера загалом ($D = 936.0$ км), відкритий 28 листопада 2000 року в рамках проекту «Spacewatch». Астероїд знаходиться між двома резонансними областями з Нептуном. [21]

Результат інтегрування об'єкта представлено на Рис.17 та Рис.18, де видно, як велика піввісь збільшується незначно що може бути наслідком впливу резонансів 5:3 та 7:4 з Нептуном.

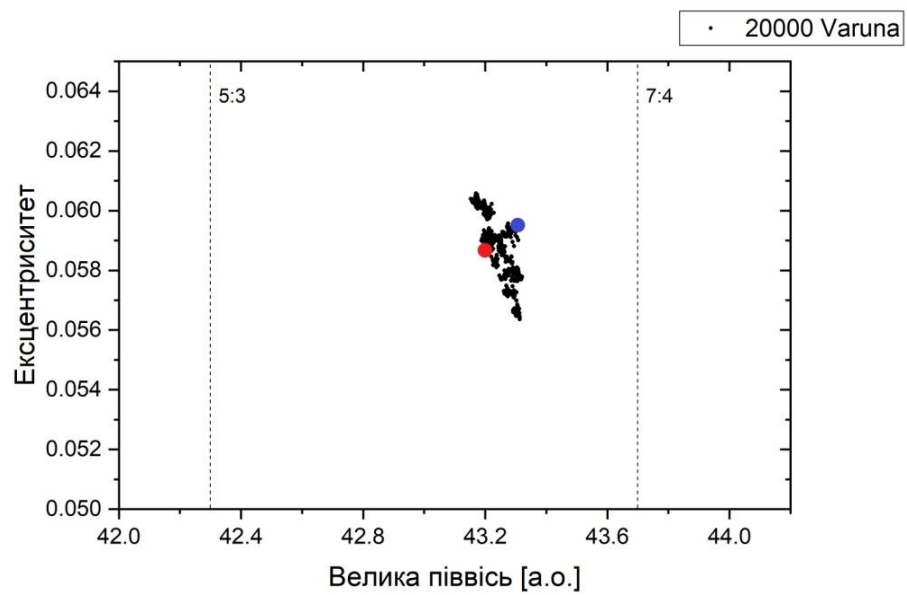


Рис.17. Еволюція орбіти Varuna (20000) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

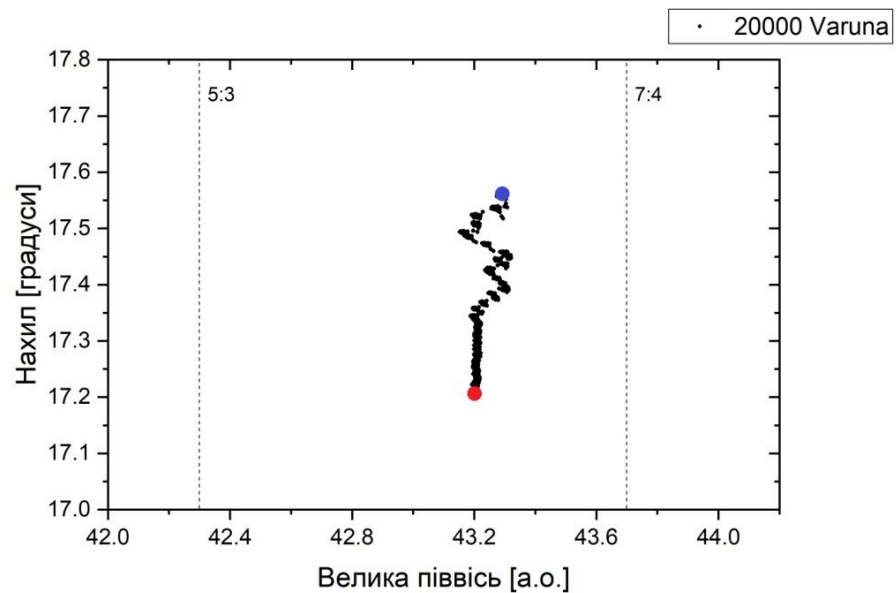


Рис.18. Еволюція орбіти Varuna (20000) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

1995 SM55 (24835) один з великих обраних об'єктів ($D = 704.0$ км), відкритий 19 вересня 1995 року [21]. На Рис.19 та Рис.20 зображено міграцію.

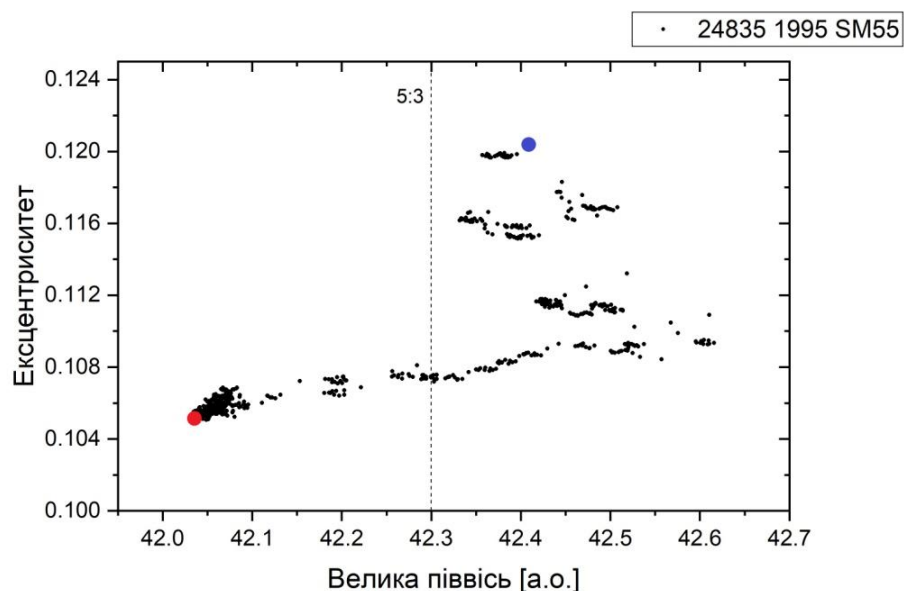


Рис.19. Еволюція орбіти 1995 SM55 (24835) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

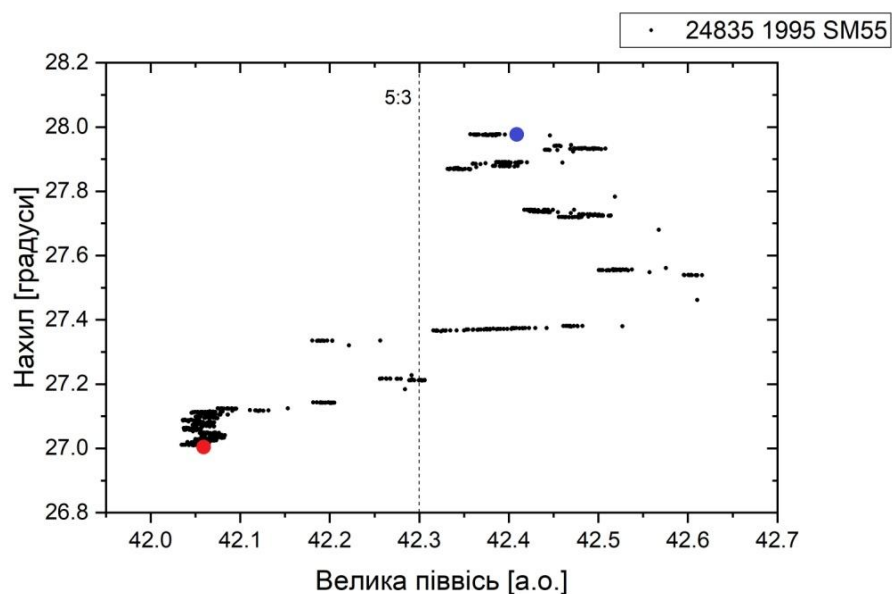


Рис.20. Еволюція орбіти 1995 SM55 (24835) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

1995 SM55 (24835) знаходиться поблизу резонансу 5:3 з Нептуном, як видно з Рис.19 та Рис.20, це впливає на результат інтегрування. Об'єкт рухається до зовнішньої частини Сонячної системи, а потім залишається перебувати в резонансній області. Ексцентриситет об'єкта 1995 SM55 (24835) збільшується до значення 0.1203 (Рис 19), також нахил орбіти збільшується до 27.9762° (Рис.20).

Об'єкт 1998 SM165 (26308) був відкритий 16 вересня 1998 року та являється подвійною системою астероїдів. 1998 SM165 (26308) – головне тіло, а його супутник знаходиться на відстані ~ 11310 км. До того ж, подвійна система перебуває в резонансі 2:1 з Нептуном. [21]

Для інтегрування було обрано основне тіло, як самостійний астероїд. На Рис.21 та Рис.22 добре видно, як об'єкт спочатку мігрує у внутрішню частину Сонячної системи, а потім, через вплив резонансу 2:1 з Нептуном, викидається у зовнішню частину Сонячної системи. З цього прикладу можна зробити висновок, що після резонансної області результат некоректний.

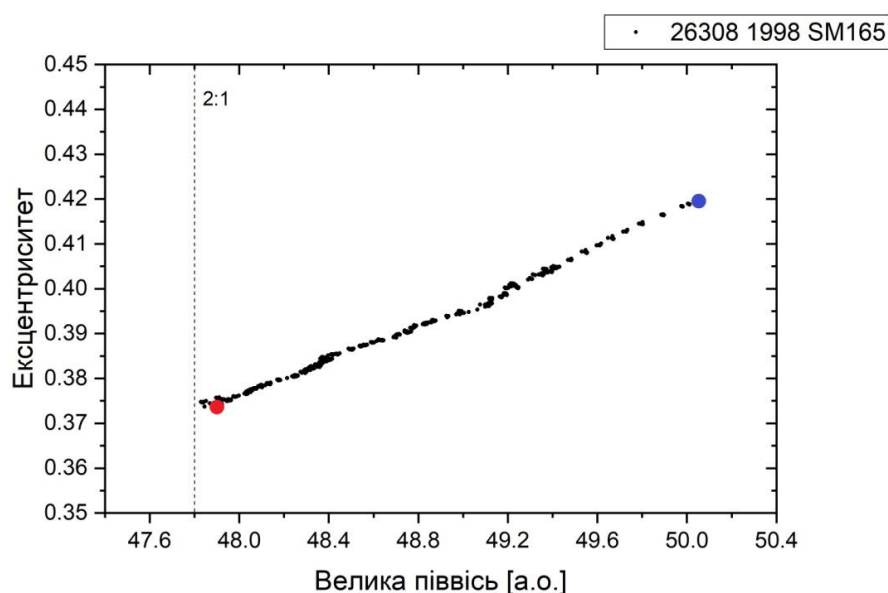


Рис.21. Еволюція орбіти 1998 SM165 (26308) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

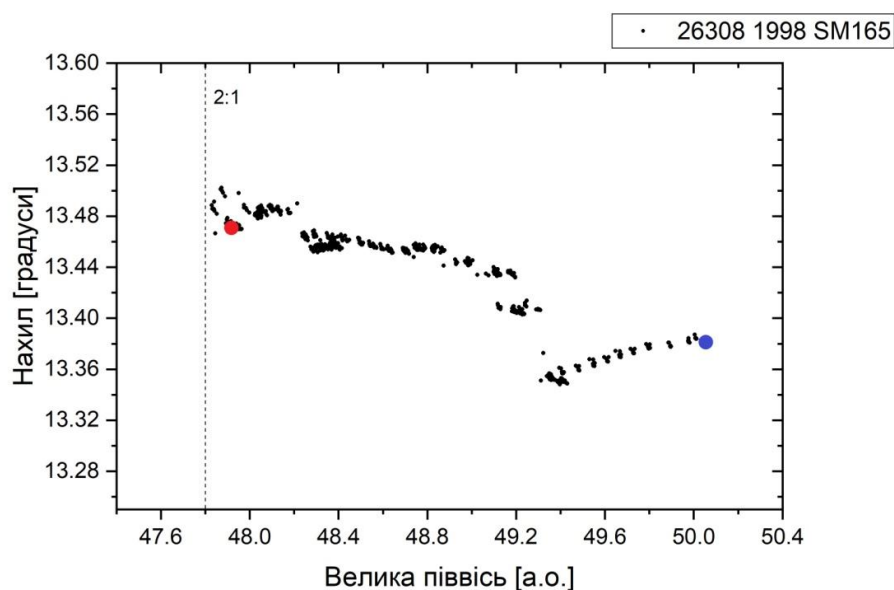


Рис.22. Еволюція орбіти 1998 SM165 (26308) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

1999 DE9 (26375) відкритий в 1999 році 20 лютого, як резонансний об'єкт з Нептуном [21]. На Рис.23 та Рис. 24 наведено результат.

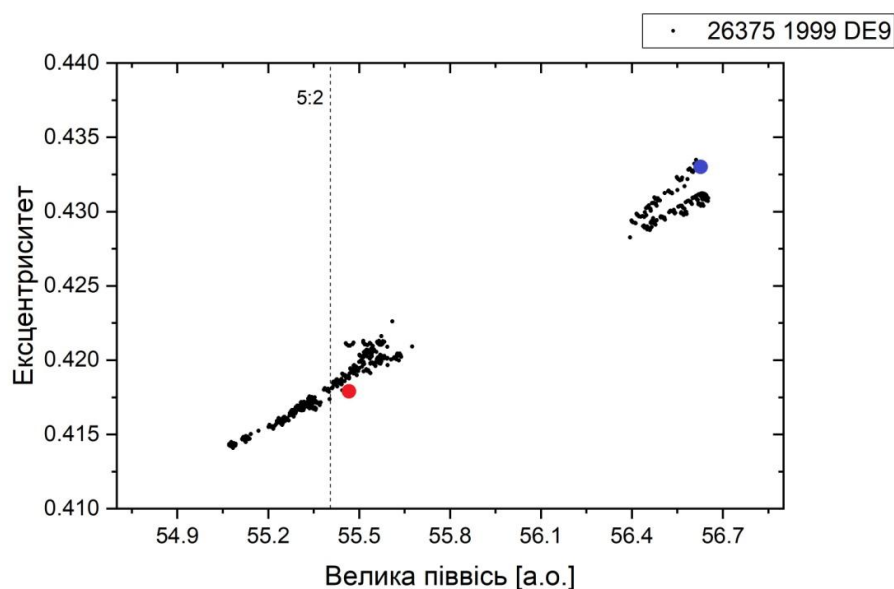


Рис 23. Еволюція орбіти 1999 DE9 (26375) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

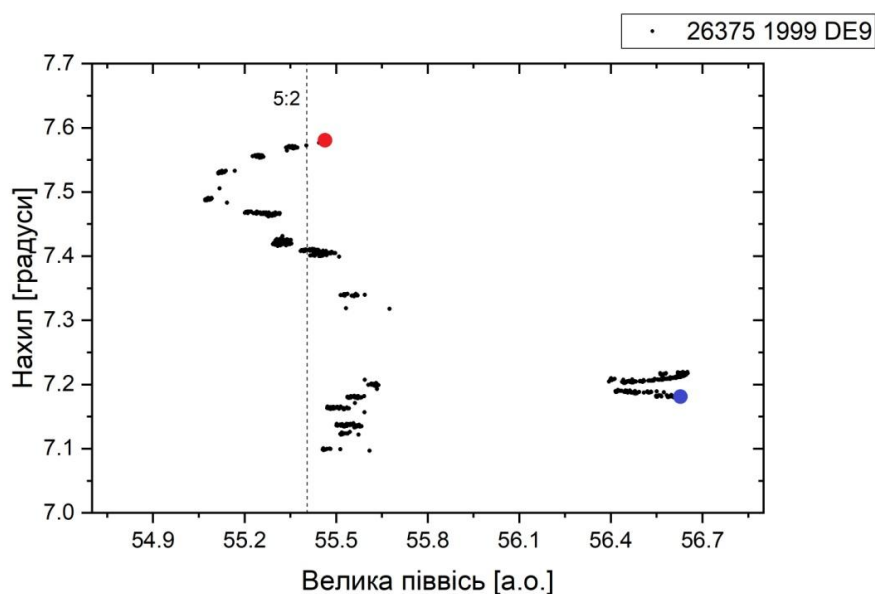


Рис.24. Еволюція орбіти 1999 DE9 (26375) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

1999 DE9 (26375) перебуває в резонансі 5:2 з Нептуном, що впливає на його орбітальну міграцію, як це видно з Рис.23 та Рис.24. Спочатку астероїд мігрує до внутрішньої частини Сонячної системи, велика піввісь зменшується до значення 55.0711 а.о. та зменшується екцентриситет. Після чого об'єкт мігрує назад до вихідного значення великої піввісі (55.4490 а.о.) і викидається у зовнішню частину Сонячної системи, що також відбувається в наслідок впливу резонансу з Нептуном.

На Рис.24 показано як за цей час змінюється значення нахилу орбіти об'єкта 1999 DE9 (26375). Нахил зменшується навколо резонансної області 5:2 з Нептуном до значення 7.0965° , потім різко збільшується до 7.2194° .

Спираючись на отримані результати на Рис.23 та Рис.24, значення після перетину резонансної області не є коректними, тому слід опиратися на значення отримані до перетину.

1995 QY9 (32929) було визначено спостереженнями 31 серпня 1995 року, останнє офіційне спостереження об'єкта відбулося 19 січня 2020 року. [21]

Об'єкт має нестабільний еволюційний трек, який представлено на Рис.25. Спочатку велика піввісь незначно зменшилась, потім збільшилась до значення 41.1242 а.о. і зменшилась до 39.2935 а.о.. В решті об'єкт мігрував до значення 41.3393 а.о. Такий розкид значень великої піввісі може бути наслідком впливу резонансу 3:2 з Нептуном. В даному випадку, гравітація Нептуна дестабілізує орбіту 1995 QY9 (32929). Ексцентриситет так само нестабільно змінюється.

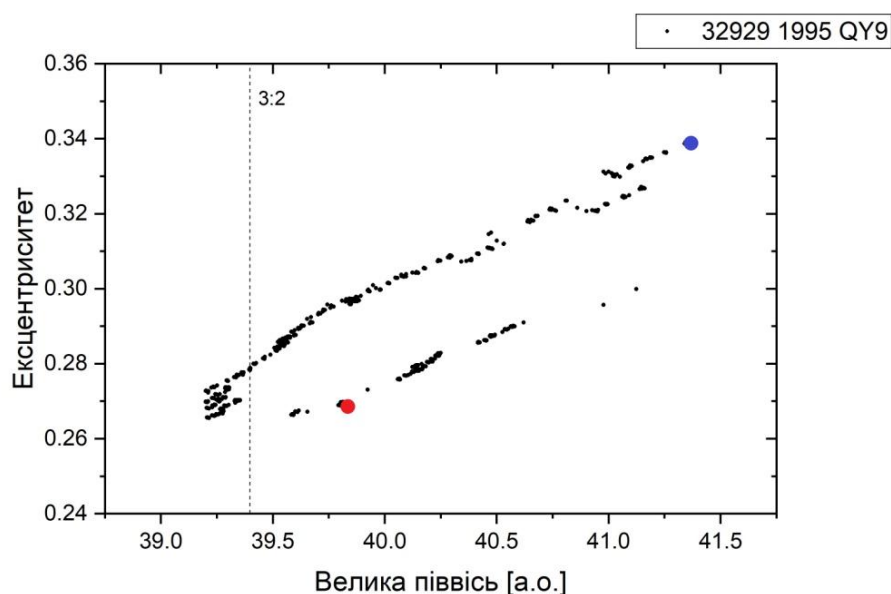


Рис.25. Еволюція орбіти 1995 QY9 (32929) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

Зміна нахилу орбіти об'єкта QY9 (32929) наведена на Рис.26. Змінюється нестабільно, до наближення до резонансної області, нахил зменшився до значення 4.7648° .

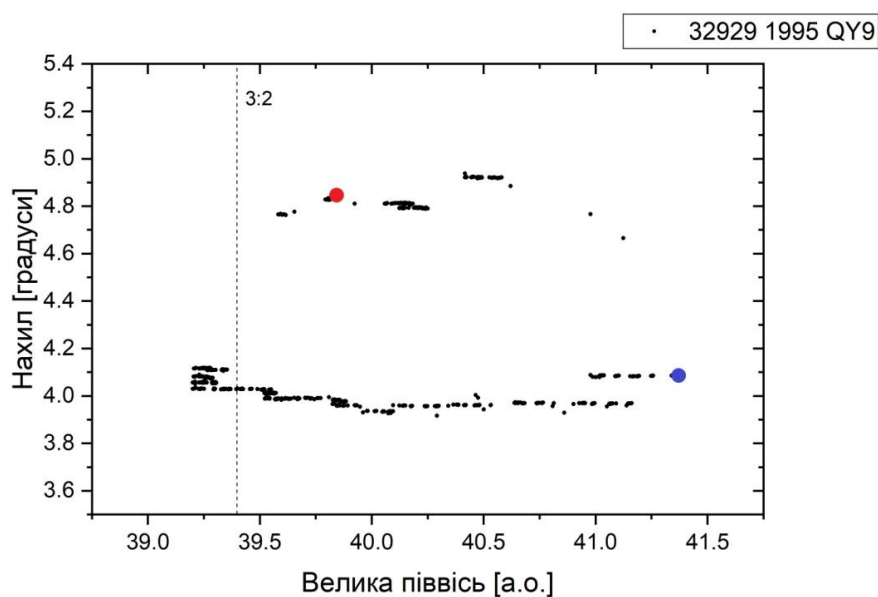


Рис.26. Еволюція орбіти 1995 QY9 (32929) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

Об'єкт Нуа (38628) відкрито на спостереженнях 10 березня 2000 року групою екваторіальних досліджень «Quasar», як бінарний об'єкт, який перебуває в резонансі 3:2 з Нептуном. В 2012 році було виявлено, що Нуа (38628) не бінарний астероїд, а подвійна система астероїдів. Тоді й було відкрито його супутник S/2012 (38628) 1. Відстань супутника від основного тіла становить щонайменше 1740 км. [21]

Для інтегрування було обрано орбіту Нуа (38628) без впливу супутника. Результат представлено на Рис.27 та Рис.28, де видно, що об'єкт мігрує у зовнішню частину Сонячної системи. Дане збільшення великої піввісі є наслідком резонансу з Нептуном, тому важливим є дані елементів орбіти до перетину резонансної області.

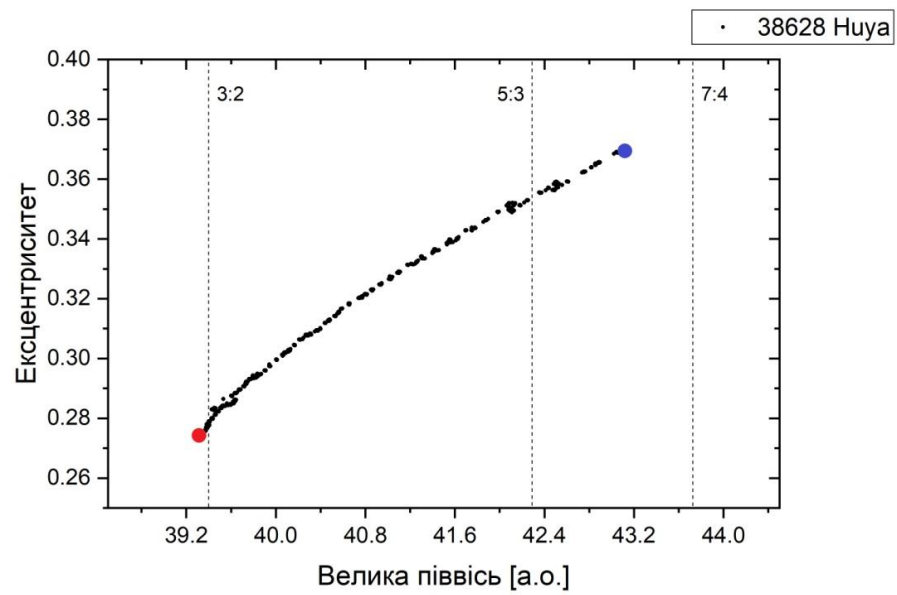


Рис.27. Еволюція орбіти Нууа (38628) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

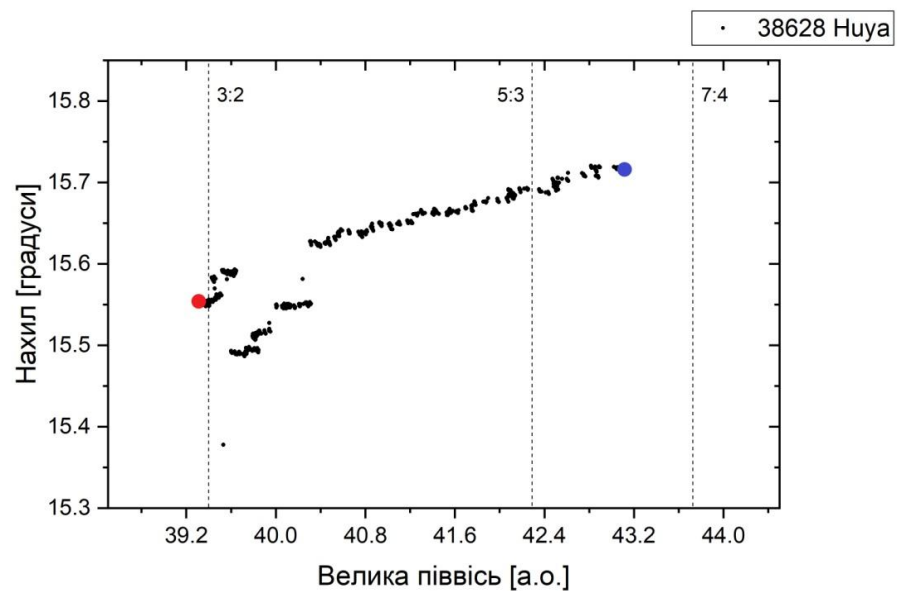


Рис.28. Еволюція орбіти Нууа (38628) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

Ексцентриситет об'єкта збільшується пропорційно збільшенню великої піввісі (рис.27), а нахил орбіти (Рис.28) до перетину резонансу збільшився до значення 15.5505° .

1999 KR16 (40314) було відкрито 16 травня 1999 року. Об'єкт не перебуває в резонансі з Нептуном та має відносно ексцентричну орбіту обертання. [21]

Результат інтегрування зображено на Рис. 29 та Рис.30, де видно, як за весь час інтегрування, велика піввісь об'єкта зменшилась до значення 48.5934 а.о. та ексцентриситет до 0.2983 (Рис.29). На Рис.30 можна побачити, як нахил орбіти спочатку зменшився, а потім збільшився до значення 24.9059° . Тому можна зробити висновок, що об'єкт мігрує до внутрішньої частини Сонячної системи.

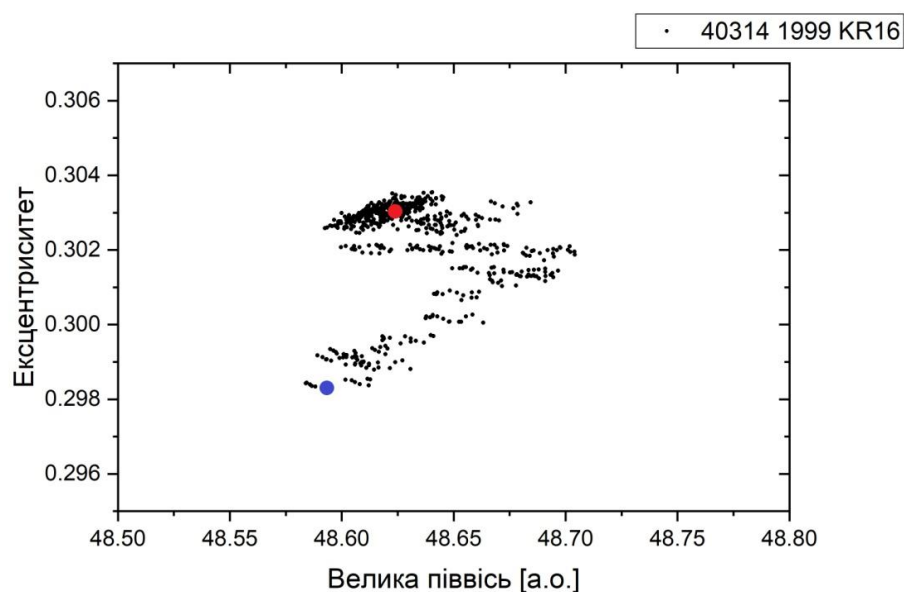


Рис.29. Еволюція орбіти 1999 KR16 (40314) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

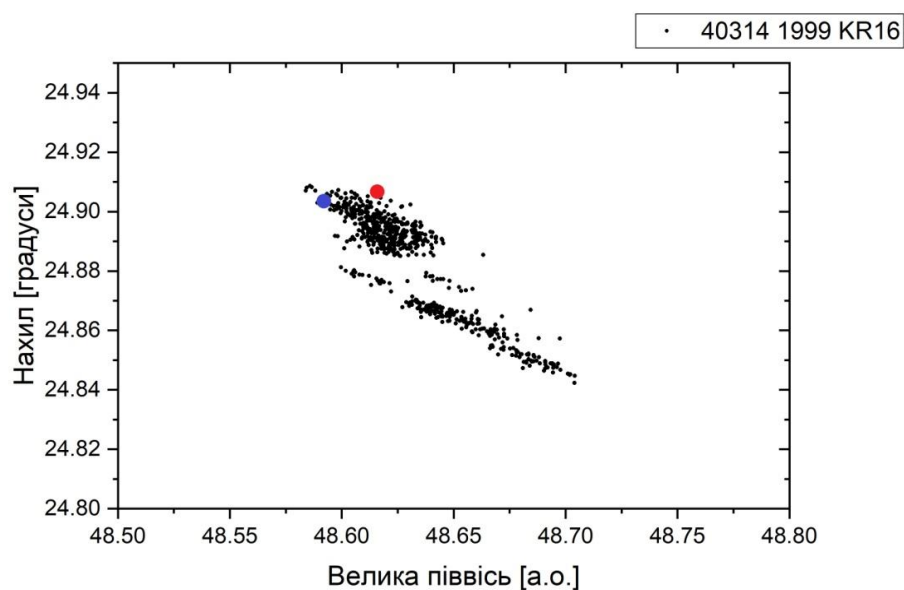


Рис.30. Еволюція орбіти 1999 KR16 (40314) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

Летро (47171) відкрили 1 жовтня 1999 року, як астероїд поясу Койпера, проте у 2001 році було виявлено супутник, який обертається на відстані ~ 7411 км від основного тіла. У 2007 році відкрили третій компонент системи, який є другим за величиною. В результаті, доведено, що Летро (47171) це контактна система астероїдів, навколо якої обертається менший супутник. [21]

Для інтегрування обрали подвійну систему астероїдів Летро (47171) і розглядали, як один цілий астероїд. Еволюцію орбіти об'єкта зображено на Рис.31 та Рис.32, де видно, як велика піввісь зменшується і після перетину резонансу 3:2 починає зростати. Це показує, що після резонансної області результат некоректний. Ексцентриситет до перетину резонансної області з Нептуном зменшується (Рис.31), натомість нахил орбіти зростає (Рис.32).

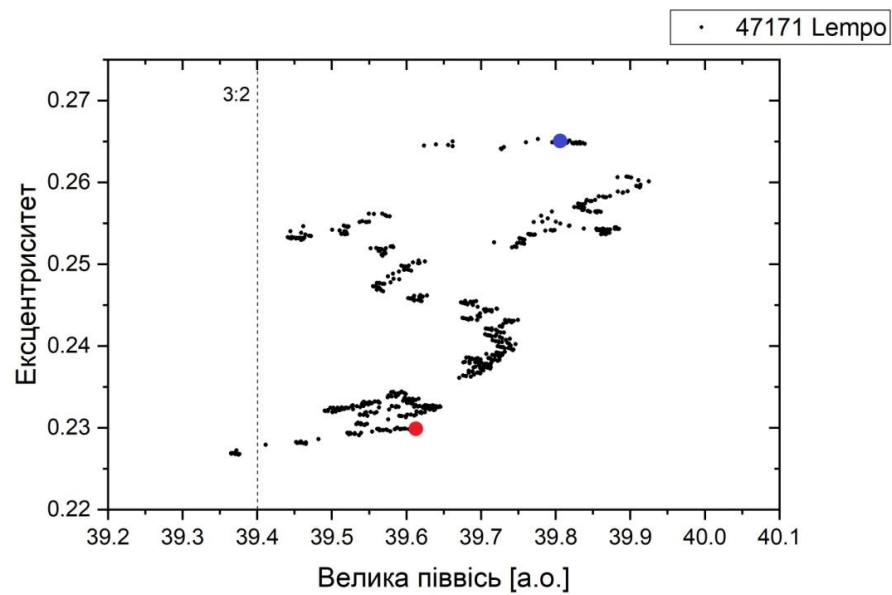


Рис.31. Еволюція орбіти Лемпо (47171) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

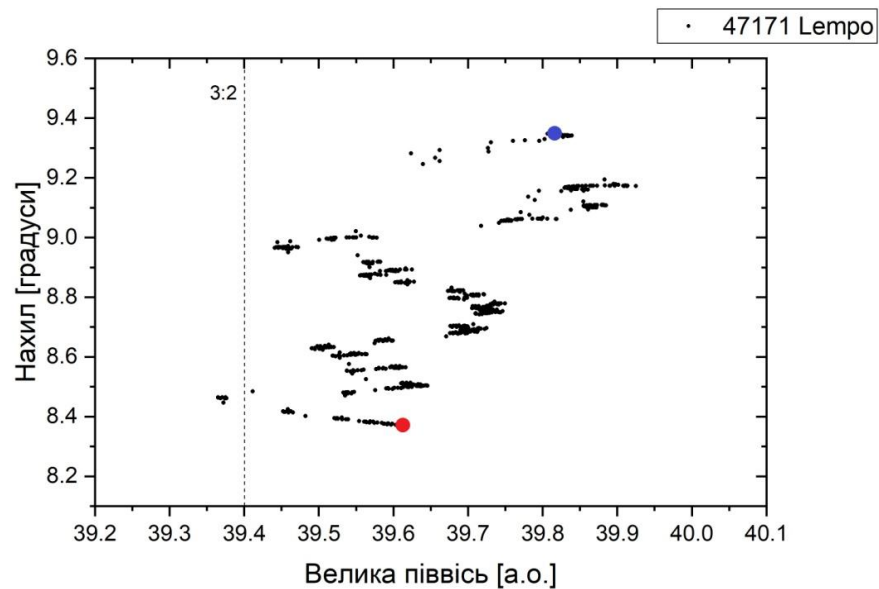


Рис.32. Еволюція орбіти Лемпо (47171) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

Quaoar (50000) один з найбільших обраних об'єктів «гарячої» популяції ($D=871.6$ км), був відкритий 4 червня 2002 року. Має супутник, який обертається на відстані $\sim 13\,300$ км [21].

Для інтегрування обирався тільки об'єкт Quaoar (50000), оскільки його супутник знаходиться на великій відстані від основного тіла.

На Рис.33 та Рис.34 наведено результат інтегрування, де добре видно зменшення великої піввісі до 42.4902 а.о. та зростання ексцентриситету до значення 0.0578. Об'єкт мігрує у внутрішню частину Сонячної системи, що можна обумовити впливом резонансної області 5:3 з Нептуном. Зміну нахилу орбіти наведено на Рис.34, де видно, як значення зросло до 8.3059° .

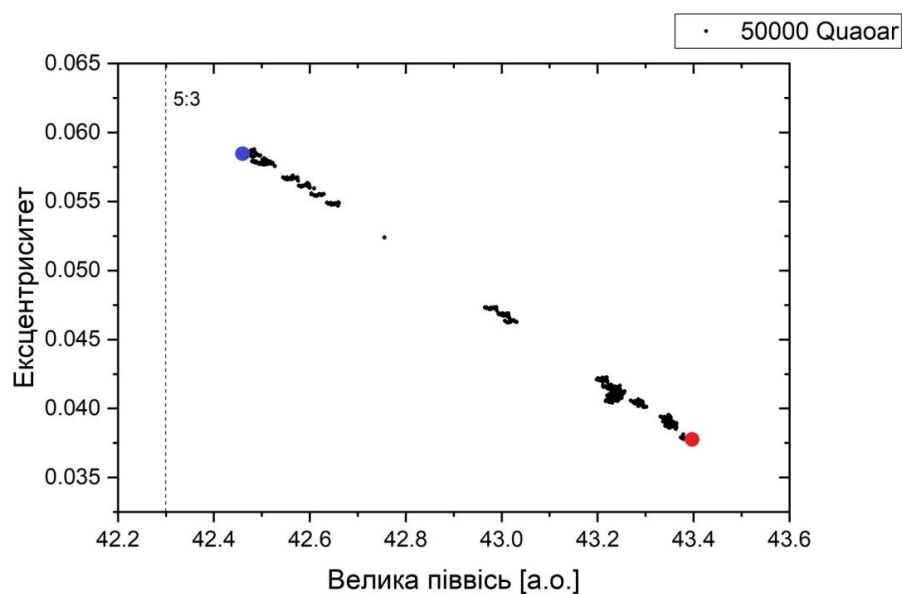


Рис.33. Еволюція орбіти Quaoar (50000) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

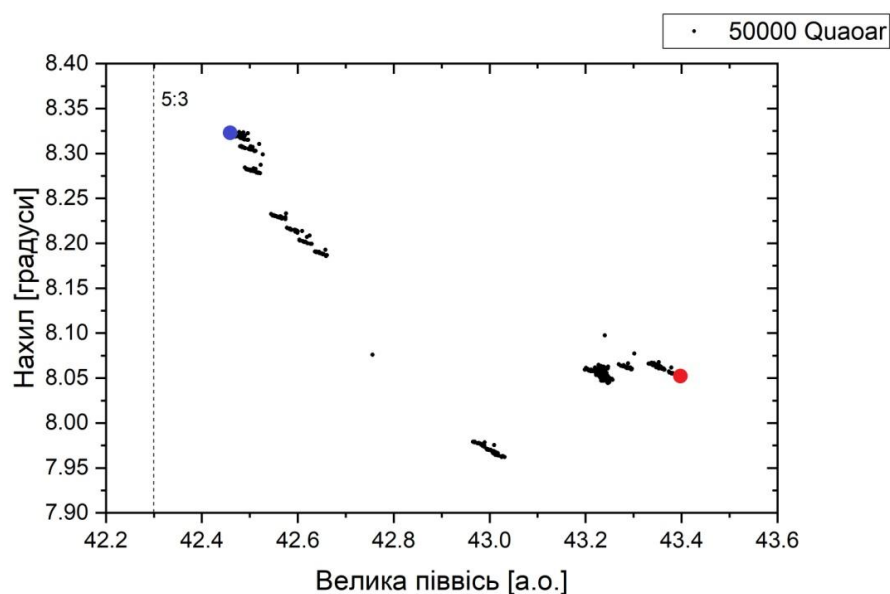


Рис.34. Еволюція орбіти Quaoar (50000) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

Об'єкт 2002 AW197 (55565) є також одним із найбільших обраних, має $D = 886.0$ км. Було відкрито на спостереженнях 10 січня 2002 року [21].

На графіках еволюції орбіти, які представлено на Рис.35 та Рис.36 видно, що об'єкт рухається у зовнішню частину Сонячної системи, що є наслідком впливу резонансної області 2:1 з Нептуном. Велика піввісь 2002 AW197 (55565) зростає до значення 47.6040 а.о., ексцентриситет також зростає до 0.1318.

На Рис.36 нахил орбіти спочатку зменшувався, а потім зростає до значення 24.3022° . Така нестабільність проявляється внаслідок гравітаційного впливу Нептуна на об'єкт, що робить орбіту нестабільною.

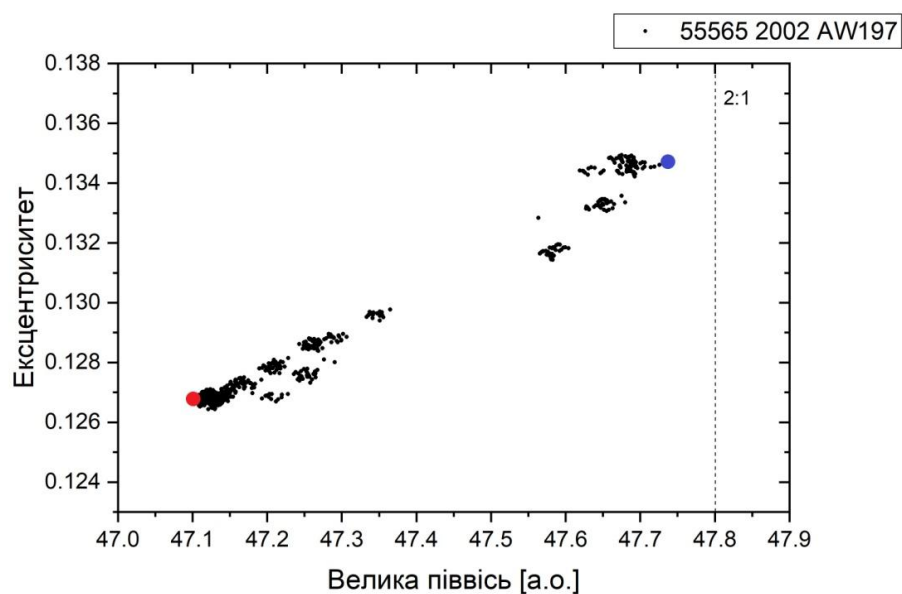


Рис.35. Еволюція орбіти 2002 AW197 (55565) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

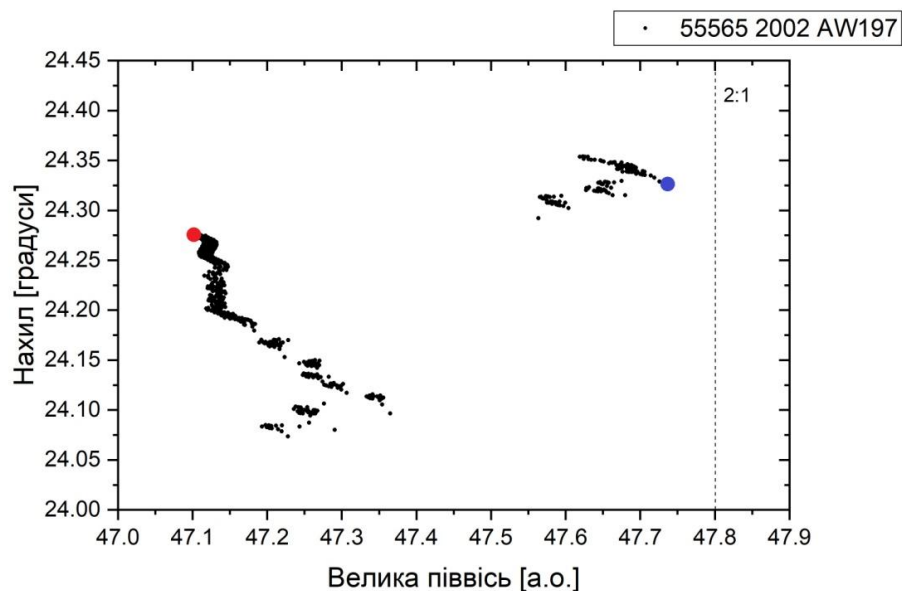


Рис.36. Еволюція орбіти 2002 AW197 (55565) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

2002 TX300 (55636) був виявлений у 2002 році 15 жовтня, як класичний об'єкт поясу Койпера [21].

На графіках еволюції орбіти Рис.37 та Рис.38 видно, що об'єкт перебуває поблизу резонансної зони 7:4 з Нептуном. Астероїд спочатку мігрує до зовнішньої області Сонячної системи, що є впливом резонансної області, а потім мігрує у внутрішню частину Сонячної системи.

В кінці інтегрування велика піввісь становить 43.2831 а.о.. Схожим чином змінюється ексцентриситет, і в решті досягає значення 0.1192. Нахил орбіти зменшується до 25.1403° .

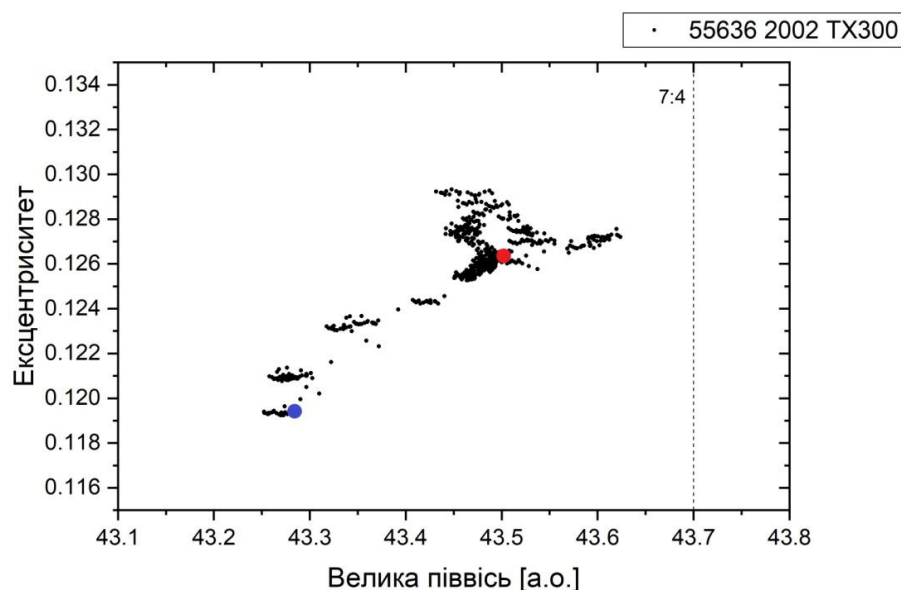


Рис.37. Еволюція орбіти 2002 TX300 (55636) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

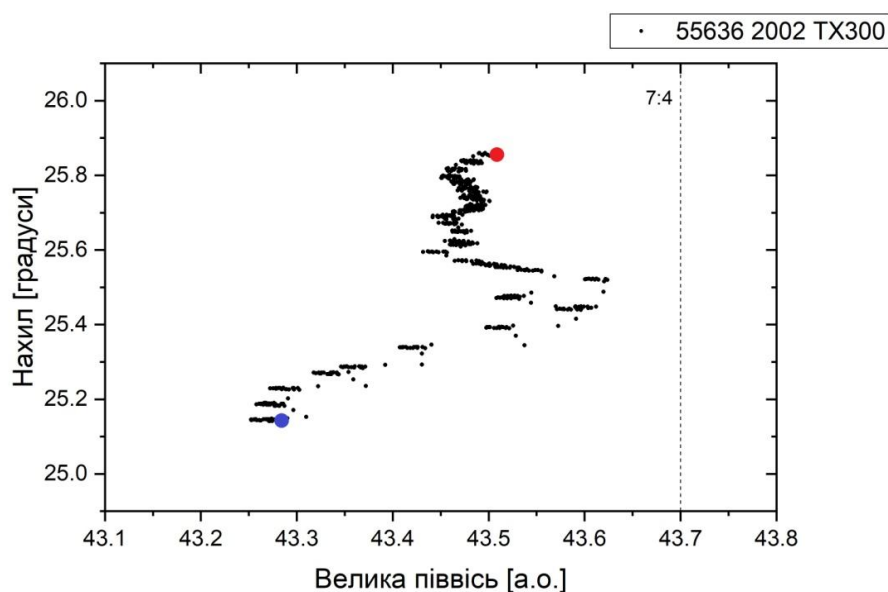


Рис.38. Еволюція орбіти 2002 TX300 (55636) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

UX25 (55637) було знайдено на спостереженнях проекту «Spacewatch» 30 жовтня 2002 року. Об'єкт також має супутник, відкритий на телескопі Хаббл у 2005 році. [21]

Оскільки супутник знаходиться на відстані 5 тис. км від основного тіла, в роботі розглядається тільки UX25 (55637).

За результатом інтегрування, представленим на Рис.39 та Рис.40, велика піввісь зменшується до значення 42.7936 а.о., що свідчить про приналежність об'єкта до внутрішньої частини Сонячної системи. Ексцентриситет зростає до 0.1472, натомість нахил орбіти після зростання зменшився до значення 19.2934°. Також з Рис.30 та Рис.40 видно, що об'єкт наближається до резонансної зони 5:3 з Нептуном, що впливає на нестабільність орбіти астероїда.

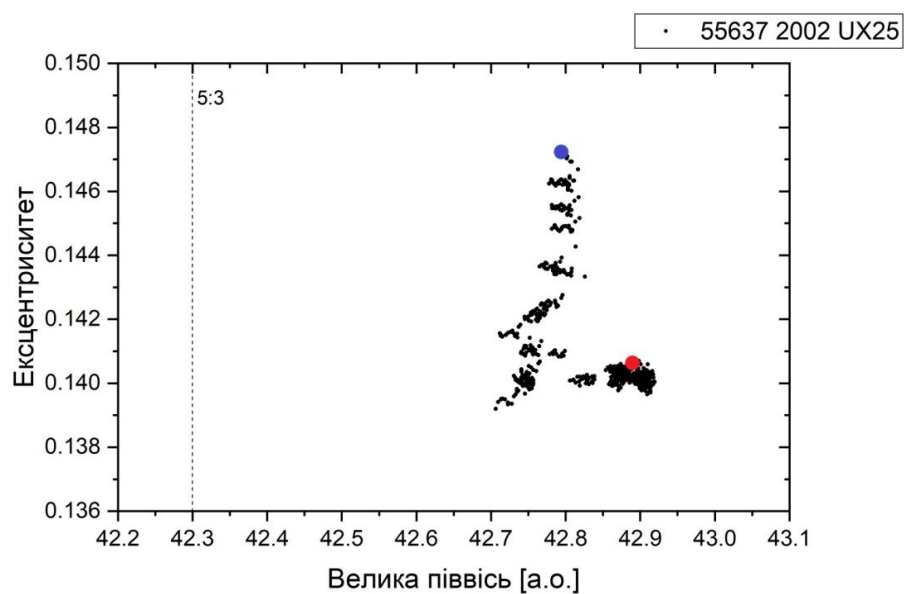


Рис.39. Еволюція орбіти UX25 (55637) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

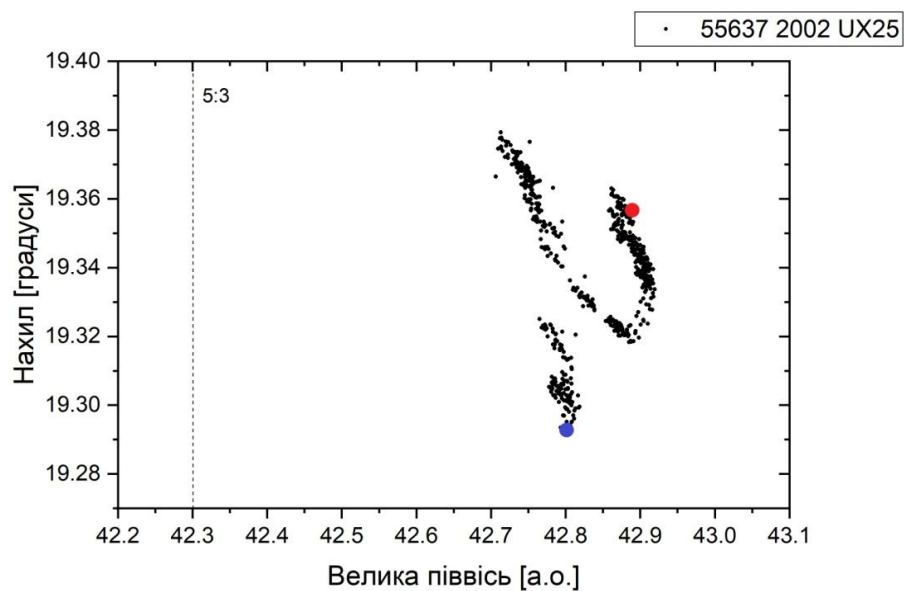


Рис.40. Еволюція орбіти 2002 UX25 (55637) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

20 лютого 1999 року відкрито 1999 DF9 (79983). Об'єкт не перебуває в резонансі з Нептуном і є класичним об'єктом поясу Койпера. [21]

На Рис.41 та Рис.42 показано результат інтегрування, де можна побачити, як велика піввісь стрімко збільшується до 47.3302 а.о.. Об'єкт наближається до резонансу 2:1 з Нептуном, а тому можна зробити висновок, що на даний результат впливає резонансна область з Нептуном. Ексцентриситет збільшується майже пропорційно до великої піввісі (Рис.41), тоді як нахил орбіти зменшується (Рис.42).

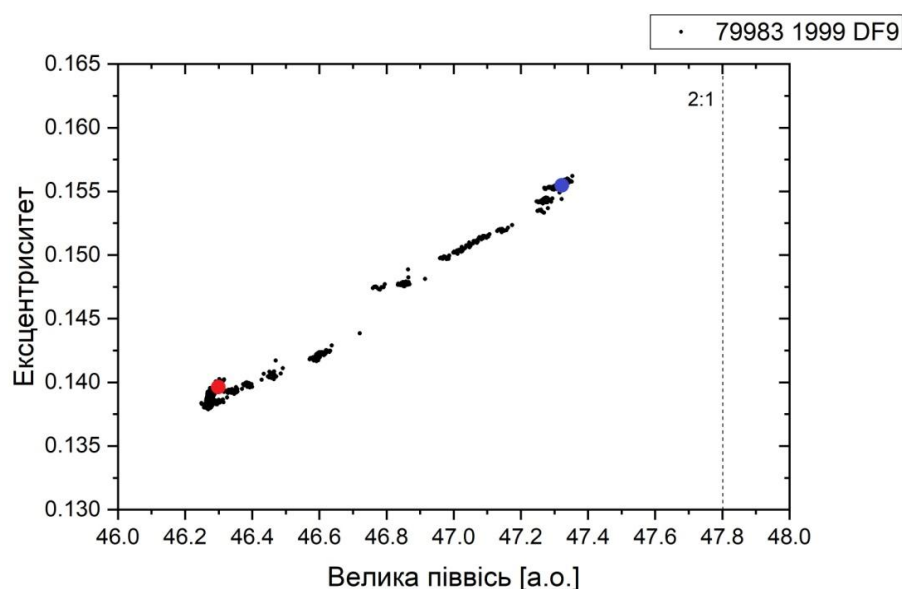


Рис.41. Еволюція орбіти 1999 DF9 (79983) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

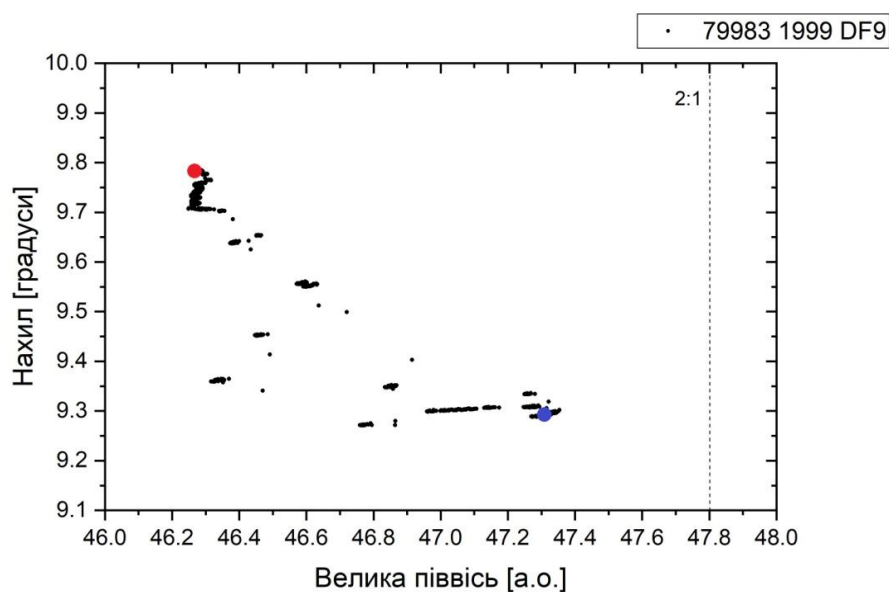


Рис.42. Еволюція орбіти 1999 DF9 (79983) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

2002 TC302 (84522) відкрито 9 жовтня 2002 року [21]. Об'єкт є найвіддаленішим від Сонця серед усіх обраних астероїдів «гарячої» популяції поясу Койпера та має найвищий нахил орбіти. Знаходиться близько до резонансної області 5:2 з Нептуном.

Міграція об'єкта наведена на графіках Рис.43 та Рис.44, де видно, як астероїд спочатку мігрує у внутрішню частину Сонячної системи, до резонансу 5:2 з Нептуном, а потім рухається в зворотному напрямку. Кінцеве значення великої піввісі становить 55.7254 а.о..

В результаті ексцентриситет не змінився. Нахил орбіти об'єкта збільшився до 35.2745° .

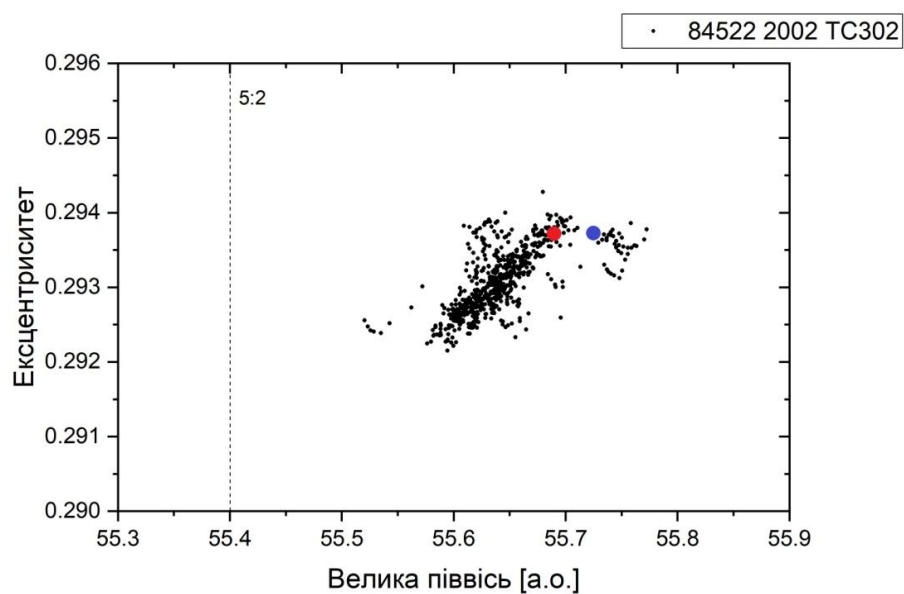


Рис.43. Еволюція орбіти 2002 TC302 (84522) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

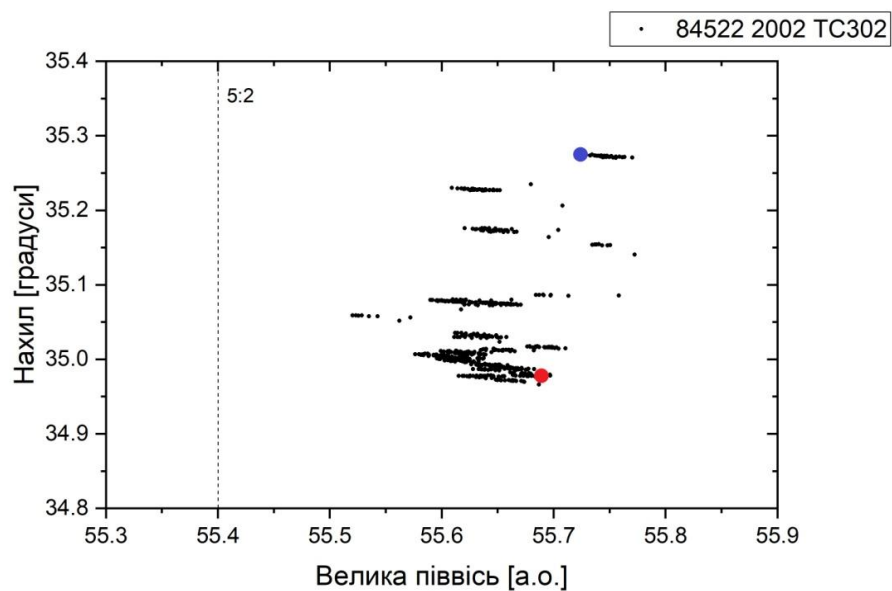


Рис.44. Еволюція орбіти 2002 TC302 (84522) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

2003 VS2 (84922) відкрито на спостереженнях 14 листопада 2003 року і класифіковано як об'єкт в резонансі 3:2 з Нептуном [21].

Результат інтегрування наведено на Рис.45 та Рис.46.

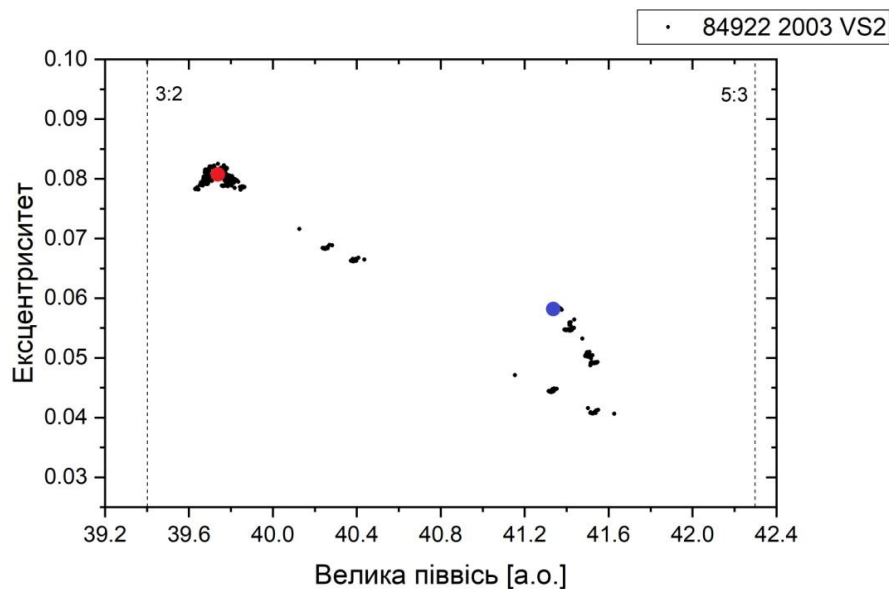


Рис.45. Еволюція орбіти 2003 VS2 (84922) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

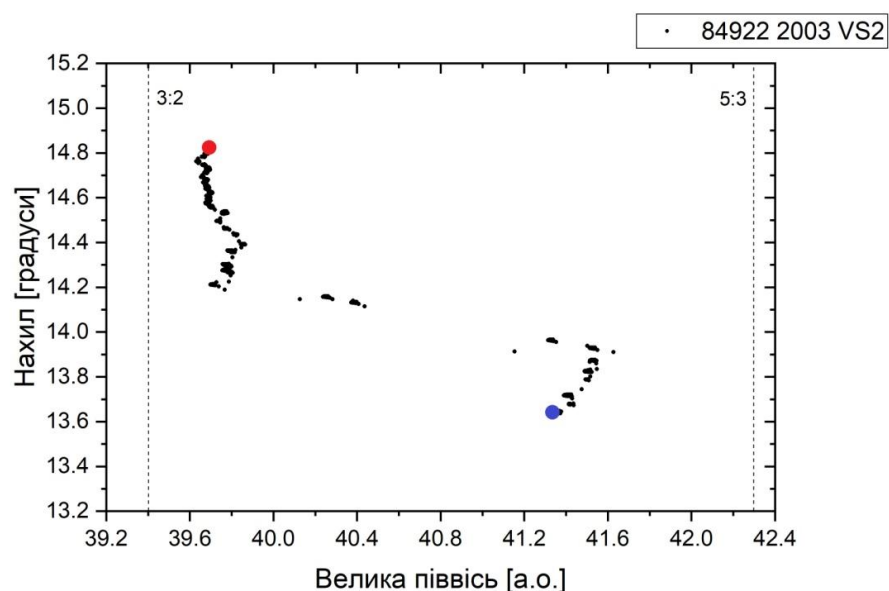


Рис.46. Еволюція орбіти 2003 VS2 (84922) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

З Рис.45 та Рис.46 видно, як об'єкт мігрує в області між двома резонансами 3:2 та 5:3 з Нептуном. В результаті велика піввісь збільшилась, що є наслідком впливу резонансу 5:3. Ексцентриситет зменшився до значення 0.0582 (Рис.45). Нахил орбіти зменшувався протягом всього часу інтегрування, що наведено на Рис.46. В результаті нахил становить 13.6367° .

18 липня 1999 року було відрито 1999 ОУ3 (86047), як класичний об'єкт поясу Койпера [21]. Астероїд знаходиться близько до резонансної області 7:4 з Нептуном.

На графіках Рис.47 та Рис.48 представлено результат інтегрування, де можна побачити, як змінюється трек міграції об'єкта: спочатку входить до резонансної області 7:4, а потім мігрує до зовнішньої частини Сонячної системи. Коли 1999 ОУ3 (86047) входить до резонансної області, його ексцентриситет зменшується, далі змінюється нестабільно. Нахил орбіти зменшується до значення 23.6584° .

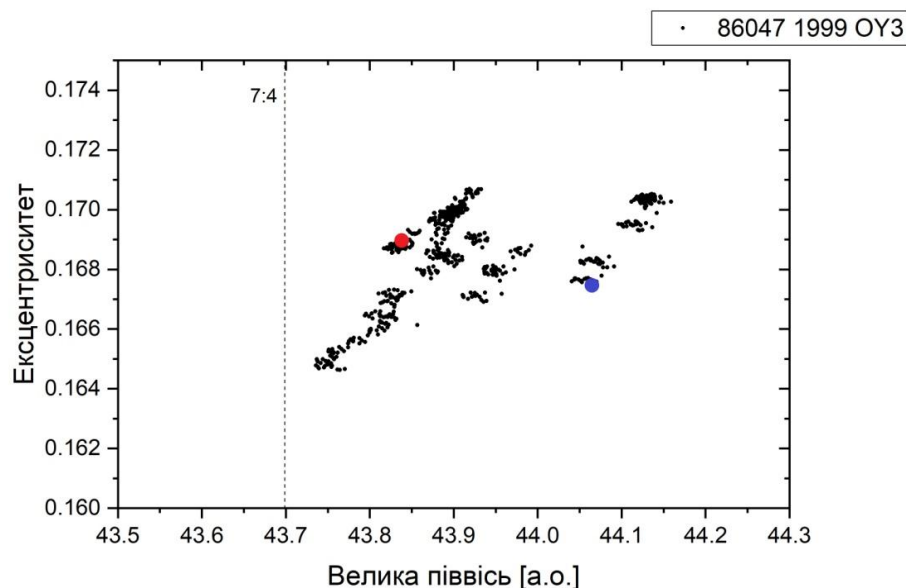


Рис.47. Еволюція орбіти 1999 ОУ3 (86047) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

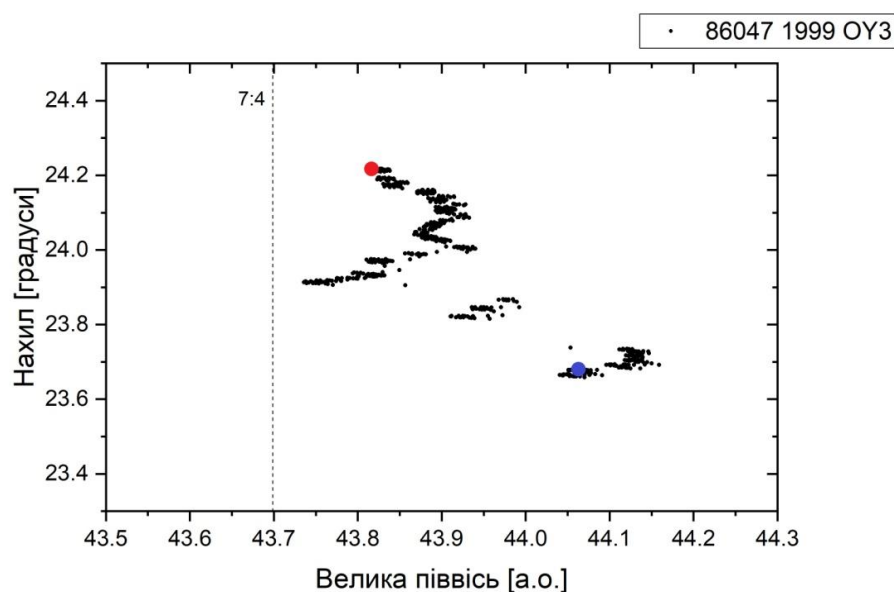


Рис.48. Еволюція орбіти 1999 OY3 (86047) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

2004 GV9 (90568) відкрито 13 квітня 2004 року в рамках проекту «NEAT», як класичний об'єкт поясу Койпера, що не перебуває в резонансі з Нептуном [21].

На графіках Рис.49 та Рис.50 зображено результат інтегрування астероїда. Можна побачити, як велика піввісь зменшилась до значення 41.6328 а.о., а значить об'єкт показує приналежність до внутрішньої частини Сонячної системи.

Протягом інтегрування ексцентриситет змінювався нестабільно, спочатку зростав, а потім зменшувався. Проте в результаті отримали значення 0.0721, що менше початкового (Рис.49).

Нахил орбіти зменшувався і в кінцевому результаті інтегрування отримали значення 21.7191° (Рис.50).

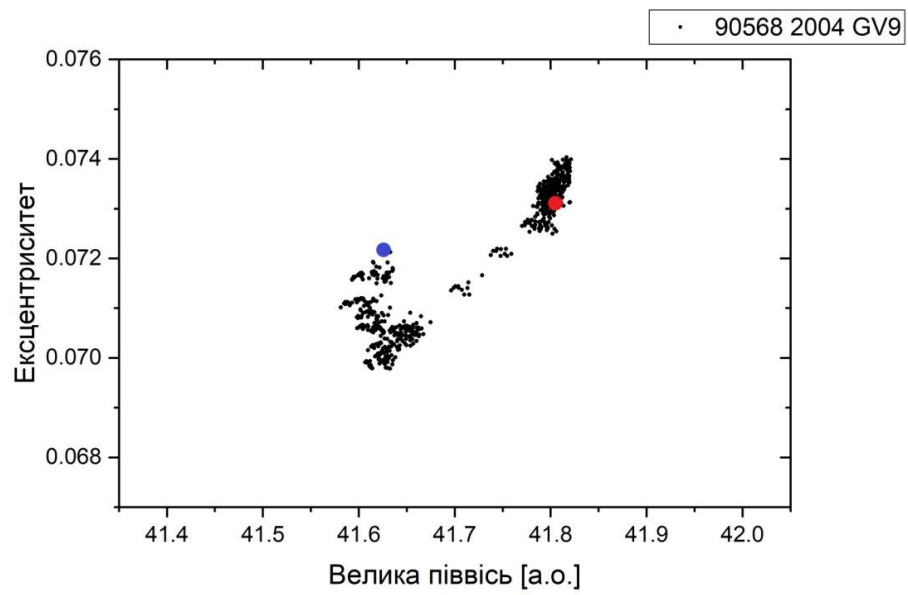


Рис.49. Еволюція орбіти 2004 GV9 (90568) в координатах ексцентриситету від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

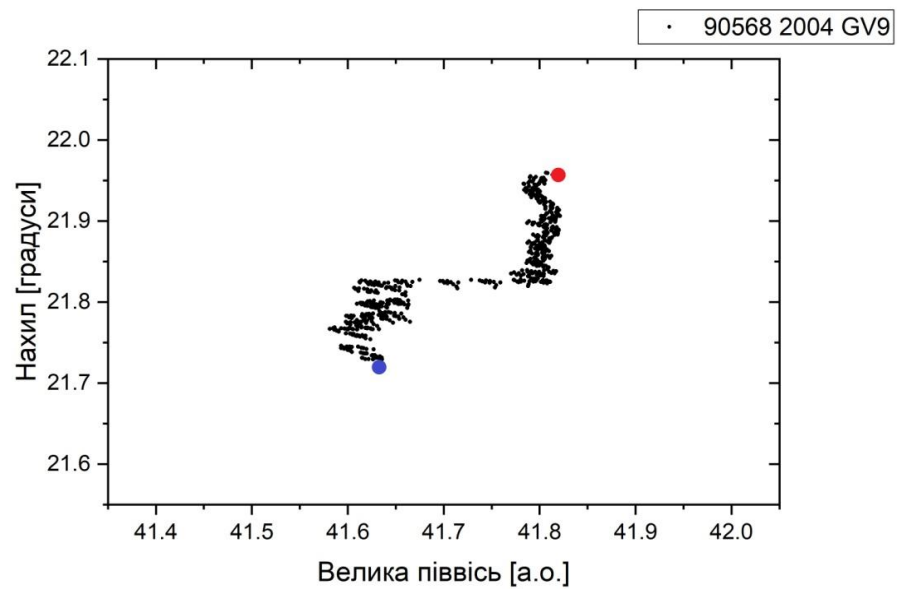


Рис.50. Еволюція орбіти 2004 GV9 (90568) в координатах нахилу орбіти від великої піввісі. Червоним кольором позначено початок інтегрування, синім – кінець інтегрування.

3.3. Точність результату інтегрування обраних об'єктів

Перевірка точності моделі відбувалася кожні 1000 років з кроком інтегрування 5000 секунд. У розділі 2.3 було описано методи, які використовуються для перевірки (метод подвійного кроку інтегрування рівнянь руху вперед-назад) та критерій стійкості моделі (рівняння 10).

В результаті отримано верифікований розв'язок, який не перевищує значення в 10 км.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

За результатами чисельного інтегрування методом Еверхарта 15-го порядку на 32100 років 19 обраних об'єктів «гарячої» популяції можна порахувати дрейф (різниця значення на початку інтегрування та в кінці) великої піввісі. Результат наведено у Табл.2.

Таблиця 2.

Дрейф великої піввісі досліджуваних об'єктів «гарячої» популяції.

Номер	Назва	D [км]	Δa
15820	1994 TB	135.4	-2.2406*
19308	1996 TO66	817.1	0.5047
20000	Varuna	936.0	-0.0992
24835	1995 SM55	704.0	-0.2251*
26308	1998 SM165	385.1	0.0086*
26375	1999 DE9	507.7	0.1081*
32929	1995 QY9	128.7	0.4393*
38628	Huya	406.0	-0.0628*
40314	1999 KR16	248.1	0.0238
47171	Lempo	393.0	0.0813*
50000	Quaoar	871.6	0.7318

Продовження табл.2

Номер	Назва	D [км]	Δa
55565	2002 AW197	886.0	-0.5001
55636	2002 TX300	605.8	0.2212
55637	2002 UX25	698.0	0.0963
79983	1999 DF9	333.9	-1.0574
84522	2002 TC302	499.0	-0.0383
84922	2003 VS2	548.0	-1.6756
86047	1999 OY3	244.1	-0.2437
90568	2004 GV9	680.0	0.1740

Червоним кольором у Табл.2 позначено об'єкти з від'ємним дрейфом великої піввісі. Зірочкою позначено об'єкти, дрейф великої піввісі яких обирався до перетину резонансу з Нептуном. Це було зроблено для того, щоб побачити справжній напрямок міграції, оскільки результат після резонансної області є некоректним. За результатами інтегрування обраних 19 об'єктів «гарячої» популяції можна зробити висновок, що:

1. Шість об'єктів «гарячої» популяції підтверджують теорію міграції описану у працях [1-7], оскільки мають дрейф великої піввісі більше 0 ($\Delta a > 0$). Отже, дані об'єкти мігрують до внутрішньої частини Сонячної системи.

2. Сім об'єктів «гарячої» популяції неоднозначно показують напрямок міграції, що є наслідком впливу резонансів.

3. Шість з 19 обраних об'єктів (~30%) мають дрейф великої піввісі менше 0 ($\Delta a < 0$). Отже, дані об'єкти показують динамічну приналежність до зовнішньої частини Сонячної системи.

Охотко Г.К.

(Підпис автора роботи)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A. et al. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. // *Nature*. – 2005. – Vol. 435. – P. 459-461.
2. Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K., et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. // *Nature*. – 2005. – Vol. 435. – P. 466-469.
3. Levison H.F., Morbidelli A., VanLaerhoven C. Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune. // *Icarus*. – 2008. – Vol. 196. – P. 258-273.
4. Gomes R.S., Morbidelli A., Levison H.F. Planetary migration in a planetesimal disk: Why did Neptune stop at 30 AU? // *Icarus*. – 2004. – Vol. 170. – P. 492-507.
5. Pollack, J.B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P. et al. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas. // *Icarus*. – 1996. – Vol. 124. – P. 62-85.
6. DeMeo F. E., Carry B. Solar System evolution from compositionalmapping of the asteroid belt. // *Nature*. – 2014. – Vol. 505. – P. 629-634.
7. Levison H.F., Marchi S., Noll K. et al. NASA's Lucy Mission to the Trojan Asteroids // *IEEE Aerospace Conference (50100)*. – 2021. – P. 1-10.
8. Morbidelli A. Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs // *Lectures on comets dynamics and outer solar system formation*. – 2008. – 86 p.
9. Delsanti A., Jewitt D. *The Solar System Beyond The Planets* // Springer. – 2006. – P. 267-294.

10. Levison H.F., Stern S.A. On the size dependence of the inclination distribution of the main Kuiper belt // *The Astronomical Journal*. – 2001. – Vol. 121. – P. 1730-1735.
11. Nesvorný D., Vokrouhlický D., Alexandersen M. et al. OSSOS XX: The Meaning of Kuiper Belt Colors // *The Astronomical Journal*. – 2020 – Vol. 160. No. 1 – 46
12. Hermann Boehnhardt Max-Planck Institute for Solar System Research // Conference. – Katlenburg-Lindau/Germany, 2007.
13. Lellouch E., Santos-San, P., Lacerda P. et al. "TNOs are Cool": A survey of the trans-Neptunian region. IX. Thermal properties of Kuiper belt objects and Centaurs from combined Herschel and Spitzer observations. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2013. – Vol. 557. A60 – 19 p.
14. Okhotko H., Troianskyi V., Bazyey O. Physical properties of “hot population” objects in the Kuiper belt // *Odessa Astronomical Publications*. – 2022. – vol. 35. – P. 74-76.
15. Asteroid Lightcurve Photometry Database (ALCDEF) [Електронний ресурс] - URL: <http://alcdef.org/>
16. Everhart E. Implicit Single-Sequence Methods for Integrating Orbits. // *Celestial mechanics*. – 1974. – vol. 10. – P. 35-55.
17. О.А. Базей, І.В. Кара. Застосування методів Еверхарта 15, 17, 19, 21 порядків для обчислення траєкторії руху небесних тіл у навколопланетному просторі // *Вісник Астрономічної школи*. - 2009. - Т.6, No. 2. - С. 155-157.
18. Troianskyi V., Bazyey O. Numerical simulation of asteroid system dynamics. // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. – 2018. – Vol. 48. No. 2. – P. 356-380.

19. Bazyey O., Tokovenko A., Troianskyi V. Temporary capture of a small body into a geocentric orbit // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. – 2023. – Vol. 53. No. 2. – P. 61-70.
20. AU Minor Planet Center [сайт]
URL: http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html
21. NASA Jet Propulsion Laboratory [сайт]
URL: <https://www.jpl.nasa.gov/>