

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет

Кафедра астрономії та космічної інформатики

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

14.06.2024 р.



Оцінка « відмінно »

Голова ЕК
проф. Віктор ТИШКОВЕЦЬ

21.06.2024 р.



Смолянїнова Ольга Андрїївна

Фотометрія астероїдів, що входять до сімейств

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



(підпис студента)

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



(підпис керівника)

Харків 2024

АНОТАЦІЯ

Смолянінова О.А. Фотометрія астероїдів, що входять до сімейств

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

У дипломній роботі проведено обробку зображень 4 астероїдів головного поясу, отриманих за результатами спостережень протягом 5 ночей та визначено абсолютні зоряні величини, одержано нові дані про амплітуди кривих блиску та показники кольору $V - R$ цих астероїдів. Було доповнено Харківську базу даних з абсолютних зоряних величин та проведено порівняльний аналіз абсолютних зоряних величин астероїдів Харківської бази з оглядом Ловелівської обсерваторії. Аналіз абсолютних зоряних величин астероїдів Харківської бази з оглядом LONEOS показав гарну узгодженість між собою, але була виявлено наявність систематичного відхилення та лінійної залежності відхилень зі збільшенням зоряної величини. Абсолютні зоряні величини з даного огляду можуть бути використані при врахуванні відповідних корекцій.

Ключові слова: абсолютна зоряна величина, крива блиску, період обертання, показник кольору.

Abstract

Smolianinova O.A. Photometry of asteroids belonging to families

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

In the thesis, images of 4 main belt asteroids obtained from observations over 5 nights were processed and absolute stellar magnitudes were determined, new data on the amplitudes of brightness curves and $V - R$ color indices of these asteroids. The Kharkiv database of absolute stellar magnitudes was supplemented and a comparative analysis of the absolute magnitudes of the asteroids of the Kharkiv database with an overview of the Loveliv observatory was carried out. The analysis of the absolute magnitudes of the asteroids of the Kharkiv base with the LONEOS survey showed a good agreement among themselves, but the presence of a systematic deviation and a linear dependence of the deviations with an increase in the magnitude was revealed. The absolute magnitudes from this review can be used with appropriate corrections.

Keywords: absolute magnitude, brightness curve, rotation period, color index.

Зміст

Вступ	1
Розділ 1. Фазові залежності блиску основних астероїдних сімейств за даними фотометричних оглядів.	3
1.1. Фазові залежності блиску за даними огляду РТФ	3
1.2. Фазові залежності блиску з огляду Слоанівської бази даних (SDSS)	8
Розділ 2. Фізичні характеристики астероїдів, що спостерігались	12
2.1. Методика обробки даних.....	12
2.2. Отримання кривих блиску та зоряних величин.....	15
2.3. Фізичні характеристики астероїдів, що спостерігались	17
Розділ 3. Порівняльний аналіз розподілу абсолютних зоряних величин Харківської бази та бази LONEOS	24
3.1. Поповнення Харківської бази даних з абсолютних зоряних величин....	24
3.2. Аналіз бази даних LONEOS.....	27
3.3. Порівняльний аналіз розподілу абсолютних зоряних величин Харківської бази та бази LONEOS.....	29
Висновки	34
Перелік використаної літератури	35

Вступ

Фотометричні спостереження дозволяють отримати багато фізичних параметрів астероїдів: абсолютні зоряні величини, показники кольору, обертальні характеристики, таксономічний тип, наявність супутників та ін. Останнім часом особлива увага приділяється вивченню астероїдів, що належать до різних сімейств та динамічних груп. Спостереження таких астероїдів необхідні для виявлення та вивчення статистичних особливостей у розподілі спектральних характеристик та обертальних властивостей, спричинених негравітаційними ефектами на популяційному рівні [11; 13; 18; 22; 23; 24; 25; 34; тощо]. З відкриттям малорозмірних астероїдів у головному поясі з діаметрами менше 10 км, суттєво збагатилася і кількісна оцінка членів, що входять до сімейств. Оскільки менші астероїди більш сприйнятливі до негравітаційних сил, їхні статистичні характеристики, імовірно, відрізняються від більших за розміром членів сімейств, оскільки зазнають більшого впливу цих сил, що дає змогу зрозуміти історію їхньої еволюції. Це було продемонстровано в дослідженнях Вестоїдів та інших родин і груп астероїдів [21; 23; 24; 25; 33; тощо].

Нещодавно, завдяки широкомасштабним оглядовим проектам, таким як Pan-STARRS, ATLAS та Gaia [8; 10; 17; 18; 19; 37; 38; 39], з'явилися нові набори даних про абсолютні зоряні величини астероїдів. Вищезазначені набори даних є однорідними, але вони зазвичай були отримані в різних фотометричних системах, а потім перетворені в систему Джонсона. Крім того, є незалежні бази даних з абсолютних зоряних величин на Ловелівській обсерваторії (LONEOS) [36] та JPL (використовується в ефемеридному додатку HORIZONS), які потребують перевірки. Для перевірки надійності подібних наборів даних і виявлення систематичних відхилень може бути використана створена в НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна Харківська база даних абсолютних зоряних величини астероїдів (КНААМД) [30]. Вона представляє собою однорідний високоякісний набір даних про абсолютні

зоряні величини астероїдів, але потребує доповнень для збільшення даних про абсолютні зоряні величини астероїдів. Все вищезгадане вказує на актуальність даної роботи.

Метою даної роботи є визначення характеристик вибраних астероїдів, що входять до астероїдних сімейств та доповнення Харківської бази даних їх абсолютними зоряними величинами.

Щоб вирішити цю мету, ставилось наступні завдання:

- а) обробка фотометричних спостережень вибраних астероїдів, що входять до астероїдних сімейств;
- б) визначення фізичних характеристик цих астероїдів, перш за все абсолютних зоряних величин та показників кольору;
- в) поповнення Харківської бази даних з абсолютних зоряних величин астероїдів;
- д) порівняльний аналіз розподілу абсолютних зоряних величин Харківської бази та бази LONEOS.

Оригінальні данні спостережень вибраних астероїдів були отримані на Чугуївській спостережній станції науковим керівником дипломної роботи та передані для подальшої обробки та аналізу.

Розділ 1. Фазові залежності блиску основних астероїдних сімейств за даними фотометричних оглядів

1.1. Фазові залежності блиску за даними огляду РТФ

Фазова залежність, являє собою зміну блиску об'єкта з фазовим кутом. Така залежність містить в собі інформацію про механізми розсіювання, структуру поверхні, розмір частинок та їх показники заломлення, також ця залежність використовується для визначення альbedo, діаметру астероїда, значення фазового інтегралу, та інше [3, 29].

У роботі Вацак та інші [40] візуальна зоряна величина астероїда моделювалась за формулою:

$$V = H + \delta + 5 \lg(r\Delta) - 2.5 \lg[\phi(\alpha)] \quad (1)$$

де H — абсолютна зоряна величина, δ — періодичний член зміни блиску, обумовлений обертанням об'єкта, Δ та r — геоцентрична та геліоцентрична відстані (в а.о.), $\phi(\alpha)$ — фазова функція, яка змінюється з кутом сонячної фази α (кут Сонце-астероїд-Земля).

Ранні роботи Боуелла [9], при невеликій вибірці добре спостережуваних фазових залежностей блиску астероїдів, припускали, що різні спектральні типи демонструють різну поведінку при різних ϕ . В своїй статті, автори графічно зобразили фазові криві, що містять щільну вибірку фотометрії астероїдів із корекцією. З нього можна побачити порівняння фазових залежностей для класів D, C, S та E, що включають дані фотометрії з різних джерел. На рисунках у статті кольоровими лініями показані оригінальні підгонки авторів статті до даних за допомогою різних моделей ϕ з одним параметром. Також, на цьому графіку добре видно розподіл за даними для чотирьох класів, зокрема в залежності від зоряної величини.

РТФ є синоптичним оглядом, що призначений для виявлення позагалактичних перехідних процесів. Камера РТФ, встановлена на 1.2-метровому телескопі Шмідта Паломарської обсерваторії, використовує 11 ПЗЗ-матриць щоб відобразити 7,3 квадратні градуси неба в одному кадрі, із

роздільною здатністю 1,0"/піксель. Для більшості експозицій (89%) використовувався фільтр R. На решті широкосмугових зображень використано g- фільтр Гунна. Близько 15% ночей (поблизу повного місяця) присвячено вузькосмуговій фотометрії у фільтрі (H α).

Вацак та інші [40] використовували спеціальний алгоритм просторової індексації для пошуку в наборі всіх одноепохових зображень PTF (до липня 2012 року) для виявлення всіх астероїдів з орбітами, відомими станом на серпень 2012 року. Дана процедура пошуку генерує рівномірно розташовані ефемериди кожного астероїда за допомогою сервісу JPL (HORIZONT system). Потім було обчислено перетин кожної кривої з тривимірним деревом (ефемерида кожного астероїда утворювала відносну криву у просторі часу, координат та зоряних величин, що в результаті давало так зване 3-дерево) і збережено позитивні виявлення в радіусі відповідності 4". В статті автори використовували таку ж модель, але модифіковану.

Рівняння (1) являє собою загальну форму для позначення моделі кривої блиску астероїда. У цій роботі автори одночасно підбирають фазову функцію ϕ разом із кривою обертання δ .

Найбільш важливим параметром є компонента обертання δ разом із синодичним періодом P , що є константою і задовольняє умову:

$$\delta(\tau) = \delta(\tau + nP)$$

де $\tau = t - \Delta/c$ скоригований час за світловий проміжок, $\Delta = \Delta(t)$ - це геоцентрична відстань астероїда, c - швидкість світла, а n - довільне ціле число, яке задовольняє умову:

$$|n| \ll P_{orb}/P$$

де P_{orb} — синодичний орбітальний період

Даний підхід є проміжним за складністю поміж деяких простіших двопараметричних моделей, що було застосовано до дуже великих наборів даних. Та більш складні моделі, котрі можуть включати в себе десятки

параметрів і вимагають більшої кількості даних, таких, що охоплюють декілька опозицій.

Автори обрали три окремі підгонки для кожної кривої блиску:

1. Двопараметрична модель Шевченка [32].
2. Однопараметрична модель HG, Боуелла [9].
3. Однопараметрична модель HG_{12} , Мйнонена [20].

Не дивлячись на більшу точність двопараметричної функції, автори все ж обрали однопараметричні моделі G та $G_{1,2}$ через їхню простоту. Проте і їх вони трохи модифікували.

Отож, першочерговим завданням при встановленні параметрів кривих блиску була саме достовірність отриманих періодів обертання. Для оцінки якості використовувалось декілька методів. Починаючи з порівняння з достовірною підвибіркою астероїдів з відомими періодами обертання, а потім повної перевірки всієї вибірки з використанням комбінації машинного навчання та ручної класифікації. Детально кожен із даних способів було описано в статті [40]. Автори зазначили, що їхній метод підгонок може відрізнитись між підгонками з використанням різних моделей фазових функцій.

Для отримання більш якісних даних, було визначено яким критеріям повинні відповідати дані:

1. Підібрані періоди будуть менш надійними, якщо вони коротші за 2,7 годин, або довші за 1 добу.
2. Підібрані амплітуди менші за 0,1 зор. вел. відповідають менш надійно підібраним періодам.
3. Криві блиску, які складаються зі спостережень астероїдів, що слабкіші за 18,5 зор. вел., набагато не надійніші ніж для яскравих.
4. Значення χ^2 (ступінь свободи) менше ніж 1,7 корелюють із менш надійними періодами.

5. Кількість спостережень на кривій блиску не прямо корелює з надійністю підігнутого періоду.
6. Співвідношення двох піків кривої блиску, відношення сигнал/шум вибраного мінімуму періодограми та невизначеність параметра абсолютної величини є сильними показниками надійності підігнутого періоду.

Також у даній статті автори виконують попередній аналіз факторів, що простежуються для параметрів кривої блиску. Вони розглядали варіації похідних параметрів кривої блиску як функцій показника кольору та діаметра. Показник кольору визначає ймовірність належності астероїда до C-типу ($p = 0$) чи до S-типу ($p = 1$). Об'єкти, які насправді не належать ні до C, ні до S типів (наприклад, V-тип, D-тип) матимуть колоріндекси, близькі до $p = 0.5$, за певних умов [40].

На рисунках в статті автори детально показали розподіл встановлених фазових параметрів відносно колоріндексу та альbedo. Хоча всі фазові параметри корелюють з колоріндексом та альbedo, лише розподіл альbedo демонструє бімодальність. Червоні та сині гістограми складаються з усіх астероїдів, що мають колірну метрику меншу за 0,25 (C-тип), або більшу за 0,75 (S-тип).

Було використано розподіл альbedo у порівнянні з G_{12} параметром для визначення іншої таксономічної метрики, аналогічної до колоріндексу, та застосовано кластерний аналіз. Центри кластерів підбирались за певним алгоритмом, і вихідна ймовірність класу для даної точки даних пов'язана з її відстанню від цих центрів кластерів. Ймовірності, близькі до 0, представляють ймовірну належність до класу C-типу, тоді як ймовірності, близькі до 1, представляють ймовірну належність до класу S-типу.

У результаті, автори отримали 54 296 підібраних кривих блиску PTF. З них не всі об'єкти мають надійно підібрані фазові функції, а такі що задовольняють всім умовам, тобто відомі періоди та параметри фазових

функцій, відомо тільки 3092 об'єкти. З них 1648 мають відомий діаметр, 651 — колоріндекс, а 361 задовольняють обидві умови.

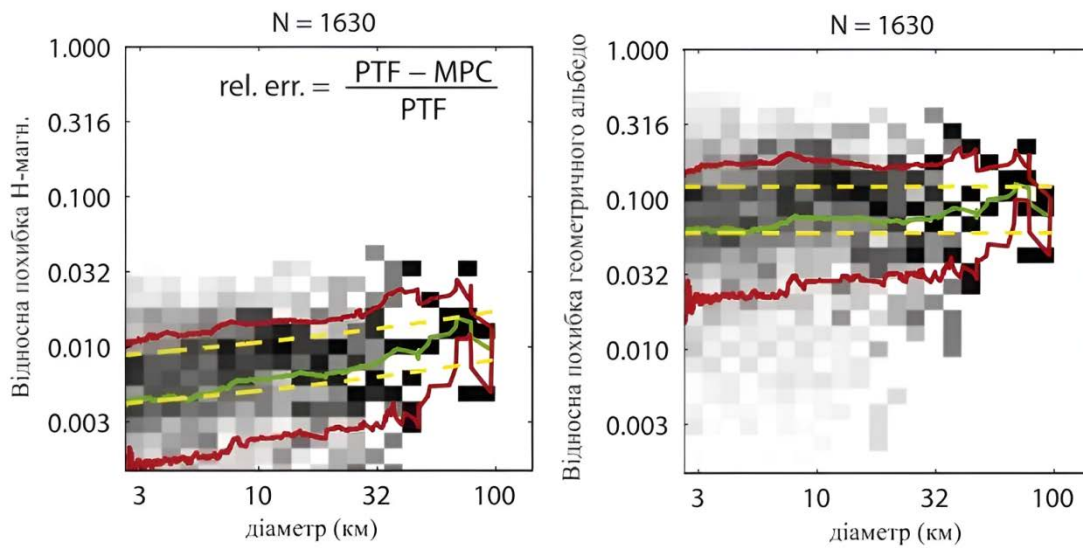


Рис. 1.1. Похибки в перерахованих у MPC абсолютних величинах відносно значень H в PTF (у R-діапазоні та з використанням значення H підгонки G_{12}), лише враховуючи астероїди з діаметрами, отриманими за ІЧ-даними. Праворуч – відповідна відносна похибка геометричного альбедо. Відносна похибка показана у вигляді логарифмічної шкали. Пікселі на двовимірних гістограмах, показаних тут, нормалізовані за стовпцями. Середнє геометричне значення, а також 16-й і 84-й процентилі показані зеленою і червоною лініями. Жовті пунктирні лінії – це середнє значення та 84-й процентиль, очікуваний лише з похибки перетворення 0,1 зор. вел [40].

На рисунку 1.1 зображено відносну похибку абсолютних величин MPC порівняно з PTF для всіх 1648 фазових залежностей блиску з достатнім покриттям фазового кута. Дані відхилення повинні відображати не лише розбіжності, але також і варіації в абсолютних фотометричних калібруваннях. Невизначеність в 0,1 зор. вел. у перетворенні R у V діапазон має значний внесок у похибку.

Отже, у цій статті автори моделювали візуальну зоряну величину астероїдів за формулою, що враховує абсолютну зоряну величину, періодичний член змінності та інші параметри, зокрема геліоцентричну та геоцентричну відстані. Вони порівняли фазові криві для різних спектральних

класів астероїдів, представивши графічні підгонки до даних за допомогою різних моделей. Камера PTF, яку вони використовували для зйомки, має високу роздільну здатність та широке охоплення неба. Для пошуку астероїдів використовувався спеціальний алгоритм просторової індексації, що дозволив авторам ефективно виявити астероїди на основі архівних даних.

Останній, третій випуск даних Palomar Transient Factory мав у своєму складі вибірккові дані для g і R діапазонів. Критерії відбору даних для третього релізу були спрямовані на побудову бази даних кривих блиску, що призвело до відсіювання значної частини низькоякісних даних. Ці дані планують покращити та включити у наступні релізи. DR3 (Data relies 3) містить ночі з кількістю експозицій, рівною 20, що призвело до прогалин у охопленні неба в базі. Загальне число отриманих даних для астероїдів (фізичних параметрів та кривих блиску) становить 4900. З яких 20 належать до навколосемних, 7 троянців, 25 таких, що перетинають орбіту Марса, 2 нововідкритих, 1329 нумерованих астероїдів головного поясу та одиночних 3517.

1.2. Фазові залежності блиску з огляду Слоанівської бази даних (SDSS)

SDSS здійснював як візуальні, так і спектроскопічні дослідження на великій ділянці неба. Для дослідження використали спеціальний 2,5-метровий телескоп, обладнаний широкоформатною мозаїчною ПЗЗ-камерою для зйомки неба у візуальній та інфрачервоній оптичних діапазонах, і два цифрові спектрографи для отримання спектрів позагалактичних джерел, вибраних з даних зображень. Незважаючи на те, що основною метою є отримання даних, необхідних для вивчення великомасштабної структури Всесвіту в широкому діапазоні масштабів, на зображеннях вдалося ідентифікувати декілька сотень тисяч астероїдів, для яких вдалося виконати таксономічну класифікацію [12].

SDSS калібрує свою фотометрію [5], використовуючи спостереження мережі стандартних зір, які спостерігались за допомогою 1-метрового телескопа Військово-морської обсерваторії США (USNO).

Великий обсяг даних, що генеруються SDSS, вимагає набору автоматизованих систем обробки даних для збору та архівування необроблених даних, виявлення та вимірювання параметрів об'єкта, астрометричного та фотометричного калібрування, вибору спектроскопічних мішеней, отримання спектрів та вимірювання різних спектральних параметрів. У своїй роботі, автори детально розповідають про методи калібрування які використовувались при наповненні Слоанівської бази даних, також описано й його методику. Не мало уваги приділено алгоритму центрування.

Загалом, дане астрометричне калібрування виконується програмою Astrom, яка обробляє за один раз одне сканування дрейфу. Використовує центроїди і створює для кожного кадру набори рівнянь, що застосовуються до центроїда.

Центроїд об'єкта визначається як перший момент розподілу світла в об'єкті. В результаті отримують зміщену оцінку центроїда. Для її покращення, спочатку, зображення об'єкта згладжується за допомогою метода Гауса та використовується квартова інтерполяція (функція 4-го ступеня). Використовуючи методику описану в статті [15], автори отримали доволі високу точність даних.

На травень 2000 SDSS отримав тестові дані зображення для приблизно 2000 кв. град неба та приблизно 20 000 спектрів. Приклади цих даних автори графічно навели в своїй статті (зразки діаграм колір-зоряна величина і колір-кутова величина об'єктів точкових джерел). В них наведено діаграми колір-колір та колір-величина, приблизно, для 117 000 точкових джерел, що яскравіші за 21 зоряну величину. На 2022 рік було представлено 127 012 фазових кривих для 94 777 астероїдів у двох фільтрах, блакитному та

помаранчевому [5]. Абсолютні зоряні і фазові коефіцієнти були отримані з використанням Баєсівської ймовірності та методу Монте-Карло. Вони були представлені як середні значення апостеріорного розподілу та інтервалу в якому лежать 95% рішень.

Автори статті [5] зазначили, що похибки для фазових кривих можуть бути відносно великими, коли її охоплює невелика кількість точок. Не зважаючи на це, вони покращили отримані значення для більшості об'єктів. Для понад 14 000 об'єктів, було покращено значення за допомогою ймовірнісних розподілів з іншою фотометричною моделлю. І вони використали ці дані, для покращення вмісту отриманої бази, автори також використовували ймовірності, які детально описали в своїй статті.

У роботі, автори розробили декілька варіантів коригування даних, для отримання кращих результатів. Вони детально описали похибку для кожного компонента та описали різницю між фазовою кривою із великою кількістю точок покриття, та з малою. Загалом, відхилення отриманих даних знаходяться в межах 0,068 - 0,071 зор. вел, що можна вважати дуже гарним результатом. Тож, що стосується якості даних, то вона висока для об'єктів яскравіших за 20 зор. вел. Фазові залежності для астероїдів було отримано в різних фільтрах, використовуючи дані із загального Слоанівського огляду. В цілому, отримано 5848 повних фазових залежностей для астероїдів, а загальна кількість спостережень об'єктів перевищує 2 млн.

Для створення бази даних було використано спеціальні телескопи та спектрографи. У SDSS було використано мережу стандартних зір (зір-порівнянь) та ПЗЗ-матриці для калібрування отриманих даних. Велику увагу було присвячено алгоритму центрування, оскільки від цього залежить точність даних. На основі отриманих значень та за допомогою вищеописаної методики, було досягнуто високої точності для об'єктів, що яскравіші за 20 зоряну величину. За допомогою цих методів було проаналізовано фазові залежності астероїдів, що означає високу точність та достовірність

отриманих залежностей. Отже, в даний момент база даних SDSS є обширним зібранням об'єктів, які пройшли якісну калібровку, оскільки похибка становить лише ± 0.1 зор. вел. Вона включає в себе широкий спектр астрономічних об'єктів, від зір і галактик до квазарів. Ця велика база даних тепер забезпечує важливим і доступним ресурсом для проведення різноманітних астрономічних досліджень. Вона дозволяє вивчати та аналізувати властивості об'єктів з високою точністю та достовірністю.

Розділ 2. Фізичні характеристики астероїдів, що спостерігались

2.1. Методика обробки даних

Для отримання даних використовувався метод диференціальної фотометрії. Цей метод полягає в тому аби знайти різницю між зоряною величиною цілі та зорею порівняння. Отриманий результат і буде різницею зоряних величин. При використанні даної методики об'єкт спостерігається через той самий фільтр, ту саму атмосферу що й зорі порівняння. Отож, усі параметри що хоч якось впливають на яскравість, повністю нівелюються, коли розраховується різниця між об'єктами зокрема й похибки калібрування або зміни чутливості приладу. Диференціальна фотометрія є легшою ніж абсолютна фотометрія, при цьому вона забезпечує високу точність вимірювання, навіть при невеликих змінах блиску [1, 31].

Видима зоряна величина при цьому розраховується за формулою:

$$m_0 = -2.5 \lg(N_0 - N_{sky})$$

N_0 — загальна інтенсивність від об'єкта, N_{sky} — значення фону.

Вибір зір порівняння має дуже велике значення під час виконання диференціальної фотометрії, оскільки зоряна величина яку ми отримуємо напряму залежить від різниці[3]. Варто зазначити, що таких зір повинно бути не менше ніж 5. Зокрема, при виконанні диференціальної фотометрії, для подальшого отримання кривих блиску астероїдів, було обрано 7-8 зір порівняння. При їх виборі зверталася увага на такі пункти:

- Не обирати змінні та подвійні зорі;
- Обрані зорі не повинні бути надто яскраві в порівнянні з астероїдом;
- Вони повинні знаходитись поблизу об'єкта, але в жодному разі не на краю зображення;
- Значення сигнал/шум (SNR) повинно бути не менше 100, і не перевищувати значення в 1000.

Відносна зоряна величина розраховувалась за формулою:

$$m = -2.5 \lg(count)$$

Потім до інструментальної зоряної величини додається стандартне значення зоряної величини зорі порівняння (її отримують з каталогу, зокрема, в даній роботі використовувався каталог «APASS: The AAVSO Photometric All-Sky Survey») [7] аби отримати видиму зоряну величину астероїда.

$$m_{target} = -2.5 \lg \left(\frac{count_{target}}{count_{ref.star}} \right) + m_{ref.star}$$

Хоча даний вид фотометрії є легшим, для отримання зоряної величини астероїда потрібно використовувати стандартну зоряну величину зорі порівняння відому заздалегідь. Крім того, зорі порівняння повинні бути в тому ж полі зору що й ціль, протягом усього періоду спостережень.

При використанні диференціальної фотометрії, важливо записувати обрані зорі порівняння, навіть якщо було виконано попередню редукацію зображень. Також, достатньо важливим є отримання вимірювань, хоча б, у двох фільтрах, оскільки перехід до стандартної системи буде неможливим без показника кольору. Використання лише одного V фільтра є можливим за умови, коли напевно, що показник кольору зорі порівняння близький до сонячного.

Даний метод зазвичай застосовується для завдань в яких потрібно дослідити об'єкт протягом деякого інтервалу часу. Якість фотометрії тут напряду залежить від вибору зір порівняння та від точності їхньої різниці із ціллю. Тому, даний метод якнайкраще підходить для визначення зоряної величини астероїдів.

Диференціальна фотометрія має низку переваг, зокрема, вона дозволяє уникнути багато систематичних похибок, а при їх відсутності вона може забезпечувати високу точність вимірювання яскравості об'єктів, що є дуже важливим при дослідженні слабких цілей.

Як було сказано раніше, не менш важливим є каталог із якого беруться дані для зір порівняння. У даній роботі було використано каталог «APASS: The AAVSO Photometric All-Sky Survey»[14]. Основна мета цього проєкту — забезпечення точних вимірювань параметрів яскравості зір в різних частинах неба. Даний каталог можна застосовувати для доволі широкого спектру досліджень, включаючи й визначення яскравості астероїдів.

Для збирання даних використовують невеликі автоматизовані телескопи, що розташовані в різних частинах світу. Дані телескопи мають широке поле огляду та їхній діаметр дзеркал складає від 20 до 50 см. Всі дані надходять в AAVSO (American Association of Variable Star Observers), цей центр є основним координатором проєкту.

Вимірювання відбуваються у кількох фільтрах у системі Джонсона. [1, б] Зокрема у синьому (B), видимому (V) та в інфрачервоному (I). Рідше в g' та r' слоанівських смугах. Це дозволяє отримувати дані про кольори зір та їх яскравості.

Варто зазначити, що першою стандартною системою яка була добре охарактеризована та реалізована була UBV система Джонсона. На момент створення вона складалась лише із трьох смуг пропускання UBV (U — ультрафіолетовий, B — блакитний, V — видимий). Пізніше до неї додали червону смугу (R) та інфрачервону (I).

Варто зазначити що більшість ПЗЗ чутливі в R смузі, але не дуже в U, саме тому більшість сучасних спостережень проводяться в B, V, R, та I смугах. Але не дивлячись на цей недолік, в даній системі проведено більшість вимірювань блиску. [1]

Нижче наведено таблицю, із зазначеними в них середніми довжинами хвиль та півширини в цих смугах загальної системи Джонсона-Козінса.

Таблиця 2.1

Смуга	U	B	V	R	I	J	H	K	L	M	N	Q
λ_0	0.36	0.44	0.55	0.70	0.88	1.25	1.62	2.2	3.5	5.0	10.4	20.0
$\Delta\lambda$	0.04	0.10	0.08	0.21	0.22	0.30	0.2	0.6	0.9	1.1	6.0	5.5

Показники кольору можна використовувати для визначення фізичних характеристик. Найчастіше використовують різницю (B-V), оскільки для більшості небесних об'єктів, він легко вимірюється.

Отже, каталог AAVSO забезпечує високу точність вимірювань для зір до 15 зор. вел., при цьому для V-фільтра похибка не перевищує 0,03 зор. вел., а для інших фільтрів — близько 0,05. Точність може варіюватись в залежності від умов спостереження та яскравості об'єктів. Чим слабкіша ціль, тим більша похибка вимірювань.

2.2. Отримання кривих блиску та зоряних величин

Крива блиску являє собою графік зміни яскравості об'єкта протягом певного періоду часу. Для дослідження астероїдів, об'єктів що змінюють свою яскравість, крива блиску є дуже цінним інструментом для вивчення. Графік показує зміну яскравості астероїда що спостерігався за допомогою телескопа на протязі певного проміжку часу. У результаті було отримано вимірювану криву блиску [28].

Запис змін яскравості може допомогти зрозуміти астрономам певні процеси що відбуваються в/на об'єкті, що вивчається. Зокрема, з її допомогою можна визначити тип об'єкта що спостерігається, приналежність астероїда до класу, альbedo, тощо.

Оригінальні зображення спостережуваних астероїдів, що були отримані на Чугуївській спостережній станції, були надані науковим керівником Шевченком В. Г.

Отримані зображення було завантажено в програмну оболонку MaxIm DL де виконано фотометрію зображень, згідно із вищеописаною методикою. Для більшої точності розрахунку було підібрано до 7 зір порівняння для кожного астероїда, із співвідношенням SNR в межах від 100 до 1000, та із значенням зоряної величини в діапазоні 10,5 – 13,5. Як було сказано раніше, дані для них було взято з каталогу AAVSO, отримавши дані, було розраховано

значення зоряної величини для кожної зорі, у двох фільтрах V та R. Для того щоб розрахувати зоряну величину астероїда, підставлялися значення для зір порівняння в програмну оболонку і на їхній основі, програмою за вищенаведеними формулами було розраховано значення блиску для астероїда.

Після проведення апертурної фотометрії у програмній оболонці, було отримано файл *.csv, що містив в собі дані щодо часу у форматі JD, фільтр у якому знято зображення, значення зоряної величини, похибку та інтенсивність потрібного об'єкта (астероїда). Отримавши відповідну таблицю, було проведено уточнення значень часу та зоряної величини. Для того аби їх відкорегувати, було використано Ephemeris Service MPC (електронний доступ: <https://minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>), зокрема дані про ефемериду об'єкта в ту ніч коли велись спостереження. Правильність даних параметрів, напряму впливає на весь результат, тому не менш важливим було правильно зробити обчислення [2, 4].

Після коригування отриманих даних було побудовано відповідні криві залежності зоряної величини від часу. Користь даного графіку полягає в тому, що з його допомогою можна визначити період обертання астероїда. Для отримання складеної кривої блиску було використано формулу:

$$\alpha^{\circ} = \frac{\Delta t_{JD}}{P} - q \left[\frac{\Delta t_{JD}}{P} \right]$$

де $\Delta t_{JD} = t_{JD0} - t_{JD}$ — різниця в часі, t_{JD0} — початковий момент часу, t_{JD} — поточний час. P — період обертання астероїда визначений із графіка, q — ціла частина від ділення. Також важливо, початкова точка на фазі обертання (кут, на який, в даний момент часу, повернуто тіло щодо його початкового положення) завжди дорівнює 0, якщо це так, то розрахунки проводяться вірно [16].

Після цього було побудовано складену криву блиску скоригованої зоряної величини від фази обертання. З нього, уточнювались отримані значення.

Зображення були отримані у двох фільтрах, тому для кожного фільтру дане завдання було виконано окремо.

2.3. Фізичні характеристики астероїдів, що спостерігались

У даній роботі були опрацьовані дані для чотирьох астероїдів, що відносяться до різних сімейств: (2379) Heiskanen, (2427) Kobzar, (2763) Jeans, (8694) 1993 CO. Спостереження проводились у двох фільтрах V та R фотометричної системи Джонсона-Козінса. Основним завданням була обробка спостережного матеріалу, побудова кривих блиску та оцінки зоряних величин і показників кольору. Спостережні дані є потужним інструментом для отримання різної інформації, особливо абсолютних зоряних величин. Абсолютна зоряна величина пов'язана з кількістю світла яке відбиває об'єкт, з його площею і альбедо. Фазова залежність блиску містить інформацію про оптичні властивості розсіяного світла поверхнею та дозволяє оцінити абсолютну зоряну величину. Враховуючи, що спостереження за об'єктами (астероїдами) велися протягом однієї ночі, отримати велику кількість інформації було неможливо, але за отриманими даними вдалося оцінити амплітуду та показник кольору, та використовуючи літературні дані класифікувати астероїд до таксономічного класу.

Таблиця 2.2. Аспектні та фізичні дані астероїдів, що спостерігались

№	Назва	Дата	Координати		Δ а.о	r а.о	Тип	α град	P год	H mag
			λ	β						
2379	Heiskanen	28.10.2021	36,755	-0,679	1,659	2,653	C	0,6	3,76±0,01	11,09
2427	Kobzar	29.10.2021	38,169	1,284	1,301	2,294	S	0,9	7,00±0,01	12,83
2763	Jeans	06.12.2020	109,235	2,904	1,635	2,511	V	12,8	7,70±0,10	12,43
		08.12.2020	108,867	2,888	1,625	2,516		11,9		
8694	1993 CO	27.10.2021	34,49	-0,584	1,776	2,769	C	0,2	6,07±0,01	12,71

В Таблиці 2.2. представлені аспектні дані спостережень (екліптичні координати об'єкта, фазовий кут та відстані до Землі та Сонця) та деякі фізичні характеристики спостережуваних астероїдів, які були зібрані за

літературними джерелами (період обертання, тип та абсолютна зоряна величина за даними MPC).

Астероїд (2379) Heiskanen було відкрито 21 вересня 1941 року, в обсерваторії Туруку (Ісо-Хейккіля) Вайсялем, Фінляндія. Спочатку мав назву 1941 ST, пізніше названий на честь фінського геодезиста В. Хейсканена. Наразі, сучасне значення абсолютної зоряної величини за даними MPC становить 11,09 зор. вел. Він відноситься до сімейства Теобальда, що знаходиться в зовнішній частині поясу астероїдів.

Дані фотометричних спостережень астероїда (2379) Heiskanen було отримано протягом однієї ночі спостережень 2021/10/28 на Чугуївській спостережній станції. Використовуючи базу даних Ferret, встановлено, що період даного астероїда становить 0,157 доби, тобто 3,76 годин з похибкою $\pm 0,01$. Окрім того, даний об'єкт спостерігався в інфрачервоній ділянці спектру для визначення альbedo та діаметру [26, 27, 35]. Згідно з цими спостереженнями, було визначено що його діаметр становить $32,2 \pm 0,5$ км, а альbedo $0,075 \pm 0,010$. На рисунку 2.1 зображено залежність зоряної величини від часу на протязі двох годин спостережень, з неї видно що максимальна амплітуда кривої блиску становить $-0,17$ зор. вел. Обчислений показник кольору V-R становить $0,36 \pm 0,01$, що враховуючи значення альbedo, вказує на приналежність його до C- класу астероїдів.

Також, було оцінено абсолютну зоряну величину H в системі HG₁G₂ [32], але оскільки значення зоряної величини було отримано при фазовому куті 0,6 град, то онлайн-калькулятор <https://psr.it.helsinki.fi/HG1G2/> не використовувався, лише була врахована амплітуда зміни блиску, це значення становить $11,05 \pm 0,08$ зор. вел. Отриманий результат повністю співпадає із даними, що представлені в MPC (11,09 зор. вел.).

Астероїд (2427) Kobzar було відкрито 20 грудня 1976 року, в НДІ "Кримська астрофізична обсерваторія" Черних Н. С., Україна. Спочатку мав назву 1976 YQ7, а пізніше отримав назву на честь Т.Г. Шевченка. Він

відноситься до середнього за кількістю членів сімейства Мерксія, серед якого більшість членів відносяться до S-астероїдів.

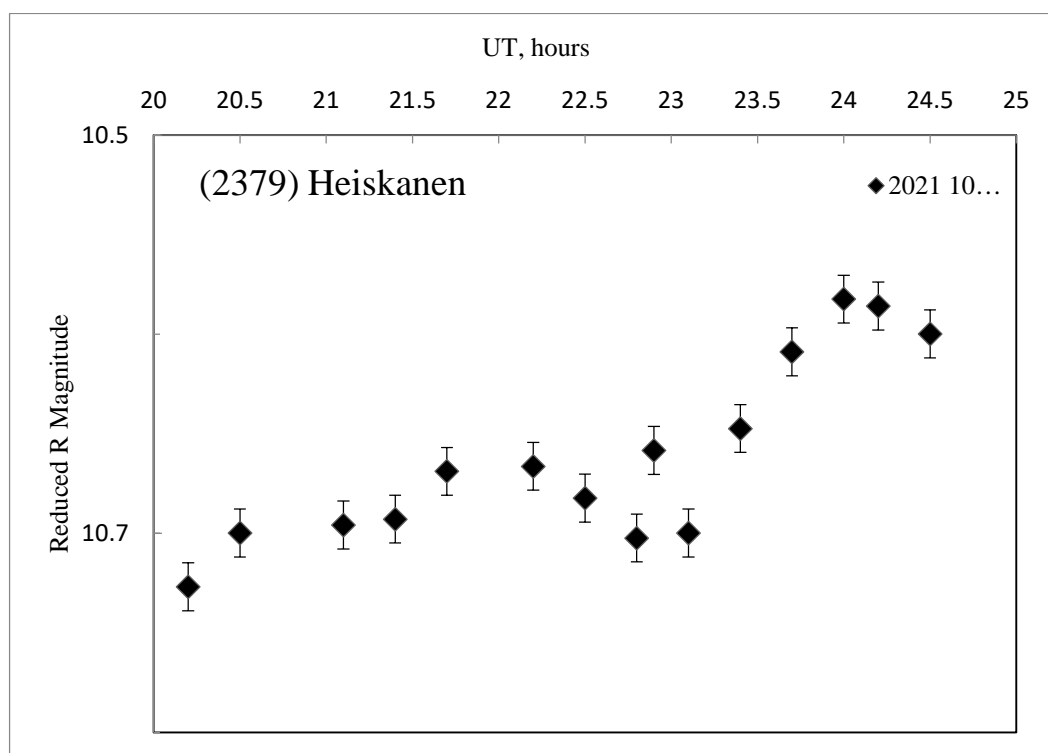


Рис. 2.1. Крива блиску астероїда (2379) Heiskanen

Дані фотометричних спостережень астероїда (2427) Kobzar було отримано протягом однієї ночі спостережень 2021/10/29 на Чугуївській астрономічній станції. Переглянувши наявні дані у базі даних Ferret, було визначено, що період обертання становить 0,292 доби, тобто близько 7,0 години. Даний об'єкт мало досліджений, тим не менш, він має такі фізичні параметри [30]: діаметр його становить $8,3 \pm 0,2$, а альbedo — $0,20 \pm 0,02$. Нижче зображено графік залежності зоряної величини від часу (рис. 2.2), з нього видно, що максимальна амплітуда кривої блиску за час спостережень 2,5 години, надзвичайно мала і не перевищує 0,05 зор. вел. Вимірний показник кольору V-R становить $0,45 \pm 0,03$, вважаючи, що альbedo відноситься до середньоальбедних астероїдів, то він належить до S класу.

Оскільки спостереження цього астероїда було отримано при фазовому куті 0,9 град, то звичайна екстраполяція на нульовий фазовий кут з врахуванням амплітуди дає значення $12,85 \pm 0,04$ зор. вел. Отриманий результат також дуже добре співпадає із даними, що представлені в MPC (12,84 зор. вел.).

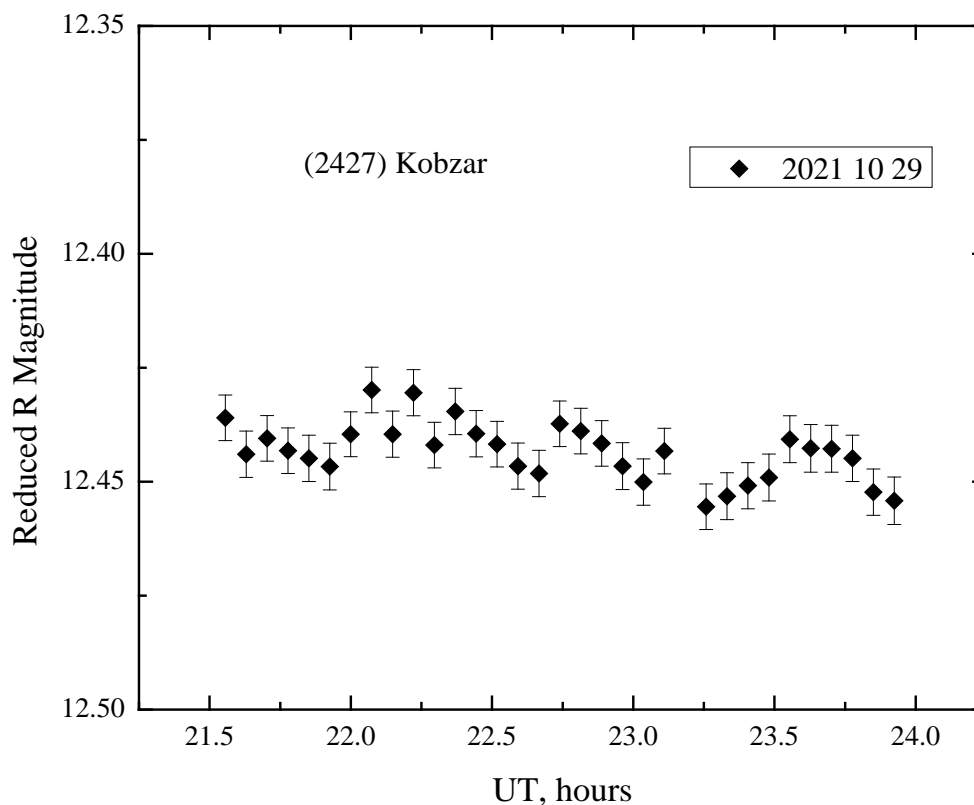


Рис. 2.2. Крива блиску астероїда (2427) Kobzar

Астероїд (2763) Jeans було відкрито 24 червня 1982 року, на спостережній станції Андресон-Меса в США, Едвардом Боуеллом, і отримав початкову назву 1982 OG. Він відноситься до сімейства Вести та класифікований як V-астероїд.

Дані фотометричних спостережень астероїду (2763) Jeans було отримано протягом двох ночей 2020/11/06 та 2020/11/08 на Чугуївській спостережній станції. Звіривши дані з базою Ferret, було визначено, що період даного астероїда становить 0,323 доби, тобто 7,75 годин з похибкою $\pm 0,10$. Згідно з останніми дослідженнями, діаметр астероїда становить $7,5 \pm$

0,2 км та альbedo $0,41 \pm 0,08$, це альbedo характерно для більшості V-астероїдів. На рисунку 2.3 зображено складену криву блиску, отриману на протязі двох ночей з періодом 7,88 годин. Крива блиску показує, що максимальна амплітуда становить 0,13 зор. вел. Вимірний показник кольору V-R становить $0,49 \pm 0,03$, і це підтверджує, що він належить до V класу.

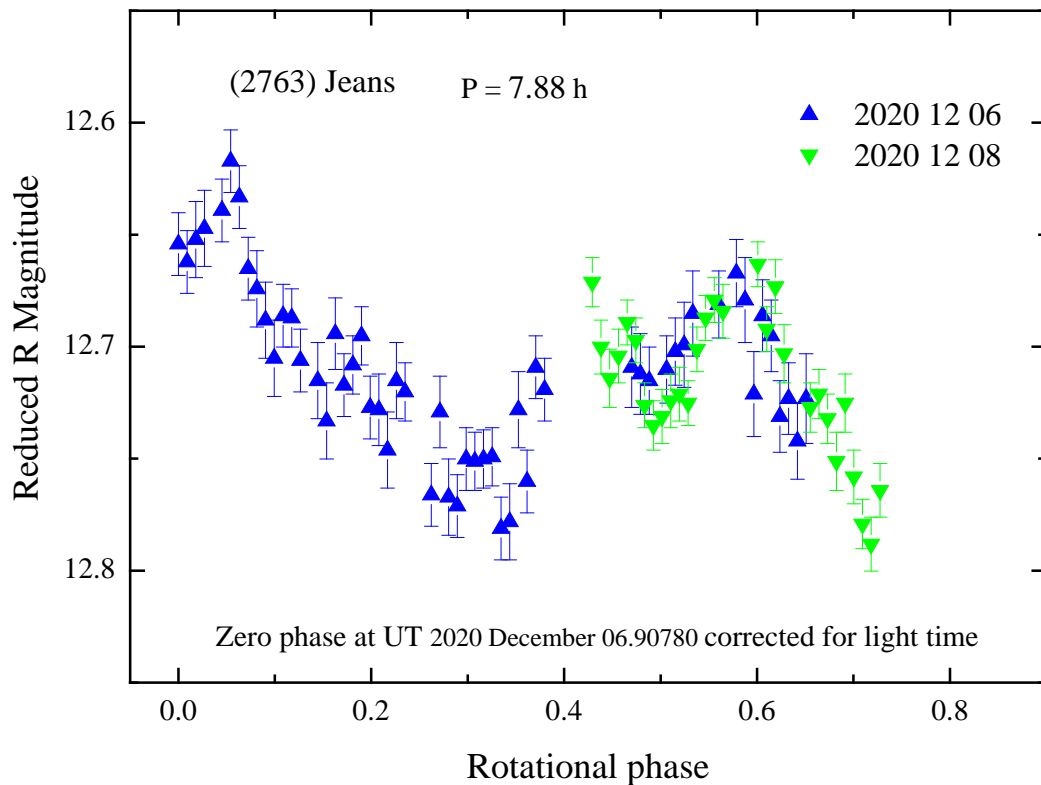


Рис. 2.3. Складена крива блиску для астероїда (2763) Jeans

Також, було оцінено абсолютну зоряну величину H в системі HG_1G_2 [9]. Оскільки значення зоряної величини було отримано при фазових кутах близьких до 12 град, то був використаний онлайн-калькулятор <https://psr.it.helsinki.fi/HG1G2/>, [20, 32] з середніми значеннями параметрів для високоальбедних астероїдів. Враховуючи амплітуду зміни блиску, це значення становить $12,37 \pm 0,07$ зор. вел. Отриманий результат відрізняється від даних, що представлені в MPC (12,43 зор. вел.).

Астероїд (8694) 1993 CO було відкрито 10 лютого 1993 року, в обсерваторії Кушіро, Японія, Уедом С. та Канедом Г. Він відноситься до

достатньо великого сімейства Короніс, що складається в основному з S-астероїдів, але знаходиться ближче до зовнішньої частини поясу.

Дані фотометричних спостережень астероїда (8694) 1993 CO було отримано протягом ночі спостережень 2021/10/27 на Чугуївській астрономічній станції. Переглянувши наявні дані у базі даних Ferret, було знайдено, що період даного астероїда становить 0,25 доби, тобто 6,07 години з похибкою $\pm 0,01$. Згідно з останніми дослідженнями, значення діаметра для цього об'єкта становить $8,3 \pm 0,4$, а для альbedo, було отримане значення $0,49 \pm 0,14$ [30, 35]. На рис. 2.4 зображено криву блиску даного астероїда на протязі двох годин, з нього видно, що варіації блиску досягають 0,18 зор. вел. Вимірний показник кольору V-R становить $0,40 \pm 0,03$, це підтверджує, що даний астероїд належить до S класу.

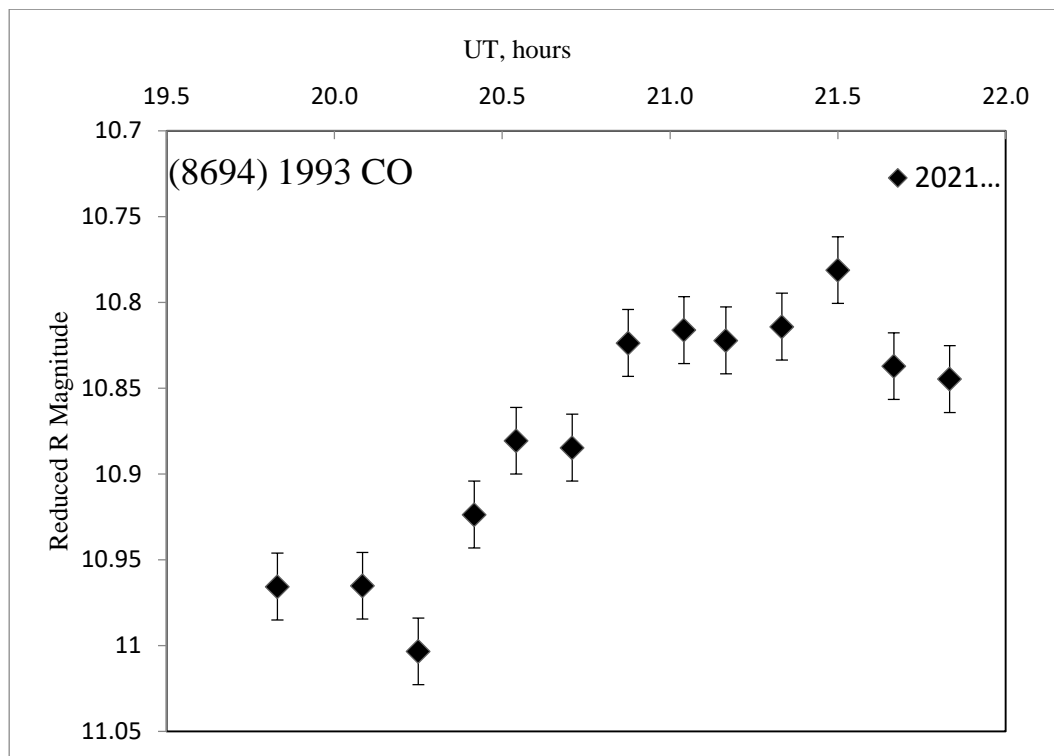


Рис. 2.4. Крива блиску астероїда (8694) 1993 CO

Оскільки спостереження цього астероїда було отримано при фазовому куті 0,2 град, то екстраполяція на нульовий фазовий кут з врахуванням амплітуди кривої блиску дає значення $12,75 \pm 0,10$ зор. вел. Отриманий

результат також добре співпадає із даними, що представлені в МРС (12,71 зор. вел.).

Загалом, дані астероїди досліджуватись не вперше, але можна помітити, що в багатьох дослідників дані про зоряну величину відрізняються один від одного, іноді із дуже суттєвою різницею. Саме тому, завдання створення однорідної точної бази зоряних величин надзвичайно важливе. Враховуючи весь період спостережень, можна помітити, що дані в МРС з кожним роком стають все точнішими, але все одно в залежності від причин, похибки є відчутними, хоча і меншими. Тому в НДІ астрономії було створено Харківську базу даних абсолютних зоряних величин астероїдів, про яку йтиметься згодом. Оцінки абсолютних величин спостережуваних астероїдів були додані до цієї бази даних.

Розділ 3. Порівняльний аналіз розподілу абсолютних зоряних величин Харківської бази та бази LONEOS

3.1. Поповнення Харківської бази даних з абсолютних зоряних величин

Наразі основною базою даних абсолютних зоряних величин астероїдів є Центр малих планет (MPC). До центру надходять дані із багатьох обсерваторій та спостережних станцій вимірюваних у різних спектральних діапазонах та фотометричних системах. Тому величини з MPC можуть мати різні системні та випадкові похибки при стандартизації даних.

Харківська база даних абсолютних зоряних величин астероїдів (KhAAMD) [30] містить в собі набір абсолютних зоряних величин для 356 астероїдів у новій системі HG_1G_2 . Дані зібрані в Інституті астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках довгострокової програми спостережень для вивчення фазових кривих блиску астероїдів. Також, дана база має спостережувані дані отримані в інших програмах.

Зі спостережень, дослідник може одразу визначити видиму зоряну величину m , але не отримає з цього жодної користі, тому було введено поняття абсолютної зоряної величини H . Такою називається така зоряна величина астероїда, яку б він мав би, якби знаходився на відстані 1 а.о. від Сонця та спостерігача. Це зроблено для того, аби мати змогу порівняти яскравість різних астероїдів при однакових умовах. Варто зазначити, абсолютна зоряна величина є однією із основних характеристик астероїда, та залежить від його розмірів та відбивної здатності. Використовуючи її та припущення щодо альbedo, проводять оцінку діаметра (D) астероїдів. Наразі, це майже єдина можливість отримати розмірні параметри без атмосферних тіл у Сонячній системі.

Зв'язок між альbedo та діаметром задається формулою [19]:

$$\lg D = 3.1236 - 0.2H - 0.5\lg(p_V)$$

де D — діаметр, H — абсолютна зоряна величина, p_V — відбивна здатність (альbedo) [4] і використовується у багатьох практичних завданнях.

Маючи справу з реальними даними, визначення H зводиться до визначення фазової функції [22], оскільки залежність до Землі та Сонця, яка є обернено квадратичною залежністю, враховується тривіально. Звернемо увагу, що багато астероїдів головного поясу не спостерігаються при фазових кутах $<10^\circ$, тому ми повинні екстраполювати за фазовим кутом від 0° , враховуючи те що ми знаємо про зміну зоряної величини як функцію фазового кута. Дана зміна є переважно лінійною, але на фазових кутах менше 7° спостерігається нелінійний хід (опозиційний ефект, далі ОЕ). Вважається, що його походження пов'язане із взаємодією механізмів затінення і зворотного когерентного розсіювання.

Для вирішення даної проблеми було введено двопараметричну функцію H, G , але автори статті [22] вдосконалили її, зробивши трипараметричну HG_1G_2 функцію.

Фазові функції для астероїдів можна описати у вигляді кривих. Нехай α — фазовий кут, тоді $V(\alpha)$ — зоряна величина, що приведена до одиничної відстані (смуга V Джонсона [2]).

Згідно з [22] значення зоряної величини при конкретному фазовому куті може бути визначено:

$$\begin{aligned} 10^{-0,4V(\alpha)} &= a_1\Phi_1(\alpha) + a_2\Phi_2(\alpha) + a_3\Phi_3(\alpha) \\ &= 10^{-0,4H} [G_1\Phi_1(\alpha) + G_2\Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)] \end{aligned}$$

Де $\Phi_1(0) = \Phi_2(0) = \Phi_3(0) = 1$. Абсолютна зоряна величина H і коефіцієнти можна знайти зі співвідношень:

$$H = -2.5 \lg(a_1 + a_2 + a_3),$$

$$G_1 = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3},$$

$$G_2 = \frac{a_2}{a_1 + a_2 + a_3}.$$

Відповідно, базисні функції Φ_1 , Φ_2 і Φ_3 згідно з визначенням авторів [39] становлять:

$$\Phi_1(\alpha) = 1 - \frac{6\alpha}{\pi},$$

$$\Phi_2(\alpha) = 1 - \frac{9\alpha}{5\pi},$$

$$\Phi_3(\alpha) = \exp\left(-4\pi \operatorname{tg}^{\frac{2}{3}} \frac{1}{2} \alpha\right).$$

Дану три параметричну функцію було реалізовано авторами [22, 26] за допомогою веб-технологій. В її основі лежить метод найменших квадратів, та передбачає обрахування похибки, можливість обрати лінійну/нелінійну апроксимацію. Користувач може завантажити вхідний файл, що містить у собі фазові кути і спостережувані значення зоряної величини об'єкта. Після обрання виду підгонки ОСР повідомить одну із семи рекомендованих моделей на основі статистики ВІС. Після чого надасть результати які являють собою модельні оцінки похибок та графік. Режим доступу: <https://psr.it.helsinki.fi/HG1G2/>. Ця система була прокалібрована за тим же набором даних що й попередня HG-система, але додатково були використані і нові дані [15, 39]. Але зі збільшенням даних виникла необхідність у визначенні середніх значень нових параметрів. Такі роботи були виконані рядом авторів під керівництвом К. Муйнонена (слід відмітити, що до впровадження цієї функції були включені і співробітники НДІ астрономії нашого університету) [4].

Показники кольору являють собою характеристики колірної складової світла, що відбиває астероїд. Вони залежать від довжини хвилі світла та мінералогічного складу астероїда, оскільки деякі мінерали мають здатність поглинати світло на певних довжинах хвиль, і це може відобразитися у

показниках кольору. У більшості випадках для такого використовують фотометричну систему Джонсона, так звану UVV-систему. Усі зоряні величини були виміряні у V смузі системи Джонсона. Загалом, найчастіше використовують U-B, B-V, V-R та R-I показники, проте, залежність даних показників кольору від фазового кута, вивчена погано. Фазові кути для головного поясу астероїдів змінюється від 0 до 25 градусів. В цих межах блиск астероїда збільшується лінійно приблизно до 7 градусів разом із зменшенням фазового кута [22]. Такі залежності є дуже інформативними при діагностиці механізмів розсіювання в реголітовому шарі, проте все ще погано вивчена область OE.

В даній роботі Харківська база абсолютних зоряних величин була доповнена новими даними, це перш за все абсолютні зоряні величини для чотирьох астероїдів, що спостерігались, а також абсолютні зоряні величини ще двадцяти астероїдів, результати спостережень яких було опубліковано працівниками відділу Фізики астероїдів та комет НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Таким чином загальна вибірка кількості об'єктів у Харківській базі складає 380 астероїдів. Раніше було виконано порівняльний аналіз між даною базою даних та базами MPC, Pan-STARS, ATLAS, PTF та Gaia. В даній роботі виконується порівняльний аналіз Харківської бази з базою LONEOS.

3.2. Аналіз бази даних LONEOS

Запровадження нових технологій в сфері астрономії спричинило збільшення об'єму астрономічних даних, яке в свою чергу посприяло створенню центрів астрономічних даних, які поєднали в собі бази даних з різних обсерваторій, телескопів тощо.

В даній роботі розглядається одна із основних таких баз астероїдних даних — Ловелівська база даних, найбільший період активних відкриттів якої припадає на 1999-2006 рр.

У своїй програмі LONEOS використали 60 сантиметровий телескоп Шмідта і 16 Мпк ПЗЗ камеру. Даний телескоп розташовано в Ловелівській обсерваторії, штат Арізона, США. За допомогою цього, даний інструмент може охопити все доступне нічне небо протягом місяця. ПЗЗ виявляв навіть досить слабкі астероїди з значенням зоряної величини 19.8, але все ж граничною величиною вважається 19.3. Телескоп LONEOS частково автоматизований, це значно спрощує завдання дослідникам. [36]

Для отримання даних використовувалось два комп'ютери, один для наведення телескопа, і ще один для керування камерою. Також було застосовано програмне забезпечення для камери, за допомогою якого можна було керувати всіма іншими пристроями.

Для того аби знаходити астероїди, робились чотири знімки однієї області неба. Потім даний набір зображень редагували, і під час цього виявлялись всі зорі на кадрі, та ідентифікувались джерела світла які рухались (астероїди). Спостерігач обов'язково візуально перевіряв усі виявлені малі тіла, рух яких відрізнявся від типового астероїда головного поясу. Робота телескопу була дуже добре автоматизована, настільки, що спостереження можна було проводити без участі спостерігача, однак, в такому режимі він майже не використовувався.

До 2007 року, для переведення отриманих положень астероїдів в екваторіальну систему координат, використовувався каталог USNO. Потім використовували Слоанівську базу даних та 2MASS. Готові дані яскравості астероїда представлялись у вигляді таблиці з екваторіальних координат та зоряної величини, та було надіслано в Центр малих планет (MPC).

Станом на 2017 рік, вважається що в LONEOS було проведено 5 212 685 досліджень в результаті яких відкрито 22077 астероїдів в період 1998-2008 рр. Відкриття включають в себе навколоземні об'єкти, астероїди що перетинають орбіту Марсу та астероїди головного поясу.

За останні чотири роки досліджень, обсерваторія Лоувелла сфотографувала майже половину неба в кілька епох. Протягом цього часу, було отримано велику базу даних, що чудово підходить для вивчення змінних об'єктів та астероїдів.

Наразі, база даних містить 15000 кв. град з 8 епохами, та 6000 кв. град з 20 епохами спостережень. При перехресному співвідношенні фотометрично ідентифіковані змінні в базі даних LONEOS з об'єктами, що мають спектроскопічні дослідження в публікаціях EDR цифрового огляду SDSS, було показано, що схеми ідентифікації та класифікації є надійними. Дані результати демонструють потужність цієї бази даних. Крім того, вона часто використовується для фізичних досліджень астероїдів, оскільки в ній автоматично визначаються абсолютні зоряні величини.

3.3. Порівняльний аналіз розподілу абсолютних зоряних величин Харківської бази та бази LONEOS

Як було сказано вище, база LONEOS, зробила великий вклад в дослідження астероїдів, та їхніх характеристик, в тому числі були визначені абсолютні зоряні величини астероїдів. Тому, при виконанні даної роботи, було поставлено завдання порівняти дану базу із KhAAMD. Для того, аби це зробити, було отримано відповідні дані із Лонеоської бази даних.

Варто зазначити, враховуючи невелику кількість астероїдів, справедливо вважати, що набір значень у базі даних KhAAMD набагато точніший, ніж у інших базах даних з якими вона порівнювалась, адже кожен з об'єктів, детально перевірявся вручну, що значно зменшує кількість випадкових похибок. Детально про це написано у статті [30]. Відповідні дані із бази LONEOS, було отримано на сайті Lowell Minor Planet Service.

На рис. 3.1 зображено залежність між зоряними величинами Харківської бази та LONEOS. Для порівняння, було використано відповідні дані із бази Minor Planet Center (MPC), оскільки дана база є однією із

найбільш наповнених. Доступ до даної бази можливий через електронний ресурс <https://minorplanetcenter.net>.

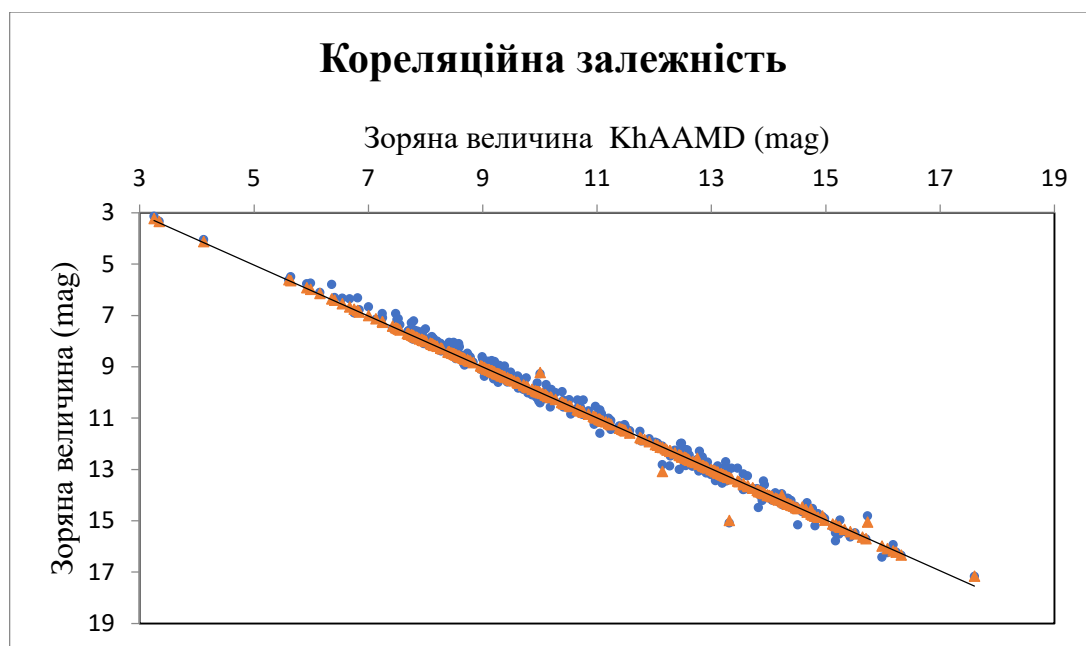


Рис. 3.1. Кореляційна залежність бази KhAAMD та LONEOS, відносно бази MPC. Де синім кольором позначено MPC базу даних, помаранчевим — базу LONEOS.

З цього графіку кореляційної залежності добре видно розбіжності між базами. Завдяки тренду, можна побачити невелике систематичне недооцінення зоряних величин базою LONEOS. Тим не менш, коефіцієнт кореляції складає 0,996, що вказує на хороше співпадіння між зоряними величинами досліджуваних баз.

На Рис. 3.2. зображено різницю між значеннями зоряних величин, що входять до цих баз. Загальний розкид відхилень не перевищує 0,6 зор. вел. З нахилу лінії тренду можна побачити, що для більш яскравих астероїдів з зоряною величиною <10 є завищення зоряної величини, тобто у базі LONEOS зоряна величина таких об'єктів збільшена. Для об'єктів з зоряною величиною >10 , навпаки, вони виглядають більш яскравими. Таку тенденцію можна пояснити недостатньою якістю даних для деяких об'єктів, а також похибкою при перетворенні в стандартну фотометричну систему. З цього можна зробити висновок про бімодальність відхилень для даної бази.

Похибки для коефіцієнта нахилу для тренду та вільного коефіцієнта становлять $\pm 0,004$ та $\pm 0,05$ відповідно.

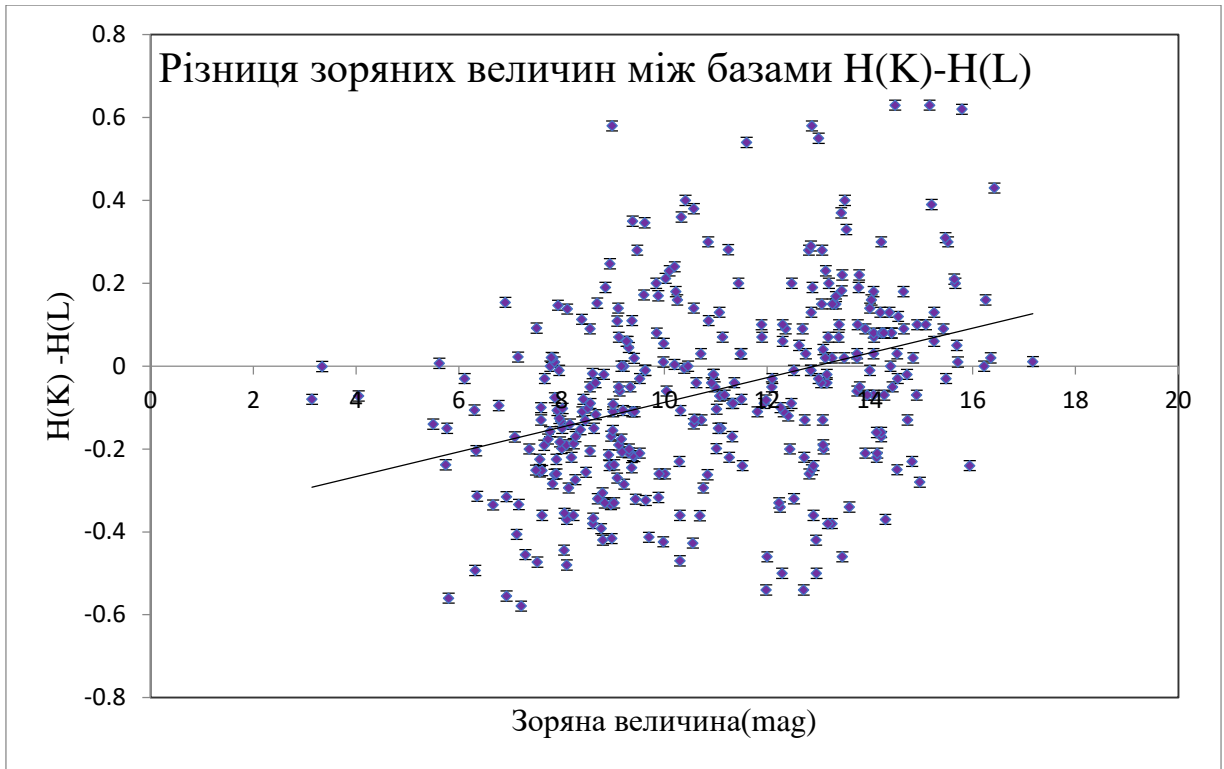


Рис. 3.2. Різниця зоряних величин в двох базах даних. Суцільна лінія — лінія тренду: $y = 0,028(\pm 0,004)x - 0,38(\pm 0,05)$.

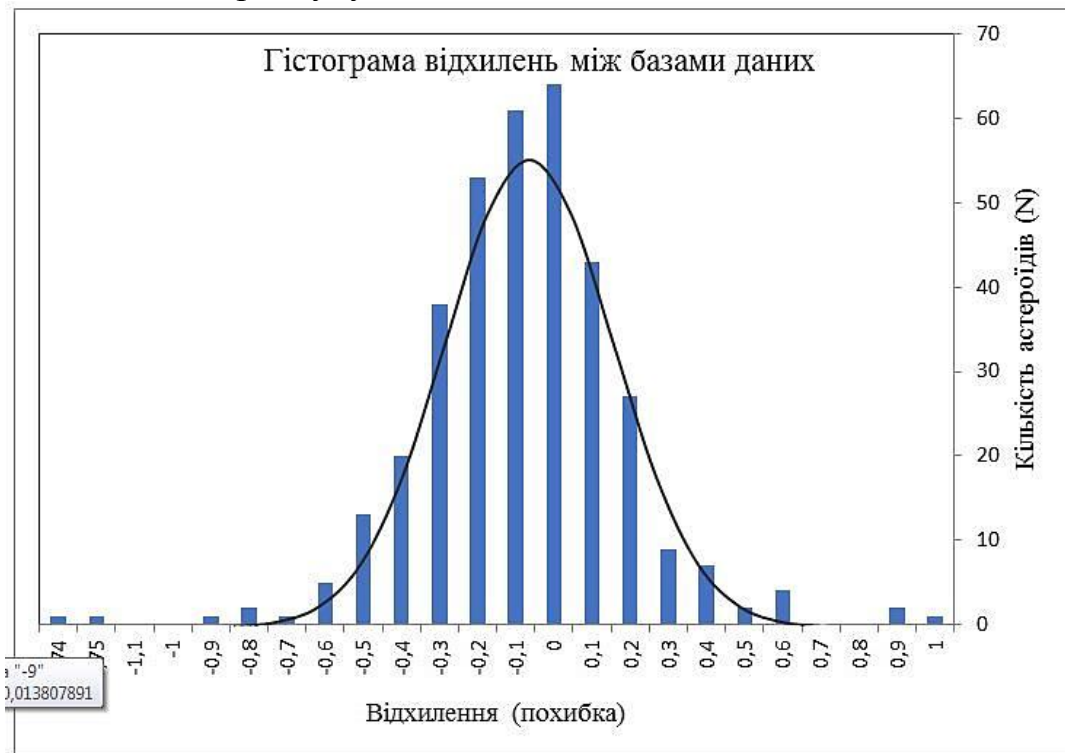


Рис. 3.3. Гістограма відмінностей баз даних. Суцільна лінія — нормальний розподіл.

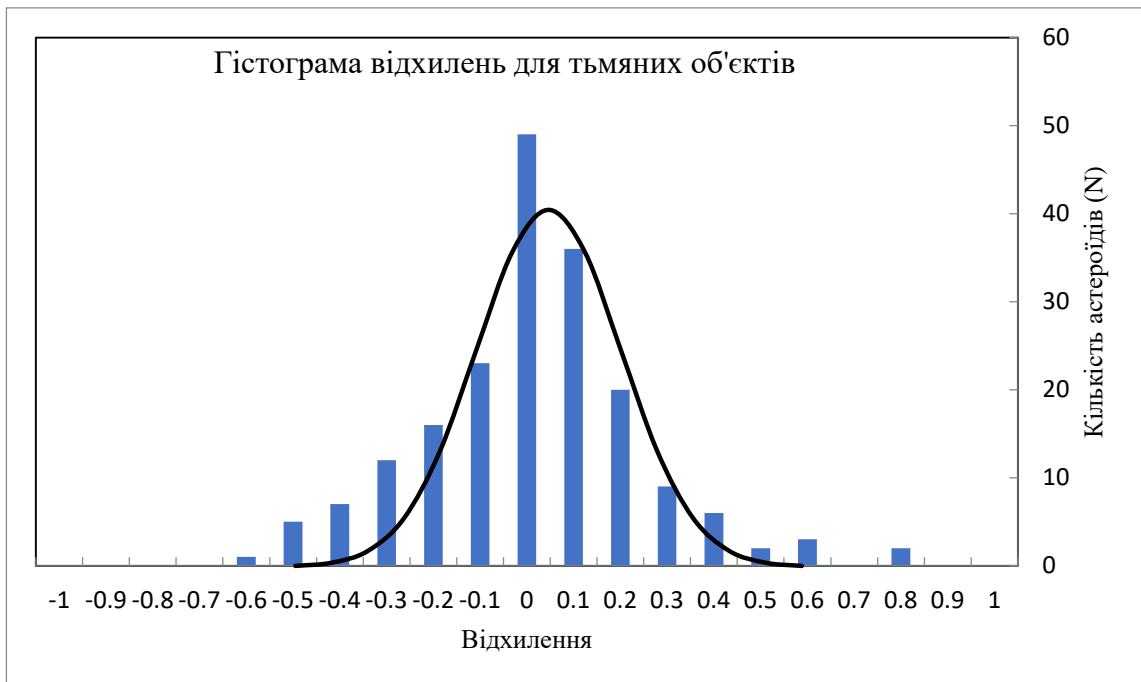
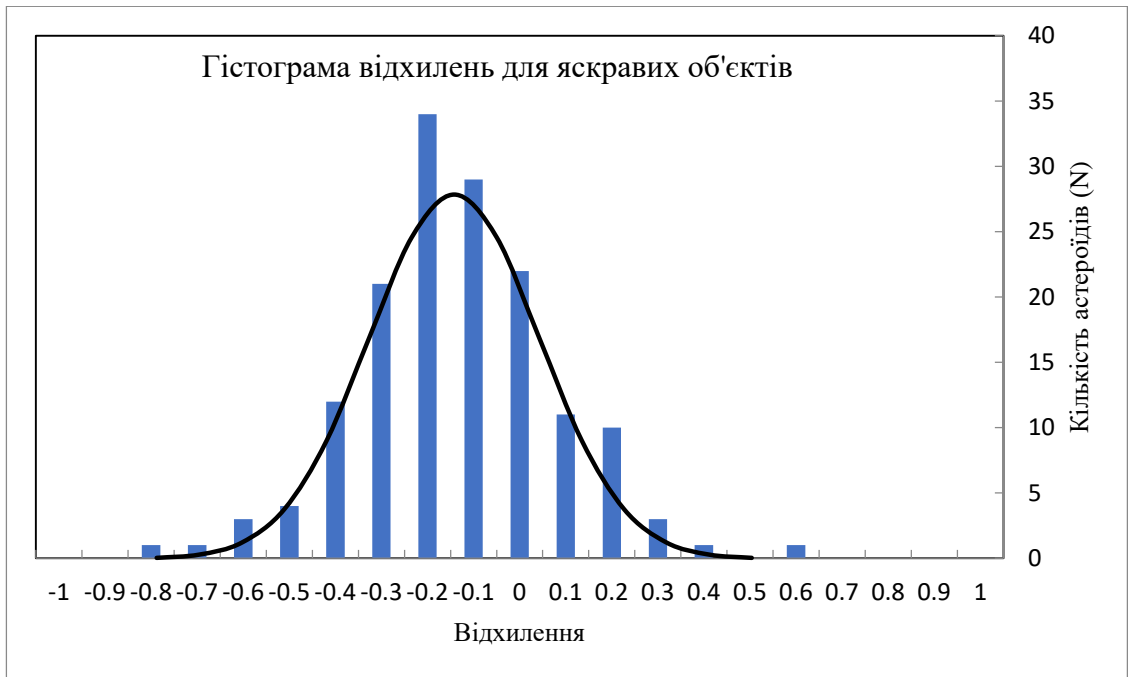


Рис. 3.4. Гістограма відмінностей баз даних. Зверху, для астероїдів 3-10 зор.вел., знизу, для об'єктів, темніших за 10 зор.вел.. Суцільна лінія — нормальний розподіл.

Для кращої наочності різниці між Ловелівською та Харківською базою, було побудовано загальну гістограму відхилень. З графіку нормального розподілу 3.3 видно, що є систематичне відхилення до $-0,1$ зор. вел., це підтверджує недооцінку значень зоряних величин Ловелівської бази.

Враховуючи що відхилення яке зображено на всіх графіках, це різниця LONEOS від KhAAMD, оцінка, щодо заниження базою LONEOS отриманих значень є правдивою. Тим не менш, на рисунку 3.3 явно не прослідковується бімодальність відхилення, тому для кращої наглядності, було побудовано додаткові гістограми, для об'єктів яскравіших та слабкіших за 10 зор. вел. З Рис. 3.4 видно, що для яскравих астероїдів недооцінка складає близько -0,15 зор. вел., тоді як для слабкіших переоцінка знаходиться в діапазоні до 0,1 зор. вел., що загалом не перевищує загальну похибку оцінки зоряної величини. Слід відзначити, що подібні відмінності для яскравих і слабкіших за блиском астероїдів були відмічені і при аналізі бази даних MPC [30], що пов'язано з некоректною трансформацією зоряних величин до стандартної системи.

Після проведення порівняльного аналізу абсолютних зоряних величин астероїдів набору даних KhAAMD та LONEOS можна зробити висновок про гарну узгодженість даних, але присутні систематичні розбіжності. Було продемонстровано, що набір даних LONEOS, отриманих в Ловелівській обсерваторії, має невеликий тренд як для яскравих об'єктів так і для слабких. Отже, абсолютні зоряні величини з даного огляду можуть бути використані при врахуванні відповідних корекцій для визначення фізичних характеристик астероїдів.

Висновки

При виконанні даної дипломної роботи, основною метою було визначити фізичні характеристики астероїдів у вибраних астероїдних сімействах та доповнити Харківську базу даних абсолютними зоряними величинами.

Після виконання всіх поставлених завдань було отримано наступні основні результати:

1. Виконано фотометричну обробку для чотирьох спостережуваних астероїдів, які входять до різних сімейств ((2379) Heiskanen, (2427) Kobzar, (2763) Jeans та (8694) 1993 CO);
2. Для даних астероїдів було отримано значення абсолютної зоряної величини, показники кольору V-R та побудовані відповідні криві блиску;
3. Харківська база даних з абсолютних зоряних величин була доповнена новими даними для 20 астероїдів. Аналіз бази LONEOS показав гарну узгоджуваність з Харківською базою, але була виявлена наявність систематичного відхилення та лінійної залежності відхилень зі збільшенням зоряної величини. Абсолютні зоряні величини з даного огляду можуть бути використані при врахуванні відповідних корекцій.

Перелік використаної літератури

1. Миронов А. В. Основи фотометрії // 1985 – 254
2. Симоненко А. Н. Астероїди.// 1985 – 207
3. Шевченко В. Г. Інтегральна фотометрія астероїдів: спостереження та чисельне моделювання. Автореферат дис. ... д-ра фіз. – мат. наук: 01.03.03. Харків, 2017. – 254 с.
4. Шевченко В. Г. Комп'ютерні технології // Методичні вказівки. – Харків: ХНУ ім. Каразіна. – 2011. – 44 с.
5. Alvarez-Candal A., Benavidez P. G., Campo Bagatin A., and T. Santana-Ros. Phase curves of small bodies from the SLOAN Moving Objects Catalog.// Astronomy & Astrophysics - 2022 – 11
6. Alvarez-Candal A., Jiménez Corral S., and Colazo M.. Absolute colors and phase coefficients of asteroids.// Astronomy & Astrophysics - 2022 – 8
7. APASS: The AAVSO Photometric All-Sky Survey [Електронний ресурс]. — Режим доступу: URL: <https://www.aavso.org/apass>
8. Athanasopoulos, D., VizieR Online Data Catalog: Asteroid spin-states of 4 Gyr-old family (Athanasopoulos+, 2022)// VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/666/A116. – 2022
9. Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. W. Application of photometric models to asteroids. // In: Binzer R. P., Gehrels T., Matthews M. S. (Eds.), Asteroids II. Univ. of Arizona Press, Tucson, -1989. pp. 524-556.
10. Colazo M., Asteroid Photometry and Lightcurve Analysis at GORA Observatories//The Minor Planet Bulletin (ISSN 1052-8091) - 2021 - pp. 50-55
11. Dell'Oro, A. et. al. , The impact of physical processes on the estimation of the ages of asteroid families // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society - 2021- pp.4302-4320

12. Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J. E. et al. The Sloan digital sky survey photometric system. *Astron. J.* –1996. –111. –P. 1748-1756.
13. Gehrels, T.. A review of comet and asteroid statistics.// *Earth, Planets and Space*, Volume 51, Issue 11, p.1155-1161
14. Henden A. A., Welch D. L., Terrell D., Levine S. E. The AAVSO Photometric All-Sky Survey (APASS). *Bulletin of the American Astronomical Society*. - 2009. -Vol. 41. -P. 669.
15. Jeffrey R. Pier and Jeffrey A. Munn. Astrometric Calibration of the Sloan Digital Sky Survey.// *Fermilab* - 2003 – 47
16. Kanwar Preet Kaur, Pankaj S. Joshi. Fundamentals of Differential and All-Sky Aperture Photometry Analysis for an Open Cluster. // *Bulgarian Astronomical Journal* - 2014 – 16
17. Mahlke M., Carry B. Asteroid phase curves from ATLAS dual-band photometry. 2021, *Icarus*, 354
18. Martikainen, J., VizieR Online Data Catalog: Lightcurve inversion for 491 asteroids (Martikainen+, 2021) // *VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/649/A98*. – 2021
19. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., et al. Main Belt Asteroids with WISE/ NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters // *Astrophys. J.* – 2011. – V. 741. – P. 68.
20. Muinonen K., Belskaya I.N., Cellino A., et al. A three-parameter magnitude phase function for asteroids. // *Icarus*. -2010. -209. – P. 542-555.
21. Nesvorný, D., Fugitives from the Vesta family// *Icarus* - 2008 - p. 85-95.
22. Novakovič B., Vokrouhlický D., Spoto F. and Nesvorný D.. Asteroid Families: properties, recent advances and future opportunities.// 2021 – 88
23. Oszkiewicz, D. , Physical Properties of V-Type Asteroids in the Main Asteroid Belt // *Asteroids, Comets, Meteors Conference* - 2023
24. Oszkiewicz, D., Characterisation of V-type asteroids using phase-curves // *European Planetary Science Congress* – 2020

25. Oszkiewicz, D., Physical and dynamical properties of the unusual V-type asteroid (2579) Spartacus // *Astronomy & Astrophysics* - 2019 - 7 pp.
26. Penttilä A., Shevchenko V. G., Wilkman O., Muinonen K. H, G₁, G₂ photometric phase function extended to low-accuracy data. // *Planet. Space Sci.* 2016. 123. P. 117-125.
27. Pravec P., Harris, A. W., Kušnirák, P., Galád, A., Hornoch, K. Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations. // *Icarus*. -2012. –V. 221. –P. 365–387.
28. Sergeyev, A.; Carry, B. VizieR Online Data Catalog: SDSS Solar System Objects.// VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/652/A59. Originally published in: 2021A&A...652A..59S
29. Shepard M. K. Introduction to Planetary Photometry. 2017, Cambridge university press
30. Shevchenko V. G., Belskaya I. N., Slyusarev I. G., Mikhalchenko O. I., Krugly Yu. N., Chiorny V. G., Lupishko D.F., Oszkiewicz D., Kwiatkowski T., Gritsevich M., Muinonen K., Penttilä A. Kharkiv database of asteroid absolute magnitudes: Comparative analysis with other datasets. // *Astron. Astrophys.* 2022. Vol. 666, A190, pp. 5.
31. Shevchenko V. G., Lupishko D. F. Optical properties of asteroids from photometric observations // *Sol. Syst. Res.* – 1998. – V. 32. – P. 220–232.
32. Shevchenko V.G., Belskaya I.N., Muinonen K., et al. Asteroid observation at low phase angles. IV. Average parameters for the new H, G₁, G₂ magnitude system // *Planet. Space Sci.* – 2016. – V. 123. – P. 101-116.
33. Silvan S. M., Synodic And Sidereal Rotation Periods Of Koronis Family Member (1389) Onnie // *The Minor Planet Bulletin* (ISSN 1052-8091) - 2023- pp. 8-10
34. Silvan S. M., The Distribution of New Spin Vectors in the Koronis Family// *American Astronomical Society* - 2008 - p.425

35. Sykes M. V., Early R., Stone J. et al. The PDS small bodies data ferret.// Asteroids, Comets, Meteors - 2012 – 1
36. Taylor B. W., Dunham E. W., and Elliot J. L.. Performance of the Lowell Observatory Instrumentation System. // Advanced Software, Control, and Communication Systems for Astronomy. pp. 446-454 (2004).
37. Tonry J. L, Stubbs C. W., Lykke K. R. et al. The Pan-STARRS1 photometric system. // Astrophys. J. –2012. –750. –99 (14pp).
38. Usui F., Kuroda D., Muller T. G., et al. Asteroid catalog using Akari: AKARI/IRC mid-infrared asteroid survey. // Publ. Astron. Soc. Japan. -2011. – V. 63. –P. 1117–1138.
39. Veres P., Jedicke R., Firzsimmons A., et al. Absolute magnitudes and slope parameters for 250000 asteroids observed by Pan-STARRS PS1 – Preliminary results // Icarus -2015. -261. –P. 34-47.
40. Waszczak A., Chang Chan-Kao, Eran O. et al. Asteroid light curves from the palomar transient factory survey: rotation periods and phase functions from sparse photometry // The Astronomical Journal - 2015 – 33