

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра астрономії та космічної інформатики

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри астрономії та
космічної інформатики
проф. Юрій ШКУРАТОВ

14.06.2024 р.



Оцінка « відмінно »

Голова ЕК
проф. Віктор ТИШКОВЕЦЬ

21.06.2024 р.



Грицутенко Ганна Сергіївна

Фізичні властивості вибраних астероїдних сімейств

Кваліфікаційна робота на здобуття
освітньо-кваліфікаційного рівня
«Бакалавр» спеціальність
104 – «фізика та астрономія»
освітньо-професійна програма
«астрономія»



(підпис студента)

Науковий керівник – професор кафедри
астрономії та космічної інформатики
В. Г. Шевченко



(підпис керівника)

Харків 2023

АНОТАЦІЯ

Грицутенко Г.С. Фізичні властивості вибраних астероїдних сімейств

Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія». Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2024.

Під час написання дипломної роботи було проведено огляд літератури щодо сімейств астероїдів, описано їх динамічні характеристики та процеси вивітрювання, які діють на поверхні астероїдів, що входять до сімейств. Сформовано загальний масив даних з основних фізичних властивостей для 329 астероїдів, що входять до трьох сімейств Веста, Флора та Феміда (власні орбітальні елементи, абсолютні зоряні величини, спектри низької роздільної здатності, діаметри та альbedo), використовуючи дані Міжнародної бази PDS та каталогу Gaia EDR3. Обчислено нахили спектрів у видимій та ближній інфрачервоній ділянках для цих астероїдів та проведено аналіз поведінки нахилів в залежності від відстані до Сонця. Аналіз показав, що існує залежність між нахилом спектру та відстанню до Сонця, що можливо пов'язано з дією сонячного випромінювання на поверхні астероїдів досліджуваних сімейств. У сімейства Вести виявлено найбільші зміни у нахилі спектра у видимому та інфрачервоному діапазонах, що може свідчити про сильнішу дію сонячного випромінювання на поверхню, багату піроксеновими мінералами.

Ключові слова: сімейства астероїдів, абсолютна зоряна величина, власні елементи орбіти, спектральний нахил.

Abstract

Hrytsutenko H.S. Physical properties of selected asteroid families

Thesis for the degree of Higher Education "bachelor" in specialty 104 "Physics and astronomy". V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2024.

During the writing of the thesis, a review of the literature on asteroid families was conducted, their dynamic characteristics and weathering processes acting on the surface of the asteroids included in the families were described. A general dataset of basic physical properties for 329 asteroids belonging to the three families of Vesta, Flora, and Themis (proper orbital elements, absolute magnitudes, low-resolution spectra, diameters, and albedo) was generated using data from the International PDS database and the Gaia EDR3 catalog. The slopes of the spectra in the visible and near-infrared regions for these asteroids were calculated and the behavior of the slopes depending on the distance to the Sun was analyzed. The analysis showed that there is a dependence between the slope of the spectrum and the distance to the Sun, which is possibly related to the effect of solar radiation on the surface of the asteroids of the studied families. The largest changes in the slope of the spectrum in the visible and infrared ranges were found in the Vesta family, which may indicate a stronger effect of solar radiation on a surface rich in pyroxene minerals.

Keywords: families of asteroids, absolute magnitude, proper elements of the orbit, spectral inclination.

Зміст

Вступ	3
Розділ 1. Сімейства астероїдів	5
1. Історія відкриття сімейств астероїдів.....	5
2. Методики відбору астероїдів до сімейств.....	6
3. Динамічні характеристики основних астероїдних сімейств	10
4. Процеси вивітрювання на астероїдах	13
Розділ 2. Методика формування бази даних спектральних властивостей вибраних астероїдних сімейств	17
2.1 Відбір сімейств для аналізу спектральних властивостей.....	17
2.2 Структура бази даних по сімействам з Міжнародної бази PDS.....	23
2.3 Структура бази даних спектрів астероїдів з каталогу Gaia EDR 3...25	
Розділ 3. Аналіз впливу процесів вивітрювання на спектральні характеристики вибраних астероїдних сімейств	28
3.1 Сімейство Вести.....	28
3.2 Сімейство Флори.....	31
3.3 Сімейство Феміди.....	35
3.4 Порівняльний аналіз процесів вивітрювання на спектральні характеристики вибраних астероїдних сімейств.....	38
Висновки.....	41
Список цитованої літератури.....	42
Додаток 1. Орбітальні та спектральні дані для сімейства Вести.....	44
Додаток 2. Орбітальні та спектральні дані для сімейства Флори	53
Додаток 3. Орбітальні та спектральні дані для сімейства Феміди	59

Вступ

Астероїдні сімейства - це групи астероїдів, які мають схожу орбіту та походять від одного батьківського тіла, яке розпалося внаслідок зіткнення з іншим об'єктом. Фізичні властивості астероїдів у сімействі можуть бути схожими між собою, оскільки вони мають спільне походження. В останні роки наукові спостереження та чисельні симуляції дозволили детально вивчити фізичні властивості астероїдів та їх систем. Результати цих досліджень можуть пояснити, як астероїдні системи формуються та еволюціонують з часом.

Сімейства астероїдів надають унікальну можливість отримати інформацію про внутрішню будову батьківських тіл, зіткнення яких і сформувало сімейство. Тому дослідження сімейств відкриває можливість виявити прояви процесів диференціації, основного процесу на початкових стадіях, що формував мінералогічні зміни у надрах планетезималей. Вважається, що біля 80% астероїдів внутрішньої частини головного поясу виникли при формуванні найбільших сімейств Вести, Флори, Нізи-Поляни-Евлалії [1]. А визначення віку сімейств і порівняння його із розподілом віку метеоритів дозволяє виявити генетичні зв'язки між різними типами метеоритів і сімействами астероїдів [16]. Крім того, зі зростанням інтересу до космічних досліджень, включаючи майбутні заплановані місії до астероїдів, все більш важливим стає знання фізичних властивостей цих об'єктів. Наприклад, вивчення складу і структури астероїдів може допомогти вибрати найбільш підходящий об'єкт для збору зразків і повернення їх на Землю. Ці зразки можуть дати відповіді на питання про те, як виникло життя на нашій планеті і чи можливо знайти життя в інших тілах Сонячної системи та за її межами. Таким чином, вивчення фізичних властивостей астероїдів та астероїдних сімейств є актуальним і важливим завданням для наукової спільноти, а результати досліджень можуть мати велике значення для нашого розуміння Сонячної системи та її розвитку.

Важливими факторами, що визначають спектральні властивості астероїдів, що входять до сімейств, можуть бути процеси космічного вивітрювання. Вивітрювання на астероїдах відбувається в результаті впливу різноманітних

фізичних процесів, таких як сонячне випромінювання, космічні впливи (мікрометеорити, космічний пил), іонні потоки та термічні цикли. Ці процеси можуть призвести до зміни поверхні астероїда з часом. Аналіз можливих змін у спектрах астероїдів було проведено в ряді робіт, наприклад, [12, 14, 16]. Але це стосувалось загалом астероїдів, розмір яких більше 20 км. З появою великої кількості низькороздільних спектрів, що отримані супутником Gaia, з'явилася можливість дослідити ці процеси на відносно невеликих об'єктах, що входять до сімейств, розміром до 20 км. Тож метою даної роботи є дослідження спектральних нахилів у вибраних астероїдних сімейств у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, порівняння їх між собою та встановлення можливих факторів, що можуть вказувати на процеси вивітрювання для членів цих сімейств.

Для вирішення цієї мети ставилось декілька основних завдань:

- а) ознайомлення з базами даних астероїдних сімейств, що ввійшли до каталогу Gaia DR3 та інших каталогів;
- б) формування загального масиву даних з фізичних властивостей окремих астероїдних сімейств на основі наземних та космічних спостережних даних;
- в) статистичний аналіз одержаних даних, їх інтерпретація та узагальнення з метою виявлення можливих факторів, що можуть вказувати на процеси вивітрювання для членів досліджуваних сімейств.

Наукова новизна досліджень полягає в одержанні нових даних для вибраних астероїдних сімейств.

Розділ 1. Сімейства астероїдів

1.1 Історія відкриття сімейств астероїдів

Про те, що в Сонячній системі між орбітами Марса і Юпітера рухаються численні дрібні тіла, найбільші з яких у порівнянні з планетами лише кам'яні брили дізналися трохи більше 200 років тому, їх відкриття стало закономірним кроком на шляху пізнання навколишнього світу. Перший астероїд, 1 Церера, був відкритий 1 січня 1801 року італійським астрономом Джузеппе Піацці в Палермо, Сицилія. Пізніше було відкрито інші астероїди, але на той момент їх розуміння було досить обмеженим. У другій половині 19 століття астрономи почали відзначати схожі орбітальні параметри та спектральні властивості певних груп астероїдів. Це спричинило підозру, що деякі астероїди можуть мати спільне походження [24].

Астероїдні сімейства - це групи астероїдів, які мають схожі орбіти та фізичні характеристики, і вважається, що вони мають спільне походження з одного батьківського тіла, яке розпалося в результаті зіткнення з іншим космічним об'єктом або іншого подібного процесу [16, 10]. Найбільшим сховищем астероїдів є головний пояс, який включає тіла зі стабільними орбітами між Марсом і Юпітером. Однак з часом, взаємні зіткнення розбили деякі з цих астероїдів, створюючи родини фрагментів; вони дрейфували вздовж орбітальної півосі завдяки не гравітаційній силі, відомій як ефект Ярковського [7], що й зумовило їх розташування у наш час.

Астероїдні сімейства формуються в результаті колізій між астероїдами [10]. Коли два або більше астероїдів зіштовхуються, вони можуть розлетітися на шматки, які розлітаються у різні напрямки. Ці шматки можуть мати подібні орбіти, особливо якщо розлетілися в одному напрямку. Японський астроном Хіраяма Кійоцугу першим ввів поняття "власних" орбітальних елементів для визначення груп астероїдів, що характеризуються схожими фізичними елементами [9].

У 1857 році, французький астроном Іпполіт Фіцджеральд відкрив родину астероїдів і назвав її "Флора" на честь астероїда 8 Флора. Він помітив, що орбіти

цієї родини астероїдів дуже збігаються, це можна пояснити тим, що астероїди походять від одного і того ж батьківського тіла, яке розпалося через зіткнення з іншими тілами [1]. Після цього було відкрито ще декілька астероїдних сімейств, таких як Евномія, Ібеко, Короніс і Марія. У 1918 році американський астроном Макс Вольф відкрив найбільше астероїдне сімейство - "Еос" (було назване на честь найбільшого астероїда цього сімейства 221 Еос). Із появою комп'ютерів та автоматизованих методів аналізу даних відкриття та аналіз сімейств стало значно більш точним і систематичним, було відкрито багато нових астероїдних сімейств, наприклад, такі, як Карінда, Фомальгаута, Немезіда, Ганнібал та інші. Завдяки цим дослідженням ми отримали велику кількість інформації про розподіл, характеристики та походження астероїдних сімейств, що допомагає в розумінні еволюції та динаміки Сонячної системи.

Хіраяма застосував теорію вікових збурень Лапласа — Лагранжа для розбиття орбіт астероїдів на генетичні групи, ввівши поняття власних ексцентриситету та нахилу. У результаті виявив п'ять груп астероїдів, які мали схожі середні рухи, ексцентриситет і нахил орбіт; ці групи він назвав сімействами: сімейства Феміди, Еос, Короніди, Марії і Флори. Іноді всі ці сімейства згадуються під єдиною назвою - Сімейство Хіраяма. Він висунув гіпотезу, що члени кожного з цих сімейств астероїдів утворилися в результаті розпаду одного великого тіла. До невеликого списку Хіраяма почали додавати багато нових сімейств астероїдів: починаючи з 1990 року, розвиток більш об'єктивних математичних методів покращив ситуацію з ідентифікацією сімейств. Крім того, став доступним більш точний набір внутрішніх даних, що дозволило дослідникам проаналізувати більший список орбіт астероїдів [9].

1.2 Методики відбору астероїдів до сімейств

Сьогодні нараховується понад 100 відомих астероїдних сімейств, і вони продовжують вивчатися астрономами для отримання більш детальних відомостей про походження та еволюцію Сонячної системи.

Для відбору астероїдів до сімейств використовують різні методи, такі як аналіз орбіт, спектроскопію, вимірювання альbedo та інші характеристики. Аналіз орбіт є основним методом відбору, оскільки астероїди в одному сімействі мають подібні орбіти навколо Сонця. Також, спектроскопічні вимірювання допомагають визначити склад астероїдів, а вимірювання альbedo допомагають відрізнити світлі поверхні астероїдів від темних.

Загалом, відбір астероїдів до сімейств є складним процесом, який вимагає багато різних досліджень та аналізів. Однак, цей процес є важливим для розуміння еволюції астероїдів та їхнього впливу на формування нашої Сонячної системи. Ідентифікація сімейств астероїдів може бути здійснена за допомогою декількох методів, таких як аналіз орбіт, спектроскопія, фотометрія [14] та ієрархічна кластеризація [22].

Орбітальний аналіз - це процес визначення параметрів орбіти астероїда, таких як період обертання навколо Сонця, ексцентриситет, нахил орбіти і орбітальне положення. Астероїди, що належать до одного сімейства, мають подібні орбітальні параметри. Цей метод може бути виконаний шляхом порівняння параметрів орбіт астероїдів, або за допомогою статистичного аналізу орбітальних елементів.

Метод вейвлет-аналізу- це метод оцінки щільності точок, заснований на використанні специфічної функції, названої «вейвлетом». За допомогою цього методу можна виявити локальну щільність точок, що належать до N-вимірного простору в різних масштабах. Зазвичай в якості координат використовують орбітальні параметри, такі як наприклад ексцентриситет, чи нахил орбіти. Крім того, можна використовувати і інші параметри, такі як наприклад осьовий момент та співвідношення великої та малої півосі орбіт. Якщо певну сітку накласти на фазовий простір, можна обчислити вейвлет-коефіцієнт у кожній вершині. Чим вище значення цього коефіцієнта, тим щільніше кластеризація поблизу цієї вершини, і навпаки, чим ближче до нуля цей коефіцієнт, тим більш однорідним є локальний розподіл. Використовуючи цей метод для квазівипадкових точкових розподілів, можна оцінити ступінь виявлення

справжньої кластеризації. Ці два методи часто використовуються в останні роки. В принципі, обидва виявляють одне й те саме скупчення, хоча й відрізняються кількістю астероїдів, що входять до нього [10].

Ієрархічна кластеризація - це метод аналізу даних, який використовується для класифікації об'єктів на групи на основі їхніх схожих властивостей. Для виявлення астероїдних сімейств за допомогою ієрархічної кластеризації спочатку визначаються такі властивості, як параметри орбіт і спектральні характеристики астероїдів. Потім, на основі подібності цих властивостей, астероїди розділяють на класи, які можуть представляти кожен родину астероїдів. Одним з методів ієрархічної кластеризації для визначення сімейств астероїдів є використання дерев класифікації. Спочатку кожен астероїд розглядається як окремий клас. Потім класи об'єднують у більші групи на основі схожості їхніх властивостей, формуючи таким чином «дерево» класифікації. Для створення «дерева» класифікації можна використовувати різні методи зв'язування, такі як метод одиночного зв'язку, метод повного зв'язку та метод середнього зв'язку. Для цих методів існує загальна формула, запропонована А. Н. Колмогоровим для заходження подібності:

$$K_{\eta}([i, j], k) = \left[\frac{(n_i K(i, k)^{\eta} + (n_j K(j, k)^{\eta}))}{n_i + n_j} \right]^{\frac{1}{\eta}}, \quad -1 \leq \eta \leq +1$$

Де: $[i, j]$ — група з двох об'єктів i і j ; k — об'єкт, з яким шукається схожість зазначеної групи; $n(i)$ — кількість елементів в об'єкті i ; $n(j)$ — кількість елементів в об'єкті j , η - коефіцієнт, який залежить від вибраної метрики і розподілу змінної. Після створення «дерева» класифікації можна ідентифікувати групи астероїдів і віднести їх до різних астероїдних сімейств. Потім ці групи можна досліджувати більш детально, щоб дізнатися про їхню природу і походження. У контексті застосування формули Колмогорова для вимірювання подібності між об'єктами в ієрархічній кластеризації, зазвичай використовуються такі елементи, які можна описати числовими значеннями,

наприклад, довжина, вага, температура, густина тощо. Крім того, можуть бути використані інші методи для ідентифікації сімейств астероїдів, такі як:

- Аналіз спектрів зіткнення: при зіткненні астероїда з іншим об'єктом може відбуватися розбризкування матеріалу, який може бути виявлений на Землі. Якщо ці матеріали мають подібний спектр, то астероїди, можуть належати до одного сімейства.
- Аналіз хімічного складу: вивчення складу вільних метеороїдів, що приходять на Землю, може дати підказку про склад матеріалу, який утворився при руйнуванні астероїда. Якщо склад вільних метеороїдів має подібний склад до астероїдів, то ці астероїди можуть належати до одного сімейства.

Загалом, ідентифікація сімейств астероїдів є складним процесом, який вимагає використання декількох методів та врахування різноманітних факторів. Однак, знання про сімейства астероїдів може допомогти зрозуміти їх походження та еволюцію в сонячній системі.

Так як астероїдні сімейства складаються з групи об'єктів, які мають схожі орбіти і, ймовірно, походять з одного батьківського тіла, то кожне астероїдне сімейство має свою орбіту характеристиками якої будуть власні елементи орбіти астероїдного сімейства. За цими характеристиками визначають, до якого конкретного сімейства астероїдів належить той чи інший об'єкт. Власні елементи орбіти включають наступні параметри: велика піввісь орбіти; ексцентриситет; нахил орбіти; аргумент перигелію (кут між напрямом до перигелію і певним напрямом у площині орбіти).

Власні елементи орбіт є важливою складовою для ідентифікації сімейств, проте ця характеристика з плином часу може змінюватися в наслідок планетарних збурень. Оскулююча орбіта сімейства (орбіта, по якій стало б рухатися небесне тіло, якби в деякий момент часу збурюючі сили раптово перестали діяти на тіло, може бути еліпсом, параболою або гіперболою[8], Рис.

1.1) формується відразу після розколу батьківського тіла, але потім об'єкти починають швидко відхилятися, внаслідок ефекту збурень.

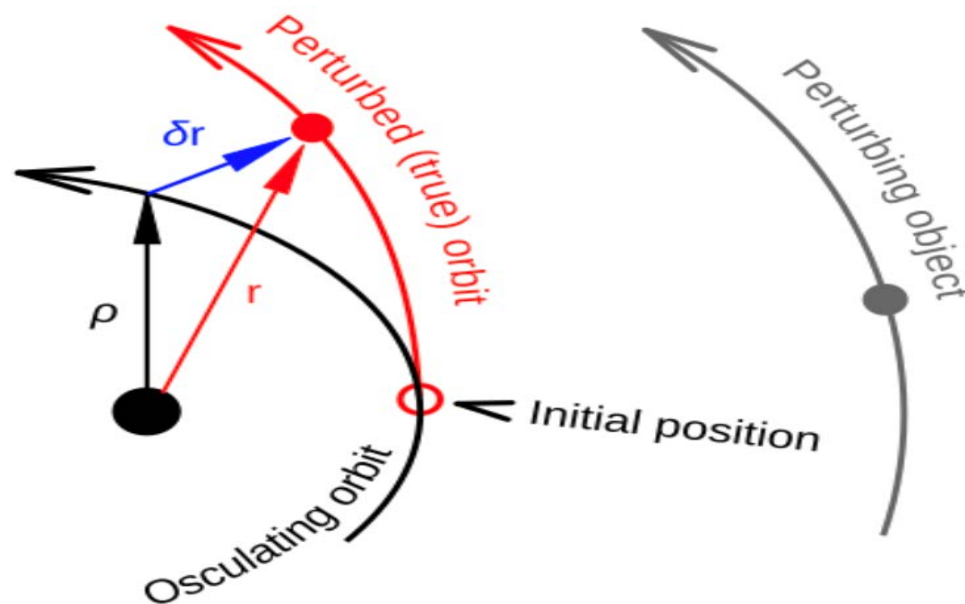


Рис. 1.1 Оскулююча (чорна) та збурена орбіта (червона) [26]

Удосконалення динамічних теорій і обчислювальних методів призвело до того, що з'явилося багато даних про власні елементи астероїдів. Разом із цим з'явилося багато методів ідентифікації, проте це не завжди добре, бо застосовуючи різні методи ідентифікації науковці складуть каталоги і тоді ми можемо побачити невідповідності у них.

1.3 Динамічні характеристики основних астероїдних сімейств

Основні астероїдні сімейства знаходяться в головному поясі астероїдів, який розташований між орбітами Марса та Юпітера (Рис. 1.2). Найбільш відомими і вивченими астероїдними сімействами є Eridania, Flora, Koronis, Nysa, Vesta, Pallas. Основні астероїдні сімейства зазвичай мають назви за найбільшим тілом у групі. Найбільші сімейства розташовані у центральній частині поясу, між 2.1 та 2.5 астрономічних одиниць від Сонця. Проте, є і сімейства, які знаходяться

близько до крайньої межі поясу, або навіть на ній, прикладами можуть бути сімейства Eridania, Nysa та Pallas [10].

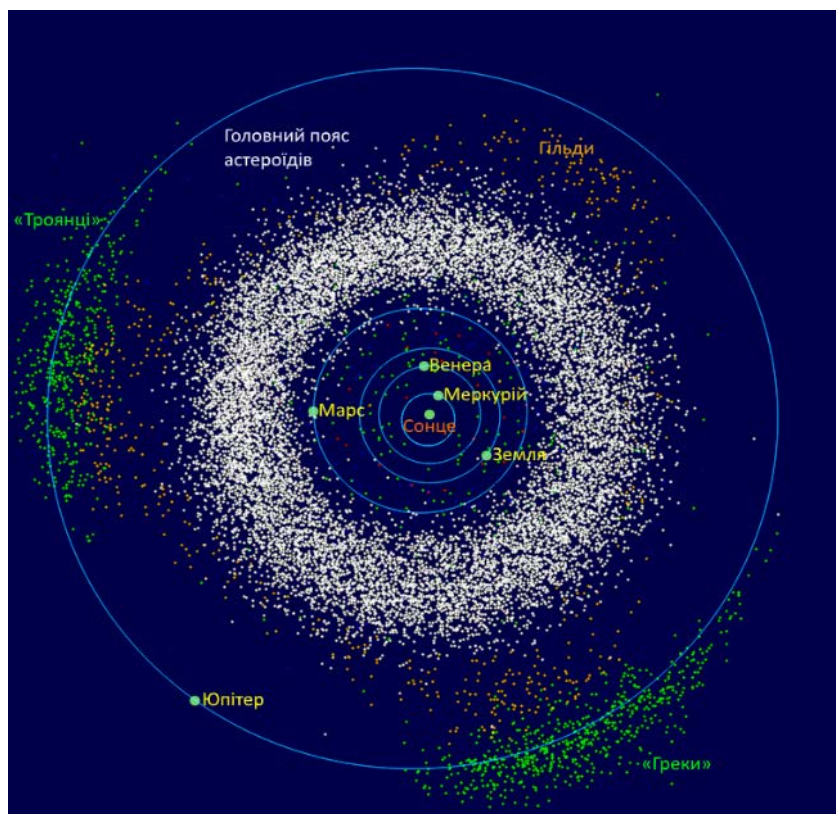


Рис. 1.2 Схема розташування астероїдів у Сонячній системі [27]

Астероїдні сімейства характеризуються певним діапазоном значень ексцентриситету та нахилу орбіт. Ексцентриситет показує, наскільки еліптичною є орбіта астероїда, і коливається від 0 (кругова орбіта) до 1 (параболічна орбіта). Нахил орбіти показує кут між площиною орбіти астероїда та екліптикою і коливається від 0 (екваторіальні орбіти) до 90 градусів (полярні орбіти).

Найбільші астероїдні сімейства зазвичай мають досить схожі значення ексцентриситету та нахилу орбіт. Це можна побачити, порівнюючи сімейства, які мають кути нахилу орбіт від 0° до 20° (рис. 1.3), а також на діаграмі розподілу астероїдів у залежності від нахилу орбіти та ексцентриситету (рис. 1.4). Однак сімейство Grigorieva, яке також розташоване поблизу внутрішньої межі поясу астероїдів, має ексцентриситет до 0,1 і нахили орбіт близько 5-6 градусів. Якщо порівнювати їх із такою групою як Koili, яка розташована на краю поясу

астероїдів, і має ексцентриситет близько 0,4 і нахил орбіти 30 градусів, то ми побачимо, що її характеристики доволі сильно відрізняються від характеристик тих астероїдних сімейств, які знаходяться ближче до центру. Характеристики ексцентриситету і нахилу орбіти сильно варіюються в залежності від факторів, що впливають на об'єкт, таких як гравітаційна взаємодія між астероїдами, теплові ефекти і сонячне випромінювання. Наприклад, сімейство Junos має дуже високий ексцентриситет близько 0,4 і нахил орбіти близько 13 градусів, що можна пояснити тепловими ефектами [4].

Але слід звернути увагу на те, що самі астероїди мають різні форми та розміри в межах одного сімейства, через це їх динамічні характеристики можуть

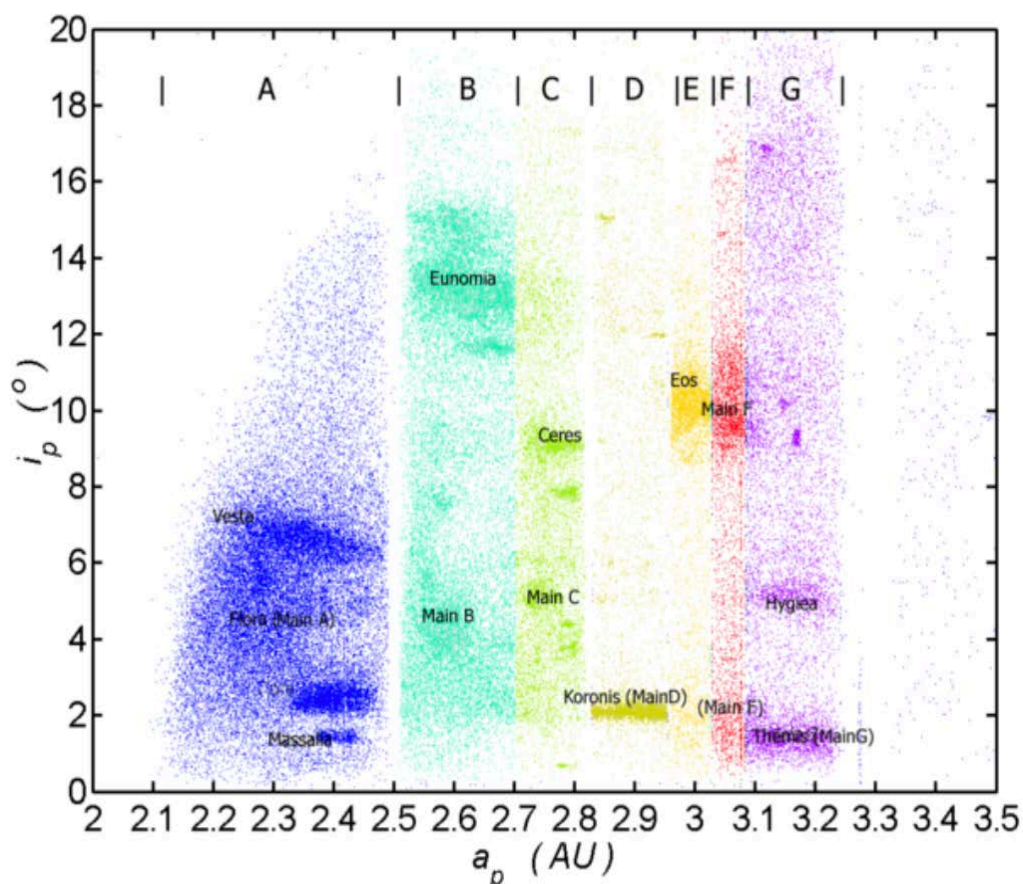


Рис. 1.3 Діаграма розподілу астероїдів у залежності нахилу від великої півосі [28]

бути різними. Проте в середньому, основні астероїдні сімейства мають нахили від 0 до 20 градусів і ексцентриситети від 0,07 до 0,18. Виходячи із перерахованого вище можна зрозуміти, що характеристики розмірів, мас, форм

впливають і на розподіл астероїдів в астероїдному поясі. Саме тому сімейства з вищими значеннями ексцентриситету та нахилом орбіт зазвичай розташовуються на краях поясу, тоді як сімейства з меншими значеннями зосереджені більш в середині поясу. Також слід зазначити, що існує багато дрібних астероїдних сімейств, які мають менш регулярні характеристики орбіт, які можуть бути результатом більш складних взаємодій між астероїдами та іншими факторами.

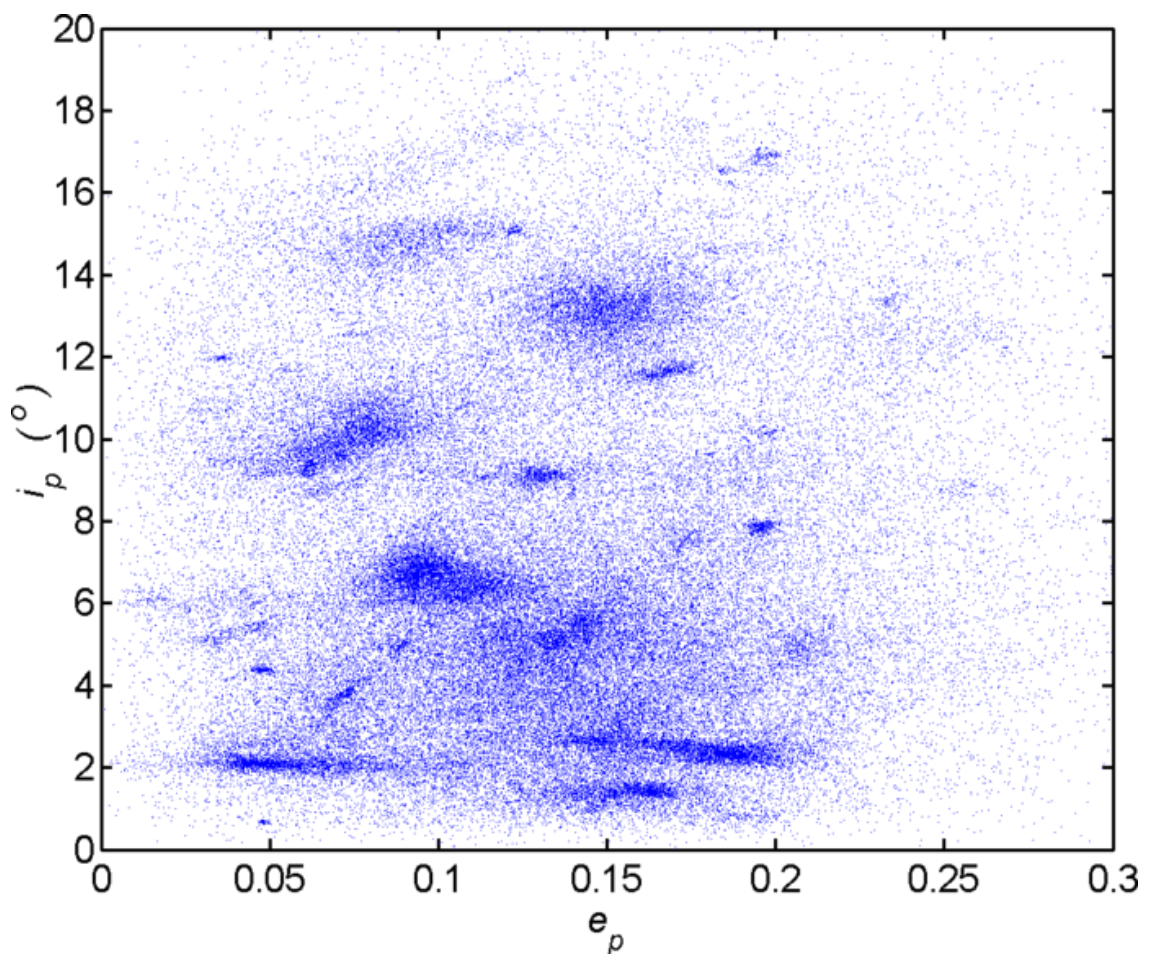


Рис. 1.4 Діаграма розподілу астероїдів у залежності нахилу орбіти від ексцентриситету [28]

1.4 Процеси вивітрювання на астероїдах

Поверхні безатмосферних об'єктів, таких як астероїди і Місяць, піддаються високоенергетичному опроміненню протягом тривалого часу, що змінює властивості розсіювання світла матеріалу. Внаслідок опромінення випаровується

матеріал, який повторно конденсується і покриває частки реголіту тонким шаром, що містить частки субмікронного або нанофазного заліза npFe^0 [7].

Вивітрювання - це процес поступової зміни поверхні об'єкта (наприклад, астероїда, місячної поверхні, кам'яних утворень, тощо) під впливом негативних зовнішніх факторів, таких як термічні, механічні або хімічні впливи. На астероїдах, наприклад, цей процес може включати термічні зміни коливань температури внаслідок сонячного випромінювання, механічні впливи від мікрометеоритів і космічного пилу, хімічні реакції від іонних потоків та інші фактори. У результаті цих процесів поверхня астероїда змінюється з часом, можуть утворюватися тріщини, вигини, розшарування та інші структурні аномалії.

Більша частина наших знань про процеси космічного вивітрювання надходить із досліджень місячних зразків, добутих екіпажами Аполлонів, особливо реголіту. Постійний потік високоенергетичних частинок і мікрометеоритів, разом із великими метеоритами, дробить, розпилює та випаровує компоненти місячного ґрунту [6]. Космічні місії до невеликої кількості астероїдів S- типу надали докази космічного вивітрювання на їх поверхнях. Зображення поверхні Гаспри, зняті космічним апаратом Галілео, показали, що яскравий, спектрально менш червоний (свіжий) реголіт сконцентрований на краях кратерів, а темніший, спектрально червоніший (вивітрюваний) матеріал в основному зустрічається на схилах [8]. Вивітрений реголіт також проявляв до 30% зниження спектрального контрасту порівняно зі свіжими поверхнями. Аналогічно, поверхня астероїда Іда, S- типу головного поясу, була характеризована наявністю двох ділянок різного кольору: одна темніша (на 1%) і червоніша, з менш вираженими смугами поглинання, а інша, з яскравішою, менш червоною поверхнею, яка мала смуги поглинання на 5% сильніші [2, 20]. Темніші області корелюють з низинами, а яскравіша поверхня знаходиться серед місць ударів, таких як кратер Аццурра, і пов'язаного з ними матеріалу, що викидається. Крім того, варіації спектрального нахилу та глибини

поглинання в середньоальбедних астероїдах S- типу, які містять силікати, також пояснюються космічним вивітрюванням [3].

Вивітрювання на астероїдах відбувається в результаті впливу, таких основних факторів, як сонячне випромінювання, космічні впливи (мікрометеорити, космічний пил), іонні потоки та термічні цикли.

- Сонячне випромінювання: Інтенсивне сонячне випромінювання може викликати термічні цикли на поверхні астероїдів, що призводить до розширення та стиснення поверхневих матеріалів, що, в свою чергу, може призвести до розтріскування та розшарування (дуже добре видно на зображеннях астероїда Бенну, переданими космічним апаратом).
- Космічні впливи: Мікрометеорити та космічний пил можуть зіткнутися з поверхнею астероїдів, що викликає механічне зношування та руйнування поверхні.
- Іонні потоки: Вплив сонячного вітру та магнітних полів на поверхню астероїдів може викликати хімічні реакції та зміни в складі поверхневих матеріалів.
- Термічні цикли: Швидкі зміни температури на поверхні астероїдів можуть призвести до термічного втомлення матеріалу та утворення тріщин.

Процес вивітрювання може значно змінювати спектральні властивості астероїдів та інших небесних тіл. Одні з основних ефектів вивітрювання включають зменшення спектрального контрасту, зміну спектрального нахилу та глибини смуги, а також формування спектральних або кольорних аномалій. Наприклад, процес вивітрювання може призводити до збільшення вмісту наночасток заліза ($n\text{pFeO}$) у реголіті астероїда. Це може призвести до зміни абсорбційних характеристик спектра, зокрема, збільшення глибини смуги та зміни спектрального нахилу. Деякі аналізи також показують, що космічне випромінювання може впливати на розмір та форму зерен реголіту. Зміни в розмірі зерен можуть відбитися на спектральних характеристиках, зокрема на вигляді абсорбційних смуг та зміні відбивної здатності. Крім того, космічна погода може викликати формування різних хімічних сполук на поверхні

астероїда, таких як оксиди та гідроксиди металів. Ці сполуки можуть мати вплив на спектральні властивості у різних діапазонах хвиль, що призводить до змін у спектрах [12]. Зокрема, нахил спектра стає "червонішим". Це означає, що спектр відбивної здатності астероїда зсувається в бік довших хвиль, тобто у червону область спектра. Причиною цього є те, що дрібні частинки на поверхні астероїда починають відбивати більше червоного світла через зміни у мінералогічному складі та структурі поверхневого шару.

В рамках дослідження астероїда (101955) Бенну за допомогою космічного апарату "Осиріс-Рекс" (OSIRIS-REx) були здійснені спектральні вимірювання у діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 4,3 мкм. Видимий і інфрачервоний спектрометр "Осиріс-Рекс" (OVIRS), а також інші дистанційні засоби спостереження на борту космічного апарату, надали контекст для вивчення зразка і були використані для характеристики темної поверхні Бенну [19]. На поверхні астероїда Бенну спостерігається значна кількість великих каменів, а також глибокі вирви та яри. Такі різноманітні структури вказують на складний процес формування поверхні астероїда, можливо, пов'язаний з метеоритним бомбардуванням та тепловими процесами. Також на поверхні Бенну спостерігаються темні плями та світлі ділянки, що може свідчити про різні склади матеріалів або різну ступінь впливу впорядкованих процесів, таких як відкладення пилу або вивітрювання. Зокрема, OVIRS був спроектований для картографування спектральних смуг різних речовин, таких як силікати, оксиди, карбонати, гідратовані мінерали та органічні сполуки з глибинами >5%.

Повні спектри Бенну, отримані під час підходу космічного апарату, показали лише одну особливість з глибиною смуги понад 5%: поглинання при 2,7 мкм, що свідчить про гідратовані філосилікати. Ця особливість присутня по всій поверхні, з варіаціями глибини смуги всього кілька відсотків. Органічні та карбонатні поглинання були виявлені в спектрах, отриманих в режимі розгляду поверхні. Ці спектральні особливості, пов'язані з вуглецем, не мали кореляції з іншими характеристиками поверхні: спектральні нахили у видимій частині довжин хвиль (<1,5 мкм), яскравість на 0,55 мкм та температура поверхні [19].

Розділ 2. Методика формування бази даних спектральних властивостей вибраних астероїдних сімейств

2.1. Відбір сімейств для аналізу спектральних властивостей

Для аналізу впливу вивітрювання на астероїдні сімейства були обрані найбільші сімейства головного поясу різної таксономії Vesta, Flora та Themis. Дані були взяті із Міжнародної бази даних PDS. Для першого сімейства відбір за зоряною величиною проходив у межах від 14,5 до 17,0 зоряної величини, щоб охопити невеликі за розміром об'єкти з діаметром < 10 км. На Рис. 2.1 можна побачити розподіл зоряної величини усіх астероїдів, що належать до сімейства від власної півосі (загальна протяжність 0,25 а.о.).

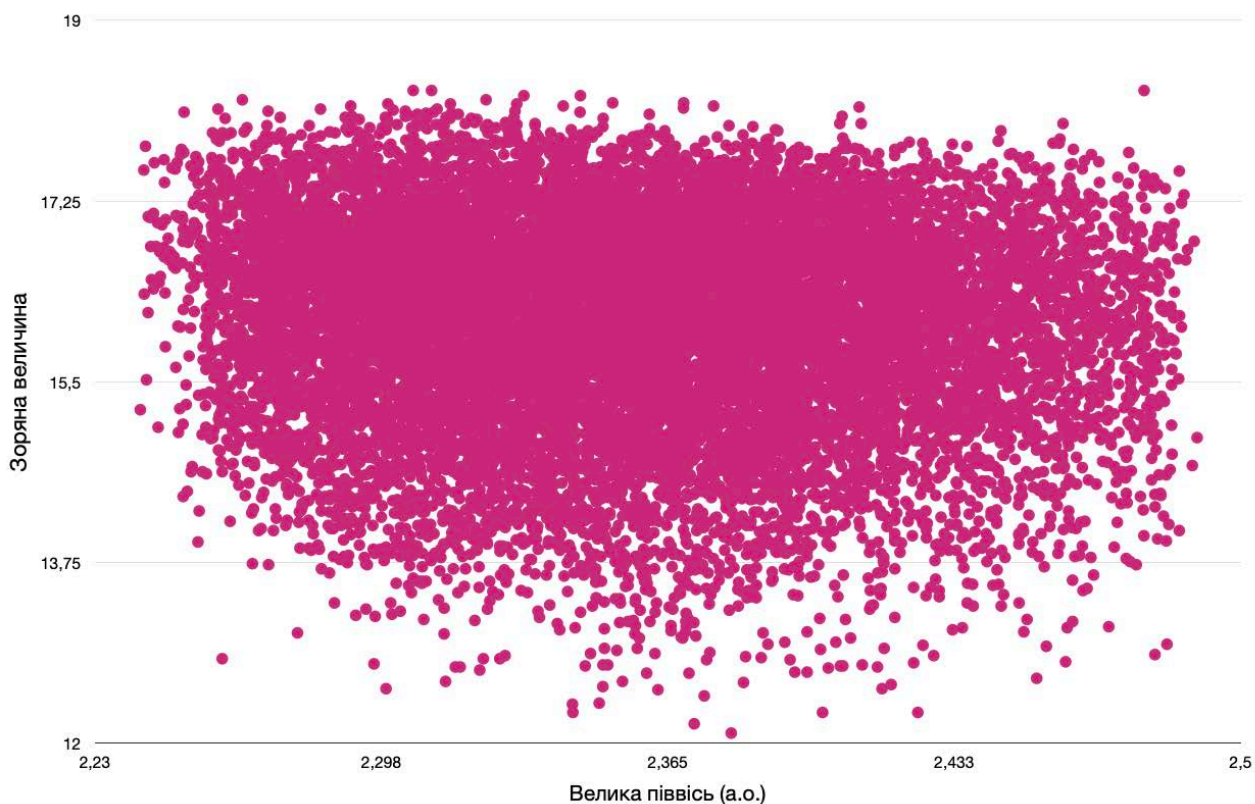


Рис. 2.1 Розподіл зоряної величини від власної півосі для сімейства Вести

Для сімейства Flora також відбір за зоряною величиною становив від 14,5 до 17,0 зоряної величини. На Рис. 2.2 можна побачити розподіл зоряної величини усіх астероїдів, що належать до даного сімейства від власної півосі (загальна протяжність 0,24 а.о.).

Для сімейства Themis відбір за зоряною величиною відбувся в межах від 12,6 до 15,0 зоряної величини, що пов'язано з меншою кількістю об'єктів у цьому сімействі, для яких є спектральні дані, оскільки воно знаходиться на краю головного поясу, і, відповідно, меншого розміру об'єкти мають слабкішу зоряну величину. На Рис. 2.3, можна побачити розподіл зоряної величини усіх астероїдів, що належать до цього сімейства від власної півосі (загальна протяжність 0,23 а.о.).

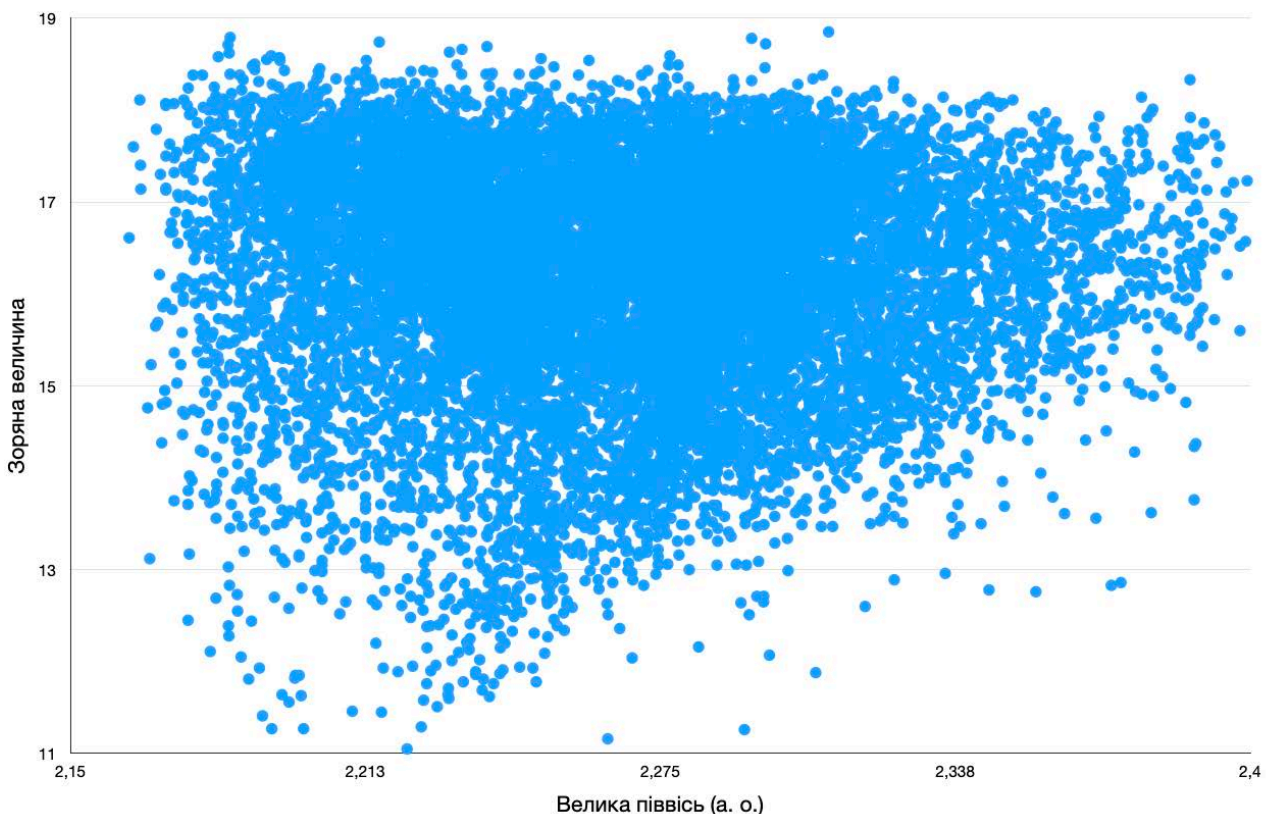


Рис. 2.2 Розподіл зоряної величини від власної півосі для сімейства Флори

Такі межі були обрані, щоб відбулося рівномірне розміщення за зоряною величиною астероїдів відповідного сімейства вздовж великої півосі. Як видно з рисунків, загальна протяжність вибірок за великою піввіссю приблизно однакова.

Після відбору астероїдів за зоряною величиною із вибраних сімейства, було ототожнено астероїди відповідного сімейства зі спектрами відбиття, що знаходяться у базі даних EDR3 релізу, отриманого супутником Gaia.

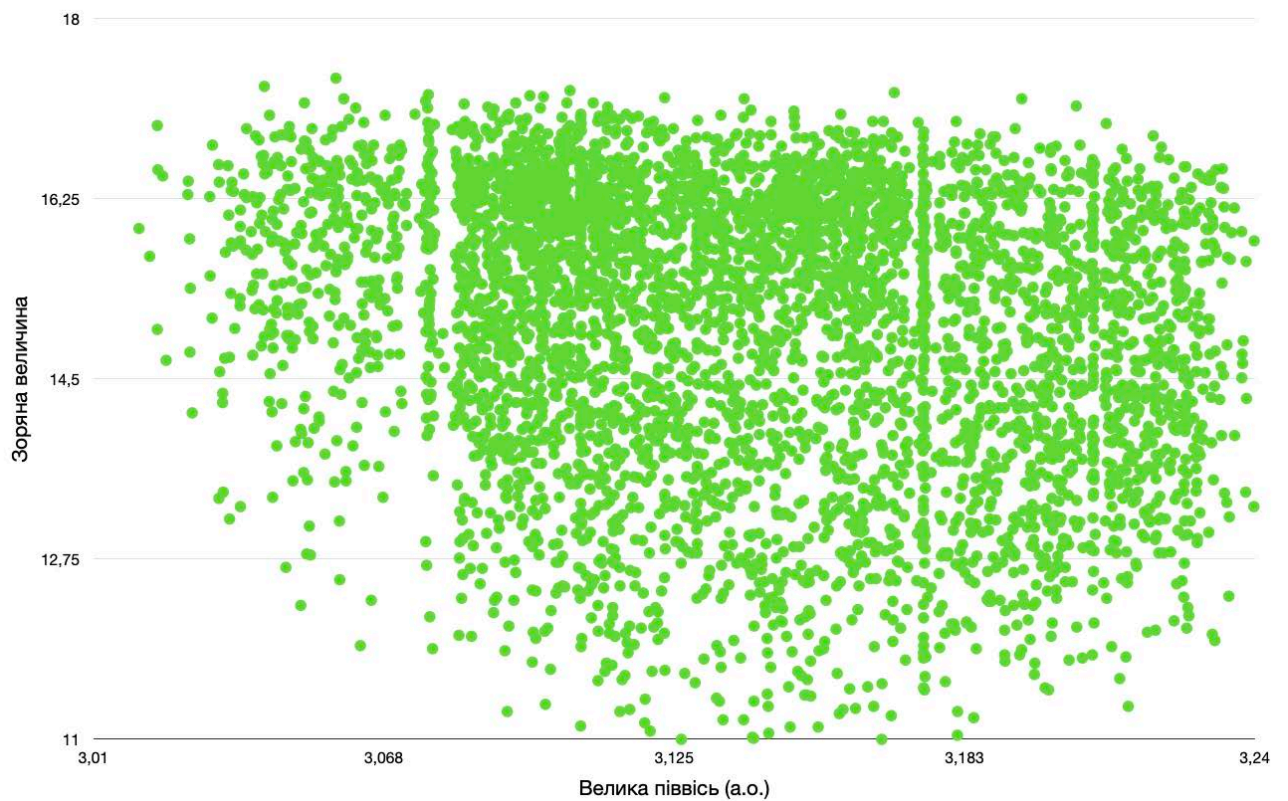


Рис. 2.3 Розподіл зоряної величини від власної півосі для сімейства Феміди

Для всіх астероїдів, що входять до вибраних сімейств було побудовано спектри та обчислено спектральні нахили у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Для побудови спектрального нахилу у видимому діапазоні було обрано довжини хвиль від 418 нм до 726 нм, приклади спектрів та обчислений спектральний нахил приведено на рисунках 2.4(а), 2.5(а), 2.6(а).

Для побудови спектрального нахилу у ближньому інфрачервоному діапазоні було обрано довжини хвиль від 726 нм до 902 нм, відповідні приклади спектральних кривих та нахилу наведено на рисунках 2.4(б), 2.5(б), 2.6(б). Дані на довжині хвилі 374 нм та 1034 нм були не дуже якісні, чи інколи навіть відсутні, тому вони не були використані для обчислення спектрального нахилу. Лінії спектрального нахилу були побудовані за методом найменших квадратів.

Метод найменших квадратів полягає у знаходженні таких значень коефіцієнтів a та b апроксимуючої функції $y=ax+b$, при яких сума квадратів ухилень є мінімальною

$$\sum_{k=1}^n (y_k - ax_k - b)^2 = \min$$

Умови мінімуму функції двох змінних a та b призводить до системи нормальних рівнянь

$$\sum_{k=1}^n (x_k^2 \times a) + \sum_{k=1}^n (x_k \times b) = \sum_{k=1}^n (x_k y_k)$$

$$\sum_{k=1}^n (x_k \times a + n \times b) = \sum_{k=1}^n (y_k)$$

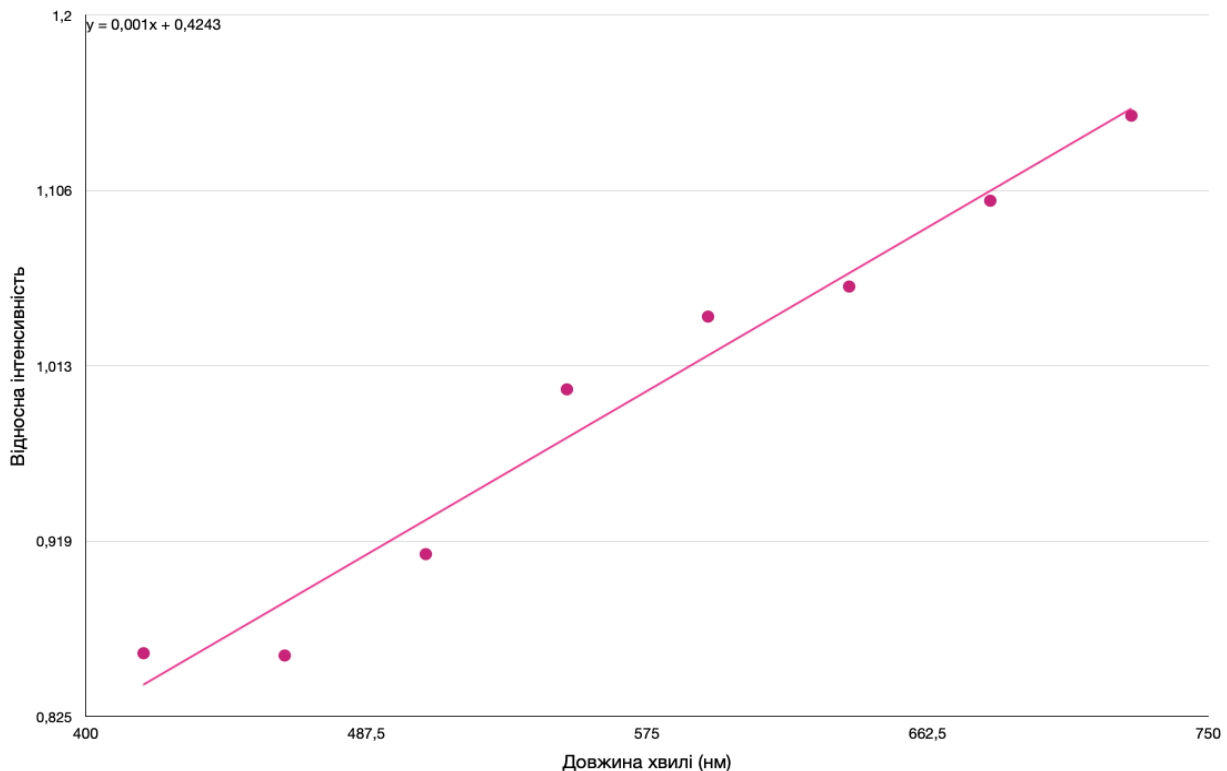


Рис. 2.4 (а). Спектральний нахил у видимому діапазоні для сімейства Вести, астероїд (11042) Ernstweber

Яка може бути отримана з системи умовних рівнянь

$$ax_k + b = y_k$$

$$k = 1, \dots, n.$$

Окрім значень a та b , можна також знайти із системи нормальних рівнянь похибки коефіцієнтів та 95%-довірчі інтервали для a та b .

$$s_a = 2\sqrt{-\frac{s^2}{n-2} \times \frac{n}{a}}$$

$$s_b = 2\sqrt{-\frac{s^2}{n-2} \times \frac{\sum_{k=1}^n (x_k^2)}{a}}$$

$$s^2 = \sum_{k=1}^n (y_k - ax_k - b)^2$$

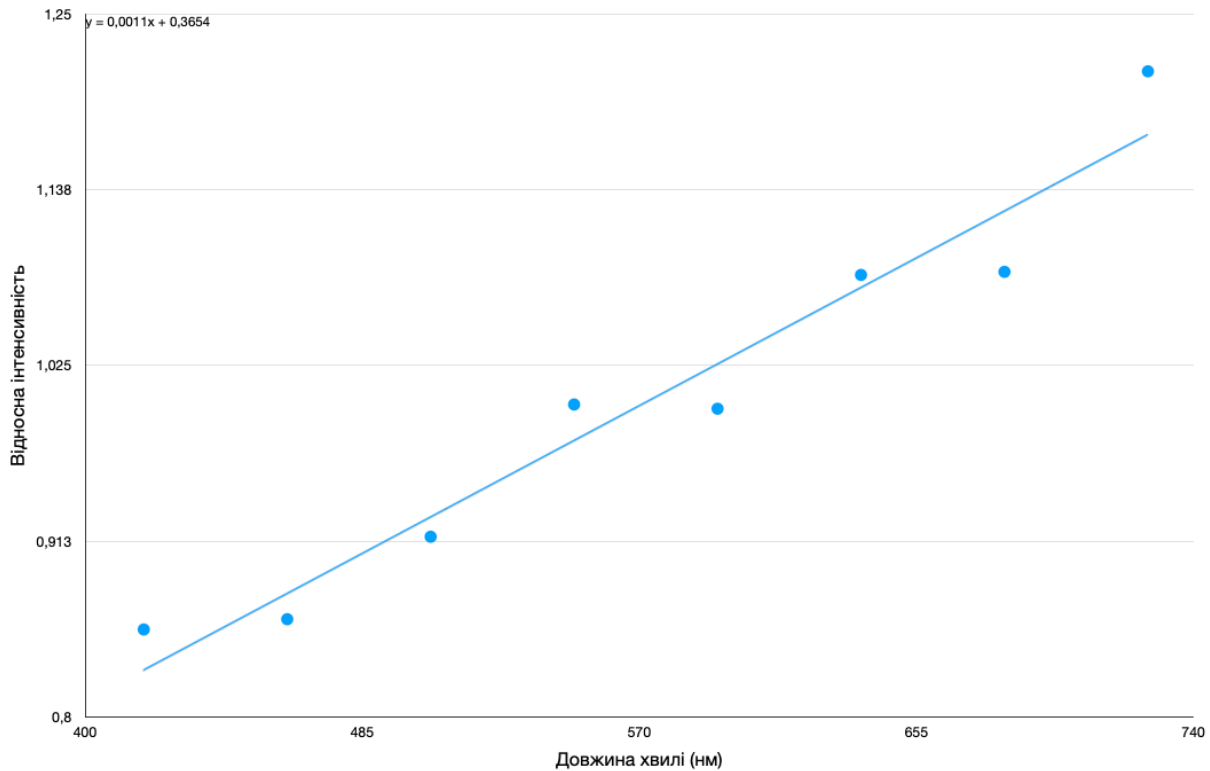


Рис. 2.5 (а). Спектральний нахил у видимому діапазоні для сімейства Флори, астероїд (24517) Omattage

2.2. Структура бази даних по сімействам з Міжнародної бази PDS

База даних була сформована Несворні та ін. [13, 16] використовуючи методи кластерного аналізу і вона налічує 122 астероїдних сімейств та 386929 окремих

астероїдів, що входять до цих сімейств. PDS є активним архівом, який забезпечує спільноті дослідників документовані, різноформатні дані про об'єкти Сонячної системи. Дані надходять від орбітальних, посадкових і роботизованих місій, а також від наземних програм, пов'язаних з цими місіями та іншими наземними програмами. Його керівництво веде відділ планетних наук при штаб-квартирі NASA.

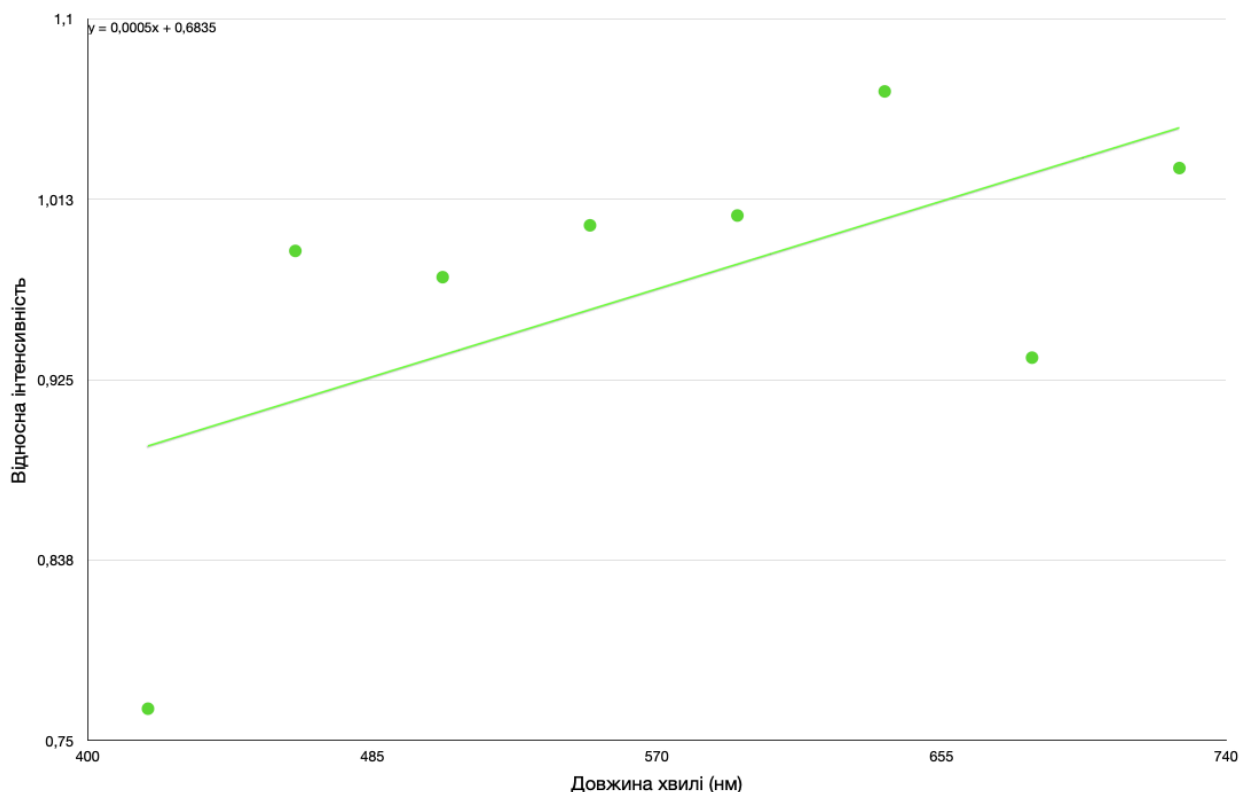


Рис. 2.6(a) Спектральний нахил у видимому діапазоні для сімейства Феміди, астероїд (7621) Sweelinck

Кожен заархівований продукт PDS описується за допомогою об'єктних міток, які надають інформацію про типи даних значень, що зберігаються [25]. Елементи даних `DATA_TYPE`, `BIT_DATA_TYPE` та `SAMPLE_TYPE` визначають початкове місце розташування та довжину для кожного поля. У визначеннях об'єктів даних PDS позиції байту, біта та записи йдуть зліва направо або з першого до останнього зустрінутого і завжди починаються з 1.

Дані по сімействам в базі PDS були сформовані наступним чином: 1 стовпець - номер астероїда (номер астероїда визначається порядком його

відкриття. Коли астероїд відкривається, йому присвоюється наступний вільний

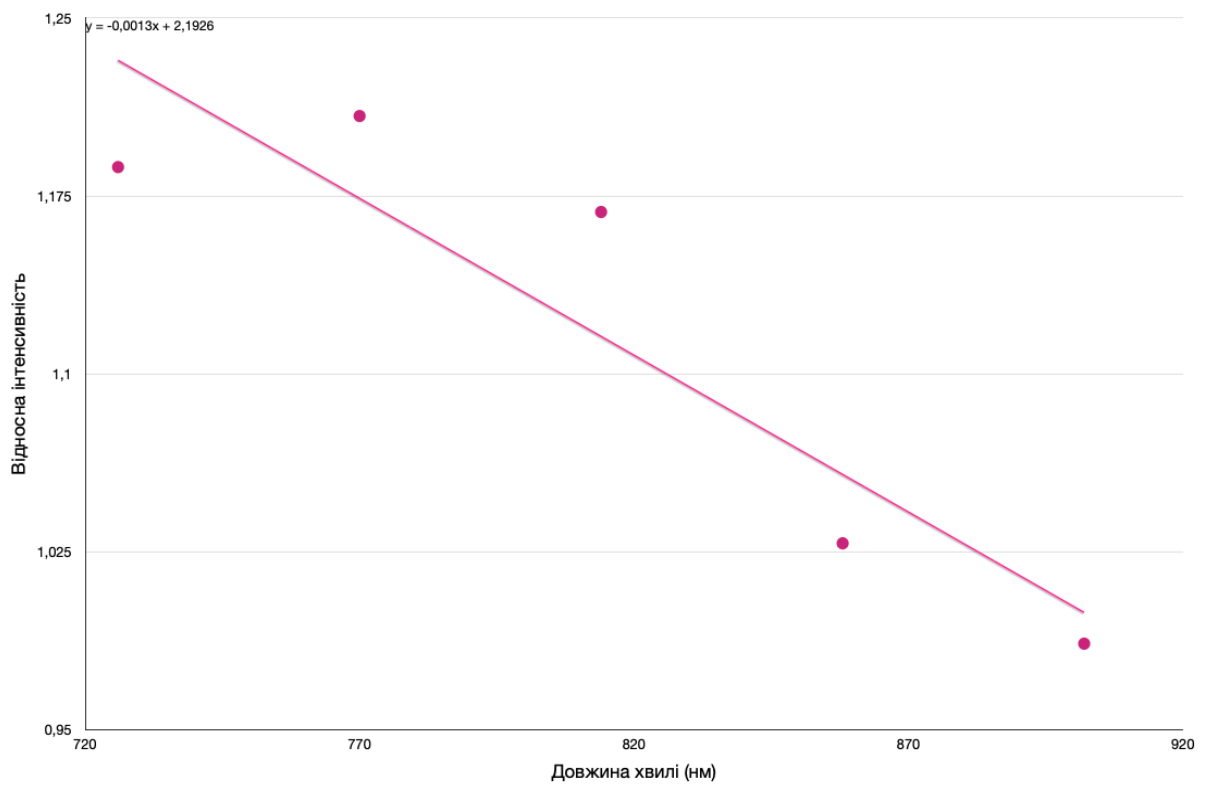


Рис. 2.4 (б). Спектральний нахил у інфрачервоному діапазоні для сімейства Вести, астероїд (11042) Ernstweber

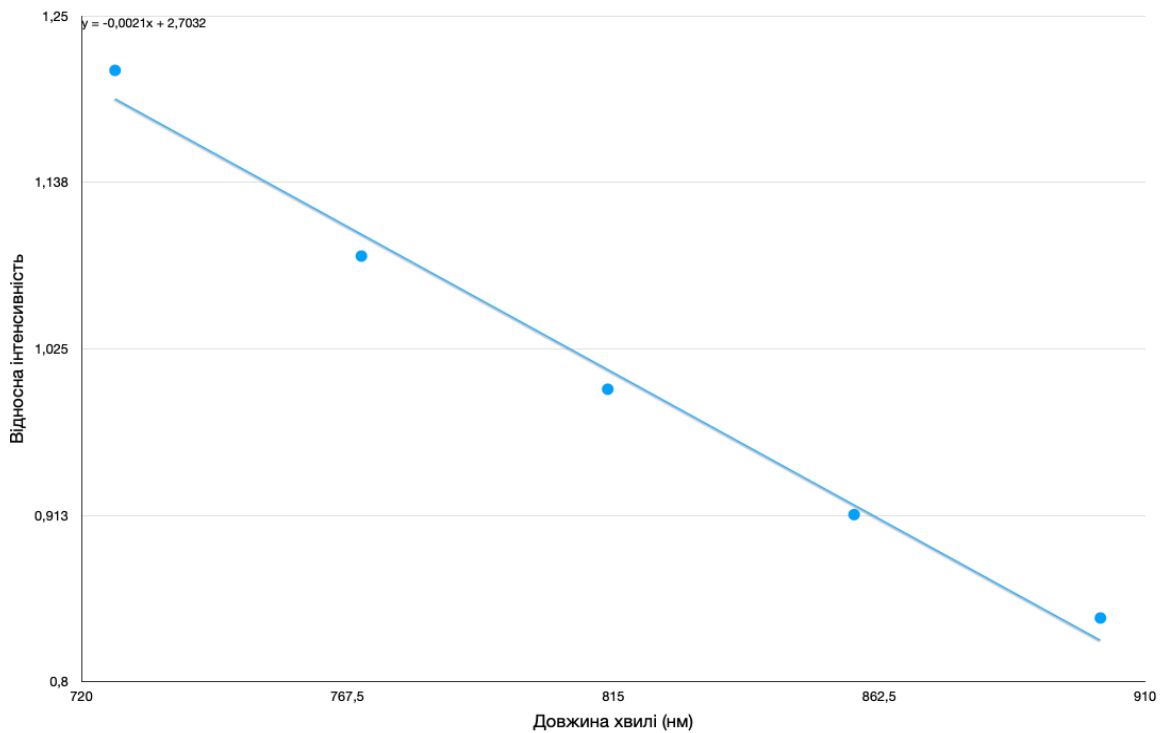


Рис. 2.5(б). Спектральний нахил у інфрачервоному діапазоні для сімейства Флори, астероїд (24517) Omattage

номер в порядку відкриття, наприклад, першому відкритому астероїду був присвоєний номер 1, другому - номер 2, і так далі. Це систематичний підхід, щоб мати унікальні ідентифікаційні номери для кожного відкритого астероїда), 2 - велика піввісь, 3 - ексцентриситет, 4 - синус нахилу, 5 - зоряна величина, 6 - параметр C (цей параметр допомагає виявити астероїди, що не являються членами сімейства, однак на даний момент перебувають у сімействі, тобто астероїдів, які, хоча можуть мати схожі орбітальні параметри з астероїдним сімейством, насправді не належать до цього нього і можуть мати інше походження) , 7 - номер сімейства (номер сімейства зазвичай визначається порядком їх відкриття або датою їх класифікації, наприклад, перше відкрите сімейство отримує номер 1, друге - номер 2 і так далі. Кожне сімейство має свій

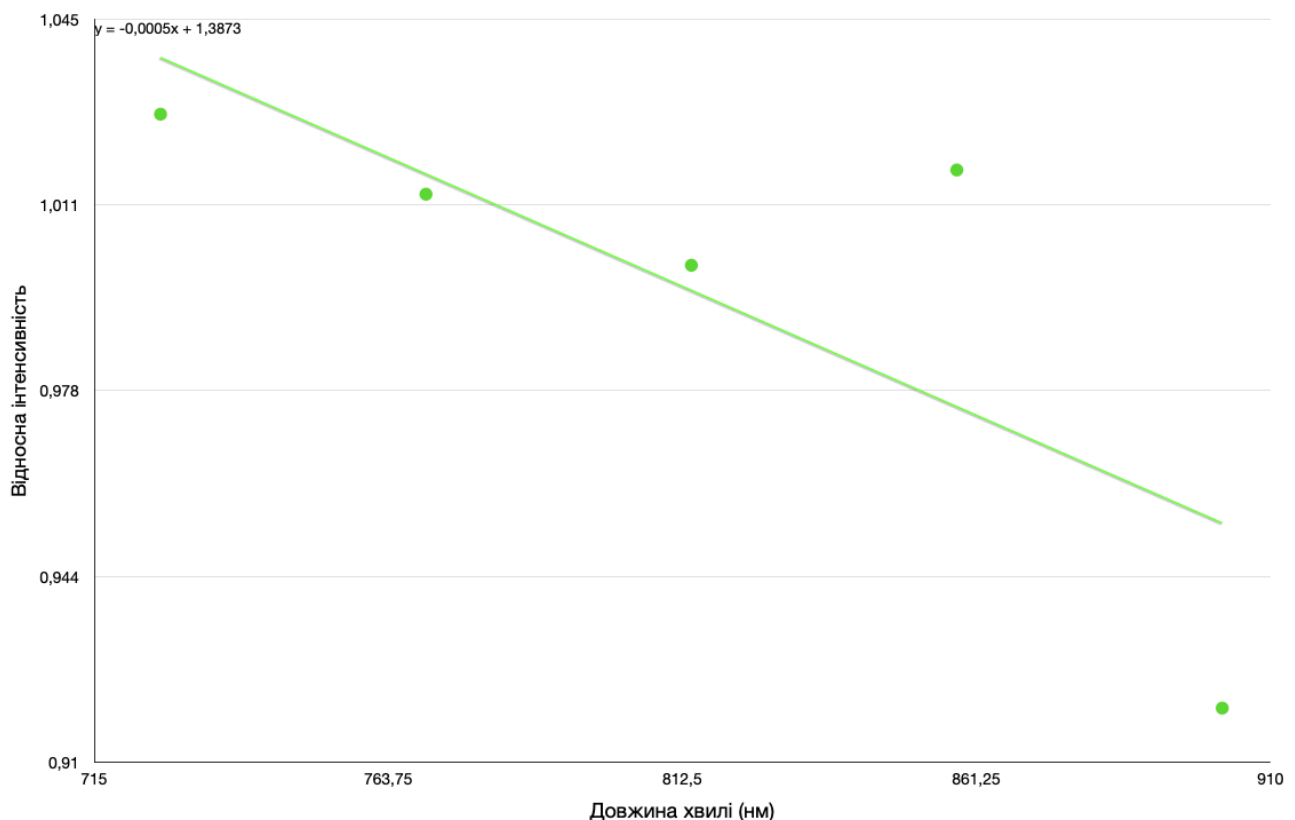


Рис. 2.6 (б). Спектральний нахил у інфрачервоному діапазоні для сімейства Феміди, астероїд (7621) Sweelinck

унікальний номер, який використовується для ідентифікації групи астероїдів), 8 – номер астероїда, від якого сімейство отримало назву, 9 - назва сімейства (назва зазвичай визначається за найбільш відомим астероїдом, що належить до цього

сімейства, наприклад, сімейство Веста (Vesta family) отримало назву від астероїда 4 Веста, який є найбільшим та найяскравішим об'єктом в цьому сімействі та одночасно четвертим за рахунком астероїдом, що був відкритий). Абсолютною вимогою до всіх даних в PDS є те, щоб відповідні системи координат і системи відліку були чітко вказані на мітках даних і супровідних документах. Всі ці дані були використані для відбору конкретних об'єктів з вибраних астероїдних сімейств. На рис. 2.7 представлений фрагмент даних для сімейства Вести з бази даних PDS.

33852	2.34958	0.09364	0.12335	14.96	-99.9999	401	4	Vesta
33875	2.26761	0.09653	0.11426	15.14	-99.9999	401	4	Vesta
33882	2.33003	0.09541	0.12051	15.39	-99.9999	401	4	Vesta
33897	2.36553	0.11279	0.10861	15.46	-99.9999	401	4	Vesta
33905	2.35057	0.08871	0.11383	14.82	-99.9999	401	4	Vesta
33963	2.26436	0.09923	0.12466	14.96	-99.9999	401	4	Vesta
33964	2.36312	0.09752	0.11786	14.75	-99.9999	401	4	Vesta
33971	2.31419	0.08812	0.09954	14.65	-99.9999	401	4	Vesta
33991	2.38812	0.11736	0.11182	15.16	-99.9999	401	4	Vesta
34002	2.29015	0.09778	0.11042	14.52	-99.9999	401	4	Vesta
34047	2.39782	0.12509	0.10681	14.57	-99.9999	401	4	Vesta
34079	2.37113	0.10526	0.10283	14.41	-99.9999	401	4	Vesta
34081	2.33407	0.09336	0.11405	14.26	-99.9999	401	4	Vesta
34086	2.31837	0.08889	0.11123	14.17	-99.9999	401	4	Vesta
34100	2.37025	0.10827	0.11023	14.60	-99.9999	401	4	Vesta
34101	2.33489	0.09700	0.11797	14.71	-99.9999	401	4	Vesta
34130	2.32319	0.10039	0.11104	14.69	-99.9999	401	4	Vesta
34166	2.31407	0.09160	0.12161	14.16	-99.9999	401	4	Vesta
34171	2.46962	0.11270	0.10293	14.38	-99.9999	401	4	Vesta
34189	2.48245	0.10957	0.11144	14.60	-99.9999	401	4	Vesta

Рис. 2.7 Фрагмент бази даних сімейства Вести в базі PDS

2.3. Структура бази даних спектрів астероїдів з каталогу Gaia EDR 3

Для аналізу спектрів вибраних астероїдних сімейств була використана база даних спектрів астероїдів з каталогу Gaia EDR3 місії Європейського космічного агентства Gaia. Ми скористалися спектрами відбиття, які були отримані з астрономічних спостережень астероїдів, проведених Gaia між 5 серпня 2014 та 28 травня 2017 року, і були опубліковані у червні 2022 року в рамках DR3 [5, 25]. Цей набір даних складається з середніх спектрів відбиття у діапазоні довжин

хвиль від 330 нм до 1050 нм для 60 518 об'єктів Сонячної системи (SSO-Solar System objects). Спектри відбиття були отримані двома спектрографами низької роздільної здатності на борту Gaia. Один з них оптимізований для спостережень у синьому діапазоні видимого світла і називається Blue-Photometer (BP), тоді як інший оптимізований для червоного діапазону і називається Red-Photometer (RP). Обидва спектрографи іноді колективно називаються як XP. Зокрема, BP охоплює діапазон довжин хвиль від 330 до 680 нм, а RP - від 640 до 1050 нм. Спектральна роздільна здатність кожного спектрофотометра є функцією довжини хвилі і змінюється від 4 до 32 нм на піксель для BP та від 7 до 15 нм на піксель для RP [5]. Коли астероїд проходив по фокальній площині Gaia у певну епоху, кожен спектрофотометр виміряв потік на кожній довжині хвилі, щоб створити спектри, віднесені до відповідної епохи. Для кожного астероїда кожний такий спектр був поділений на середній спектр серії перевірених зір, сонячних аналогів, щоб створити спектри, що подібні до сонячного спектру [5]. Оскільки діапазони довжин хвиль двох інструментів перекриваються в інтервалі від 650 до 680 нм, два спектри були об'єднані, щоб створити повне спектральне відбиття. Для кожного астероїда було асоційовано унікальний середній спектр відбиття, отриманий шляхом усереднення кількох спектрів, що охоплюють видимий діапазон довжин хвиль від 374 до 1034 нм у 16 дискретних смугах довжин хвиль.

Gaia DR3 є найбільшим космічним банком даних астероїдних спектрів у видимому діапазоні до цього часу. Gaia DR3 містить усереднені спектри головного поясу астероїдів, астероїдів, що наближаються до Землі, кентаврів, троянських астероїдів Юпітера та декілька об'єктів за орбітою Нептуна. Дані, які стали основою даних DR3, були зібрані Gaia протягом номінальної місії земних операцій з Точки Лагранжа L2 Землі між 5 серпня 2014 року і 28 травня 2017 року [5].

Файли в базі даних спектрів астероїдів з каталогу Gaia EDR 3 (рис. 2.8) формуються наступним чином: 1 стовпець – ідентифікатор ототожнення поля, 2 – ідентифікатор ототожнення об'єкта у полі, 3 - номер астероїда, 4 - назва, 5 – число дискретних смуг у спектрі, 6 – число спектрів при усередненні, 7 - спектр

відбиття, 8 - похибка відбиття спектрів, 9 - довжина хвилі. Для написання дипломної роботи були взяті з цієї бази даних номер астероїда, спектр відбиття (дані на довжинах хвиль 374 нм та 1034 нм не дуже якісні, чи інколи навіть відсутні, тому вони не використовувались в дипломній роботі), похибка відбиття спектрів, довжина хвилі.

-4284924206,4167557769573408785,4309,"marvin",16,22,0.96822447,0.018862471,946.0,0
-4284924206,4167557769573408785,4309,"marvin",16,22,1.0752211,0.025633918,990.0,0
-4284924206,4167557769573408785,4309,"marvin",16,22,0.98794067,0.058342766,1034.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.170244,0.20457926,374.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,0.7323394,0.03311428,418.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,0.79281837,0.020394975,462.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,0.8785874,0.018669643,506.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.0,0.018483467,550.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.0584906,0.020299587,594.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.0855005,0.02218813,638.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.1703368,0.021909285,682.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.2177664,0.02201684,726.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.2240477,0.02344543,770.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.291451,0.023869377,814.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.2920438,0.023746114,858.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.2278224,0.024017764,902.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.2706369,0.027128745,946.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.4266956,0.03674886,990.0,0
-4284924006,4167557769573408785,4329,"miro",16,24,1.3921777,0.070741236,1034.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,0.8293348,0.02181795,374.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,0.785311,0.00841808,418.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,0.8650496,0.006652116,462.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,0.94965667,0.00657153,506.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,1.0,0.0067487503,550.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,1.0297456,0.007033994,594.0,0
-4284923806,4167557769573408785,4349,"tiburcio",16,21,0.9909961,0.0070003658,638.0,0

Рис. 2. 8 Фрагмент бази даних спектральних властивостей астероїдних сімейств

За результатами відбору об'єктів з баз даних PDS та EDR 3 було підготовлено загальну вибірку даних для трьох сімейств з власними елементами орбіти та спектрами відбиття для 326 астероїдів. Ці дані представлені у Додатках 1-3 (колонка 1 – номер астероїда, 2 – велика піввісь орбіти, 3 – абсолютна зоряна величина, 4 – нахил на видимому діапазоні, 5 – нахил на видимому діапазоні (переведений в одиниці вимірювання %/100 нм), 6 – нахил на інфрачервоному діапазоні, 7 – нахил на інфрачервоному діапазоні (переведений в одиниці вимірювання %/100 нм), 8 – ексцентриситет орбіти, 9 – перигелійна відстань).

Розділ 3. Аналіз впливу процесів вивітрювання на спектральні характеристики вибраних астероїдних сімейств

3.1. Сімейство Вести

Сімейство Вести - це одне з найбільш великих та відомих сімейств астероїдів в Сонячній системі. Воно отримало свою назву від однойменного та найбільшого астероїда в цьому сімействі, який має номер 4 за каталогом Minor Planet Center. Сімейство Вести складається з групи астероїдів, які мають схожі орбітальні параметри та властивості, що свідчить про їх спільне походження від руйнування більшого астероїда у давньому минулому [10]. Інші астероїди у цій сім'ї значно менші, з діаметрами менше 10 км. Серед найяскравіших представників можна відзначити астероїди 1929 Коллаа і 2045 Пекін. Це означає, що їхній розмір можна оцінити приблизно в 7,5 км, за умови, що вони мають таке ж альbedo, як і Веста.

Відомо, що сімейство Вести утворилося в результаті зіткнення між астероїдами близько мільярда років тому, що призвело до викидання великої кількості уламків у космос. Ці уламки стали самостійними астероїдами, які ми спостерігаємо сьогодні, та залишили величезний кратер на південному полюсі Вести. Згідно з дослідженнями, розмір кратера становить близько 460 км у поперечнику і 13 км у глибину. Астероїди цього сімейства мають схожий мінералогічний склад та спектральні характеристики. Вивчення цього сімейства допомагає вченим краще зрозуміти процеси руйнування астероїдів, формування та еволюцію поясу астероїдів, а також може вказувати на попередні стадії формування планет у ранній Сонячній системі [11].

Кількість астероїдів сімейства Вести, за даними дослідження 2005 року, становить 6051 астероїдів, що становило 6 % від усіх відкритих астероїдів на той час. Діапазон абсолютних зоряних величин астероїдів сімейства Веста варіюється від 3,31 до 18,4 зоряних величин.

У ході написання роботи було виконано дослідження зміни нахилу спектру у видимому та близькому інфрачервоному діапазонах в залежності від

орбітальної відстані для аналізу впливу процесів вивітрювання за рахунок сонячного корпускулярного випромінювання. Для цього було відібрано та обчислено нахили спектрів для 144 астероїдів цього сімейства та побудовані графіки залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від великої півосі (рис. 3.1), залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від перигелійної відстані (рис. 3.2), залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від великої півосі (рис. 3.3) та залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від перигелійної відстані (рис. 3.4). Результати обчислень нахилів представлені в Таблиці 3.1.

Як видно з рисунків 3.1 та 3.2 є невелике збільшення нахилу з відстанню для видимого діапазону та навпаки зменшення для інфрачервоного (рис. 3.3-3.4). Для перигелійної відстані ці нахили більші за нахили від великої півосі, що може вказувати на зміни в поверхневому шарі за рахунок сонячного випромінювання (Таблиця 3.1).

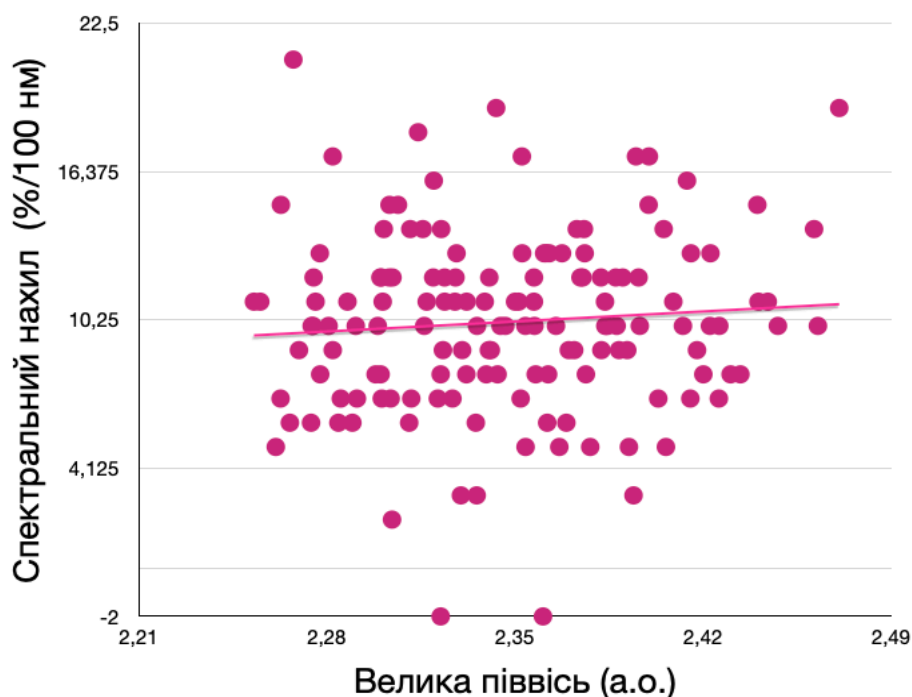


Рис. 3.1 Графік залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від великої півосі

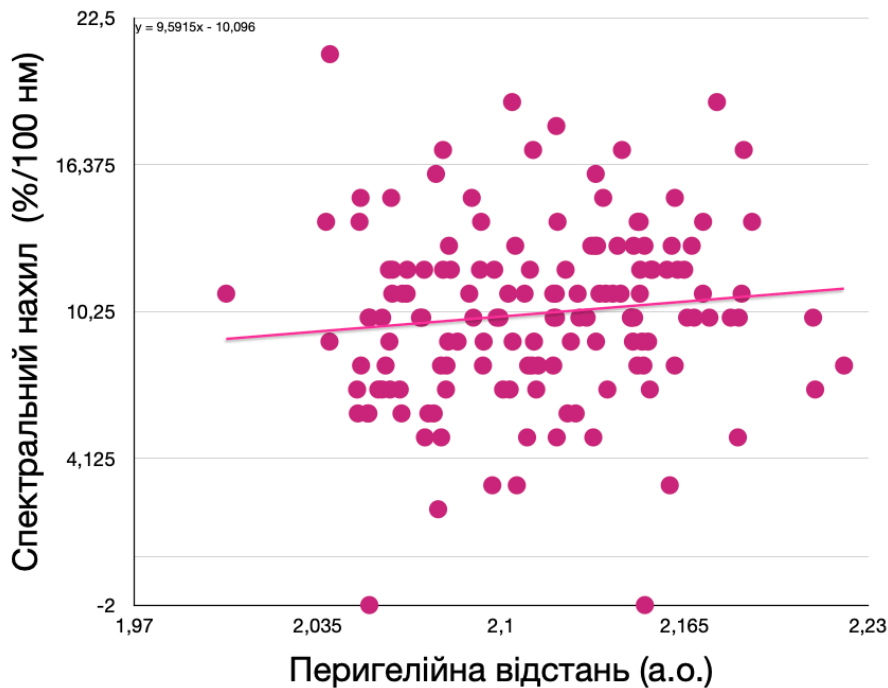


Рис. 3. 2 Графік залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від перигелійної відстані

3.2. Сімейство Флори

Сімейство Флори є однією із найближчих до нас астероїдних сімей і складається переважно з астероїдів класу S, які мають високе альbedo, що робить їх легше помітними порівняно з іншими астероїдами такого ж розміру. Таке властиве їм відбивання світла сприяло тому, що сім'я Флори стала однією з найчисленніших серед астероїдних сімей. Наприкінці 1995 року кількість астероїдів у цій сім'ї становила 604 об'єкти в основній групі та близько 1027 в ширшій групі. У 2005 році, за даними проєкту AstDys, серед 96 944 вивчених астероїдів було виявлено вже 7438 об'єктів, які входять до сім'ї Флори. Проте варто зазначити, що області, де знаходяться астероїди сімей Вести та Нізи, також частково перекриваються з областями сім'ї Флора. Тому приблизна кількість

членів сім'ї Флора оцінюється від 4000 до 5000 астероїдів, що становить близько 5–6% усіх відомих астероїдів в головному астероїдному поясі на час ототожнення у роботі [14]. Сімейство отримало свою назву від однойменного та найбільшого астероїда в цьому сімействі, який має номер 8 за каталогом Minor Planet Center.

Сімейство Флора вважається одним з найдавніших астероїдних сімейств, воно виникло внаслідок зіткнення батьківського астероїда з іншим великим об'єктом. Це призвело до викиду значної кількості фрагментів, які стали окремими астероїдами і утворили сімейство Флора. Головним членом цього сімейства є астероїд Флора, який становить близько 80% маси всього сімейства. Наступним за розміром є астероїд 43 Аріадна, який містить близько 9% залишкової маси сімейства. Решта астероїдів, які розподіляють залишкові 11%, мають діаметр менше 30 км. Сімейство включає велику кількість астероїдів, кількість об'єктів у цьому сімействі становить близько 13-15% від загальної кількості астероїдів [16].

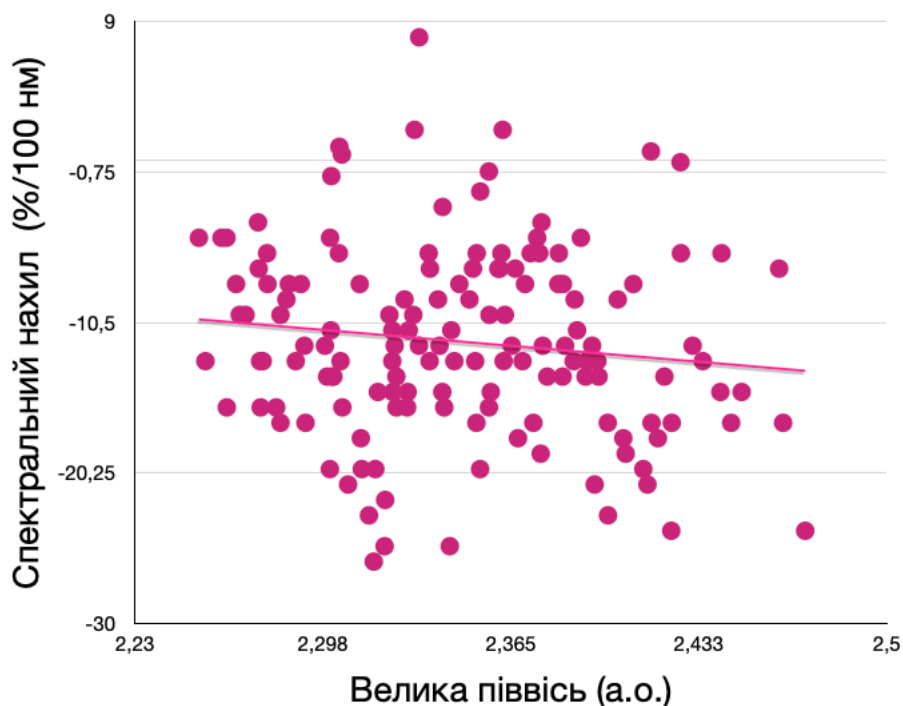


Рис. 3.3 Графік залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від великої піввісі

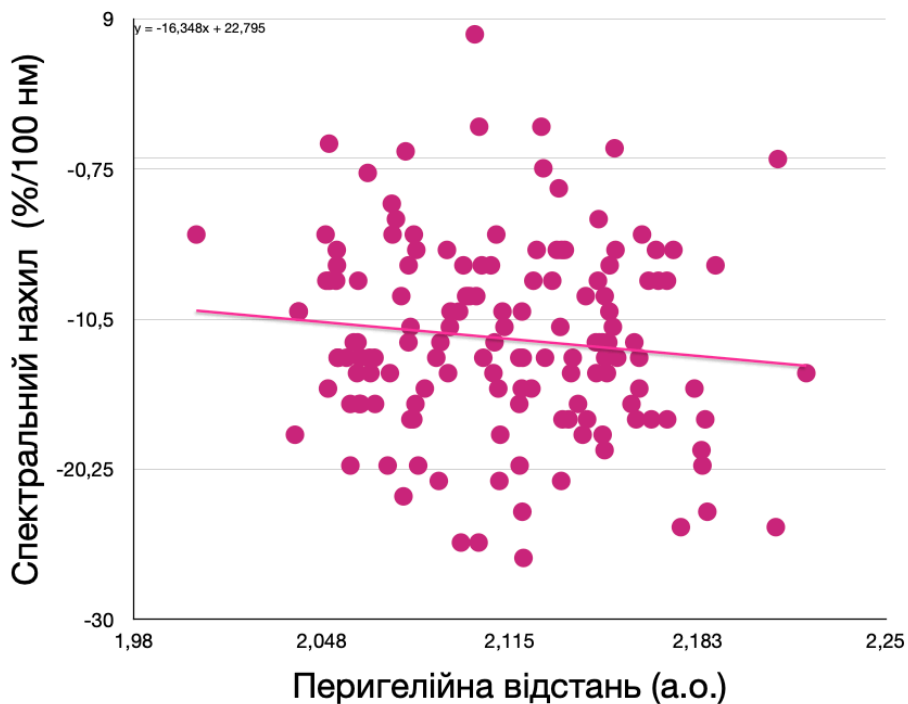


Рис. 3.4 Графік залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від перигелійної відстані

Загальний діапазон абсолютних зоряних величин для цього сімейства становить приблизно від 6,26 до 18,5 зоряних величин.

У ході написання роботи було обчислено нахили спектрів для 91 астероїда цього сімейства та зроблені графіки залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від великої півосі (рис. 3.5), залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від перигелійної відстані (рис. 3.6), залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від великої півосі (рис. 3.7), залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від перигелійної відстані (рис. 3.8).

На рисунку 3.5 бачимо, що є невелике зменшення нахилу для видимого діапазону в залежності від великої півосі, тоді як для залежності від перигелійної відстані (рис. 3.6) є навпаки збільшення нахилу. Для нахилу у інфрачервоному діапазоні, він збільшується і у випадку залежності від великої півосі і у випадку перигелійної відстані (рис. 3.7, 3.8), при цьому нахили більші у випадку перигелійної відстані у порівняння з відстанню від великої півосі. Це також може вказувати на вплив сонячного випромінювання.

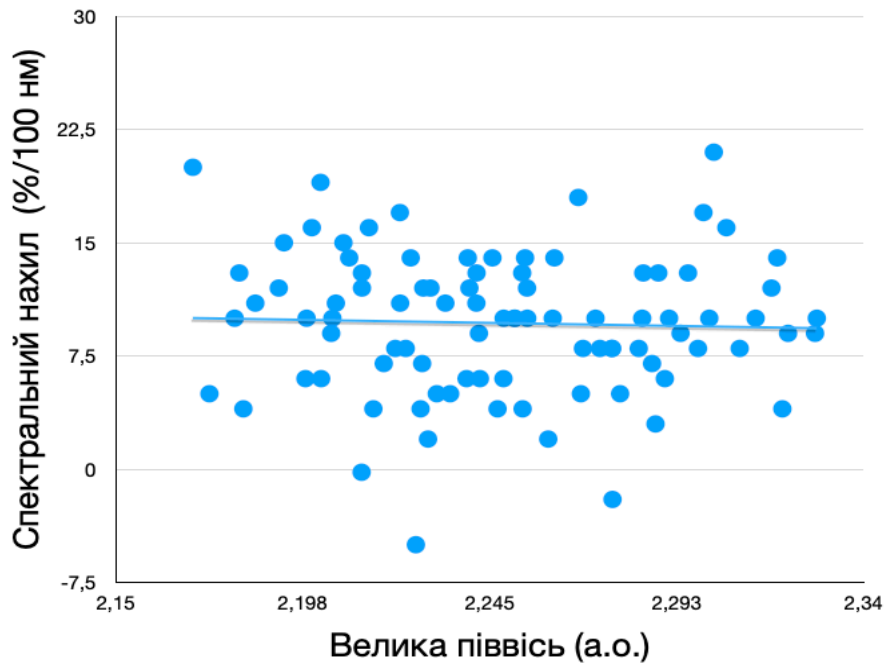


Рис. 3.5 Графік залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від великої півосі

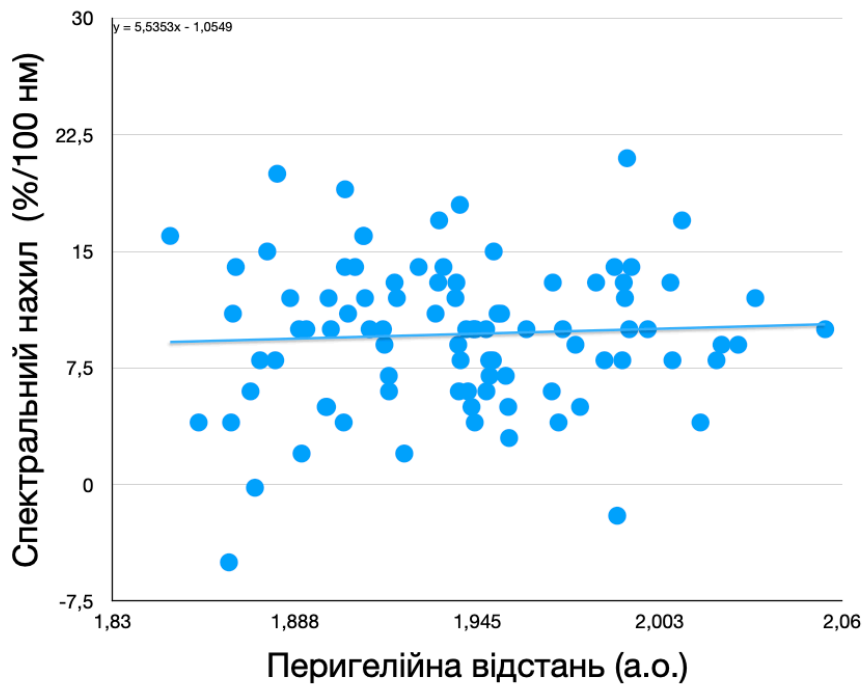


Рис. 3.6 Графік залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від перигелійної відстані

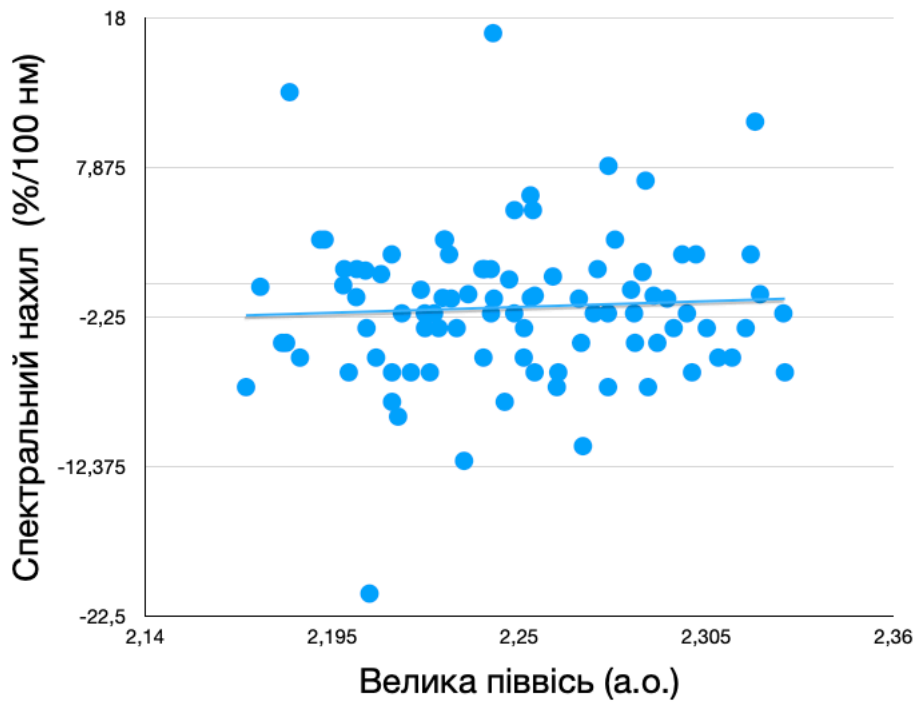


Рис. 3.7 Графік залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від великої півосі

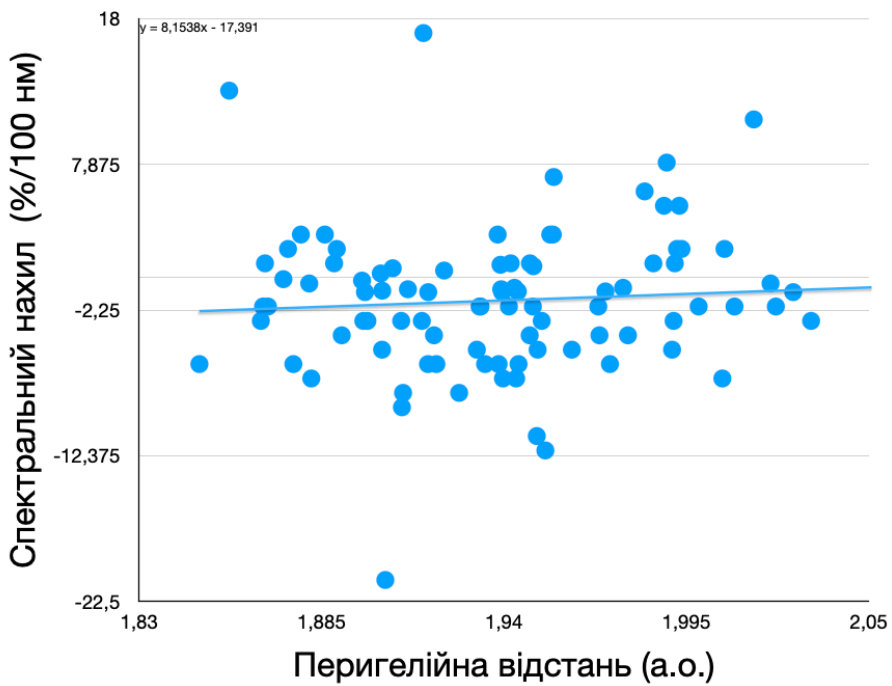


Рис. 3.8 Графік залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від перигелійної відстані

3.3. Сімейство Феміди

Сімейство Феміди є велике астероїдне сімейство, розташоване в зовнішній частині головного поясу астероїдів між орбітами Марса і Юпітера на середній відстані 3,13 а.о. від Сонця. Структура сім'ї Феміди відзначається чіткою диференціацією: найбільші астероїди розташовані у центрі, тоді як менші — на периферії. До центральної групи відноситься астероїд 24 Феміда, після якого сім'я отримала свою назву. Цей астероїд був відкритий італійським астрономом Анібале де Гаспарісом 5 квітня 1853 року. В даний час виявлено понад 535 членів цього сімейства.

Сімейство Феміди є одним з найстаріших динамічних сімейств і складається з темних вуглецевих астероїдів класу С, які за складом аналогічні хондритним метеоритам SM та CV [18].

Загальний діапазон абсолютних зоряних величин для цього сімейства становить приблизно від 7,1 до 17,2 зоряних величин. В даний час виявлено понад 500 членів даної сім'ї. Внутрішня межа сімейства проходить на відстані 3,08 а. о., а зовнішня на відстані 3,24 а. о. У ході написання роботи було обчислено нахили спектрів для 91 астероїда цього сімейства та зроблені графіки залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від великої півосі (рис. 3.9), залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від перигелійної відстані (рис. 3.10), залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від великої півосі (рис. 3.11), залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від перигелійної відстані (рис. 3.12).

Як видно з рисунків 3.9 та 3.10 є невелике зменшення нахилів з відстанню для видимого діапазону та навпаки збільшення для інфрачервоного (рис. 3.11, 3.12). Для перигелійної відстані ці нахили більші за нахили від великої півосі, що може вказувати на зміни в поверхневому шарі за рахунок сонячного випромінювання (Таблиця 3.1).

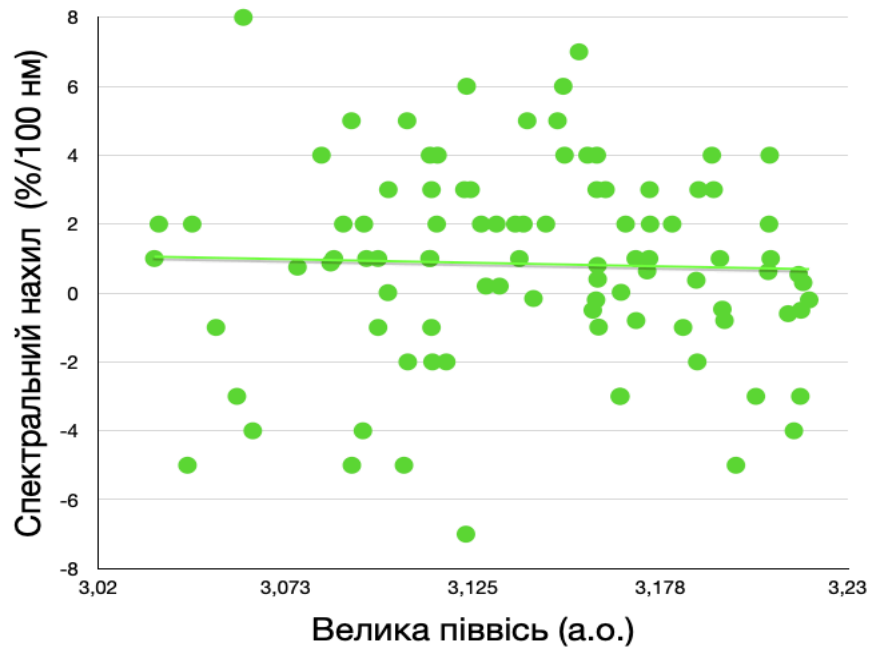


Рис. 3.9 Графік залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від великої півосі

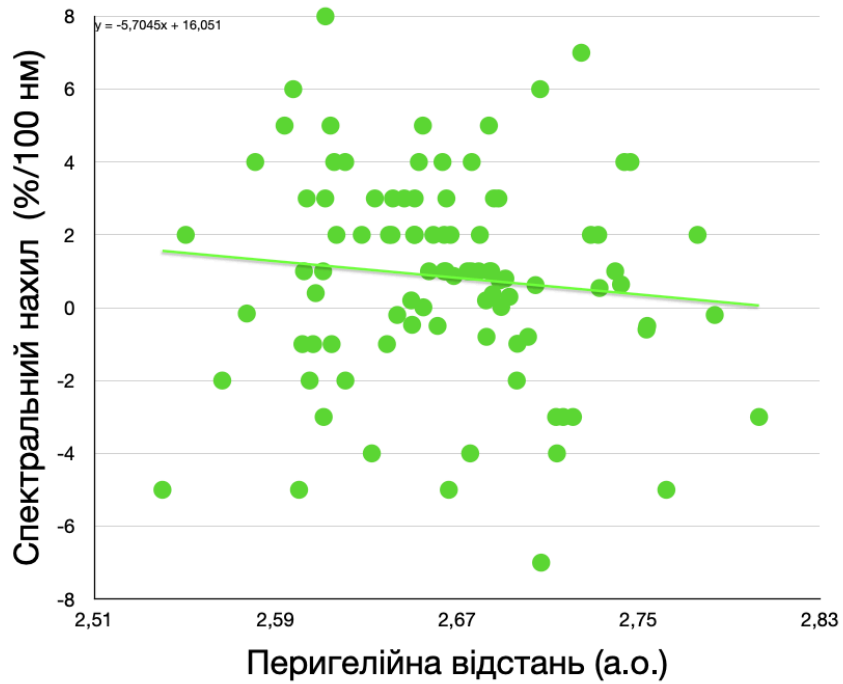


Рис. 3.10 Графік залежності спектрального нахилу у видимому діапазоні від перигелійної відстані

3.4. Порівняльний аналіз процесів вивітрювання на спектральні характеристики вибраних астероїдних сімейств

Як відомо з літературних джерел [12, 14, 15, 16], ефекти космічного вивітрювання змінюють поверхні астероїдів наступним чином: у випадку астероїдів S-типу це призводить до зменшення альbedo, а їх спектри стають значно «червоніші», ніж у метеоритів звичайних хондритів і мають набагато меншу смугу поглинання олівіну/піроксену поблизу 1 мкм. За даними [16] було зроблено навіть оцінки збільшення середнього нахилу у діапазоні від 0.35 до 0.9 мкм приблизно на 0.01 мкм за мільйон років. Що стосується астероїдів C-комплексу, то вони демонструють більше різноманіття спектральних змін. Опромінення прозорих органічних матеріалів створює спочатку більш червоні матеріали з низьким альbedo, які після подальшої обробки стають більш плоскими та синішими, а також стають темнішими. Але знайдена також кореляція між віком і кольором для сімей C-комплексу, яка потребує перевірки на новому спостережному матеріалі.

Отримані нами результати зміни середніх нахилів спектрів у видимому та ближньому ІЧ діапазонах відносно великої півосі та перигелійної відстані приведені в Таблиці 3.1 та представлені на рис. 3.13. Як видно з таблиці та рисунку, сонячне випромінювання впливає на поверхні вибраних об'єктів сімейств, оскільки є відповідні зміни у нахилах відносно великої півосі та перигелійної відстані, при чому залежність нахилів суттєво збільшується у випадку перигелійної відстані. Вплив не однаковий на різні спектральні типи сімейств, що ймовірно пов'язано з різною мінералогією цих сімейств.

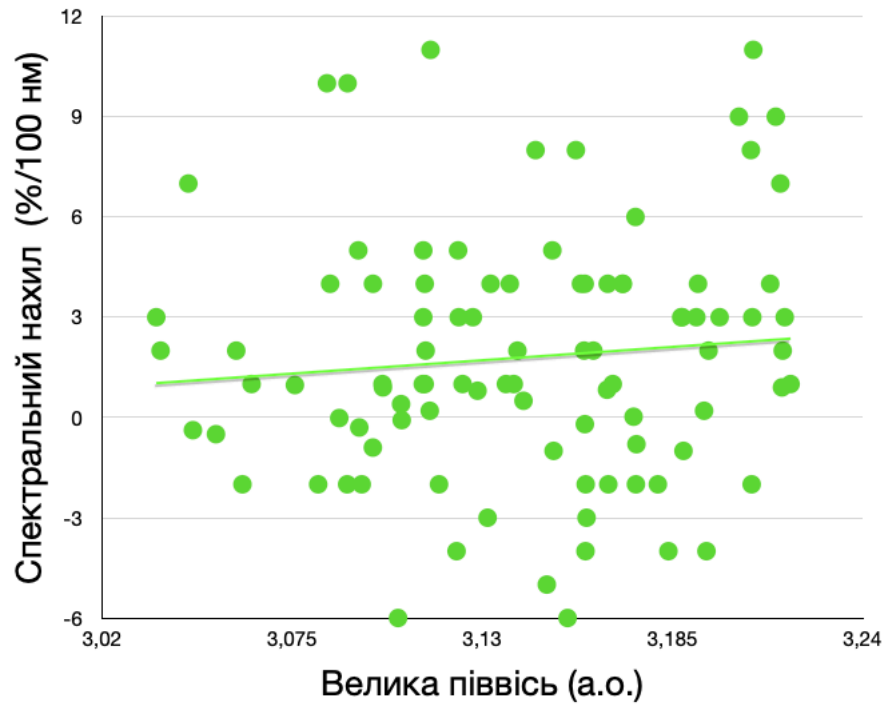


Рис. 3.11 Графік залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від великої півосі

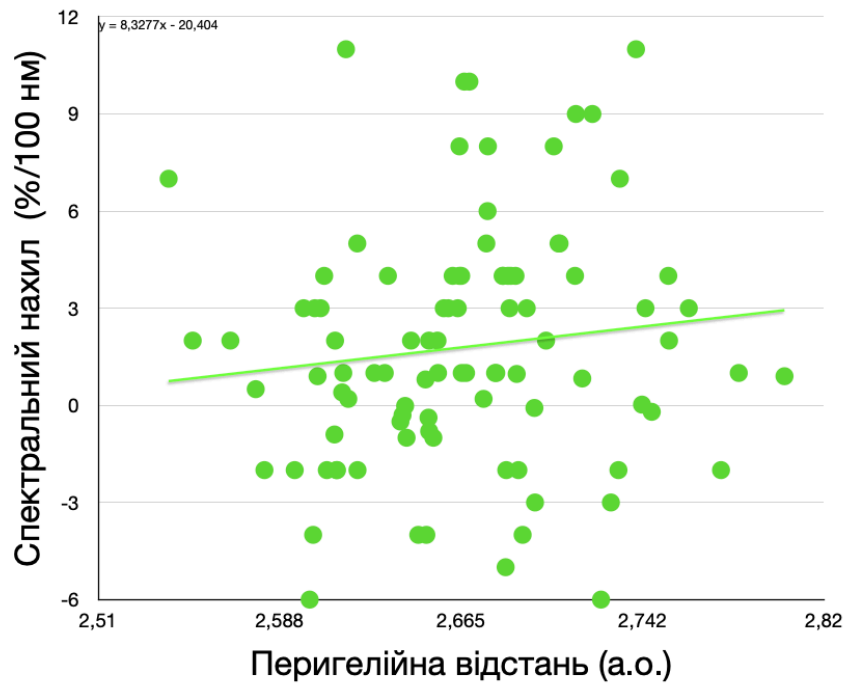


Рис. 3.12 Графік залежності спектрального нахилу в інфрачервоному діапазоні від перигелійної відстані

Сімейство Вести має найбільший нахил у видимо та інфрачервоному діапазоні, що може свідчити про сильнішу дію сонячного випромінювання на поверхню, багату піроксеновими мінералами. Раніше вже були досліджені представники сімейства Вести на рахунок сонячного вивітрювання, однак дослідження проводилися для астероїдів більшого розміру, і були виявлені сліди вивітрювання. У даній роботі проведений аналіз представників розміром < 10 км для цього сімейства і також виявлено дію сонячного вивітрювання на спектри астероїдів, що загалом збігається з дослідженнями за літературними даними. Є загальний тренд збільшення нахилу від відстані до Сонця у видимому діапазоні, та збільшення глибини смуги поглинання в інфрачервоному, що проявляється як збільшення нахилу в інфрачервоному.

Для сімейства Флори, аналогом мінералів поверхні якого є звичайні хондрити HL та LL типів, також спостерігається відповідний, але менше виражений ефект, хоч градієнт від півосі і від'ємний. Що стосується сімейства Феміди, то поверхня цих об'єктів за мінералогією близька до вуглистих хондритів CM та CV типів і градієнт в обох випадках від'ємний зі збільшення від перигелійної відстані.

Таблиця 3.1. Зміни нахилів спектрів у видимому та ближньому ІЧ діапазонах відносно великої півосі та перигелійної відстані.

Сімейство	N	Середня піввісь орбіти (а.о)	Зміна нахилу у видимому діапазоні з орбітальною піввіссю	Зміна нахилу у ІЧ діапазоні з орбітальною піввіссю	Перигелійна відстань (а.о)	Зміна нахилу у видимому діапазоні з перигелійною відстанню	Зміна нахилу у ІЧ діапазоні з перигелійною відстанню
Веста	144	2,37	5,92± 0,37	-15,32 ±0,67	2,26	9,59± 0,29	-16,35± 0,37
Флора	91	2,25	-4,23±0,45	7,1± 0,38	2,17	5,54± 0,38	8,15± 0,36
Феміда	94	3,13	-1,97± 0,4	7,26± 0,28	3,08	-5,7± 0,24	8,33± 0,26

Висновки

Під час роботи над дипломним проєктом було вирішено поставлені задачі та отримано наступні основні результати:

1. Сформовано загальний масив даних з основних фізичних властивостей для 329 астероїдів, що входять до трьох сімейств Веста, Флора та Феміда (власні орбітальні елементи, абсолютні зоряні величини, спектри низької роздільної здатності, діаметри та альbedo), використовуючи дані Міжнародної бази PDS та каталогу Gaia EDR3.
2. Обчислено нахили спектрів у видимій та ближній інфрачервоній ділянках для цих астероїдів та проведено аналіз поведінки нахилів в залежності від відстані до Сонця.
3. Аналіз показав, що існує залежність між нахилом спектру та відстанню до Сонця, що можливо пов'язано з дією сонячного випромінювання на поверхні астероїдів досліджуваних сімейств. У сімейства Вести виявлено найбільші зміни у нахилі спектра у видимому та інфрачервоному діапазонах, що може свідчити про сильнішу дію сонячного випромінювання на поверхню, багату піроксеновими мінералами.

Таким чином, підсумовуючи отримані результати слід звернути увагу, що виявлені особливості зміни нахилів не відрізняються від загального твердження про почервоніння спектрів з відстанню до Сонця, хоч розміри досліджуваних об'єктів становили менше за 10 км для сімейств Вести та Флори і до 20 км для сімейства Феміди. Отримані результати слід перевірити на більшому спостережному матеріалі з використанням інших сімейств з різною мінералогією та різним віком утворення.

Список цитованої літератури

1. Bottke B., Vokrouhlický D., Nesvorný D. The origin and evolution of the asteroid belt // *Nature*. – 2005. – 47-82 с.
2. Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. W. Application of photometric models to asteroids. // In: Binzer R. P., Gehrels T., Matthews M. S. (Eds.), *Asteroids II*. Univ. of Arizona Press, Tucson, -1989. pp. 524-556.
3. Chapman C. R. Space Weathering of Asteroid Surfaces // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 32. – 2004. – 539–567 с.
4. Delbo M. et al. Asteroid families in the inner and middle main belt - I. Spectroscopic properties of 15 consistent family candidates. – 2007. – 2-6 с.
5. Galluccio L., et al. Gaia Collaboration. – 2023. – 5-13 с.
6. Grant H., *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon*. // Cambridge, Cambridge Univ. Press. – 1991. – 142-154 с.
7. Hapke B. Space Weathering from Mercury to the Asteroid Belt // *Journal of Geophysical Research* 106. – 2001. – 10,039–10,073 с.
8. Helfenstein P., Veverka J., Thomas, et al. Galileo Photometry of Asteroid 951 Gaspra // *Icarus* 107. – 1994. – 37–40 с.
9. Hirayama K. Families of asteroids // *Japan Journal of Astronomy and Geophysics*. –1922. – 55-68 с.
10. Kaasalainen M., Mottola S., & Fulchignoni, M., in *Asteroids III*, ed. Bottke W., Cellino A., Paolicchi P.// Univ. Arizona Press. –2003. –113-139 с.
11. Leliwa-Kopystynski J.; Włodarczyk I. The minimal sizes of impactors that formed the Vesta family and 15 other asteroid families. – *Icarus* 2024. – 2-5 с.
12. Maclennan E., Emery J., et al. Multifactor characterization of space weathering among siliceous asteroids. I: Grain size effects // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2024. – 3-32 с.
13. Michel P., Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, *Asteroids IV* // University of Arizona Press, Tucson, 895 pp. ISBN: 978-0-816-53213-1. – 2015. –297-321 с.

14. Nesvorný D., Brož M., Carruba V. Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families. – 2015. – 264-297 с.
15. Nesvorný D.; Morbidelli A.; Vokrouhlický D. The Flora family: a case of the dynamically dispersed collisional swarm?. – 2002. – 157-163 с.
16. Novaković B., Vokrouhlický D., Spoto F., Nesvorný D. Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities. –2022. – 134, 34 с.
17. Prusti T., et al. Gaia Collaboration. – 2016. – 4-6 с.
18. Rivkin A., DIVERSITY OF TYPES OF HYDRATED MINERALS ON C-CLASS ASTEROIDS // Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, USA. – 2004. – 408 с.
19. Simon A., Kaplan H., Hamilton V., et al., Weak spectral features on (101995) Bennu from the OSIRIS-REx Visible and InfraRed Spectrometer. – 2020. – 2-4 с.
20. Sullivan R., Greeley R., Pappalardo, et al. Geology of 243 Ida. Icarus 120. – 1996. – 119–139 с.
21. Watanabe S., Hirabayashi M., Hirata N., et al., Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. – 2019. – 364 с.
22. Zappala V., Cellino A., Farinella P. Identification by Hierarchical Clustering and Reliability Assessment. – 1990. –2031-2043 с.
23. Лагранж Же., Аналітична механіка. – 1950. – т1 -т2
24. Симоненко А. Н., Астероїди. – 1985. – 33 с.
25. Шевченко В. Г. Комп'ютерні технології // Методичні вказівки. – Харків: ХНУ ім. Каразіна. – 2011. – 25-44 с.
26. https://en.m.wikipedia.org/wiki/Osculating_orbit
27. <https://no.m.wikipedia.org/wiki/Asteroidbeltet>
28. <https://no.m.wikipedia.org/wiki/Asteroidfamilie>

Додатки

Додаток 1. Таблиця з даними астероїдного сімейства Веста

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
4878	2,28951	14,51	0,0006	6	-0,0008	-8	0,10499	2,049134 3451
5659	2,33035	14,70	0,0009	9	0,0002	2	0,09713	2,104003 1045
7795	2,29078	14,71	0,001	10	-0,0012	-12	0,08761	2,090084 7642
8557	2,30648	14,76	0,0015	15	-0,0021	-21	0,09407	2,089509 4264
8731	2,31065	14,65	0,0006	6	-0,0008	-8	0,08101	2,123464 2435
9236	2,41775	14,97	0,0009	9	-0,0018	-18	0,12664	2,111566 14
9613	2,30334	14,70	0,0015	15	0,00009	0,9	0,10994	2,050110 8004
9618	2,36913	14,62	0,0006	6	-0,0013	-13	0,12854	2,064602 0298
10678	2,26755	14,69	0,0021	21	-0,001	-10	0,10068	2,039253 066
10956	2,35212	15,48	0,0007	7	-0,0013	-13	0,09121	2,137583 1348
11042	2,34465	14,70	0,001	10	-0,0013	-13	0,09255	2,127652 6425
11349	2,38217	14,72	0,0009	9	-0,0006	-6	0,10437	2,133542 9171
11953	2,32258	14,70	0,0014	14	-0,0015	-15	0,11748	2,049723 3016
11980	2,46130	14,51	0,0014	14	-0,0007	-7	0,11069	2,188858 703
12157	2,41251	14,67	0,001	10	-0,002	-20	0,09465	2,184165 9285

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
12405	2,37302	14,66	0,0014	14	-0,0017	-17	0,08492	2,171503 1416
12479	2,28432	14,62	0,0006	6	-0,0009	-9	0,09118	2,076035 7024
12578	2,30120	14,75	0,0014	14	-0,0014	-14	0,09055	2,092826 34
12946	2,39413	14,71	0,0003	3	-0,0012	-12	0,09792	2,159696 7904
12982	2,38784	14,85	0,001	10	-0,0009	-9	0,12083	2,099317 2928
13122	2,32382	14,71	0,0012	12	-0,0014	-14	0,11346	2,060159 3828
13164	2,29995	14,56	0,0012	12	-0,002	-20	0,09472	2,082098 736
13569	2,41526	14,69	0,0007	7	0,00006	0,6	0,10874	2,152624 6276
13888	2,38363	14,66	0,001	10	-0,0008	-8	0,09032	2,168340 5384
14182	2,32237	14,62	0,0008	8	-0,0011	-11	0,09856	2,093477 2128
14433	2,42603	14,59	0,001	10	-0,0006	-6	0,10399	2,173747 1403
14489	2,39504	14,70	0,0017	17	-0,0021	-21	0,11849	2,111251 7104
14527	2,28221	15,06	0,0009	9	-0,001	-10	0,08259	2,093722 2761
14588	2,36200	14,86	0,0006	6	0,0002	2	0,09977	2,126343 26
14592	2,38752	14,74	0,0012	12	-0,0013	-13	0,09799	2,153566 9152
14606	2,39984	14,57	0,0017	17	-0,0023	-23	0,08914	2,185918 2624
14838	2,28520	14,55	0,0007	7	-0,0008	-8	0,09830	2,06056

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
14924	2,31980	14,85	0,0016	16	-0,0022	-22	0,10474	2,076824 148
15072	2,38873	14,96	0,0009	9	-0,0011	-11	0,09910	2,152006 857
15088	2,34301	14,69	0,0019	19	-0,0025	-25	0,10209	2,103812 1091
15109	2,36528	14,63	0,001	10	-0,0012	-12	0,09226	2,147059 2672
15295	2,35134	14,59	0,0011	11	-0,0007	-7	0,10339	2,108234 9574
15346	2,27509	14,76	0,0012	12	-0,0016	-16	0,09163	2,066623 5033
15382	2,27414	14,74	0,0006	6	-0,0004	-4	0,08795	2,074129 387
15386	2,37004	15,13	0,0009	9	-0,0008	-8	0,09426	2,146640 0296
15456	2,46273	14,96	0,001	10	-0,0017	-17	0,12055	2,165847 8985
15553	2,26626	14,52	0,0006	6	-0,0008	-8	0,09426	2,052642 3324
15687	2,38200	14,73	0,0012	12	-0,0008	-8	0,09118	2,164809 24
15860	2,37595	14,55	0,0013	13	-0,0004	-4	0,09641	2,146884 6605
16095	2,34354	14,52	0,0008	8	-0,0011	-11	0,09834	2,113076 2764
16112	2,37204	14,82	0,0009	9	-0,0006	-6	0,10430	2,124636 228
16250	2,31106	14,74	0,0014	14	-0,0018	-18	0,11821	2,037869 5974
16311	2,32132	14,66	0,0007	7	-0,001	-10	0,09001	2,112377 9868
16382	2,32768	14,56	0,0011	11	-0,0016	-16	0,08991	2,118398 2912

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
16753	2,39974	14,66	0,0015	15	-0,0017	-17	0,10986	2,136104 5636
16798	2,35390	14,90	0,001	10	-0,002	-20	0,09999	2,118533 539
17072	2,26103	15,10	0,0005	5	-0,0005	-5	0,08320	2,072912 304
17383	2,30046	14,69	0,0007	7	-0,0001	-1	0,10279	2,063995 7166
17396	2,35269	15,13	0,0013	13	-0,0006	-6	0,07872	2,167486 2432
17553	2,30376	14,64	0,0007	7	-0,0013	-13	0,10738	2,056382 2512
17629	2,27754	14,58	0,0008	8	-0,0008	-8	0,09979	2,050264 2834
17641	2,42010	14,65	0,0008	8	-0,0014	-14	0,08208	2,221458 192
17719	2,31626	14,51	0,001	10	-0,002	-20	0,10582	2,071153 3668
17821	2,31398	14,83	0,0018	18	-0,0023	-23	0,08405	2,119489 981
17920	2,36087	14,79	0,0013	13	-0,0007	-7	0,10841	2,104928 0833
17934	2,36751	14,52	0,0013	13	-0,0018	-18	0,09560	2,141176 044
17943	2,35258	14,73	0,0017	17	-0,0017	-17	0,08919	2,142753 3898
17946	2,36234	15,12	0,0008	8	-0,0013	-13	0,10326	2,118404 7716
17952	2,32237	15,16	-0,0002	-2	-0,0013	-13	0,11590	2,053207 317
18158	2,40534	14,51	0,0014	14	-0,0018	-18	0,10685	2,148329 421
18174	2,31718	14,54	0,0011	11	-0,0015	-15	0,08540	2,119292 828

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
18253	2,44407	14,52	0,0011	11	-0,0017	-17	0,10593	2,185169 6649
18283	2,44062	14,74	0,0011	11	-0,0006	-6	0,12532	2,134761 5016
18310	2,32675	15,50	0,0007	7	-0,0009	-9	0,09719	2,100613 1675
18498	2,26964	14,93	0,0009	9	-0,001	-10	0,10158	2,039089 9688
18621	2,42274	15,21	0,0013	13	-0,0017	-17	0,10829	2,160381 4854
18681	2,35006	14,51	0,0011	11	-0,0009	-9	0,08842	2,142267 6948
18924	2,37801	14,87	0,0005	5	-0,0014	-14	0,11307	2,109128 4093
18943	2,39599	14,62	0,0012	12	-0,0013	-13	0,10299	2,149226 9899
18949	2,29896	15,01	0,001	10	-0,0014	-14	0,09874	2,071960 6896
19025	2,44019	14,54	0,0015	15	-0,0015	-15	0,11421	2,161495 9001
19077	2,42588	14,56	0,0007	7	-0,00001	-0,1	0,08848	2,211238 1376
19098	2,26292	15,17	0,0015	15	-0,0016	-16	0,08925	2,060954 39
19203	2,28221	15,08	0,0017	17	-0,0017	-17	0,08890	2,079321 531
19298	2,39241	14,51	0,0005	5	-0,0013	-13	0,11402	2,119627 4118
19374	2,37515	14,77	0,0012	12	-0,0006	-6	0,09355	2,152954 7175
19410	2,35708	14,91	0,0012	12	-0,0016	-16	0,08417	2,158684 5764
19656	2,37439	14,71	0,0012	12	-0,0005	-5	0,11129	2,110144 1369

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
19766	2,34644	14,64	0,001	10	-0,0008	-8	0,09214	2,130239 0184
19809	2,32387	14,91	0,0011	11	-0,0016	-16	0,07934	2,139494 1542
19813	2,36044	14,86	-0,0002	-2	-0,0007	-7	0,08879	2,150856 5324
20030	2,34102	14,68	0,0009	9	-0,0016	-16	0,111017	2,081126 98266
20073	2,30029	14,62	0,0012	12	-0,0011	-11	0,09605	2,079347 1455
20074	2,29120	14,67	0,0007	7	-0,0017	-17	0,09202	2,080363 776
20078	2,35772	14,82	0,0008	8	-0,0015	-15	0,10470	2,110866 716
20082	2,41547	14,84	0,0013	13	-0,0017	-17	0,11656	2,133922 8168
20138	2,25524	14,99	0,0011	11	-0,0013	-13	0,08372	2,066431 3072
20148	2,35726	15,02	0,001	10	-0,001	-10	0,10092	2,119365 3208
20245	2,37567	14,69	0,0014	14	-0,0019	-19	0,09540	2,149031 082
20285	2,38352	14,63	0,0011	11	-0,0014	-14	0,10343	2,136992 5264
20305	2,30080	14,54	0,0011	11	-0,0014	-14	0,10250	2,06497
20318	2,27438	15,24	0,001	10	-0,0007	-7	0,09736	2,052946 3632
20454	2,47067	14,53	0,0019	19	-0,0024	-24	0,11910	2,176413 203
20477	2,38441	14,56	0,001	10	-0,0012	-12	0,100031	2,145895 08329
20568	2,43024	14,65	0,0008	8	-0,0012	-12	0,11517	2,150349 2592

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
20574	2,33202	14,79	0,0011	11	0,0008	8	0,09845	2,102432 631
20821	2,32990	14,95	0,0003	3	-0,001	-10	0,10005	2,096793 505
20883	2,25290	14,68	0,0011	11	-0,0005	-5	0,11116	2,002467 636
20919	2,32826	14,64	0,0013	13	-0,0011	-11	0,08381	2,133128 5294
20921	2,33934	14,99	0,0008	8	-0,0012	-12	0,08170	2,148215 922
21057	2,28769	15,22	0,0011	11	-0,0013	-13	0,08702	2,088615 2162
21067	2,43388	14,68	0,0008	8	-0,0013	-13	0,11193	2,161455 8116
21156	2,31571	14,87	0,0014	14	-0,0026	-26	0,08455	2,119916 7195
21185	2,33876	15,31	0,0011	11	-0,0009	-9	0,08110	2,149086 564
21192	2,44784	14,57	0,001	10	-0,0015	-15	0,10889	2,181294 7024
21392	2,28067	14,78	0,001	10	-0,0016	-16	0,09774	2,057757 3142
21397	2,30443	14,71	0,0012	12	-0,0016	-16	0,10544	2,061450 9008
21399	2,26280	15,02	0,0007	7	-0,0005	-5	0,09454	2,048874 888
21416	2,41401	14,54	0,0016	16	-0,0021	-21	0,11622	2,133453 7578
21431	2,34031	14,79	0,0009	9	-0,0015	-15	0,10931	2,084490 7139
21463	2,42255	14,54	0,001	10	-0,0024	-24	0,08753	2,210504 1985
21481	2,36280	14,75	0,0013	13	-0,001	-10	0,08975	2,150738 7

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ГЧ	Нахил ГЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
21484	2,35396	14,55	0,0005	5	-0,0002	-2	0,09404	2,132593 6016
21673	2,37640	14,76	0,0008	8	-0,0012	-12	0,11231	2,109506 516
21724	2,32788	14,67	0,0012	12	-0,0015	-15	0,08811	2,122770 4932
21738	2,32321	14,80	0,0009	9	-0,0012	-12	0,11316	2,060315 5564
21837	2,40893	14,56	0,0011	11	-0,0008	-8	0,09859	2,171433 5913
21840	2,31960	14,64	0,0012	12	-0,0025	-25	0,09576	2,097475 104
21969	2,33193	14,57	0,0008	8	-0,0012	-12	0,10863	2,078612 4441
22167	2,30427	15,24	0,0002	2	0,00004	0,4	0,09837	2,077598 9601
22182	2,36651	14,68	0,0005	5	-0,0007	-7	0,12163	2,078671 3887
22215	2,39645	14,51	0,001	10	-0,0014	-14	0,10448	2,146068 904
22220	2,39009	14,89	0,0012	12	-0,0005	-5	0,09523	2,162481 7293
22233	2,39178	14,64	0,0009	9	-0,0014	-14	0,10114	2,149875 3708
22342	2,27581	14,94	0,0011	11	-0,0013	-13	0,09424	2,061337 6656
22502	2,27487	14,86	0,001	10	-0,0013	-13	0,09737	2,053365 9081
22515	2,31142	14,54	0,0007	7	-0,002	-20	0,10974	2,057764 7692
22553	2,40618	14,89	0,0005	5	-0,0019	-19	0,09241	2,183824 9062
22599	2,33589	15,32	0,001	10	-0,0007	-7	0,10169	2,098353 3459

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
28411	2,33544	15,69	0,0006	6	-0,0006	-6	0,12099	2,052875 1144
29066	2,30317	15,53	0,0012	12	-0,0006	-6	0,09150	2,092429 945
31858	2,29817	15,51	0,0008	8	-0,0012	-12	0,10408	2,058976 4664
31972	2,30002	15,78	0,0008	8	-0,0005	-5	0,09542	2,080552 0916
32013	2,40333	15,56	0,0007	7	-0,0009	-9	0,12498	2,102961 8166
39037	2,33576	15,69	0,0003	3	-0,0013	-13	0,09859	2,105477 4216
39379	2,27740	15,88	0,0013	13	-0,0006	-6	0,08605	2,081429 73
39380	2,35706	15,56	0,0011	11	-0,00007	-0,7	0,09759	2,127034 5146
39870	2,34046	15,77	0,0012	12	-0,0003	-3	0,11443	2,072641 1622
41803	2,36157	15,54	0,0013	13	-0,0006	-6	0,09726	2,131883 7018

Додаток 2. Таблиця з даними астероїдного сімейства Флори

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
7377	2,22217	15,21	0,0017	17	-0,0002	-2	0,13017	1,932910 1311
7546	2,31654	14,94	0,0012	12	-0,0003	-3	0,12259	2,032555 3614
8193	2,26141	15,52	0,0014	14	-0,0006	-6	0,14466	1,934274 4294
8253	2,29054	15,11	0,001	10	-0,0004	-4	0,14967	1,947714 8782
8299	2,18545	14,59	0,0011	11	-0,0005	-5	0,11607	1,931784 8185
8306	2,24159	14,70	0,0011	11	0,0001	1	0,16670	1,867916 947
8572	2,21252	14,83	0,0013	13	-0,0006	-6	0,12392	1,938344 5216
8837	2,22365	14,72	0,0008	8	-0,0006	-6	0,15613	1,876471 5255
8853	2,27297	14,56	0,0008	8	0,0001	1	0,12669	1,985007 4307
8964	2,19271	14,86	0,0015	15	0,0003	3	0,14319	1,878735 8551
9265	2,22782	15,14	0,0007	7	0,0003	3	0,12295	1,953909 531
9320	2,28621	14,65	0,0007	7	0,00008	0,8	0,14758	1,948811 1282
9349	2,30075	15,37	0,001	10	-0,0006	-6	0,14293	1,971903 8025
9416	2,29535	14,50	0,0013	13	-0,0003	-3	0,13255	1,991101 3575
9491	2,21431	14,75	0,0016	16	-0,0009	-9	0,13779	1,909200 2251

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
9521	2,26099	15,06	0,001	10	-0,0007	-7	0,14036	1,9436374436
9647	2,20783	15,04	0,0015	15	-0,0005	-5	0,11673	1,9501100041
9683	2,27602	15,09	0,0008	8	-0,0002	-2	0,14382	1,9486828036
9880	2,28780	14,55	0,0013	13	-0,0007	-7	0,12326	2,005805772
10127	2,20929	15,11	0,0014	14	0,000066	0,66	0,13709	1,9064184339
10131	2,30190	15,21	0,0021	21	0,0002	2	0,13457	1,992133317
10181	2,21253	16,00	0,0012	12	-0,0008	-8	0,13694	1,9095461418
10432	2,24164	14,64	0,0013	13	-0,0002	-2	0,13786	1,9326075096
10510	2,22223	14,52	0,0011	11	-0,0003	-3	0,12190	1,951340163
10687	2,23493	14,56	0,0005	5	-0,00007	-0,7	0,13057	1,9431151899
10758	2,22811	14,73	0,0012	12	0,0003	3	0,15356	1,8859614284
11278	2,25334	14,74	0,0004	4	-0,000095	-0,95	0,12550	1,97054583
11337	2,28371	14,94	0,001	10	-0,0002	-2	0,12482	1,9986573178
11369	2,31801	14,66	0,0014	14	0,0002	2	0,14000	1,9934886
11430	2,20472	14,90	0,0009	9	0,00009	0,9	0,12056	1,9389189568
11457	2,28709	15,68	0,0003	3	0,0007	7	0,14522	1,9549587902
11474	2,27604	14,58	0,0008	8	-0,0007	-7	0,14779	1,9396640484

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
11592	2,22742	15,27	0,0004	4	-0,000095	-0,95	0,12718	1,9441367244
11667	2,31931	14,63	0,0004	4	0,0011	11	0,13109	2,0152716521
11702	2,31252	14,65	0,001	10	-0,0005	-5	0,11154	2,0545815192
11874	2,24847	14,77	0,0006	6	-0,0002	-2	0,12456	1,9684005768
11913	2,26748	14,70	0,0018	18	-0,0001	-1	0,14467	1,9394436684
12007	2,25984	14,99	0,0002	2	0,00005	0,5	0,14953	1,9219261248
12013	2,23941	14,55	0,0014	14	-0,0005	-5	0,15013	1,9032073767
12021	2,23982	14,66	0,0012	12	0,0001	1	0,11088	1,9914687584
12217	2,17379	14,72	0,0005	5	-0,00002	-0,2	0,12725	1,8971752225
12319	2,19980	14,90	0,0016	16	-0,0006	-6	0,15986	1,848139972
12321	2,22491	14,76	0,0014	14	-0,0002	-2	0,16005	1,8688131545
12322	2,24697	15,23	0,0004	4	0,00003	0,3	0,15316	1,9028240748
12469	2,28398	14,55	0,0013	13	-0,0004	-4	0,13802	1,9687450804
12509	2,30847	14,78	0,0008	8	-0,0005	-5	0,13768	1,9906398504
12595	2,27617	14,80	-0,0002	-2	0,0008	8	0,12615	1,9890311545
13250	2,22994	15,11	0,0012	12	-0,0001	-1	0,14883	1,8980580298
19925	2,24853	15,51	0,001	10	0,0005	5	0,11372	1,9928271684

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимої	Нахил видимої (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
21270	2,19818	15,50	0,0006	6	-0,00001	-0,1	0,14772	1,8734648504
23623	2,21807	15,65	0,0007	7	-0,0006	-6	0,13571	1,9170557203
23625	2,24249	15,91	0,0006	6	-0,0001	-1	0,14509	1,9171271259
24517	2,20590	15,62	0,0011	11	-0,0021	-21	0,13677	1,904199057
24620	2,18019	15,58	0,001	10	-0,0004	-4	0,13262	1,8910532022
26241	2,30509	14,59	0,0016	16	-0,0003	-3	0,17184	1,9089833344
29258	2,32761	15,61	0,0009	9	-0,0002	-2	0,13133	2,0219249787
29290	2,29926	15,68	0,0017	17	-0,0002	-2	0,12604	2,0094612696
29435	2,21543	15,57	0,0004	4	-0,0002	-2	0,15712	1,8673416384
30607	2,27810	15,54	0,0005	5	0,0003	3	0,14197	1,954678143
31974	2,18137	15,73	0,0013	13	-0,0004	-4	0,12034	1,9188639342
36678	2,29345	15,73	0,0009	9	-0,0001	-1	0,11611	2,0271575205
38101	2,22931	16,01	0,0002	2	0,0002	2	0,15240	1,889563156
38636	2,19847	15,95	0,001	10	0,0001	1	0,14088	1,8887495464
38874	2,25323	15,57	0,0013	13	0,0006	6	0,12021	1,9823692217
41903	2,23910	15,99	0,0006	6	0,0001	1	0,13269	1,941993821
42822	2,16959	15,86	0,002	20	-0,0007	-7	0,13261	1,8818806701

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
43697	2,20217	15,66	0,0006	6	0,0001	1	0,11551	1,9477973433
44774	2,20502	15,85	0,001	10	-0,0003	-3	0,13888	1,8987868224
45967	2,29788	15,94	0,0008	8	0,0002	2	0,12683	2,0064398796
46116	2,21244	16,02	-0,00002	-0,2	0,0002	2	0,15258	1,8748659048
46419	2,28946	15,82	0,0006	6	-0,00008	-0,8	0,15302	1,9391268308
46775	2,24224	15,78	0,0009	9	0,0017	17	0,14564	1,9156801664
47193	2,23371	16,03	0,0011	11	-0,0012	-12	0,12592	1,9524412368
47411	2,25446	15,80	0,0012	12	-0,0006	-6	0,14854	1,9195825116
47470	2,26867	15,41	0,0008	8	-0,0011	-11	0,14053	1,9498538049
48437	2,20201	16,13	0,0019	19	-0,00009	-0,9	0,13567	1,9032633033
51421	2,25450	15,68	0,001	10	-0,00008	-0,8	0,15236	1,91100438
51517	2,25396	15,87	0,0014	14	0,0005	5	0,11791	1,9881955764
52791	2,19140	15,71	0,0012	12	0,0003	3	0,11561	1,938052246
56374	2,22623	16,29	-0,0005	-5	-0,0003	-3	0,16151	1,8666715927
56398	2,23154	16,00	0,0005	5	-0,0003	-3	0,14966	1,8975677236
60971	2,22100	16,02	0,0008	8	-0,00004	-0,4	0,15297	1,88125363
63868	2,25136	16,30	0,001	10	-0,0003	-3	0,14931	1,9152094384

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
63869	2,26813	16,08	0,0005	5	-0,0004	-4	0,12821	1,9773330527
65349	2,18241	16,74	0,0004	4	0,0013	13	0,14905	1,8571217895
80205	2,24567	16,21	0,0014	14	-0,0008	-8	0,14215	1,9264480095
84088	2,27185	16,46	0,001	10	-0,0002	-2	0,14543	1,9414548545
84524	2,25127	16,25	0,001	10	-0,0005	-5	0,12919	1,9604284287
85305	2,32806	15,41	0,001	10	-0,0006	-6	0,16482	1,9443491508
117444	2,32076	16,60	0,0009	9	-0,00007	-0,7	0,14861	1,9758718564
117912	2,28283	16,65	0,0008	8	-0,00004	-0,4	0,11499	2,0203273783

Додаток 3. Таблиця з даними астероїдного сімейства Феміди

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
4972	3,12725	13,16	0,0002	2	0,0003	3	0,14957	2,659507 2175
5151	3,18779	13,31	-0,0002	-2	0,0003	3	0,18283	2,604966 3543
5375	3,18076	13,11	0,0002	2	-0,0002	-2	0,14103	2,732177 4172
5400	3,08598	13,20	0,0001	1	0,0004	4	0,12993	2,685018 6186
6248	3,11291	13,02	0,0004	4	0,0005	5	0,15814	2,620634 4126
6482	3,16643	13,27	0,000002	0,02	-0,0002	-2	0,15064	2,689438 9848
6676	3,16772	13,04	0,0002	2	0,0001	1	0,17040	2,627940 512
6812	3,13151	13,12	0,0002	2	-0,0003	-3	0,12855	2,728954 3895
6848	3,10562	13,00	-0,0005	-5	-0,0006	-6	0,16271	2,600304 5698
6860	3,11333	13,10	0,0003	3	0,0004	4	0,15405	2,633721 5135
7149	3,13238	13,59	0,00002	0,2	0,0004	4	0,14355	2,682726 851
7367	3,20790	13,70	0,0002	2	-0,0002	-2	0,13464	2,775988 344
7371	3,21487	13,49	-0,0004	-4	0,0009	9	0,15580	2,713993 254
7413	3,08251	13,21	0,0004	4	-0,0002	-2	0,16270	2,580985 623
7442	3,15961	13,09	0,0003	3	0,0004	4	0,14982	2,686237 2298

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
7452	3,11479	13,18	0,0002	2	0,00002	0,2	0,15988	2,616797 3748
7454	3,15965	13,23	0,0004	4	-0,00002	-0,2	0,13079	2,746399 3765
7461	3,20422	13,12	-0,0003	-3	0,0009	9	0,15079	2,721055 6662
7506	3,21746	13,54	0,00003	0,3	0,0003	3	0,16300	2,693014 02
7548	3,15061	13,32	0,0004	4	-0,0001	-1	0,15790	2,653128 681
7573	3,10668	13,11	-0,0002	-2	-0,000008	-0,08	0,13210	2,696287 572
7621	3,14864	14,51	0,0005	5	-0,0005	-5	0,14757	2,683995 1952
7634	3,19543	13,49	-0,00008	-0,8	0,0002	2	0,15465	2,701256 7505
7863	3,12860	13,14	0,00002	0,2	0,00008	0,8	0,15305	2,649767 77
7892	3,21915	13,24	-0,00002	-0,2	0,0001	1	0,13531	2,783566 8135
7909	3,15943	13,25	-0,00002	-0,2	0,0002	2	0,16327	2,643589 8639
7951	3,13794	13,41	0,0001	1	0,0004	4	0,15071	2,665021 0626
7956	3,09511	13,14	0,0001	1	-0,0002	-2	0,13274	2,684265 0986
7969	3,17457	12,71	0,0002	2	-0,00008	-0,8	0,16482	2,651337 3726
7972	3,21687	13,40	-0,00005	-0,5	0,0002	2	0,14395	2,753801 5635
8001	3,14014	12,97	0,0005	5	0,0002	2	0,15453	2,654894 1658
8012	3,09440	13,45	0,0002	2	-0,00003	-0,3	0,14686	2,639956 416

Номер астероида	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
8061	3,17054	13,16	0,0001	1	0,0004	4	0,15969	2,6642364674
8076	3,19413	12,65	0,0001	1	0,00002	0,2	0,16266	2,6745728142
8161	3,15705	13,22	0,0004	4	0,0008	8	0,15224	2,676420708
8172	3,07578	12,92	0,000075	0,75	0,000097	0,97	0,12584	2,6887238448
8205	3,18817	12,77	0,0003	3	-0,0001	-1	0,17141	2,6416857803
8239	3,15465	13,22	0,0007	7	-0,0006	-6	0,13628	2,724734298
8261	3,03693	13,14	0,0002	2	0,0002	2	0,16022	2,5503530754
8282	3,08861	13,20	0,0002	2	-0,0000017	-0,017	0,14490	2,641070411
8314	3,19189	12,84	0,0004	4	0,0003	3	0,14041	2,7437167251
8319	3,18752	13,26	0,000037	0,37	0,0003	3	0,15744	2,6856768512
8322	3,20836	12,99	0,0001	1	0,0011	11	0,14608	2,7396827712
8337	3,19863	13,24	-0,0005	-5	0,0003	3	0,13643	2,7622409091
8339	3,17429	13,10	0,0001	1	0,0006	6	0,15689	2,6762756419
8346	3,15989	12,71	0,00004	0,4	-0,0002	-2	0,17477	2,6076360247
8385	3,12318	13,34	0,0006	6	0,0003	3	0,16824	2,5977361968
8408	3,04628	13,85	0,0002	2	-0,000038	-0,38	0,12974	2,6510556328

Номер астероида	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
8432	3,18382	13,23	-0,0001	-1	-0,0004	-4	0,18281	2,6017858658
8518	3,11277	12,73	0,0001	1	0,0001	1	0,13919	2,6795035437
8535	3,14539	13,18	0,0002	2	0,0008	8	0,15296	2,6642711456
8561	3,11360	13,14	-0,0002	-2	0,0002	2	0,17573	2,566447072
8590	3,21326	13,14	-0,00006	-0,6	0,0004	4	0,14309	2,7534746266
8591	3,16209	12,78	0,0003	3	0,0002	2	0,16154	2,6512859814
8598	3,15983	13,52	0,00008	0,8	-0,0004	-4	0,14829	2,6912588093
8614	3,15852	12,78	-0,00005	-0,5	0,0004	4	0,15740	2,661368952
8679	3,03568	13,40	0,0001	1	0,0003	3	0,14270	2,602488464
8681	3,05295	12,79	-0,0001	-1	-0,00005	-0,5	0,13557	2,6390615685
8682	3,13909	12,71	0,0002	2	0,0001	1	0,14625	2,6799980875
8697	3,09833	13,45	0,0001	1	-0,00009	-0,9	0,15732	2,6109007244
8717	3,19238	12,78	0,0003	3	0,0004	4	0,15793	2,6882074266
8961	3,20808	13,54	0,0004	4	0,0003	3	0,16974	2,6635405008
8978	3,21666	13,52	-0,0003	-3	0,00009	0,9	0,12857	2,8030940238
9026	3,17374	13,06	0,000064	0,64	0,0000023	0,023	0,13596	2,7422383096
9163	3,17442	13,55	0,0003	3	-0,0002	-2	0,17722	2,6118492876

Номер астероїда	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
9470	3,16014	13,66	-0,000099	-0,99	-0,0003	-3	0,14670	2,696547462
10659	3,16627	13,82	-0,0003	-3	0,0004	4	0,14296	2,7136200408
10663	3,20768	13,54	0,000062	0,62	0,0008	8	0,15685	2,704555392
10918	3,11332	13,66	-0,0001	-1	0,0001	1	0,16017	2,6146595356
10968	3,12254	13,97	0,0003	3	-0,0004	-4	0,15239	2,6466961294
11485	3,16606	13,86	-0,0003	-3	0,000083	0,83	0,14192	2,7167327648
12192	3,08506	13,94	0,000087	0,87	0,001	10	0,13502	2,6685151988
12361	3,12428	13,78	0,0003	3	0,0001	1	0,14692	2,6652607824
12758	3,13682	13,80	0,0002	2	0,0001	1	0,14975	2,667081205
12944	3,10649	14,08	0,0005	5	0,00004	0,4	0,15848	2,6141734648
13327	3,09411	13,90	-0,0004	-4	0,0005	5	0,13521	2,6757553869
13845	3,17065	14,19	-0,00008	-0,8	0,0004	4	0,15382	2,682940617
13984	3,09101	14,10	-0,0005	-5	0,001	10	0,13739	2,6663361361
15086	3,12298	14,02	-0,0007	-7	0,0005	5	0,13319	2,7070302938
15122	3,14190	14,09	-0,000016	-0,16	0,00005	0,5	0,17971	2,577269151
15395	3,15024	14,17	0,0006	6	0,0005	5	0,14083	2,7065917008
16303	3,09836	14,12	-0,0001	-1	0,0004	4	0,15875	2,60649535

Номер астероида	Відстань	Абсолютна зоряна величина	Нахил видимий	Нахил видимий (%/100 нм)	Нахил ІЧ	Нахил ІЧ (%/100 нм)	Ексцентриситет	Перигелійна відстань
24792	3,09090	14,81	0,0005	5	-0,0002	-2	0,16079	2,593914189
25157	3,10124	14,60	0,0003	3	0,00009	0,9	0,16044	2,6036770544
38463	3,06061	14,51	0,0008	8	-0,0002	-2	0,14660	2,611924574
39593	3,21620	14,68	0,000054	0,54	0,0007	7	0,15031	2,732772978
42400	3,11747	14,52	-0,0002	-2	-0,0002	-2	0,15934	2,6207323302
43193	3,05881	14,59	-0,0003	-3	0,0002	2	0,14635	2,6111531565
50577	3,04496	14,55	-0,0005	-5	0,0007	7	0,16581	2,5400751824
59862	3,11291	14,60	0,0001	1	0,0003	3	0,14627	2,6575846543
60025	3,19482	14,85	-0,000047	-0,47	-0,0004	-4	0,17049	2,6501351382
60180	3,10111	14,95	0,000001	0,01	0,0001	1	0,14382	2,6551083598
62490	3,06325	14,76	-0,0004	-4	0,0001	1	0,14066	2,632373255
67125	3,11502	14,62	0,0004	4	0,0011	11	0,16026	2,6158068948