

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

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

17.05.2024 р.



Оцінка « відмінно »

Голова ЕК
проф. Віктор ТИШКОВЕЦЬ

24.05.2024 р.



Кравцова Марія Володимирівна

**«Фазові залежності блиску низькоальбедних астероїдів (439) Ohio та
(1390) Abastumani»**

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



(підпис студента)

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



(підпис керівника)

Харків 2024

АНОТАЦІЯ

Кравцова М.В. Фазові залежності блиску низькоальбедних астероїдів (439) Ohio та (1390) Abastumani

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

У дипломній роботі проведено обробку зображень двох низькоальбедних астероїдів – (439) Ohio та (1390) Abastumani - зовнішньої частини головного поясу, отриманих за результатами спостережень протягом 20 і 16 ночей відповідно. За отриманими даними було визначено абсолютні зоряні величини, одержано нові дані про амплітуди кривих блиску та показники кольору цих астероїдів, побудовано складені криві блиску та фазові залежності блиску об'єктів дослідження. Аналіз фазових залежностей цих астероїдів показав відсутність нелінійного зростання блиску поблизу опозиції, що дало виявити ще два нові об'єкти без опозиційного ефекту. Порівняльний аналіз фотометричних властивостей 47 низькоальбедних астероїдів виявив ряд факторів, що можуть обумовлювати таку поведінку блиску на малих фазових кутах. Ці результати відкривають нові перспективи для подальших досліджень та сприяють загальному розумінню природи відсутності ОЕ.

Ключові слова: абсолютна зоряна величина, низькоальбедні астероїди, опозиційний ефект, фазова крива блиску.

Abstract

Kravtsova M.V. Phase dependences of brightness of low-albedo asteroids (439) Ohio and (1390) Abastumani

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

In this diploma work, the images of two low-albedo asteroids - (439) Ohio and (1390) Abastumani - of the outer part of the main belt, obtained from observations over 20 and 16 nights, respectively, were processed. The absolute magnitudes were determined from the data obtained, new data on the amplitudes of the light curves and color indices of these asteroids were obtained, and composite light curves and phase dependences of the light of the objects under study were constructed. The analysis of the phase dependences of these asteroids showed the absence of a nonlinear increase in the light near the opposition, which allowed us to identify two more new objects without an opposition effect. A comparative analysis of the photometric properties of 47 low-albedo asteroids has revealed a number of factors that may account for this behavior of the brightness at small phase angles. These results open up new perspectives for further research and contribute to the general understanding of the nature of the lack of OE.

Keywords: absolute magnitude, low-albedo asteroids, opposition effect, magnitude-phase dependence.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
РОЗДІЛ 1. Фізичні характеристики низькоальбедних астероїдів	
1.1 Розподіл діаметрів низькоальбедних астероїдів	6
1.2. Розподіл альbedo низькоальбедних астероїдів.....	9
1.3 Спектральна класифікація низькоальбедних астероїдів.....	10
1.4 Фазові залежності блиску низькоальбедних астероїдів.....	15
РОЗДІЛ 2. Методика дослідження фазових залежностей блиску	
2.1 Попередня редукція зображень.....	20
2.2 Апертурна фотометрія та калібровка фотометричних даних	21
2.3 Побудова складеної кривої блиску.....	24
2.4 Побудова фазової залежності блиску.....	25
РОЗДІЛ 3. Порівняльний аналіз фазових залежностей блиску астероїдів з відсутнім опозиційним ефектом	
3.1 Фазова залежність блиску астероїда (439) Ohio	27
3.2 Фазова залежність блиску астероїда (1390) Abastumani.....	30
3.3 Порівняльний аналіз фазових залежностей блиску астероїдів з відсутнім опозиційним ефектом.....	34
Висновки.....	40
Список використаної літератури.....	41
Додаток 1.....	47
Додаток 2.....	48

ВСТУП

Астероїди, невеликі небесні тіла, що обертаються навколо Сонця, є важливим об'єктом дослідження в астрономії. Вони є рештками формування нашої Сонячної системи і містять цінну інформацію про її ранню історію.

Астероїди, поверхня яких складається з примітивної речовини, що не пройшла температурний розігрів на початковому етапі еволюції, мають дуже низьке альbedo поверхні, яке не перевищує 10-11%. Більшість з таких астероїдів знаходяться у зовнішній частині Головного поясу ($a > 2.5$ а.о.).

Вивчення фізичних параметрів таких астероїдів виконується різними методами, у тому числі і з використанням фазових залежностей блиску. Фазова залежність блиску конкретного астероїда є наслідком процесів розсіяння світла у реголітовому шарі його поверхні. Оскільки фазові залежності блиску астероїдів у межах одного композиційного типу подібні, це дає змогу класифікувати астероїди за типами, використовуючи параметри їх фазових залежностей. Крім того, нахил лінійної частини залежності має кореляцію з альbedo і дає можливість визначати альbedo незалежним чином. На жаль, для низькоальбедних астероїдів, діапазон альbedo яких лежить у межах $0.03 \div 0.11$, детальні фазові залежності блиску були одержані для відносно невеликої кількості таких об'єктів. Незважаючи на те, що нахили лінійної частини фазової залежності цих астероїдів схожі між собою, діапазон амплітуд опозиційного ефекту (ОЕ) для них змінюється суттєво ($0.02 \div 0.25$ зор. вел., [51]) та навіть виявлено деяку кількість астероїдів, у яких з точністю до похибок спостережень відсутній опозиційний ефект. Щоб виявити причини таких розходжень у амплітуді ОЕ, необхідні нові якісні дані з фазових залежностей блиску низькоальбедних астероїдів, особливо для тих, у яких немає опозиційного ефекту. Саме тому основною метою роботи було дослідження фазових залежностей блиску двох низькоальбедних астероїдів (439) Ohio та (1390) Abastumani, спостереження яких було проведено в широкому діапазоні фазових кутів, що включають і гранично малі значення

($\alpha < 1$ град), а також провести порівняльний аналіз їх фазових залежностей з іншими низькоальбедними астероїдами.

Об'єкт дослідження: низькоальбедні астероїди зовнішньої частини Головного поясу (439) Ohio та (1390) Abastumani.

Предмет дослідження: фазові залежності блиску досліджуваних тіл.

Для вирішення цієї мети ставилось декілька основних завдань:

1. Провести огляд наукової літератури щодо фізичних властивостей астероїдів з низьким альбедо та їх спектральної класифікації.
2. Опанувати методику дослідження фазових залежностей блиску астероїдів, включаючи обробку спостережних даних, побудову складених кривих та фазових залежностей блиску.
3. Провести обробку спостережень, виконати аналіз отриманих даних та зробити висновок щодо характеру фазової залежності блиску астероїдів (439) Ohio та (1390) Abastumani.
4. Виконати порівняльний аналіз фазових залежностей блиску астероїдів (439) Ohio та (1390) Abastumani з іншими низькоальбедними астероїдами та сформуванню бази даних астероїдів у яких відсутній опозиційний ефект.

Актуальність дипломної роботи полягає в тому, що вивчення фазових залежностей блиску астероїдів є важливою складовою для розуміння процесів світлорозсіяння та механізмів формування опозиційного ефекту в реголітовому шарі. Дослідження низькоальбедних астероїдів є особливо цінним з космогонічної точки зору, оскільки вони надають інформацію про ранні етапи утворення та еволюції Сонячної системи.

РОЗДІЛ 1. Фізичні властивості низькоальбедних астероїдів

1.1 Діаметри низькоальбедних астероїдів

Перші уявлення про розмір астероїда отримують із фотометричних оцінок блиску астероїда під час його виявлення. Блиск визначається середньою відбивною здатністю астероїда, тобто альбедо, і його розміром. Тому, щоб на підставі виміряного блиску астероїда отримати оцінку його розміру, необхідно задати найімовірніше значення його альбедо. Якщо відомий тип астероїда, то задають середнє значення альбедо для даного типу астероїдів і отримують вже більш точне значення розміру (діаметра) астероїда. Однак і ця оцінка є досить наближеною. Лише для відносно невеликої кількості астероїдів вдалося виміряти їхні діаметри безпосередньо з Землі, оскільки астероїди мають відносно невеликі кутові розміри, які можна розділити за допомогою великих телескопів, розташованих на Землі. Лише Церера має максимальний кутовий розмір ~ 0.8 кутової секунди [18], а більшість астероїдів мають кутові розміри менше 0.01 кутової секунди [29]. Як і очікувалося, набагато простіше безпосередньо вимірювати діаметри астероїдів з космічних апаратів.

Найпоширенішим прямим способом вимірювання діаметра астероїда з Землі є оцінка його розміру при покритті зорі астероїдом [42]. Вимірявши час, протягом якого астероїд закриває зорю, і знаючи відстань до нього та швидкість його руху, можна обчислити діаметр. Приблизно для 900 різних астероїдів були виміряні діаметри за допомогою цього методу використовуючи понад 2000 спостережень.

Для вимірювання діаметрів астероїдів також використовували прямі зображення. Однак телескопи повинні бути відносно великими, оснащеними адаптивною оптикою або знаходитися в космосі (наприклад, космічний телескоп "Габбл") [27].

Найбільш масивний обсяг даних про діаметри астероїдів був отриманий за даними в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль, який отримано супутником Wise [60]. Як видно з графіку розподілу кількості астероїдів в залежності від діаметру (рис. 1.1), зі зменшенням діаметру майже лінійно збільшується кількість об'єктів подібного розміру у логарифмічній шкалі.

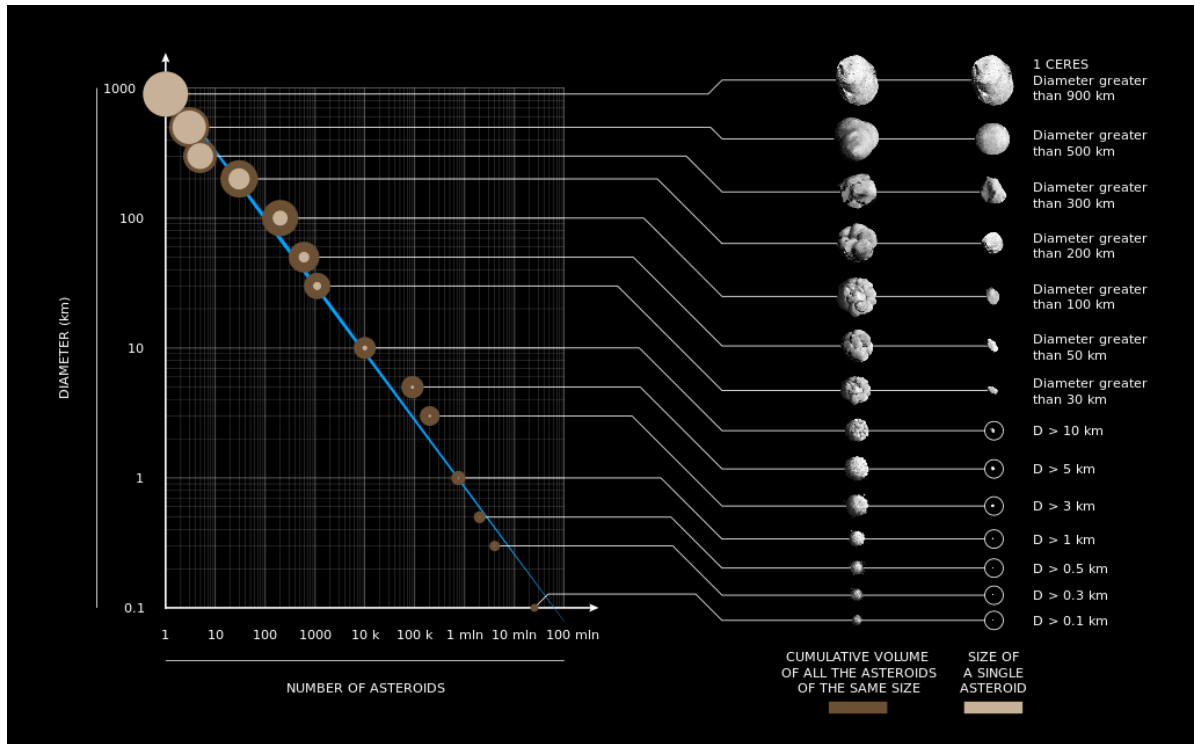


Рис. 1.1 Розподіл астероїдів за діаметрами [11].

Діаметри астероїдів з низьким альбедо можуть знаходитися в різних межах, оскільки їх розміри варіюються у значному діапазоні. Проте, для більш точної характеристики можна зазначити, що діаметри таких астероїдів зазвичай лежать у діапазоні від кількох десятків метрів до кількох сотень кілометрів. На найменший кінець розподілу за діаметрами входять маленькі астероїди, які можуть мати діаметр близько кількох десятків метрів або менше.

На більший кінець розподілу за діаметрами входять значно більші низькоальбедні астероїди. На відміну від малих астероїдів, які, ймовірно, є продуктами руйнівних зіткнень, найбільші астероїди головного поясу - це протопланети, які були надто великими, щоб бути зруйнованими і розсіяними. Їхнє зростання до повнорозмірних планет земного типу припинилося, коли

пояс астероїдів вичерпав свою масу через швидке формування Юпітера на початку історії формування Сонячної системи.

На рис. 1.2-1.4 зображені найбільші низькоальбедні астероїди, а саме: 1 Ceres (974 км), 10 Hygeia (429 км), 19 Fortuna (223 км), 24 Themis (202 км), 130 Elektra (198 км). Ці дані отримані за результатами космічних місій та наземних спостережень на телескопах VLT і Кеєк та модельних розрахунків [63-65,68,69].



Рис.1.2 Зображення астероїдів: зліва 1 Ceres [63], справа 10 Hygeia [68]

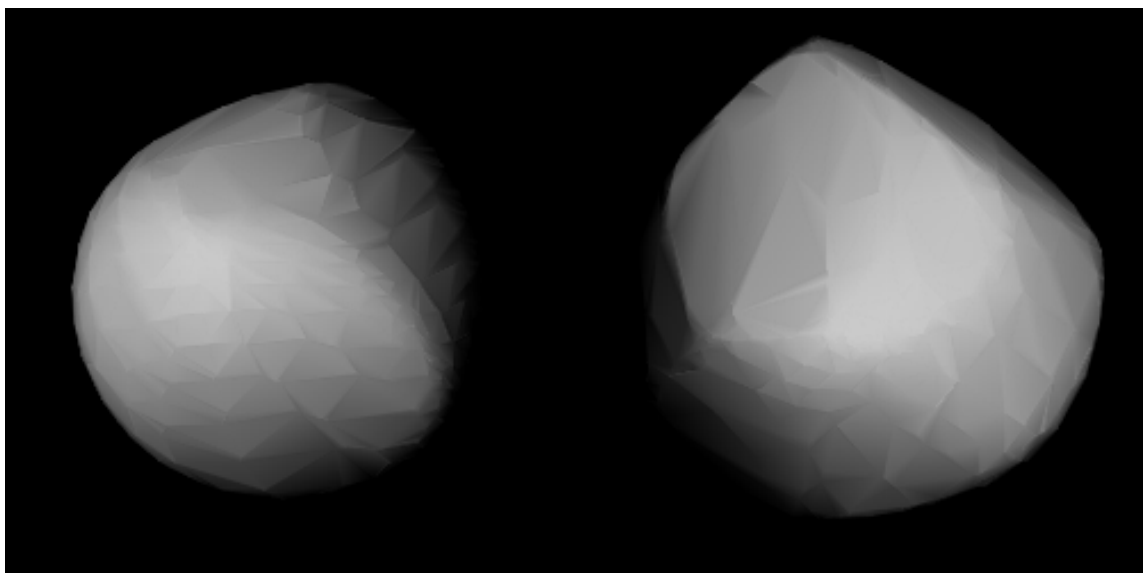


Рис. 1.3 3D-моделі астероїдів: зліва 19 Fortuna [65] та справа 24 Themis [69]

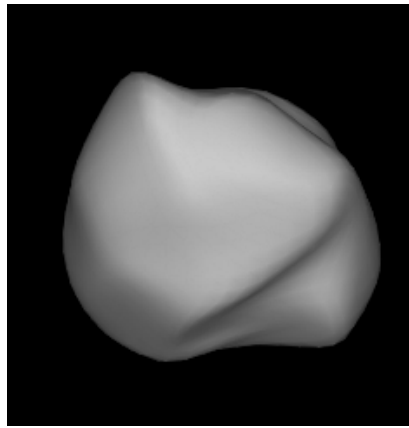


Рис.1.4 Астероїд 130 Elektra [64]

1.2 Альbedo низькоальбедних астероїдів

Однією з основних оптичних характеристик поверхонь астероїдів є їх альbedo, яка визначає, наскільки світлою або темною є поверхня. На рис.1.5 показано графік розподілу нахилу астероїда відносно півосі з додатковим означенням кольором діапазону альbedo.

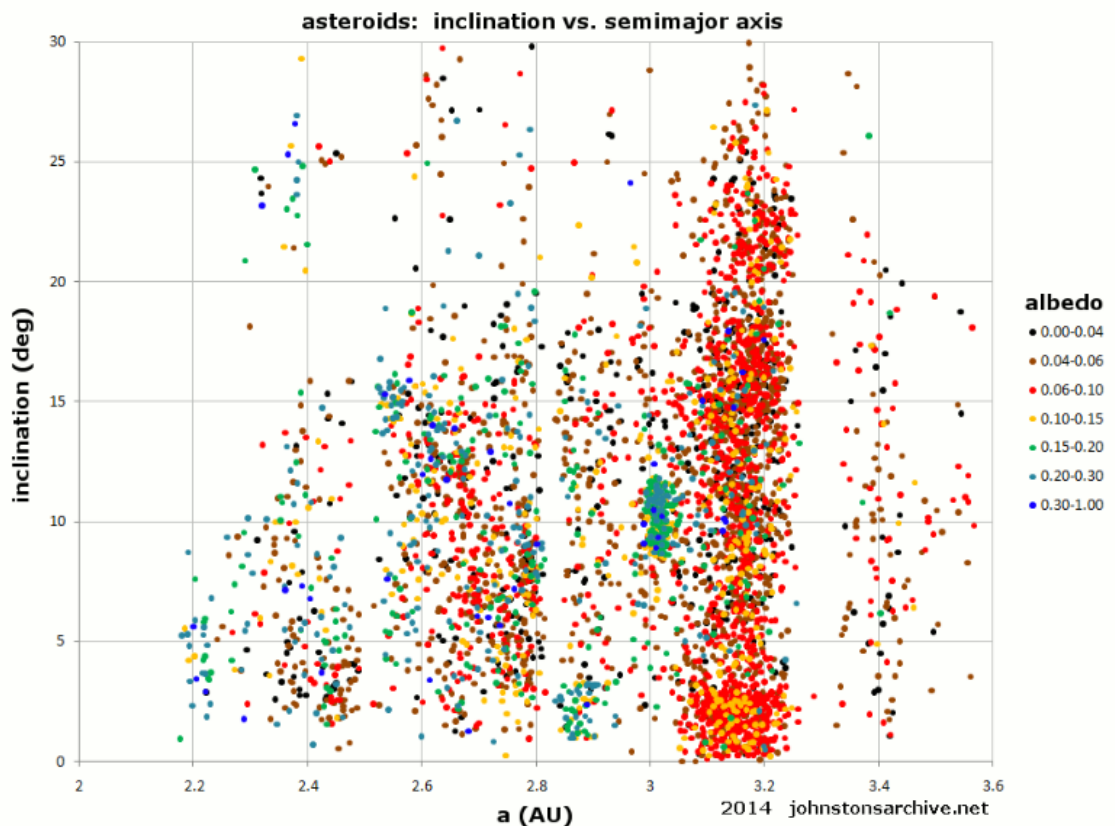


Рис.1.5 Розподіл нахилу астероїда відносно півосі, кольори позначають діапазони альbedo. [62]

Альbedo астероїдів коливається від 0.01 до понад 0.5 і загалом астероїди розділяють на три групи: низькоальбедні (0.02-0.12), середньоальбедні (0.13-0.35) і високоальбедні (понад 0.35). Графік розподілу альbedo вибірки низькоальбедних астероїдів головного поясу в залежності від значення великої півосі зображено на рис. 1.6.

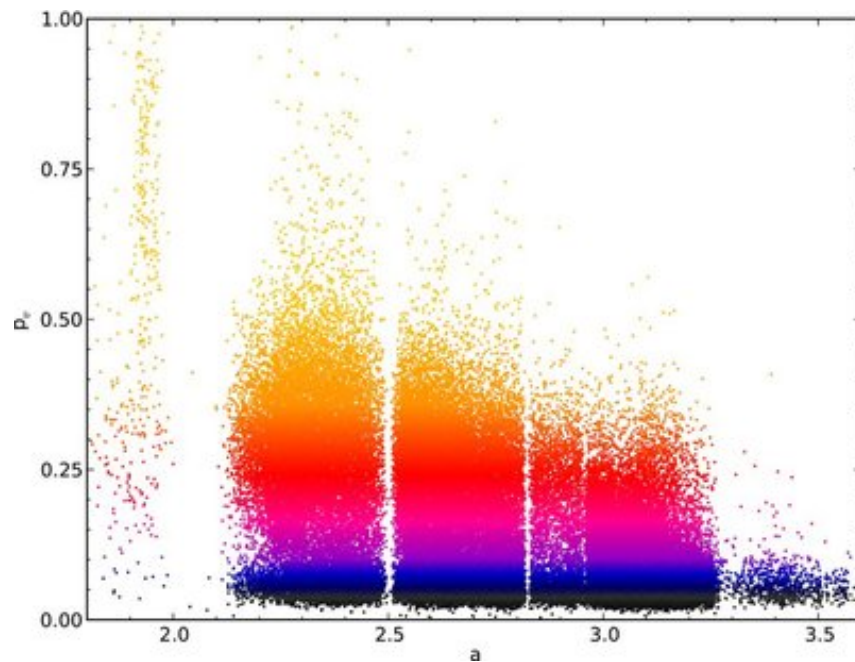


Рис.1.6 Розподіл астероїдів за великою піввісю. Кольори, позначені тут, рівномірно розподілені у просторі $\log(p_v)$. [39]

1.3 Спектральна класифікація низькоальбедних астероїдів

Спектральний тип астероїда визначається на основі його спектра відбиття, кольору, а іноді й альbedo. Вважається, що ці типи відповідають складу поверхні астероїда. Для малих тіл, які не мають внутрішньої диференціації, поверхневий і внутрішній склад імовірно подібний, тоді як великі тіла, такі як Церера і Веста, як відомо, мають внутрішню структуру. Протягом багатьох років було проведено низку досліджень, які призвели до створення різних таксономічних систем, таких як класифікації Толена, SMASS та Баса-Демео [56, 15, 6].

Спектральні властивості кожного таксономічного типу визначаються дещо по-різному в кожній таксономії.

Таблиця 1.1 Таксономічна класифікація астероїдів [6,15,56]

Tholen Class	SMASSII (Bus Class)	Альbedo	Спектральні властивості
<u>A</u>	A	середнє	Дуже крутий червоний нахил коротше 0,75 мкм; помірно глибока лінія поглинання довше 0,75 мкм.
<u>B, F</u>	B	низьке	Лінійні, загалом без особливостей спектри. Відмінності в особливостях УФ поглинання та наявність/відсутність вузької смуги поглинання біля 0,7 мкм.
<u>C, G</u>	C, Cb, Ch, Cg, Chg	низьке	Лінійні, загалом без особливостей спектри. Відмінності в особливостях УФ поглинання та наявність/відсутність вузької смуги поглинання біля 0,7 мкм.
<u>D</u>	D	низьке	Відносно безхарактерний спектр з дуже крутим червоним нахилом.
<u>E, M, P</u>	<u>X</u> , Xc, Xe, Xk	від низького (P) до дуже високого (E)	Загалом безхарактерний спектр з червонуватим нахилом; відмінності в тонких особливостях поглинання та/або спектральній кривизні та/або піковому відносному відбитті.
<u>Q</u>	Q	середнє	Червонуватий нахил до 0,7 мкм; глибока, округла лінія поглинання до 0,75 мкм.
<u>R</u>	R	середнє	Помірний червонуватий нахил вниз 0,7 мкм; глибоке поглинання вздовж 0,75 мкм.
<u>S</u>	S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr	середнє	Помірно крутий червонуватий нахил вниз від 0,7 мкм; помірне і круте поглинання вздовж 0,75 мкм; пік відбиття на 0,73 мкм. Підгрупи шин проміжні між класами S і A, K, L, Q, R.
<u>T</u>	T	низьке	Помірно червонуваті коротше 0,75 мкм; далі плоскі.

Історично, найбільшого поширення набула класифікація Толена [55], заснована на кластерному аналізі результатів восьмиколірної фотометрії 589

астероїдів (рис. 1.6). Основним джерелом інформації про мінеральний склад речовини поверхонь астероїдів є спектральні спостереження у видимій та ІЧ-областях спектра, а інтерпретація цих даних ґрунтується здебільшого на порівнянні їх із відповідними лабораторними спектрами метеоритів і земних мінералів. Такі дослідження низькоальбедних астероїдів показали, що їхня речовина відповідає водовмісним вуглистим хондритам типів CI і CM. Ці хондрити містять відносно багаті на залізо гідратовані силікати (філосилікати) і мінерали групи серпентину [33].

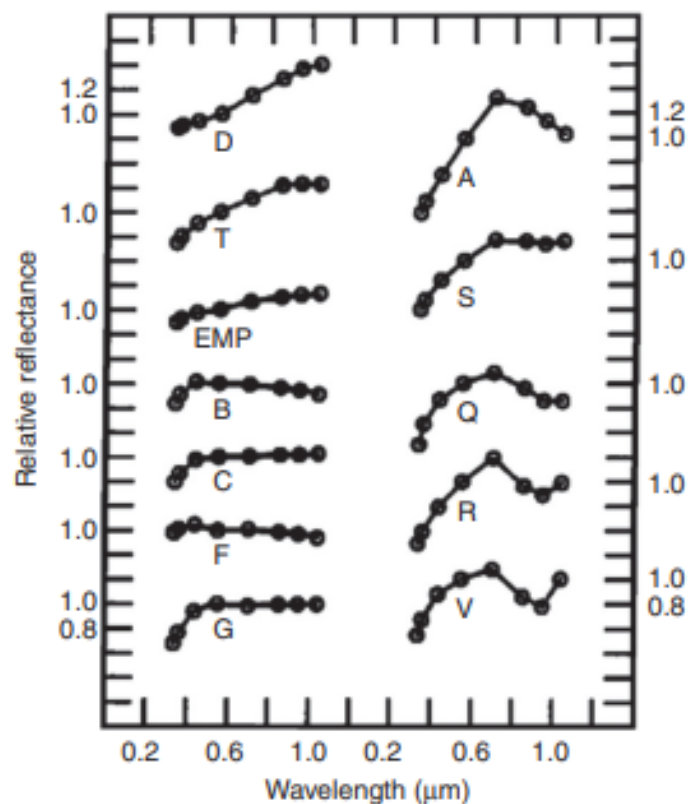


Рис. 1.6 Спектри відбиття для астероїдів по класифікації Толена [26]

Серед низькоальбедних астероїдів переважають об'єкти таких спектральних типів: С, В, Ch, X, Р, D. Тому, докладніше розглянемо особливості саме цих типів астероїдів.

Астероїди **С-комплексу**, як правило, мають слабкі смуги поглинання в ультрафіолетовій та видимому діапазонах довжин хвиль і відносно безхарактерні спектри від ~ 1 до $\sim 2,5$ мкм, які мають від синюватого до злегка червонуватого спектрального нахилу.

До тіл С-комплексу DeMeo та ін. (2009) [15] відносять об'єкти В, С, Сб, Сg та Сgh об'єкти. Приблизно 13% класифікованих астероїдів за DeMeo та ін. (2009) є частиною С-комплексу.

Традиційно, об'єкти С-комплексу пов'язували з вуглистими хондритами (наприклад, Johnson та Fanale, 1973 [28]) або термічно метаморфізованими вуглистими хондритами [25,44]. Два найбільші об'єкти в головному поясі належать до С-складних тіл: карликові планети (1) Церера (діаметр ~950 км) і (2) Паллада (діаметр ~530 км).

Астероїди **типу В** мають блакитнуваті спектральні нахили на довжинах хвиль ~0,5 мкм (Таблиця 1.1).

Янг і Джуїтт (2010) [61] відзначили, що низка астероїдів, які мають орбіти, що узгоджуються з орбітами з кометами або пов'язані з метеоритними потоками, були класифіковані як В-типи, що означає, що ці об'єкти могли спочатку містити значну кількість водяного льоду. Це узгоджується з ідеєю, що між темними астероїдами і кометами існує зв'язок [20]

Янг і Джуїтт (2010) [61] також виявили, що увігнуті форми спектрів ряду В-типів в ближньому інфрачервоному діапазоні узгоджуються з широкою особливістю поглинання на 1 мкм, що притаманне мінералом з магнетитом.

С- об'єкти з особливістю на ~0,7 мкм позначаються символом "h". Ця смуга, як правило, зустрічається в спектрах хондритів SM2 [7]. Об'єкти зі смугою ~0,7 мкм майже завжди мають смугу 3 мкм [45,46, 59] , що узгоджується з цим зв'язком з хондритами SM. Х-типи (13) Egeria і (19) Fortuna спочатку були відзначені деякими вченими як спектрально подібні до хондритів SM у видимій та ближній інфрачервоній області, а також мають довжину смуги поглинання 3 мкм, що узгоджується з хондритами SM2. Круїкшанк і Браун (1987) [12] виявили смугу поглинання ~3,4 мкм у Ch-типу (130) Elektra, яку Толен (1984) [55] спочатку класифікував як G-тип. Ця смуга поглинання, як стверджувалося, пов'язана з режимом розтягування С-Н в органічних речовинах. Однак ця особливість не була виявлена [13] в більш пізніх спектрах Elektra або в спектрах ряду спостережуваних G-, P- чи D-типів.

Cruikshank та ін. (2002) [13] стверджують, що ця смуга може бути відсутня в спектрах астероїдів через космічне вивітрювання, яке могло з часом дегідрогенізувати C-H-вмісні вуглеводні через взаємодію з сонячним вітром.

Астероїди **X-комплексу** мають червонуваті спектральні нахили у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Толен (1984) [55] поділив астероїди X-комплексу на на основі візуального альбедо на E-, M- і P-типи. E-типи мають високе візуальне альбедо, M-типи мають помірне візуальне альбедо, а P-типи мають низьке візуальне альбедо.

Історично склалося так, що E-тип пов'язаний з матеріалом, багатим на енстатит, M-тип - з металевим залізом, а **P-типи** - з матеріалом, багатим на органіку, через їхні відповідні видимі альбедо і відносно пласким спектром у видимій і ближній інфрачервоній області. Оскільки таксономія Bus-DeMeo не використовує візуальне альбедо, E-, M- і P-типи не визначаються в цій таксономії і замість цього X-типи поділяються відповідно до форми спектру.

P-типи часто зустрічаються в групі Хільди та серед юпітеріанських троянців. Близько чверті спостережуваних троянців [47] мають спектральні нахили, сумісні з астероїдами P-типу. Більшість астероїдів P-типу не мають смуги на 3 мкм [45]. Зазвичай вважається, що спектральні властивості астероїдів P-типу зумовлені органічними речовинами, які могли б почервоніти і потемніти на поверхні.

D-типи мають дуже червоні спектральні схили та надзвичайно низьке альбедо (Таблиця 1.1). Тип D є домінуючим таксономічним типом серед троянців Юпітера, а також поширені у зовнішньому головному поясі та серед астероїдів групи Гільди. Також спостерігалися D-типи у внутрішній частині Головного поясу [17].

Через дуже червоні спектральні нахили та низьке альбедо D-типи зазвичай пов'язані з багатим на органіку матеріалом [21], який може не бути присутнім у колекціях метеоритів через його крихку природу.

В наш час таксономічна класифікація астероїдів вдосконалюється за допомогою використання методів машинного навчання, а саме нейромереж, для розробки оптимальних моделей розподілу об'єктів.

Як і очікувалося, деякі таксономічні типи легше передбачити, ніж інші. Унікальні та виразні об'єкти V-типу майже ніколи не класифікуються неправильно, тоді як, наприклад, типи в межах комплексів S, C і X іноді класифікуються неправильно. Це природний наслідок того, що спектри астероїдів даних типів досить схожі і тому їх важко розрізнити за допомогою алгоритмів машинного навчання. Деяка помилкова класифікація також помітна між комплексами C і X, які часто мають схожі спектри, що відрізняються лише спектральним нахилом або альбедо [30].

Також, були опубліковані роботи, по перекласифікації астероїдів з неоднозначними спектральними типами C-X та ін. (наприклад, [10]).

У роботі [36] класифікація була виповнена на основі аналізу спектрів та альбедо астероїдів, що допомогло перенести об'єкти P-класу до астероїдів C-комплексу, хоча до цього, даний клас належав до об'єктів X-комплексу.

1.4 Фазові залежності блиску низькоальбедних астероїдів

Важливою характеристикою астероїда є зміна його видимої зоряної величини з кутом фази. Блиск астероїда збільшується за малих фазових кутів і зменшується при збільшенні кута фази. Зміна блиску може задаватись фазовим коефіцієнтом β , і зазвичай становить у середньому 0,035 (або близько того) зор. величин на градус.

Якби можна було використовувати фазовий коефіцієнт для всіх кутів до $\alpha = 0^\circ$ (рис. 1.7), то все було б добре. Але понад століття тому астрономи помітили, що планети та інші тіла стають яскравішими, ніж очікувалося, коли $\alpha < 10^\circ$, це явище назвали опозиційним ефектом, тому що планети або інші об'єкти, які перебувають за межами орбіти Землі під цими фазовими кутами, перебувають в опозиції - у точці, протилежній до Сонця по відношенню до

Землі. Типовий астероїд збільшує блиск додатково на 0.3 зор. величини понад збільшення, що вже враховане фазовим коефіцієнтом [5].

Залежність зоряної величини від фази є однією з основних фізичних характеристик астероїдів, отриманих за допомогою спостережень. Перш за все, вона дозволяє отримати абсолютну зоряну величину астероїда, яка є основою для визначення альbedo і діаметра. Фазова залежність містить інформацію про фізичні властивості поверхневого шару астероїда (тобто механізми розсіювання світла, альbedo, шорсткість, пористість і показник заломлення матеріалу). Воно також використовується для визначення значення фазового інтеграла для розрахунку альbedo і діаметрів астероїдів за випромінювальною здатністю в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль [39, 57].

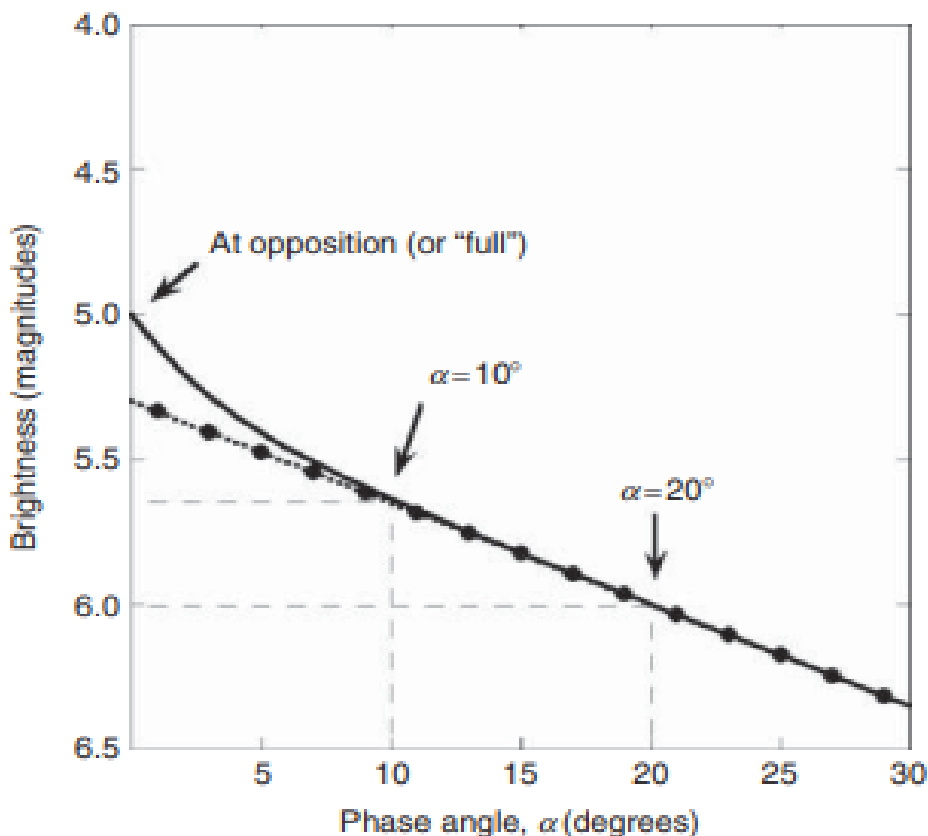


Рис.1.7 Зміна зоряної величини об'єкта від фазового кута [34].

Фазову залежність блиску астероїда умовно можна розділити на три ділянки: ділянку опозиційного ефекту (0÷8 град), лінійну ділянку (8÷80 град)

і ділянку нелінійного зменшення блиску ($80\div 180$ град). Усі три ділянки розрізняються для астероїдів із різною відбивною здатністю і формуються різною масштабною структурою поверхні: мікрорельєфом (масштаб до сотень мікрон), мезорельєфом (до десятків сантиметрів) і макрорельєфом (до десятих часток середнього радіуса астероїда).

Інформація про область опозиційного ефекту фазової залежності дає можливість попередньо класифікувати астероїди за типом речовини поверхні. Нахил лінійної частини фазової залежності блиску показує кореляцію з альбедо поверхні, завдяки чому ми можемо незалежно визначити альбедо. Крім того, область опозиційного ефекту виявилася діагностичною для визначення механізмів світлорозсіювання в реголітовому шарі безатмосферних об'єктів.

Встановлено, що поведінка блиску в діапазоні опозиційного ефекту (ОЕ) відрізняється для астероїдів з низьким, помірним і високим альбедо [5]. Максимальна амплітуда ОЕ спостерігається для астероїдів з помірним альбедо S і M-типу. Це пояснюється спільним впливом двох основних фізичних механізмів, що спричиняють ОЕ, таких як тіньовий ефект та когерентне зворотне розсіяння. Низькоальбедні астероїди демонструють найбільшу варіацію амплітуд ОЕ порівняно з середньо- та високоальбедними астероїдами. Деякі темні астероїди демонструють широкий ефект опозиції з досить великою амплітудою (наприклад, 10 Хігея, 24 Феміда [48, 23]), тоді як для деяких інших низькоальбедних астероїдів поведінка блиску практично лінійна аж до дуже малих фазових кутів. На основі поведінки зоряної величини при малих фазових кутах темні астероїди можна розділити на три групи (рис. 1.8) [49]:

а) практично лінійні залежності блиску від фазового кута при амплітуді $OE \leq 0.06$ mag;

б) широкий ефект опозиції, починаючи з фазового кута 6-7 град з амплітудою 0.15-0.25 mag;

в) вузький ефект опозиції, починаючи з фазового кута близько 4 градусів і досягаючи амплітуди 0.1-0.13 mag.

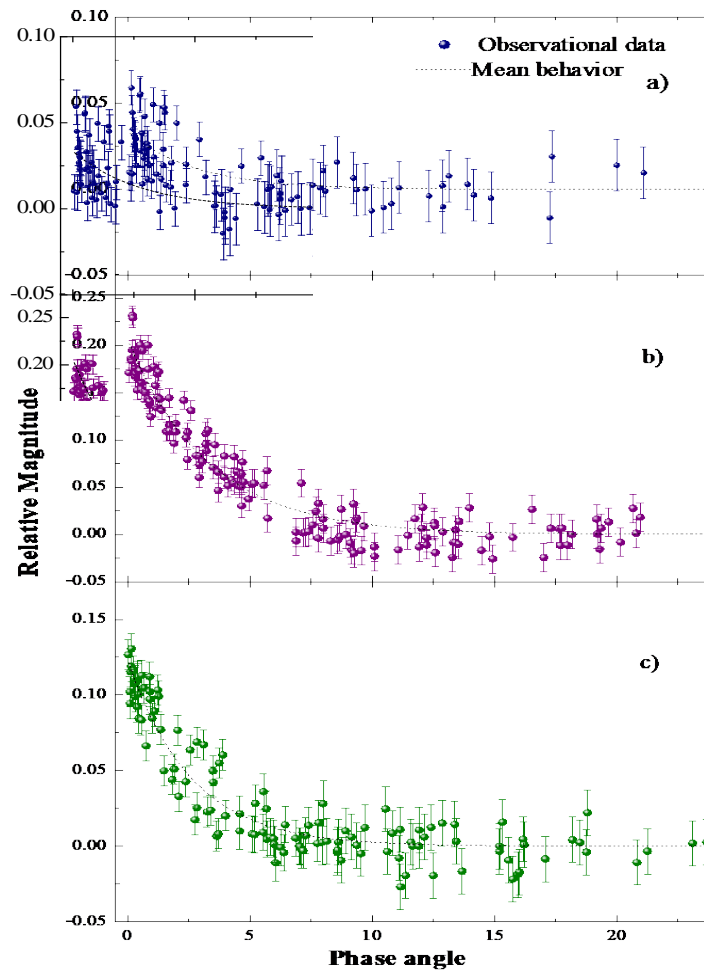


Рис. 1.8 Фазові залежності 3-х груп низькоальбедних астероїдів [49]

Астероїди, які не показують нелінійного збільшення блиску поблизу опозиції, як правило, мають дуже низьке поверхнєве альбедо (менше 0.05).

Серед астероїдів зовнішнього поясу, групи Гільди і Троянців Юпітера виявлено близько 20 таких астероїдів [53,54]. Не виключено, що їхню поведінку блиску формують лише однократне розсіювання та тіньовий ефект. Ці астероїди мають діапазон діаметрів від 50 до 200 км, а їхні фазові залежності блиску подібні з відмінностями в лінійних нахилах. Всі ці астероїди належать переважно до спектральних класів P і D, які мають спектри без помітних смуг поглинання з помірним і високим нахилом у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах [15,16]. Їхні спектри подібні до спектрів

вуглецевих хондритних метеоритів, особливо до деяких CI-метеоритів (Alais, Tagish Lake) та деяких CM-метеоритів після термічного впливу [7,8].

Нажаль недостатня кількість спостережних даних стримує аналіз фазових залежностей блиску таких астероїдів. Крім того, виникає необхідність знайти критерії виявлення таких астероїдів для реалізації відповідної спостережної програми.

РОЗДІЛ 2. Методика дослідження фазових залежностей блиску

Основною ідеєю даного розділу є детальний огляд методики отримання фазових залежностей блиску низькоальбедних астероїдів (439) Ohio та (1390) Abastumani. В основі досліджень лежить аналіз програм, які використовувались для попередньої редукції зображень та подальшої обробки методом апертурної фотометрії. Також, увага приділяється вивченню процесу корекції значень зоряних величин астероїдів за світловий проміжок, побудові складених кривих блиску та побудові фазових залежностей блиску, приведених до однієї фази обертання.

2.1 Попередня редукція зображень

Попередня обробка зображень, що отримані за допомогою ПЗЗ-камери, включає в себе корекцію за теплові шуми і нерівномірність чутливості кожного пікселя матриці. Цю операцію можна виконати в програмній оболонці (ПО) MaxImDL, використовуючи 6 версію даного програмного забезпечення. Для цього фотографічні знімки піддаються калібруванню за допомогою серій темнових знімків (master-dark) і серій знімків "плоских" полів (master-flat).

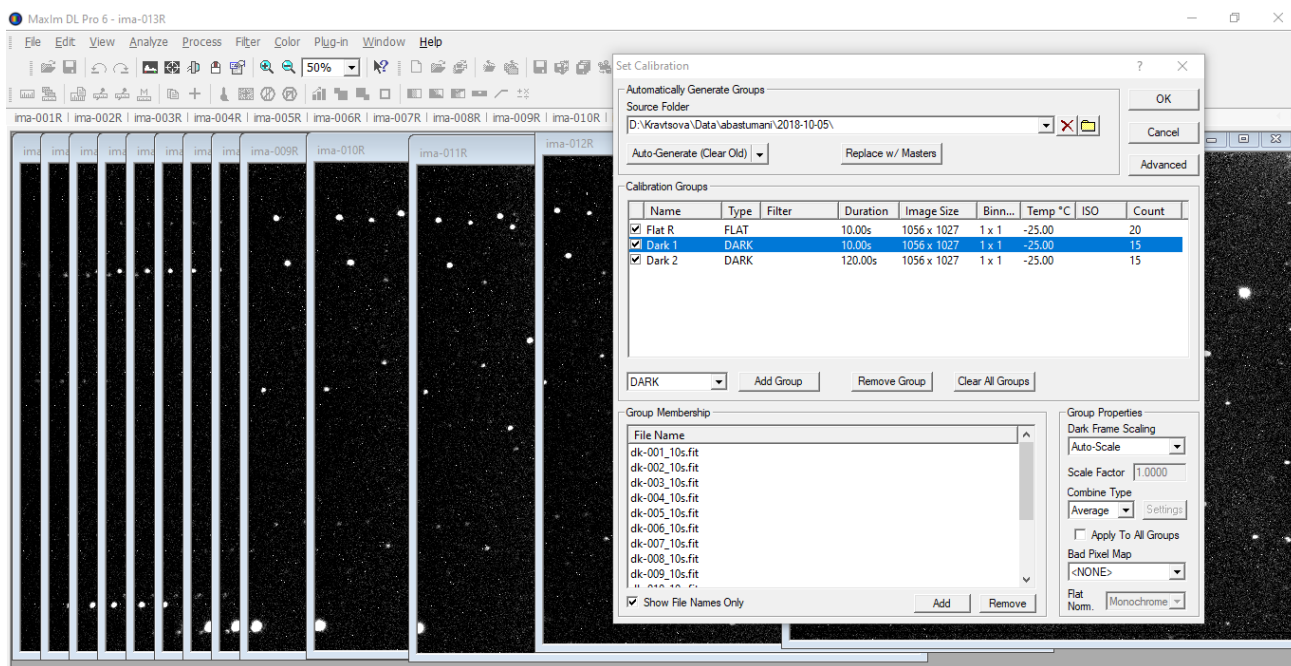


Рис. 2.1. Інтерфейс програми MaxImDL 6, вікно налаштувань калібрування.

Так як значення темнових відліків у пікселів є випадковими, проводиться серія знімків темнових полів з подальшим їх усередненням, щоб створити так звані "master-darks" для відповідних температур і експозицій, при яких були зроблені спостереження об'єктів і знімалися пласкі поля. Потім з кожного знімку "плаского" поля віднімається відповідний "master-dark", що дозволяє отримати усереднені зображення "master-flats" окремо для кожної фотометричної смуги. На рис. 2.1 представлено інтерфейс програми MaximDL б з вікном налаштувань для калібрування.

Далі, зображення, завантажені до оболонки, автоматично піддаються калібруванню і зберігаються на диску для подальшого використання [2].

2.2 Апертурна фотометрія та калібровка фотометричних даних

Після калібрування потрібно провести апертурну фотометрію зображень. Це також можна зробити також в ПО MaxIm DL.

Принцип апертурної фотометрії базується на підсумовуванні значень інтенсивності пікселів всередині деякої області. Для визначення зоряної величини досліджуваного об'єкту здійснюється порівняння його інтенсивності із значеннями інтенсивностей пікселів опорних зір (за замовчуванням, обирались 5 зір з показниками кольору близькими до сонячного та відношенням сигнал/шум більшим за 100), для яких ми вже маємо цю інформацію (рис. 2.2) .

На цьому етапі обробки зображень було використано електронний атлас неба Aladin Sky Atlas для ототожнення вибраних на зображеннях зір порівняння та отримання їх зоряної величини з електронного каталогу AAVSO в інтерактивному режимі доступу [24] (рис. 2.3) . Важливо підібрати правильні зорі порівняння для отримання якісних результатів апертурної фотометрії. Дані цих зір окремо додаються до документу Ексель для розрахунку їх зоряних величин у Джонсонівській фотометричній системі.

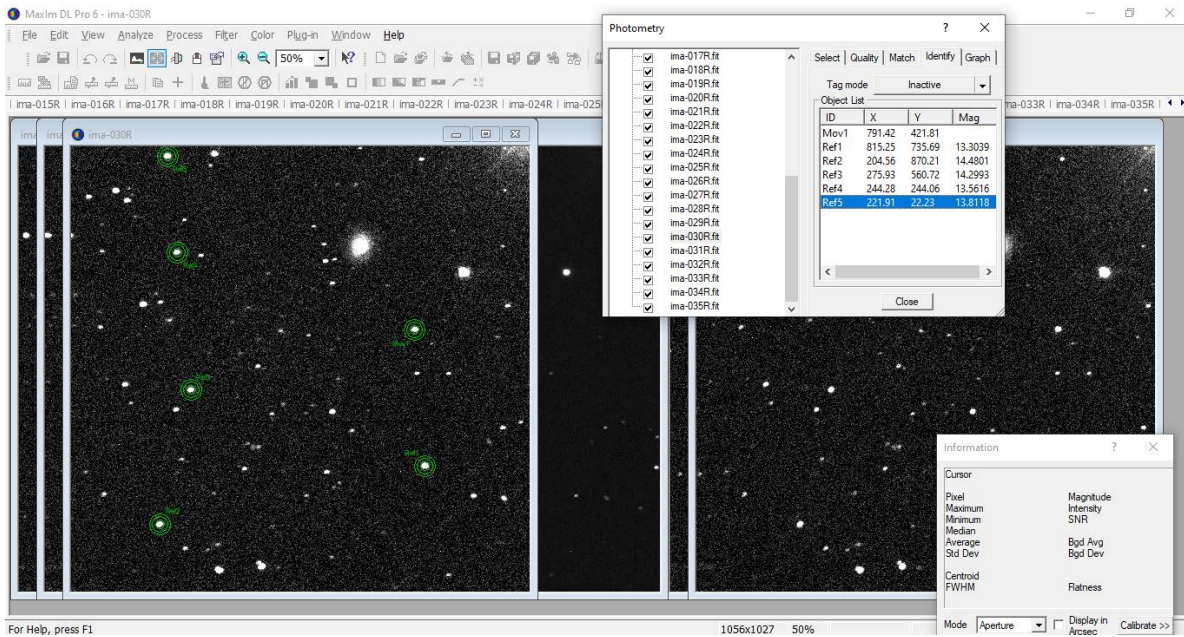


Рис. 2.2. Maxim DL 6, ідентифікація об'єкта та зір порівняння.

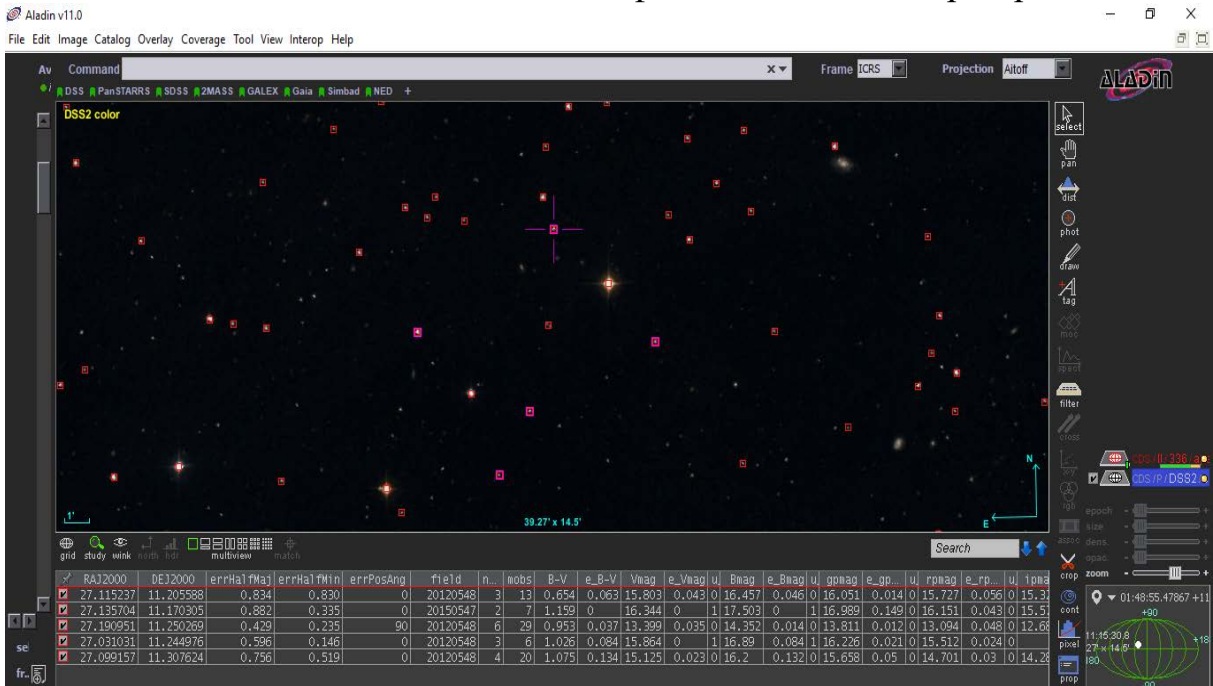


Рис. 2.3. Електронний атлас зір Aladin Sky Atlas, вибір зір порівняння.

Оскільки основні дані в каталозі AAVSO були представлені для смуг B та V системи Джонсона-Козінса, а також r та i Слоанівської фотометричної системи, то були використані відповідні формули переходу від Слоанівської системи до системи Джонсона-Козінса для визначення зоряної величини зір порівняння та зоряної величини астероїда. Ці формули взяті зі статті [24]:

формула переходу із r та i до R (каталог AAVSO):

$$r - 0.272 \times (r - i) - 0.159$$

формула переходу із r та i до V (каталог AAVSO):

$$r - 0.587 \times (r - i) - 0.011.$$

Після внесення значень зоряних величин для зір порівняння у відповідні поля Mag у вікні вибору зір оболонки MaximDL, можна побудувати графік змін блиску досліджуваного об'єкту та завантажити файл *.csv з результатами фотометрії.

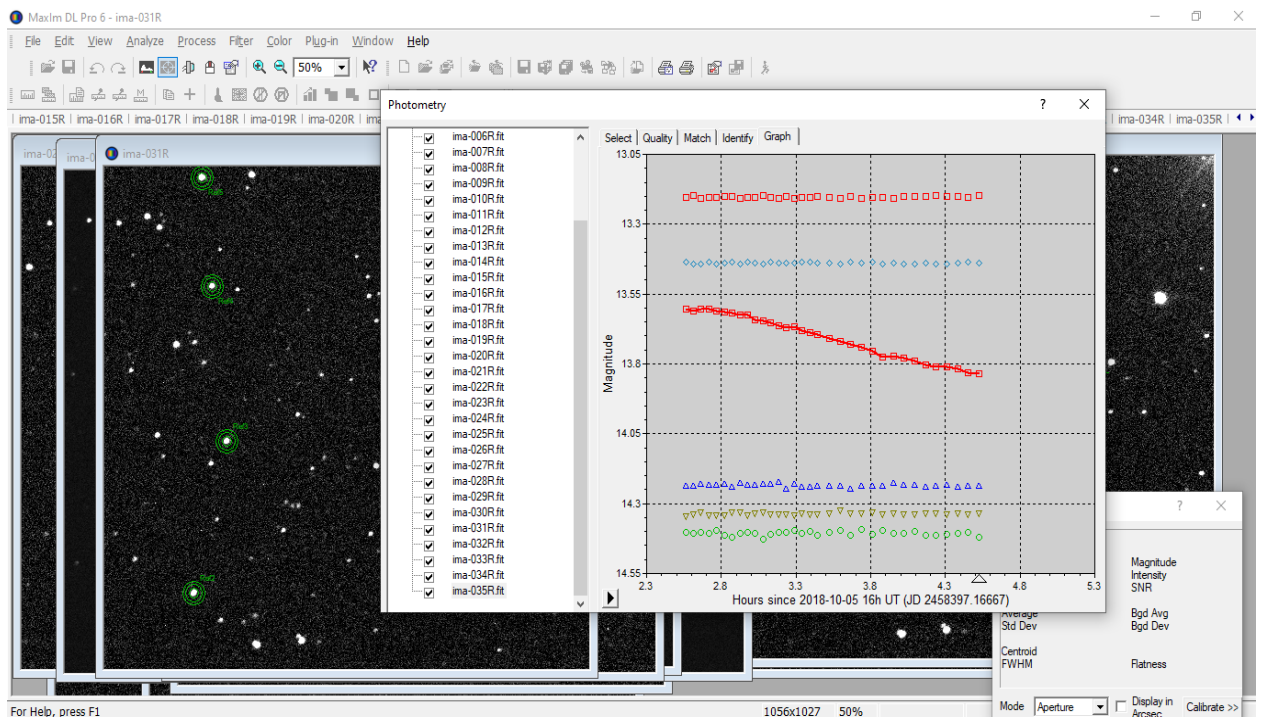


Рис. 2.4. Maxim DL 6, графік змін блиску астероїда та зір порівняння.

Крім зазначених вище, існують також і інші методи переведення зоряних величин у стандартну систему *UBVRI*. У статті Li et al. (2023) [32] описується метод інструментального калібрування зоряних величин у різних діапазонах спостережень. У роботі використовували фотометричний каталог Pan-STARRS. Описаний метод калібрування може коригувати вплив повітряної маси різних спостережень, а також флуктуації, що вносяться різними інструментами.

Запропоновані процедури калібрування інструментальних величин можуть бути використані для різних завдань, де немає стандартів у спостережуваній області, наприклад, для спостережень змінних зір, екзопланет, наднових, оптичних перехідних процесів, тощо.

2.3 Побудова складеної кривої блиску

Для побудови складеної кривої блиску астероїда необхідно спершу скоригувати час спостереження за світловий проміжок, привести зоряні величини астероїда, отримані після проведення апертурної фотометрії, на одиничну відстань, та розрахувати фази обертання астероїда для кожного відповідного моменту часу спостережень. Для цього були використані наступні формули:

$$T_i = T(JD) - 0.05776 * \Delta,$$

$$M(1, \alpha) = m - 5 * \lg(\Delta * r),$$

$$f = \frac{T_i - T_0}{p} - \text{int}\left(\frac{T_i - T_0}{p}\right),$$

де $T(JD)$ – поточний момент часу у юліанських добах, m – зоряна величина у цей момент, T_0 – початковий момент часу, P – період обертання астероїда (в добах), r – відстань від Сонця до астероїда в а.о.; Δ - відстань від спостерігача до астероїда в а.о.; α – кут фази; f – фаза обертання. Для відділення цілого числа циклів обертання і отримання фази обертання використовувалась функція *int*.

Такі дані для кожної ночі спостережень для конкретного астероїда бралися з ефемерид Центру Малих Планет. Після цього була побудована складена крива блиску досліджуваного об'єкту. Шляхом шифтування за зоряною величинною окремих ночей складається суцільна крива блиску, приведена до одного початкового моменту спостережень [2].

2.4 Побудова фазової залежності блиску

Особливість отримання фазових залежностей блиску полягає в правильному врахуванні внеску фазового ефекту та періодичних змін блиску, спричинених осьовим обертанням астероїда, що можливо тільки за наявності добре вимірених кривих блиску, які охоплюють весь період обертання. Врахування варіацій кривої блиску досліджуваних астероїдів здійснювалось за методикою, описаною в роботах [23,35], при цьому будувалась повна складена крива блиску астероїда по всьому інтервалу спостережень. Якщо амплітуда кривої блиску не буде врахована, то опозиційне зростання блиску може бути і не виявлено, особливо це стосується астероїдів з амплітудами кривої блиску більше 0.1 зор. вел.

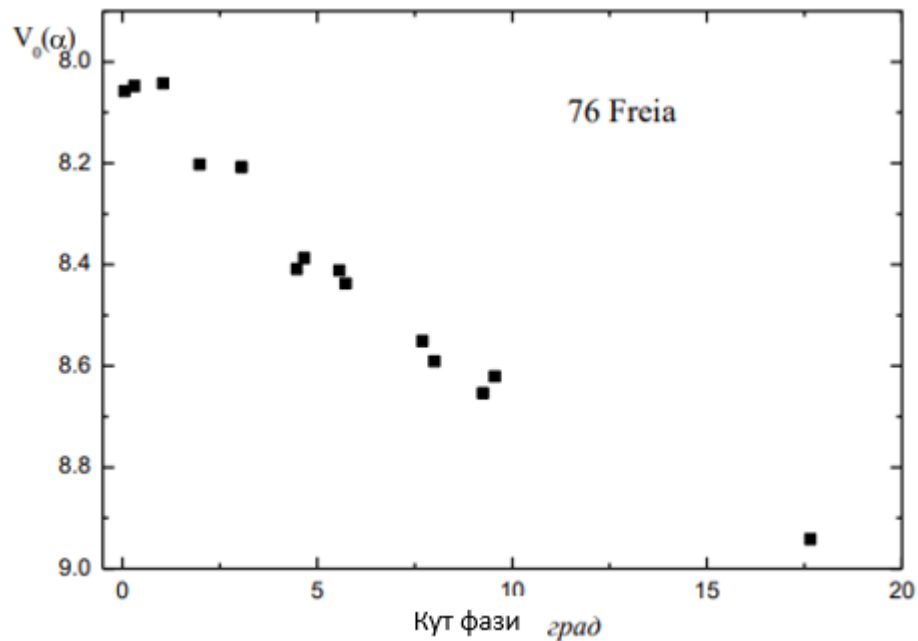


Рис.2.5 Фазова залежність блиску астероїда 76 Фрейя (усереднений блиск впродовж однієї ночі) [1].

Особливо це характерно для низькоальбедних астероїдів, у яких амплітуда ОЕ, як правило, має низьке значення, порівняне з похибками спостережень [1].

Для побудови графіка фазової залежності блиску астероїда (зміна блиску від зміни кута фази) необхідно кути фази для кожної ночі спостережень

зіставити з відповідною зоряною величиною астероїда за цей період і з'єднати ці точки.

Як приклад, на рис. 2.5 наведено фазову залежність астероїда 76 Freia, побудовану виходячи із середнього блиску протягом ночі. Найбільший розкид даних виявляється якраз в області ОЕ і мінімальних фазових кутів. На рис. 2.6 зображено фазову залежність цього ж астероїда, але з урахуванням кривої блиску і приведену до максимуму кривої блиску. Неврахування зміни амплітуди з кутом фази призводить до виникнення додаткових похибок, позбутися яких можна за допомогою побудови якомога повнішої кривої блиску астероїда і визначення його блиску для даного фазового кута в максимумі цієї кривої. За окремими кривими блиску, отриманими протягом окремих ночей будується складена криву блиску астероїда [1].

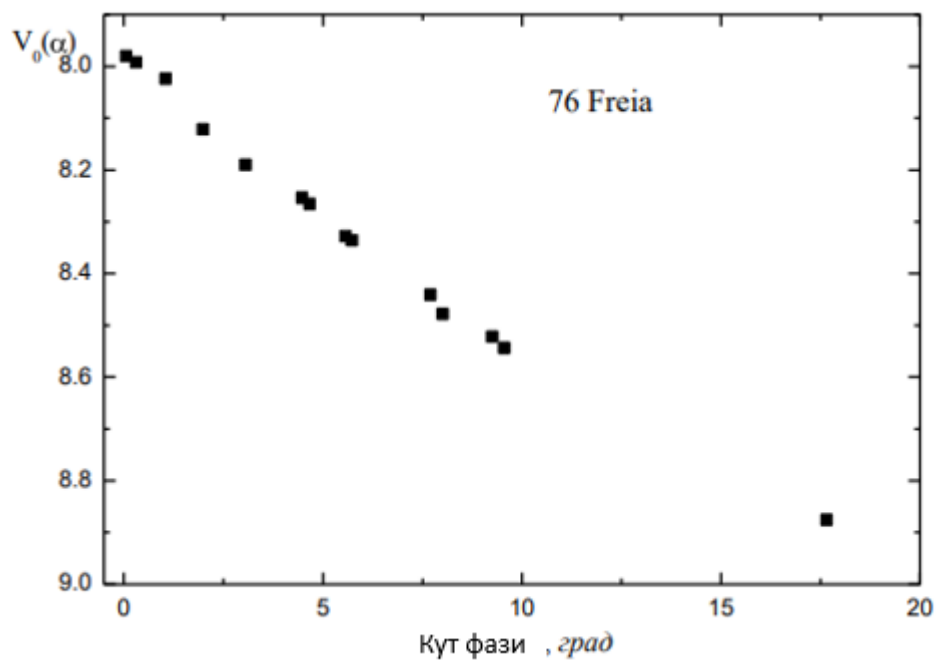


Рис.2.5 Фазова залежність блиску астероїда 76 Фрейя з урахуванням кривої блиску [1]

РОЗДІЛ 3. Порівняльний аналіз фазових залежностей блиску астероїдів з відсутнім опозиційним ефектом

3.1 Фазова залежність блиску астероїда (439) Ohio

(439) Ohio – астероїд, відкритий у жовтні 1898 року американським астрономом Едвіном Коддінгтоном (рис. 3.1). З цього часу й почалося визначення фізичних параметрів даного астероїду. (439) Ohio був досліджений багатьма астрономами використовуючи наземні спостереження, крім цього, для визначення його характеристик також були використані дані, що одержані космічними апаратами. Отримані дані представлені у таблиці 3.1.

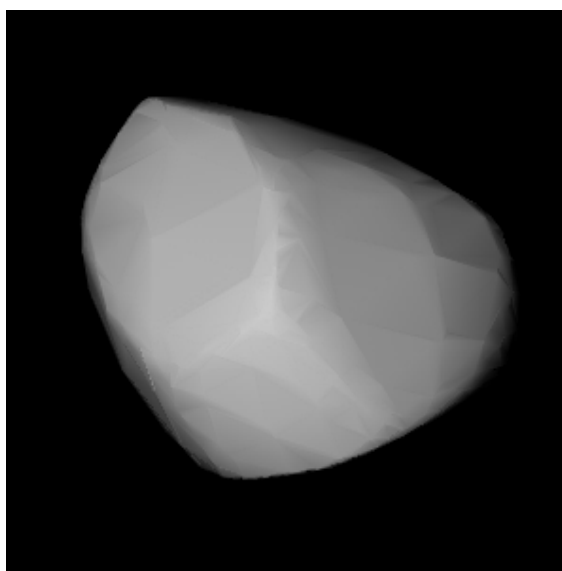


Рис.3.1. 3D- модельне зображення астероїда (439) Ohio [19]

Таблиця 3.1. Попередня інформація про астероїд (439) Ohio.

Ім'я автора	Дата	Клас	Діаметр, км	Зор.вел.	Альbedo	Період обертання, год
Загальна інф.	1898 EB	P	76.58	9.88	0.0336	37.46
Tholen [55]	1984	X	-	-	-	-
Lagerkvist [31]	1987b	-	-	-	-	19.2
Behrend [4]	2007.05.19	-	-	-	-	19.2
Masiero [40]	2012	-	86.86	9.83	0.027	-
Nugent [43]	2015	-	78.01	9.83	0.03	-
Masiero [41]	2017	-	76.155	9.84	0.0292	-
Durech [19]	2018c	-	-	-	-	37.4675
Mainzer [37]	2010.01.16	-	70.421	9.83	0.042	-
Colazo [9]	2021	-	-	9.42	-	-
Colazo [9]	2021	-	-	8.27	-	-
Martikainen [38]	2021	X	-	9.79	-	37.46631
AKARI [3]	-	-	75.6	9.83	0.037	-

SIMPS [52]	-	-	76.57	9.83	0.0352	-
WISE [60]	-	-	75.596	9.83	0.0361	-

Астероїд (439) Ohio має орбіту з великою піввіссю 3.13 а.о. і належить до зовнішньої частини головного поясу, де переважна більшість астероїдів має середнє альbedo ~ 0.05 . Орбітальний період цього астероїда становить близько 5.55 років (або ж 2024.5 днів) з ексцентриситетом орбіти 0.06571. (рис. 3.2).

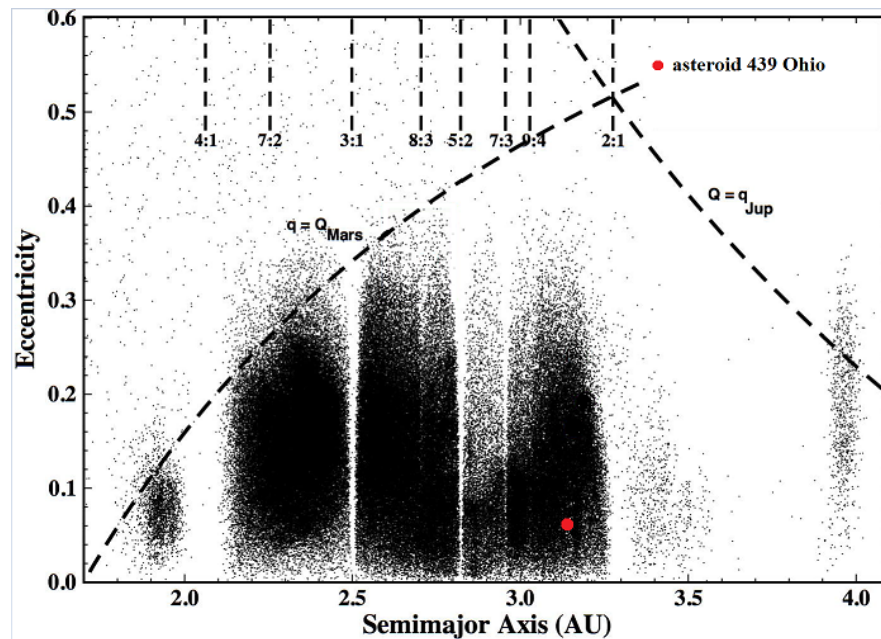


Рис.3.2 Розташування астероїда Ohio у Головному поясі

За минулі роки вченими неодноразово спостерігались криві блиску астероїда (439) Ohio [4,19,31,38]. Вперше така крива була описана Лагерквістом та іншими в статті 1987-го року [31]. Астероїд показав один широкий максимум й плоский мінімум на кривій блиску з періодом 19.2 години та амплітудою 0.24 зор. вел. Також була передбачена можливість бімодальної поведінки кривої блиску, якщо період був би у два рази довшим, а саме 38.4 години [31].

При виконанні дипломної роботи була проведена обробка спектрофотометричних зображень астероїда (439) Ohio, а також була побудована складена крива блиску для спостережних даних на проміжку часу в 3 місяці. Для цього були використані дані спостережень Чугуївської

спостережної станції НДІ астрономії ХНУ, але, крім цього, при дослідженні використовувались інші інструменти, наприклад, 0.6-м телескоп обсерваторії Рожен (Болгарія) та 0.7-м телескоп Абастуманської астрофізичної обсерваторії (Грузія). Відповідні зображення зоряних полів були надані керівником дипломної роботи для подальшої обробки та аналізу.

Спостереження проводились з 9-го жовтня по 7 грудня 2020 року. Збір даних виконувався впродовж 16 ночей у смугах B , V та R та охоплював кути фази від 0.7° до 16.3° . Оскільки цей астероїд знаходиться у зовнішній частині поясу з майже круговою орбітою, спостереження на більших фазових кутах з поверхні Землі не можливі. В Додатку 1 представлені аспектні дані об'єкта на всьому інтервалі спостережень.

На рис. 3.3 зображено складену криву блиску з періодом 38,488 години, це значення відрізняється від даних [19,38]. Амплітуда кривої блиску склала 0,28 зор.вел. На рисунку також приведена апроксимація кривої блиску рядом Фур'є другого порядку. Це дає змогу детальніше визначити амплітуду кривої блиску. Показники кольору: $B-V=0.78\pm 0.05$ та $V-R=0.32\pm 0.03$

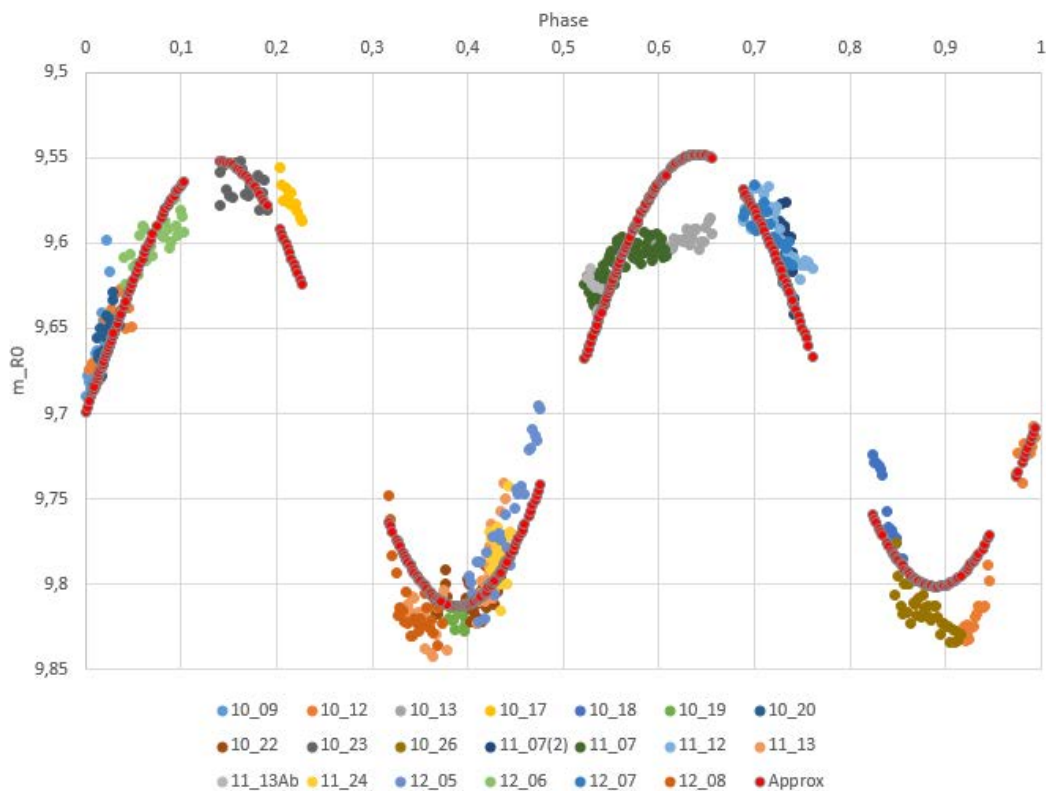


Рис.3.3 Складена крива блиску астероїда (439) Ohio.

Отримане значення періоду обертання було використано для побудови фазової залежності блиску цього астероїда у двох фотометричних смугах V і R (рис. 3.4). Як видно з рисунка, фазова залежність має лінійний характер і не показує опозиційного збільшення яскравості. Перервна лінія на рис. 3.3 результат апроксимації фазової залежності блиску HG_1G_2 - функцією з параметрами: $H_V = 9.910 \pm 0.025$ зор. вел., $G_1 = 0.92 \pm 0.09$, $G_2 = 0.01 \pm 0.05$ для фотометричної смуги V . Отримані значення коефіцієнтів G_1 та G_2 є близьким до середніх значень низькоальбедних астероїдів D- типу [67].

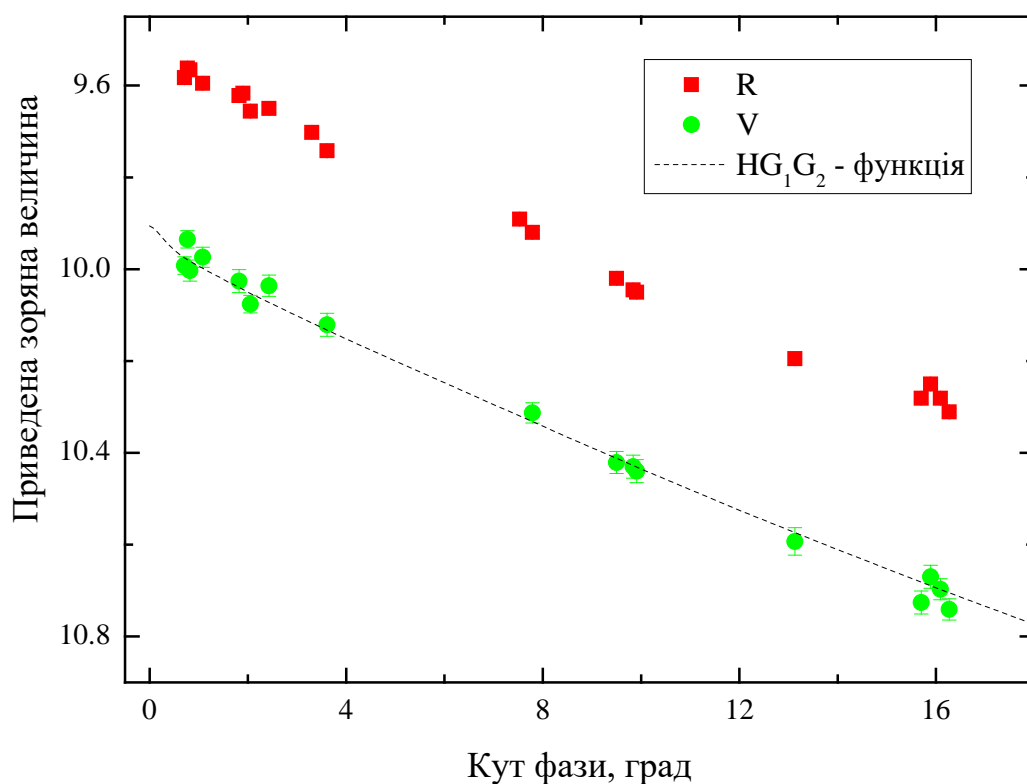


Рис. 3.3 Фазова залежність блиску астероїда (439) Ohio.

3.2 Фазова залежність блиску астероїда (1390) Abastumani

Астероїд (1390) Abastumani був відкритий 3 жовтня 1935 року радянським астрономом Пелагеею Шайнат у Сімеїзькій обсерваторії в Криму. Свою назву він отримав на честь Абастуманської астрофізичної обсерваторії. Астероїд розташований у зовнішній частині головного поясі і має діаметр близько 100

км та низьке альbedo поверхні, що становить 0,033 [39,57], і він був класифікований як рідкісний астероїд Р-типу [56].

У таблиці 3.2 представлені дані основних фізичних параметрів астероїда (1390) Abastumani, отриманих у попередніх дослідженнях, в тому числі і з використанням космічних апаратів.

Таблиця 3.2. Попередня інформація про астероїд (1390) Abastumani

Ім'я	Дата	Клас	Діаметр, км	Зор.вел.	Альbedo	Період обертання, год
Загальна інф.	1935 TA	P	101.70	9.2	0.0357	17.100
Gross [22]	2002/04/01	-	-	-	-	17.100
Veres [58]	2015	-	-	9.08	-	-
Mainzer [37]	2010/03/26	-	95.849	9.40	0.033	-
Nugent [43]	2016	-	101.26	9.15	0.04	-
Durech [19]	2018c	-	-	-	-	13.16482
AKARI [3]		-	98.30	9.40	0.033	-
SIMPS [52]		-	101.58	9.40	0.0298	-
WISE [60]		-	107.827	9.4	0.0264	-

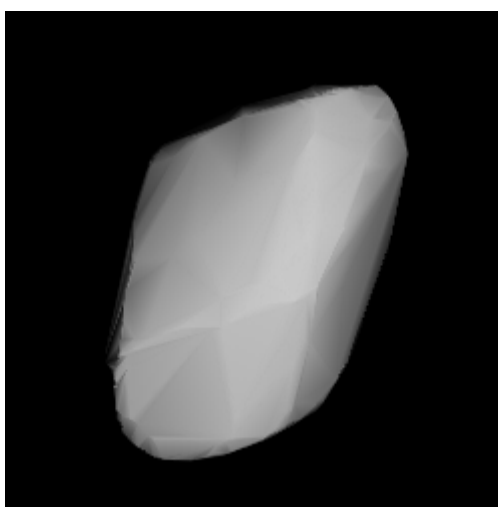


Рис.3.4. 3D-модельне зображення астероїда (1390) Abastumani [19].

Оцінку періоду обертання 17.1 години отримав Гросс [22], використовуючи спостережень за квітень 2002 року. Дюреч та ін. (2018) [19], використовуючи фотометричну базу даних Лоуеллівської обсерваторії (США), реконструювали модель форми цього астероїда і отримали період обертання 13.16482 години. Крім того, існують оцінки абсолютної зоряної

величини H від Центру малих планет (MPC), яка становить 9.19 зор. вел. та оцінка Вереса та ін. (2015) [58] ($H=9.15$), отримана за даними огляду Pan-STARRS.

В ході виконання практичної частини дипломної роботи була здійснена обробка спостережного матеріалу, отриманого з 5-го жовтня 2018 року по 26 січня 2019-го року (загалом, 13 ночей) в діапазоні фазових кутів 0,1-17,08 град у B , V та R фільтрах системи Джонсона-Козінса. Аспектні дані спостережень для цього астероїда також представлені в Додатку 1.

На рис. 3.5 зображена складена крива блиску, отримана з періодом 13.1640 ± 0.0005 години, що трохи відрізняється від даних Durech et al. (2018) [19]. Максимальна амплітуда кривої блиску в цій опозиції становить близько 0.35 зор.вел. Звертає увагу збільшення амплітуди зі зростанням фазового кута. Показники кольору мають наступні значення: $B-V=0.71\pm0.05$ зор.вел та $V-R=0.35\pm0.03$ зор.вел.

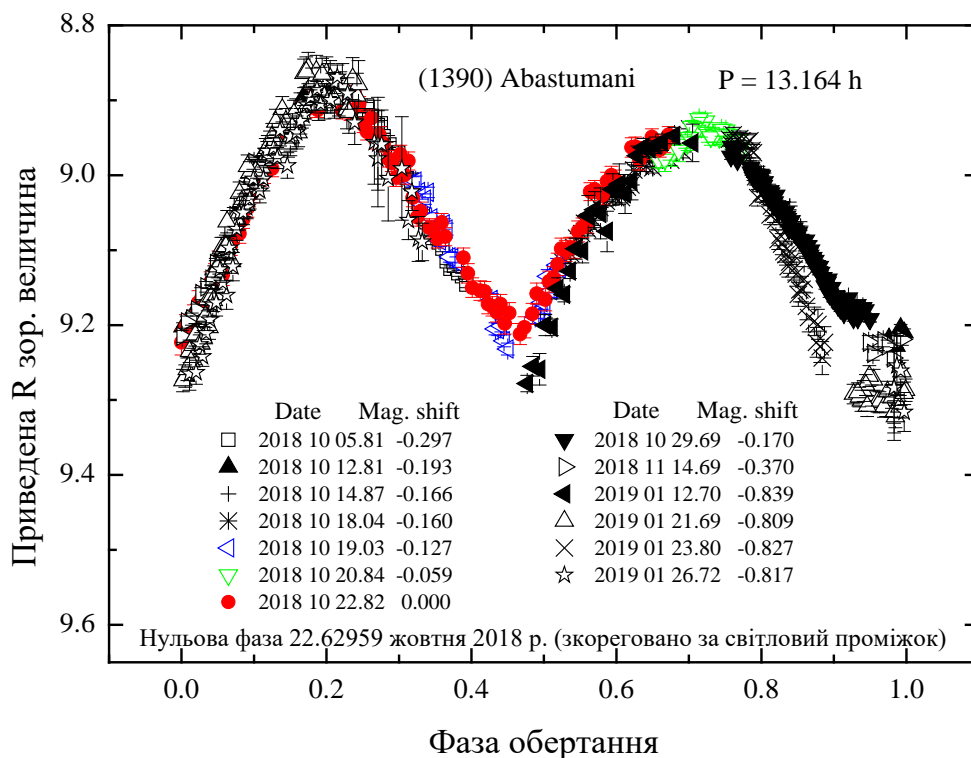


Рис. 3.5 Складена крива блиску астероїда (1390) Abastumani.

Фазова залежність блиску астероїда (1390) Абастумані у BVR - смугах (рис. 3.6) була побудована за приведеним значенням блиску до первинного

максимуму кривої блиску. Червоною лінією показано апроксимацію фазової кривої HG_1G_2 -функцією з параметрами: $H_V = 9.21 \pm 0.02$ зор. вел, $G_1 = 0.97 \pm 0.06$, $G_2 = 0.00 \pm 0.05$. Отримані значення параметрів G_1 і G_2 близькі до середніх значень для низькоальбедних астероїдів спектрального класу D [50]. Фазова залежність не має опозиційного зростання блиску і є лінійною в усьому діапазоні спостережуваних фазових кутів з лінійним фазовим коефіцієнтом 0.046 ± 0.001 зор.вел/град. Це вказує на дуже темну поверхню цього астероїда.

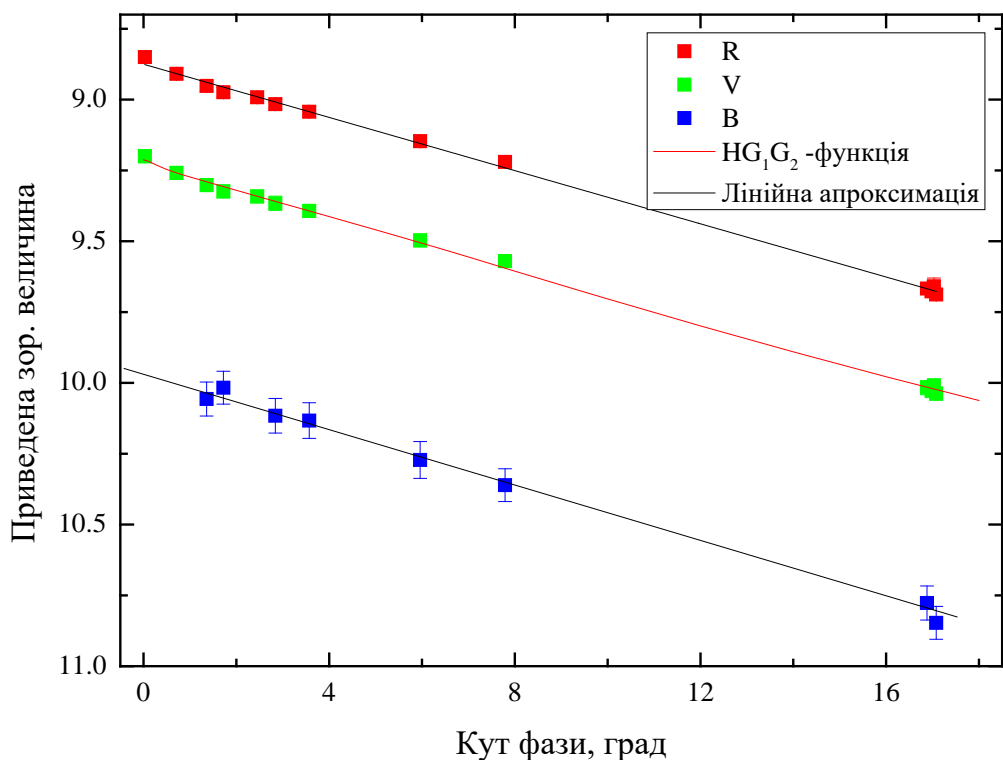


Рис. 3.6. Фазова залежність блиску астероїда (1390) Абастумані

3.3 Порівняльний аналіз фазових залежностей блиску астероїдів з відсутнім опозиційним ефектом з іншими низькоальбедними астероїдами

Як видно з отриманих фазових залежностей досліджуваних об'єктів (що були розглянуті у попередніх підрозділах), дані низькоальбедні астероїди не проявляють нелінійного збільшення блиску поблизу опозиції, тобто ми маємо нові об'єкти, у яких відсутній опозиційний ефект.

У даному підрозділі будуть порівняні деякі фізичні характеристики низькоальбедних астероїдів з астероїдами, у яких відсутній опозиційний ефект. Так як подібних об'єктів виявлено відносно небагато, досі залишаються невідомими фактори, що обумовлюють таку поведінку блиску на малих фазових кутах. Задля внесення ясності в це питання, було розглянуто кореляційні співвідношення амплітуди ОЕ з деякими фізичними параметрами астероїдів. Для цього було відібрано 47 низькоальбедних астероїдів, для яких отримані високоякісні фазові залежності блиску та сформовано таблицю з відповідними фізичними характеристиками (діаметр, альbedo, амплітуда ОЕ, нахил спектру, показник кольору, приналежність до групи чи сімейства) (Додаток 2). Амплітуда ОЕ обчислювалась відповідно до рекомендацій з роботи Бельська та Шевченко [5]. На рис. 3.7 представлений розподіл альbedo вибірки з 47-ми низькоальбедних астероїдів за великою піввіссю, який показує розташування відповідних астероїдів у поясі.

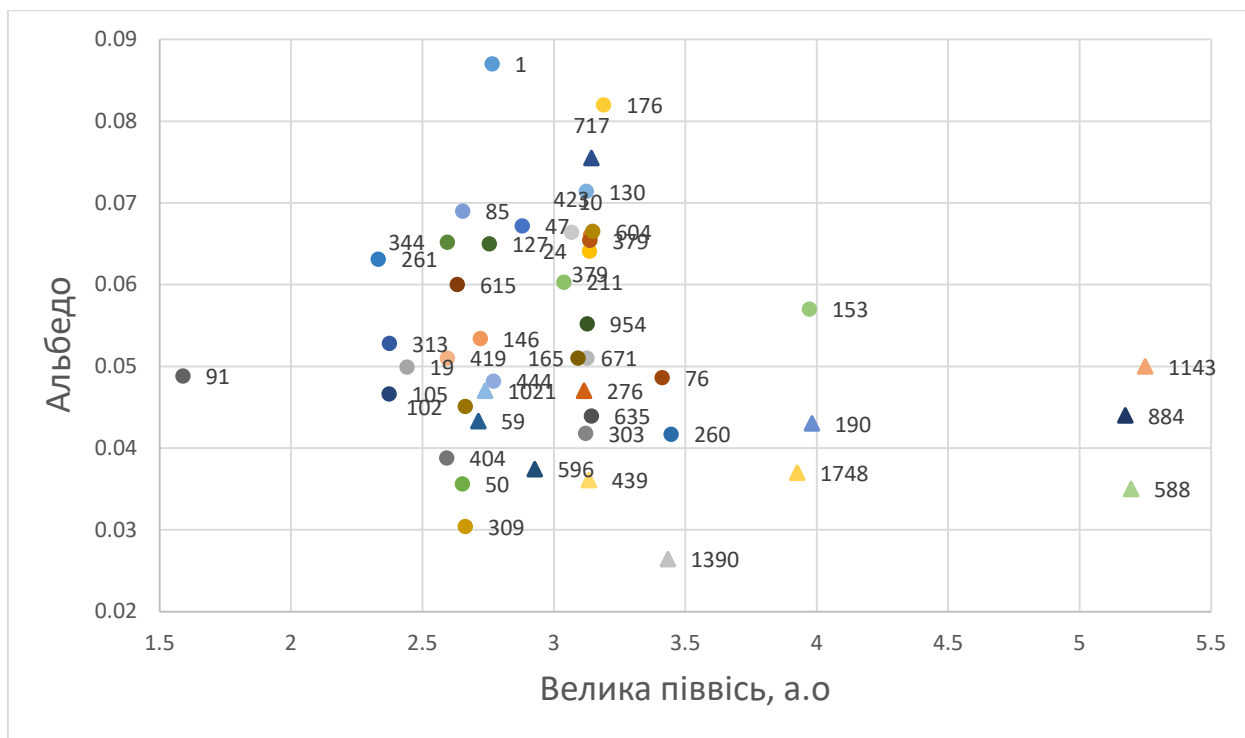


Рис. 3.7 Графік розподілу альbedo поверхонь вибірки з 40 низькоальбедних астероїдів для яких отримано високоякісні фазові залежності блиску

альbedo на рис. 3.9. Але є загальна тенденція зростання амплітуди OE зі зростанням відбиної здатності.

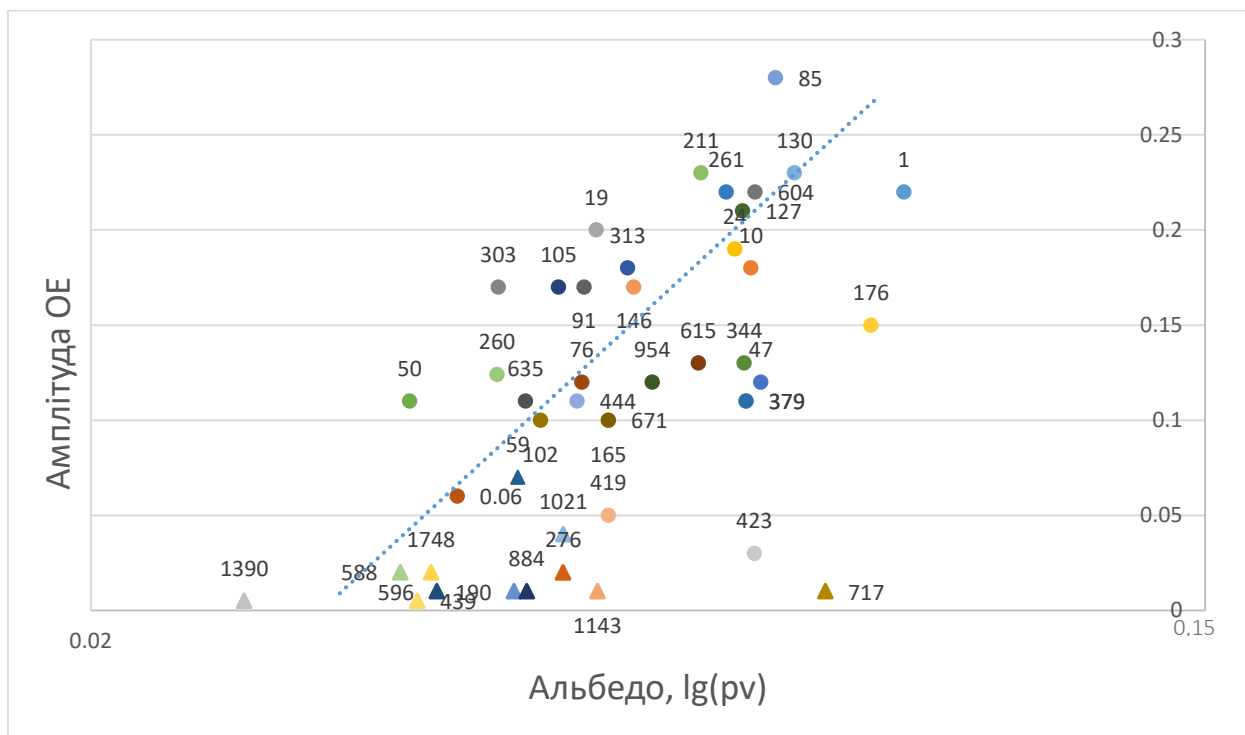


Рис. 3.9 Залежність амплітуди OE від альbedo поверхні.

На рис. 3.10 представлено залежність амплітуди опозиційного ефекту астероїдів від показника кольору U-V. Це найбільш інформативна діаграма порівняно з іншими показниками кольору. Як видно з рисунка, низькоальбедні астероїди з меншими показниками кольору U-V характеризуються найменш вираженим опозиційним ефектом блиску (астероїди без OE на рис. 3.10 позначені трикутниками). Коефіцієнт кореляції для цих величин: 0,452. Коефіцієнти регресії: нахил - 0.9175, точка перетину з віссю Oy – (-0.1681).

Така кореляційна залежність може бути пов'язана з мінералогічним співвідношенням світлої і темної речовини на поверхнях цих типів астероїдів. Аналогічним чином поводить ся й амплітуда OE залежно від альbedo. Цей факт ще раз вказує на те, що альbedo відіграє переважну роль у формуванні фазової залежності блиску, принаймні, у низькоальбедних астероїдів.

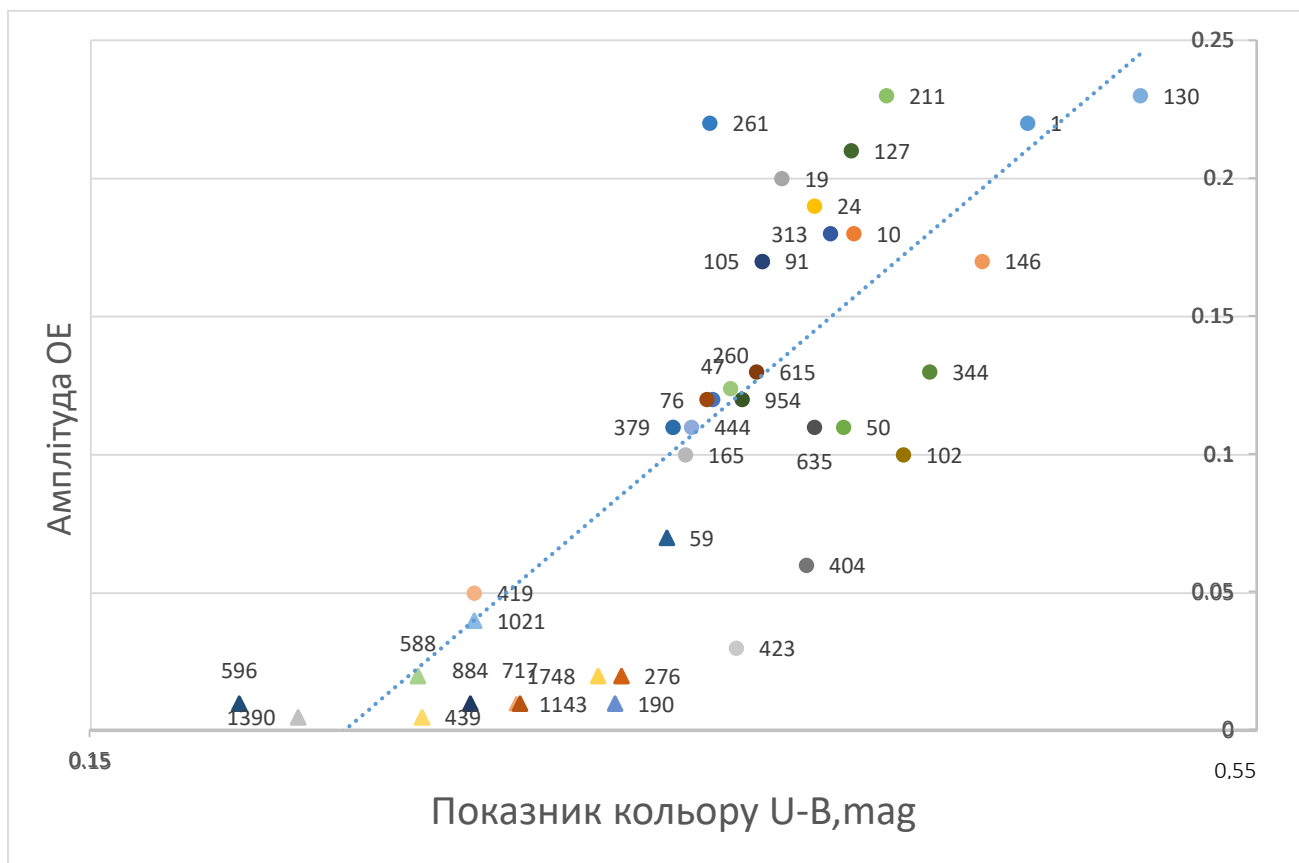


Рис. 3.10 Залежність амплітуди OE від показника кольору U-V для вибірки низькоальбедних астероїдів.

На рис. 3.11 приведено графік складеної фазової залежності блиску для десяти астероїдів з мінімальним OE (амплітуда OE не перевищує похибок спостережень). Ці об'єкти відносяться до різних спектральних класів, в основному P і D, але присутні й більш специфічні об'єкти (наприклад, астероїд 588 Achilles класу DU). Загальний розкид від середньої лінії не перевищує 0.05 зор. вел. Середній лінійний фазовий коефіцієнт становить 0.044 зор. вел./град, а відповідно параметри G_1 та G_2 мають середні значення: 0.97 ± 0.06 , та 0.00 ± 0.05 . З даного графіку видно, що дані астероїди, включно з об'єктами дослідження дипломної роботи, не показують нелінійного збільшення блиску на малих кутах фази. Середнє альbedo цих об'єктів становить 0.044 ± 0.006 .

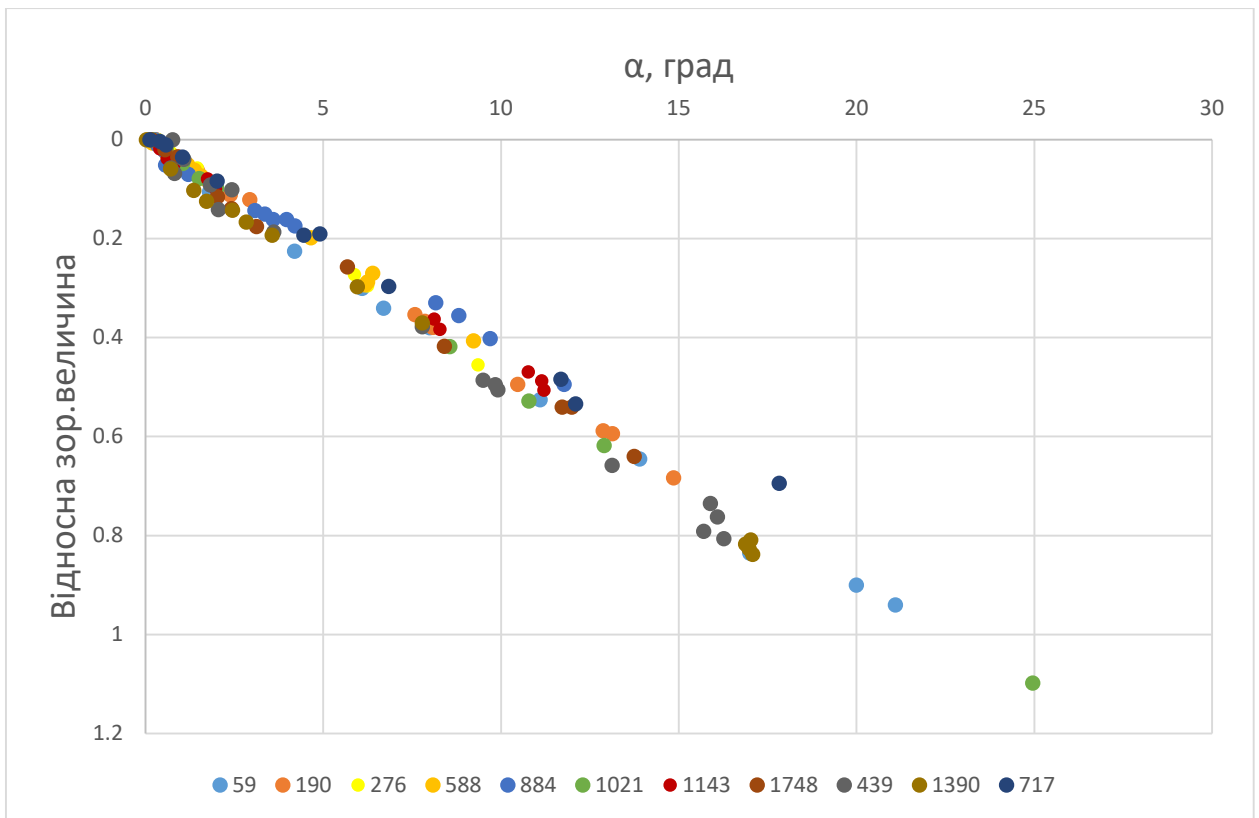


Рис. 3.11 Складена фазова залежність блиску вибірки астероїдів, що не показують ОЕ

Це значення альbedo можна розглядати як деяке граничне значення, починаючи з якого внесок тіньового механізму стає домінуючим зі зменшенням альbedo. При альbedo поверхні 0.07 і вище спостерігається досить виражене нелінійне зростання блиску астероїда поблизу опозиції. Таким чином, відсутність опозиційного ефекту у фазових залежностях блиску астероїдів може свідчити про те, що альbedo їхньої поверхні менше 0.040.

Висновки

В ході виконання дипломної роботи було вирішено поставлені задачі та одержано наступні основні результати:

1) проведена обробка *BVR*-зображень, отриманих за результатами спостережень астероїдів (439) Ohio та (1390) Abastumani протягом 20 і 16 ночей відповідно (загалом, близько 2500 зображень);

2) отримано складені криві блиску, уточнено періоди обертання та значення показників кольору астероїдів, що спостерігались;

3) вперше отримано високоякісні фазові залежності блиску у *V* та *R* смугах та виявлено відсутність опозиційного зростання блиску для цих астероїдів, що притаманне об'єктам з надзвичайно низькою відбивною здатністю;

4) порівняльний аналіз фотометричних властивостей 47 низькоальбедних астероїдів показав, що є загальна тенденція зростання амплітуди ОЕ зі зростанням відбивної здатності, а низькоальбедні астероїди з меншими показниками кольору *U-B* характеризуються найменш вираженим опозиційним ефектом блиску.

Таким чином, підсумовуючи отримані результати слід звернути увагу, що альbedo відіграє переважну роль у формуванні фазової залежності блиску у низькоальбедних астероїдів, а відсутність опозиційного ефекту може свідчити про те, що фазова залежність формується тільки тіньовим механізмом та однократним розсіянням, а альbedo поверхні таких тіл менше 0.040. Ці результати відкривають нові перспективи для подальших досліджень та сприяють загальному розумінню природи даного явища, що є важливим кроком у вивченні низькоальбедних астероїдів без ОЕ та їх фізичних характеристик.

Список використаної літератури

1. Терещенко І.А. «Опозиційний ефект блиску низькоальбедних астероїдів»: дисертація на отримання вченого ступеню кандидату фіз-мат. наук. Геліофізика та фізика Сонячної системи, Харків, 2010, 135 с.
2. Шевченко В. Г. Комп'ютерні технології: методичні вказівки – Г 80 Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2011. – 38 с.
3. AKARI 2011 PASJ...63.1117U Usui, F.; Kuroda, D.; Mueller, T.G.; Hasegawa, S.; et al. Pub. Astron. Soc. Japan 63, 2011, p. 1117-1138.
4. Behrend, R et al. Physical models of ten asteroids from an observers' collaboration network. A&A 465, 2007, p. 331-337.
5. Belskaya, I. N., and V. G. Shevchenko. "Opposition effect of asteroids." *Icarus* 147.1, 2000, p. 94-105.
6. Bus, Schelte J., Binzel, Richard P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. July 2002.
7. Cloutis E. A. et al. Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 2. CM chondrites. *Icarus*, vol. 216, no. 1, 2011, p. 309–346.
8. Cloutis, E. A. et al. The effects of CM2 carbonaceous chondrites on reflectance spectra of HED meteorites. European Planetary Science Congress 2012.
9. Colazo, M., Duffard, R., & Weidmann, W. The determination of asteroid H and G phase function parameters using Gaia DR2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(1), 2021, p. 761-768.
10. Colazo M. et al. Zero-phase angle asteroid taxonomy classification using unsupervised machine learning algorithms. *Astronomy & Astrophysics*. 666, 2022, A77.
11. Colombo M. Density Design Research Lab, Density Design Integrated Course Final Synthesis Studio.
12. Cruikshank, D. P. and R. H. Brown. Organic matter on asteroid 130 Elektra. *Science* 238.4824, 1987, p. 183-184.
13. Cruikshank, Dale P. et al. Search for the 3.4- μm C–H spectral bands on low-albedo asteroids. *Icarus* 156.2, 2002, p. 434-441.

14. DeMeo, Francesca E. et al. Visible and near-infrared colors of Transneptunian objects and Centaurs from the second ESO large program. *Astronomy & Astrophysics* 493.1, 2009, p. 283-290.
15. DeMeo, Francesca E., Binzel, Richard P. Slivan, Stephen M., Bus, Schelte J. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*. 202 (1), 2009, p. 160–180.
16. DeMeo, F. E., & Carry, B. The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. *Icarus*, 226(1), 2013, p. 723-741.
17. DeMeo, Francesca E. and Benoît Carry. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature* 505.7485, 2014, p. 629-634.
18. Drummond, J. D. et al. Dwarf planet Ceres: Ellipsoid dimensions and rotational pole from Keck and VLT adaptive optics images. *Icarus*, 236, 2014, p. 28-37.
19. Ďurech, J. Hanuš and V. Alí-Lagoa. Asteroid models reconstructed from the Lowell Photometric Database and WISE data. *Astronomy & Astrophysics*, 617, 2018, A57.
20. Gounelle M. et al. Meteorites from the outer solar system // The solar system beyond Neptune. – 2008. – T. 592. – P. 525-541.
21. Gradie J. et al. The effects of scattering geometry on the spectrophotometric properties of powdered material. Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. Vol. 11. 1980.
22. Gross, J. and Wolff, U. Minor Planet Observations [G94 Sonoran Skies Observatory, St. David]. MPC. 4891, 2003.
23. Harris A. W. Photometric lightcurve observations and reduction techniques. Asteroids II. Univ. of Arizona Press, Tucson. – 1989. – P. 39–53.
24. Henden A. A., Smith T. C., Levine S. E., Terrell D. The AAVSO Photometric All-Sky Survey Completes the Sky. AAS Meeting. V. 220. 2012. Id. 133.06.
25. Hiroi, Takahiro et al. Modeling of S-type asteroid spectra using primitive achondrites and iron meteorites. *Icarus* 102.1, 1993, 107-116.18.

26. Howell, E. S., E. Merenyi, and L. A. Lebofsky. Classification of asteroid spectra using a neural network." *Journal of Geophysical Research: Planets* 99. E5, 1994, 10847-10865.
27. Ishak, B. *Asteroids: astronomical and geological bodies*, by T. H. Burbine: Scope: reference, textbook. Level: undergraduate, specialist. *Contemporary Physics*. 58. 2017. 1-3.
28. Johnson, Torrence V. and Fraser P. Fanale. Optical properties of carbonaceous chondrites and their relationship to asteroids. *Journal of Geophysical Research* 78, 1973, 8507-8518.
29. Kim, Sam et al. Thermal models and far infrared emission of asteroids. *Journal of The Korean Astronomical Society*, vol. 36, issue 1, p. 21-31 36, 2003, p. 21-31.
30. Klimczak, H. et al. Comparison of machine learning algorithms used to classify the asteroids observed by all-sky surveys. *Astronomy & Astrophysics*. 667. 2022.
31. Lagerkvist, C., Hahn G, Magnusson, P. et al. Physical studies of asteroids XVI-Photoelectric photometry of 17 asteroids. *A&A* 70, 1987, p. 21.
32. Li X. et al. An UBVRI calibration method based on Pan-STARRS photometric survey. *Astronomy and Computing* V.45. – 2023. – P.8.
33. Lupishko, D. F. Physical properties of asteroids. *Astronomical School's Report* 1.2, 2000, p. 63-77.
34. Michael Shepard. *Asteroids: Relics of Ancient Time*. 2015. 10.1017/CBO9781107447899.
35. Magnusson P. Analysis of asteroid lightcurves. I. Data base and basic reduction. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1990. – V. 86. – P. 45–51.
36. Mahlke, Max & Carry, Benoit & Mattei, Pierre-Alexandre. *Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Spectrometry and Albedo*. 2022.
37. Mainzer, A. et al. NEOWISE studies of spectrophotometrically classified asteroids: Preliminary results. *The Astrophysical Journal*, 741(2), 2011, p. 90.

38. Martikainen, J. et al. Asteroid absolute magnitudes and phase curve parameters from Gaia photometry. *Astronomy & Astrophysics*, 649, 2021, A98.
39. Masiero, Joseph R. et al. Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters. *The Astrophysical Journal* 741.2, 2011, p. 68.
40. Masiero, J. R et al. A revised asteroid polarization–albedo relationship using WISE/NEOWISE data. *The Astrophysical Journal*, 749 (2), 2012, p. 104.
41. Masiero, J.R.; Nugent, C.; Mainzer, A.K.; Wright, E.L.; et al. *Astron. J.* 154, 2017, A168.
42. Millis, R. L. and J. L. Elliot. Direct determination of asteroid diameters from occultation observations. *Asteroids*, 1979, p. 98-118.
43. Nugent, C.R.; Mainzer, A.; Baurer, J.; Cutri, R.M. et al. *Astron. J.* 152, 2016, A63.
44. Ostrowski, Daniel R. et al. An investigation of the presence and nature of phyllosilicates on the surfaces of C asteroids by an analysis of the continuum slopes in their near-infrared spectra. *Meteoritics & Planetary Science* 45.4, 2010, p. 615-637.
45. Rivkin, A. S. et al. Hydrated minerals on asteroids: The astronomical record. *Asteroids III* 1, 2002, p. 235-253.
46. Rivkin, Andrew S. et al. Astronomical observations of volatiles on asteroids. *Asteroids IV*, 2015, p. 65-87.
47. Roig, F., A. O. Ribeiro and R. Gil-Hutton. Taxonomy of asteroid families among the Jupiter Trojans: comparison between spectroscopic data and the Sloan Digital Sky Survey colors. *Astronomy & Astrophysics* 483.3, 2008, p. 911-931.
48. Shevchenko, V. et al. Asteroid observations at low phase angles. Average parameters for the new three-parameter HG₁G₂ magnitude system. *ACM- 2014*, p. 488.
49. Shevchenko V. G. et al. Asteroids without opposition effect. *ACM-2014*.

50. Shevchenko, V. G., Belskaya, I. N., Muinonen, K. et al. Asteroid observations at low phase angles. IV. Average parameters for the new H, G1, G2 magnitude system. *Planetary and Space Science*, vol. 123, 2016, p. 101–116.
51. Shevchenko, V., Krugly, Y., Belskaya, I. and Molotov, I. *Modern Problems of Asteroid Photometry, A&A(Caucasus)*, vol. 1, 2017.
52. Tedesco, E.F.; Noah, P.V.; Price, S.D. 2004. IRAS Minor Planet Survey. IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0. NASA Planetary Data System. SIMPS 2004 PDSS 12 T
53. Slyusarev, I. G., Shevchenko, V. G., Belskaya, I. N., Krugly, Y. N. and Chiorny, V. G. Magnitude Phase Angle Dependences of Jupiter Trojans and Hilda Asteroids. 43rd Lunar and Planetary Science Conference, held March 19-23, 2012 at The Woodlands, Texas, 2012.
54. Slyusarev, I., Shevchenko, V. and Belskaya, I. CCD photometry of selected outer-belt asteroids: Similarity of magnitude-phase dependencies among the Jupiter Trojan, Hilda, and Cybele asteroids. *Asteroids, Comets, Meteors 2014. Proceedings of the conference held 30 June - 4 July, 2014 in Helsinki, Finland.* p. 497, 2014.
55. Tholen, David James. *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry.* The University of Arizona, 1984.
56. Tholen, D. J. *Asteroid taxonomic classifications.* Asteroids Tucson: University of Arizona Press, 1989, p. 1139–1150.
57. Usui, Fumihiko, et al. Asteroid catalog using Akari: AKARI/IRC mid-infrared asteroid survey. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 63.5, 2011, 1117-1138.
58. Vereš, P. et al. Absolute magnitudes and slope parameters for 250,000 asteroids observed by Pan-STARRS PS1—Preliminary results. *Icarus*, 261, 2015, 34-47.
59. Vilas, Faith, Kandy S. Jarvis and Michael J. Gaffey. Iron alteration minerals in the visible and near-infrared spectra of low-albedo asteroids. *Icarus* 109.2, 1994, p. 274-283.

60. WISE 2011 ApJ 741 90M Mainzer, A.; Grav, T.; Masiero, J.; Hand, E.; et al. *Astrophys. J.* 741, 2011, A90.
61. Yang Bin and Jewitt David. Identification of magnetite in B-type asteroids. *The Astronomical Journal* 140.3, 2010, p. 692.
62. Asteroid albedos: graphs of data. URL: <https://www.johnstonsarchive.net/astro/astalbedo.html>
63. Dawn data from Ceres publicly released. URL: <http://www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/2015/10221314-dawn-data-from-ceres-publicly.html>
64. Elektra – Model 1856. URL: https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/asteroid_models/view/1856
65. Fortuna – Model 117. URL: https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/asteroid_models/view/117
66. NEOWISE Diameters and Albedos Bundle V2.0. URL: https://sbn.psi.edu/pds/resource/doi/neowise_2.0.html
67. Online calculator for H,G1,G2 photometric system. URL: <https://psr.it.helsinki.fi/HG1G2/>
68. SPHERE image of Hygiea. URL: <https://www.eso.org/public/images/eso1918a/>
69. Themis – Model 1006. URL: https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/asteroid_models/view/1006

Додаток 1

Аспектні дані для астероїдів (439) Огайо та (1390) Абастумані: середній момент спостереження у дану ніч, екліптичні координати λ і β на епоху 2000.0, геліо- та геоцентричні відстані r і Δ та фазовий кут α .

Name	UT Date day	λ_{2000} deg	β_{2000} deg	r au	Δ au	α deg
(439) Ohio	2020 10 09.78	27.555	-1.295	3.024	2.037	3.61
	2020 10 12.86	26.900	-1.584	3.022	2.030	2.43
	2020 10 13.86	26.683	-1.679	3.021	2.028	2.05
	2020 10 17.91	25.798	-2.058	3.019	2.023	0.77
	2020 10 18.88	25.584	-2.149	3.019	2.023	0.71
	2020 10 19.74	25.395	-2.229	3.018	2.023	0.82
	2020 10 20.73	25.178	-2.320	3.018	2.023	1.08
	2020 10 22.88	24.706	-2.518	3.016	2.025	1.83
	2020 10 23.07	24.664	-2.535	3.016	2.025	1.90
	2020 10 26.76	23.870	-2.870	3.014	2.031	3.30
	2020 11 07.02	21.635	-3.826	3.008	2.073	7.53
	2020 11 07.76	21.504	-3.884	3.008	2.077	7.79
	2020 11 12.69	20.686	-4.265	3.005	2.108	9.50
	2020 11 13.72	20.530	-4.341	3.005	2.115	9.84
	2020 11 13.95	20.495	-4.358	3.005	2.116	9.91
	2020 11 24.73	19.218	-5.087	2.999	2.206	13.13
	2020 12 05.68	18.627	-5.706	2.993	2.321	15.70
	2020 12 06.67	18.609	-5.756	2.993	2.332	15.89
	2020 12 07.67	18.598	-5.806	2.992	2.343	16.09
	2020 12 08.66	18.593	-5.855	2.992	2.355	16.27
(1390) Abastumani	2018 10 05.81	32.423	-1.244	3.327	2.371	5.96
	2018 10 12.81	31.119	-0.699	3.328	2.346	3.57
	2018 10 14.87	30.717	-0.537	3.329	2.341	2.84
	2018 10 18.04	30.082	-0.283	3.329	2.336	1.72
	2018 10 19.03	29.882	-0.204	3.329	2.335	1.36
	2018 10 20.84	29.517	-0.060	3.330	2.335	0.71
	2018 10 22.82	29.114	0.099	3.330	2.335	0.03
	2018 10 29.69	27.730	0.647	3.331	2.345	2.45
	2018 11 14.69	24.868	1.860	3.334	2.423	7.79
	2019 01 12.70	24.626	4.892	3.345	3.151	17.08
	2019 01 21.69	26.052	5.189	3.347	3.286	17.03
	2019 01 23.80	26.428	5.254	3.348	3.318	16.98
2019 01 26.72	26.978	5.344	3.348	3.361	16.88	

Додаток 2

Фізичні дані для низькоальбедних астероїдів з високоякісними фазовими залежностями блиску.

Номер астероїду	Назва	Діаметр, км	Альbedo	Тип	Група	Спектр. нахил, %/нм	U-B	Амплітуда OE
1	Ceres	974	0.087	C	MBA	0.0244	0.426	0.22
10	Hygiea	429	0.066	C	Hygiea family	0.0142	0.351	0.18
19	Fortuna	223	0.050	G/Ch	MBA	0.0248	0.324	0.20
24	Themis	202	0.064	C/B	Themis family	0.0182	0.336	0.19
47	Aglaja	138	0.067	C/B	MBA	0.0145	0.3	0.12
50	Virginia	100	0.036	Ch/X	MBA	0.0188	0.347	0.11
59	Elpis	166	0.043	P/B	MBA	0.0221	0.285	0.07
76	Freia	159	0.049	P(X)	MBA	0.0240	0.298	0.12
85	Io	163	0.063	B	MBA	0.0044	0.294	0.28
91	Aegina	103	0.049	D	MBA	0.0074	0.317	0.17
102	Miriam	88	0.045	P/C	MBA	0.0313	0.371	0.10
105	Artemis	119	0.047	C	MBA	0.0183	0.317	0.17
127	Johanna	114	0.065	C/X	MBA	0.0299	--	0.21
130	Elektra	199	0.071	C	MBA	0.0286	0.483	0.23
146	Lucina	132	0.053	C	MBA	0.0196	0.405	0.17
153	Hilda	168	0.057	P	Hilda asteroid	0.0119	0.243	--
165	Loreley	174	0.051	C	MBA	0.0198	0.291	0.10
176	Iduna	122	0.082	C	MBA	0.0237	--	0.15
190	Ismene	180	0.051	P	Hilda asteroid	0.0253	0.269	0.01
211	Isolda	143	0.060	C	MBA	0.0257	0.364	0.23
260	Huberta	95	0.042	CX	MBA	0.0232	0.306	0.12
261	Prymno	163	0.063	X	MBA	0.0264	0.299	0.22
276	Adelheid	54	0.101	P	MBA	0.0262	0.271	0.02
303	Josephina	106	0.042	C	MBA	0.0276	--	0.17
309	Fraternitas	45	0.030	C/P	MBA	0.0343	--	0.14
313	Chaldaeaa	96	0.053	C	Chaldaeaa family	0.0260	0.342	0.18
344	Desiderata	126	0.065	C	MBA	0.0236	0.382	0.13
379	Huenna	87	0.065	C	Themis family	0.0230	0.287	0.11
404	Arsinoe	98	0.039	C	MBA	0.0223	0.333	0.06
419	Aurelia	122	0.051	F	MBA	0.0125	0.23	0.05
423	Diotima	177	0.066	C	MBA	0.0142	0.308	0.03
439	Ohio	76	0.036	P/X	MBA	0.0256	0.217	0.01
444	Gyptis	163	0.048	C	MBA	0.0206	0.293	0.11
588	Achilles	133	0.035	DU	Trojans	0.0407	0.216	0.02
596	Scheila	114	0.037	T	MBA	0.0335	0.177	0.01
604	Tekmessa	65	0.067	X	MBA	0.0240	--	0.22
615	Roswitha	47	0.060	CX	MBA	0.0396	0.315	0.13
635	Vundtia	100	0.044	C	MBA	0.0203	0.336	0.11

671	Carnegia	59	0.051	X	MBA	0.0374	--	0.10
717	Wisibada	31	0.075	DX	MBA	0.0341	0.242	0.01
884	Priamus	101	0.044	D	Trojans	0.0250	0.229	0.01
954	Li	52	0.055	FCX	MBA	0.0180	0.31	0.12
1021	Flammario	98	0.047	F/B	MBA	0.0110	0.23	0.04
1143	Odysseus	115	0.050	D	Trojans	0.0429	0.241	0.01
1390	Abastumani	108	0.026	P/D	MBA	0.0318	0.189	0.01
1748	Mauderli	52	0.037	D	Hilda asteroid	0.0004	0.264	0.02