

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

16.05.2025 р.



Оцінка « відмінно »
Голова ЕК
проф. Олександра ІВАНОВА

22.05.2025 р.



Данилко Даніїл Олександрович

Фізичні характеристики змінних зір зі швидкими варіаціями блиску

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



(підпис студента)

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



(підпис керівника)



Рецензент – провідний
науковий співробітник НДІ астрономії,
кандидат ф.-м.н. О. П. Железняк

Харків 2025

АНОТАЦІЯ

Данилко Д.О. Фізичні характеристики змінних зір зі швидкими варіаціями блиску

Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр» за спеціальністю Е5 «Фізика та астрономія». Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2025.

У даній дипломній роботі проведено обробку 294 зображень однієї затемнено-подвійної зорі, та оброблено фотометричні дані для усіх чотирьох наявних затемнено-подвійних систем. Встановлено оцінки періодів обертання чотирьох зір, а також побудовано складені криві блиску, та оцінені амплітуди кривих блиску. Для однієї з яких період оцінено вперше, для іншої уточнено період за даними спостережень різних років. З використанням паралаксів з каталогу Gaia DR3, отримано оцінки абсолютних зоряних величин у R смузі для чотирьох контактних-подвійних систем. Врахувавши абсолютну зоряну величину Сонця у R смузі також отримано оцінки світностей для чотирьох систем. Враховуючи міжзоряне поглинання, було скориговано оцінену відстань до зір, а також фізичні характеристики. Для семи контактних-подвійних систем W UMa побудовано залежність Період-світність у фотометричній смузі V, коефіцієнти якої відрізняються від наявних у роботі Chen et al. (2018), але близькі до них.

Ключові слова: крива блиску, змінна зоря, період обертання, фотометрична відстань, абсолютна зоряна величина, залежність період-світність.

Abstract

Danylko D.O. Physical characteristics of variable stars with rapid brightness variations

Thesis for the degree of Higher Education "magister" in specialty E5 "Physics and astronomy". V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2025.

In this thesis, 294 images of one eclipsed binary star were processed, and photometric data for all four existing eclipsed binary systems were processed. Estimates of the rotation periods of four stars were established, and composite light curves were constructed, and the amplitudes of the light curves were estimated. For one of them, the period was estimated for the first time, for the other, the period was refined based on observations of different years. Using parallaxes from the Gaia DR3 catalog, estimates of absolute stellar magnitudes in the R band were obtained for four contact binary systems. Taking into account the absolute stellar magnitude of the Sun in the R band, estimates of luminosities were also obtained for four systems. Taking into account interstellar absorption, the estimated distance to the stars was corrected, and physical characteristics were obtained. For seven contact binary systems W UMa, the Period-luminosity dependence in the photometric band V was constructed, the coefficients of which differ from those in the work of Chen et al. (2018), but close to them.

Keywords: light curve, variable star, rotation period, photometric distance, absolute magnitude, period-luminosity relation.

Зміст

| | |
|---|------------|
| Вступ | 4 |
| Розділ 1. Загальні відомості про змінні зорі..... | 6 |
| 1.1 Історія вивчення змінних зір..... | 6 |
| 1.2 Сучасна класифікація змінних зір..... | 7 |
| 1.2.1 Затемнено-подвійні змінні | 8 |
| 1.3 Залежність період-світність для контактної-подвійних систем..... | 144 |
| 1.4 Каталоги змінних зір..... | 177 |
| 1.4.1 Gaia DR3..... | 177 |
| 1.4.2 Zwicky Transient Facility | 188 |
| 1.4.3 Variable Star IndeX | 19 |
| 1.4.4 Strasbourg astronomical Data Center | 200 |
| Розділ 2. Методи досліджень | 211 |
| 2.1 Апаратура спостережень | 211 |
| 2.2 Редукція зображень..... | 222 |
| 2.3 Апертурна фотометрія та побудова кривої блиску | 277 |
| Розділ 3. Результати спостережень змінних зір..... | 333 |
| 3.1 Криві блиску обраних об'єктів..... | 333 |
| 3.2 Визначення фізичних характеристик та фотометричних відстаней..... | 39 |
| 3.3. Залежність період-світність | 422 |
| Висновки | 455 |
| Перелік використаної літератури..... | 466 |

Вступ

Одним з ключових об'єктів зоряної астрономії є змінні зорі. Їх дослідження розширяють уявлення про фізичну природу зір, структуру подвійних систем та процеси, що у них протікають. Оскільки змінність є лише окремим етапом еволюції зорі, її вивчення дає більш широке розуміння загальної еволюції зір та зоряних систем. Особливе місце серед змінних зір займають затемнено-подвійні контактні системи, в яких відбувається перетікання речовини від однієї компоненти до іншої. Їх спостереження дають змогу оцінити орбітальний період, абсолютні зоряні величини, світності та інші параметри. Вивчення періодичності таких систем дають змогу робити припущення про природу зміни їх блиску, а також спостерігати за можливими змінами періодів з часом, що може свідчити про певні еволюційні та фізичні процеси у системі. Змінні зорі досить легко виявити за допомогою фотометрії навіть на великих відстанях [3]. Іноді змінні зорі можуть переставати змінювати свій блиск, що змушує ще активніше їх вивчати. Також існують такі зорі, природа змінності яких остаточно не встановлена, і, як потім буде показано у даній роботі, залишає відкритим питання про характер змінності. Таким чином, дослідження змінних зір є актуальним та цікавим для сучасної астрофізики, що вказує на актуальність даної теми.

У відділі фізики астероїдів та комет при спостереженнях за астероїдами отримано великий масив зображень зоряних полів, які можна використовувати для пошуку змінних зір. Використані у цій роботі зображення зоряних полів були отримані науковими співробітниками НДІ астрономії та кафедри астрономії та космічної інформатики і надані автору роботи для подальшого дослідження та визначення їх характеристик.

Виходячи з викладеного вище, метою даної роботи є дослідження обраних зір на фотометричну змінність, а також аналіз отриманих даних та порівняння з іншими даними. Основна увага була зосереджена на дослідження змінних зір зі

швидкими варіаціями блиску, тобто характерний період зміни блиску був не більше доби. Загалом у більшості випадків це були подвійні зорі типу W UMa.

Засновуючись на зазначеній меті, були поставлені наступні завдання:

1. Обробка спостережного матеріалу та отримання кривих блиску.
2. Аналіз кривих блиску та отримання фотометричних характеристик досліджуваних зір.
3. Оцінка фотометричних відстаней та фізичних характеристик досліджуваних об'єктів та перевірка залежності період-світність для зір типу W UMa.
4. Порівняльний аналіз отриманих даних з літературними джерелами.

Новизною досліджень є нові фотометричні дані для наявних у роботі зір.

Практичним значенням є дослідження зір на фотометричну змінність, отримання їх фізичних характеристик, побудова залежності період-світність, та уточнення відстаней до зір, з урахуванням міжзоряного поглинання.

Науковим значенням є те, що для деяких досліджуваних зір, ще не отримано фізичні характеристики.

Розділ 1. Загальні відомості про змінні зорі

1.1 Історія вивчення змінних зір

Змінні зорі – це такі зорі, блиск яких змінюється з часом.

Початок наукових досліджень змінних зір датують 1844 роком. Саме цього року німецький вчений Фрідріх Вільгельм Август Аргеландер опублікував звернення до астрономів-любителів, де призвав їх співпрацювати у дослідженні змінних зір [4]. Розвиток спостережень змінних зір зростав і з розвитком астрофотографії. Великий вклад у дослідження внесла Гарвардська обсерваторія в Кембріджі (США), та американський астрофізик Едуард Чарльз Пікерінг. Під його керівництвом велись візуальні спостереження із спектроскопом, а пізніше і фотографічні, з спектрографом. З часом, Пікерінг заснував Американську Асоціацію Спостережувачів Змінних Зір (AAVSO), яка й досі є одною з найпопулярніших спільнот спостережувачів змінних зір [4].

У ХХ столітті особливого успіху досягнули дослідження затемнено-подвійних змінних. 1914 рік запам'ятовується в історії змінних зір публікацією астронома Харлоу Шеплі, де він описав теорію пульсацій, яку у 1918 році математично обґрунтував англійський астрофізик Артур Еддінгтон [4]. Теорія пульсацій – великий крок у вивченні змінності зір, яку успішно застосовували для опису змінності деяких об'єктів. Сильним поштовхом у вивченні природи змінних зір стала поява діаграми Герцшпрунга-Рассела. Змінні різноманітних типів займають різне положення на діаграмі, що пояснюється стадією еволюції світила. Згодом прийшли до висновку, що змінні не є ненормальними зорями, вони являють собою нормальний етап розвитку, який кожна зоря повинна пройти, маючи необхідні початкові умови. Цей висновок має фундаментальне значення. Висновок, що існує залежність між змінністю зір та еволюцією світил, став причиною нового значення та етапу досліджень змінних зір [4].

1.2 Сучасна класифікація змінних зір

Вивчення змінних зір показало різноманітність характеру змінності блиску. Змінність буває періодичною або нерегулярною, різниця простежується у амплітуді та періоді. Вона може визиватись великою кількістю причин. Через це зародилось питання класифікації змінних зір. За характером змінності зорі поділили на чотири основних типи: затемнювальні, пульсуючі, еруптивні та катаклізмичні (останні два класи деякі автори зараховують до одного типу). Важливо розуміти, що сама змінність зорі або системи зір, не є характеристикою постійною, вона з'являється та пропадає на різних ступенях еволюції.

Отже, існують чотири основні типи змінних зір [1]. Затемнювальні змінні представляють собою подвійні пари зір, що у процесі обертання перекривають одна одну, чим викликають зміни зоряної величини. Зазначимо, що це не основна причина зміни їх блиску, адже існують різні типи подвійних систем, а отже і причини змінності бувають різні.

Пульсуючі типи зір зазнають змін блиску завдяки пульсаціям самої зорі, у процесі яких і змінюється зоряна величина. Наприклад, одна з змінних зір ми Міра Кита – пульсуюча змінна зоря, на честь якої названо підтип пульсуючих змінних. В 1784 році Піготтом була відкрита η Орла, одна з перших пульсуючих зір. Приблизно у той же час англійський астроном-любитель Джон Гудрайк відкрив δ Цефея, яка також виявилась пульсуючою змінною. На той час вже було встановлено, що зоряна величина цих об'єктів змінюється, та змінюється з визначеною регулярністю. Приблизно через сто років було виявлено, що разом із блиском змінюється ефективна температура та променева швидкість. Основними типами пульсуючих зір є Цефеїди. Це пульсуючі змінні зорі типу δ Цефея. Вони є довгоперіодичними, періоди їх пульсацій інколи досягають 70 діб, але такі довгі періоди зустрічаються не часто. Також одними з основних є змінні типу RR Ліри. Вони навпаки короткоперіодичні. Значення їх періодів лежать у проміжку від 0.2 до 0.8 діб.

У затемнено-подвійних та пульсуючих змінних є спільна характеристика – зміна їх зоряної величини завжди періодична. Еруптивні змінні виділяються серед інших типів саме тим, що їх змінність зовсім не періодична, а навпаки непередбачувана. Також особливість цього класу світил полягає у відсутності загального механізму, що визиває змінність. Одним з класів еруптивних зір є спалахуючі зорі. Вони різко змінюють свою світність у всьому діапазоні випромінювання. Спалах досягає максимуму за секунди, а спад блиску може продовжуватись від декількох хвилин, до декількох годин. Представниками цих зір є помаранчеві та червоні карлики. До еруптивних зір часто відносять і клас катаклізмичних змінних, адже вони дуже схожі, але загального механізму змінності для класів еруптивних світил немає.

Прогрес точності спостережень, а також розвиток їх аналізу посприяли появленню більш детальної класифікації змінних зірок. Сучасні уявлення про змінність зір розширились, та у кожного типу з'явилися свої підтипи.

Оскільки у межах даної роботи досліджувались затемнено-подвійні зорі з відносно короткими періодами зміни блиску, розглянемо детальніше саме ці змінні зорі.

1.2.1 Затемнено-подвійні змінні

Затемнено-подвійні змінні зорі – різновид подвійних зір. Подвійна зоря називається затемнено-подвійною змінною, якщо одна з компонент повністю або частково закриває іншу від спостерігача. Зміна блиску у таких системах має чітку періодичність. Затемнено-подвійні змінні займають особливе положення серед змінних зір. До кінця XX століття багатьма авторами вони взагалі не відносились до справжніх змінних [4]. Вважалось, що природа зміни блиску у подвійних системах суто геометрична, вони навіть протиставлялись фізичним, та характеризувались як «оптичні». Однак навіть у розділених системах затемненість рідко буває єдиною причиною змінності, адже вплив гравітації, електромагнітного випромінювання та магнітного поля обох компонент одна на одну велике.

Характеристики подвійної системи сильно залежать від відносних розмірів компонент. Сучасна класифікація затемнено-подвійних змінних заснована на концепції порожнин Роша. На Рис. 1.1. зображені типи подвійних систем, та їх порожнини Роша. Їх природа полягає у наступному. Навколо точкової маси гравітаційна потенційна енергія постійна на сферах навколо зорі (див. Рис. 1.1.). Зокрема, вона обернено пропорційна відстані. У подвійній системі зір, потенціальна енергія постійна на поверхнях, що зображені на Рис 1.1. [9]. Поблизу кожної зорі вони мають форму, схожу на сферичну, однак чим далі від зорі, тим більше форма поверхні відрізняється від сферичної симетрії. Але є критична поверхня. Форма її чимось схожа на пісочний годинник. Обидві частини цього «годинника» називаються долями Роша, та поєднуються у першій точці Лагранжа [9].

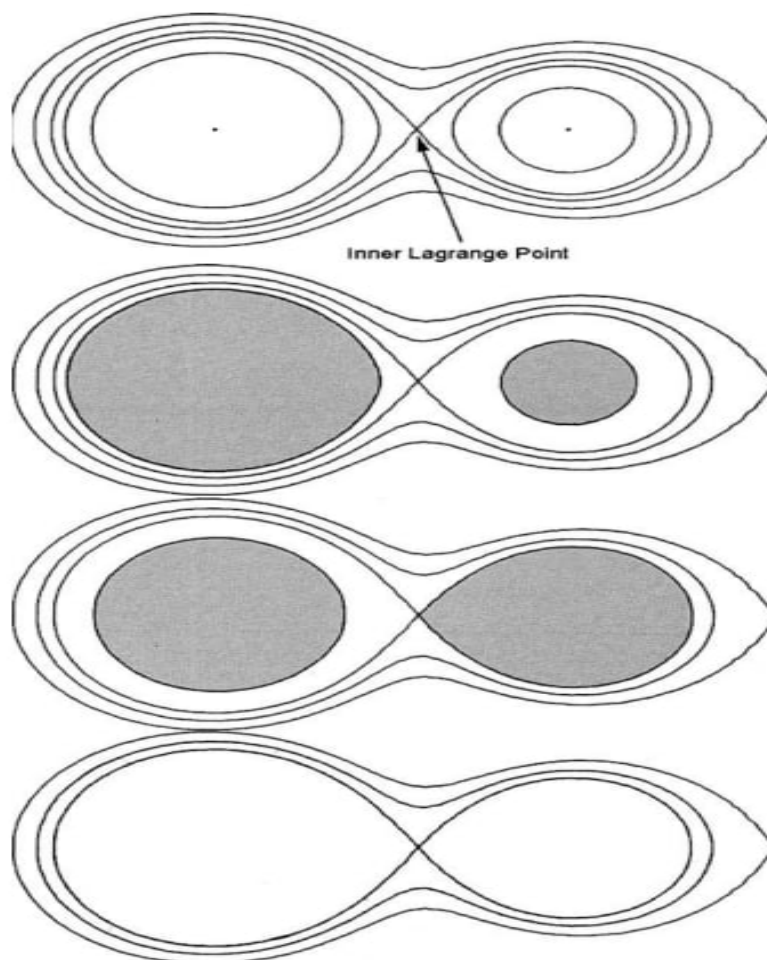


Рис 1.1. Поверхні Роша [9].

Зустрічаються пари зір, що заповнили свою порожнину Роша, така система називається контактною, а самі компоненти мають спільну оболонку та обмінюються речовиною. На Рис. 1.2. обидва приклади зліва демонструють контактні системи.

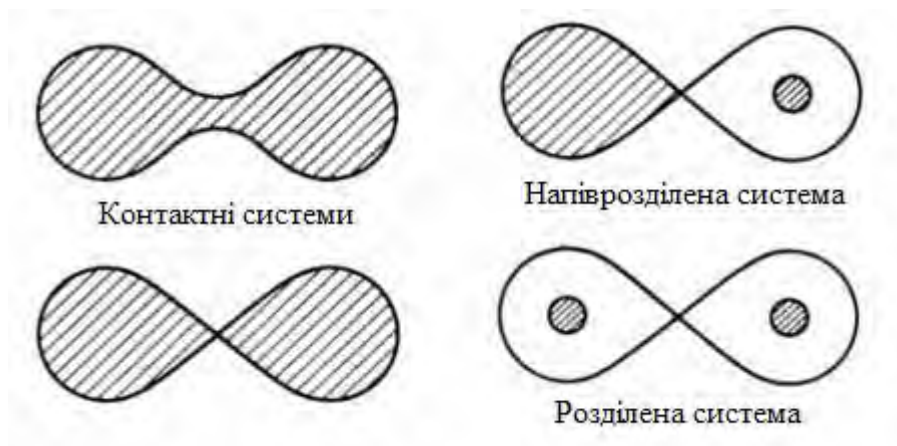


Рис 1.2. Основні типи подвійних пар зір [2]. Зліва зображені контактні системи, справа зверху – напіврозділені, справа знизу – розділені.

Зорі стикаються та сильно деформуються завдяки гравітаційному впливу. Бувають системи, у яких тільки одна з зір заповнила свою порожнину Роша, а інша компонента має набагато менші розміри. У таких системах більша зоря деформується, речовина з неї починає акрецію (перетікання) на меншу компоненту, а такі системи називаються напіврозділеними, вони зображені на Рис. 1.2. справа зверху. Останній тип систем – розділені. В них обидві компоненти знаходяться далеко вглибині своїх порожнин Роша (Рис. 1.2.), та не взаємодіють оболонками.

Класифікація затемнено-подвійних змінних прямо засновується на типі подвійної системи. Припустимо, що ми маємо контактну подвійну систему, компоненти якої приблизно однакових розмірів та світностей. Протягом повного обороту крива блиску (зміна блиску з часом) буде показувати два максимуми, та два мінімуми, ділянки постійного блиску не буде зовсім, а період таких зір є достатньо коротким (Рис. 1.3.). Кожний мінімум відповідає

покриттю однієї компоненти іншою. Оскільки зорі можна порівняти за розміром, то не має значення, перша компонента перекриває другу, чи навпаки.

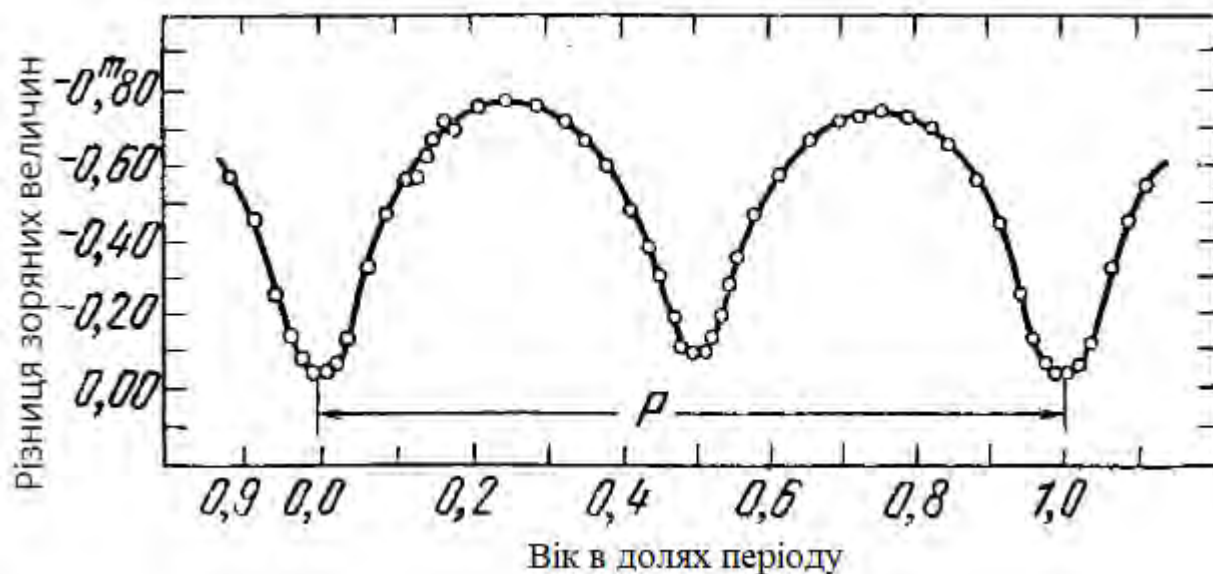


Рис 1.3. Крива блиску W Великої Ведмедиці [4].

Мінімуми приблизно однакові за глибиною, а криві блиску схожі за формою. Ці системи називаються змінними типу W Великої Ведмедиці [2]. На Рис. 1.3. представлена крива зміни блиску цієї зорі. Обидва компоненти лежать поблизу головної послідовності, мають однаковий блиск. Різниця з описаною ідеалізованою системою полягає у тому, що маси у компонент не однакові, а частіше усього відносяться як 2:1. Також змінні типу W Великої Ведмедиці не є зовсім контактними системами, а лише приблизно називаються такими. Контактні системи типу W Великої Ведмедиці поділяються також на два підкласи – А та W. Підкласу А характерні періоди від 0.4 до 0.8 діб, а самі зорі відносяться до спектрального класу А та F. Підклас W має більш короткі періоди, котрі лежать у проміжку приблизно від 0.22 до 0.4 діб, та відносяться до спектральних класів G і K.

Розглянемо інший приклад. Бувають контактні системи, поверхнева яскравість яких відрізняється. Крива блиску таких систем схожа на криві змінних типу W Великої Ведмедиці тим, що не показує постійний блиск. Сама

крива блиску має важливу характеристику, як мінімуми різної глибини. Така обставина зумовлена тим, що компоненти у системі мають різні температури. Більш глибокий мінімум відповідає моменту перекриття гарячої зорі холоднішою (Рис. 1.4.).

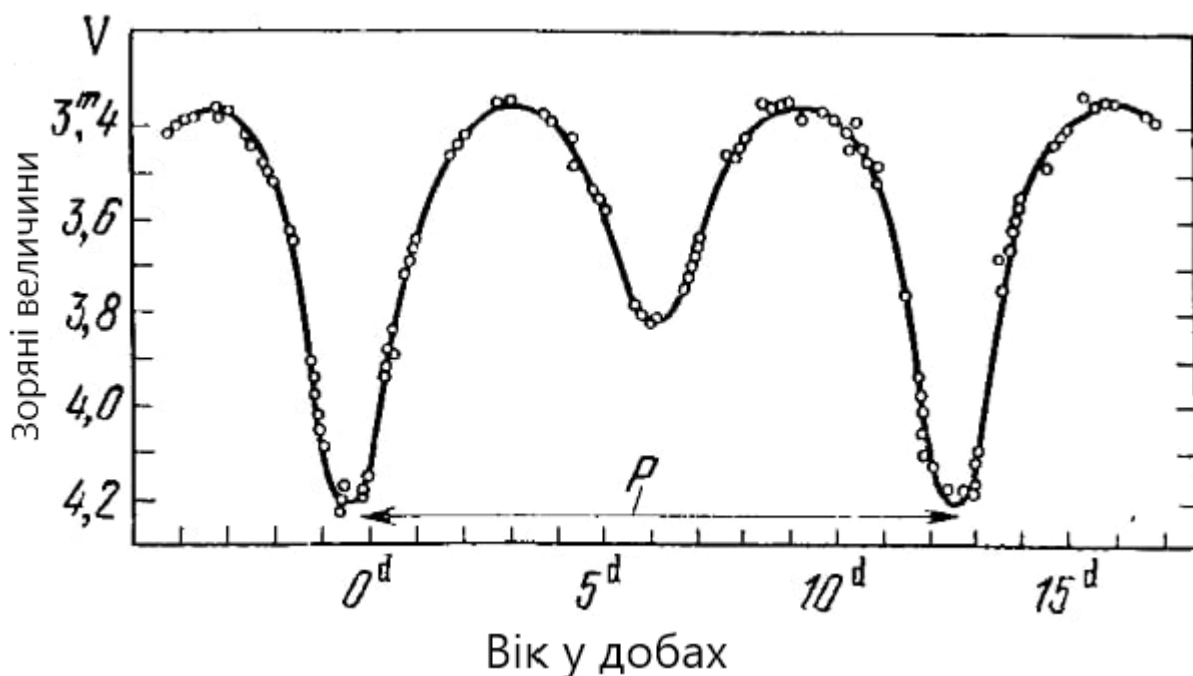


Рис 1.4. Крива блиску змінної зірки типу β Ліри [4]. Увагу привертають мінімуми різної глибини, що зумовлені різницею температур компонент.

Гравітаційний вплив змушує зорі деформуватись, тому компоненти мають еліпсоїдальну форму, причому сильно виражену. Яскравий приклад такої системи це β Ліри, крива блиску якої і зображена на Рис.1.4. Тип змінних зір, що має такий характер, носить однойменну назву.

Ототожнювання розділених систем дещо простіше. Криві блиску кожної розділеної системи мають характерні ділянки постійного блиску і цей факт не залежить від характеристик компонент. Такі системи відносять до змінних типу Алголя [2]. Зробимо припущення, що обидві компоненти однакового розміру, та однакові за значенням блиску. В такому випадку, мінімуми будуть мати однакову глибину, а відстань між ними визначається як половина періоду. Але частіше зустрічаються пари, в яких зорі різняться за поверхневою яскравістю.

Криві блиску цих систем мають вже різні за глибиною мінімуми, причому вторинний мінімум має помітно меншу глибину, ніж основний, і відповідає моменту покриття слабкої зорі більш яскравою (Рис. 1.5). Саме такою є змінна зоря Алголь.

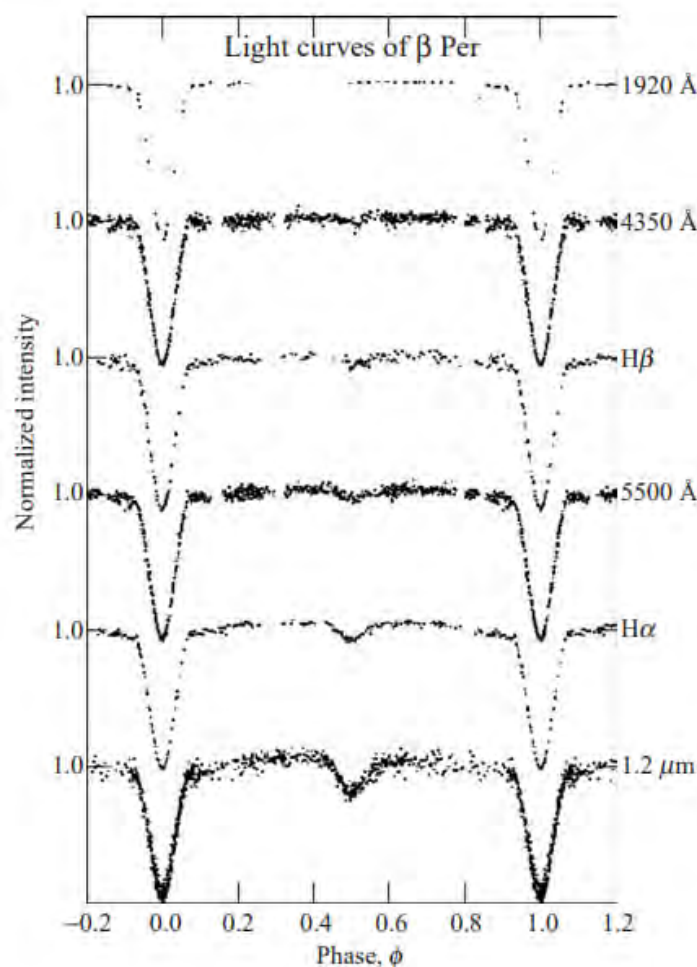


Рис 1.5. Крива блиску Алголя у різних довжинах хвиль. Глибина другого мінімуму помітно менша, ніж глибина першого [9].

У деяких пар вторинний мінімум взагалі майже відсутній, тому що слабкіша зоря майже не впливає на блиск системи. Форми кривих блиску змінних типу Алголя відрізняються. Характер кривої сильно залежить від відносного розміру компонент, різниці у їх поверхневій яскравості, свою роль також грає орієнтування орбіти пари відносно променя зору спостерігача, та від відношення радіусу світил до радіусу їх орбіти. Орієнтування орбіти може бути таким, що затемнення буде не центральним і зорі будуть лиш частково

перекривати одна одну, а отже на кривій блиску не буде гострих мінімумів. Центральному ж затемненню характерні гострі мінімуми. Бувають випадки, коли менша компонента рівна головній по блиску на одиницю площини. При таких умовах усе одно спостерігаються два схожих мінімуми. Але частіше за все зустрічаються системи, в яких зорі мають велику різницю у поверхневій яскравості, це пояснює велику різницю у мінімумах, що досягає декількох зоряних величин.

Не усі подвійні зорі можуть називатись затемнено-подвійними. Справа у тому, що характер орієнтації орбіти пари відносно спостерігача може не дозволяти нам бачити затемнень у системі. Змінність зоряних величин має місце бути тільки у випадку еліпсоїдальної форми компонент, але навіть так зміна блиску буде зовсім мінімальною.

1.3 Залежність період-світність для контактних-подвійних систем

Вперше статистичну залежність між періодом та світністю для контактних-подвійних систем типу W UMa виявили та дослідили Rucinski (1974) та Mochnaski (1981), засновуючись на фотометричних дослідженнях 40 систем. Вони встановили, що більш низька світність властива системам з більш малими періодами. Фізичне обґрунтування цього явища надав Lucy (1968), запропонувавши модель для систем W UMa з спільною оболонкою. Пізніше, Smith (1984) надав еволюційну схему для контактних-подвійних зір, згідно з якою в таких системах обидві компоненти заповнили свої порожнини Роша, обмінюються речовиною, та утворюють спільну оболонку, завдяки чому перебувають у стані термодинамічної рівноваги.

Сучасне вивчення залежності період-світність (далі – ПС-залежність) є досить точними. Опираючись на базу даних космічного телескопу Gaia було проведено багато досліджень систем W UMa. Перші точні ПС-залежності встановили Chen et al. (2016), з використанням даних у ближньому інфрачервоному діапазоні.

Chen et al. (2018) [12] виявили ПС-залежність для 183 об'єктів, з використанням паралаксів каталогу Tycho-Gaia Astrometric Solution (TAGS), та у 12 фотометричних полосах G (Gaia), B, V (Johnson system), R, I (USNO-B), J, H, K (2MASS), W1, W2, W3, W4 (WISE). З даного обзору були виключені довгоперіодичні системи, де $\log P > -0.25$ d, та короткоперіодичні, для яких $\log P < -0.575$ d. Діапазон періодів складає 0.3 d, а точність досягає 0.16 mag (7%) у інфрачервоному діапазоні, та 0.3 – 0.5 mag у оптичному, що обумовлено меншою чутливістю інфрачервоного діапазону до поглинання. На рис. 1.6 зображено отримані Chen et al. (2018) залежності період-світність у дванадцяти полосах для контактної-подвійних систем типу W UMa. Чорними точками позначено 183 системи даного дослідження, червоні лінії – лінійні апроксимації ПС-залежностей цих об'єктів, сині лінії - межі похибки, сині точки – дані з ранніх досліджень Chen et al. (2016) для порівняння, червоні пунктирні лінії – ПС-залежності Chen et al. (2016), що показують узгодженість нульових точок між дослідженнями.

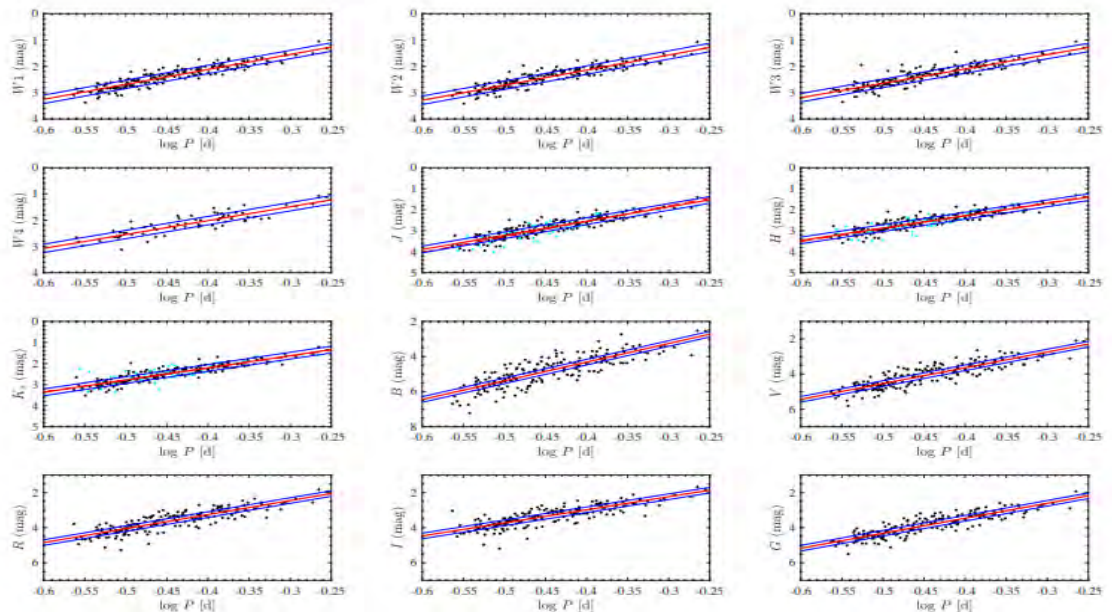


Рис. 1.6 Залежності період-світність у 12 смугах для контактної-подвійних систем типу W UMa. Зображення запозичено з Chen et al. (2018) [12].

Окрім ПС-залежностей для контактної-подвійних систем, досліджуються залежності період-світність-металічність (далі – ПСМ-залежність). Так, Li et al. (2025) [13] дослідили ПСМ-залежність для вибірки із 250 систем з паралаксами Gaia DR3, у фотометричних полосах G (Gaia), J, H, K (2MASS), W1, W2, W3 (WISE). Довгоперіодичні та коротко періодичні системи були виключені з дослідження, по аналогії з оглядом Chen et al. (2018). Також застосовувались спектроскопічні дані баз APOGEE та LAMOST. Завдяки врахуванню металічності Fe/H, точність паралаксів становить 5%, у порівнянні з 7% у Chen et al. (2018) [12]. На рис. 1.7 представлені ПСМ-залежності, для дев'яти фотометричних полос. Синіми точками позначено метало-бідні об'єкти, зеленими – об'єкти із сонячною металічністю, червоними – метало-багаті (Li et al. 2025) [13]. Завдяки розподілу по металічності, можна бачити цікаву властивість – при однаковому періоді метало-багаті контактні-подвійні системи демонструють більшу яскравість. Врахування металічності дозволяє знизити розкид залежностей на 30-40% у порівнянні з Chen et al. (2018), та наглядно демонструє еволюцію методів аналізу.

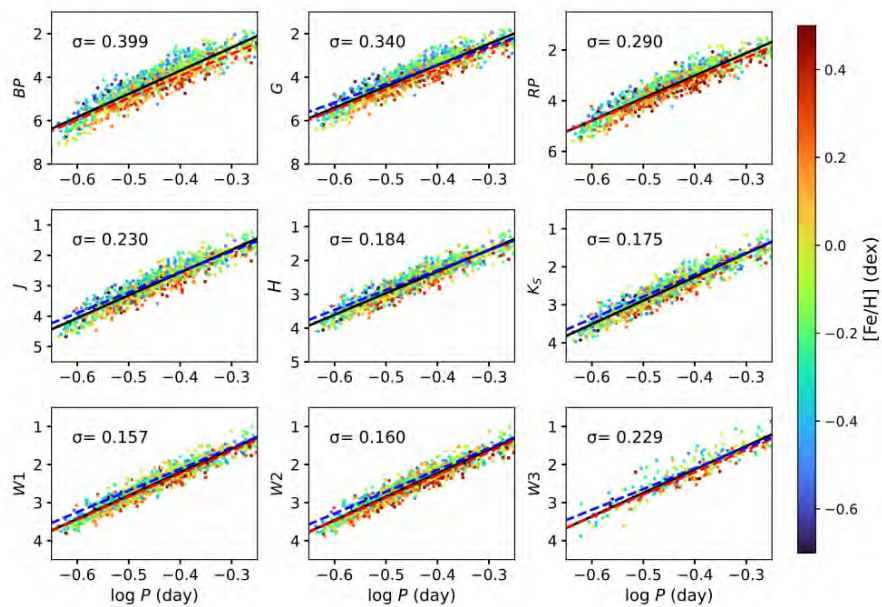


Рис. 1.7 ПСМ-залежності для контактної-подвійних систем типу W Uma. Синіми та червоними пунктирними лініями позначено порівняння ПС-залежностей у Song & Tian (2024) та Chen et al. (2018) відповідно. Зображення запозичено з Li et al. (2025) [13].

Таким чином, вивчення та аналіз ПС- та ПСМ-залежностей значно збільшують точність використання контактної-подвійних систем в розрахунку відстаней, а врахування нових критеріїв для таких залежностей відкривають можливості для досліджень хімічної еволюції таких систем. Цей напрямок активно розвивається, що добре демонструють дослідження Chen et al. (2018) [12] та Li et al. (2025) [13].

1.4 Каталоги змінних зір

1.4.1 Gaia DR3

У рамках третього релізу даних космічної обсерваторії Gaia було опубліковано великий масив даних про змінні зорі (Eyer et al. 2023) [16]. Кількість змінних джерел у третьому релізі становить близько 10,5 мільйонів об'єктів, що включають 35 класів змінності, серед яких 34 різноманітні типи змінних зір, та одна група змінних джерел, що ідентифікована як позагалактичні, а саме активні ядра галактик, або «квасари».

Серед великого масиву даних Gaia було проаналізовано близько 1,8 мільярдів об'єктів, що спостерігались у період з 2014 по 2017 рік, у полосах G, G_{BP} та G_{RP}. З використанням спеціальних операторів, було ідентифіковано та розбито на класи близько 10,5 мільйонів змінних об'єктів (Eyer et al. 2023) [16].

Каталог містить більше двох мільйонів затемнено-подвійних змінних, близько 270 тисяч зір типу RR Ліри, 15 тисяч Цефеїд, кількість довгоперіодичних об'єктів становить близько 1,7 мільйонів, серед яких для 392 тисяч виявлено період, та близько 470 тисяч короткоперіодичних зір [16]. Кожен з класів змінності має свою таблицю даних у каталозі,

vari_eclipsing_binary – подвійні системи

vari_rr_lyrae – змінні RR Ліри

vari_cepheid - Цефеїди

vari_long_period_varialbe – довгоперіодичні зміни

vari_short_timescale – короткоперіодичні змінні

vari_summary – зведена таблиця

за допомогою яких можна орієнтуватись по масиву даних.

Масив даних Gaia DR3 надає широкий спектр аналізу змінних об'єктів. Таблиця `vari_summary` містить зведену інформацію по змінним об'єктам: періоди змінних зір, амплітуди та кількість спостережень. Для багатьох об'єктів доступні криві блиску у фотометричних полосах G , G_{BP} та G_{RP} , а також супутня астрометрична інформація. Даний масив є унікальним ресурсом для статистичного аналізу змінності зір.

1.4.2 Zwicky Transient Facility

Zwicky Transient Facility (далі - ZTF) – це велика оглядова програма, ціллю якої є моніторинг неба з високою частотою зйомки у видимому діапазоні. Спостереження проводились за допомогою телескопа системи Шмідта імені Самуеля Ошина Паломарської обсерваторії, діаметром 1,2 метри, з березня 2018 року по червень 2019 року.

Каталог містить 781 602 змінних об'єкта, які ідентифікували та розподілили на класи з використанням спеціальних алгоритмів та аналізу часових рядів, отриманих у полосах g , r та i Слоанівської системи. (Xiaodian et al. 2020) [17]. Для аналізу кривих блиску та ефективної оцінки періодів застосовувався метод Ломба-Скаргла (Lomb 1976, Scargle 1982), та функція Фур'є четвертого порядку. Основою обробки даних є автоматизований алгоритм, що виявляв об'єкти зі значними змінами блиску, та аналізував їх (Xiaodian et al. 2020) [17].

Усього каталог змінних зір ZTF містить 12 типів періодичних змінних об'єктів, серед яких є змінні типу RR Ліри, еруптивні змінні та затемнено-подвійні системи. Для об'єктів каталогу наявні параметри кривих блиску, що включають амплітуду, періоди, різницю мінімумів у двох діапазонах для затемнено-подвійних та інші параметри. На рисунку 1.8 зображено карту розподілу змінних зір, виявлених в обзорі ZTF, у галактичних координатах (Xiaodian et al. 2020) [17]. Понижена щільність у північній частині неба

пов'язана з неповним покриттям обзору. Проміжки на карті обумовлені охоптом неба телескопом, або виключенням деяких даних за результатами їх обробки.

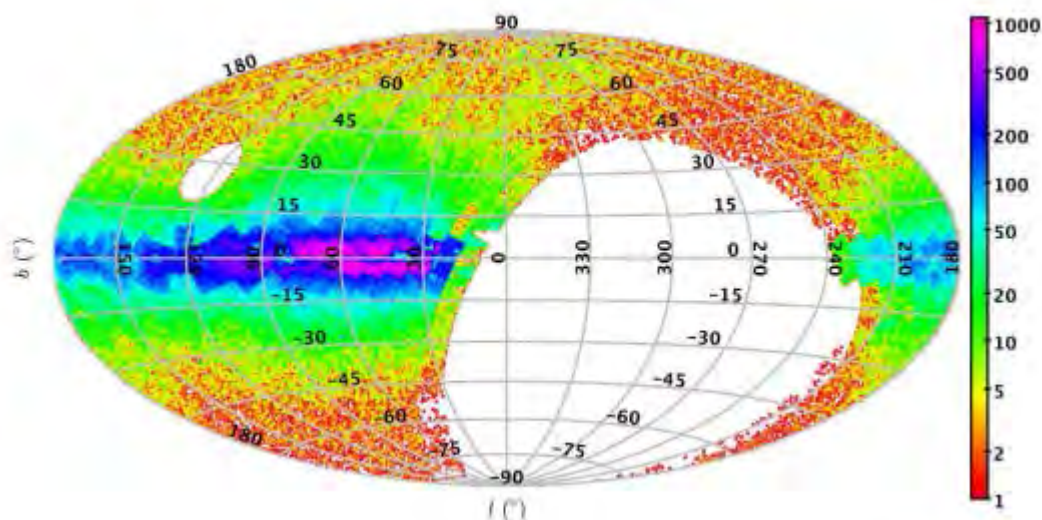


Рис 1.8. Карта розподілу змінних зір, наявних у ZTF DR2. Зображення запозичено з роботи Xiaodian et al. (2020) [17]. Кольорові позначення свідчать про число об'єктів у даній області неба, відповідно до вказаної на рисунку шкали.

Таким чином, база даних ZTF є одним з найбільш обширних та сучасних ресурсів у даній області. Вона містить понад 780 тисяч змінних об'єктів. Завдяки точній фотометрії, каталог містить широкий діапазон типів змінності, від пульсуючих зір, до затемнено-подвійних систем.

1.4.3 Variable Star Index

Каталог Variable Star index (далі – VSX) представляє крупну базу даних змінних зір. VSX є проектом асоціації американських спостерігачів змінних зір (American Association of Variable Star Observers – AAVSO). Ця база даних була задумана та створена астрономом-любителем Кристофером Уотсоном, у відповідь на бажання Картографічної та Робочої груп AAVSO. Головна мета VSX полягає у зібранні усієї нової інформації про змінні зорі, яка з'являється кожен день, у велику базу даних, та зробити її доступною для всіх. Станом на 2024 рік VSX містить більше 2,3 мільйонів об'єктів, серед яких для близько 700 тисяч підтверджено змінність. Для більшості об'єктів наявні координати, тип змінності, періоди, діапазони блиску та інші фотометричні характеристики.

Особливістю каталогу є забезпечення єдиної платформи, що накопичує інформацію про змінні зорі, він включає дані з таких широкомасштабних фотометричних обзорів, як ZTF, Gaia, OGLE та інших. Запроси до бази даних повертають усі накопичені дані до останнього оновлення для кожної зорі, а також інформацію про всі зміни, що вносились у дані. Завдяки тому, що каталог накопичує дані з різних джерел, він містить усі типи змінних об'єктів, від затемнено-подвійних до еруптивних змінних зір. Інформацію можна отримати не тільки про підтвержені змінні, а і про кандидати у змінні об'єкти. Також, цю базу часто використовують для створення нових каталогів змінних зір. Так, з використанням каталогу VSX та обзору Vista Variables in the Via Lactea (VVV), Herpich et al. (2021) поєднали дані цих баз, та створили каталог, що служить основою для подальших досліджень.

Кожен місяць каталог оновлюється на приблизно 10 тисяч об'єктів. Усі оновлення відстежуються модераторами, інформація завжди проходить фільтрацію, що робить цю базу даних актуальною, точною та надійною.

1.4.4 Strasbourg astronomical Data Center

Серед баз даних відомою є Страсбурзький центр астрономічних даних Strasbourg astronomical Data Center (далі - CDS). Місія CDS полягає у зборі корисної інформації про астрономічні об'єкти, що може бути доступна у комп'ютеризованій формі. CDS містить астрономічну базу даних SIMBAD, що є всесвітньою довідковою базою даних для ідентифікації астрономічних об'єктів; також VizieR, службу астрономічних каталогів; інтерактивний атлас зоряного неба Aladin, що надає доступ до багатьох каталогів та баз даних, та візуалізує астрономічні зображення. CDS має складні алгоритми для ідентифікації об'єктів, які базуються на машинному навчанні, що допомагає аналізувати, ідентифікувати та перевіряти дані, що поступають у базу, або інтегруються з інших баз. Завдяки співпраці з NASA, ESA та ESO база CDS є досить важливим та актуальним центром астрономічних даних.

Розділ 2. Методи досліджень

2.1 Апаратура спостережень

Фотометричні спостереження проводились з 2013 по 2016 рік на протязі 12 ночей з використанням ПЗЗ-камери, якою оснащений 0.7-метровий телескоп-рефлектор АЗТ-8 на Чугуївській спостережній станції Науково-дослідного інституту Астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна [Шевченко та ін. 2013, Железняк та ін. 2015]. ПЗЗ-камера ML4710 має матрицю 1027x1056 пікселів з розміром пікселя 13x13 мкм. За допомогою електричного охолодження елементами Пельть'є температура матриці стабілізується до температури -50°C відносно навколишнього середовища з точністю 0.1 градус (Рис. 2.1). Камера має поле зору 16.2x16.2 кутових мінут, кутове розділення пікселя складає 1.1 кутової секунди. ПЗЗ-камера оснащена фільтровою насадкою FLI CFW-1 з вікнами світофільтрів, що відповідають смугам *BVR*I фотометричної системи Джонсона-Козінса [Bessel, 2005]. Квантова ефективність ПЗЗ-камери ML 4710 у діапазоні довжин хвиль від 0.55 до 0.75 мкм складає 93% - 95%, що дозволяє проводити високоефективні та якісні фотометричні спостереження слабких об'єктів. Типовий час експозиції складає від одної до трьох хвилин, в залежності від яскравості зорі, що забезпечує точність індивідуального вимірювання блиску у межах 0.01 – 0.02 зор. вел. Зображення були отримані з використанням смуг *V* та *R* фотометричної системи Джонсона-Козінса. Оригінальні ПЗЗ-кадри калібрувалися стандартним методом з урахуванням темного струму, що виникає внаслідок температурних шумів, та корекції за неоднорідність чутливості пікселів. Детально методика первинної редукації зображень описана у наступному параграфі.



Рис. 2.1. Телескоп АЗТ-8 спостережної станції НДІ астрономії ХНУ та ПЗЗ-камера ML 4710.

2.2 Редукція зображень

Перед роботою із зображеннями, необхідно піддати їх редукції. Зображення мають формат FITS. У кожного файлу є свій заголовок - Header. Header – це файл у 2880 байт. В ньому міститься структурований запис даних, у 36 рядках по 80 символів у кожному [5]. Рядки починаються з ключових слів, після яких розміщені значення, що присвоєні кожному з них. У Header міститься інформація про температуру ПЗЗ-камери, або прізвище спостерігача, тощо. Основні ключові слова мають наступні назви:

OBJECT = найменування об'єкту спостережень;

TELESCOP = дані про тип телескопу, його назву;

INSTRUME = назва приймача інформації;

OBSERVER = прізвища спостерігачів;

DATE-OBS = дата спостережень (рік-місяць-день);

TIME-OBS = час спостережень на початок експозиції (год-хв-с);

EXPTIME = час експозиції (с);

CCD-TEMP = температура ПЗЗ-камери;

FILTER = фільтр, що використовується при одержанні зображення;

В кінці заголовка написано слово END, що також є ключовим.

Після слова END розміщено запис інформаційних байтів, на кожен з котрих виділяється по 2 байти: перший – старший, другий – молодший. Запис у файл починається з кінця зображення [5]. Заголовки файлів у файл починається з кінця зображення.

Зображення FITS-формату представлені наступними розширеннями: *.fts, *.fit, або *.fits [5]. Багато оболонки працюють саме з файлами FITS-формату.

Первинна обробка зображень називається редукцією. Метою редукції є усунення теплових шумів та корекцію за нерівномірність чутливості кожного пікселя. Так, за час експозиції ПЗЗ-камера реєструє електричний заряд, з даною довжиною хвилі, після чого проходить процес зчитування та оцифрування цього заряду. Тоді його значення наступне [5]:

$$N_{ij} = lsq_{ij}I_{ij}^0t + D_{ij}t + B_{ij} \quad (2.1)$$

де l - коефіцієнт пропускання телескопу, s – коефіцієнт пропускання фільтру, q_{ij} – квантова ефективність пікселя, I_{ij}^0 - число фотонів на вході телескопу за одиницю часу, t – час експозиції, D_{ij} – тепловий шум у пікселі за одиницю часу (темновий сигнал), B_{ij} – шум зчитування, i, j – відповідний номер пікселя.

Для отримання темнових знімків, які називаються «dark», ПЗЗ-камера повністю закривається, після чого роблять знімок. Таким чином, ми реєструємо темновий сигнал, який створюється тепловими шумами:

$$N_{ij}^t = D_{ij}t + B_{ij}. \quad (2.2)$$

Сигнал у пікселі є адитивним. Отримавши різницю рівнянь (2.1) та (2.2), отримаємо скориговане за тепловий шум та шум зчитування значення сигналу у пікселі:

$$N_{ij} - N_{ij}^t = lsq_{ij}I_{ij}t \quad (2.3)$$

Редукція передбачає також і корекцію за нерівномірність чутливості пікселів. Щоб її провести, необхідно отримати поле рівномірно освітлених пікселів, такі зображення називаються «flat». Методів такого освітлення досить

багато, ми не будемо на них зупинятись. Після отриманого плаского поля, щоб скорегувати зображення, розділимо рівняння (2.3) на це поле:

$$N_{ij} = I_{ij} \frac{I^f}{I_{ij}} \quad (2.4)$$

де $I^f = \frac{1}{mn} \sum_i^m \sum_j^n I_{ij}$, n , m – кількість рядків та кількість пікселів у рядку матриці.

Даний вид зображень також бувають двох типів: з короткою та довгою експозицією. Оскільки величина темнових відліків у пікселі випадкова, виконується створення декількох темнових знімків, з ціллю усереднити зображення темнових полів. Усереднені темнові поля називаються «master-dark». Отримавши темнові знімки, та знімки пласких полів, що зображені на рис. 2.2, необхідно приступити до обробки знімків зоряних полів.

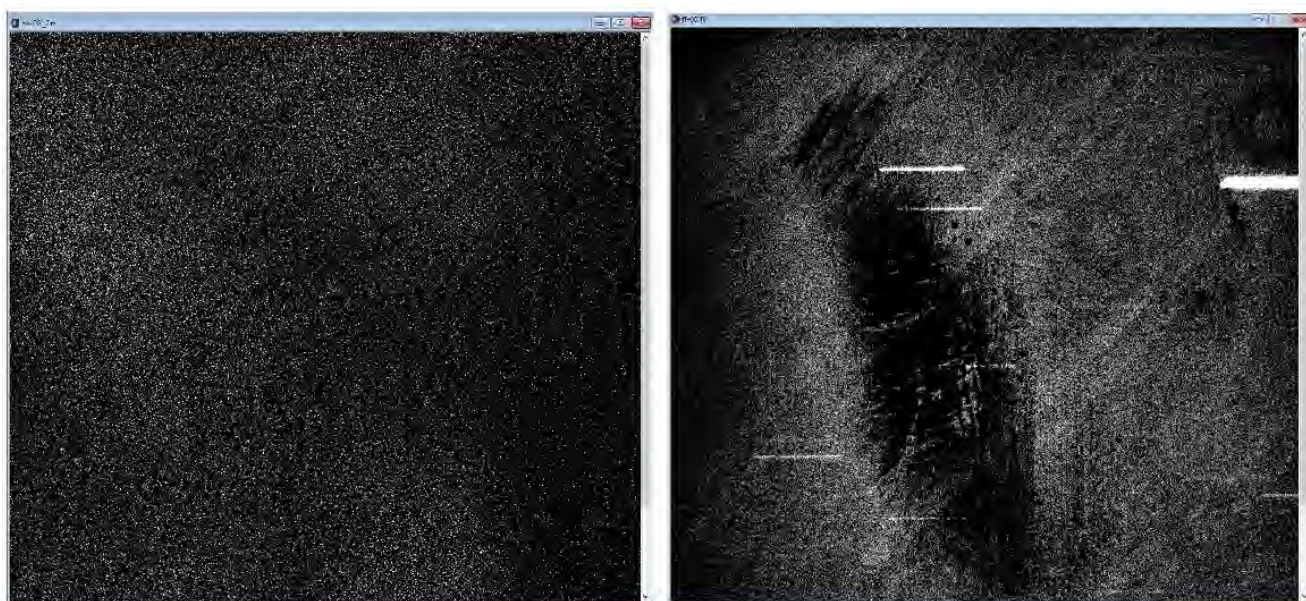


Рис. 2.2. Зображення «dark» та «flat», зліва та справа відповідно.

Редукція у даній роботі проводилась у програмній оболонці MaxImDL [5]. На зображенні, що завантажене у дану оболонку, добре видно теплові шуми, що проявляють себе у вигляді окремих яскравих пікселів (Рис. 2.3.). Призменшення температури матриці, темновий шум зростає, тому важливо не змінювати температуру під час експозиції.

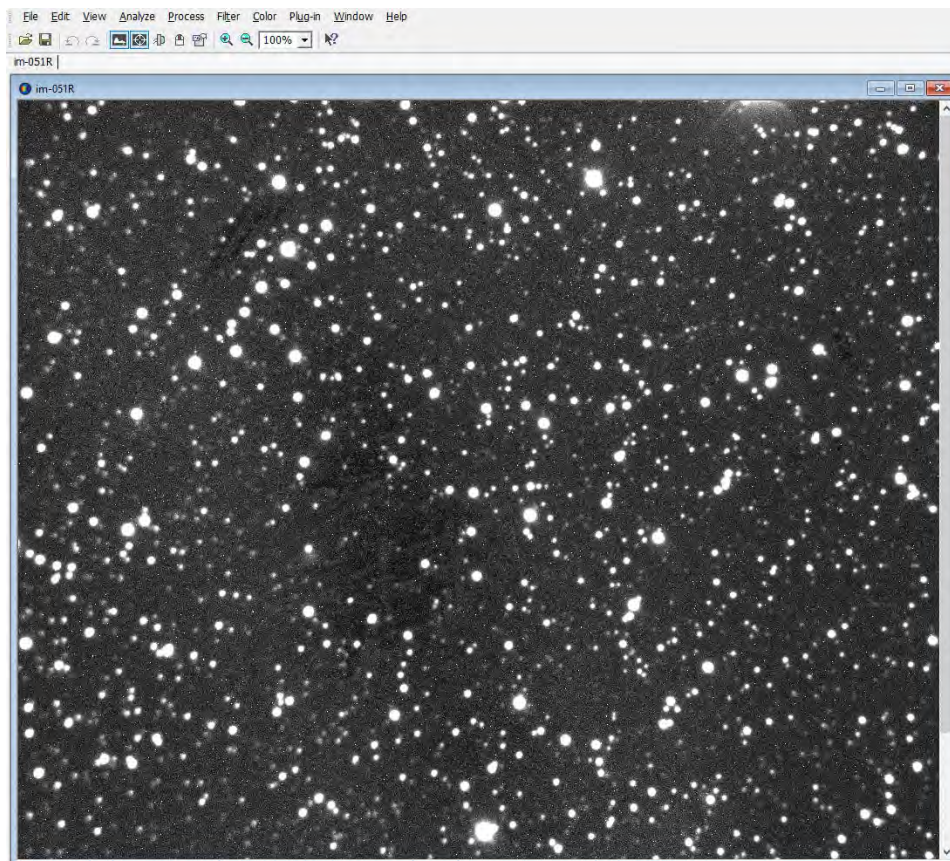


Рис. 2.3. Необроблене зображення з тепловими шумами, що відображає оболонка MaxImDL.

Для початку роботи над обробкою знімків у MaxImDL, через вікно «Process» обираємо підпункт «Set Calibration», та відкриваємо меню редукції (Рис. 2.4.). Віконце за надписом «FLAT» надає змогу обрати необхідний формат зображення, що ми хочемо додати. Тепер, використовуючи клавішу «Add Group», ми додаємо зображення «dark», та за допомогою кнопки «Add» завантажуюмо темнові зображення з короткою експозицією. Після чого, знову додаємо групу темнових з довгою експозицією, для отримання усереднених «master-dark». Так само, змінивши формат зображень на «FLAT», додаємо плоскі поля (див. Рис. 2.4.). Закриваємо це вікно, натискаючи «OK», та у меню «Process» обираємо пункт «Calibrate All».

Програма MaxImDL, після виконання усіх даних дій, автоматично проведе редукцію зображень. На рис. 2.5 наведено скореговане зображення зоряного поля.

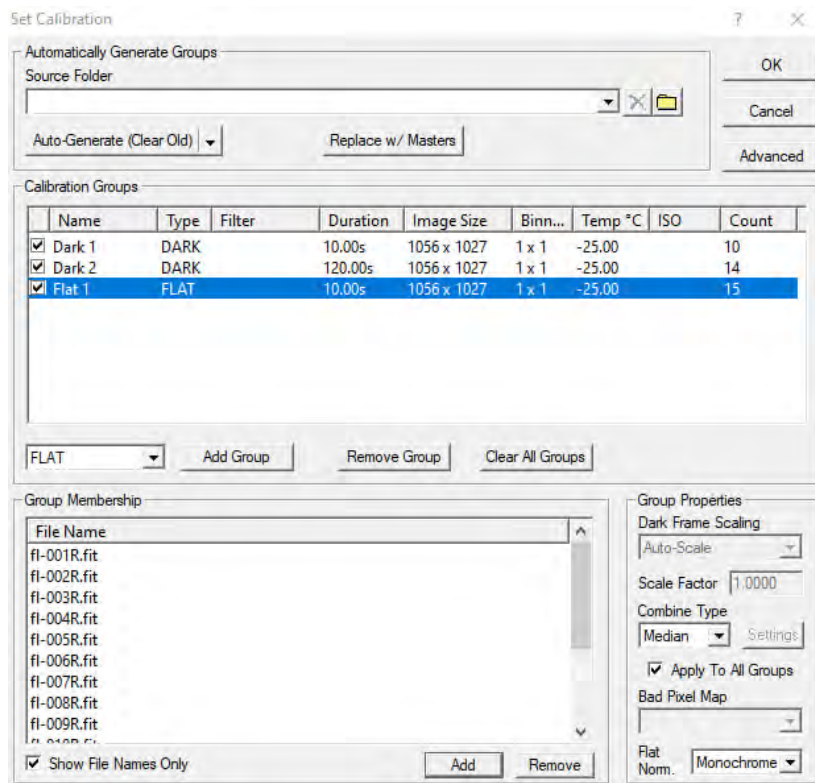


Рис. 2.4. Меню проведення редукції у оболонці MaxImDL.

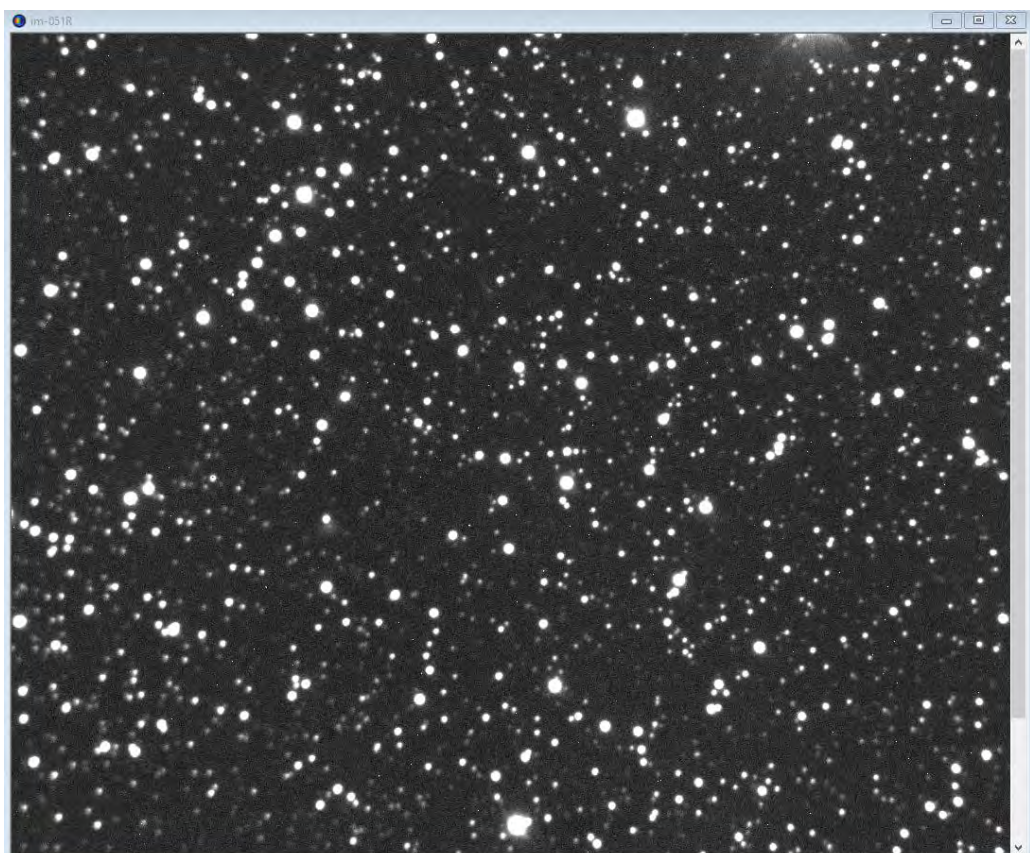


Рис. 2.5. Скореговане зображення зоряного поля.

2.3 Апертурна фотометрія та побудова кривої блиску

Для побудови складеної кривої блиску у даній роботі використано метод апертурної фотометрії.

Апертурна фотометрія – це метод виміру сумарної інтенсивності випромінення об'єкта, заснований на виділенні його центральної частини за допомогою апертури (діафрагми) круглої форми, за всіма пікселями, що приходяться на апертуру. Виділяючи апертурою необхідний об'єкт, ми також реєструємо і фон неба, який необхідно відняти. Для цього вимірюється також фон навколо світила. Таким чином маємо:

$$N_o = N - kN_\phi \quad (2.5)$$

де N – інтенсивність об'єкта разом з фоном, N_ϕ – середнє значенні фону у пікселі, k – кількість пікселів, що виділяє апертура.

Точність фотометрії характеризується відповідним відношенням сигнал-шуму (англ. - Signal Noise Ratio, або SNR). Флуктуації потоку фотонів від теплового джерела можна описати розподілом Пуассона. Відношення SNR при вимірюванні блиску світила, отриманому за час експозиції t , наступне:

$$SNR(t) = \frac{N_o t}{\sqrt{N_o t + k(N_\phi t + N_t t + N_B^2)}} \quad (2.6)$$

де N_t – значенні темного відліку у межах одного пікселю за одиницю часу, N_B – шум зчитування у межах одного пікселя. Шум зчитування величина постійна для кожної експозиції, вона не залежить від її тривалості.

Видом апертурної фотометрії є диференційна фотометрія. Суть даного методу полягає у аналізі зміни блиску відносно постійної зорі, що називається зорею порівняння. Таких зір обирають не менше п'яти, значення SNR для яких повинно бути не менше 100, але не перевищувати 600-700. Відліки від об'єкта

та зір порівняння, з урахуванням віднятого фону, переводяться у шкалу зоряних величин наступним чином:

$$m_o = -2.5 \lg(N_o - N_{sky}) \quad (2.7)$$

Оскільки поле зору ПЗЗ-камери невелике, об'єкти знаходяться на однакових повітряних масах, тому для побудови кривої блиску достатньо відняти блиск відомої зорі, від спостережуваного блиску досліджуваної зорі:

$$\Delta m = m_o - m_s \quad (2.8)$$

Де m_o – інструментальна зоряна величина об'єкту, m_s – інструментальна зоряна величина зір порівняння. Загальна похибка буде мати вигляд:

$$\sigma \Delta m = \sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_s^2} \quad (2.9)$$

Описана вище апертурна диференційна фотометрія у даній роботі виконувались у середовищі MaxImDL.

Після завантаження зображень зоряних полів у середовище MaxImDL, ототожнимо досліджувану зорю. Ототожнення зорі здійснюється за використанням її координат, що зазначені та закріплені за кожною нічю спостережень. Знайшовши координати, необхідно скористуватися зоряним атласом Aladin для пошуку нашого об'єкту. За допомогою оболонки Aladin, вказавши координати зорі у відповідній ділянці, знаходимо світило. Тепер, порівнюючи зоряні поля, шукаємо необхідний об'єкт на зображеннях у MaxImDL. Після знаходження зорі, необхідно обрати не менше п'яти зір порівняння. Дивлячись на значення SNR у спеціальному меню, ми шукаємо підходящі зорі. Для позначення їх порівняльними зорями та подальшої фотометрії, необхідно обрати вкладку «Analyze», та у списку вибрати «Photometry». Після цього з'явиться меню фотометрії (Рис 2.6.).

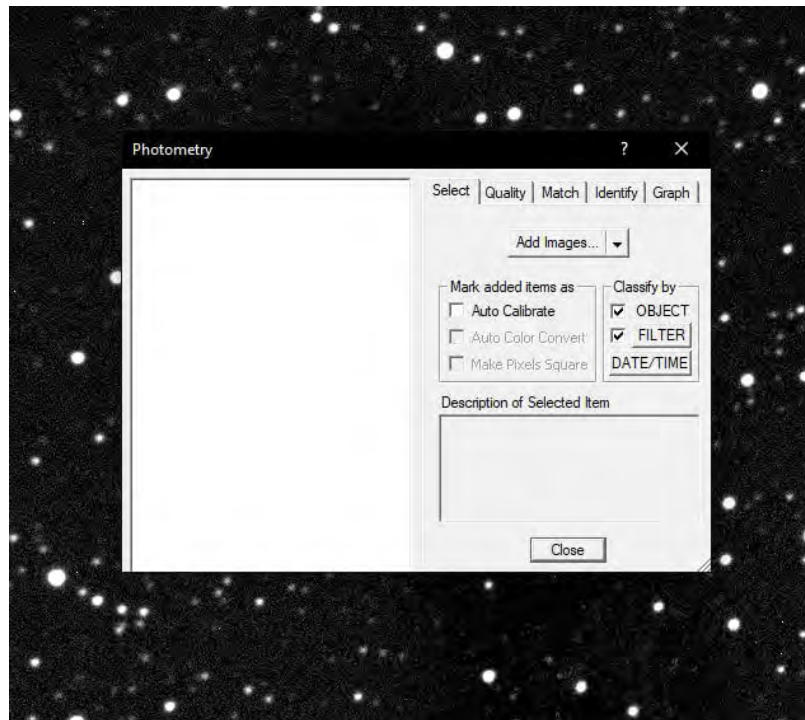


Рис. 2.6. Меню фотометрії у оболонці MaxImDL.

Додавши усі зображення, за допомогою вкладки «Identify» вибираємо в ній тип об'єкту «New Reference Star». Після чого за допомогою аперттури (Рис. 2.8.) вибираємо обрану зорю. Таким чином обираємо усі п'ять (або більше) зір порівняння (Рис. 2.10.).

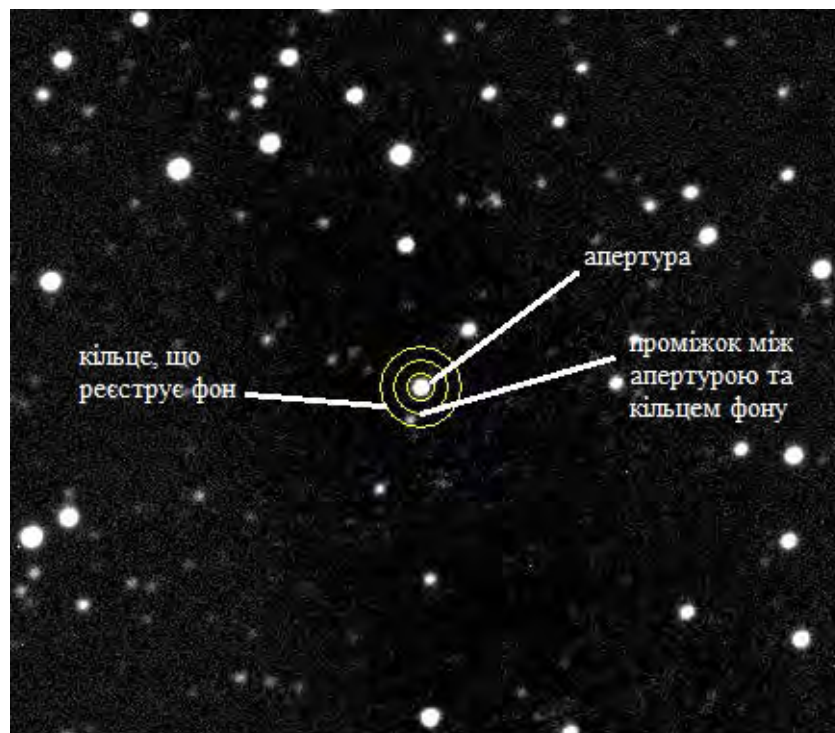


Рис. 2.8. Кільце аперттури навколо об'єкту у оболонці MaxImDL.

Знайдемо тепер пункт «New Object», та виберемо досліджувану зорю. Перед будівання кривої блиску, ми повинні вказати зоряні величини зір порівняння у даній полосі. Знову звернемося до оболонки Aladin (Рис. 2.9.), де необхідно знайти базу даних VizieR та підключити каталог APASS – AAVSO. Зорі, що наявні у базі даних, будуть позначені спеціальними символами (див. Рис. 2.9.).

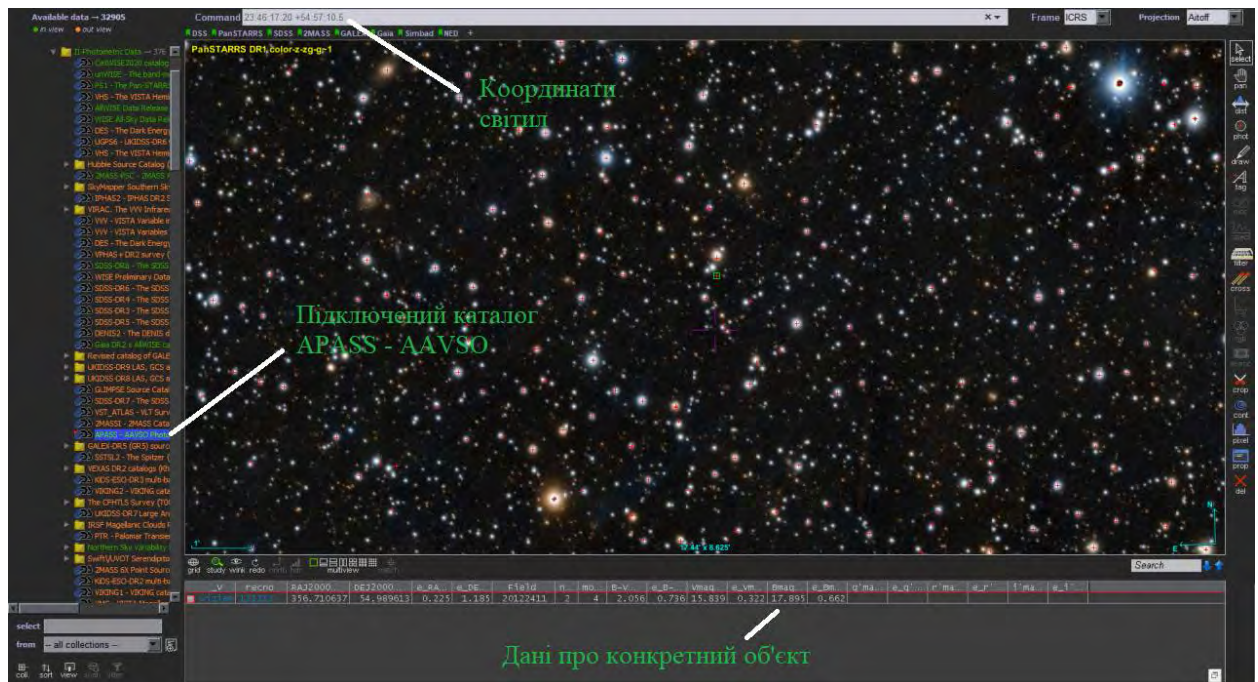


Рис. 2.9. Зоряний атлас Aladin.

Зазвичай зоряні величини даються у Слоанівській системі [Bessel 2005]. Щоб перевести їх у систему Джонсона-Козінса, використовуються наступні трансформаційні формули:

$$R = r' - 0,272(r' - i') - 0,159, \quad (2.10)$$

$$V = g' - 0,578(g' - r') - 0,011.$$

де R , V – Джонсоновські зоряні величини у відповідних смугах, g' , r' , i' – Слоанівські зоряні величини у відповідних смугах. Отримані дані позначаємо у меню фотометрії (див. Рис. 2.10.).

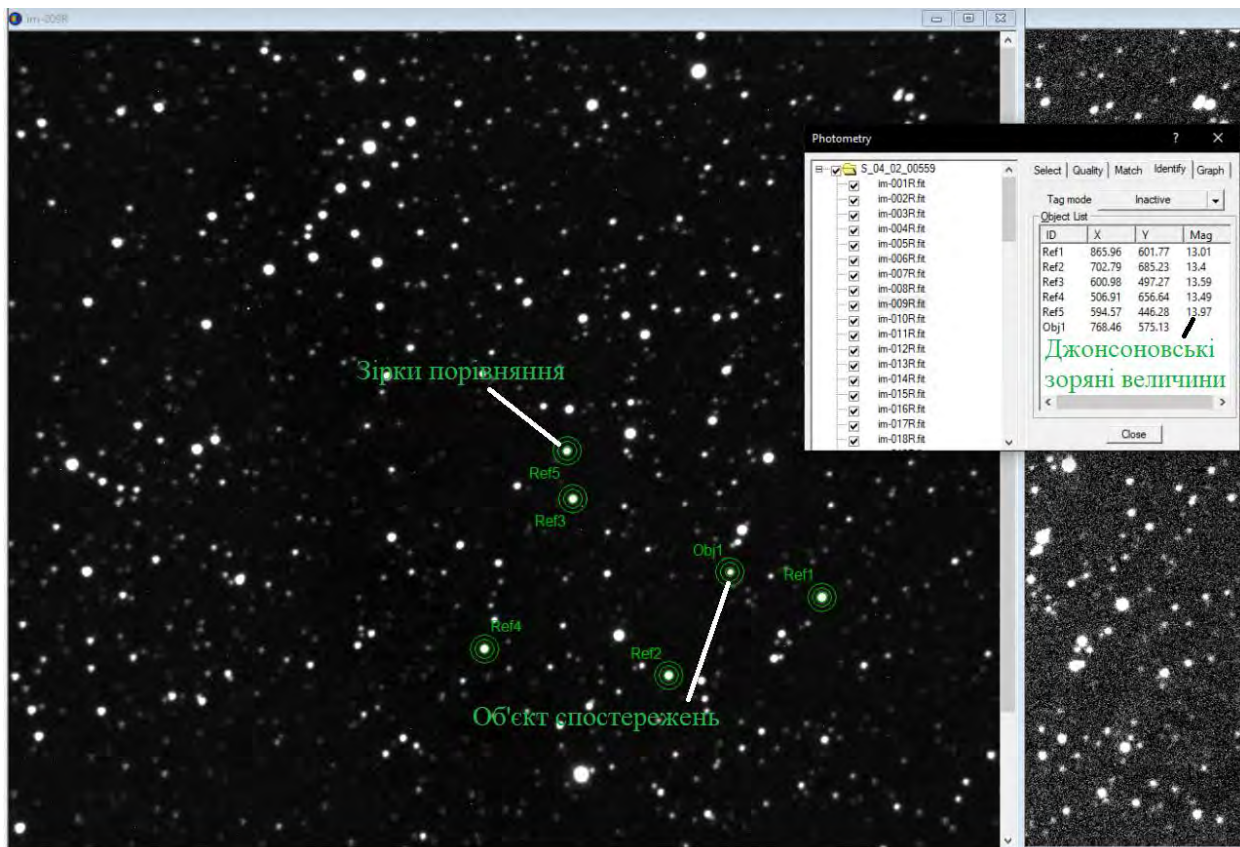


Рис. 2.10. Вибір зір порівняння та об'єкту фотометрії у оболонці MaxImDL.

Тепер, знайшовши та зазначивши всі необхідні дані, натисканням «Graph» будемо криву блиску нашої зорі за дану ніч (Рис. 2.11.).

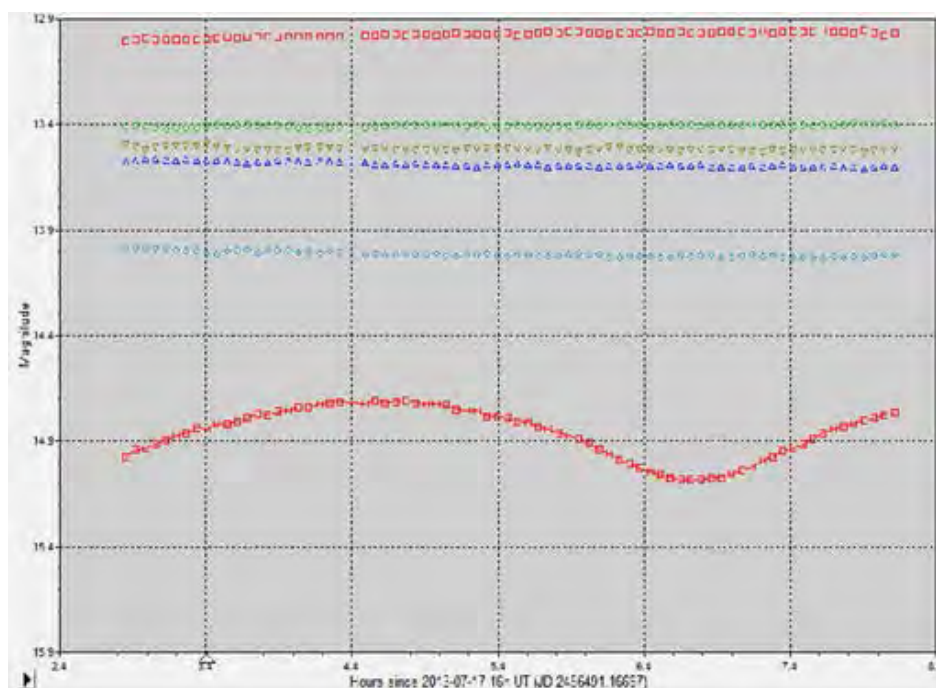


Рис. 2.11. Крива блиску за одну ніч в оболонці MaxImDL.

Таким чином отримуємо криві блиску для кожної ночі спостережень. Щоб об'єднати їх, побудувати складену криву блиску та визначити період зорі, нам необхідно завантажити отримані в форматі CSV дані у оболонку OriginPro. Побудувавши криві блиску за кожну ніч, необхідно оцінити період, та розрахувати фазу за формулою:

$$\Phi = \left(\frac{T-T_0}{P}\right) - \text{int}\left(\frac{T-T_0}{P}\right)$$

де T , T_0 – поточний момент часу, та початковий момент часу відповідно, P – період.

Отримавши дану величину, будемо залежність зоряної величини від фази, та отримаємо складену криву блиску (Рис. 2.12.). Після чого, опираючись на вид складеної кривої, корегуємо значення періоду. Усі складені криві блиску у даній роботі будувались саме таким чином.

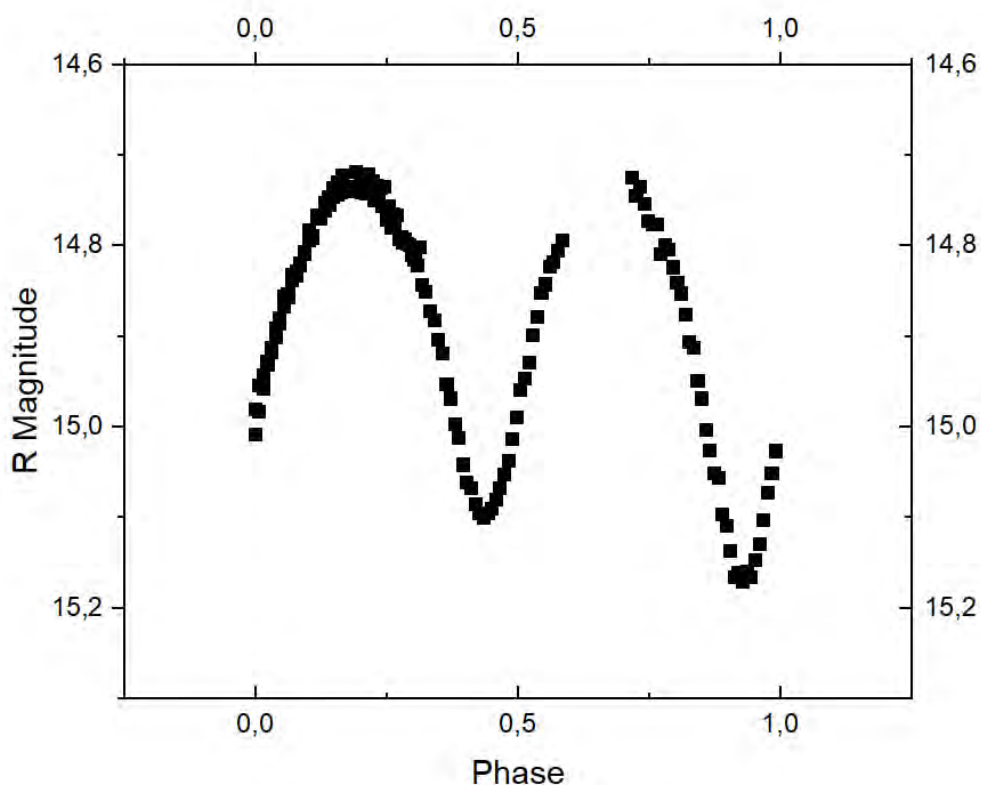


Рис. 2.12. Складена крива блиску в оболонці OriginPro.

Розділ 3. Результати спостережень змінних зір

3.1 Криві блиску обраних об'єктів

У даній роботі ми обрали чотири змінні зорі для визначення їх характеристик. Як було відмічено у Вступі, зображення зоряних полів були одержані співробітниками НДІ астрономії та кафедри астрономії та космічної інформатики, і передані автору для подальшого аналізу та визначення характеристик обраних об'єктів. Загалом було опрацьовано майже 1100 зображень. Номер об'єкту за каталогом Gaia DR3, дата спостережень, видима зоряна величина у смузі R системи Джонсона-Козінса та екваторіальні координати зазначені у таблиці 3.1. Далі буде наведено результати, отримані для даних зір.

Таблиця 3.1 Дати спостережень, координати та видимі зоряні величини

| Номер зорі за каталогом Gaia | α_{2000} | δ_{2000} | R |
|------------------------------|-----------------|-----------------|--------|
| 2653267311833715200 | 22 45 56.88 | -00 36 47.6 | 11.984 |
| 1997858296066237312 | 23 36 47.46 | +56 34 05.8 | 16.33 |
| 2603412499692849920 | 22 51 28.79 | -13 12 00.4 | 15.61 |
| 1997847472748694272 | 23 37 50.05 | +56 35 34.9 | 14.77 |

2653267311833715200. Спостереження даної зорі проводились упродовж двох ночей у вересні 2016 року, в фотометричній смузі R . За описаними методами було проведено апертурну фотометрію з використанням 10 зір порівняння, та отримано складені криву блиску, що наведені на рис. 3.1. На кривій блиску для R смуги спостерігається один глибокий мінімум, дещо випуклий максимум.

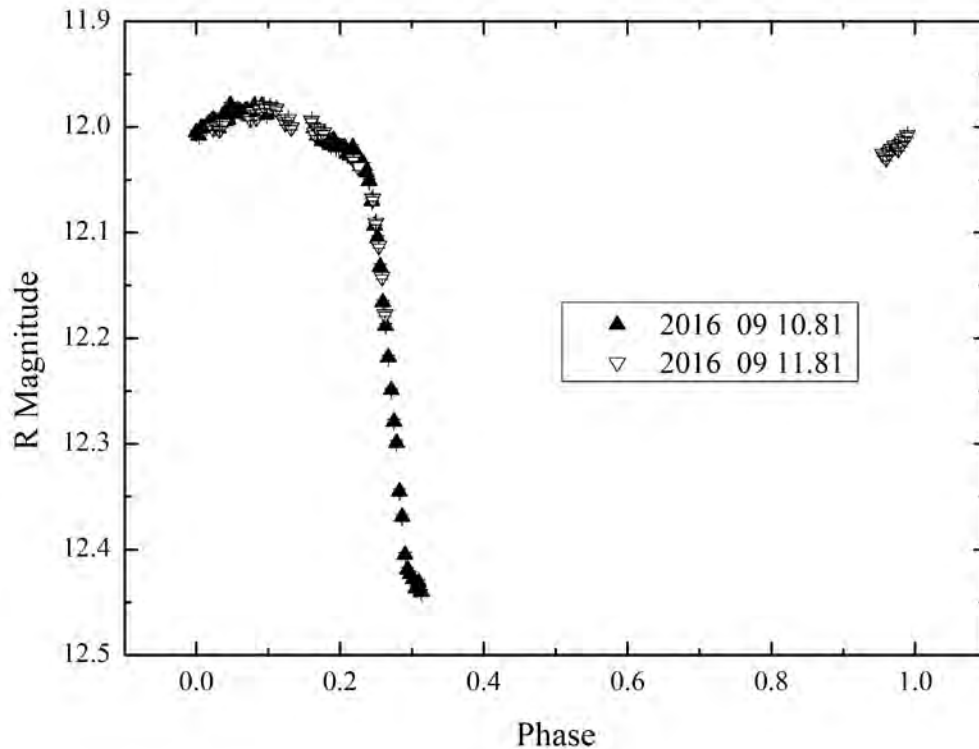


Рис. 3.1. Крива блиску об'єкта 2653267311833715200 у смузі R .

Період цього об'єкта за даними каталогу VSX становить 0.50614 ± 0.0021 діб. Крива блиску демонструє амплітуду 0.442 зоряних величин у R смузі. За характером кривої блиску об'єкт ототожнений як затемнено-подвійна змінна типу Алголя, що підтверджується даними каталогу VSX, а також опис кривої підпадає під характерні для цього типу змінних криві блиску. Ми припускаємо, що точки, що виходять за рамки основної кривої є похибками спостережень, що викликані погодними умовами.

1997858296066237312. Дана зоря спостерігалась упродовж шести ночей у липні 2015 року у R смузі. Крива блиску у смузі R наведена на рис. 3.2. Період об'єкту за даними каталогу ZTF становить 0.974598 діб [17]. На кривій блиску спостерігається один досить глибокий та гострий мінімум, максимальна амплітуда кривої становить 0.55 ± 0.009 зоряних величин. Дана зоря відноситься до затемнено-подвійних змінних типу Алголя (EA). Глибокі гострі мінімуми та рівні ділянки блиску характерні для таких систем. Отримана нами крива блиску демонструє гладкі та трохи випуклі ділянки максимумів. Така

форма може свідчити про витягнутість компонент приливними силами, що може спостерігатись навіть у розділених системах. Однак, причиною такого ефекту також може слугувати освітлення поверхні більш слабкої компоненти світлом головної зорі, що спричиняє сплески блиску такого характеру, адже слабкіша компонента нагрівається світлом головної.

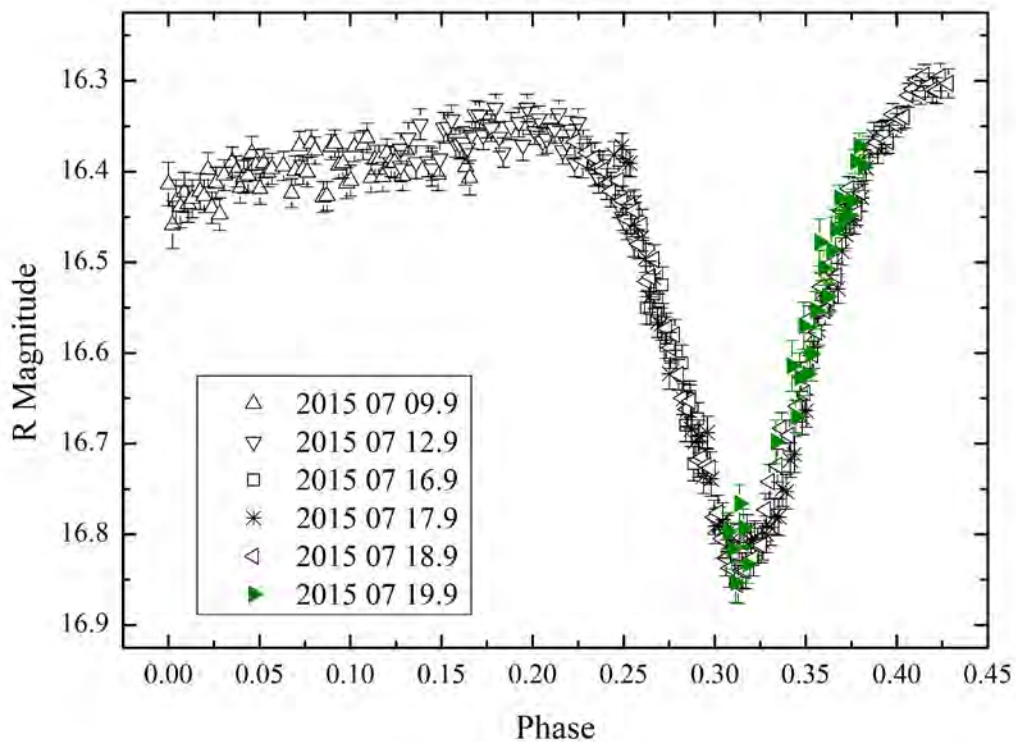


Рис. 3.2. Крива блиску об'єкту 1997858296066237312 у R смузі.

2603412499692849920. Даний об'єкт був ототожнений як змінна зоря під час вибору зір порівняння при спостереженнях астероїду. З використанням зорі порівняння, було розраховано блиск зорі у смузі R за формулою

$$R_{obj} = R_{ref} - (m_1 - m_2)$$

де R_{obj} – зоряна величина об'єкту у R смузі, R_{ref} – зоряна величина зорі порівняння у R смузі, m_1 , m_2 – видимі зоряні величини зорі порівняння та досліджуваного об'єкту відповідно. За отриманими зоряними величинами було побудовано криву блиску, що наведена на рис 3.3.

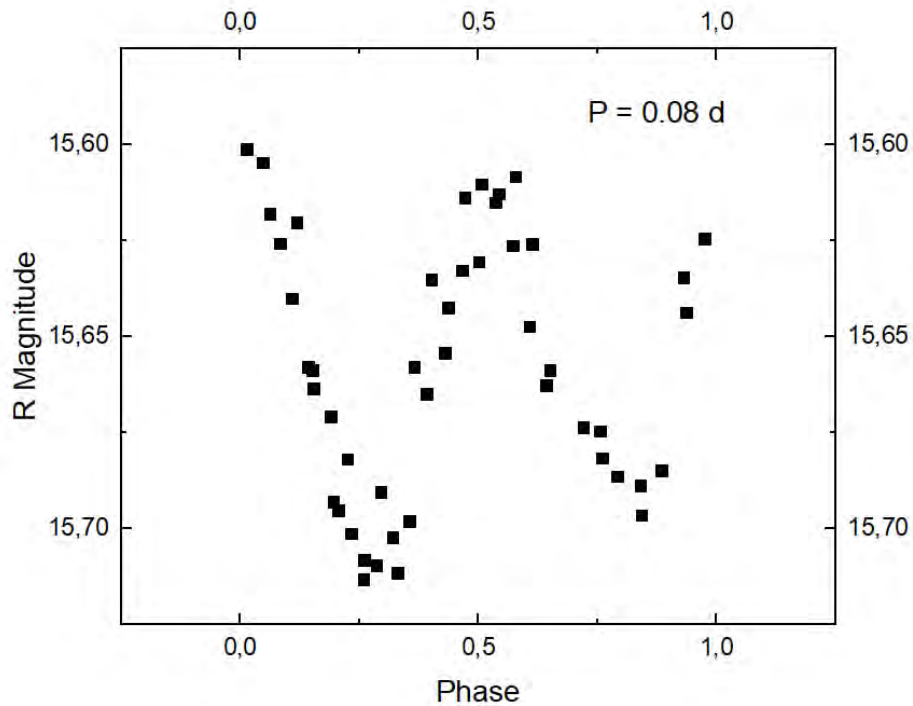


Рис. 3.3. Крива блиску об'єкту 2603412499692849920 у R смузі.

Період зорі оцінений у 0.08 діб, для цієї зорі його отримано вперше. Максимальна амплітуда становить 0.11 ± 0.02 зоряних величин. Для розширення даних про цей об'єкт, та більш точного встановлення типу змінності, ми прибігли до використання зовнішніх баз даних, астрономічних оглядів та місій. Це є важливим при роботі з зорями, що вивчаються вперше.

Одним з джерел для аналізу стали дані космічної місії Transiting Exoplanet Survey Satellite (далі -TESS). Даний телескоп призначений для моніторингу неба з великою точністю, його знімки містять інформацію для дослідження як постійних, так і змінних зір. Для досліджуваної зорі було знайдено та ототожнено знімки відповідного зоряного поля. На жаль, короткий час експозиції у 0.00183333249 діб (приблизно 158 секунд) не дозволяє працювати з даними знімками, адже наявного об'єкту на зображеннях майже не видно. Виходячи з цих умов, фотометрія знайдених зображень зоряних полів не проводилась. Також, нами було використано пошук даних у базі Panoptic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS). Телескопи Pan-STARRS1 та Pan-STARRS2 є наземними, їх огляд охоплює велику частину неба,

що дає можливість надавати багато астрометричної або фотометричної інформації про небесні об'єкти. Метою пошуку була інформація щодо положення даної зорі. Такі дані дали б змогу побудувати залежність зміни координат від часу, для перевірки гіпотези подвійності зорі. Метод засновується на тому, що у подвійних системах можуть спостерігатись варіації положення зорі, який відбувається завдяки руху навколо барицентру. Було знайдено необхідні дані, однак, вони були досить розріджені, проміжки між спостереженнями виявились надто великими для різних смуг, тому за такими даними неможливо встановити необхідну залежність та зробити висновок, щодо гіпотези подвійності даної зорі. Не дивлячись на те, що знайдені дані не були використані для аналізу, процес їх пошуку та ототожнення об'єкту є невід'ємною частиною дослідницької роботи. Це дозволяє зробити висновки не лише для самої зорі, а і щодо обмежень існуючих про неї даних.

За характером кривої блиску нами було зроблено припущення, що дана зоря є затемнено-подвійною контактною системою. Різниця мінімумів за глибиною складає близько 0.02 зоряних величин, такі показники під час затемнень властиві тісним системам. Однак, з оцінки періоду можна побачити, що об'єкт є досить короткоперіодичним, а зорям типу W UMa характерні довші періоди. Не дивлячись на це, контактні-подвійні зорі з надкороткими періодами існують. Такі системи складаються з двох білих або червоних карликів, вони малі за радіусами, що дозволяє знаходитись досить близько один до одного не зливаючись, та мають невеликі маси, що і спричиняє досить швидкі обертання. Наприклад, Reolofs, G. H. A., et al. (2010) дослідили таку систему, її період становить 5.4 хвилини [15]. Також, Corperwheat, C. M. et al. (2011) дослідили подвійну систему з дуже коротким періодом у 28.3 хвилини [14]. Але такі системи не часто зустрічаються серед контактних-подвійних систем. Пошук даних у каталогах для цього об'єкту привніс деякі розбіжності щодо класифікації даної зорі. У базі даних VSX спектральний тип зорі позначений як F, така класифікація відкидає припущення про подвійну систему з двох

карликів. Беручи до уваги, що деякі типи пульсуючих зір, як наприклад δ Scuti, мають короткі періоди, схожі з нашими даними амплітуди, та спектральні класи A-F, можна припустити, що даний об'єкт все ж таки є пульсуючою змінною. Але остаточно зробити висновок щодо класу даної змінної зорі наразі складно, оскільки потрібно більше даних для аналізу.

1997847472748694272. Спостереження даної зорі проводились на протязі двох ночей у липні 2013 р., та шести ночей у липні 2015 р. Довгостроковий період спостережень дав можливість дуже точно оцінити період, який становить 0.3381335 ± 0.0000015 діб. Поєднана крива блиску зображена на рис. 3.4. Амплітуда складає 0.34 ± 0.02 зоряних величин, а мінімуми відрізняються на 0.05 ± 0.01 зоряних величин. Ця зоря ідентифікована як контактна подвійна система типу W UMa. Криві блиску 2013 та 2015 років незначно відрізняються, це може вказувати на фізичні процеси, що протікають у системі, такі як, наприклад, перерозподіл маси через акрецію речовини, та еволюційні зміни у системі.

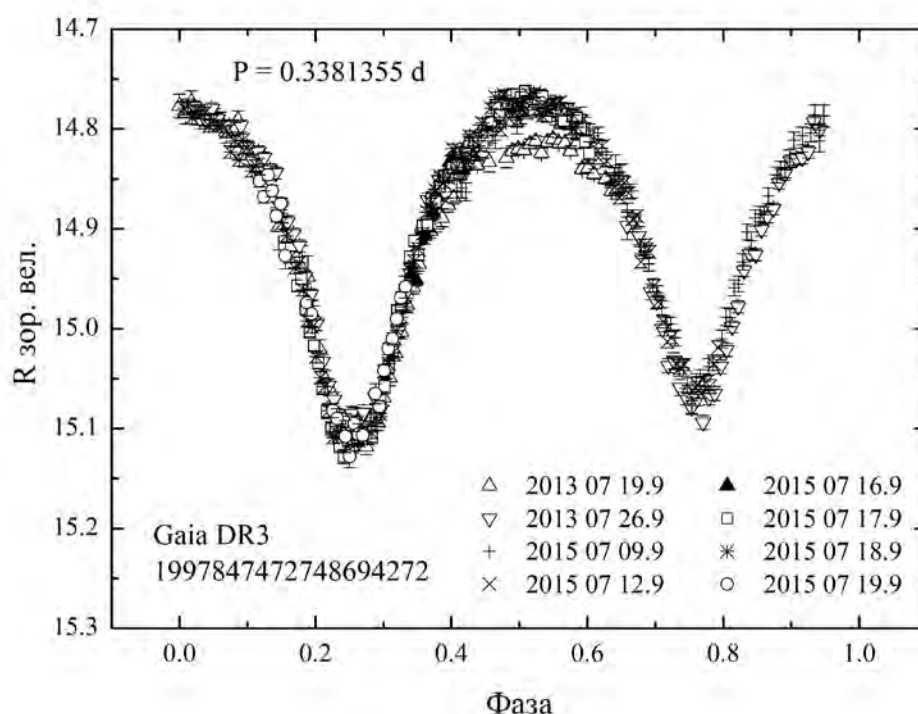


Рис. 3.4. Поєднана крива блиску об'єкта 1997847472748694272.

Важливо зазначити, що поряд із даною зорею знаходиться ще одна зоря поля, яка не розділяється при апертурній фотометрії на нашому телескопі. Усі оцінки характеристик даної зорі, а також побудова кривої блиску, були виконані з внеском зорі поля.

3.2 Визначення фізичних характеристик та фотометричних відстаней

Розрахунок відстаней у даній роботі проводився за допомогою паралаксів каталогу Gaia DR3. Але дані Gaia можуть мати неточності, оскільки вони не скореговані за міжзоряне поглинання. Для уточнення відстаней до досліджуваних зір, а також їх фізичних характеристик, представлених у даній роботі, ми розрахували фотометричні відстані для усіх об'єктів. Для даних розрахунків використовувалась формула:

$$M = m - 5 \times \log_{10}(d) + 5 - A$$

де M – абсолютна зоряна величина, m – спостережна зоряна величина, d – відстань до об'єкта в парсеках, A – міжзоряне поглинання.

Для обчислення міжзоряного поглинання була використана тривимірна карта поглинання Чумацького Шляху (<http://argonaut.skymaps.info>), та коефіцієнт перерахунку $E(g-r)$ поглинання в смузі R з роботи Green et al. (2019) [23]. Також, отримавши фотометричну відстань, було скориговано оцінки абсолютних зоряних величин та світностей досліджуваних зір. У таблиці 3.2 наведено результати розрахунків фізичних характеристик зір без врахування поглинання, у таблиці 3.3 наведені оцінки, зроблені на основі фотометричних відстаней.

2653267311833715200. Опираючись на паралакси Gaia DR3 було зроблено оцінки абсолютної зоряної величини об'єкта $M_R = 4.53$, відповідна світність складає $L_R = 0.88 L_{\odot}$ для R смуги.

Фотометрична відстань цієї зорі оцінена як $d = 289.55$ пк. Виходячи з даного значення, було отримано скореговану оцінку абсолютної зоряної

величини $M_R = 4.67$, та світності $L_R = 0.78 L_\odot$. Оцінки відстані відрізняються на 18.87 пк, різниця між значеннями абсолютних зоряних величин скала 0.14^m , а величини світності уточнені на $0.1 L_\odot$.

1997858296066237312. Використовуючи паралакси з каталогу Gaia DR3 для оцінки відстані, було отримано оцінку абсолютної зоряної величини у R смузі даного об'єкту, яка становить $M_R = -2.82$. Значення абсолютної зоряної величини дозволили зробити оцінку світності зорі, яка складає $L_R = 786.35 L_\odot$, що є досить великим показником, як і значення M . Слід зазначити, що паралакс даного об'єкту у базі Gaia менше власної похибки, що дає сильну похибку оцінок даних параметрів. З урахуванням міжзоряного поглинання, оцінена фотометрична відстань об'єкту $d = 39273.37$ пк, відповідні значення абсолютної зоряної величини $M_R = -1.64$, та світності $L_R = 263.21 L_\odot$. Врахування міжзоряного поглинання зменшило оцінку відстані майже вдвічі від наведеної у табл. 3.2, оціненої по паралаксам Gaia, різниця становить 28606.06 пк. Відповідно, різниця між оцінками абсолютної зоряної величини складає 1.18^m , тоді як оцінки світності відрізняються на $523.14 L_\odot$, що досить суттєво. Таким чином, з даного порівняння видно, як важлива оцінка фотометричних відстаней з урахуванням міжзоряного поглинання, та корегування оцінок фізичних характеристик зір. Не дивлячись на це, показники для даного об'єкту залишаються досить великими, що може свідчити про досить високу температуру головної компоненти системи, а також велику яскравість.

2603412499692849920. Паралакси Gaia DR3 дозволили зробити оцінку абсолютної зоряної величини даної зорі у смузі R , що складає $M_R = 3.19$ зоряних величин. Виходячи з даного значення, нами також була отримана оцінка світності $L_R = 3.05 L_\odot$.

Фотометрична відстань для даної зорі обчислена у $d = 2974.79$ пк, абсолютна зоряна величина з урахуванням даного значення $M_R = 3.24$, а світність становить $L_R = 2.92 L_\odot$. Оцінки відстаней відрізняються на 63.27 пк,

різниця між оцінками абсолютної зоряної величини складає 0.05^m , а величини світностей відрізняються на $0.13 L_{\odot}$.

1997847472748694272. Для даного об'єкту було виконано оцінку абсолютної зоряної величини, за відстанями Gaia DR3. Таким чином, абсолютна зоряна величина зорі у R смузі становить $M_R = 4.09$. Використовуючи цю величину, ми зробили оцінку світності об'єкту $L_R = 1.33 L_{\odot}$. Для даного об'єкту оцінка фотометричної відстані не проводилась, по причині наявної постійної зорі, що не розділяється при апертурній фотометрії.

Оцінки фізичних характеристик зір наведені у таблиці 3.2, а оцінки фотометричних відстаней та скореговані параметри зір наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.2. Оцінки фізичних характеристик зір.

| Gaia DR3 | P (day) | $Ampl.$ (mag) | r (pc) | M_R (mag) | L_R (L_{\odot}) |
|---------------------|------------------------------|------------------|-------------|----------------|--------------------------|
| 2653267311833715200 | 0.506138 ± 0.0036 | 0.442 | 308.42 | 4.53 | 0.88 |
| 1997858296066237312 | 0.974598 ± 0.0011 | 0.55 ± 0.009 | 67879.43 | -2.82 | 786.35 |
| 2603412499692849920 | 0.08 | 0.11 ± 0.02 | 3038.06 | 3.19 | 3.05 |
| 1997847472748694272 | 0.3381335 ± 0.0000015 | 0.34 ± 0.02 | 1342.29 | 4.09 | 1.33 |

Таблиця 3.3. Оцінки фотометричних відстаней та скореговані оцінки фізичних характеристик.

| Gaia DR3 | A_R | d (pc) | M_R (mag) | L_R (L_{\odot}) |
|---------------------|-------|-------------|----------------|--------------------------|
| 2653267311833715200 | 0.13 | 289.55 | 4.67 | 0.78 |
| 1997858296066237312 | 1.18 | 39273.37 | -1.64 | 263.21 |
| 2603412499692849920 | 0.04 | 2974.79 | 3.24 | 2.92 |

3.3. Залежність період-світність

В межах даної роботи була проведена побудова залежності період-світність засновуючись на даних для семи контактено-подвійних систем типу W UMa для смуги *V*. Для кожної системи були визначені абсолютні зоряні величини та логарифми періодів, які наведені у таблиці 3.4, після чого побудована відповідна залежність. Діаграма період-світність для семи систем типу W UMa зображена на рис 3.5. Апроксимація проводилась в середовищі OriginPro, з використанням інструменту «лінія тренду», що на діаграмі позначена червоним.

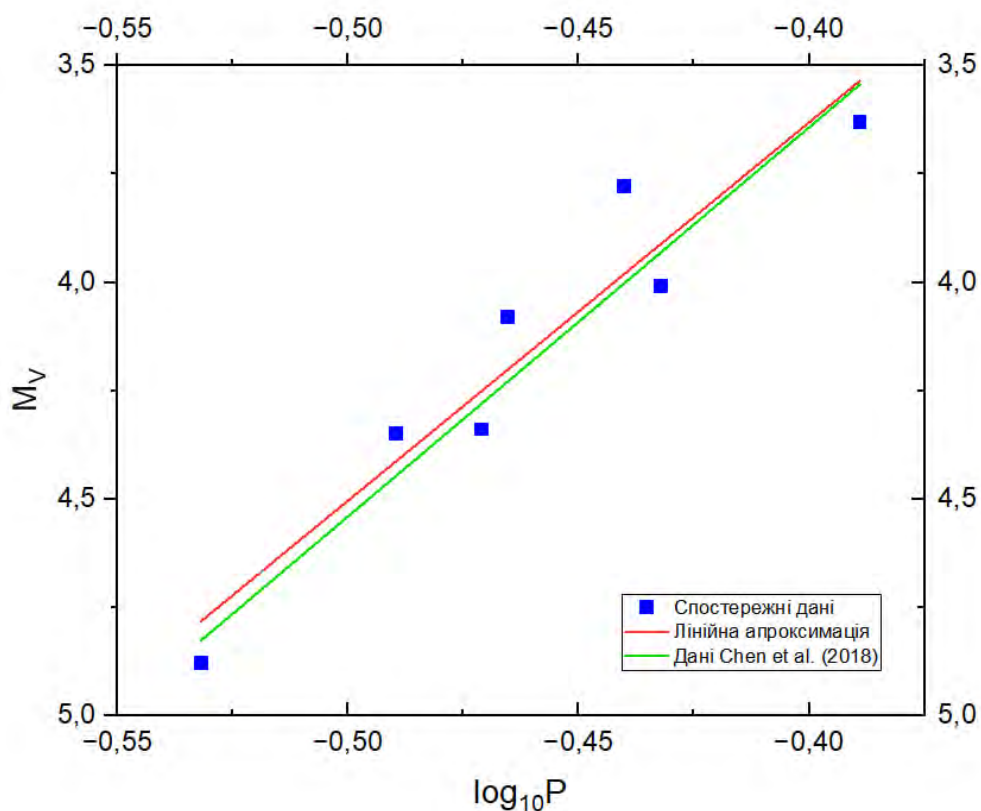


Рис. 3.5. Діаграма період-світність для 7 систем W UMa у смузі *V*. Сині точки – спостережні дані, червона лінія – лінійна апроксимація, зелена лінія – ПС-залежності отримані у роботі Chen et al. (2018) [12].

Rucinski (1974) [22] вперше емпірично отримав залежність період-світність для контактено-подвійних систем, яка має вигляд:

$$M = a \times \log_{10}P + b$$

Використовуюючи подібну залежність та дані про періоди та світність для зір типу W UMa, що отримані в НДІ астрономії Харківського національного університету, була отримана наступна залежність:

$$M = -8.73158 \times \log_{10}P + 0.13798$$

де коефіцієнти $a = -8.73158 \pm 1.2$, $b = 0.13798 \pm 0.5$ визначені з зазначеними похибками. Значення коефіцієнту a вказує на те, що при збільшенні періоду світність системи зростає, що є типовим для систем W UMa. Коефіцієнт кореляції отриманої залежності складає $R^2 = 0.90852$, що каже про досить добрий опис даних моделлю. Не зважаючи на невелику вибірку, отримані нами співвідношення в цілому співпадають з отриманими на великій вибірці, що можна бачити з таблиці 3.4, в якій наведено порівняльний аналіз коефіцієнтів залежності отриманих у даній роботі, та у роботі Chen et al. (2018) [12] для V смуги, де аналізувались 183 системи W UMa.

Таблиця 3.3. Абсолютні зоряні величини та логарифми періодів.

| Gaia DR3 | M_V | $\log_{10}P$ |
|---------------------|-----------------|--------------|
| 1994611232070701184 | 4.01 ± 0.04 | -0.43213 |
| 1997506143105623808 | 3.63 ± 0.07 | -0.38896 |
| 1997847472748694272 | 4.34 ± 0.03 | -0.47091 |
| 3913806854199490176 | 4.88 ± 0.26 | -0.53184 |
| 1862596066387379712 | 4.35 ± 0.18 | -0.48955 |
| 1997845582963089152 | 3.78 ± 0.08 | -0.44004 |
| 1997860048412872320 | 4.08 ± 0.13 | -0.46525 |

Таблиця 3.4. Порівняльний аналіз коефіцієнтів PS-залежності отриманими в рамках даної роботи, та оцінок Chen et al. (2018) [12] для V смуги.

| | a_V | b_V |
|----------------------|------------------|-----------------|
| Отримані коефіцієнти | -8.73 ± 1.2 | 0.14 ± 0.5 |
| Chen et al. (2018) | -8.98 ± 0.38 | 0.05 ± 0.17 |

Таким чином, отримані нами та Chen et al. (2018) [12] величини близькі за значеннями, засновуючись на чому можна сказати, що отримана в цій роботі залежність достатньо добре відтворює загальне співвідношення не дивлячись на невелике число проаналізованих систем.

Висновки

При виконанні дипломної роботи було вирішено поставлені основні задачі та отримано наступні результати:

1. Проведена обробка спостережного матеріалу (майже 1100 зображень) та отримано криві блиску для чотирьох зір зі швидкими змінами блиску.
2. Визначено періоди зміни блиску досліджуваних зір, отримано оцінки амплітуд та показників кольору. Для однієї з зір період отримано вперше, для іншої – уточнено завдяки збільшенню спостережного матеріалу.
3. З використанням паралаксів з каталогу Gaia DR3 зроблено оцінки абсолютних зоряних величин та світностей досліджуваних зір.
4. На вибірці з семи зір типу W UMa, значення періодів яких отримано в НДІ астрономії, підтверджена залежність період-світність для зір цього типу. Значення коефіцієнтів добре співпадають з наявними в літературних джерелах.

Дані цієї роботи дають змогу в майбутніх роботах розвинути дослідження наявних змінних зір, та з їх використанням за сучасними методами оцінити фотометричні маси об'єктів, побудувати моделі подвійних систем, оцінити радіуси та температури.

Перелік використаної літератури

1. Александров Ю.В., Шевченко В.Г. Астрофізика. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2016. – 208 с.
2. Гоффмейстер К, Ріхтер Г, Венцель В. Змінні зорі. – Наука, 1990. – 360 с.
3. Цесевич В.П. Що та як спостерігати на небі – Наука, 1973. – 384 с.
4. Цесевич В.П. Змінні зорі та їх спостереження - Наука, 1980. – 174 с.
5. Шевченко В. Г. Комп'ютерні технології // Методичні вказівки. – Харків: ХНУ ім. Каразіна. – 2011. – 44 с.
6. Bessel S.M. Standard photometric systems. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2005. V. 43. P. 293–336.
7. Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J. E. et al. The Sloan digital sky survey photometric system. *Astron. J.* –1996. –111. –P. 1748-1756.
8. Martin V. Zombeck *Handbook of Space Astronomy and Astrophysics* - Cambridge University Press, 2012. – 528 p.
9. John R. Percy. *Understanding Variable Stars.* - Cambridge University Press, 2007. – 350 p.
10. 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.
11. Tonry J. L, Stubbs C. W., Lykke K. R. et al. The Pan-STARRS1 photometric system. // *Astrophys. J.* –2012. –750. –99 (14pp).
12. Chen X., Wang S., Deng L. et al The period-luminosity relation of contact binaries based on Gaia DR2 data. // *Astrophys. J.* – 2018. -Vol. 859, No. 2. -P. 140
13. Li C., Qian S.-B., He J.-J. et al. The period-luminosity relations of eclipsing binaries in the Magellanic Clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2025. -Vol. 269, No. 1. – P. 1.

14. Copperwheat C. M., Marsh T. R., Dhillon V. S. et al. SDSS J010657.39-100003.3: The shortest-period detached binary white dwarf system // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2011. -Vol. 410, No. 1. – P. 1113-1122.
15. Roelofs G. H. A., Rau A., Marsh T. R., Dhillon V. S. et al. SDSS J0926 + 3624: The shortest-period eclipsing binary star // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 711, No. 2. – P. L138-L142.
16. Eyer L., Rimoldini L., Auard M. et al. Gaia Data Release 3: The Gaia Catalogue of Variable Stars. *Astronomy & Astrophysics*. -2023. -674, A34. – 32 p.
17. Xiaodian C., Hu Z., Wang S. et al. The Zwicky Transient Facility Catalog of Periodic Variable Stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2020. – 249, 18. – 28 p.
18. Shevchenko V. G., Drobyazko N. V., Slyusarev I. G., Zubareva A. M., Kravchenko E. A., Lagyra A. V., Tereschenko I. A. CCD-photometry of variable stars at the Astronomical Institute of Karazin Kharkiv National University. // *Peremennie Zvezdy. Prilozhenie*. 2013. Vol. 13. No. 7.
19. Shevchenko V. G., Mikhalchenko O. I., Slyusarev I. G., Khramtsov V. P., Chigladze R. A. New observations of variable stars at the Astronomical Institute of Karazin Kharkiv National University // *Astron. Astrophys. (Caucasus)*. 2018. [S.l.], V. 3, n. 1, p. 61-66. Jan. 2018. ISSN 2449-2914.
20. Shevchenko V. G., Danylko D. O., Slyusarev I. G., Chigladze R. A. Some results of CCD-photometry of variable stars at the Astronomical Institute of Karazin Kharkiv National University. // *Astron. Astrophys. (Caucasus)*. 2025. V. 9. P. 1-7. Jan. 2025. ISSN 2449-2914. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.10754>
21. Zheleznyak A. P., Shevchenko V. G., Slyusarev I. G., Zubareva A. M., Checha V. A., Lapko A. V. VRc photometry of new variable stars detected on the fields from the photoplate collections of the SAI MSU. // *Peremennie Zvezdy. Prilozhenie*. 2015. Vol. 15. No. 6.
22. Ruchinski S. M. A period-color relation for contact binaries. // *Acta Astron.* – 1974. – Vol. 24. – P. 119-125.

23. Green G. M., Schlafly E. F., Zucker C., Speagle J. S., Finkbeiner D. P. A 3D Dust Map Based in Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS. // *Astrophys. J.* – 2019. -Vol. 887, No. 1. – P. 93.