

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

«Допущено до захисту»

Оцінка « відмінно »

Зав. кафедри астрономії та
космічної інформатики
проф. Юрій ШКУРАТОВ

Голова ЕК
проф. Олександра ІВАНОВА



22.05.2025 р.

16.05.2025 р.

Хромюк Олександр Федорович

**Пошук проявів космічного вивітрювання серед сімейств астероїдів
різних таксономічних типів**

Кваліфікаційна робота на здобуття
освітньо-кваліфікаційного рівня
«Магістр» спеціальність
104 «фізика та астрономія»
освітньо-наукова програма
«астрономія та космічна інформатика»



(підпис студента)

Науковий керівник –
доцент кафедри астрономії
і космічної інформатики,
к.ф.-м.н. І.Г.Слюсарев



(підпис керівника)

Харків 2025

АНОТАЦІЯ

Хромюк О.Ф. Пошук проявів космічного вивітрювання серед сімейств астероїдів різних таксономічних типів

Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія». Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2025.

У дипломній роботі проведено аналіз впливу космічного вивітрювання на поверхні астероїдів 24 сімейства різної таксономії (11 сімейств S-типу та 13 C-типу) і віку, за допомогою фотометричних даних з каталогів SDSS MOC4, Gaia та SkyMapper. Для кожного сімейства був розрахований вік за апроксимацією V-shape у просторі «велика піввісь – абсолютна зоряна величина». Прояви вивітрювання оцінювались за допомогою параметра a^* , який характеризує нахил спектру. Знайдені кореляційні залежності між параметром a^* і логарифмом віку для сімейств S-типу та C-типу. Ці залежності показують різних характер зміни нахилу спектру із віком для астероїдів різної таксономії: У сімейств C-типу параметр a^* зменшується з віком, а у сімейств S-типу навпаки-збільшується.

Ключові слова: космічне вивітрювання, V-shape, a^* , показник кольору, таксономія, астероїдні сімейства, SDSS, Gaia, SkyMapper.

ABSTRACT

Khromiuk O.F. Search for manifestations of space weathering among families of asteroids of different taxonomic types.

Thesis for the degree of Higher Education "master's degree" in specialty 104 "Physics and astronomy". V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2025.

This thesis analyzes the impact of space weathering on the surfaces of 24 families of asteroids of different taxonomy (11 S-type and 13 C-type families) and age, using photometric data from the SDSS MOC4, Gaia, and SkyMapper catalogs. For each family, the age was calculated using the V-shape approximation in the space "major axis - absolute stellar magnitude". The manifestations of weathering were estimated using the parameter a^* , which characterizes the slope of the spectrum. We found correlations between the a^* parameter and the logarithm of age for the S-type and C-type families. These dependences show different changes in the spectral slope with age for asteroids of different taxonomies: For C-type families, the parameter a^* decreases with age, while for S-type families, on the contrary, it increases.

Keywords: space weathering, V-shape, a^* parameter, color index, taxonomy, asteroid families, SDSS, Gaia, SkyMapper.

Зміст

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. КОСМІЧНЕ ВИВІТРЮВАННЯ НА МІСЯЦІ, АСТЕРОЇДАХ І В ЛАБОРАТОРІЇ	6
1.1 Космічне вивітрювання на Місяці	7
1.2. Прояви космічного вивітрювання на астероїдах	10
1.3. Лабораторні дослідження	11
1.4. Постановка задачі	15
РОЗДІЛ 2. ДАНІ ТА МЕТОДИКА.	22
2.1. Використані каталоги	23
2.2. Каталог сімейств Несворного	25
2.3. Показники кольору та обчислення параметра a^*	26
2.4. Побудова V-share	27
2.5. Формула оцінки віку	30
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОЗРАХОВАНИХ ДАНИХ	33
3.1 Порівняння з роботою Nesvorný et al. (2005)	33
3.2. Залежність a^* від віку у S-типах	34
3.3. Залежність a^* від віку у C-типах	37
3.3. Порівняння з попередніми дослідженнями	38
ВИСНОВКИ	40
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	42

ВСТУП

Астероїди- безатмосферні небесні тіла, поверхні яких піддаються впливу факторів відкритого космічного простору, таких як сонячне випромінювання, заряджені частинки, мікрометеоритне бомбардування тощо. Сукупність фізико-хімічних змін, що відбуваються під дією цих чинників, називають космічним вивітрюванням. Найдослідженішим об'єктом на якому вивчались процеси космічного вивітрювання є Місяць, де космічне вивітрювання досліджувалося як експериментально (завдяки зразкам, доставленим місяцями "Аполлон"), так і теоретично. Саме на місячному ґрунті вперше було зафіксовано прояви цього явища, а згодом розроблено фізико-хімічні моделі, що пояснюють зміну властивостей поверхні реголіту під впливом зовнішніх чинників. Незважаючи на схожі умови космічного середовища, в яких перебувають астероїди, можливість систематичного дослідження процесів космічного вивітрювання з'явилася лише в останнє десятиліття — завдяки розвитку фотометричних оглядів, спектроскопічних методів і доставці перших зразків астероїдної речовини на Землю. Проте досі залишається невирішеною проблема узгодження темпів вивітрювання, що впливають із даних про місячний реголіт, лабораторних досліджень метеоритів та фотометричних спостережень астероїдів. Одним із перспективних підходів до вивчення цього явища є аналіз астероїдних сімейств. Астероїдне сімейство — це група тіл, що мають спільне походження, близький вік та подібні фізичні властивості. Це робить їх ідеальними об'єктами для дослідження накопичення ефектів космічного вивітрювання з часом. Саме тому в даній роботі основну увагу зосереджено на вивченні проявами космічного вивітрювання у астероїдних сімейств різної таксономії та різного віку.

Актуальність. Протягом останніх років обсяг і якість даних фотометричних спостережень астероїдів суттєво зросли. Зокрема, переобробки каталогів SDSS , SkyMapper та Gaia, виконані Сергєєвим,

забезпечили більш точні та однорідні фотометричні вимірювання, а також охопили більшу кількість об'єктів. Це створило нові умови для високоточних статистичних досліджень еволюції астероїдних поверхонь. Крім того, доставлені зразки астероїдної речовини місіями Hayabusa 1 та 2 та OSIRIS-REx значно розширили можливості для лабораторного вивчення фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхнях астероїдів. Однак, оскільки в даний час ми не маємо доступу до лабораторних умов для дослідження астероїдних зразків, ми зосереджуємося на аналізі даних з фотометричних каталогів. Таким чином, ми використовуємо доступні спостереження для вивчення впливу космічного вивітрювання на астероїди, опрацьовуючи великі обсяги даних з різних джерел для більш повного та систематичного аналізу. Цей підхід дозволяє поєднати дистанційне спостереження з теоретичними моделями і отримати більш глибоке розуміння того, як космічне вивітрювання впливає на астероїди різних таксономічних типів та різного віку.

Метою роботи є дослідження впливу космічного вивітрювання на поверхні астероїдів сімейств C та S-типів різного віку.

Згідно до мети, були сформовані наступні задачі:

1. Відбір 24 астероїдних сімейства (11 S-типу та 13 C-типу) для аналізу.
2. Побудова V-shape для обраних сімейств та розрахунок їх віку.
3. Вибір показників кольору, які чутливі до проявів вивітрювання (глибина смуги поглинання 0.9 мкм, нахил спектру).
4. Співставлення показників кольору чотирьох обраних фотометричних каталогів з членами обраних сімейств.
5. Оцінка кореляції середніх значень обраних показників кольору досліджуваних сімейств із їх віком.

Об'єктами дослідження є астероїдні сімейства C та S-типів, зокрема 11 сімейств S-типу (Agnia, Barcelona, Eunomia, Gefion, Iannini, Karin, Koronis, Maria, Massalia, Merxia, Rafita) та 13 сімейств C-типу (Adeona, Astrid, Dora,

Erigone, Euphrosyne, Hoffmeister, Hygiea, Misa, Naema, Nemesis, Themis, Ursula, Veritas).

Предмет дослідження: фотометричні прояви космічного вивітрювання у астероїдних сімействах різного віку.

Метод дослідження: V-shape-аналіз для визначення віку сімейств, статистичний аналіз фотометричних параметрів (зокрема a^*) за даними ширококутних оглядів.

РОЗДІЛ 1. КОСМІЧНЕ ВИВІТРЮВАННЯ НА МІСЯЦІ, АСТЕРОЇДАХ І В ЛАБОРАТОРІЇ

1.1 Космічне вивітрювання на Місяці

Космічне вивітрювання (англ. space weathering) — це сукупність фізико-хімічних процесів, які змінюють властивості поверхні безатмосферних тіл під дією навколишнього космічного середовища. Найбільш дослідженими факторами, що спричиняють ці зміни, є бомбардування мікрометеоритами та дія сонячного вітру. Ці процеси з часом значно змінюють спектральні, хімічні та морфологічні характеристики поверхонь астероїдів, супутників та інших малих тіл Сонячної системи. Треба зауважити, що космічне вивітрювання може впливати на поверхні усіх безатмосферних тіл, однак механізми цього вивітрювання будуть дещо відрізнятись. [7,30].

Дослідження процесів космічного вивітрювання почалися із вивчення найближчого до Землі безатмосферного тіла- Місяця. Він протягом довгого проміжку часу був єдиним об'єктом, який давав змогу проаналізувати спектральні зміни поверхні реголіту під впливом різних чинників. Під час програми “Аполлон” на землю було доставлено багато зразків місячного ґрунту, які дозволили порівняти спостережні результати вивчення спектрів поверхні місяця з отриманими у лабораторіях(Рис.1.). Також було виявлено, що спостережні спектри є більш “червоними” та демонструють зниження альbedo в окремих місцях поверхні, порівняно недоторканими зразками. Ці відмінності були пояснені впливом сонячного вітру та мікрометеаритним бомбардуванням окремих ділянок Місяця [12,30].Протягом наступних десятиліть, завдяки роботам Нарке [12]та Шарман [7], було систематизовано фізико-хімічні механізми цих змін та вплив їх на інтерпретацію спектрів астероїдів та місячних порід.

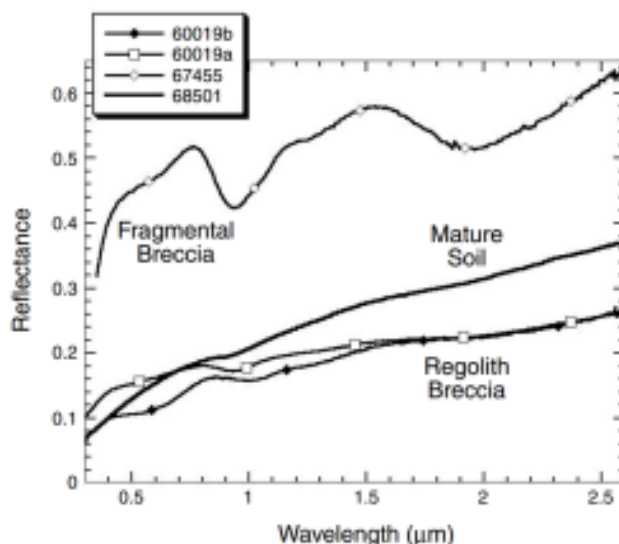


Рис.1. Спектри місячних зразків, що було доставлені "Аполлоном-16". Зрілий зразок (68501) має більш слабкі смуги поглинання на 1 та 2 мкм, та має краще відбиття при більших довжинах хвиль. [13].

Одним із ключових ефектів космічного вивітрювання є спектральне почервоніння — тобто зростання нахилу спектра у видимій та ближній інфрачервоній ділянках. У результаті цього тіло виглядає червонішим, ніж було у первинному, «свіжому» стані.

Дослідження спектральних властивостей показують, що космічне вивітрювання також зменшує глибину смуг поглинання, що свідчить про зміну кристалічної структури мінералів. Також воно проявляється і в «потменінні» поверхні- зменшенні альbedo за рахунок космічного вивітрювання. Вперше його зафіксували на поверхні Місяця, коли зразки реголіту, які привіз «Аполлон», мали нижчу відбивну здатність, ніж очікувалось. Це потемніння пов'язали з наявністю нанофазного заліза (Рис.2.), яке утворилось на поверхні в наслідок дії сонячного вітру та мікрометеоритного бомбардування. Воно значно поглинає світло, що й призводить до загального зниження альbedo.

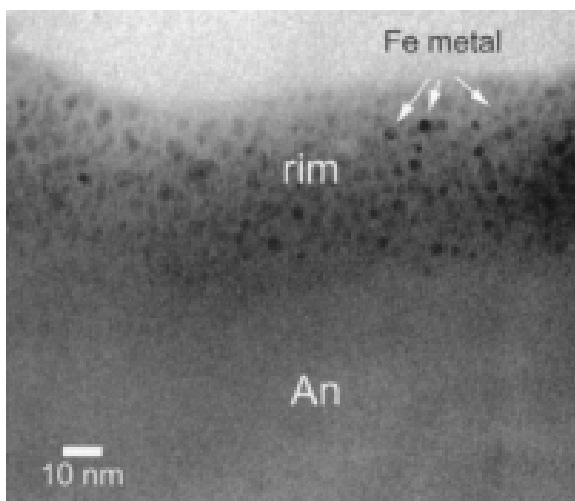


Рис.2. Зображення частинок нанофазного заліза, отриманих методом електронної мікроскопії[13].

Таким чином, космічне вивітрювання є ключовим фактором, який необхідно враховувати при зіставленні спектральних даних різних безатмосферних об'єктів.

Фізичні та хімічні механізми місячного типу вивітрювання:

1. Мікрометеоритне бомбардування.
Енергія удару мікрометеорита спричиняє локальне плавлення й випаровування мінералів, внаслідок чого утворюються тонкі аморфні оболонки та сферули нанофазного заліза (npFe^0). Ці зміни призводять до спектрального почервоніння і зниження альbedo [34]. Розплав призводить до утворення склоподібних агрегатів (аглотинатів). Конденсація парів мінералів на сусідніх частинках формує тонкий темний шар, який затемнює поверхню.
2. Імплантація іонів сонячного вітру.
Протони та інші заряджені частинки проникають у поверхневий шар реголіту, створюючи дефекти в кристалічній решітці та хімічну редукцію, що також веде до утворення npFe^0 і спектральних змін [27].
3. Аморфізація.
Під дією високої енергії ударів та радіації мінерали втрачують

кристалічний порядок, переходячи в аморфний стан. Аморфна структура має відмінні спектральні властивості від кристалічної [19].

4. Ультрафіолетове опромінення.

УФ-промені Сонця викликають фотоліз та руйнування органічних і мінеральних сполук, що змінює спектральні смуги поглинання в діапазоні 150–450 нм[14].

Космічне вивітрювання не лише впливає на колір і спектр, а й є цінним індикатором віку поверхні. Молоді кратери на Місяці чи астероїдах мають більш «свіжу» спектральну сигнатуру. Саме на цьому принципі базується частина вікових оцінок для астероїдних сімейств — зокрема, порівняння кольору (індексу a^* або $g-r$) для молодших і старших об'єктів [37].

1.2. Прояви космічного вивітрювання на астероїдах

На основі місячної моделі в подальшому була сформульована концепція “дозрівання” реголіту, яка стала основою для аналізу спектральних змін поверхонь усіх безатмосферних тіл. Особливу увагу було приділено спостереженням астероїдів S-типу, спектри яких демонстрували ознаки “зрілості” поверхонь. При цьому виявлялася систематична різниця між спектрами S-типу та спектрами хондритів, яка довгий час вважалась наслідком різного складу. Проте результати місії Hayabusa 1, яка доставила зразки з астероїду Itokawa, показали, що спектральні характеристики реголіту можуть відрізнитись за рахунок космічного вивітрювання, й таким чином було пояснено розбіжність між спектрами хондритів і астероїдів S-типу [28].

Такі самі ефекти спостерігались і у астероїдів Q-типу, що в свою чергу демонструють “свіжий” спектр, який схожий на хондритовий, що може вказувати на нещодавне “оновлення” поверхні, через можливе зіткнення чи зближення із планетами[4]. Вивчення ж спектрів астероїдів C-типу теж свідчили про певні прояви космічного вивітрювання, але на відміну від інших типів, тут вони були менш помітними у видимому , та більш помітні у

ближньому інфрачервоному або ультрафіолетовому діапазоні [20]. Місія OSIRIS-REX продовжила цю лінію досліджень, де випадку з Bennu було також виявлено спектральну неоднорідність між “свіжими” та більш “старими” ділянками поверхні[21]. Усі місії відіграли особливу роль у підтвердженні існування космічного вивітрювання, повернувши зразки на Землю: Hayabusa1 (астероїд Itokawa) (Рис.3.), Hayabusa2 (Ryugu), OSIRIS-REx (Bennu) та Arolo (Місяць). Аналіз цих зразків продемонстрував наявність нанофазного заліза, аморфних оболонок та спектральні зміни поверхні.

Треба зазначити, що прояв космічного вивітрювання має місце лише на поверхні безатмосферного тіла, що суттєво ускладнює порівняння спектрів астероїдів з метеоритами, адже метеорити, що падають на Землю, коли проходять через атмосферу Землі, втрачають свій поверхневий шар. [12].

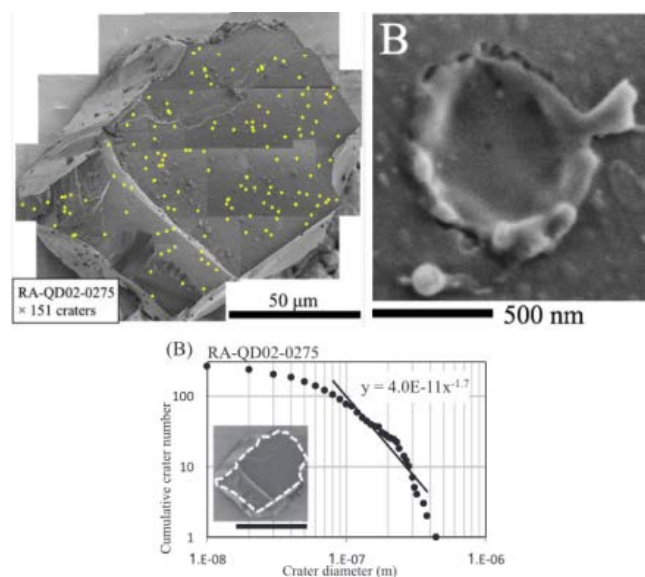


Рис.3. Електронна мікрофотографія частинки олівіну із астероїда Ітокава (RA-QD02-0275). Жовті точки відповідають положенню кратерів субмікрометрового розміру [23].

1.3. Лабораторні дослідження

Накопичення та взаємодія усіх перелічених фізико-хімічних процесів на поверхнях Місяця та астероїдів формують унікальні мікроструктури й змінюють оптичні характеристики поверхні. Для того, щоб кількісно оцінити ступінь та швидкість космічного вивітрювання, необхідно застосувати поєднання лабораторних і дистанційних підходів. Зокрема, спектроскопічні та фотометричні спостереження із наземних телескопів дозволяють відстежувати почервоніння та потемніння (зниження альbedo) спектра, а також зміну глибини смуг поглинання на великих вибірках астероїдів [18,37]. Нижче наведено основні методи, що дозволяють виявити й дослідити сліди цих механізмів на різних масштабах — від нанометрів до кілометрів:

1. Електронна мікроскопія. Дозволяє дослідити аморфні оболонки, наночастинки заліза й структуру аглютинатів.
2. Спектроскопія видимого і ближнього ІЧ-діапазону. Використовується для визначення нахилу спектра, глибини смуг поглинання та альbedo.
3. Лабораторні експерименти. Лазерне опромінення або іонне бомбардування зразків реголіту і метеоритів імітує вивітрювання.
4. Аналіз зразків місій з поверненням (Hayabusa 1/2, OSIRIS-REx, Apollo). Надійне підтвердження наявності npFe^0 , аморфних оболонок та аглютинатів [15,28].

В подальшому за допомогою лабораторних досліджень висновки щодо космічного вивітрювання астероїдів були підтверджені, зокрема за рахунок його моделювання за допомогою іонного бомбардування та лазерного опромінення. Ці методи призводили до спектральних змін зразків, аналогічних тим, які спостерігались на Місяці, а саме до зниження відбивної здатності, зменшення глибин смуг поглинання та збільшення спектрального нахилу(Рис.4.) [27,34].

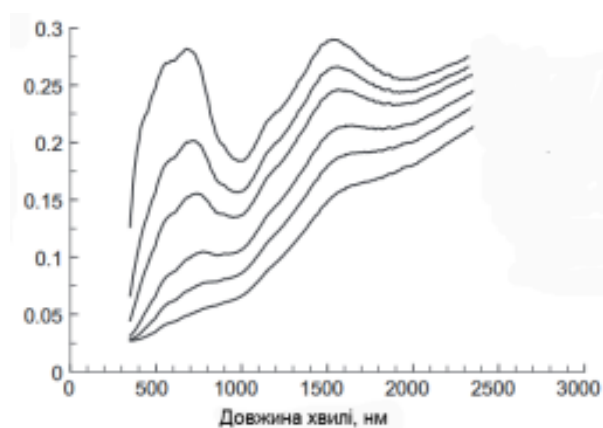


Рис.4. Трансформація спектру відбиття LL6 хондрита Вавіловка зв сrostанням ступеня зрілості: найменш зрілий у верхній частині, найбільш-нижній.

Для прямого спостереження за ефектами космічного вивітрювання на силікатних мінералах використовуються також експерименти з іонним опроміненням порошків у вакуумі. В роботі Jaramillo-Correa et al. було проведено моделювали вплив сонячного вітру на зразки олівину, опромінюючи їх іонами гелію з енергією 1,2 кеВ. Вимірювання проводили в ультрафіолетовому (UV), видимому (Vis) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах.

Одним із найочевидніших наслідків іонного опромінення є потемніння спектра відбивання. На Рис.5. показано зниження абсолютної відбивної здатності олівінового порошку у видимому діапазоні зі зростанням флюенсу. Це пояснюється утворенням нанофазного заліза (npFe^0), яке сильно поглинає світло.

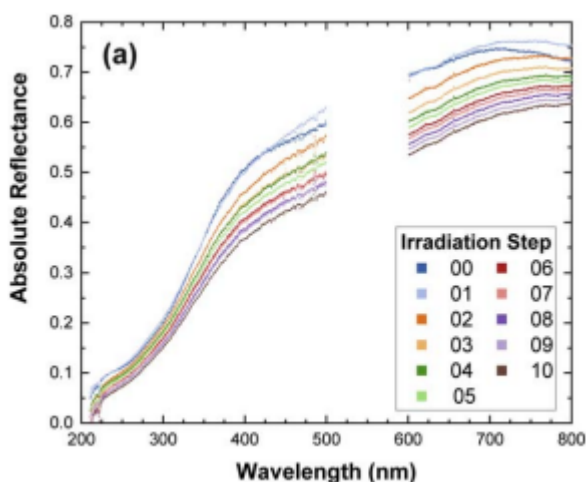


Рис.5. Зміна спектральних характеристик порошку олівину (<25 мкм) під впливом опромінення іонами гелію з енергією 1,2 кеВ, зниження абсолютної відбивної здатності олівину у видимому діапазоні внаслідок зростання флюенсу опромінення іонами гелію [17].

Флюенс — це кількість іонів, що припадає на одиницю площі поверхні зразка (ions/cm^2). Він є аналогом дози опромінення й дозволяє оцінювати кумулятивні ефекти, що відповідають різним ступеням «старіння» поверхні.

Ще одним характерним ефектом є спектральне червоніння, яке проявляється у зростанні нахилу спектра в ближньому ІЧ. Як видно з Рис.6., ухил спектра в діапазоні 700–2000 нм поступово зростає з флюенсом, що узгоджується з моделями накопичення наночастинок Fe^0 у реголіті. На графіку також наведено порівняння з попередніми даними для іншої енергії іонів та більшого розміру зерен.

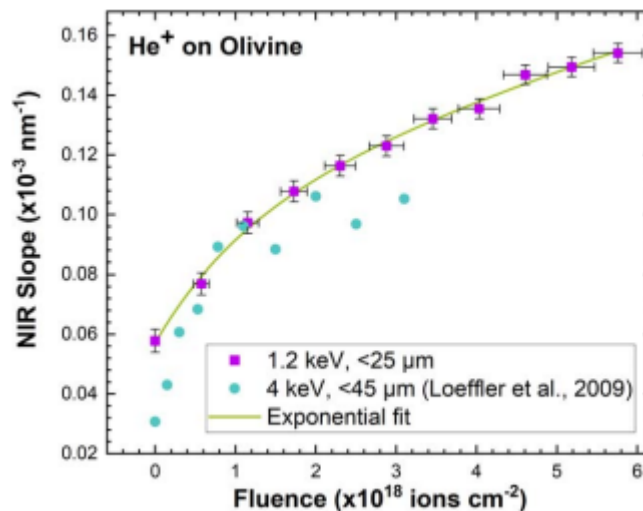


Рис.6. Нахил спектрів відбиття Vis-NIR опроміненого іонами порошку олівину. Нахили відповідають нахилу прямої лінії між значеннями відбиття при 700 і 2000 нм. Фіолетові квадрати відповідають порошку олівину <25 мкм, опроміненому іонами гелію з енергією 1,2 кеВ [17].

Цікаво, що у ультрафіолетовому діапазоні спостерігається протилежний ефект — ухил спектра зменшується, що свідчить про так зване «посиніння» (Рис. 7.). Таке розходження між поведінкою спектра в UV та NIR діапазонах є типовим для ефектів космічного вивітрювання, які по-різному змінюють структуру поверхні та типи оптичного поглинання.

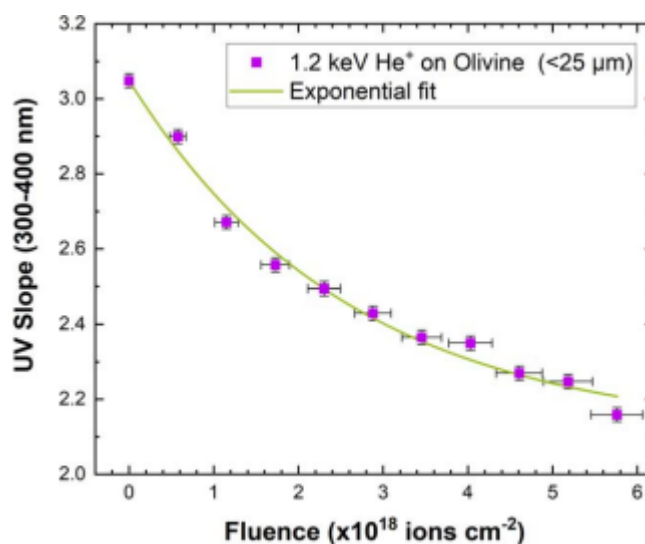


Рис.7. Зміна нахилу спектра в ультрафіолетовому діапазоні (300–400 нм) у процесі опромінення олівінового порошку іонами гелію [17].

Крім зміни ухилу спектра, іонне опромінення впливає також на глибину характерної абсорбційної смуги на 1,05 мкм, яка асоціюється з наявністю Fe^{2+} в кристалічній решітці олівіну. На Рис. 8. показано, що площа цієї смуги поступово зменшується зі зростанням флюенсу, що свідчить про деградацію кристалічної структури мінералу.

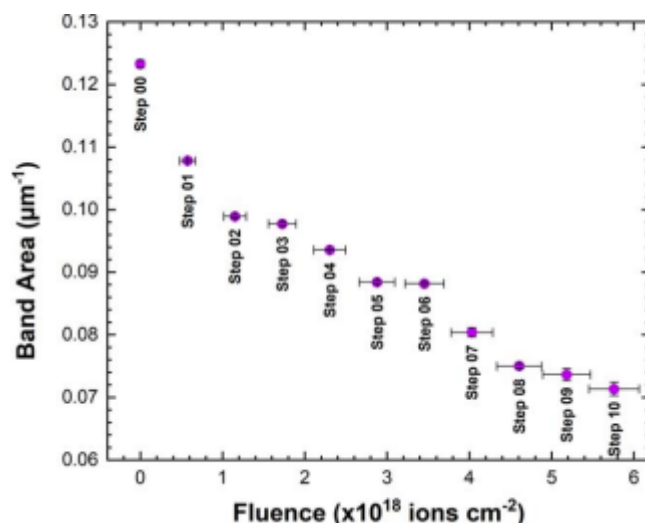


Рис.8. Еволюція площі смуги поглинання на 1050 нм у спектрі відбивання олівіну залежно від флюенсу іонного опромінення [17].

Таким чином, лабораторні моделі демонструють ті самі спектральні ефекти, які спостерігаються на поверхнях астероїдів: потемніння, червоніння, зменшення глибини абсорбційних смуг, а також специфічні зміни нахилу спектра в UV і NIR діапазонах. Це підтверджує зв'язок між фотометричними параметрами астероїдів і ступенем їхнього космічного вивітрювання.

Здобутий за допомогою спостережень та лабораторного аналізу набір даних свідчить про те, що процес космічного вивітрювання, який призводить до спектральних змін поверхні, є універсальним для більшості безатмосферних тіл у Сонячній системі. Спектральні особливості цих змін можна інтерпретувати як індикатор віку та поверхневої еволюції малих тіл.

1.4. Постановка задачі

Протягом тривалого часу каталог SDSS MOC-4 залишався основним джерелом фотометричних даних для досліджень астероїдів. Проте за останні роки ситуація суттєво змінилася: з'явилися нові великі огляди, зокрема SkyMapper та Gaia, які охоплюють значну кількість об'єктів. Крім того, було здійснено переобробку фотометричних каталогів SDSS, Gaia та SkyMapper, виконану Сергєєвим, що забезпечило кращу однорідність та точність отриманих даних. У результаті, було отримано значно повніші й якісніші фотометричні бази даних, що відкривають нові можливості для вивчення фізичних властивостей астероїдів, зокрема в межах астероїдних сімейств. Це, у свою чергу, дозволяє провести більш масовий аналіз проявів космічного вивітрювання на поверхнях безатмосферних тіл, а також глибше вивчати відмінності між вивітрюванням у тіл різного мінералогічного складу та віку.

Одним з ключових підходів до такого аналізу є таксономічна класифікація, яка є важливим інструментом для вивчення різноманіття малих тіл Сонячної системи. Вона дозволяє систематизувати астероїди на основі їхніх фізичних характеристик, зокрема спектральних властивостей та альbedo, що дає змогу визначити їх склад. Вивчення цих характеристик є необхідним для розуміння еволюції астероїдних сімейств, а також для кращого розуміння їхнього походження та динаміки.

Перші спроби класифікації астероїдів здійснювались на основі їхніх спектрів і поділялись на кілька основних типів, таких як типи C, M, S та інші, в залежності від характеру їхнього спектра [35]. Сучасна таксономія базується на аналізі оптичних властивостей, а саме спектрах астероїдів, які є індикаторами складу поверхні астероїдів. Класичний підхід до класифікації, запропонований Gradie та іншими [11], об'єднує кольорові індекси та альbedo

для визначення типу астероїдів у межах певних спектральних класів. Це дає можливість проводити класифікацію для більшої кількості об'єктів, оскільки показники кольору відомі для 400 000 астероїдів, у той час як спектри відомі для 2000. Альbedo дозволяє розділяти окремі таксономічні класи, які мають однакові спектри (E, M, P).

Одним із найважливіших досягнень у цій сфері стало використання даних інфрачервоних оглядів, таких як огляд WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer), що дозволив значно розширити вибірку астероїдів з вимірними альbedo. За допомогою цих даних було створено каталог геометричних альbedo, який містить понад 150 000 астероїдів [22].

Ще один важливий крок — використання фотометричних даних SDSS (Sloan Digital Sky Survey), які забезпечують спостереження в п'яти фільтрах (u, g, r, i, z). Це дозволяє визначити показники кольору, які є важливими для розрізнення різних таксономічних типів астероїдів. У результаті цих досліджень було отримано більш точну та численну вибірку астероїдів, яка включає майже 400 000 об'єктів [31].

Зазначена робота також дозволяє аналізувати астероїдні сімейства, використовуючи не лише альbedo, але й показники кольору, такі як параметр a^* [16]. Цей параметр є лінійною комбінацією показників кольору і дозволяє ефективно класифікувати астероїди на основі їхніх спектральних характеристик, відображаючи різницю в оптичних властивостях різних типів астероїдів. Наприклад, розрізнення між типами E, M, P, що належать до X-комплексу, може бути здійснене тільки за допомогою альbedo.

Для класифікації астероїдів використовують різні методи, що включають як спостереження на наземних телескопах, так і аналіз даних місій з космічних апаратів. Основні методи включають:

- 1. Спектроскопія в діапазоні 0,3–2,5 мкм:**
Це один з основних методів для визначення таксономічних типів астероїдів. Спектр вказує на наявність певних смуг поглинання, що характерні для конкретних мінералів, таких як олівін і піроксен. Для астероїдів типу C часто спостерігається плоский спектр без чітких смуг, тоді як для S-типу смуги олівіну і піроксену є добре вираженими [3].
- 2. Головні компоненти у просторі показників кольору PC1–PC2:**
Використовуються для попередньої класифікації астероїдів. Ці

компоненти базуються на показниках кольору у тих фільтрах, що використовуються в огляді (Sloan Digital Sky Survey в п'яти фільтрах (u, g, r, i, z)). За допомогою цих компонент можна відокремити C-, S- та X-типи.

3. **Альbedo** (NEOWISE/AKARI):
Вимірювання альbedo астероїдів за допомогою інфрачервоних супутників, таких як WISE і AKARI, дозволяє зробити висновки про фізичні властивості поверхні. Наприклад, X-типи астероїдів можуть бути розділені на низкоальбедний P тип, середньоальбедний M тип та високоальбедний E.
4. **Поляриметрія:**
Метод полягає у вимірюванні ступеню поляризації відбитого астероїдом світла, в залежності від фазового кута. Параметри такої фазової залежності ступеня поляризації чутливі до таксономії. Цей метод також дає змогу оцінити розмір часток реголіту на поверхні астероїда.
5. **Дані місій** (Hayabusa1/2, OSIRIS-REx, Dawn):
Місії з повернення зразків, такі як Hayabusa1 (астероїд Itokawa), Hayabusa2 (Ryugu) та OSIRIS-REx (Bennu), дозволяють отримати безпосередні дані про склад астероїдів, що підтверджують результати наземних спостережень. Дані, отримані з цих місій, демонструють наявність нанофазного заліза, аморфних оболонок і спектральних змін, подібних до тих, що спостерігаються на відстані [21].

Основні спектральні типи астероїдів [3]:

1. **C-тип** — темний астероїд з низьким альbedo ($p_v \approx 0,03-0,10$), який має плоский спектр з поглинаннями в синій області. Ці астероїди містять гідратовані силікати та органічні матеріали [30].
2. **S-тип** — астероїди з помірним альbedo ($p_v \approx 0,10-0,25$) і характерними смугами поглинання олівину (~ 1 мкм) і піроксену (~ 2 мкм). Вони зазвичай асоціюються з H- та L-хондритами [12].
3. **X-тип (M/E/P)** — широкий діапазон альbedo ($p_v \approx 0,10-0,60$), спектр часто плоский, а M-версії вказують на металевий склад астероїдів [35].
4. **V-тип** — астероїди з високим альbedo ($p_v \approx 0,25-0,45$), на спектрі яких чітко видні смуги піроксену при 0,9 і 1,9 мкм. Вони асоціюються з астероїдом (4) Vesta .
5. **Q-тип** — астероїди з характерним спектром LL-хондритів і альbedo ($p_v \approx 0,20-0,30$). Вони мають "свіжий" вигляд і часто зустрічаються у групах, що складаються з більш нових об'єктів.

6. **D, P-типи** — астероїди з червонуватим спектром і низьким альбедо ($p_v \approx 0,03-0,08$). Вони мають особливості, які характерні для об'єктів у зовнішніх районах поясу астероїдів та транснептунових об'єктів [9].

Таксономічна класифікація також допомагає визначити приналежність астероїдів до певних сімейств. Яскравим прикладом є сімейство Nysa–Polana [8], яке складається з динамічно пов'язаних астероїдів з різною таксономією. Астероїд (44) Nysa, хоча й має високий альбедо, є E-типом, в той час як астероїди в його сімействі переважно мають середнє альбедо і належать до S-типу. Це вказує на те, що навіть у межах одного сімейства можуть існувати значні спектральні відмінності (Рис. 9). Як видно з рисунка, об'єкти у регіоні Nysa–Polana поділяються на дві чітко визначені популяції — S- та C-типи — з окремими V-shape, що свідчить про їхню різну природу та незалежну динамічну еволюцію [1].

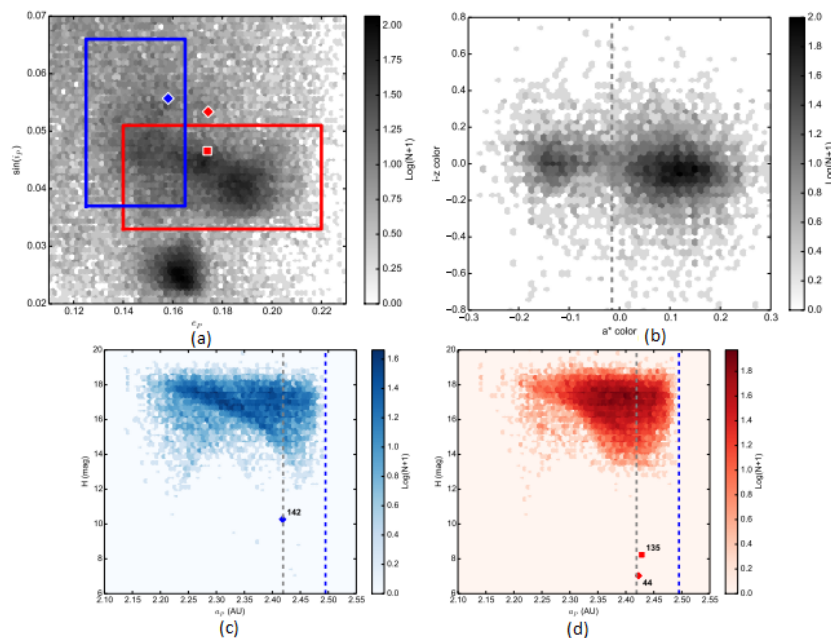


Рис.9. (а) Розподіл астероїдів із добре визначеними орбітами у просторі (e_p , $\sin i_p$). Червона та синя рамки виділяють області, пов'язані з S- та C-типами відповідно. Астероїди (44) Nysa, (135) Hertha та (142) Polana позначені відповідними символами. (b) Розподіл показника кольору $i-z$ та параметру a^* SDSS для об'єктів із (а), що мають якісні фотометричні дані. Два скупчення по різні боки від межі $a^* = -0.015$ (пунктирна лінія) відповідають, відповідно, S-типу (вищі значення a^*) та темнішим C/X-типам (нижчі значення a^*). (c,d) V-shape, що свідчать про наявність окремих еволюційних сімейств[1].

Щоб краще зрозуміти природу таких угруповань, розглянемо саме поняття астероїдних сімейств.

Астероїдні сімейства — це групи об'єктів, які мають схожі орбітальні елементи й, найімовірніше, походять від спільного предкового тіла, зруйнованого внаслідок зіткнення з іншим астероїдом. Це поняття було вперше запропоноване японським астрономом Кійоцугу Хіраямою ще на початку ХХ століття.

Під час такого зіткнення утворюється велика кількість фрагментів, які зберігають подібні елементи орбіт — власну велику піввісь, ексцентриситет та нахил. Унаслідок тривалого впливу гравітаційних резонансів і негравітаційних ефектів (ефекту Ярковського), члени сімейства з часом повільно розсіюються у просторі. Зокрема ефект Ярковського призводить до збільшення/зменшення великої півосі в залежності від орієнтації вісі власного обертання. Проте в багатьох випадках їх усе ще можна виділити за допомогою кластеризаційних методів (Рис.10.).

Вивчення астероїдних сімейств надає можливість простежити історію зіткнень у Сонячній системі, а також дослідити внутрішню структуру їхніх материнських тіл. Завдяки оцінці спектральних характеристик можна встановити, чи було тіло диференційованим, чи одноманітним за складом.

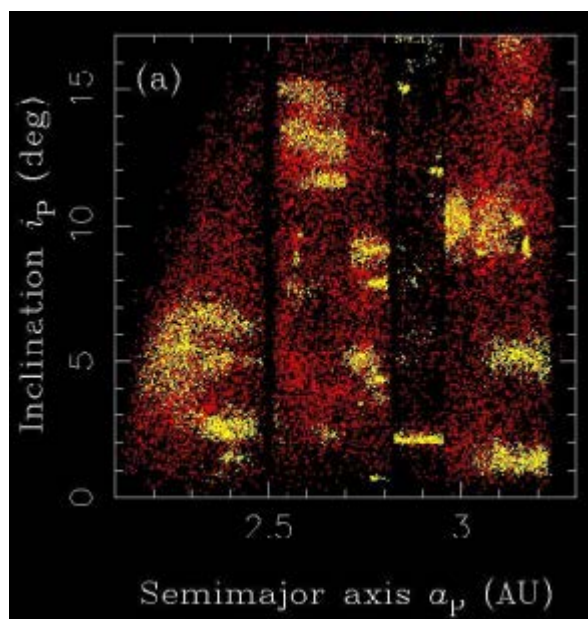


Рис.10. Алгоритм кластеризації, застосований до поясу астероїдів, відокремлює динамічні сім'ї (жовтий) від фону (червоний) [26].

Важливою подією наприкінці ХХ століття завдяки розвитку методів чисельного моделювання. Серед них ключовим став метод ієрархічної кластеризації (Hierarchical Clustering Method, HCM), який дозволяє виділяти статистично значущі угруповання в просторі власних орбітальних елементів [38].

Одним із ключових завдань у вивченні сімейств є визначення часу їхнього утворення. Це дозволяє реконструювати історію зіткнень у головному поясі, простежити динамічну еволюцію астероїдів і оцінити їхній внесок у постачання матеріалу у внутрішню Сонячну систему.

Існує кілька підходів до датування сімейств:

1. **V-shape.** Найпоширеніший і найнадійніший метод ґрунтується на аналізі V-shape — характерних структур на діаграмі «велика піввісь – абсолютна зоряна величина» ($a-H$), що виникають через диференційований дрейф уламків під впливом ефекту Ярковського. Вважається, що одразу після руйнівного зіткнення уламки мають подібні орбіти, проте з часом менші об'єкти дрейфують від центру сімейства швидше, а більші — повільніше, створюючи симетричну V-shape. Ширина цієї структури відображає час, який минув від моменту утворення сімейства. За нею та з урахуванням фізичних властивостей тіл (розмір, густина, альbedo) проводять оцінку віку [25,33].
2. **Зворотна інтеграція орбіт.** Для дуже молодих сімейств, з віком менше ~ 10 млн р., застосовують метод, який «відмотує» орбіти назад у часі, щоб знайти момент максимальної конвергенції уламків. Це дозволяє оцінити вік з точністю до сотень тисяч років (Рис.11.) [24].
3. **Спектральні підходи.** Поверхні астероїдів змінюються під впливом космічного вивітрювання: вони темніють і червоніють, тож порівняння кольорових індексів (a^* або $g-r$) між сімействами дозволяє оцінити ступінь «старіння» поверхонь [37].

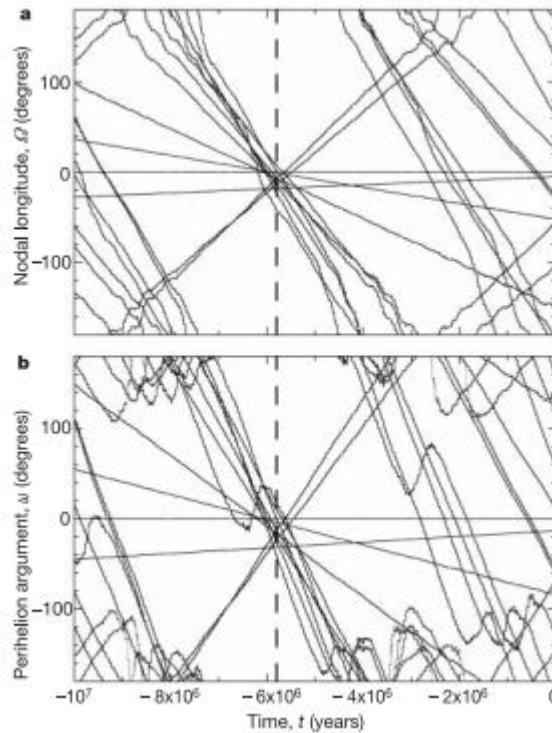


Рис.11. Ретроспективні орбітальні еволюції 13 пронумерованих членів із 39 об'єктів кластера. Збіг довгот вузлів та аргументів перигеліїв приблизно 5,8 млн років тому свідчить про те, що виявлений кластер утворився внаслідок нещодавнього катастрофічного зіткнення. Значення подані відносно до астероїда (832) Karin[24].

Ідентифікація молодих сімейств (Karin, Datura, Iannini) дозволяє досліджувати початкові умови утворення групи та механізми розподілу фрагментів із високою точністю, натомість старі сімейства зберігають інформацію про ранні етапи еволюції поясу і навіть могли транспортувати гідратовані мінерали, вносячи внесок у доставлення води на Землю.

Таким чином, комбінований підхід (V-shape, чисельна інтеграція, спектральний аналіз і статистична еволюція) є ключем до точного визначення віку астероїдних сімейств. Завдяки такому комплексному підходу можна отримати не лише дані про еволюцію сімейств, але й про процеси, які відбуваються на їхніх поверхнях під впливом космічного вивітрювання.

Метою даної роботи є вивчення проявів космічного вивітрювання на сімействах астероїдів різного віку та різних таксономічних типів.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

1. Відбір 24 астероїдних сімейства (11 S-типу та 13 C-типу) для аналізу.
2. Побудова V-share для обраних сімейств та розрахунок їх віку.
3. Вибір показників кольору, які чутливі до проявів вивітрювання (глибина смуги поглинання 0.9 мкм, нахил спектру).
4. Співставлення показників кольору чотирьох обраних фотометричних каталогів з членами обраних сімейств.
5. Оцінка кореляції середніх значень обраних показників кольору досліджуваних сімейств із їх віком.

РОЗДІЛ 2. ДАНІ ТА МЕТОДИКА.

2.1. Використані каталоги

Для подальшої роботи з астероїдними сімействами, а саме дослідження показників кольору, нами було використано декілька великих фотометричних каталогів малих тіл. Серед цих каталогів: SDSS Moving Object Catalog 4 (SDSS MOC4), його переобробка Сергєєвим [31], огляд SkyMapper DR3 (у переробці Сергєєва) [32], та каталог Gaia (у переробці Сергєєва). Для більш точного співставлення розрахованих даних, кожен з них був приведений до системи фільтрів SDSS (u, g, r, i, z)(рис.12.), з урахуванням калібрування фільтрів і корекцій на геометрію спостереження.

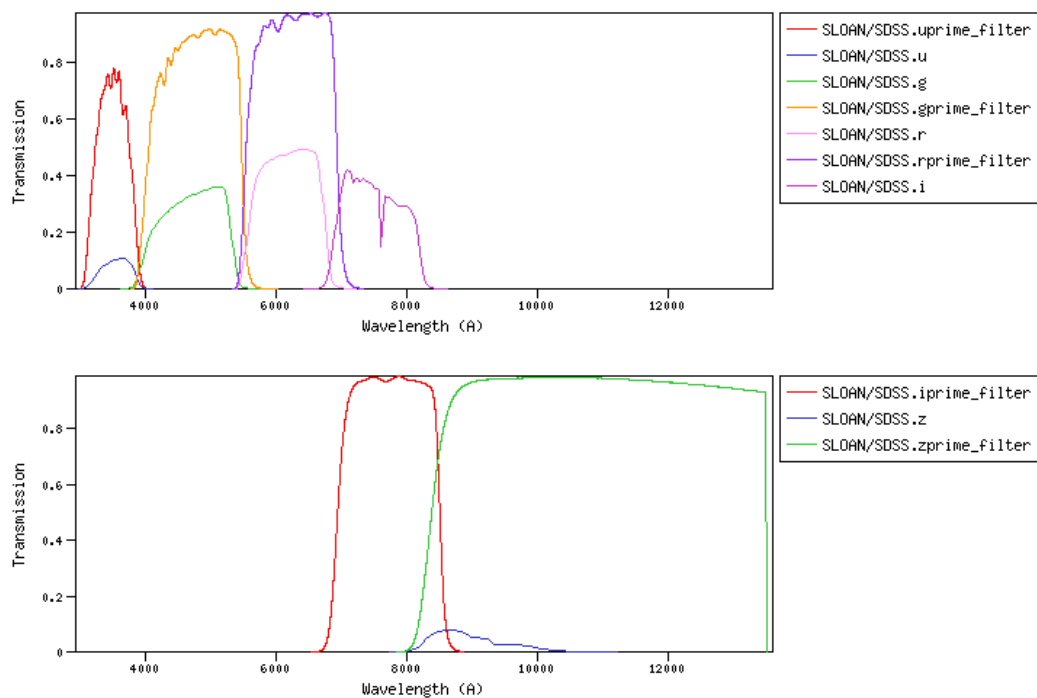


Рис.12. Криві пропускання фільтрів (u, g, r, i, z) огляду SDSS (Sloan Digital Sky Survey).

SDSS MOC4 це один з перших та найвідоміших джерел сучасних фотометричних даних для астероїдів. Він був створений на основі спостережень Sloan Digital Sky Survey (SDSS), який проводився на 2.5-метровому телескопі в обсерваторії Apache Point у Нью-Мексико, США. Як і було зазначено, цей огляд має систему з п'яти широкосмугових світлофільтрів (u, g, r, i, z), які покривають велику частину видимого спектру. Цей каталог містить більше 470000 записів спостережень, які охоплюють понад 100000 унікальних об'єктів. Якість цього огляду дозволяє доволі точно обчислювати

показники кольору та параметр a^* , які є ключовими для оцінки космічного вивітрювання в нашій роботі.

Переобробка SDSS Сергєєва [31] була проведена з метою усунення систематичних похибок і покращення точності фотометрії. Вона враховує особливості калібрування, позиційні невідповідності та зміни атмосферних умов. Це дало змогу зібрати більш обширний каталог з більше ніж 1500000 записами, які охоплювали понад 700000 унікальних об'єктів, з яких майже 400000 є нумерованими астероїдами. Показники кольору були скориговані з урахуванням фазового кута, повітряних мас та геометрії спостереження. Середня похибка таким чином була зменшена до показника 0.03–0.05 mag. У каталозі наведено як окремі спостереження, так і зведені середні кольори для кожного об'єкта[31].

Каталог SkyMapper DR3 у переобробці Сергєєва [32] був сформований на основі огляду неба, виконаного на 1.35-метровому телескопі SkyMapper, який розташований в обсерваторії Siding Spring в Австралії. Цей телескоп обладнаний шістьма фільтрами (u, v, g, r, i, z)(Рис.13.), що подібні до системи SDSS, але мають відмінності у спектральних кривих пропускання. Каталог включає більше 880000 спостережень для 205 515 унікальних об'єктів (астероїдів, комет, об'єктів поясу Койпера). Крім таблиці окремих спостережень. Також є зведена таблиця, що містить в собі усереднені кольори для більше ніж 650000 об'єктів. Для узгодженості з іншими каталогами, дані були скориговані та перераховані у систему фільтрів SDSS Сергєєвим [32].

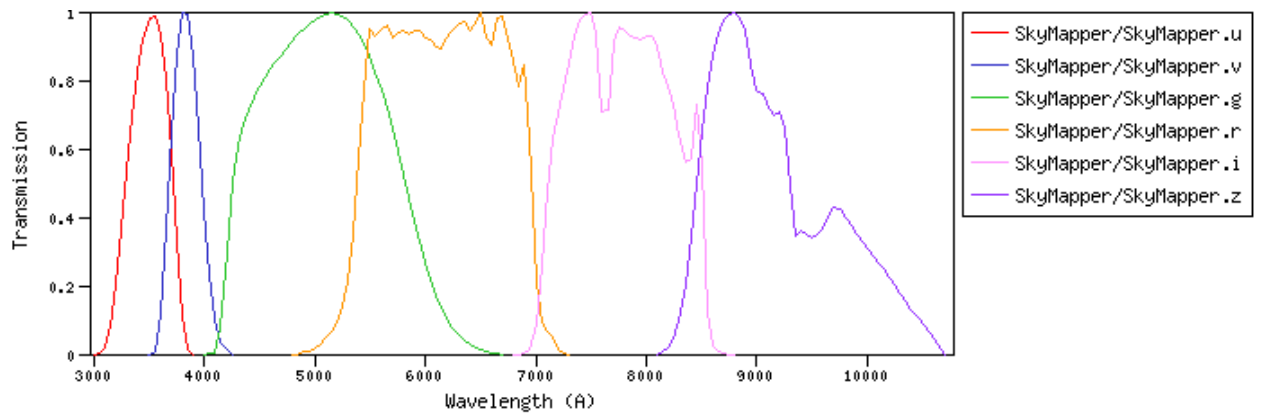


Рис.13. Криві пропускання фільтрів (u, v, g, r, i, z) огляду SkyMapper.

Каталог Gaia у цій роботі також був використаний у переобробці Сергєєва. Місія Gaia не є наземною — вона є супутником ЄКА, який працював з 2013 року по 15 січня 2025 року, та має систему фільтрів суттєво іншу від тих, що є у SDSS та SkyMapper (BP, RP, G). Окрім високоточних астрометричних спостережень, місія Gaia мала на борту спектрофотометр низького розділення, який дозволяв проводити вимірювання спектрів для зірок, астероїдів та інших об'єктів (Рис.14). Це дало змогу перерахувати їх в потоки у відповідних фільтрах, які потім логарифмувались і отримувались показники кольору у системі SDSS.

За рахунок розташування телескопу у космосі, а також якості збірки, його спектрофотометричні спостереження характеризуються високою стабільністю та точністю. Ця переобробка містить більше 65000 об'єктів, для яких було виконано перерахунок показників кольору у систему SDSS. Це було зроблено за допомогою моделі відповідності між спектрами низької роздільності Gaia та ugriz системою SDSS, з урахуванням нелінійності, геометрії освітлення та кривих чутливості.

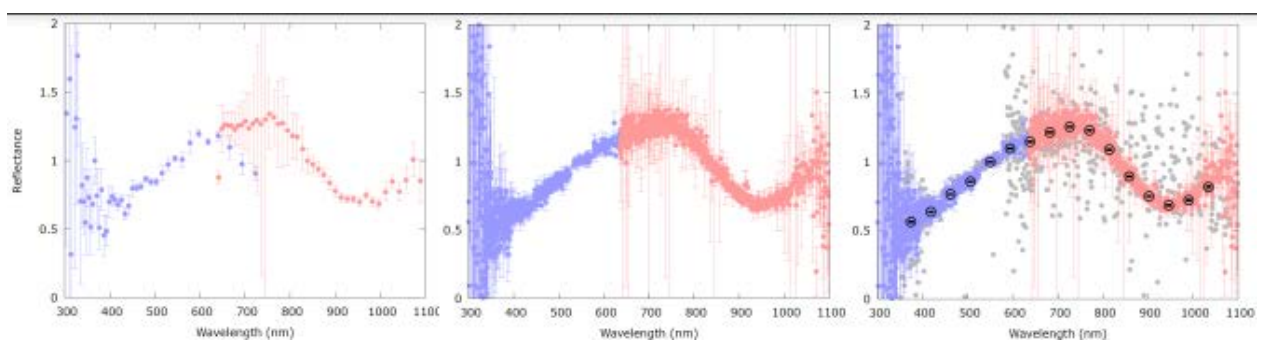


Рис.14. Ілюстрація процедури, прийнятої для обчислення середніх спектрів відбиття. Для прикладу обрано SSO (1459) Magnya - базальтовий астероїд з глибокою смугою поглинання з центром на 950 нм і червоним нахилом спектра. Ліва панель: спектр відбиття однієї епохи. Синім і червоним позначено дані BP і RP відповідно. Середня панель: спектри відбиття всіх епох для Магнії. Права панель: дані, відфільтровані за допомогою процедури сигма-

кліпування, показані сірим кольором; чорні точки відповідають остаточному усередненому спектру відбиття, дискретизованому в 16 смугах [10].

Для всіх чотирьох каталогів (переобробок SDSS, SkyMapper, Gaia), та SDSS MOC4, була застосована єдина процедура відбору об'єктів, що належать до окремих сімейств астероїдів з каталогу Несворного [26]. Це забезпечило узгоджене порівняння показників кольору у межах кожного сімейства, за допомогою даних з зазначених каталогів.

2.2. Каталог сімейств Несворного

Каталог астероїдних сімейств Несворного [26], є однією з основних баз даних для вивчення динамічних характеристик астероїдів. Цей каталог включає результати класифікації астероїдів за допомогою методу ієрархічної кластеризації (Hierarchical Clustering Method), який дозволяє поділяти астероїди на групи, що мають ймовірне спільне походження та схожі орбітальні параметри. Використовуючи цей метод, Несворним було виділено 122 астероїдні сімейства.

Створення цього каталогу передбачало застосування так званих синтетичних власних елементів для більше ніж 350 тисяч нумерованих астероїдів, що дало змогу отримати стабільні орбітальні параметри. Ці дані стали основою ієрархічного кластеризування, за допомогою якого було виявлено сімейства з подібними орбітальними параметрами.: великою піввіссю (a), ексцентриситетом (e) та нахилом орбіти (i), що дозволило розглядати астероїди не як окремі об'єкти, а як частини більших динамічних систем.

Кожен файл для відповідного сімейства містить наступну інформацію:

1. Орбітальні елементи астероїдів
Всі астероїди сімейства мають орбітальні параметри, що включають велику піввісь (a), ексцентриситет (e) та нахил орбіти (i) [26].
2. Абсолютна зоряна величина (H)

Для кожного астероїда в каталозі визначено значення його абсолютної зоряної величини H , що дає можливість оцінити розміри астероїдів, оскільки величина H безпосередньо залежить від їхнього діаметра .

3. Розмір сімейств і їх структура

Розмір кожного сімейства варіюється від декількох десятків до кількох тисяч астероїдів, що дозволяє оцінити масштаби руйнування, які могли б призвести до формування такого сімейства. Найбільші астероїдні сімейства включають в себе тисячі об'єктів.

2.3. Показники кольору та обчислення параметра a^*

У межах цієї дипломної роботи було застосовано чотири каталоги фотометричних спостережень: SDSS MOC4, а також версії каталогів SDSS, GAIA та SkyMapper, перероблені Сергеевим [32], які були приведені до єдиної системи фільтрів, що дало змогу напряму зставяти фотометричні показники між різними джерелами.

Для аналізу нами було відібрано 24 астероїдних сімейства: 11 з них S-типу (Agnia, Barcelona, Eunomia, Gefion, Iannini, Karin, Koronis, Maria, Massalia, Merxia, Rafita) та 13 — C-типу (Adeona, Astrid, Dora, Erigone, Euphrosyne, Hoffmeister, Hygiea, Misa, Naema, Nemesis, Themis, Ursula, Veritas). Для кожного сімейства було завантажено відповідний файл із каталогу Несворного [26], який містив список усіх членів, що входять до сімейства та їхні орбітальні елементи. Далі для кожного члена з перелічених у списку сімейств було проведено перехресний пошук даних в усіх чотирьох фотометричних каталогах. Для них ми отримали відповідні дані, а саме значення зоряних величин в окремих фільтрах та їх похибки. Після цього було обчислено базові кольори ($g-r$, $r-i$ та інші.), та розраховані відповідні похибки. В подальшому було виключено об'єкти з аномальними значеннями кольору, які мали велику розбіжність з середніми значеннями по сімейству, та відфільтровано результуючий список, а саме було відкинуто ті розраховані значення, похибка яких перевищувала 50% від абсолютного значення.

Наступним кроком був розрахунок кольорового індексу a^* , який визначався за формулою [16]:

$$a^* = 0.89 \times (g - r) + 0.45 \times (r - i) - 0.57$$

Після розрахунку цього параметру, результуючі дані також було відфільтровано за ним для кожного з обраних сімейств. Наступним кроком був проведений перехресний пошук значень геометричного альбедо для усіх 24-х сімейств. Значення геометричного альбедо були отримані з даних місії WISE [22]., після чого було побудовано залежності параметру a^* від альбедо, що виявило “домішок” об'єктів у сімействі іншого таксономічного типу. В

подальшому це дало змогу отримати більш однорідні таксономічно результати для кожного сімейства. Для кожного сімейства відсікалися об'єкти з параметрами a^* або альбедо, що не відповідали середнім значенням для даного сімейства. Це дозволило зменшити вплив помилкових об'єктів, які потрапили до сімейства в результаті похибок класифікації або злиття динамічних груп.

В кінцевому результаті ми отримали для кожного з 24-х сімейств чотири окремі підсумкові вибірки, що відповідали обраним фотометричним каталогам. Кожна з них містила очищені значення показників кольору, параметрів a^* , а також дані про альбедо.

2.4. Побудова V-shape

Для кожного з 24 обраних сімейств астероїдів з каталогу Несворного [26], ми побудували графіки залежності абсолютної зоряної величини H від великої піввісі a , де по осі x відкладається велика піввісь a (в астрономічних одиницях), а по осі y — абсолютна зоряна величина H . Кожна точка на графіку відповідала окремому об'єкту сімейства. Отримані графіки були згруповані за спектральним типом, а саме було отримано 2 групи графіків C та S -типу (Рис.15 та 16).

Після цього отримані розподіли були апроксимовані за допомогою наступної формули[2]:

$$H = 5 \left(\frac{|a - a_c|}{c} \right)$$

H - абсолютна зоряна величина астероїда.

a -велика піввісь астероїда.

a_c — центр V-shape на осі a .

C — параметр, який визначає ширину V-shape.

Саме параметр C є критичним для визначення віку сімейства, оскільки він відображає швидкість розсіювання уламків після початкового зіткнення [33].

Причиною виникнення подібних структур є дія негравітаційного ефекту Ярковського, що призводить до зміни великої піввісі астероїда в залежності від його розміру та орієнтації осі обертання:

Менші астероїди або астероїди з меншою густиною дрейфують швидше, а астероїди із прямим осьовим обертанням збільшують велику піввісь, а із ретроградним - навпаки, зменшують.

Таким чином, “ширина” V-shape залежить від часу, який минув з моменту катастрофічного зіткнення материнського тіла з іншим астероїдом, що й породило сімейство [36].

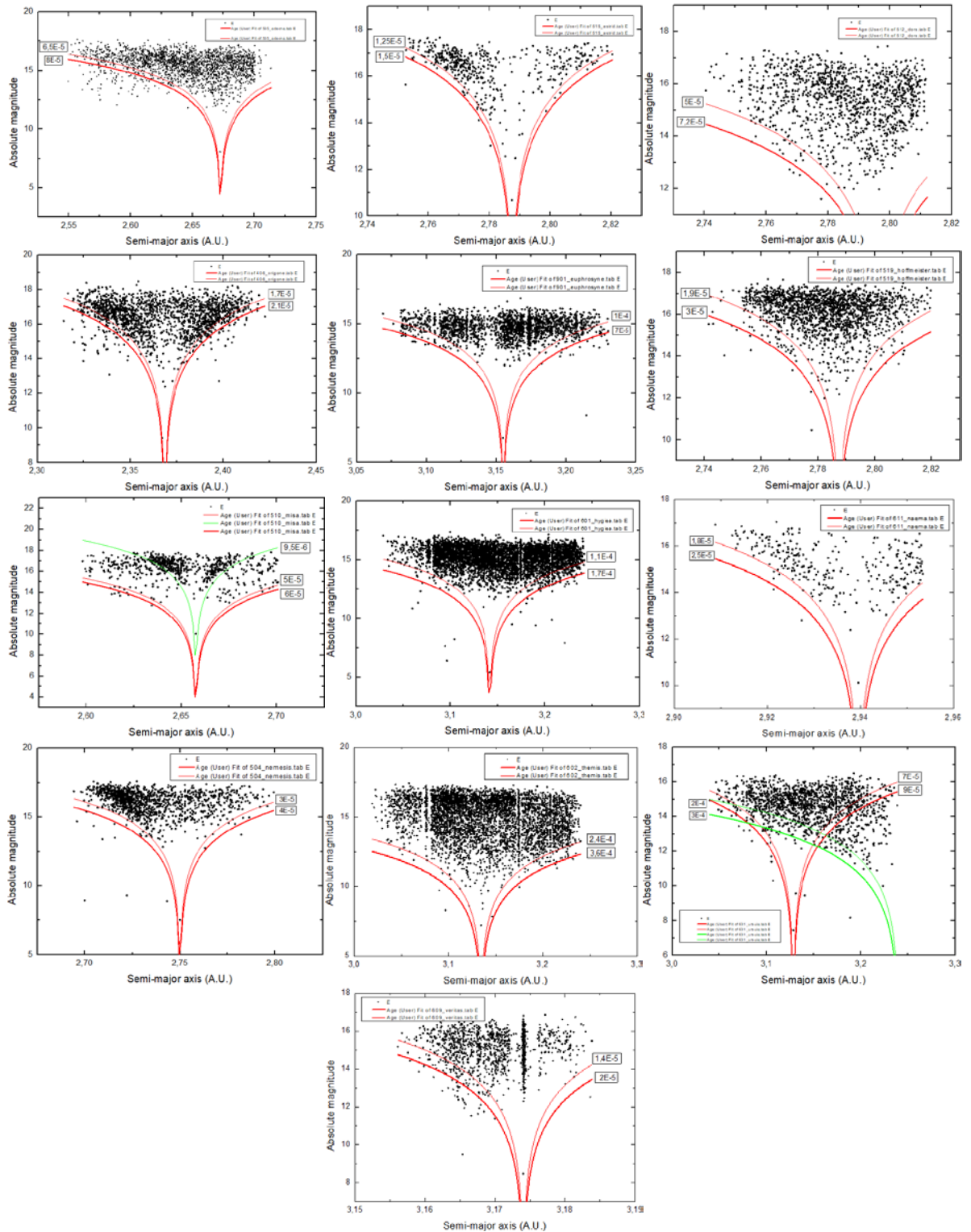
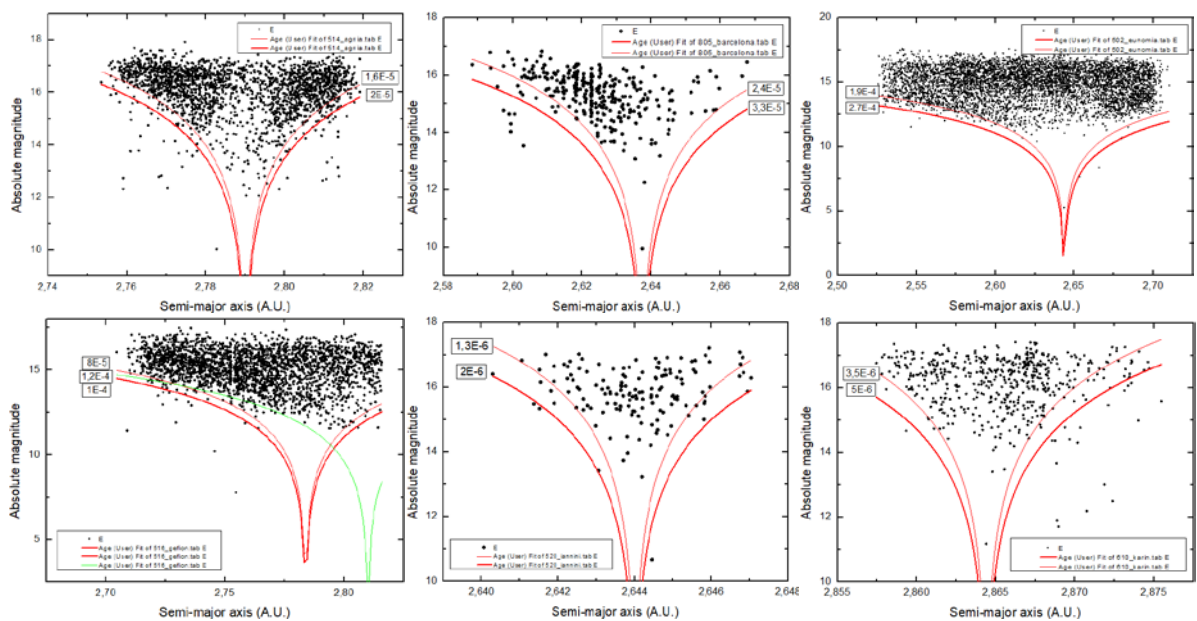


Рис.15. Побудовані V-shape та їх апроксимації для 13-ти обраних сімейств С-типу.

Зазвичай V-shape є більш-менш симетричними, в центрі якого розташоване материнське тіло. Однак бувають випадки, коли V-shape може бути дещо асиметричним, коли різні гілки можуть мати різну кількість астероїдів, що може свідчити про вплив резонансів за власним рухом [6]. В таких випадках для правильного “фітінгу” V-shape на реальний розподіл астероїдів в сімействі, ми вручну коригували значення a_c у межах 0.002–0.01 астрономічних одиниць

Параметр C є важливим в розрахунках, оскільки він визначає форму V-shape і напряму впливає на точність оцінки віку сімейства. Для кожного сімейства ми підбирали це значення вручну. Ми задавали параметр C таким чином, щоб максимізувати накладання на реальний розподіл об'єктів, з мінімальним відкиданням об'єктів за межі V-shape, що дозволяло оцінити можливі похибки у визначенні цього параметру.

Зазначимо, що побудова V-shape має свої нюанси, наприклад, ручна корекція центру a_c може вносити похибки, які слід враховувати при подальшій інтерпретації отриманих результатів. Крім того, резонанси з іншими тілами можуть деформувати форму V-shape, що вимагає додаткового врахування при побудові більш точних моделей. Таким чином, для кожного сімейства було побудовано відповідні V-shape із підібраними значеннями C , які використовувалися в подальших розрахунках віку.



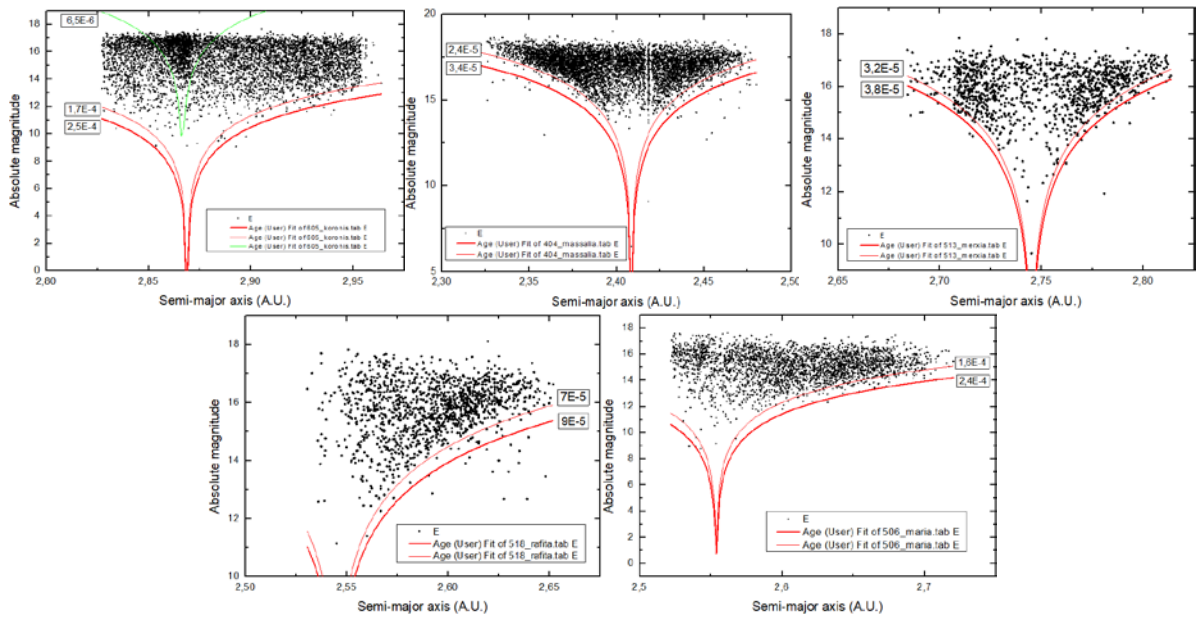


Рис.16. Побудовані V-shape для 11-ти сімейств S-типу.

2.5. Формула оцінки віку

Після побудови V-shape для кожного з 24 сімейств астероїдів, з визначенням параметру C для кожного з них, наступним кроком став розрахунок їх віку. Основна ідея полягає в тому, що межі отриманих V-shape формуються через дифузію об'єктів всередині сімейства під впливом ефекту Ярковського. Чим старіше сімейство, тим далі розповсюджуються по великій півосі об'єкти від центру — тому ширина V-shape є прямим індикатором віку. Для кількісної оцінки ми використали напівемпіричну формулу, описану Несворним [26]:

$$t_{age} \cong 1g.y. \times \left(\frac{C_0}{10^{-4} AU} \right) \times \left(\frac{a_c}{2.5 AU} \right)^2 \times \left(\frac{\rho}{2.5 g cm^{-3}} \right) \times \left(\frac{0.2}{P_V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

де:

t_{age} — вік сімейства (у млрд. Років)

C — ширина V-shape, визначена нами на попередньому етапі,

a — центральна велика піввісь V-shape (власна велика піввісь материнського тіла у формулі для побудови V-shape),

ρ — середня густина об'єктів сімейства (в g/cm^3),

P_V — середнє геометричне альbedo.

Значення C ми отримали з V-shape на попередньому етапі (див. розділ 2.4). Цей параметр був підібраний вручну для кожного сімейства для кращого накладання на реальні дані. В подальшому вони були додані у результуючу таблицю.

Значення a — це значення власної великої піввісі, що зазвичай відповідає материнському тілу сімейства, однак у деяких випадках ми зсували центр V-shape, якщо спостерігалася асиметрія.

Значення геометричного альбедо (p_v) було обчислювали окремо для кожного сімейства. Для цього було використано дані каталогу WISE [22], зібрані для об'єктів у відповідному сімействі. Далі задля більш точних результатів із вибірки були виключені об'єкти з аномально високими або низькими значеннями альбедо, та розраховано середнє значення альбедо для кожного сімейства — ці значення були використані у розрахунках та додані у результуючу таблицю.

Для оцінки густини (ρ) ми звернулися до роботи Carrу [5], де наведена таблиця для середніх густин астероїдів різних таксономічних типів. Оскільки сімейства астероїдів у нашій вибірці мають добре визначений спектральний тип (C або S), та почищені в подальшому вручну від домашок інших типів, ми використали середні густини, наведені в цій роботі:

для **S-типів**: $2.70 \text{ г/см}^3 \pm 0,69$.

для **C-типів**: $1.41 \text{ г/см}^3 \pm 0,69$.

Усі параметри зібрані у результуючих таблицях (табл.1. та 2). Розраховуючи за формулою, ми отримали приблизні оцінки віку для кожного сімейства — від кількох мільйонів до понад мільярдів років. Варто зазначити, що похибка в оцінці віку значною мірою зумовлена невизначеністю в альбедо й реальних відмінностях в густині окремих об'єктів сімейства, а також можливими похибками у нашому підборі ширини V-shape.

Таким чином, використання формули дозволило нам кількісно інтерпретувати результати побудови V-shape, перевівши їх у часову шкалу. За допомогою цієї формули було обчислено вік для 24 астероїдних сімейств, які були попередньо ідентифіковані та класифіковані на основі каталогів Несворного[26], SDSS MOC4, (SDSS, GAIA та SkyMapper (Сергеєва)). Отримані розраховані значення дозволяють провести аналіз

зв'язку між ступенем космічного вивітрювання та віком сімейств одного типу, що описано у розділі 3.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОЗРАХОВАНИХ ДАНИХ

3.1. Порівняння з роботою Nesvorný et al. (2005)

Пошук зв'язку між показниками кольору членів астероїдних сімейств та їх віком почався з появою перших великих фотометричних каталогів, таких як SDSS. Однією з перших робіт у цьому напрямку була публікація Несворного [25], де на основі даних каталогу SDSS MOC1 було проведено аналіз кольорових компонент астероїдних сімейств та їх зв'язок із віком для різних таксономічних груп. У своїй роботі автори використовували головний кольоровий компонент PC1, розрахований на основі різниці між фільтрами g, r, і та z за наступною формулою [25]:

$$PC1 = 0.396(u - g) + 0.553(g - r) + 0.567(g - i) + 0.465(g - z)$$

Це дозволило оцінити зміну кольорової компоненти для сімейств астероїдів і їх кореляцію з віком. (рис. 17.)

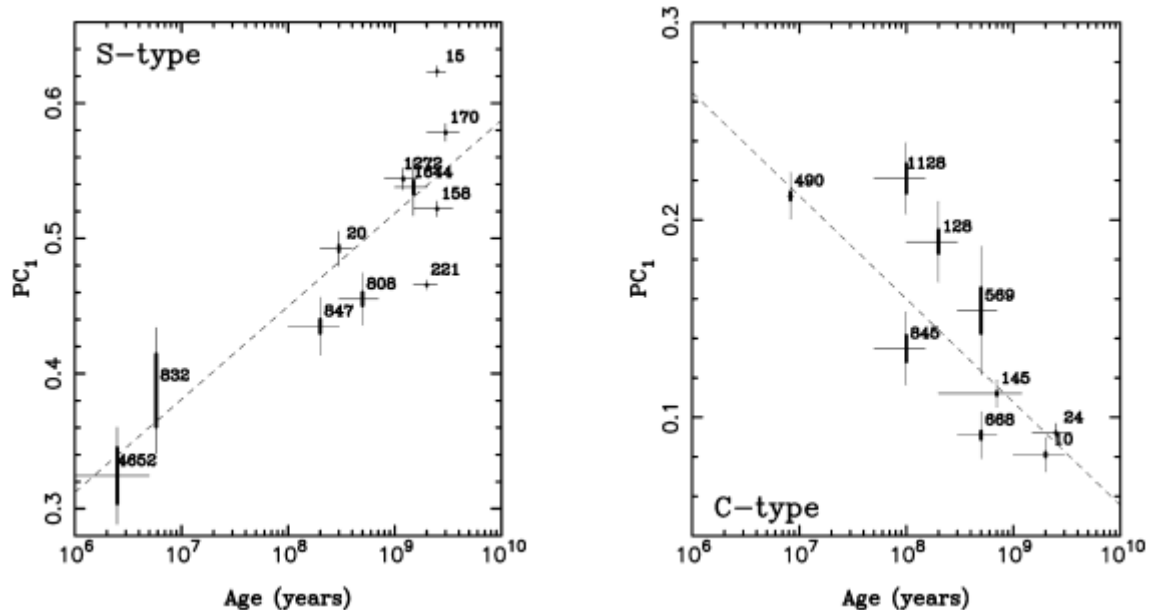


Рис.17. Залежність кольорової компоненти PC1 від віку для сімейств S-типу (зліва) та C-типу (справа). Кожне сімейство позначене окремим номером. Для обох типів сімейств простежується кореляція між PC1 та віком, що зображена пунктирними лініями тренду. Тренди є протилежними: молоді сімейства S-типу зазвичай мають менші значення PC1, тоді як серед C-типу молоді сімейства мають більші значення PC1, ніж старші[25].

Незважаючи на значний внесок цієї роботи в розуміння космічного вивітрювання, вона обмежена вибіркою та даними з одного каталогу. У нашому дослідженні ми підтвердили результати Несворного, застосувавши аналогічний метод, але на розширеній вибірці.

У роботі Несворного [25] для дослідження використовувалося 9 сімейств С-типу та 11 сімейств S-типу, серед яких:

С-тип: Veritas, Astrid, Nemesis, Naema, Misa, Adeona, Dora, Hygiea, Themis

S-тип: Iannini, Karin, Agnia, Merxia, Massalia, Eos, Koronis, Rafita, Gefion, Maria, Eunomia

В нашому дослідженні ми розширили вибірку та включили 24 астероїдних сімейства, серед яких:

11 сімейств S-типу: Agnia, Barcelona, Eunomia, Gefion, Iannini, Karin, Koronis, Maria, Massalia, Merxia, Rafita

13 сімейств С-типу: Adeona, Astrid, Dora, Erigone, Euphrosyne, Hoffmeister, Hygiea, Misa, Naema, Nemesis, Themis, Ursula, Veritas

Ми використовували аналогічний компонент PC1 для порівняння з результатами Несворного, але також ввели альтернативний параметр кольору a^* , який є менш чутливим до похибок вимірювання. Як і в дослідженні з роботи Несворного, ми спостерігали зворотну кореляцію між віком і PC1 для сімейств С та S-типу(рис.18).

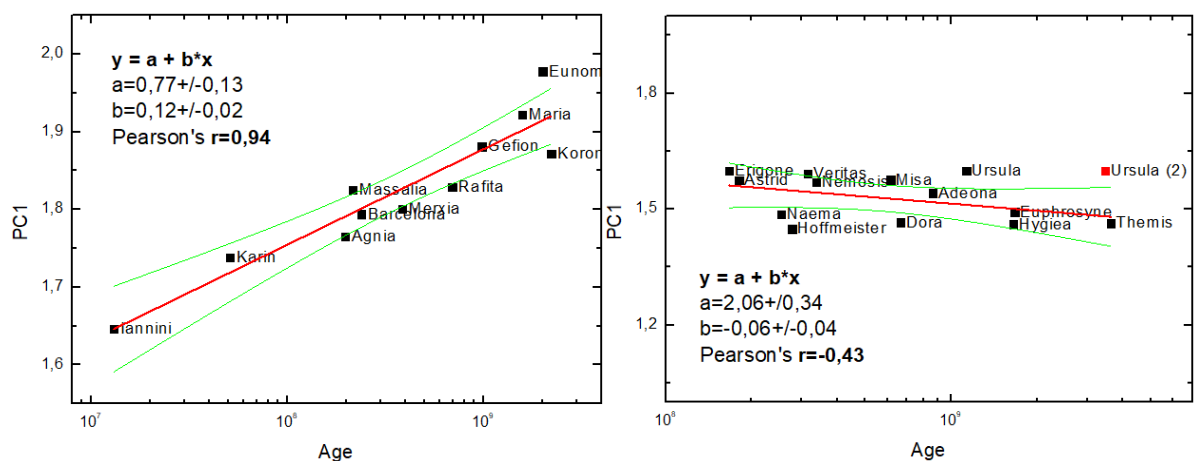


Рис.18. Побудовані нами залежності параметру PC1 від віку сімейства (S-типу- зліва, С-типу- справа)

Ми отримали схожі результати для S-типу сімейства, але дещо відмінні для С-типу. Робота Несворного [25] стала важливим етапом у дослідженні космічного вивітрювання, однак вона обмежена лише однією вибіркою даних. Наше дослідження значно розширює ці результати, та в майбутньому ми плануємо розширити вибірку на всі доступні сімейства С та S-типів, а також

перевірити можливість застосування аналогічного аналізу до інших таксономічних груп, зокрема астероїдів типу V (наприклад, сімейство Vesta), L-типу та D-типу.

3.2. Залежність a^* від віку у S-типах

Використовуючи розраховані попередньо данні було проаналізовано зміну параметру a^* від віку сімейств S-типу та помічене зростання цього параметру з часом. Це цілком співставно з теорією космічного вивітрювання, яка була описана в першому розділі, коли спектральні характеристики поверхні змінюються через низку чинників, такі як сонячний вітер чи бомбардування високоенергетичними частинками. В межах обраних нами 11 сімейств S-типу можна добре прослідкувати позитивну кореляцію між віком та середнім значенням параметру a^* .

У випадках коли, вік сімейства перевищує 1 Gy, параметр a^* зростає до значень 0.10-0.13, що відповідає більш вивітrenom та “червоним” поверхням, збагаченим нанофазним залізом, в той час як для сімейств з віком < 200 Myr (наприклад Karin та Iannini), можна спостерігати значення цього параметру на відмітці $\sim 0.02-0.035$, що свідчить про більш “молоду” поверхню, яка зазнала меншого ступеню вивітрювання через невеликий у космічних масштабах вік з моменту утворення сімейства.

Далі нами було побудовано графік a^* (для усіх чотирьох фотометричних каталогів) від віку сімейств (Рис.19.). Залежність носить приблизно логарифмічний характер, що відповідає теоретичним очікуванням: процес вивітрювання є більш інтенсивним на перших стадіях (до ~ 700 Myr), після чого темп вивітрювання сповільнюється. Це може пояснювати насичення кольору у старших сімейств.

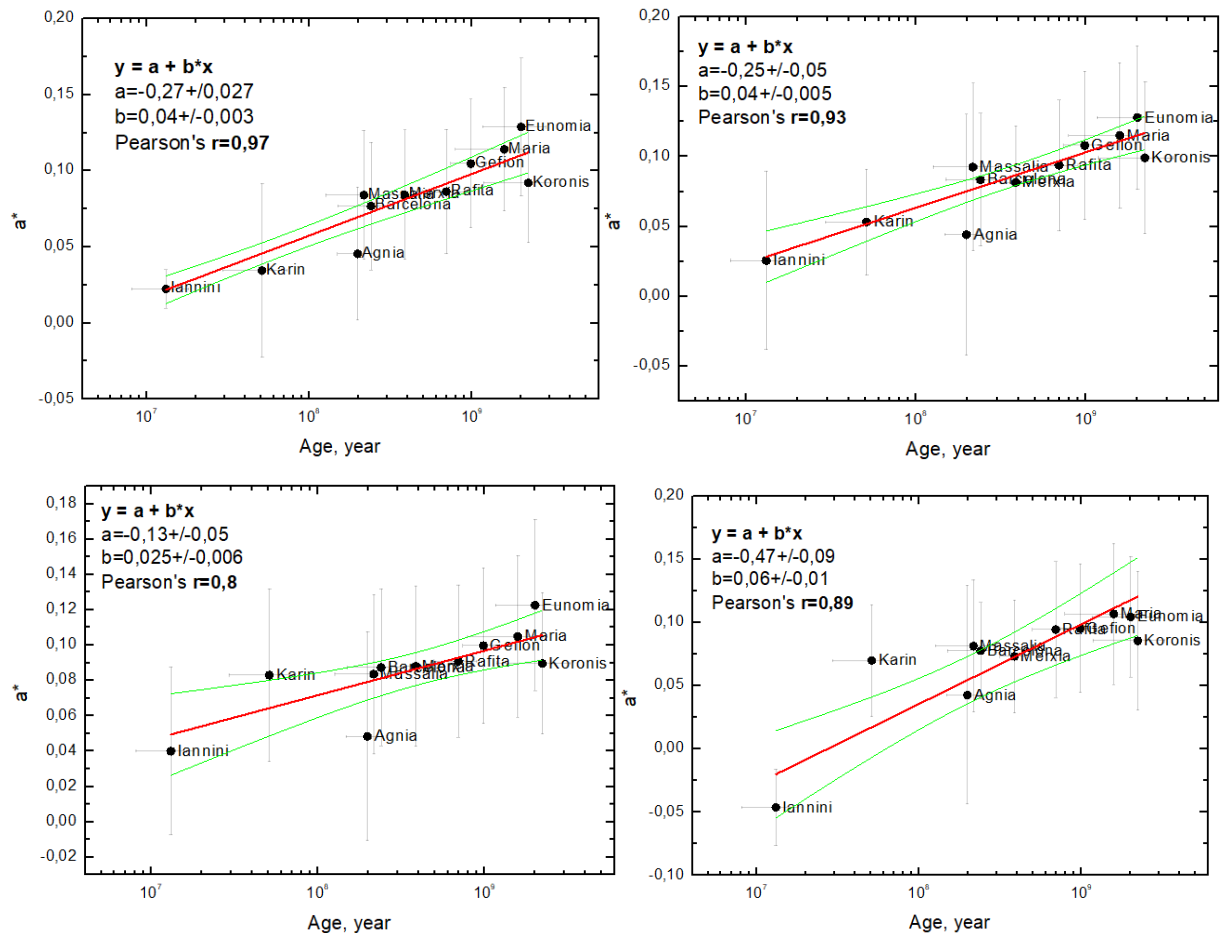


Рис.19. Залежність показника кольору a^* від віку для сімейств S-типу за даними чотирьох фотометричних каталогів (зліва зверху- SDSS MOC4 , справа- SDSS(Sergeev) . Зліва знизу- GAIA (Sergeev), справа- SkyMapper (Sergeev)).

Однак треба зазначити, що між близькими за віком сімействами також можуть бути деякі відхилення у результатах, які не можна пов'язати лише з віком. У деяких випадках середнє значення a^* є дещо вищим, аніж очікувалось зважаючи на вік, що в свою чергу можна пояснити наступним чином:

1. варіаціями у складі порід (навіть в межах одного типу),
2. різним ступенем первинного порушення поверхні,
3. наявністю вторинних подій (наприклад вторинні зіткнення в межах сімейства),
4. з похибками у визначенні віку чи кольору окремих об'єктів.

Також треба враховувати, що в окремих сімействах можливий вплив просторового розташування сімейства (наприклад, поблизу резонансів) або різниці у щільності окремих астероїдів та їх альbedo, що впливають на еволюцію форми V-shape, яка в свою чергу впливає на нашу оцінку віку.

Отримані результати підтверджують загальноприйняте припущення про поступове "старіння" поверхні у астероїдів S-типу внаслідок космічного вивітрювання. Наявність відмінностей між сімействами вказує на складну багатофакторну природу процесу, однак не заперечує загального тренду.

3.3. Залежність a^* від віку у C-типах

Для астероїдних сімейств C-типу характерна менш виразна реакція спектру на космічне вивітрювання, в порівнянні з S-типом. Це пов'язане в першу чергу з більш темною, насиченою вуглецем поверхнею, яка демонструє обмежені спектральні зміни у видимому діапазоні. В свою чергу межах обраних нами 13-ти астероїдних сімейств цього типу вдалося виявити тенденцію до зниження показника a^* з віком, що свідчить про "посиніння" поверхні під дією космічного вивітрювання та поступову деградацію оптичних властивостей поверхні.

Для підвищення якості отриманих результатів, для всіх обраних сімейств C-типу також було проведено фільтрування отриманих даних від можливих домішок об'єктів інших таксономічних класів (B, S та X-типу) за допомогою аналізу співвідношення a^* до геометричного альbedo. Це дозволило мінімізувати вплив змішаного складу на показники кольору, що дало змогу виділити більш однорідну популяцію в середині кожного сімейства. У результаті було виявлено зниження середнього значення a^* із віком, хоча ця залежність є слабшою та менш стабільною, ніж у сімейств S-типу. Для підтвердження цієї кореляції було побудовано графік a^* від віку сімейств(Рис.20.). Такий результат пояснюється припущенням про те, що процес космічного вивітрювання у вуглецевих тіл відбувається повільніше або за допомогою інший механізм. На відміну від логарифмічного насичення, характерного для S-типу, для сімейств C-типу спостерігається майже лінійна зміна a^* .

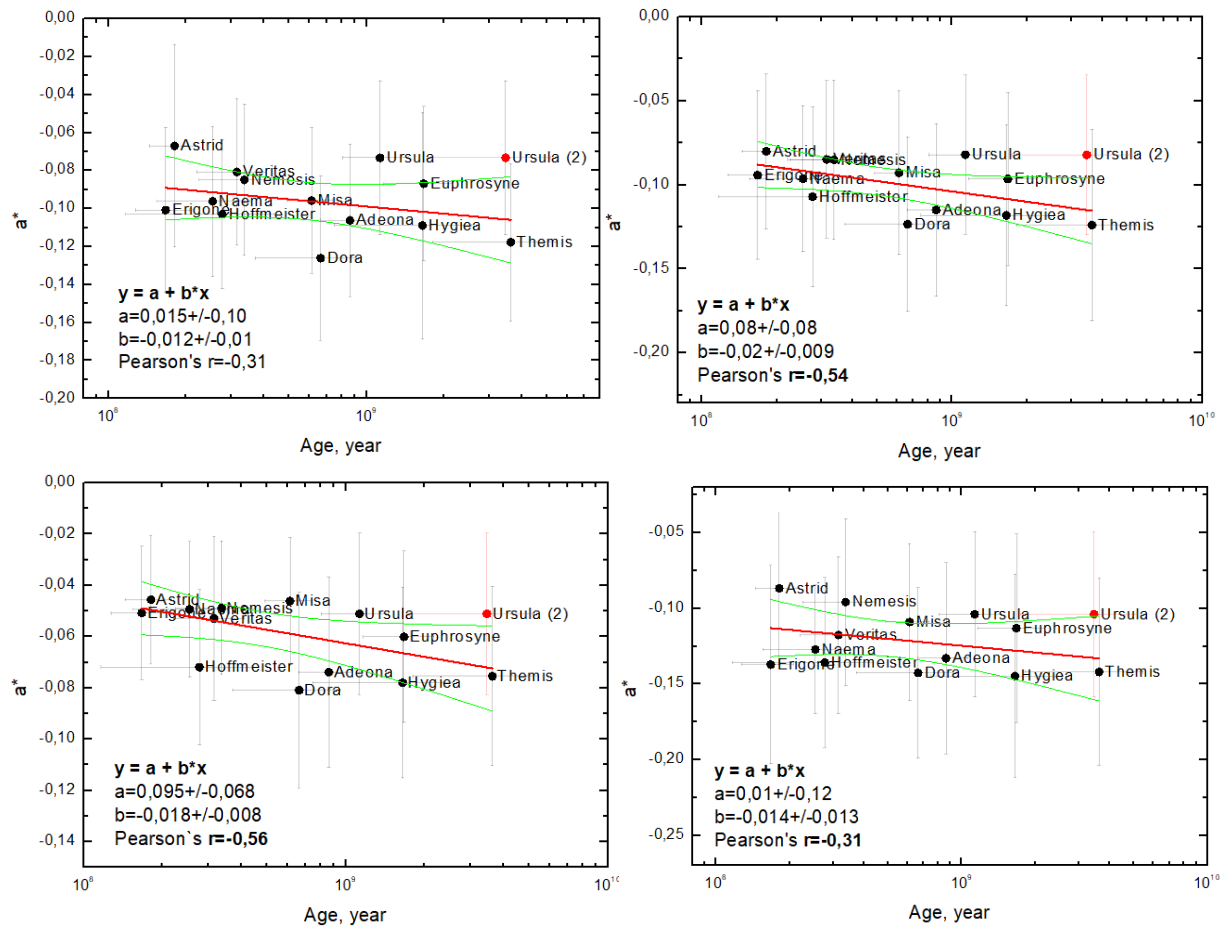


Рис.20. Залежність показника кольору a^* від віку для сімейств С-типу (зліва зверху- SDSS MOC4 , справа- SDSS(Sergeev) . Зліва знизу- GAIA (Sergeev), справа- SkyMapper (Sergeev)).

Зазначимо що варіації між окремими сімействами все ж зберігаються, та можуть бути пов'язані з різною часткою вторинних подій, особливостями складу або точністю фотометричних даних. Однак навіть за таких умов простежується загальний тренд, який можна інтерпретувати як індикатор довготривалого поверхневого "старіння" під впливом дії космічного вивітрювання.

3.3. Порівняння з попередніми дослідженнями

З метою перевірки отриманих у нашій роботі результатів розрахунку віку 24-х астероїдних сімейств, було проведено їх порівняння з результатами попередніх робіт, таких як роботи Спото [33] та Несворного [25] (рис.21 та 22). Обидві роботи є базовими у контексті розрахунків віку астероїдів, але мають деякі відмінності у методиках обчислень.

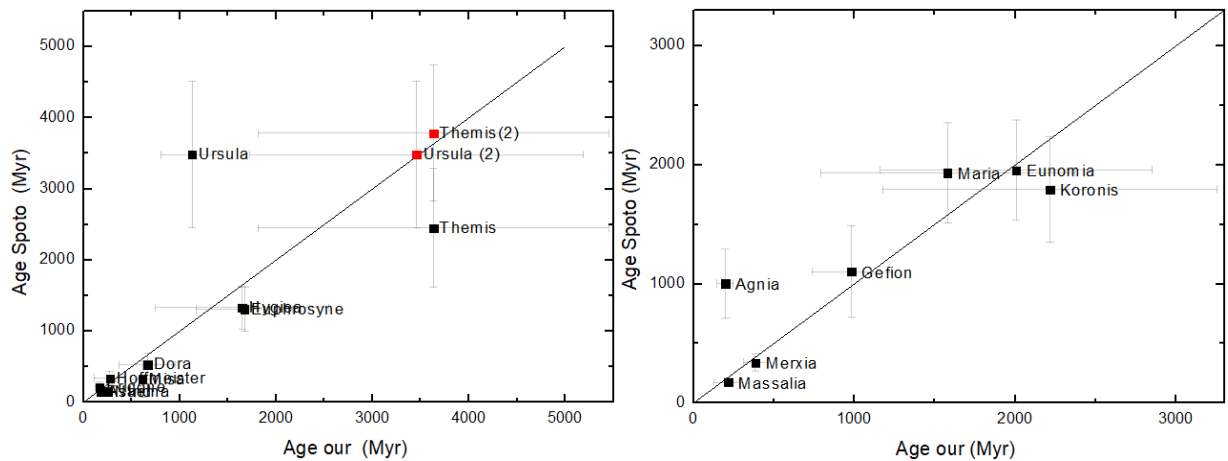


Рис.21. Порівняння розрахованих значень віку з результатами з статті Спото [33] (С-тип зліва, S-тип справа).

В нашій роботі ми розраховували вік кожного сімейства за допомогою визначених параметрів C та a_c , які були отримані з побудованих V-shape, з подальшим розрахунком за формулою, яка була запропонована Несворним у 2015 році [26]. Цей метод базується на аналізі ширини V-shape, з урахуванням середнього геометричного альбедо по сімейству, середньої щільності та центру V-shape на великій півосі.

В свою чергу в роботі Спото [33] і Несворного [25] частково застосовувався не тільки цей підхід, а ще й чисельне моделювання динамічної еволюції сімейств. Вони використовували так зване "зворотнє інтегрування" (backward integration), при якому відстежується положення членів сімейства в орбітальному просторі. Момент максимального перетину орбіт об'єктів приймався як точка катастрофічного руйнування материнського тіла. Це може пояснити деякі істотні відмінності у кінцевих результатах.

Порівняння результатів показало, що в переважній більшості випадків наші оцінки віку добре узгоджуються з попередніми, відрізняючись на рівні 10–20%, що є прийнятною похибкою з огляду на різні методи. Однак окремі сімейства (Ursula, Maria та Themis), демонстрували суттєве відхилення, проте ця різниця пояснюється різницею в підходах до розрахунків віку, а саме врахуванні більшої кількості параметрів (Спото) або зовсім використання зворотнього інтегрування орбіт у минуле.

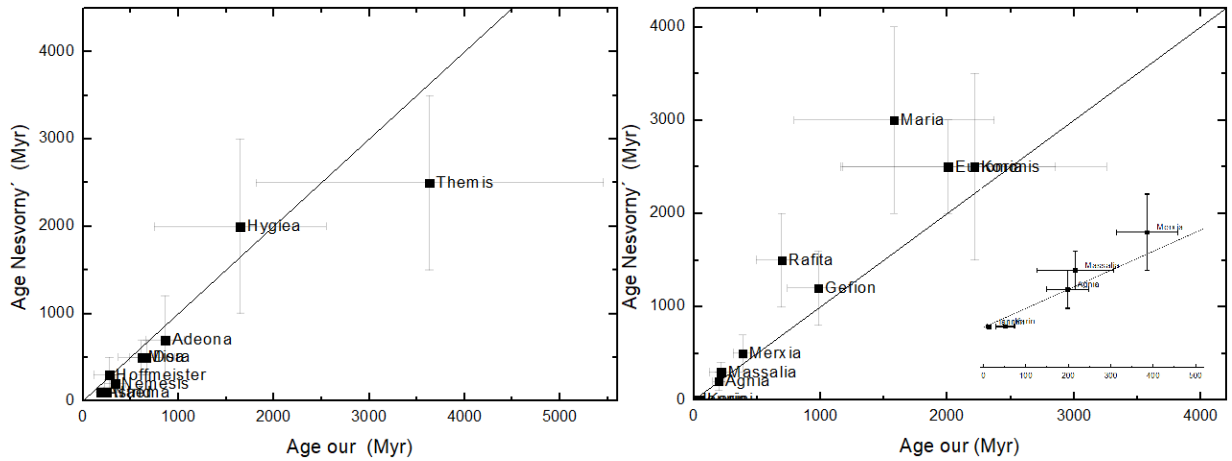


Рис.22. Порівняння розрахованих значень віку з результатами з статті Несворного [25] (С-тип зліва, S-тип справа).

Крім того, деякі розбіжності могли бути пов'язані з уточненими параметрами альbedo та щільності. Наприклад, в нашій роботі ми використовували фіксовані значення густини для С- і S-типів астероїдів з роботи Carry [5]. Таким чином, хоча окремі оцінки відрізняються, загальна відповідність результатів дозволяє стверджувати про достовірність отриманих нами розрахованих значень віку астероїдних сімейств.

ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі було здійснено аналіз проявів космічного вивітрювання на поверхні тіл сімейств S та C-типу. Для цього було використано чотири фотометричних каталоги SDSS MOC4, Gaia DR3, SkyMapper та SDSS (переоброблених Сергеевим), а також динамічні характеристики сімейств за каталогом Несворного [26]. Ключовими параметрами дослідження стали показник a^* як індикатор еволюції спектру поверхні та V-shape як інструмент оцінки віку сімейств.

Для розрахунку віку сімейств було застосовано метод побудови V-shape, з подальшим використанням формули з роботи Несворного [26]. Отримані значення були порівняні з результатами попередніх досліджень [26,33], і продемонстрували непогану узгодженість між результатами. Основні розбіжності можна пояснити методологічними відмінностями: зокрема, у роботі Спото було використано складніший підхід із урахуванням додаткових фізичних параметрів, частково запозичених із моделі еволюції Бенну.

Для сімейств S-типу було виявлено чітку тенденцію до зростання параметра a^* з віком, що узгоджується з моделлю космічного вивітрювання, та відповідає накопиченню нанофазного заліза ($npFe^0$) у реголіті. Побудовані графіки залежності a^* від віку демонструє збільшення нахилу спектру з часом. Одночасно з цим зберігаються окремі винятки, які можуть бути зумовлені особливостями складу тіл, просторовим розподілом, впливом вторинних зіткнень або похибками у вікових оцінках.

Для сімейств C-типу навпаки спостерігається нахил параметру a^* у протилежному напрямку з віком. Це може свідчити або про зовсім іншу природу процесів космічного вивітрювання на темних вуглецевих поверхнях, або про дуже повільну спектральну еволюцію, яку складно виявити в межах часової шкали <4 Gyr. Додатково, низьке альbedo та характерна спектральна «плоскість» тіл C-типу ускладнюють фотометричний аналіз. Отримані результати свідчать про відмінності в механізмах вивітрювання між C- та S-типами. Результати для C-типу підкреслюють потребу у подальших дослідженнях — зокрема, із залученням спектроскопічних спостережень та лабораторного моделювання, що дозволить краще зрозуміти природу вивітрювання на вуглецевих тілах.

Ці результати підтверджує висновки ранньої роботи Несворного [25], але розширює їх, спираючись на більшу кількість сімейств і чотири незалежні фотометричні каталоги.

Family	Age, myr	C	Average albedo	Albedo err	a* SDSS MOC4	a* err SDSS MOC4	a* SDSS Serg	a* err SDSS Serg	a* Gaia Serg	a* err Gaia Serg	a* Skm Serg	a* err Skm Serg
Adeona	863.67	6.50E-05	0.062	0.016	-0.106	0.040	-0.115	0.051	-0.074	0.037	-0.133	0.063
Astrid	181.19	1.25E-05	0.047	0.011	-0.067	0.053	-0.080	0.046	-0.046	0.025	-0.087	0.051
Dora	665.48	5.00E-05	0.056	0.014	-0.126	0.043	-0.123	0.052	-0.081	0.038	-0.143	0.056
Erigone	166.85	1.70E-05	0.053	0.013	-0.101	0.043	-0.094	0.050	-0.051	0.026	-0.137	0.065
Euphrosyne	1674.0 2	1.00E-04	0.058	0.015	-0.087	0.041	-0.096	0.052	-0.060	0.033	-0.113	0.062
Hoffmeister	277.13	1.90E-05	0.046	0.012	-0.103	0.039	-0.107	0.054	-0.072	0.030	-0.136	0.056
Hygiea	1649.2 5	1.10E-04	0.071	0.022	-0.109	0.060	-0.118	0.054	-0.078	0.037	-0.145	0.067
Misa	613.75	5.00E-05	0.054	0.014	-0.096	0.038	-0.093	0.049	-0.046	0.025	-0.109	0.052
Naema	254.38	1.80E-05	0.061	0.017	-0.096	0.039	-0.096	0.044	-0.049	0.026	-0.127	0.042
Nemesis	337.12	3.00E-05	0.074	0.022	-0.085	0.040	-0.085	0.047	-0.049	0.026	-0.096	0.055
Themis	3632.7 6	2.40E-04	0.069	0.020	-0.118	0.041	-0.124	0.057	-0.075	0.035	-0.142	0.062

Ursula	1128.9 9	7.00E-05	0.060	0.018	-0.073	0.040	-0.082	0.047	-0.051	0.031	-0.104	0.055
Ursula (2)	3459.6 4	2.00E-04	0.060	0.018	-0.073	0.040	-0.082	0.047	-0.051	0.031	-0.104	0.055
Veritas	314.88	2.00E-05	0.067	0.019	-0.081	0.038	-0.085	0.047	-0.053	0.032	-0.118	0.052

Family	Age, myr	C	Average albedo	Albedo error	a* SDSS MOC4	a* err SDSS MOC4	a* SDS S Serg	a* err SDSS Serg	a* Gaia Serg	a* err Gaia Serg	a* Skm Serg	a* err Skm Serg
Agnia	198.21	1.60E-05	0.236	0.061	0.045	0.044	0.044	0.086	0.048	0.059	0.043	0.086
Barcelona	238.62	2.40E-05	0.292	0.091	0.077	0.042	0.083	0.048	0.087	0.044	0.078	0.038
Eunomia	2006.7	1.90E-04	0.262	0.081	0.129	0.045	0.128	0.051	0.123	0.048	0.105	0.048
Gefion	983.26	8.00E-05	0.268	0.065	0.105	0.042	0.108	0.053	0.100	0.044	0.095	0.051
Iannini	13.09	1.30E-06	0.288	0.049	0.022	0.013	0.026	0.064	0.040	0.047	-0.046	0.030
Karin	51.05	3.50E-06	0.189	0.047	0.035	0.057	0.053	0.038	0.083	0.049	0.070	0.044
Koronis	2215.51	1.70E-04	0.238	0.060	0.092	0.039	0.099	0.054	0.090	0.040	0.086	0.054

Maria	1580.2 7	1.60E-04	0.260	0.072	0.114	0.041	0.115	0.052	0.10 5	0.046	0.107	0.056
Massalia	216.39	2.40E-05	0.247	0.064	0.084	0.042	0.093	0.060	0.08 4	0.045	0.081	0.052
Merxia	385.66	3.20E-05	0.233	0.059	0.084	0.043	0.082	0.040	0.08 8	0.045	0.073	0.044
Rafita	694.11	7.00E-05	0.255	0.064	0.086	0.041	0.094	0.047	0.09 1	0.043	0.094	0.054

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ali-Lagoa, V., Delbo, M., & Licandro, J. (2015). Physical properties of B-type asteroids from WISE data. *Astronomy & Astrophysics*, 583, A15.
2. Bolin, B. T., Delbo, M., Morbidelli, A., & Walsh, K. J. (2017). Yarkovsky V-shape identification of asteroid families. *Icarus*, 282, 290–312.
3. Bus, S. J., & Binzel, R. P. (2002). Phase II of the SMASS asteroid spectroscopic survey. *Icarus*, 158, 106–145.
4. Binzel, R. P., Morbidelli, A., Merouane, S., DeMeo, F. E., Birlan, M., Vernazza, P., Thomas, C. A., Rivkin, A. S., Bus, S. J., & Tokunaga, A. T. (2010). Earth encounters as the origin of fresh surfaces on near-Earth asteroids. *Nature*, 463(7279), 331–334.
5. Carry, B. (2012). Density of asteroids. *Planetary and Space Science*, 73(1), 98–118.
6. Carruba, V., & Nesvorný, D. (2016). A multidomain approach to asteroid families' identification. *MNRAS*, 433(3), 2075–2096.
7. Chapman, C. R. (2004). Space weathering of asteroid surfaces. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 539–567.
8. Cellino, A., Zappalà, V., Doressoundiram, A., Di Martino, M., Bendjoya, P., Dotto, E., & Migliorini, F. (2001). The puzzling case of the Nysa–Polana family. *Icarus*, 152(2), 225–237.
9. DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., & Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared/ *Icarus*, 202, 160–180.
10. Galluccio, L., Delbo, M., De Angeli, F., Pauwels, T., Tanga, P., Mignard, F., Cellino, A., Brown, A. G. A., Muinonen, K., et al. (2023). Gaia Data Release 3 – Reflectance spectra of Solar System small bodies. *Astronomy & Astrophysics*, 674, A35.

11. Gradie, J. C., Chapman, C. R., & Williams, J. G. (1979). Families of minor planets. *Asteroids*, 359-390.
12. Hapke, B. (2001). Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E5), 10039–10073.
13. Hapke, B. (2002). Asteroid space weathering and regolith evolution. In: Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. (Eds.), *Asteroids III*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 183–193.
14. Hendrix, A. R., & Vilas, F. (2006). The Effects of Space Weathering at UV Wavelengths: S-Class Asteroids. *The Astronomical Journal*, 132(3), 1396–1404.
15. Hiroi, T., Abe, M., Kitazato, K., et al. (2006). Developing space weathering on the asteroid 25143 Itokawa. *Nature*, 443(7107), 56–58.
16. Ivezić, Ž., et al. (2001). Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *Astronomical Journal*, 122, 2749.
17. Jaramillo-Correa, C., Pearson, N. C., Domingue, D., Savin, D. W., Clark, R. N., Vilas, F., & Hendrix, A. R. (2024). Simulated solar-wind-induced space weathering of olivine powders: Spectral alterations in the ultraviolet, visible, and near-infrared. *The Planetary Science Journal*, 5(4), 100.
18. Jedicke, R., et al. (2004). An age–color relationship for main-belt S-complex asteroids. *Nature*, 429, 275–277.
19. Keller, L. P., & McKay, D. S. (1997). The nature and origin of rims on lunar soil grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(11), 2331–2341.
20. Lantz, C., Clark, B. E., Barucci, M. A., & Lauretta, D.S. (2013). Evidence for the effects of space weathering spectral signatures on low albedo asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 554, A138.
21. Lauretta, D. S., et al. (2017). OSIRIS-REx: Sample return from Bennu. *Space Science Reviews*, 212, 925–984.

22. Masiero, J. R., et al. (2011). Main belt asteroids with wise/neowise. I. Preliminary albedos and diameters. *Astronomical Journal*, 741, 68.
23. Matsumoto, T., Hasegawa, S., Nakao, S., Sakai, M., & Yurimoto, H. (2018). Population characteristics of submicrometer-sized craters on regolith particles from asteroid Itokawa. *Icarus*, 303, 22-33.
24. Nesvorný, D., Bottke, W. F., Dones, L., & Levison, H. F. (2002). The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature*, 417(6890), 720–722.
25. Nesvorný, D., et al. (2005). Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey. *Icarus*, 173, 132–152.
26. Nesvorný, D., Brož, M., & Carruba, V. (2015). Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families. In P. Michel, F. DeMeo, & W. Bottke (Eds.), *Asteroids IV* (pp. 297–321). University of Arizona Press.
27. Noble, S. K., Pieters, C. M., & Keller, L. P. (2007). An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering. *Icarus*, 192(2), 629–642.
28. Noguchi, T., et al. (2011). Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles. *Science*, 333(6046), 1121–1125.
29. Parker, A. H., et al. (2008). The size distributions of asteroid families in the SDSS Moving Object Catalog 4. *Icarus*, 198, 138–155.
30. Pieters, C. M., et al. (2000). Space weathering on airless bodies: Resolving a mystery with lunar samples. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(5), 1101–1107.
31. Sergeyev, S., & Carry, B. (2021). A million asteroid observations in the Sloan Digital Sky Survey. *A&A*, 652, A59.
32. Sergeyev, S., et al. (2022). Multifilter photometry of Solar System objects from the SkyMapper Southern Survey. *A&A*, 658, A109.
33. Spoto, F., Milani, A., & Knežević, Z. (2015). Asteroid family ages. *Icarus*, 257, 275–289.

34. Taylor, L. A., Pieters, C. M., & Keller, L. P. (2001). Lunar mare soils: Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E11), 27985–27999.
35. Tholen, D. J. (1984). Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. Ph.D thesis, Univ. of Arizona.
36. Vokrouhlický, D., Brož, M., Morbidelli, A., et al. (2006). Yarkovsky footprints in the Eos family. *Icarus*, 182, 92–117.
37. Willman, M., et al. (2008). Reddening and space weathering of asteroid surfaces. *Icarus*, 195, 663–673.
38. Zappalà, V., Bendjoya, P., Cellino, A., Farinella, P., & Froeschlé, C. (1990). Asteroid families. I-Identification by hierarchical clustering and reliability assessment. *Astronomical Journal*, 100, 2030–2046.