

Міністерство освіти і науки України
Департамент науки і освіти Харківської обласної державної адміністрації
Комунальний заклад «Харківська обласна Мала академія наук
Харківської обласної ради»

Відділення фізики і астрономії
Секція: астрономія

ВИЗНАЧЕННЯ ВІКУ СІМЕЙСТВ АСТЕРОЇДІВ

Роботу виконав:

Світличний Владислав Андрійович, учень
11 класу Комунального закладу «Харківський
ліцей № 124 Харківської міської ради»,
вихованець Комунального закладу
«Харківська обласна Мала академія наук
Харківської міської ради Харківської області»

Наукові керівники:

Слюсарев Іван Григорович, доцент кафедри
астрономії та космічної інформатики
фізичного факультету Харківського
національного університету імені
В.Н. Каразіна, старший науковий
співробітник Науково-дослідного інституту
астрономії Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна, кандидат
фізико-математичних наук;

Жорник Віра Олексіївна, вчитель астрономії
Комунального закладу «Харківський ліцей
№ 124 Харківської міської ради», спеціаліст
вищої категорії, старший вчитель

ВИЗНАЧЕННЯ ВІКУ СІМЕЙСТВ АСТЕРОЇДІВ

Світличний Владислав Андрійович, Харківське територіальне відділення МАН України, Комунальний заклад «Харківська обласна Мала академія наук Харківської обласної ради», Комунальний заклад «Харківський ліцей № 124 Харківської міської ради», 11 клас, м. Харків;

Слюсарев Іван Григорович, доцент кафедри астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук;

Жорник Віра Олексіївна, вчитель астрономії Комунального закладу «Харківський ліцей № 124 Харківської міської ради», спеціаліст вищої категорії, старший вчитель.

Актуальність роботи: сучасні астрономічні дослідження приділяють велику увагу вивченню астероїдів і процесів їхньої еволюції. Одним із важливих аспектів цих досліджень є визначення віку сімейств астероїдів, що робить значний внесок у наше розуміння формування та динаміки Сонячної системи.

Вивчення віку сімейств астероїдів має практичне значення для розроблення моделей формування і розвитку Сонячної системи. Подальше вдосконалення методів визначення віку дасть змогу отримати точніші дані про характеристики астероїдів та їхню роль у космічній динаміці. Це важливо не тільки для поліпшення наукових уявлень, а й для практичного застосування, наприклад, для вивчення можливих загроз від об'єктів, що перетинають орбіту Землі.

Мета роботи: оцінити вік сімейств головного поясу за допомогою апроксимації її V-shape.

Завдання: побудувати V-shape сімейств астероїдів, зробити їхню апроксимацію за допомогою OriginPro, оцінити тип астероїдів і скоригувати вік. Обчислити долю уламків по відношенню до об'єму до батьківського тіла та обчислити його діаметр. Описати вплив ефекту Ярковського на розташування сімейств астероїдів.

Висновки та результати: Результатом роботи є створення таблиці в якій наведено результати обчислень віку, скорегованого віку, константи C , значення константи C обчислених Давидом Несворним, таксономічний тип, середню густину, долю уламків і діаметр батьківського тіла для цих обраних десяти сімейств.

Ключові слова: астероїд, сімейства астероїдів, велика піввісь, ексцентриситет, абсолютна зоряна величина, ефект Ярковського, таксономічний тип.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СІМЕЙСТВА АСТЕРОЇДІВ	6
1.1. Астероїди	6
1.2. Ідентифікація сімейств астероїдів	8
1.3. Фізичні та динамічні властивості сімейств астероїдів	10
Висновки до розділу 1	12
РОЗДІЛ 2. ЕФЕКТ ЯРКОВСЬКОГО	13
2.1. Відкриття ефекту	13
2.2. Механізм роботи, денний та сезонний ефекти	14
2.3. Вимірювання ефекту	17
Висновки до розділу 2	24
РОЗДІЛ 3. АПРОКСИМАЦІЯ ВІКУ СІМЕЙСТВ АСТЕРОЇДІВ	26
3.1. Розрахунки віку сімейств, константи C та долі об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла	26
3.2. Апроксимація сімейства астероїдів Astrid	27
3.3. Апроксимація сімейства астероїдів Barcelona	29
3.4. Апроксимація сімейства астероїдів Brasilia	31
3.5. Апроксимація сімейства астероїдів Chloris	33
3.6. Апроксимація сімейства астероїдів Clarissa	34
3.7. Апроксимація сімейства астероїдів Emma	36
3.8. Апроксимація сімейства астероїдів Hilda	38
3.9. Апроксимація сімейства астероїдів Erigone	40
3.10. Апроксимація сімейства астероїдів Karma	42
3.11. Апроксимація сімейства астероїдів Veritas	44
3.12. Результати обчислень	46
Висновки до розділу 3	46
ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ВСТУП

Дослідження зіткнення є одним із ключових процесів при формуванні планетних систем. Сімейства астероїдів є наслідками таких зіткнень, які все ще можна ідентифікувати в нашій Сонячній системі. Ці сімейства дають унікальний погляд на явища катастрофічного зриву та перебувають у центрі уваги планетологів більше століття.

Датування сімейств астероїдів дає нам історію зіткнень головного поясу. Це дозволяє перемотати годинник назад і зрозуміти, що сталося на початку формування Сонячної системи та її подальшої еволюції. На додаток до цього, сімейства відкривають вікно всередину своїх батьківських тіл, недоступних інакше, що дозволяє нам краще зрозуміти внутрішній склад і структуру астероїдів.

Сімейства астероїдів також дають унікальне уявлення про сили, що формують нашу планетарну систему. Сімейства надають нам спостережувані докази великомасштабних катастрофічних наслідків, даючи нам інструменти для перевірки фізики зіткнень у планетарних масштабах. Крім того, сімейства відіграли важливу роль у виявленні відбитків, залишених середнім рухом і віковими орбітальними резонансами, а також негравітаційним ефектом Ярковського.

Актуальність роботи - сучасні астрономічні дослідження приділяють велику увагу вивченню астероїдів і процесів їхньої еволюції. Одним із важливих аспектів цих досліджень є визначення віку сімейств астероїдів, що робить значний внесок у наше розуміння формування та динаміки Сонячної системи.

Вивчення віку сімейств астероїдів має практичне значення для розроблення моделей формування і розвитку Сонячної системи. Подальше вдосконалення методів визначення віку дасть змогу отримати точніші дані про характеристики астероїдів та їхню роль у космічній динаміці. Це важливо не тільки для поліпшення наукових уявлень, а й для практичного застосування, наприклад, для вивчення можливих загроз від об'єктів, що перетинають орбіту Землі.

Мета дослідження: оцінити вік сімейств головного поясу за допомогою апроксимації її V-shape.

Завдання: побудувати V-shape сімейств астероїдів, зробити їхню апроксимацію за допомогою OriginPro, оцінити тип астероїдів і скоригувати вік. Обчислити долю уламків по відношенню до об'єму до батьківського тіла та обчислити його діаметр. Описати вплив ефекту Ярковського на розташування сімейств астероїдів.

Об'єкт дослідження: Десять обраних сімейств астероїдів, а саме: Astrid, Barcelona, Brasilia, Chloris, Clarissa, Emma, Hilda, Erigone, Karma, Veritas.

Предмет дослідження: залежність великої піввісі орбіти астероїда що входить до сімейства від абсолютної зоряної величини, як прояв ефекту Ярковського.

Методи дослідження: аналіз наукової літератури, статей, інтернет ресурсів; використання матеріалу баз даних; обчислення, апроксимування значень у середовищі OriginPro.

РОЗДІЛ 1

СІМЕЙСТВА АСТЕРОЇДІВ

1.1. Астероїди

Астероїди – це невеликі небесні тіла, більші за метеороїди але менші за карликові планети, що обертаються в Сонячній системі за кеплерівською орбітою. Значна кількість астероїдів знаходяться у так званому головному поясі астероїдів, приблизно від 2 до 4 астрономічних одиниць від Сонця, який утворився між орбітами Марса і Юпітера. У цій зоні обертаються 98 % відомих астероїдів. Інші астероїди які відомі людству знаходяться за орбітою Нептуна - у поясі Койпера. Станом на 7 лютого 2023 року відкрито понад 1,265 мільйона астероїдів у Сонячній системі, і щомісяця додаються кілька тисяч нових об'єктів.

Астероїди зазвичай ділять за спектральними властивостями на декілька таксономічних типів, серед яких найбільш розповсюджені типи S та C. Оскільки сонячне випромінювання розсіюється та поглинається частинками, що складають самий верхній шар астероїда, то в залежності від оптичних характеристик цих частинок, доля розсіяного та поглинутого частинками світла, варіюється із довжиною хвилі. А самі ці оптичні характеристики частинок залежать від їх хіміко-мінералогічного складу. Тому вважається, що у підґрунті класифікації астероїдів лежить різниця у складі між представниками різних типів, в решті решт сам склад речовини астероїдів формувався на початкових етапах еволюції нашої Сонячної системи, а тому, тим чи іншим чином, тип астероїда має відображати умови у протопланетному диску, де сам астероїд формувався. Однак складна динамічна історія головного поясу, перемішування, причиною якого, як вважається була міграція планет-гігантів, можна сказати «стерла пам'ять» про місце формування астероїдів. Ще одним фактором, що призвів до перемішування були численні зіткнення. Більшість астероїдів мають неправильну форму, оскільки їхня гравітація недостатня для формування сферичних форм. Точні вимірювання діаметрів наразі технічно можливі лише для найбільших астероїдів. Розмір більшості астероїдів

оцінюють за їхньою яскравістю (абсолютною величиною) та альбедо. Точність цього вимірювання залежить від складу конкретного астероїда.

На даний момент, значна частина астероїдів, з діаметром понад 100 кілометрів, вже відкрита. Наразі відомо 26 астероїдів діаметром >200 кілометрів. Більші тіла (>800 кілометрів у діаметрі), мають кулясту форму через власну гравітацію і тому класифікуються як планети або карликові планети. Нинішня класифікація не уточнює межі розмірів між тим, коли небесне тіло вважається астероїдом, а коли – метеором, який нагадує уламок гірської породи, але менший за розміром. Ці межі коливаються в межах 1 – 10 м. Ця класифікація враховує той факт, що астероїди можуть вижити неушкодженими і досягти поверхні після входу в атмосферу, тоді як більшість метеорів повністю згорають в атмосфері [1].

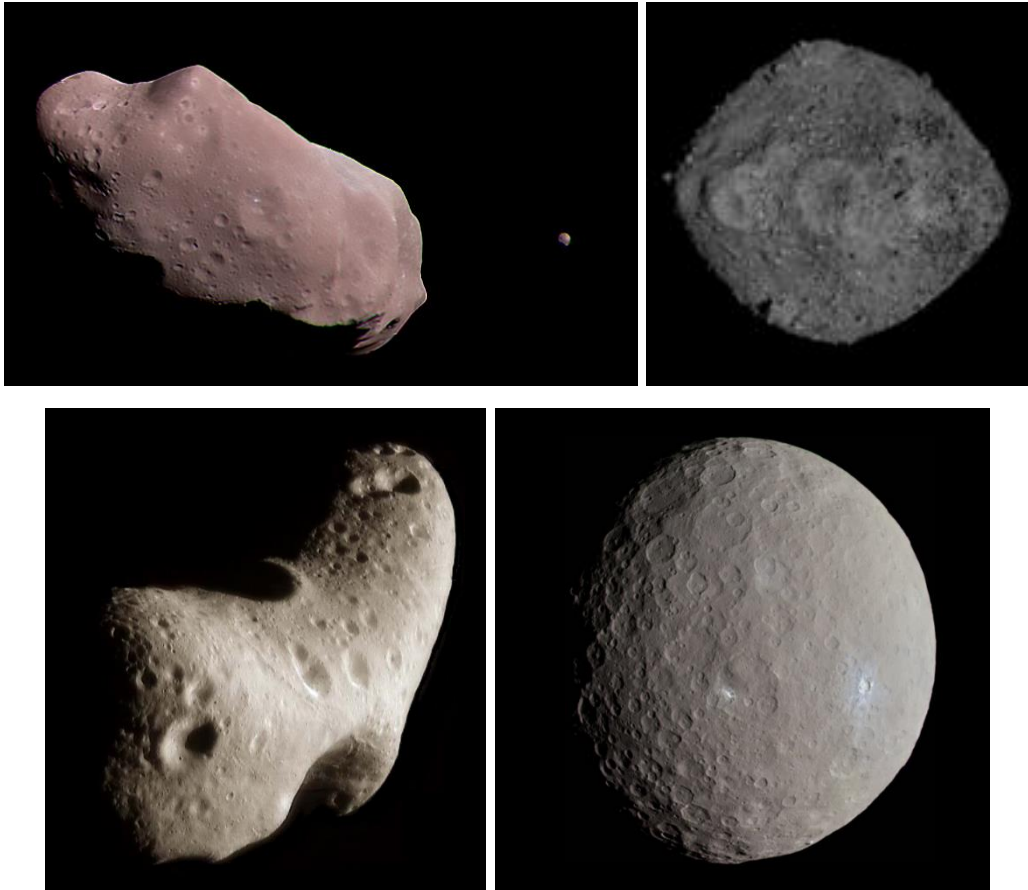


Рис. 1.1 Зображення відвіданих астероїдів, що ілюструють їх відмінності:
 (верхній ряд) 243 Іда з його супутником Дактилем і 101955 Бенну,
 (нижній ряд) 433 Ерос і 1 Церера [1]

1.2. Ідентифікація сімейств астероїдів

Термін «сімейства астероїдів» історично пов'язаний з ім'ям японського дослідника Кійоцугу Хіраями, який першим виявив групи астероїдів, що характеризуються майже однаковими функціями орбітальних елементів. Хіраяма висунув гіпотезу, що така близькість не могла бути випадковою, і припустив спільне походження членів цих угруповань (1918 рік). Його інтерпретація, прийнята і сьогодні, підкріплена теоретичними і спостережливими результатами. Вона полягала в тому, що члени сімейства – це фрагменти, утворені в результаті зіткнення батьківського астероїда і його часткової або повної дефрагментації. У своєму класичному аналізі Хіраяма зміг виокремити п'ять сімейств, які і сьогодні відомі як сімейства Хіраями: Еос, Феміда, Короніс, Флора і Марія.

Минуло багато років, перш ніж до проблеми ідентифікації сімейств астероїдів знову звернулися дослідники. Так Брауер у 1951 році підтвердив сімейства Хіраями, хоча він розділив Флору на чотири різні групи. Більше того, до списку сімейств було додано 20 нових додаткових груп. З того часу і до 1990 року кілька авторів запропонували власні каталоги сімейств але не було досягнуто єдиної згоди між результатами різних робіт. Автори, які використовували дещо різні бази даних (за кількістю об'єктів) власних елементів знайшли, що кількість сімейств, які є у головному поясі: від 15 до 117. Різні автори використовували різні методи класифікації. Більшість з них ґрунтувалися на візуальному аналізі даних, і лише у деяких випадках доповнювалися статистичними тестами для оцінки рівня значущості різних угруповань. Певна частка суб'єктивності, безумовно, була присутня.

Згодом, ситуація у сфері ідентифікації сімейства почала суттєво покращуватися. Основною причиною стала розробка більш об'єктивних процедур ідентифікації. Крім того, наявність дедалі більшої кількості наборів даних з точними відповідними елементами дозволила дослідникам аналізувати все більші вибірки всієї популяції астероїдів, що давало кращі можливості надійно виявляти наявність щільних, компактних скупчень.

Надзвичайно важливими для процедур ідентифікації сімейств є власні елементи, тому що орбітальні елементи астероїдів піддаються варіаціям на різних часових інтервалах, як наслідок планетарних збурень. Якщо припустити, що сімейства утворюються після руйнування батьківського тіла, можна очікувати, що миттєві орбітальні елементи фрагментів дуже схожі одразу після утворення сімейства, але потім починають розходитися під впливом збурень [2].

Стандартним підходом до ідентифікації сімейств астероїдів став так званий метод ієрархічної кластеризації (НСМ), запроваджений італійським астрономом Ф. Заппала у 1990 році. Виявлення сімейств астероїдів та ідентифікація їх членів зазвичай виконується у тривимірному просторі власних орбітальних елементів: велика піввісь (a), ексцентриситет (e), і нахил (i). Відстані між астероїдами у просторі власних елементів зазвичай визначаються за допомогою формули (1.1), запропонованих Zappala et al [9]:

$$d = na \sqrt{\frac{5}{4} \times \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + 2(\Delta e)^2 + 2(\Delta \sin i)^2} \quad (1.1)$$

де na – це геліоцентрична орбітальна швидкість астероїда на коловій орбіті з великою піввіссю a ;

Далі величини, що входять до (1.1) це:

$$a = \frac{(a_2 + a_1)}{2}, \Delta a = a_1 - a_2, \Delta e = e_1 - e_2, \Delta \sin i = \sin i_1 - \sin i_2, \quad (1.2)$$

де індекси (1) і (2) позначають два тіла, відстань між якими обчислюється. Відстань d зазвичай виражається у метрах за секунду, тобто метод оцінює відстані у просторі відносних швидкостей.

Метод НСМ, що використовується для ідентифікації сімейств астероїдів, базується на однозв'язній кластеризації. Він працює агломеративно (знизу вгору), тобто на кожному кроці об'єднуються два кластери, які містять найближчу пару астероїдів, що ще не належать до одного кластера. Основна перевага однозв'язного НСМ полягає в тому, що він не виключає жодної форми сімейства. Тому він дозволяє виявляти нерегулярні кластери, тобто такі, що мають неправильну форму з вузькими перехідними областями у багатовимірному просторі власних орбітальних елементів. Однак головна перевага тісно пов'язана з основною проблемою НСМ – так званим

ланцюговим ефектом. Тобто, перші концентрації природним чином об'єднують сусідні групи, утворюючи таким чином ланцюжок. У випадку сімей, що знаходяться поруч, ланцюговий ефект може перешкоджати роз'єднанню сімей. Ланцюговий ефект полягає в тому, що для злиття двох скупчень достатньо лише однієї пари точок, щоб вони були достатньо близькими [3].

У даній роботі використовується набір сімейств астероїдів отриманих у роботі Несворного та ін. – цей набір даних містить динамічну приналежність астероїдів до 122 сімейств, розраховану на основі синтетичних власних елементів, включно з сімействами з високим нахилом. Ці сімейства були розраховані Давидом Несворним за допомогою його коду, заснованого на методі ієрархічної кластеризації (НСМ) [11].

1.3. Фізичні та динамічні властивості сімейств астероїдів

Родини астероїдів є лабораторіями вивчення зіткнень, які були частими під час формування планет земної групи. Зокрема відомо, що під час кристалізації залізних метеоритів катастрофічні зіткнення розтрошили ці астероїди, залишивши після себе рої тіл, які динамічно еволюціонували під дією гравітаційних збурень та ефекту Ярковського до їхнього сучасного розташування, як у головному поясі, так і за його межами. Наслідки зіткнення та гравітаційна реаккумуляція продуктів зіткнення також залишили свій відбиток на формах, розмірах, осьовому обертанні та густині членів сімейств, що утворилися. Вивчаючи фізичні властивості залишків зіткнень, ми можемо дослідити склад батьківських астероїдів, особливо цікаво це у важливих регіонах джерел перехідних популяцій (тобто поблизу люків Кірквуда), таких як навколоземні об'єкти (ОСЗ).

Таким чином, ці набори даних є джерелом інформації про фізичні властивості сімейств, що уможлиблює нові дослідження формування та еволюції сімейств астероїдів. Ці дані також забезпечують механізм зворотного зв'язку для динамічного аналізу сімейств, зокрема, для визначення віку а також методи, які покладаються на моделювання негравітаційних сил, які залежать від альbedo, діаметра та густини астероїда.

Також вимірювання кольорів і альbedo дозволяють нам виявляти викиди в наших списках популяцій і шукати варіації у властивостях поверхні членів родини які можуть вказувати на неоднорідність материнського тіла або процеси вивітрювання. Вимірювання діаметрів дозволяє побудувати розподіл частот за розміром і оцінити початковий розмір материнського тіла.

Обидва ці виміри мають вирішальне значення для вивчення фізики гігантських зіткнень. Спектри надають детальні мінералогічні обмеження членів родини, що дозволяє проводити більш чутливі дослідження космічного вивітрювання космосу та неоднорідності батьківських тіл, хоча і для меншого розміру зразка, а також досліджують середовище формування і дає змогу порівнювати їх з метеоритними зразками [4]. Швидкий розвиток ІЧ астрономії у 1960-ті роки відкрив можливість визначати відбивну здатність астероїдів – їх альbedo, таким чином на початку 1970-х було відомо альbedo для понад 100 астероїдів, а через 10 років було запущено перший ІЧ супутник IRAS, що отримав дані про альbedo вже майже 1500 астероїдів. Водночас було виконано огляд спектральних характеристик астероїдів у спеціальній 8-смуговій фотометричній системі ECAS. Саме ці два набори даних – альbedo IRAS та показники кольору з ECAS стали базою для найбільш вдалої таксономічної класифікації Толена 1984 року [2], хоча вона була розроблена на досить невеликій вибірці (близько 600 астероїдів). Її перевагою було використання не тільки показників кольору (різниці в відбивної здатності на різних довжинах хвиль) у широкому діапазоні спектру від ближнього УФ до ближнього ІЧ, але й альbedo, відбивної здатності поверхні астероїдів. Ця класифікація довгий час була основною.

Кінець 1980-х та початок 1990-х років відмічений швидким розповсюдження ПЗЗ-камер, які принесли стрибок у чутливості, однак втрати у спектральному діапазоні: на відміну від фотоелектронних помножувачів ПЗЗ-матриці не чутливі до синьої частини спектру. Тому із останнього десятиліття ХХ сторіччя йшов швидкий ріст кількості вимірювань спектрів у червоній та ближній ІЧ областях спектру, нових же вимірювань альbedo не було. Тому виникла необхідність розробки класифікації астероїдів виключно за спектрами. Такими стали Бас та Бінзала, та Бас ДеМео [3,4].

Суттєвий прогрес настав із запуском ІЧ супутника WISE, дані якого дозволили отримати у 2012 каталог альbedo для понад 150000 астероїдів. Паралельно накопичувалися дані огляду SDSS у власній системі 5 фільтрів, так у 2008 році було опубліковано каталог показників кольору приблизно 104000 астероїдів. А у 2020 було отримано новий каталог, що вміщував майже 400000 астероїдів із вимірними показниками кольору. Все це відкрило шлях до повернення до класичного підходу класифікації за показниками кольору та альbedo на суттєво більшому об'ємі даних. Саме таку амбітну мету і поставлено у даній роботі.

Висновки до розділу 1

Астероїди – це кам'янисті, малі тіла, що обертаються навколо Сонця. Їхні розміри варіюються від кількох метрів до сотень кілометрів. Більшість астероїдів знаходиться у головному поясі астероїдів, розташованому між орбітами Марса та Юпітера. Деякі астероїди, звані навколосемними, мають орбіти, які перетинають орбіту Землі, що робить їх потенційно небезпечними для нашої планети. Існують популяції і поза головним поясом – групи Кібели, Гільди, троянці Юпітера, Нептуна, кентаври, транснептунові тіла.

Сімейства астероїдів – це групи астероїдів, які мають схожі орбітальні характеристики. Вважається, що вони утворилися внаслідок катастрофічних зіткнення батьківського тіла із ударником. Вивчення сімейств астероїдів дає нам цінну інформацію про ранню історію Сонячної системи, а також про склад та еволюцію астероїдів.

Фізичні властивості астероїдів, такі як альbedo астероїда – міра того, скільки сонячного світла він відбиває, поряд зі спектром дає інформацію про його склад та дозволяє провести класифікацію.

РОЗДІЛ 2

ЕФЕКТ ЯРКОВСЬКОГО

2.1. Відкриття ефекту

Іван Осипович Янковський (1844 – 1902), інженер-будівельник який у вільний час працював над науковими проблемами, вперше запропонував ефект, який тепер носить його ім'я. У своїй брошурі, написаній близько 1900 року, Янковський зазначив, що добове нагрівання обертового об'єкта у космосі призведе до того, що він відчує силу, яка, хоч і є крихітною, але може призвести до значних ефектів на орбітах малих тіл, особливо метеоритів і малих астероїдів. Видатне відкриття Янковського було б віддане забуттю, якби не естонський астроном Ернст Й. Опік (1893 – 1985), який прочитав брошуру Янковського десь у 1909 році. Десятиліття потому Опік, пригадуючи по пам'яті ідею памфлету, зрозумів можливе значення ефекту Янковського для руху метеороїдів у Сонячній системі. Стаття Опіка 1951 року та стаття В. Радзієвського 1952 року фактично перевідкривають цей ефект.

Ефект Янковського – поява слабкого реактивного імпульсу завдяки тепловому випромінюванню від поверхні астероїда, що нагрілася вдень і вистигає вночі, що надає йому додаткового прискорення. Цей ефект пояснює, чому кількість астероїдів, що досягли Землі, більша, ніж впливало з колишніх розрахунків.

Величина і напрямок реактивного імпульсу залежать від швидкості обертання, будови і фізичних параметрів поверхні астероїда. Наприклад, для астероїда масою 210 млн. тон вона становить приблизно 0,3 Н – у результаті з 1991 по 2003 роки траєкторія астероїда відхилилася від розрахованої на 15 км.

У 2000 р. на базі ефекту Янковського було сформульовано більш загальний ефект Янковського – О'Кіфа – Радзієвського – Педдека (ЯОРП ефект), який враховує перевипромінення теплової радіації несиметричним астероїдом і означає вже вплив на осьове обертання самого астероїда (рис. 2.1).

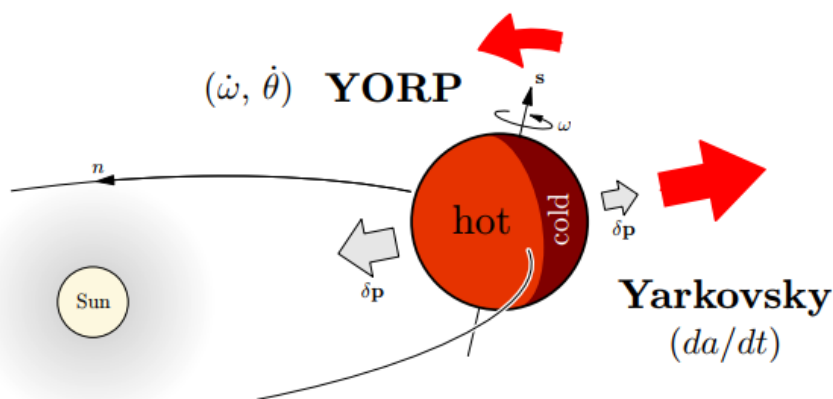


Рис. 2.1 Ефекти Ярковського та ЯОРП [18]

2.2. Механізм роботи, денний та сезонний ефекти

Ефект Ярковського є наслідком того факту, що зміна температури об'єкта, нагрітого випромінюванням (і, отже, інтенсивності теплового випромінювання від об'єкта) відстає від змін вхідного випромінювання через теплову інерцію речовини астероїда. Тобто поверхні об'єкта потрібен час, щоб нагрітися при першому освітленні, і час, щоб охолонути, коли освітлення припиняється. Загалом є два компоненти ефекту:

Добовий ефект. Основна ідея добового ефекту Ярковського показана на рис. 2.2 (а), де показано сферичний метеороїд на круговій орбіті навколо Сонця. Для простоти, вісь обертання метеороїда вважається нормальною до площини орбіти, так що Сонце завжди стоїть на екваторі. Інсоляція нагріває сторону, повернуту до Сонця, а тепло, зрештою, випромінюється в космос. Інфрачервоний фотон при вильоті з метеороїда передає імпульс тілу відповідно до співвідношення $p = \frac{E}{c}$ де p – імпульс фотона, E – його енергія, а c – швидкість світла. Оскільки більше енергії і, відповідно, більше імпульсу вилітає від гарячої частини метеороїда, ніж від холодної, метеороїд отримує віддачу у напрямку від гарячої частини. Якби метеороїд не мав теплової інерції, то розподіл температури був би симетричним відносно підсонячної точки і імпульс був би направлений радіально – від Сонця. Єдиним наслідком цієї сили було б послаблення ефективної сили тяжіння до Сонця. Однак, всі тіла мають теплову

інерцію, яка спричиняє затримку, тому найгарячішою частиною метеороїда є його вечірня сторона, а не підсонячна точка. Як наслідок, сила, що діє на метеороїд, має не лише складову, яка спрямована радіально назовні від Сонця, але й також має компонент, спрямований вздовж траєкторії. Цей компонент вздовж траєкторії викликає збільшення великої осі (i , меншою мірою, ексцентриситету) для прямого обертання, показаного на рисунку, так що з часом крихітна сила Ярковського може суттєво змінити орбіту. Знак добового ефекту Ярковського залежить від напрямку обертання. Якщо метеороїд, зображений на рис. 2.2 (а) обертається у ретроградному напрямку, то орбіта буде стискатися, а не розширюватися, а коли вісь обертання знаходиться в орбітальній площині, то добовий ефект Ярковського був би повністю відсутній. Величина добового ефекту також залежить від того, наскільки близько тіло до Сонця, нахилу осі обертання тіла відносно площини орбіти і фізичних характеристик тіла (тобто розміру тіла, його форми і теплових властивостей, а також швидкості обертання). Взаємодія цих факторів означає, що існує оптимальний розмір для максимізації добового ефекту Ярковського для заданої швидкості обертання і теплових властивостей. Дуже великий об'єкт матиме погане співвідношення площі до маси (наприклад, ефект є незначним на такому великому тілі, як Земля). З іншого боку, чим менше тіло, тим краще співвідношення площі до маси, але в якийсь момент радіус стає настільки малим, що тепла хвиля проникає наскрізь через все тіло, зменшуючи різницю температур між денною та нічною сторонами та послаблюючи ефект (наприклад, пилинка, що повільно обертається).

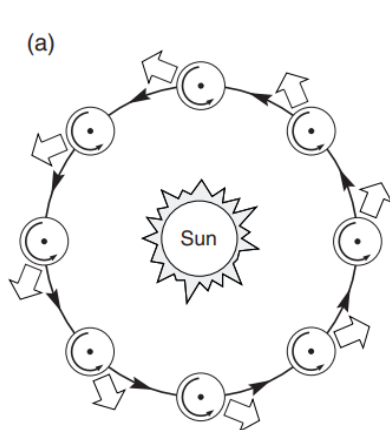


Рис. 2.2 (а)

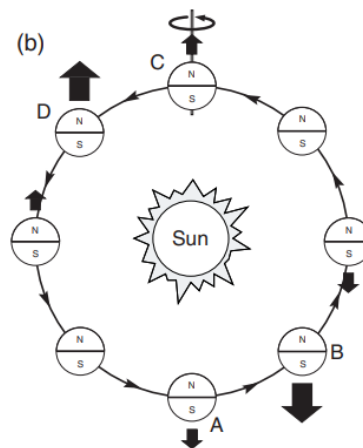


Рис. 2.2 (б) [5]

Рис. 2..2 (а): добовий ефект Ярковського, коли вісь обертання астероїда перпендикулярна до площини орбіти. Частина сонячної інсоляції поглинається лише для того, щоб згодом випромінюватися, створюючи чисту теплову силу в напрямку широких стрілок. Оскільки теплове випромінювання в цьому прикладі зосереджене на астероїді, що обертається, приблизно о 2:00 дня, сила віддачі випромінювання завжди спрямована на 2:00 дня. Таким чином, поздовжня складова змушує об'єкт обертатися по спіралі назовні. Ретроградне обертання призводить до того, що орбіта обертається по спіралі всередину.

Рис. 2..2 (b): сезонний ефект Ярковського, з віссю обертання астероїда в площині орбіти. Сезонне нагрівання та охолодження «північної» та «південної» півкуль призводять до виникнення теплової сили, яка лежить вздовж осі обертання. Сила рерадіаційного тиску змінюється вздовж орбіти внаслідок теплової інерції; навіть якщо максимум освітленості на кожній півкулі припадає на А і С, то максимальні результуючі сили випромінювання діють на тіло в точках В і D. Сумарний ефект за один оберт завжди змушує об'єкт закручуватися по спіралі всередину.

Майже через століття після того, як Ярковський написав свій памфлет, був відкритий прояв сезонного ефекту Ярковського. Під час пошуків причини сезонного спадання орбіти супутника LAGEOS було зрозуміло, що має існувати сезонний ефект на додаток до оригінального добового ефекту Ярковського. Сезонний ефект застосовується не тільки для супутників Землі, таких як LAGEOS, але й до об'єктів, що обертаються навколо Сонця. Сезонний ефект Ярковського проілюстровано на рис. 2.2. (b), як і на рис. 2.2. (a), сферичний метеороїд вважається таким, що перебуває на круговій орбіті навколо Сонця, але в цьому випадку вісь обертання лежить у площині орбіти. Саме складова сили, що лежить вздовж осі обертання, призводить до сезонного ефекту. Коли метеороїд перебуває в точці А (нижня частина рисунка), Сонце найсильніше світить на його північній півкулі. Як і у випадку з добовим ефектом, існує затримка через теплову інерцію, тому північна півкуля найгарячіша у точці В. Так само Сонце найсильніше світить на південну півкулю в точці С, але ця

півкуля стає найгарячішою в точці D. Коли усереднюється по орбіті, вона виявляється ненульовою. Однак, для тіла без теплової інерції, сила вздовж траєкторії в середньому дорівнює нулю, якщо інтегрувати її за один оберт навколо Сонця. Для малих орбітальних ексцентриситетів середня сила вздовж траєкторії завжди протилежна руху метеороїда. Отже, в режимі малих ексцентриситетів сезонна сила завжди діє як опір і спричиняє зменшення великої піввісі орбіти; з цієї причини сезонний ефект Ярківського спочатку отримав назву «тепловий опір». На відміну від добового ефекту Ярківського, сезонний ефект Ярківського не залежить від напрямку обертання метеороїда; зміна напрямку обертання не змінює знак ефекту. Більше того, відповідним для сезонного ефекту є період обертання метеороїда по орбіті, а не зазвичай набагато швидший період обертання, який бере участь у добовому ефекті. Сезонний ефект залежить від близькості тіла до Сонця і від нахилу осі обертання відносно орбіти; він зникає, коли вісь нормальна до площини орбіти. Як і в добовому випадку, існує оптимальний розмір для максимізації ефекту [5].

2.3. Вимірювання ефекту

Вперше ефект був виміряний на основі довготривалих оптичних та радіолокаційних спостережень 1991 – 2003 роках астероїда (6489) Голевка. Прогноз впливу ефекту Ярківського передбачає номінальні значення густини $2,5 \text{ г см}^{-3}$ і теплопровідності $0,01 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$ для Голевки (рис. 2.3) [12].

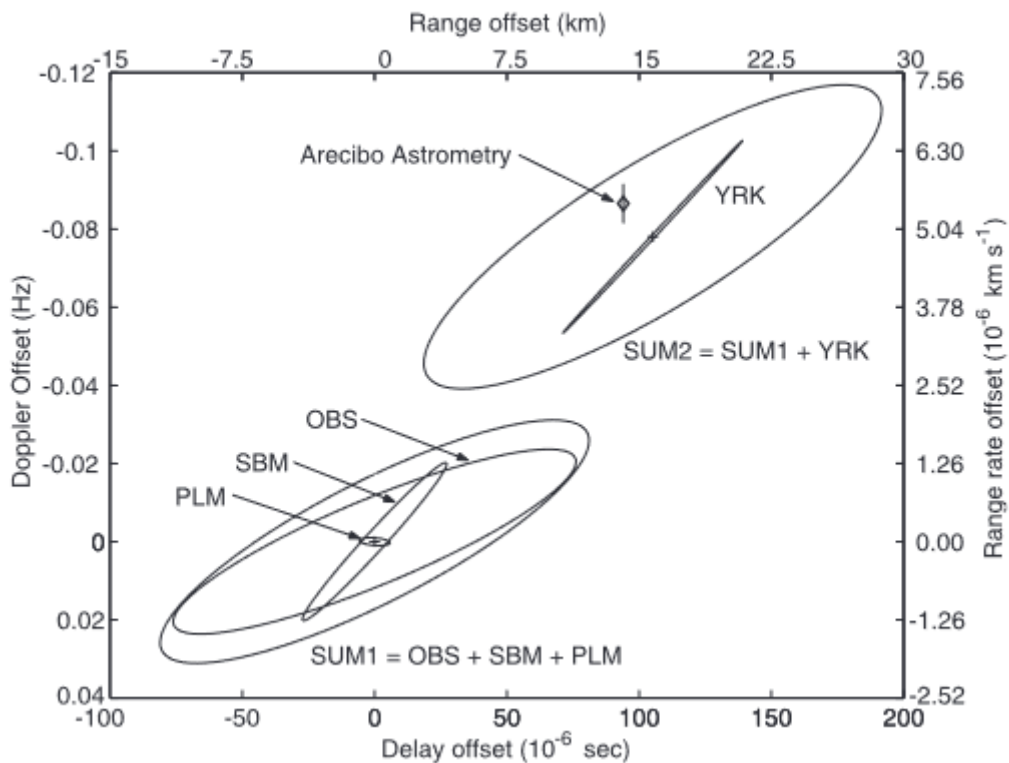


Рис. 2.3 Прогнозований за впливом ефекту Ярковського зсув положення астероїду Голевка з еліпсом достовірності 90% у просторі радіолокаційної затримки (діапазон) і доплерівські (дальність) вимірювання 26 травня 2003 р. 09:38 UTC. Прогнози базуються на астрометричних даних з квітня 1991 р. по жовтень 1999 р. [12]

На теперішній час виміряти вплив ефекту вдалося для майже 350 астероїдів. Суттєвий прорив у цій області стався після надточних астрометричних даних супутника Gaia. Однак це астероїди що зближуються із Землею, для головного поясу надійних вимірів поки що не має [13]. Нижче наведено графіки зі статті [13] із аналізом астероїдів із виміряним ефектом Ярковського, їх розподіли за величиною діаметр, сигнал/шуму та розподіл за таксономічним типом. Також за даними каталога [14] нами було побудовано гістограму розподілу величини швидкості дрейфу (рис. 2.4) із якої бачимо, що більшість тіл мають від'ємні швидкості дрейфу, тобто зменшення великої піввісі та типові значення між 0.005 та -0.01 . Найбільший дрейф зафіксовано у астероїдів 2015 TC25 $(4.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$ а.о. за млн років та 2010 KQ10 $(-3.3 \pm 1.1) \cdot 10^{-4}$ а.о. за млн років.

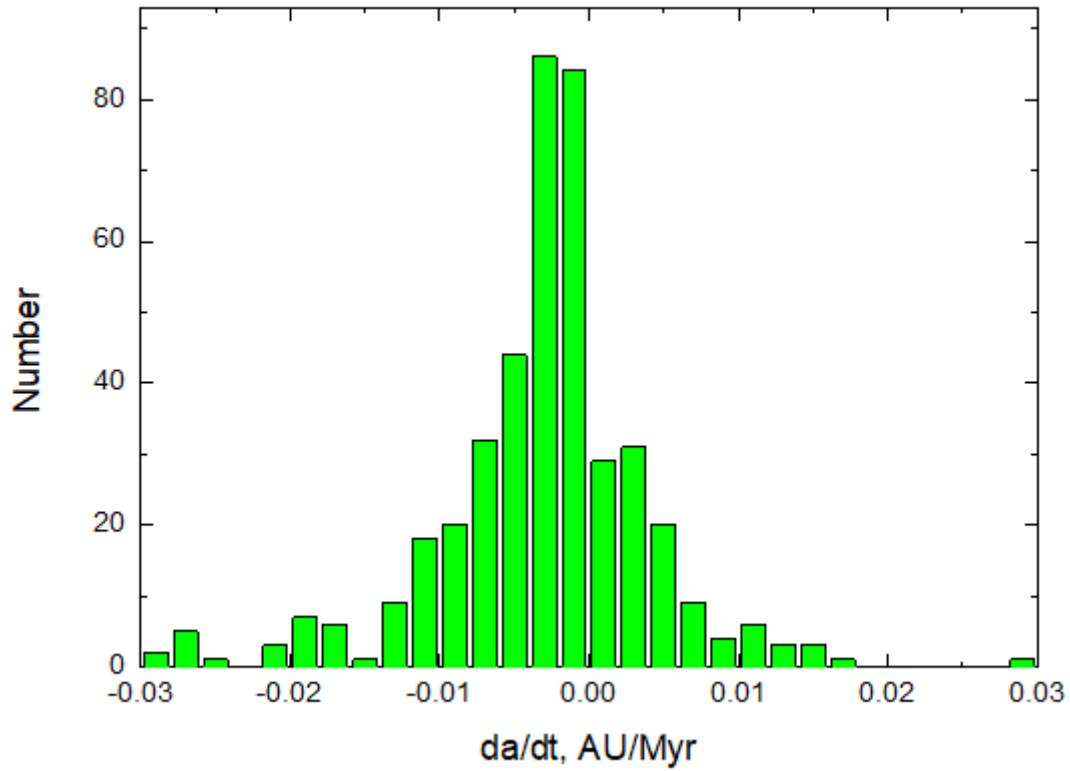


Рис. 2.4 Гістограма розподілу швидкостей дрейфу

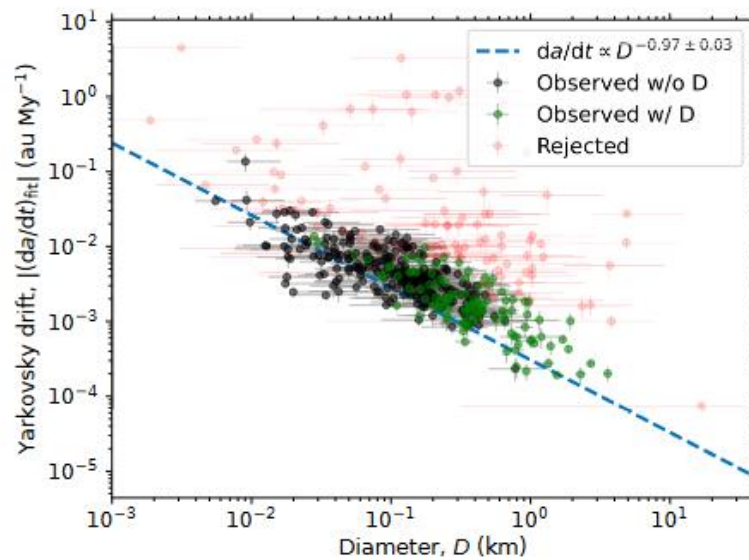


Рис. 2.5 Розподіл астероїдів із задетектованим ефектом Ярковського на площині « $da/dt - D$ »

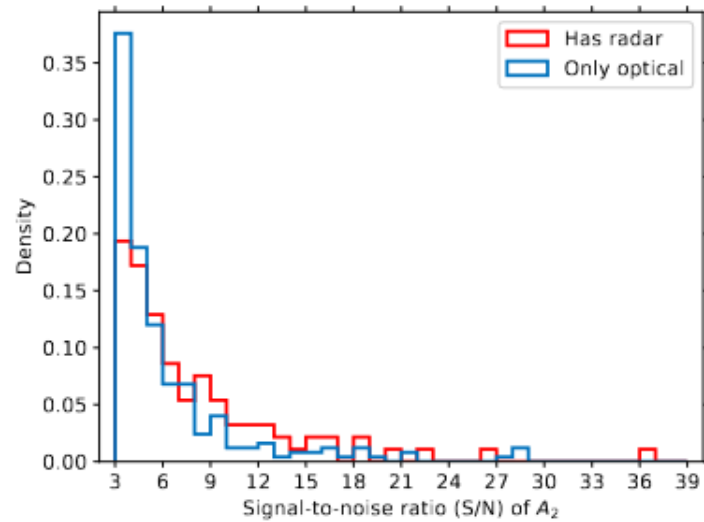


Рис. 2.6 Розподіл астероїдів із задетектованим ефектом Ярковського за величиною сигнал/шум

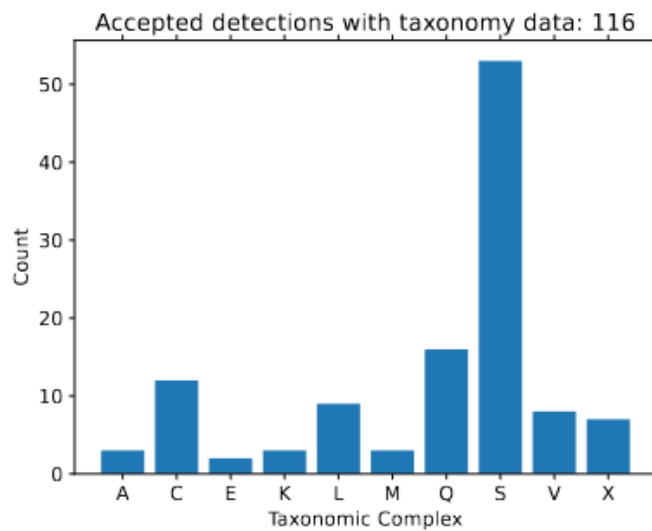


Рис. 2.7 Розподіл астероїдів із задетектованим ефектом Ярковського за таксономічним типом (116 астероїдів)

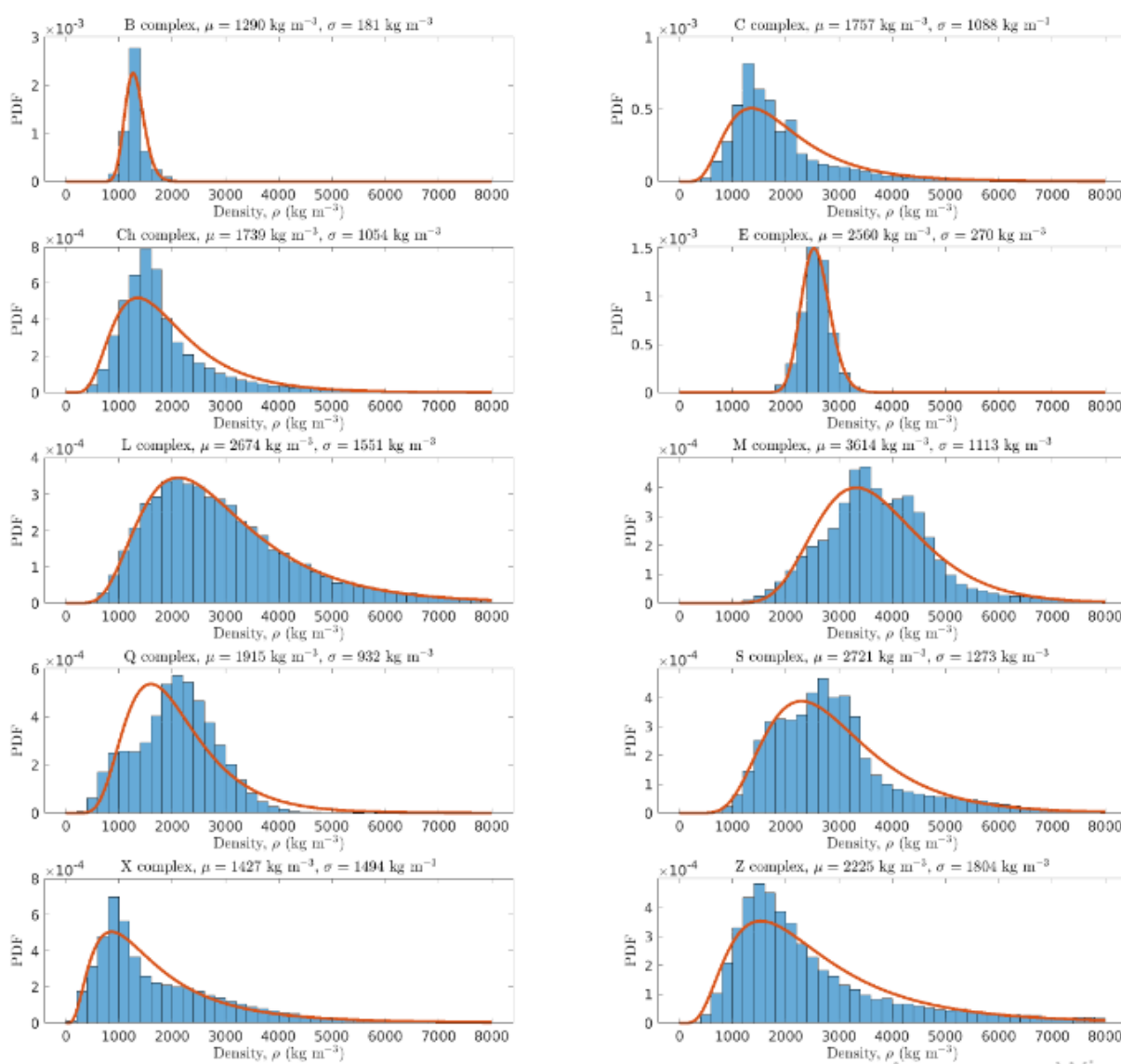


Рис. 2.8 Розподіл густин астероїдів із відомим таксономічним типом та із задетектованим ефектом Ярковського [13]

Особливо важливим є те, що виміри дрейфу Ярковського можуть слугувати джерелом інформації про густини. Вище на рис. 2.8 показано розподіл густин астероїдів даного таксономічного типу, саме за величиною дрейфу Ярковського. До відомого методу визначення густин із небесномеханічних збурень додався ще цей новий метод.

Місія OSIRIS – REx , запущена у вересні 2016 року, вивчає ефект Ярковського на астероїді Бенну. У 2020 році астрономи підтвердили прискорення Ярковським астероїда 99942 Апофіс. Отримані дані мають відношення до запобігання зіткненню з астероїдом, оскільки вважалося, що 99942 Апофіс мав дуже низький шанс

зіткнутися з Землею в 2068 році, а ефект Ярковського був значним джерелом невизначеності прогнозів. У 2021 році міждисциплінарне професійно-аматорське співробітництво поєднало супутникові та наземні радіолокаційні вимірювання Gaia з аматорськими спостереженнями затемнення астероїдом зірок для подальшого уточнення орбіти 99942 Апофіса та вимірювання прискорення Ярковського з високою точністю в межах 0,5%. Завдяки цьому астрономи змогли виключити можливість зіткнення із Землею щонайменше на наступні 100 років [6]. Величина зміни великої піввісі у теорії отримана наступним чином [15]:

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n} S \quad (2.1)$$

де $\frac{da}{dt}$ – швидкість зменшення великої піввісі, S – прискорення вздовж орбіти астероїда, n – частота обертання астероїда навколо Сонця.

$$S = -B \left(\frac{a_E}{a} \right)^2 \left(\frac{\Phi_1}{1 + \Phi_1 + 2\Phi_1^2} \right) \quad (2.2)$$

де a_E – відстань від Землі до Сонця, a – велика піввісь астероїда, Φ_1 – це модифікований термічний параметр.

$$B = \frac{(1-A)F_E}{6pcR_A} \quad (2.3)$$

де p – густина астероїда, A – альbedo, R_A – радіус астероїда, c – швидкість світла, F_E – сонячна стала.

$$\Phi_1 = \frac{(KpnC_p)^{1/2}}{(32)^{1/2}\varepsilon\sigma T_0^3} \quad (2.4)$$

де K – теплопровідність, C_p – питома теплоота, ε – випромінювальна здатність, σ – постійна Стефана Больцмана, T_0 – середня температура астероїда.

$$\varepsilon T_0^4 \sigma = \frac{(1-A)}{4} F_E \left(\frac{a_E}{a} \right)^2 \quad (2.5)$$

З формули (2.5):

$$T_0^4 = \frac{\frac{(1-A)}{4} F_E \left(\frac{a_E}{a} \right)^2}{\varepsilon \sigma} \quad (2.6)$$

$$F_E = 1378;$$

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8};$$

$$A = 0,318;$$

$$a_E = 1 \text{ AU};$$

$$a = 2,62284 \text{ AU};$$

$$\varepsilon = 0,9;$$

Підставимо значення із [19] у формулу (2.6):

$$T_0^4 = \frac{0,1705 \cdot 1378 \cdot 0,38^2 \cdot 10^8}{5,1} = 6.69275 \cdot 10^8;$$

$$T_0 = 160;$$

$$\text{Відомо, що } \Gamma = \sqrt{K\rho C_p}$$

де Γ – теплова інерція.

$$\Gamma = 100 \quad [19]$$

Якщо підставити у формулу (2.4) замість $K\rho C_p$ квадрат теплової інерції – Γ^2 , то вийде:

$$\Phi_1 = \frac{(n\Gamma^2)^{1/2}}{(32)^{1/2} \varepsilon \sigma T_0^3} \quad (2.7)$$

$$n = P^{-1} \quad (2.8)$$

де P – період обертання астероїда навколо сонця.

$$P = 1550.83109943 \text{ діб} = 133920000 \text{ с};$$

$$\text{Отже, } n = 133920000^{-1} = 7,467 \cdot 10^{-9}.$$

$$\Phi_1 = \frac{(7,467 \cdot 10^{-9} \cdot 100^2)^{1/2}}{(32)^{1/2} \cdot 0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 160^3} = 73,08 \cdot 10^{-4};$$

$$\rho = 2700 \text{ кг/м}^3;$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

$$R_A = 935.5 \text{ м};$$

Підставивши ці значення із [19] до формули (2.3), отримаємо:

$$B = \frac{(1-0,318) \cdot 1378}{6 \cdot 2700 \cdot 935.5 \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,067 \cdot 10^{-13};$$

Підставивши знайдені B та Φ_1 , а також відомі a_E та a у формулу (2.2), отримаємо:

$$S = -2,067 \cdot 10^{-13} \cdot \left(\frac{1}{2,62284}\right)^2 \cdot \left(\frac{73,08 \cdot 10^{-4}}{1 + 73,08 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot (73,08 \cdot 10^{-4})^2}\right) = -2,179 \cdot 10^{-16};$$

Отже, підставивши у формулу (2.1) S та n , отримаємо:

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{7,467 * 10^{-9}} * (-2,179 * 10^{-16}) = -5,836 * 10^{-8};$$

$$\frac{da}{dt} = -5,836 * 10^{-8} \text{ м/с} = -1.2308 * 10^{-5} \text{ а.о./млн.років.}$$

Висновки до розділу 2

Ефект Ярковського – це слабка сила, яка виникає внаслідок нерівномірного нагрівання обертового тіла випромінюванням. Він був відкритий російським інженером-будівельником Іваном Осиповичем Ярковським у 1900 році. Ефект Ярковського має два компоненти:

Добовий ефект діє вздовж траєкторії об'єкта. Він виникає внаслідок того, що денна сторона об'єкта нагрівається сильніше, ніж нічна сторона. Це призводить до того, що денна сторона випромінює більше тепла, ніж нічна сторона. Різниця в імпульсі випромінювання призводить до виникнення сили, яка діє вздовж траєкторії об'єкта.

Сезонний ефект діє вздовж осі обертання об'єкта. Він виникає внаслідок того, що різні частини об'єкта отримують різну кількість сонячного світла протягом року. Наприклад, північна півкуля астероїда, який обертається навколо Сонця, буде отримувати більше сонячного світла влітку, ніж взимку. Це призводить до того, що північна півкуля буде нагріватися сильніше, ніж південна півкуля. Різниця в температурі між північними та південними півкулями призводить до виникнення сили, яка діє вздовж осі обертання об'єкта.

Ефект Ярковського має важливе значення для розуміння руху малих тіл у Сонячній системі. Він є однією з основних сил, які впливають на орбіти астероїдів, комет і метеороїдів. Ефект Ярковського також може призвести до зіткнення цих тіл із Землею або іншими планетами. У 2020 році астрономи підтвердили прискорення Ярковським астероїда 99942 Апофіс. Це дослідження показало, що ефект Ярковського може бути значним джерелом невизначеності прогнозів зіткнень астероїдів із Землею. У майбутньому ефект Ярковського може використовуватися для зміни курсу навколосемних астероїдів, які потенційно можуть зіткнутися з Землею.

Для цього можна використовувати різні методи, наприклад, «фарбування» поверхні астероїда або фокусування сонячного випромінювання на астероїд.

РОЗДІЛ 3

АПРОКСИМАЦІЯ ВІКУ СІМЕЙСТВ АСТЕРОЇДІВ

3.1. Розрахунки віку сімейств, константи C та долі об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла

Утворення сімейства означає розліт фрагментів, і ступінь. Ця поведінка стає зрозумілою, коли ми малюємо V-подібну форму сімейства в $(a, 1/D)$ або (a, H) просторі, де a – власна велика піввісь, H – абсолютна зоряна величина, D – діаметр членів родини.

Nesvorný et al. 2002 першими застосували теорію ефекту Ярковського, для оцінки віку сімейства астероїдів. Вони змогли оцінити вік родини Феміди 2.5 ± 1.0 мільярдів років. Пізніше той самий підхід було використано для оцінки віку багатьох інших родин астероїдів.

У роботі Nesvorný et al. (2015) [10]. Наведено формулу (3.1) яка пов'язує вік сімейства з фізичними властивостями його членів:

$$T \cong 1 \text{ Gyr} \times \left(\frac{c}{10^{-4} \text{ au}} \right) \left(\frac{a}{2.5 \text{ au}} \right)^2 \left(\frac{\rho}{2.5 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left(\frac{0.2}{p_v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Де ρ – це об'ємна густина астероїда і p_v – це візуальне геометричне альbedo. Константа C пов'язана з віком сімейства і залежить від швидкості дрейфу великої піввісі. Визначається за формулою (3.2)[7]:

$$H(a, a_c, C) = 5 \log \left(\frac{|a - a_c|}{c} \right) \quad (3.2)$$

Де a_c – власна велика піввісь центрального тіла сімейства, тобто передбаченого батьківського тіла, а H – абсолютна зоряна величина астероїда. Для того щоб для даного сімейства визначити константу C потрібно побудувати розподіл його членів на площині « $a - H$ » та апроксимувати гілки V – shape за допомогою вище наведеної формули (3.2). Далі буде наведено результати апроксимації для 10 сімейств.

Швидкість дрейфу Ярковського, яка становить $\sim 2.8 \times 10^{-7}$ AU мільйонів років⁻¹ для астероїда 1329 км діаметром, у внутрішній частині поясу, із густиною 1 г см^{-3} , теплопровідністю $0,01 - 0,001 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, альbedo Бонда $0,02$. Якщо визначити C , то

скорегувавши швидкість дрейфу за густину, відстань до Сонця та альbedo можна отримати приблизний вік сімейства астероїдів. Таксономічний тип визначався за альbedo та показниками кольору із огляду SDSS [16] для кожного сімейства будувався графік. Середні густини для основних типів Результати таких розрахунків наведено у таблиці.

Для оцінки долі об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла було спочатку обчислено діаметр кожного астероїда сімейства за формулою (3.3):

$$D = 2.99 \times 10^8 \frac{10^{0.2(-26.76-H)}}{\sqrt{P_V}} \quad (3.3)$$

Де P_V – візуальне альbedo, яке розраховувалось для всього сімейства за середнім значенням. Дані були взяті із бази NEOWISE [17] однаковим для всіх членів сімейства. За формулою $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ обчислюються об'єми кожного уламка, сума яких дає об'єм батьківського тіла до зіткнення і утворення сімейства.

За відношенням об'єму головного тіла з загальною сумою об'ємів всіх тіл ми отримуємо відсоткове значення долі об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла [8].

Дані усіх розрахунків було наведено в таблиці 3.1.

3.2. Апроксимація сімейства астероїдів Astrid

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Astrid віднесено 489 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 60 м/с. Сімейство розташовано у середній частині (Рис. 3.2) Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 2,75 – 2,82 а.о., ексцентриситет від 0,04 до 0,05, нахил орбіти від 0,13° до 1,26°. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 60%.

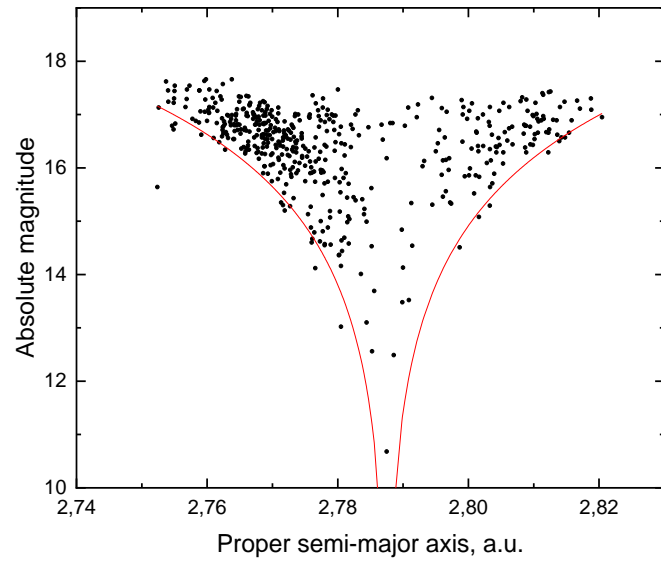


Рис. 3.1 Розподіл астероїдів сімейства Astrid за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H .

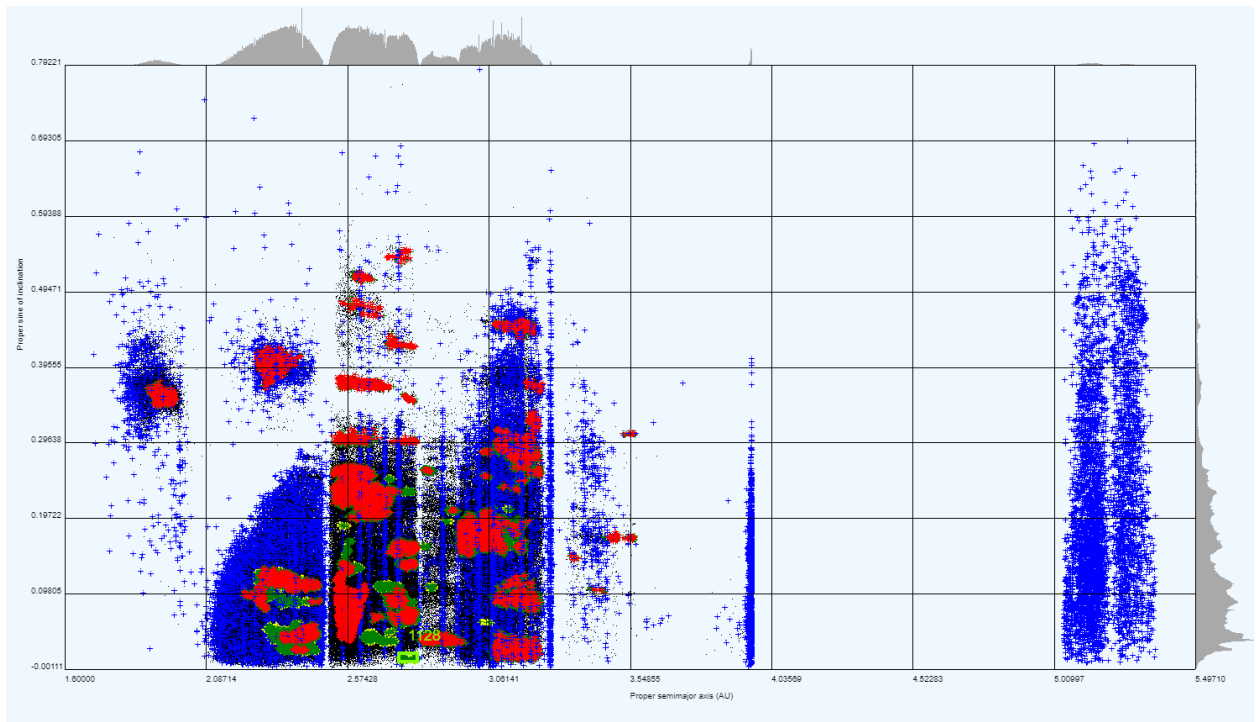


Рис 3.2 Розташування сімейства Astrid у Головному поясі астероїдів.

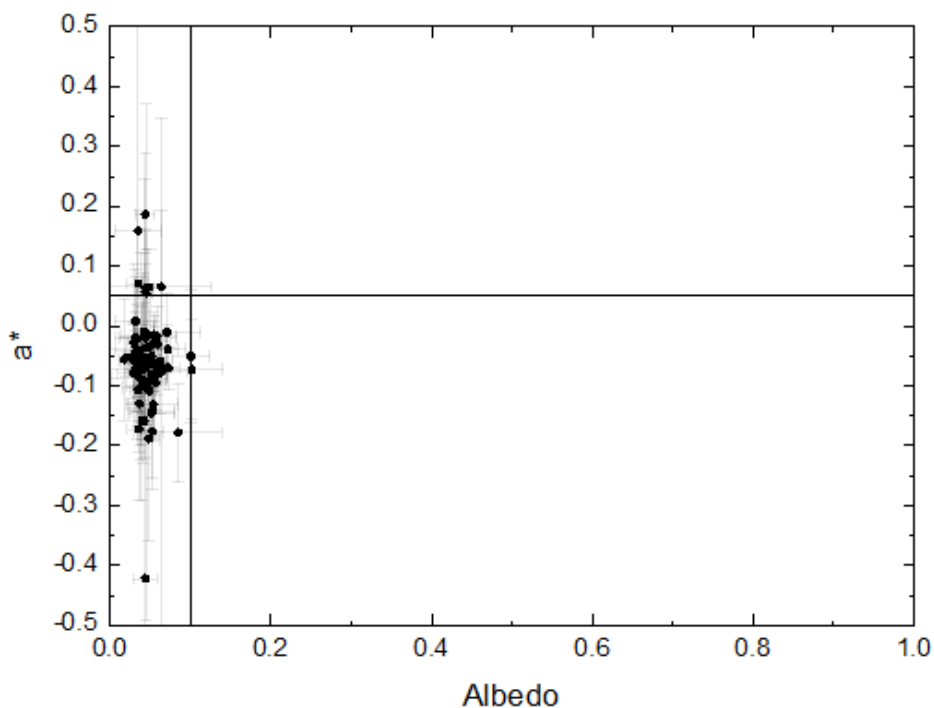


Рис 3.3 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Astrid у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.3. Апроксимація сімейства астероїдів Barcelona

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Barcelona віднесено 306 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 150 м/с. Сімейство розташоване у середній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 2,58 – 2,66 а.о., ексцентриситет від 0,18 до 0,29, нахил орбіти від $30,29^\circ$ до $31,42^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 36%.

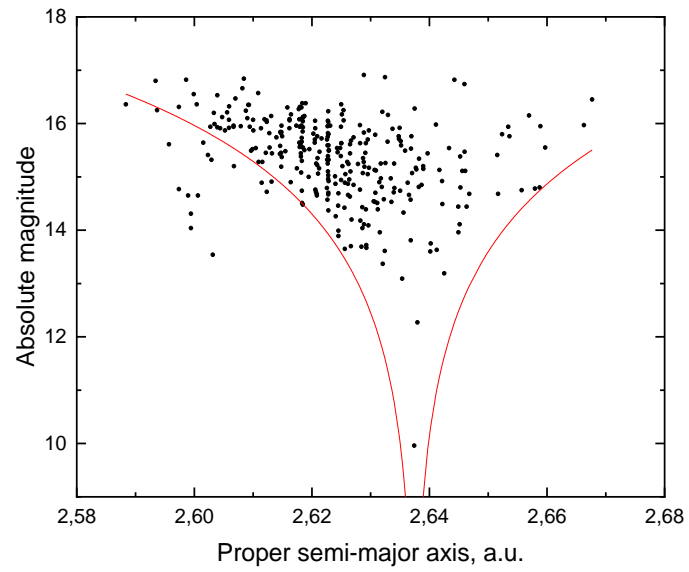


Рис. 3.4 Розподіл астероїдів сімейства Barcelona за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H .

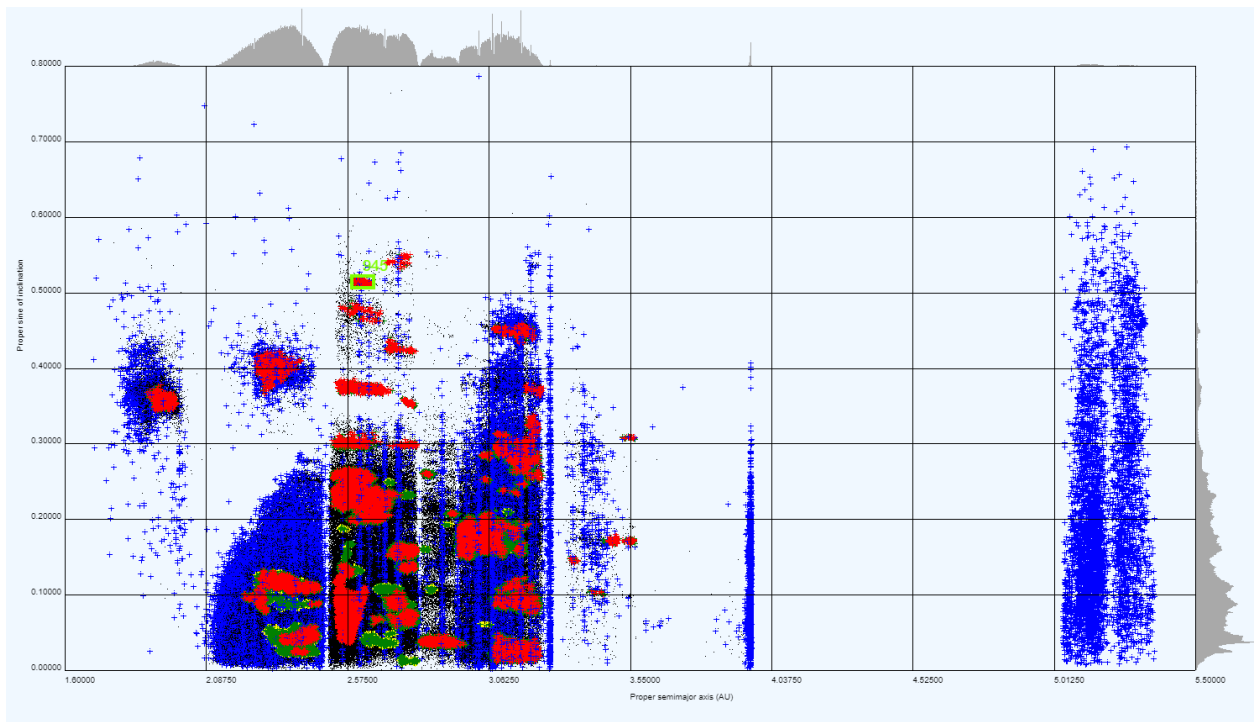


Рис 3.5 Розташування сімейства Barcelona у Головному поясі астероїдів

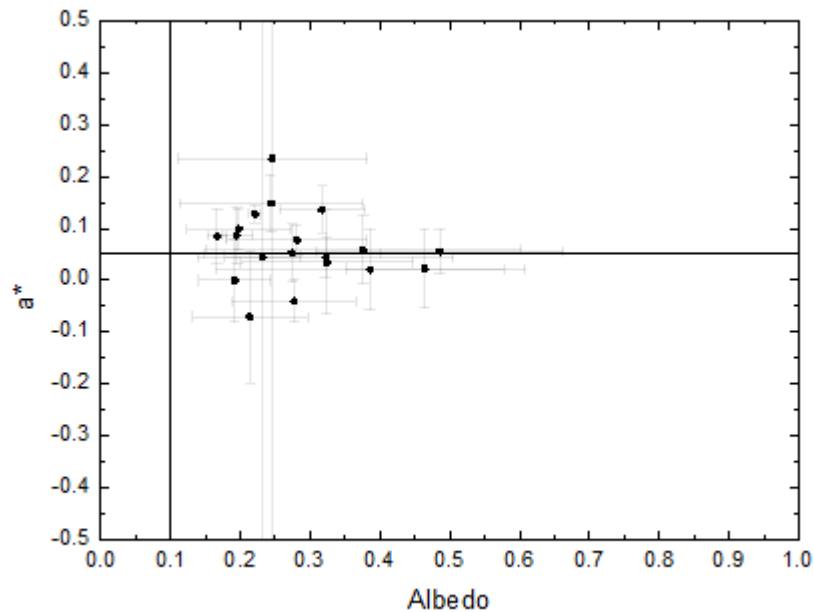


Рис. 3.6 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Barcelona у просторі «показник кольору a^* - Альbedo»

3.4. Апроксимація сімейства астероїдів Brasilia

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Brasilia віднесено 579 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 50 м/с. Сімейство розташоване у зовнішній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 2,83- 2,88 а.о., ексцентриситет від 0,11 до 0,12, нахил орбіти від $14,8^\circ$ до $15,29^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму цих уламків становить 108%.

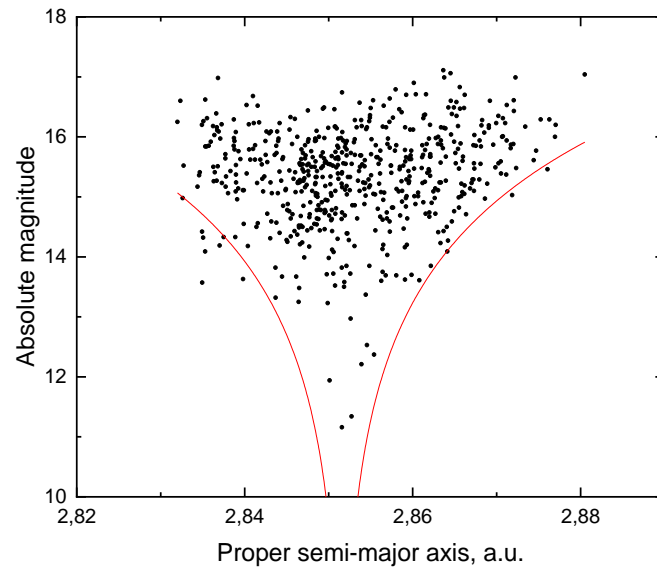


Рис. 3.7 Розподіл астероїдів сімейства Brasilia за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

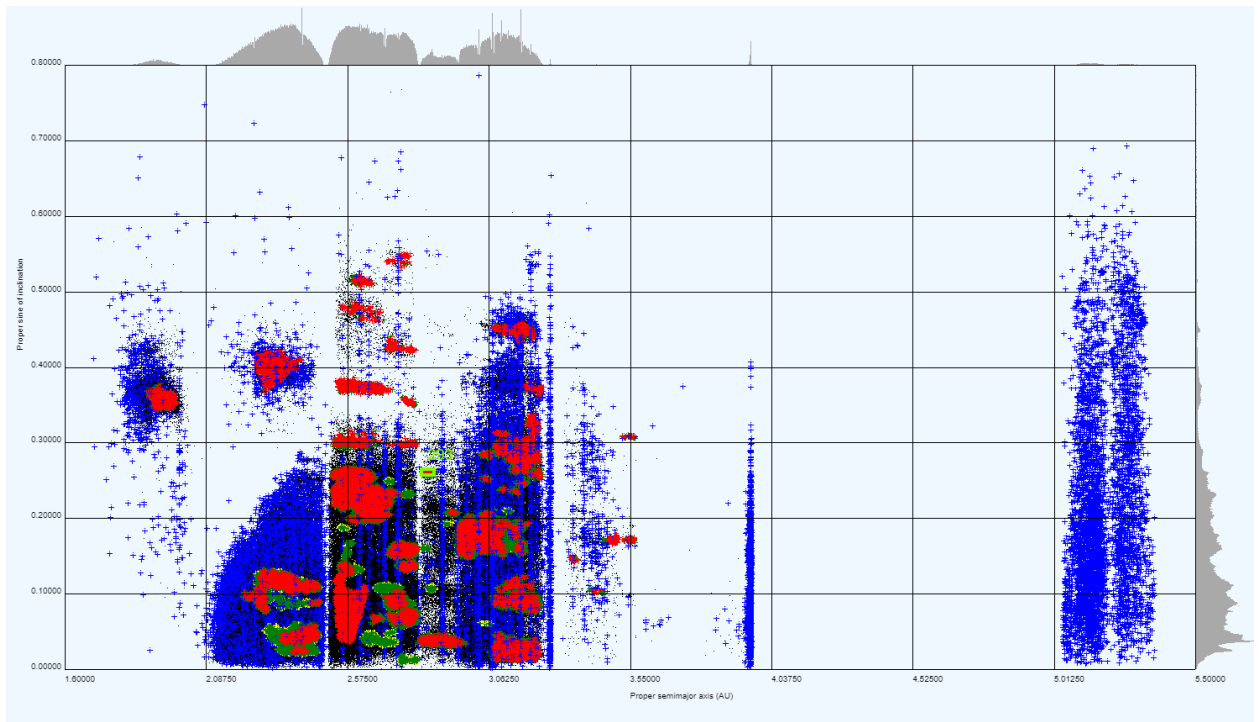


Рис 3.8 Розташування сімейства Brasilia у Головному поясі астероїдів

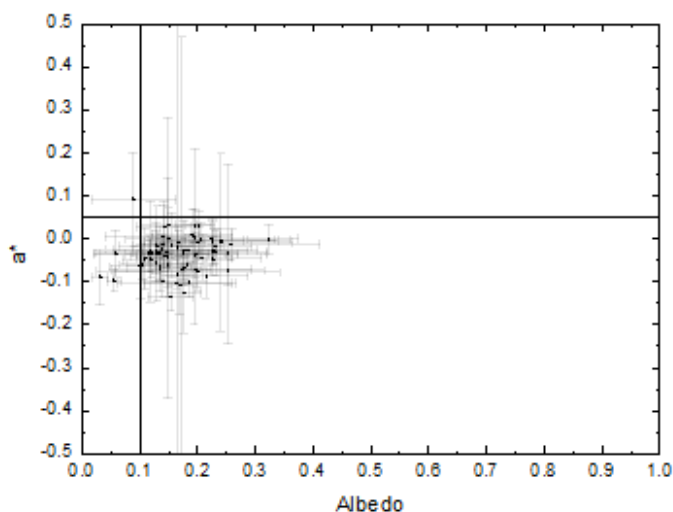


Рис 3.9 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Brasilia у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.5. Апроксимація сімейства астероїдів Chloris

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Chloris віднесено 424 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 80 м/с. Сімейство розташовано у середній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 2,66 – 2,80 а.о., ексцентриситет від 0,23 до 0,26, нахил орбіти від $7,97^\circ$ до $9,53^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 9%.

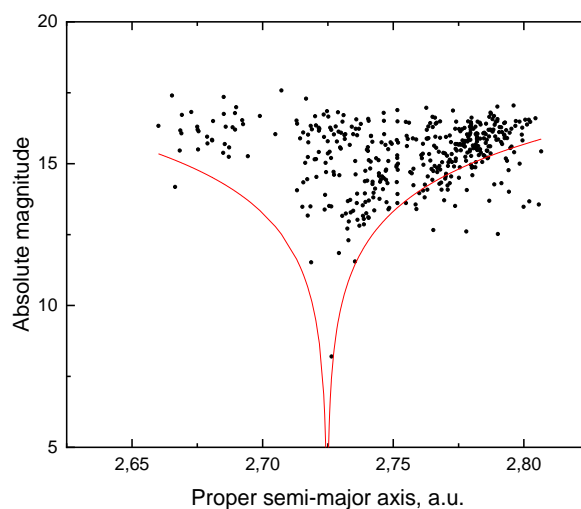


Рис. 3.10 Розподіл астероїдів сімейства Chloris за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

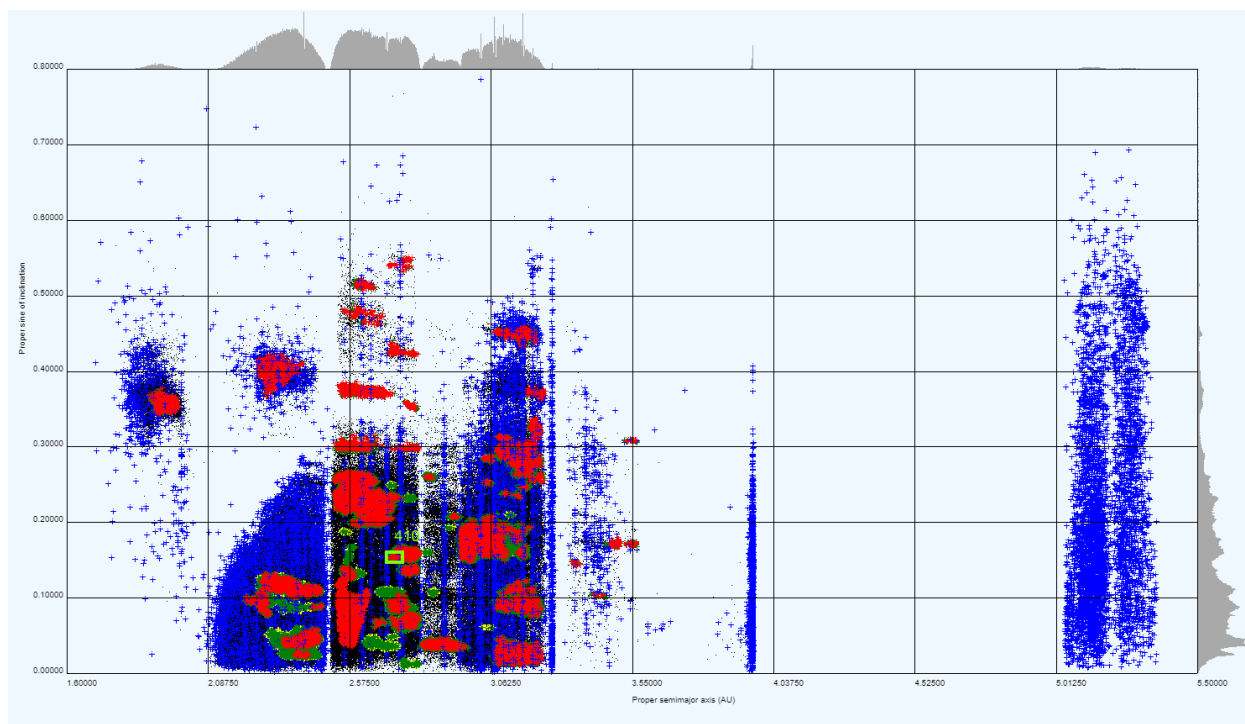


Рис 3.11 Розташування сімейства Chloris у Головному поясі астероїдів

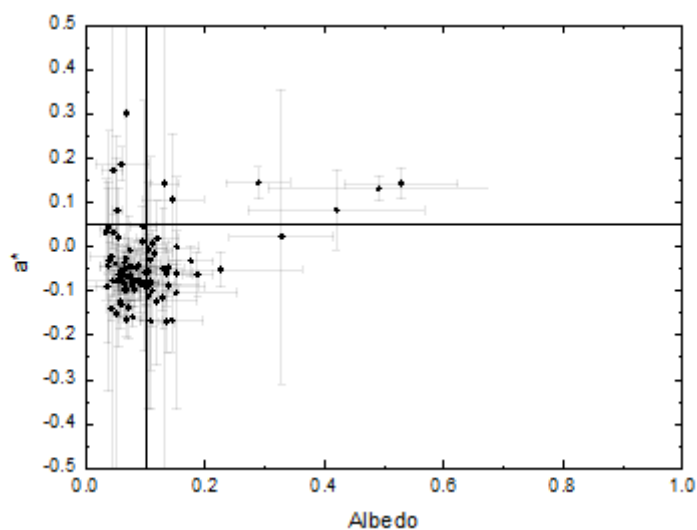


Рис 3.12 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Chloris у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.6. Апроксимація сімейства астероїдів Clarissa

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Clarissa віднесено 179 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 55 м/с. Сімейство розташовано у внутрішній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої

піввісі дорівнює 2,38 – 2,42 а.о., ексцентриситет від 0,10 до 0,11, нахил орбіти від 3,2° до 3,56°. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 8%.

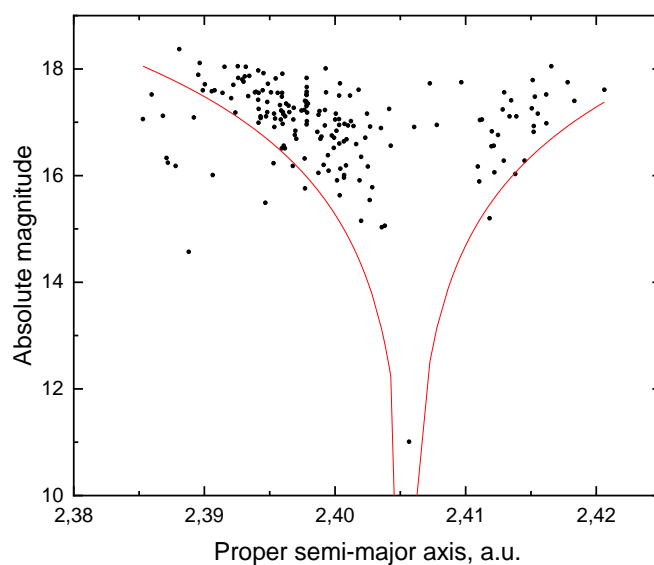


Рис. 3.13 Розподіл астероїдів сімейства Clarissa за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

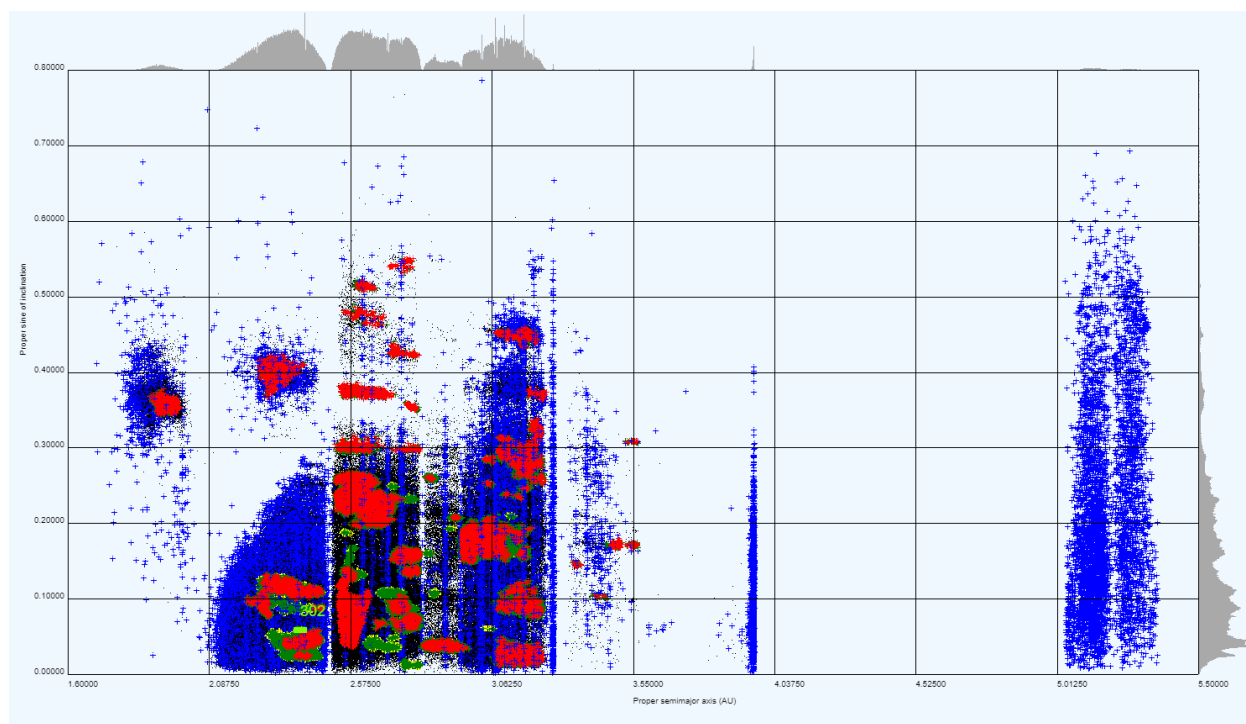


Рис 3.14 Розташування сімейства Clarissa у Головному поясі астероїдів

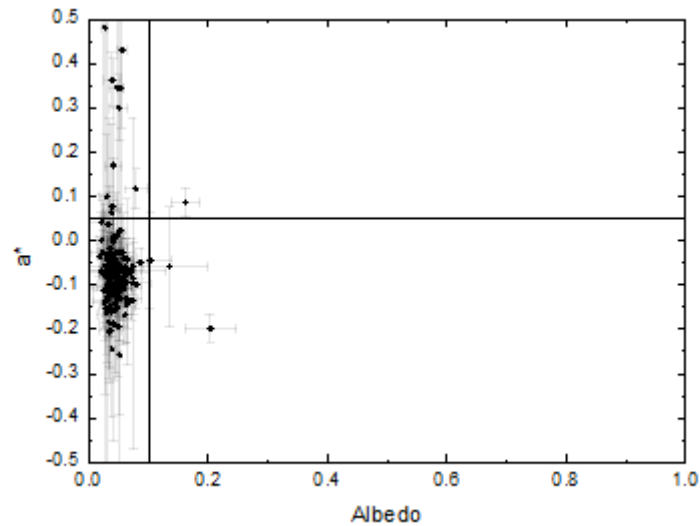


Рис. 3.15 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Clarissa у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.7. Апроксимація сімейства астероїдів Emma

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Emma віднесено 76 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 40 м/с. Сімейство розташовано у зовнішній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 3,02- 3,07 а.о., ексцентриситет від 0,10 до 0,12, нахил орбіти від $8,88^\circ$ до $9,57^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 10%.

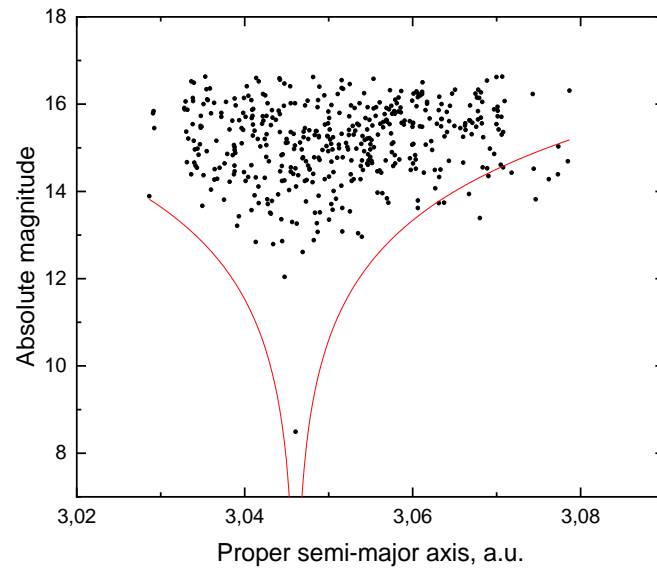


Рис. 3.16 Розподіл астероїдів сімейства Емма за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

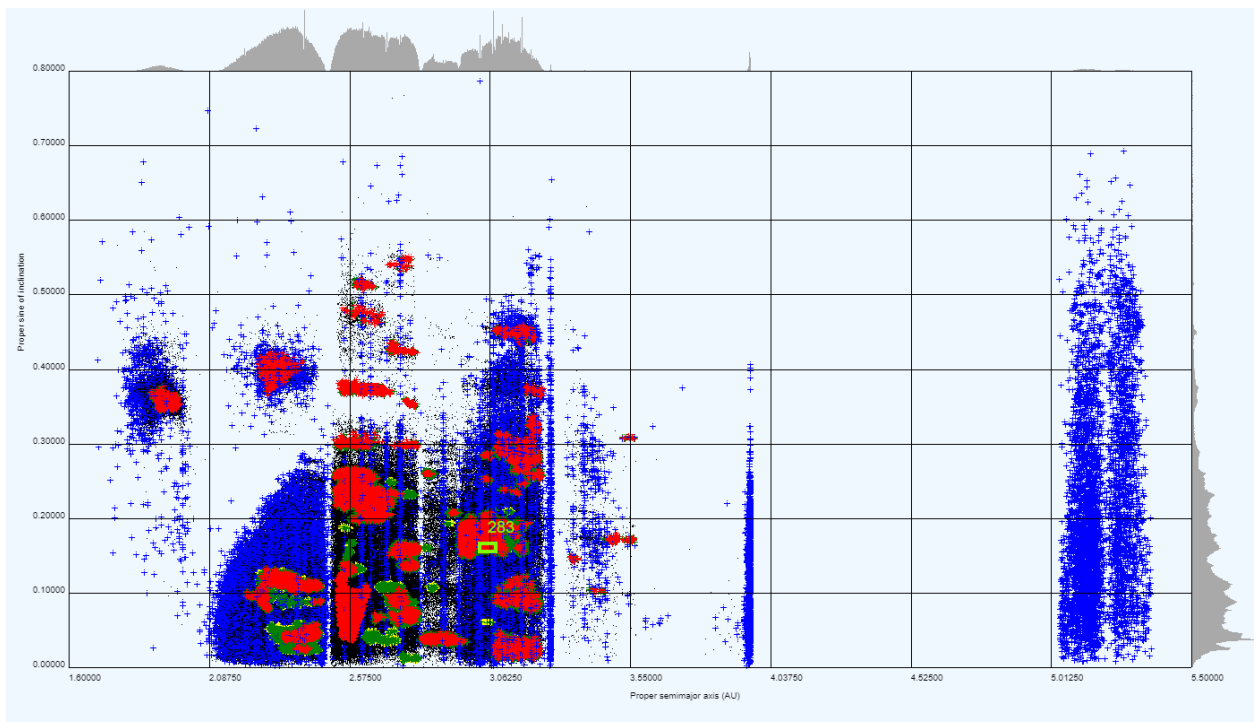


Рис. 3.17 Розташування сімейства Емма у Головному поясі астероїдів

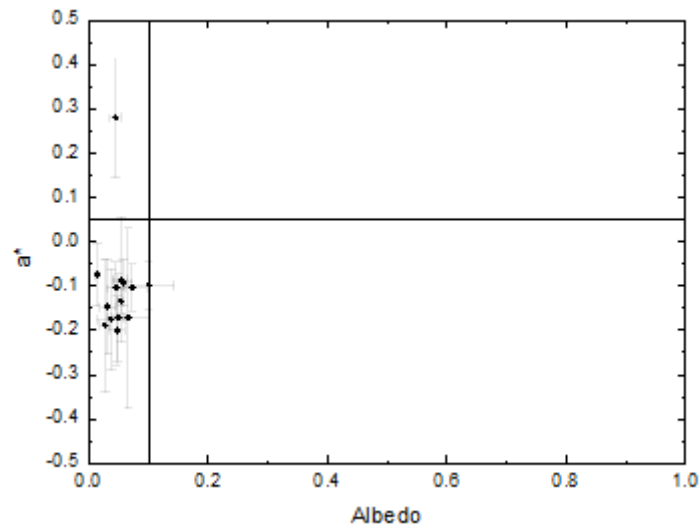


Рис. 3.18 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Емма у просторі
«показник кольору a^* – Альbedo»

3.8. Апроксимація сімейства астероїдів Hilda

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Hilda віднесено 409 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 130 м/с. Сімейство розташовано у Трикутнику Гільди Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 3,9 – 3,96 а.о., ексцентриситет від 0,08 до 0,26, нахил орбіти від 6,82° до 10,32°. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 32%.

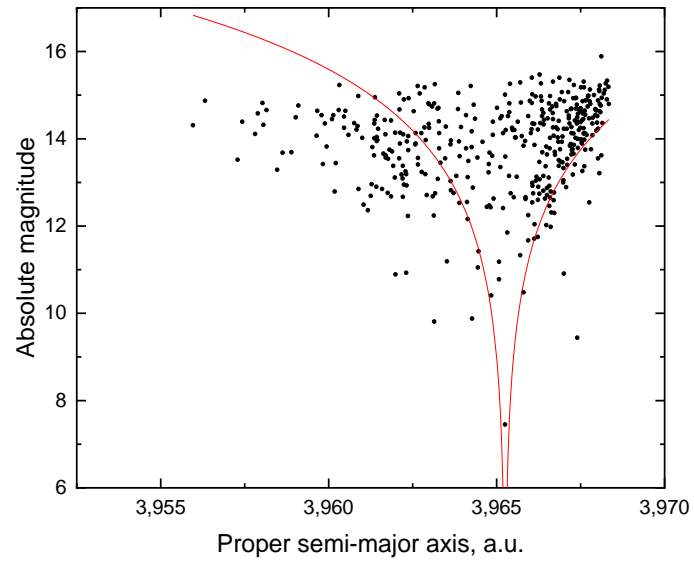


Рис. 3.19 Розподіл астероїдів сімейства Нілда за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

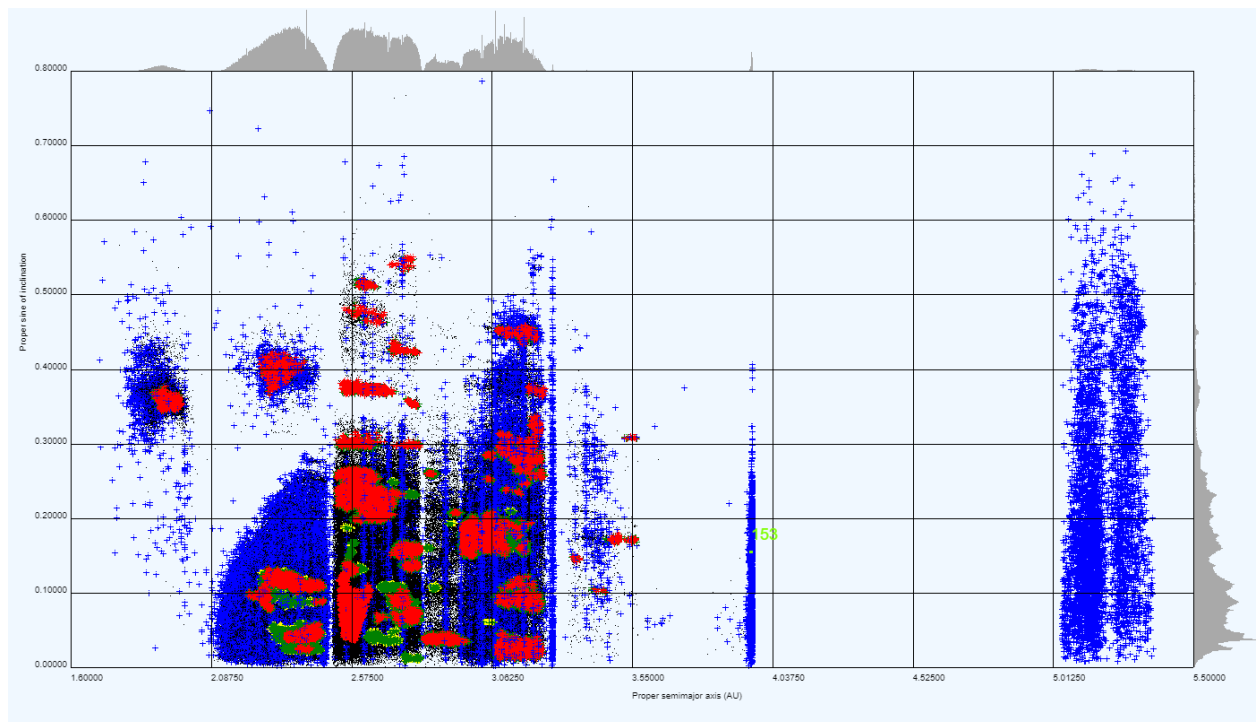


Рис. 3.20 Розташування сімейства Нілда у просторі

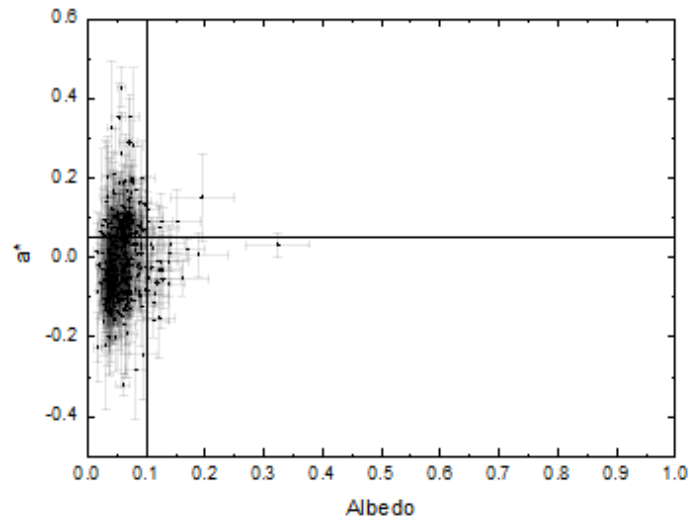


Рис. 3.21 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Nilda у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.9. Апроксимація сімейства астероїдів Erigone

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Erigone віднесено 1776 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 50 м/с. Сімейство розташовано у внутрішній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 2,31 – 2,42 а.о., ексцентриситет від 0,19 до 0,22, нахил орбіти від $4,3^\circ$ до $5,8^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 30%.

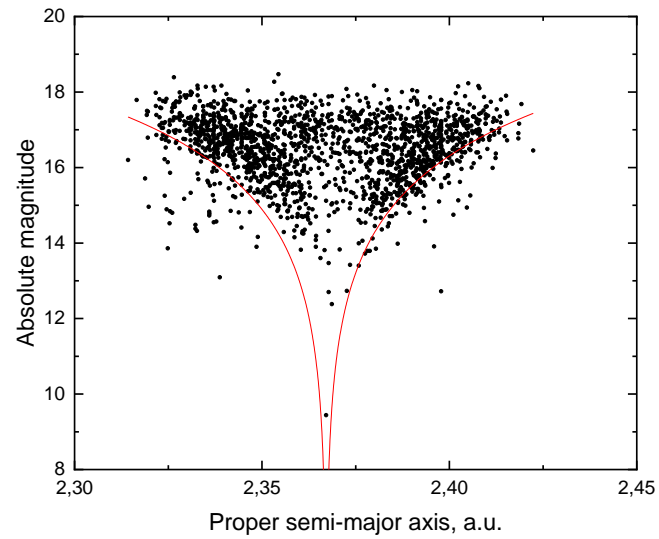


Рис. 3.22 Розподіл астероїдів сімейства Erigone за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

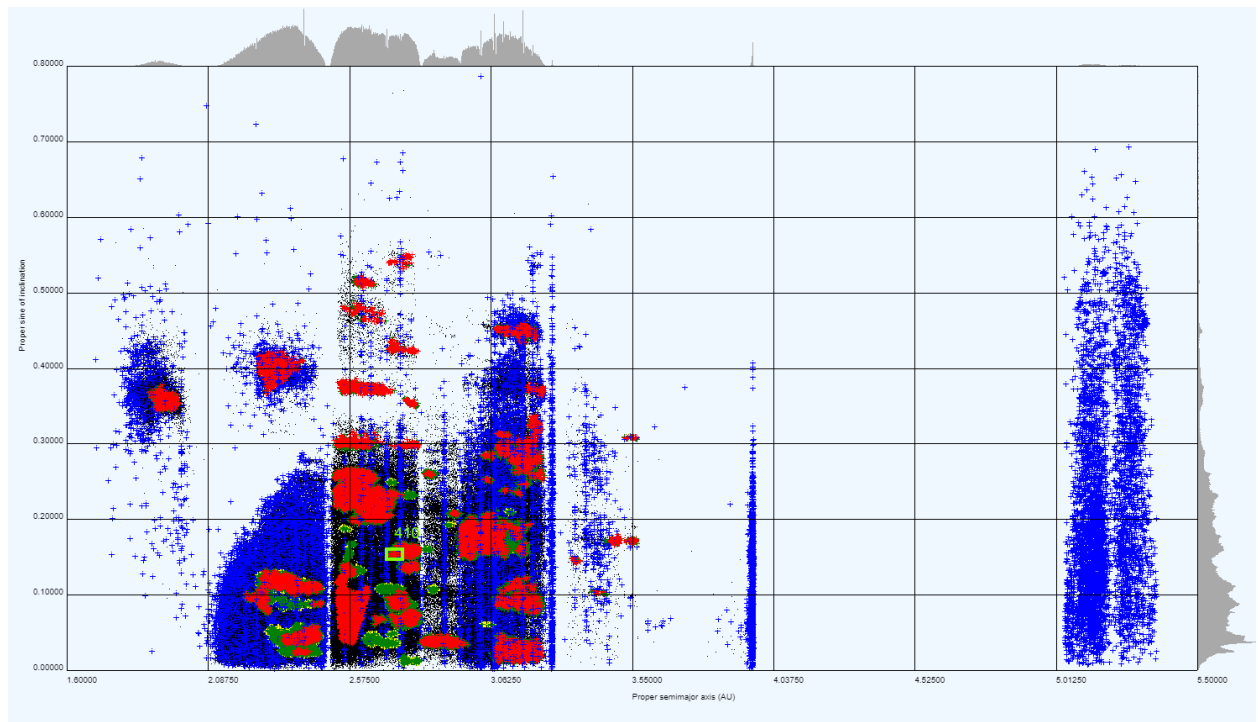


Рис. 3.23 Розташування сімейства Erigone у Головному поясі астероїдів

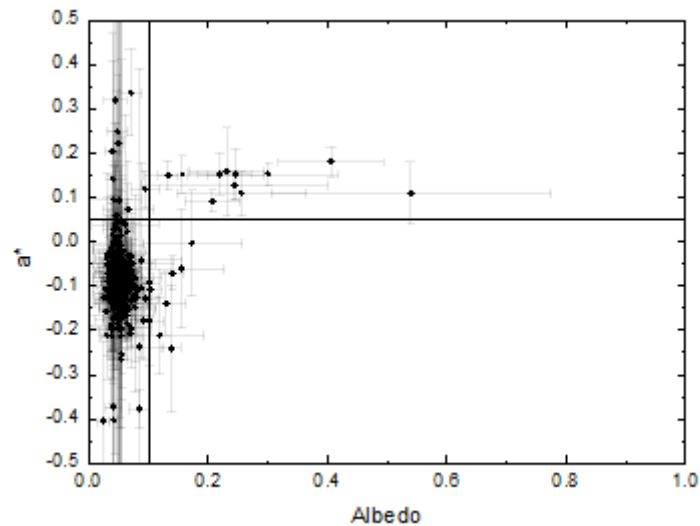


Рис. 3.24 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Erigone у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.10. Апроксимація сімейства астероїдів Karma

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Karma віднесено 124 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 60 м/с. Сімейство розташовано у середній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 2,53 - 2,61 а.о., ексцентриситет від 0,09 до 0,11, нахил орбіти від $10,53^\circ$ до $11,05^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 92%.

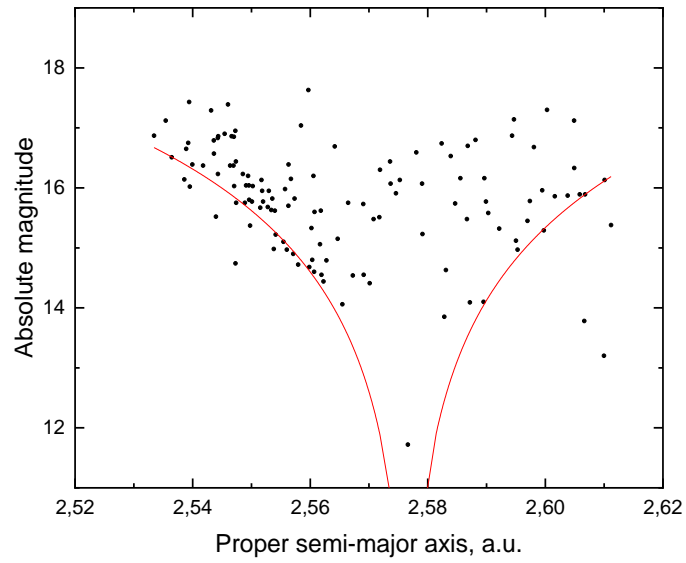


Рис. 3.25 Розподіл астероїдів сімейства Карма за великою піввісю a та абсолютною зоряною величиною H

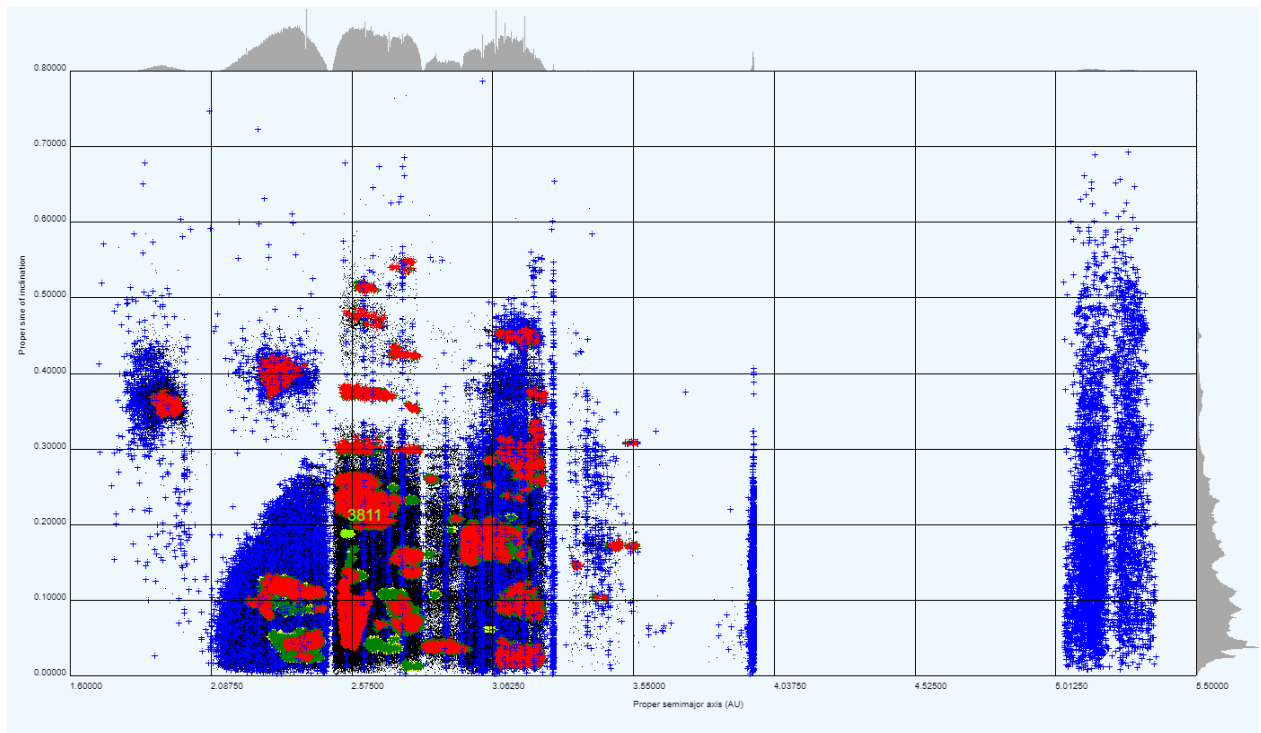


Рис. 3.26 Розташування сімейства Карма у Головному поясі астероїдів

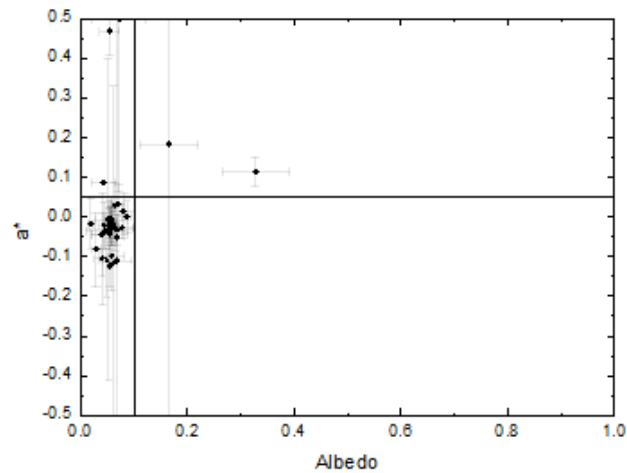


Рис. 3.27 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Корма у просторі «показник кольору a^* – Альbedo»

3.11. Апроксимація сімейства астероїдів Veritas

У каталозі Несворного до сімейства астероїдів Veritas віднесено 1294 членів, гранична швидкість цього сімейства складає 30 м/с. Сімейство розташовано у зовнішній частині Головного поясу астероїдів. Діапазон значень власної великої піввісі дорівнює 3,15 - 3,18 а.о., ексцентриситет від 0,05 до 0,07, нахил орбіти від $8,61^\circ$ до $9,81^\circ$. Доля об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла становить 69%.

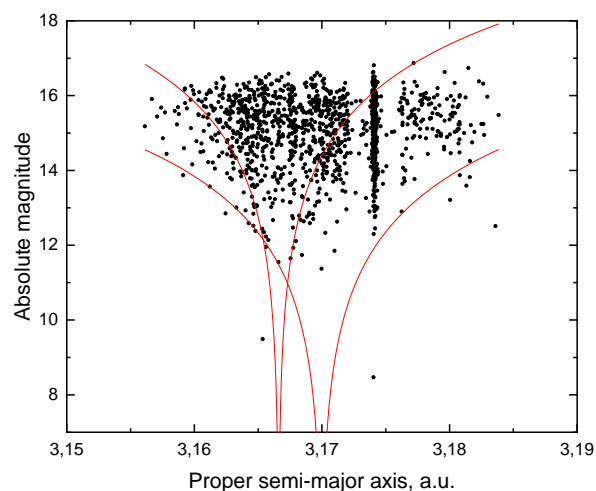


Рис. 3.28 Розподіл астероїдів сімейства Veritas за великою піввіссю a та абсолютною зоряною величиною H

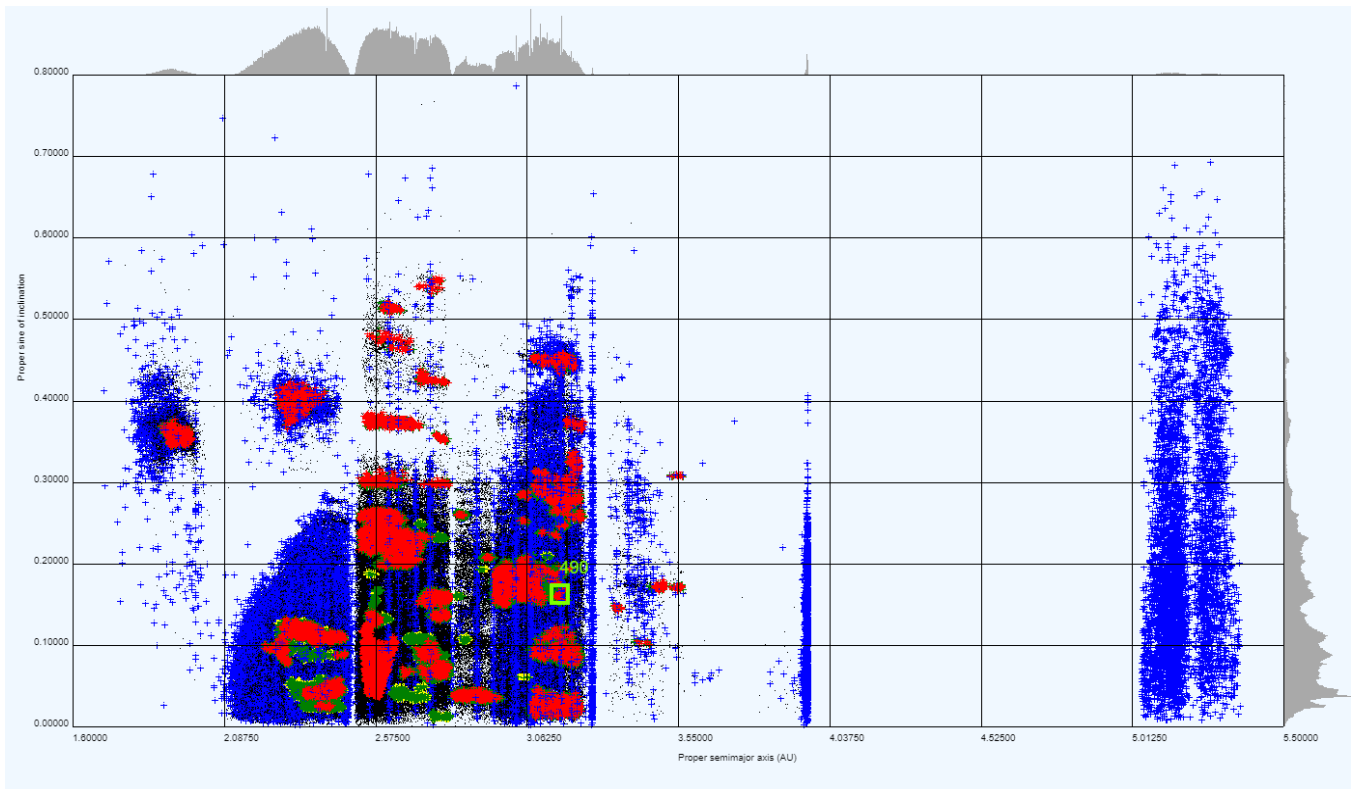


Рис. 3.29 Розташування сімейства Veritas у Головному поясі астероїдів

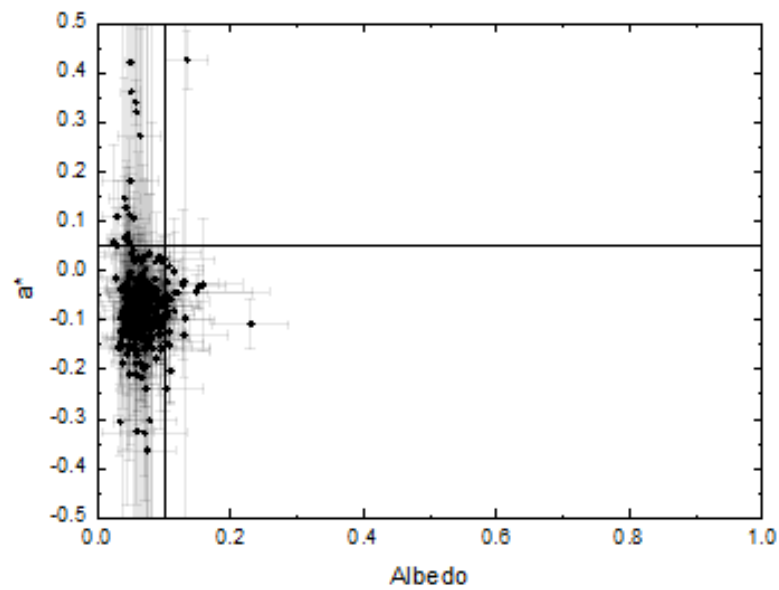


Рис. 3.30 Графік розподілу членів сімейства астероїдів Veritas у просторі
«показник кольору a^* – Альbedo»

3.12. Результати обчислень

Таблиця 3.1

Таблиця отриманих розрахункових даних які обчислювалися в ході роботи

Назви сімейств	C0 (10 ⁻⁵ AU)	C0 [1] (10 ⁻⁵ AU)	Вік (млн років)	Таксономічний тип	Середня густина (г/см ³)	Альbedo	a*	Скорегований вік (млн років)	Доля уламків(%)	Діаметр батьківського тіла (км)
Astrid	1,3	1.2 ± 0.2	45	C	1.41±0.7	0.04	- 0.04	65	60%	50
Barcelona	2,4	2.5 ± 0.5	85	S	2.7±0.7	0.3	0.05	230	36%	32
Brasilia	1,9	2 ± 0.5	70	M	3.8±1.2	0.17	- 0.03	260	108%	36
Chloris	5,5	7.5 ± 2.5	125	C+B	1.41±0.7	0.11	- 0.03	180	9%	3
Clarissa	0.5	0.5 ± 0.1	17	C	1.41±0.7	0.05	- 0.07	25	8%	32
Emma	3	3 ± 1	60	C	1.41±0.7	0.04	- 0.06	80	10%	139
Hilda	0.4	-	15	P	1±0.5	0.06	0.00	15	32%	181
Erigone	1,8	2 ± 0.5	65	C	1.41±0.7	0.06	- 0.03	90	30%	79
Karma	2	2.5 ± 0.5	70	C	1.41±0.7	0.07	- 0.01	100	92%	32
Veritas	4,5	2 ± 1	16	C	1.41±0.7	0.06	- 0.06	22	69%	124
Veritas 2	1,7		60					85		

Висновки до розділу 3

Було досліджено вік десяти сімейств астероїдів, який також було скореговано за допомогою середньої густини сімейств, визначеної за таксономічним типом сімейств, описано методи та наведені формули за допомогою яких це було зроблено. Побудовано графіки із зображенням V-Share результатом чого було отримання константи C, а також наведені зображення розташування обраних сімейств у Головному поясі астероїдів та просторі. Обчислено діаметри членів сімейств що дало

змогу обчислити об'єм батьківського тіла до його руйнування, і на основі цього було обчислено долю об'єму уламків по відношенню до об'єму головного тіла.

Результатом є створена таблиця, в якій наведено всі обчисленні дані для десяти обраних сімейств астероїдів: Astrid, Barcelona, Brasilia, Chloris, Clarissa, Emma, Hilda, Erigone, Karma, Veritas. Наведено результати обчислень віку, скорегованого віку, константи C , значення константи C обчислених Давидом Несворним, такосномічний тип, середню густину, долю уламків і діаметр батьківського тіла для цих обраних десяти сімейств.

ВИСНОВКИ

Визначення віку сімейств астероїдів, має значення для перевірки моделей зіштовхувальної еволюції малих тіл, що в свою чергу важливо для валідації моделей формування і еволюції Сонячної системи.

У даній роботі був розрахований вік, та деякі інші параметри для десяти сімейств, а саме – Astrid, Barcelona, Brasilia, Chloris, Clarissa, Emma, Hilda, Erigone, Karma, Veritas.

Сімейства астероїдів – це групи астероїдів, члени яких мають схожі орбітальні характеристики. Вони утворилися внаслідок катастрофічних зіткнень між астероїдами у минулому. Також у роботі було приділено увагу опису ефекту Ярковського – слабкої сили, яка виникає внаслідок нерівномірного нагрівання (через власне осьове обертання і кінцеву теплопровідність поверхневого шару) малого тіла сонячним випромінюванням, що має важливе значення для розуміння еволюції орбіт малих тіл у Сонячній системі. Ефект Ярковського також може призвести до зіткнення цих тіл із Землею або іншими планетами. Ефект Ярковського має два компоненти:

Добовий ефект діє вздовж траєкторії об'єкта. Він виникає внаслідок того, що денна сторона об'єкта нагрівається сильніше, ніж нічна сторона. Це призводить до того, що денна сторона випромінює більше тепла, ніж нічна сторона. Різниця в імпульсі випромінювання призводить до виникнення сили, яка діє вздовж траєкторії об'єкта у випадку прямого осьового обертання.

Сезонний ефект діє вздовж осі обертання об'єкта. Він виникає внаслідок того, що різні частини об'єкта отримують різну кількість сонячного світла протягом року. Наприклад, північна півкуля астероїда, який обертається навколо Сонця, буде отримувати більше сонячного світла влітку, ніж взимку. Це призводить до того, що північна півкуля буде нагріватися сильніше, ніж південна півкуля. Різниця в температурі між північними та південними півкулями призводить до виникнення сили, яка діє вздовж осі обертання об'єкта.

Побудовано графіки розподілу абсолютних зоряних величин астероїдів, що входять до зазначених 10 сімейств за власною великою піввіссю. Ці розподіли були

апроксимовані за формулами, що описують розходження великої піввісі членів сімейства за рахунок впливу ефекту Ярковського – так звані V-shape.

Отримані константи C добре узгоджуються із значеннями, отриманими у раніше опублікованих роботах. За величиною C був розрахований вік сімейств. Діапазон оцінок віку серед розглянутих 10 сімейств за апроксимацією їх V-shape склав від 15 млн років (сімейство Hilda) до 125 млн років (сімейство Chloris). Із аналізу альbedo та показників кольору членів сімейств було визначено домінуючий таксономічний тип для кожного сімейства. Відповідно до типу було використане середнє значення густини тіл даного типу і скореговано вік, це призвело до збільшення отриманого віку в від 1 до 3,7 разів.

Із використанням середнього альbedo для даного типу оцінку долі об'єму уламків по відношенню до головного тіла та за сукупним об'ємом всіх відомих членів сімейств отримано оцінки розміру батьківського тіла. Можемо зробити висновок, що сімейства із долею уламків менше 50% утворилися при некатастрофічному зіткненні, а сімейства із великою долею (сімейства Astrid, Brasilia, Karma, Veritas) – є наслідком руйнування батьківського тіла при зіткненні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid>
2. Ph. Bendjoya, V. Zappalà, Asteroid Family Identification (2002)
3. Bojan Novaković¹ · David Vokrouhlický² · Federica Spoto³ · David Nesvorný⁴, Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities (2022)
4. Masiero J. R., DeMeo F. E., Kasuga T., and Parker A. H. (2015) Asteroid family physical properties. In Asteroids IV (P. Michel et al., eds.), pp. 323–340. Univ. of Arizona, Tucson, DOI: 10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch017.
5. William F. Bottke Jr., David Vokrouhlický, David P. Rubincam, Miroslav Brož, The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids (2002)
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Yarkovsky_effect
7. Bojan Novaković, David Vokrouhlický, Federica Spoto & David Nesvorný Yarkovsky V-shape identification of asteroid families (2022) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10569-022-10091-7#Sec19>
8. Bryce T. Bolina, Marco Delbo, Alessandro Morbidelli, Kevin J. Walsh Yarkovsky V-shape identification of asteroid families (2016)
9. Zappalà, V., Cellino, A., Farinella, P., Knezevic, Z.: Asteroid families. I: Identification by hierarchical clustering and reliability assessment. AJ 100, 2030 (1990). <https://doi.org/10.1086/115658>
10. Nesvorný, D., Brož, M., Carruba, V.: Identification and dynamical properties of asteroid families. In: Michel, P., DeMeo, F.E., Bottke, W.F. (eds.) Asteroids IV, pp. 297–321. University of Arizona Press, Tucson (2015).
11. ["Nesvorny, D. \(2020\). Nesvorny HCM Asteroid Families V1.0. urn:nasa:pds:ast.nesvorny.families::1.0. NASA Planetary Data System; https://doi.org/10.26033/6cg5-pt13."](https://doi.org/10.26033/6cg5-pt13)
12. Chesley, Steven R.; et al. (2003). ["Direct Detection of the Yarkovsky Effect via Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka" \(PDF\)](#). *Science*. **302** (5651): 1739–1742.

13. An automated procedure for the detection of the Yarkovsky effect and results from the ESA NEO Coordination Centre Marco Fenucci, Marco Micheli, Francesco Gianotto, Laura Faggioli, Dario Oliviero, Andrea Porru, Regina Rudawska, Juan Luis Cano, Luca Conversi and Richard Moissl *A&A*, 682 (2024) A29
14. <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/A+A/682/A29#/browse>
15. Asteroid orbit evolution due to thermal drag David Parry Rubincam/ *Journal of Geophysical Research* (ISSN 0148-0227), vol. 100, no. E1, p. 1585-1594
16. <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/cat/J/A+A/652/A59#/browse>
17. https://sbn.psi.edu/pds/resource/doi/neowise_2.0.html
18. Brož, Miroslav. (2006). Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System. PhD Thesis. Charles University, Faculty of Mathematics and Physics Astronomical Institute
19. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ac1591>