

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет математики фізики та інформаційних технологій

Кафедра фізики та астрономії

Кваліфікаційна робота
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**«Система телескопів Unistellar: використання у спостереженнях
транзитів екзопланет.»**

**«Unistellar telescope system: using for the transits of exoplanets
observations.»**

Виконала: здобувачка денної форми навчання
спеціальності 104 – «Фізика та астрономія»
Освітня програма – Фізика та астрономія
Печко Анастасія Костянтинівна

Керівник _ д.ф.-м.н., проф. Панько О.О. _____

Рецензент д.ф.-м.н., проф. Андронов І.Л.

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри

№ ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Завідувачка кафедри
_____ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Захищено на засіданні ЕК № ____
протокол № __ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК
_____ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Одеса 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Екзопланети та методи їх виявлення.....	5
1.1. Екзопланети: класифікація, особливості, наукове значення.....	5
1.2. Основні методи виявлення екзопланет.....	8
1.3. Фізична суть транзитного методу.....	12
1.4. Параметри транзитів: глибина, тривалість, крива блиску.....	14
2. Системи OGLE і Unistellar у транзитній астрономії.....	19
2.1. Огляд OGLE: мета проєкту, технічні характеристики.....	19
2.2. Телескопи Unistellar: конструкція, принцип роботи, технології.....	20
2.3. Порівняння апаратного забезпечення.....	22
2.4. Методики обробки фотометричних даних: OGLE, Unistellar.....	26
3. Порівняльний аналіз кривих блиску та взаємодія з науковою спільнотою.....	34
3.1. Вибір екзопланет для аналізу.....	34
3.2. Порівняння кривих блиску з баз OGLE та Unistellar.....	35
3.3. Інтерпретація отриманих даних.....	38
3.4. Роль непрофесійних телескопів у наукових ініціативах.....	40
Результати роботи та висновки.....	42
Список використаних джерел.....	44
Додаток А. Схематичне зображення проходження екзопланети по диску..	49
Додаток Б. Формула глибини транзиту та інтерпретація величин.....	50
Додаток В. Приклад типової кривої блиску з транзитами екзопланети.....	51
Додаток Г. Порівняльна таблиця технічних характеристик.....	52
Додаток Д. Реальні спостереження зоряного скупчення Owl Cluster.....	53
Додаток Е. Карта регіонів видимості транзиту екзопланети.....	54
Додаток Ж. Пошукова карта наведення телескопа на зорю TOI 1516b.....	55
Додаток З. Крива блиску екзопланети OGLE-TR-113b.....	56
Додаток И. Крива блиску екзопланети WASP-43b 52.....	57

ВСТУП

Пошук та дослідження екзопланет є однією з найдинамічніших галузей сучасної астрономії. Із розвитком методів високоточної фотометрії стало можливим виявляти планети поза межами Сонячної системи за допомогою транзитного методу – спостереження зниження яскравості зорі під час проходження планети по її диску. Традиційно такі дослідження проводилися на базі великих телескопічних комплексів, зокрема проєкту OGLE, однак останнім часом значного поширення набули малі автоматизовані телескопи типу Unistellar, що відкрили доступ до спостережень навіть для аматорів.

На тлі збільшення обсягів відкритих даних виникає потреба у науковому аналізі ефективності таких систем у порівнянні з класичними інструментами, а також у визначенні їх ролі у сучасній транзитній астрономії. Саме це й зумовлює актуальність обраної теми.

Метою цієї роботи є порівняння ефективності системи телескопів Unistellar та професійної системи OGLE у спостереженнях транзитів екзопланет на основі відкритих кривих блиску, а також дослідження значення комунікації в межах глобальної мережі Unistellar для забезпечення наукової достовірності результатів.

Об'єктом дослідження є транзитні спостереження екзопланет.

Предметом дослідження є фотометричні характеристики кривих блиску, отриманих за допомогою телескопів Unistellar та OGLE, а також механізми взаємодії користувачів Unistellar з науковою спільнотою.

Завдання дослідження

- Проаналізувати фізичні принципи транзитного методу виявлення екзопланет.
- Розглянути технічні характеристики телескопічних систем OGLE та Unistellar.
- Порівняти криві блиску екзопланет за даними обох систем.

- Оцінити точність, стабільність і наукову придатність результатів Unistellar.
- Дослідити роль комунікації в мережі Unistellar у контексті колективної верифікації даних.

У роботі використано методи теоретичного аналізу, порівняльного фотометричного аналізу кривих блиску з відкритих джерел (OGLE, Unistellar Network), графічної обробки даних та структурно-функціонального порівняння телескопічних систем.

Результати роботи можуть бути використані для подальших досліджень транзитів із залученням малих телескопів, а також для планування участі у міжнародних спостереженнях через мережу Unistellar. Окрім того, узагальнення досвіду таких систем сприяє популяризації громадянської науки та інтеграції аматорів у сучасну астрономію.

Уперше здійснено зіставлення якості спостережень транзитів екзопланет, отриманих за допомогою телескопів OGLE та Unistellar, на основі реальних кривих блиску, а також проаналізовано роль мережевої наукової співпраці в децентралізованих спостереженнях, що дає підстави оцінити ефективність непрофесійних систем у підтримці фундаментальної астрономії.

1. ЕКЗОПЛАНЕТИ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

1.1. Екзопланети: класифікація, особливості, наукове значення

Екзопланети — це планети, що знаходяться поза межами Сонячної системи й обертаються навколо інших зір. Їх відкриття стало можливим завдяки розвитку високоточних методів спостережень, таких як транзитна фотометрія, метод променевих швидкостей та гравітаційне мікролінзування [1].

Процеси формування екзопланет тісно пов'язані з утворенням зоряних систем. Більшість таких планет виникають у межах протопланетних дисків, що оточують молоді зорі. У міру еволюції ці системи можуть формувати складні планетні архітектури, подібні до Сонячної. Значна частина екзопланет, зокрема системи наприклад TRAPPIST-1, демонструють потенційну придатність до життя, що стимулює дослідження умов їхньої населеності та можливості майбутньої колонізації [2].

Завдяки використанню сучасних методів спостереження у 1995 році було відкрито першу достовірну екзопланету – 51 Пегаса b [3]. Це відкриття підтвердило теоретичні уявлення про те, що планетні системи — звичне явище в космосі. Станом на сьогодні відомо понад 5000 підтверджених екзопланет.

Залежно від маси, орбіти, температури та складу атмосфери екзопланети поділяють на кілька основних типів:

- Гарячі Юпітери — масивні газові гіганти з коротким періодом обертання. Гарячі Юпітери – це масивні газоподібні екзопланети, які за масою зазвичай дорівнюють або перевищують масу Юпітера (понад 1 MJ), але перебувають на дуже близькій відстані від своєї зорі, часто менш ніж 0,1 астрономічної одиниці (а.о.), що приблизно у 10 разів ближче, ніж Меркурій до Сонця [3].

Через таку близькість вони мають дуже короткі періоди обертання від кількох годин до кількох діб, і відповідно надзвичайно високі температури

атмосфери (понад 1000-2500 K). Власне тому вони й отримали назву “гарячі”, на відміну від свого “холодного” аналога Юпітера [3; 4].

З фізичної точки зору ці планети:

1. мають товсту атмосферу з водню та гелію;
2. характеризуються значною пухкістю (радіус часто більший за масу) через нагрівання та розширення атмосфери;
3. часто виявляються за допомогою транзитного методу через глибокі й чіткі зниження блиску зорі під час проходження планети перед нею.

• Суперземлі — кам’янисті планети масою більші за Землю. Суперземлі клас екзопланет, що мають масу більшу за масу Землі, але меншу за масу Урана або Нептуна (тобто приблизно в діапазоні 2-10 мас Землі) [3]. Ці планети зазвичай мають кам’яну або залізо-силікатну будову, подібну до Землі, що відрізняє їх від газових гігантів чи крижаних планет. Хоча їх радіус часто перевищує земний (до 1,5-2,5 радіуса Землі), багато суперземель зберігають високу щільність, що свідчить про кам’янисту структуру без значної газової оболонки. Це робить їх дуже перспективними кандидатами на дослідження умов, подібних до земних [3].

Особливості суперземель:

1. Поверхня: теоретично може бути тверда, із вулканічною активністю або океанами, залежно від температури та атмосфери.
2. Атмосфера: деякі мають щільну атмосферу, багату на вуглекислий газ, азот або навіть водяну пару; в інших - атмосфера може бути відсутня через близькість до зорі.
3. Температурні умови: залежать від орбітального розташування - від придатних до життя до умов, схожих на Венеру.

Багато відкритих суперземель обертаються навколо червоних карликів зір малого спектрального класу, що дозволяє їм перебувати в зоні життєпридатності навіть на невеликій відстані [4]. Суперземлі є найперспективнішим класом для пошуку позаземного життя завдяки своїй стабільній орбіті, потенційно придатним для життя температурним

режимам і геологічній активності, яка може підтримувати атмосферу та хімічні цикли [4].

- Мінінептуни — планети з вираженою газовою оболонкою, менші за типові гіганти. Мінінептуни екзопланети, що за розмірами перевищують Землю, але є меншими за газові гіганти типу Нептуна чи Урана, зазвичай мають радіус від 2 до 4 радіусів Землі та масу від 5 до 20 земних мас [3]. Їх основною ознакою є виражена газова оболонка, що оточує кам'яне або крижане ядро, подібно до планет-гігантів, проте в компактнішому масштабі.

Ці планети зазвичай:

1. мають низьку середню щільність, що свідчить про наявність товстої атмосфери з водню, гелію, можливо з додаванням водяної пари або метану;
2. не мають твердої поверхні, подібною до Землі;
3. володіють розмитою межею між атмосферою і ядром, що ускладнює визначення їхньої структури [3].

Мінінептуни часто обертаються порівняно близько до своєї зорі, але не настільки близько, як гарячі Юпітери, тому їх атмосферні умови можуть бути менш екстремальними. Деякі з них перебувають у зоні життєпридатності, однак наявність товстої атмосфери може створювати сильний парниковий ефект і високий тиск, що ускладнює можливість життя в земному розумінні [4].

- Землеподібні планети — потенційно придатні для життя [3]. Землеподібні планети — це екзопланети, що мають подібну до Землі масу, розміри, щільність і, потенційно, геологічну будову, тобто складаються переважно з силікатних порід та мають залізне ядро [3]. Їхні маси зазвичай не перевищують 1,5-2 маси Землі, а радіуси — до 1,5 радіуса Землі, що дозволяє віднести їх до кам'янистих планет. Ключовим критерієм для виділення землеподібних планет як особливої категорії є потенційна придатність до життя, що означає:

1. наявність твердої поверхні, яка може підтримувати воду в рідкому стані;
2. температурний режим, що допускає стабільну кліматичну рівновагу;
3. можливість утримання атмосфери, яка не розвіюється під дією зоряного випромінювання [3].

Землеподібні екзопланети вважаються найперспективнішими об'єктами для пошуку біосигнатур. Особливо цінними є ті, що перебувають у зоні життєпридатності – тобто на відстані від зорі, де температура поверхні може підтримувати рідку воду. У деяких випадках, якщо атмосфера планети щільна, зона життєпридатності може бути дещо ширшою за класичну

Особливо важливими є планети, що розташовані у зоні життєпридатності - області навколо зорі, де температура дозволяє існування рідкої води. Саме такі планети є об'єктами дослідження з боку астробіології. З розвитком транзитної фотометрії та спектроскопії стало можливим не лише фіксувати наявність екзопланет, а й вивчати їхні атмосфери, зокрема наявність води, метану, кисню — потенційних біомаркерів [4]. Для інтерпретації таких даних важливими є базові знання про класифікацію зір, побудову діаграми Герцшпрунга - Рассела, визначення абсолютних зоряних величин та відстаней [2].

Екзопланети відіграють ключову роль у сучасній астрофізиці. Їх вивчення інтегрує знання з класичної астрономії, фізики зір, спектрального аналізу та космології, дозволяючи відповісти на одне з найважливіших питань науки: Чи ми одні у Всесвіті? [3; 4].

1.2. Основні методи виявлення екзопланет

На сьогодні виявлено понад 5000 підтверджених екзопланет, і цей список щороку поповнюється. Існує значна кількість методів виявлення планет за межами Сонячної системи, які поділяються на прямі та непрямі.

Більшість відкриттів здійснено саме непрямыми способами, які дозволяють реєструвати ефекти, що планета справляє на свою зорю.

- Прямі методи

Пряме зображення екзопланет передбачає фіксацію світла, що походить безпосередньо від планети як власного теплового, так і відбитого зоряного випромінювання. Основна проблема — надзвичайна різниця в яскравості між зорею та планетою, яка в оптичному діапазоні може перевищувати 1 мільярд разів. Щоб зменшити вплив світла зорі, застосовують спеціальні інструменти коронографи, адаптивну оптику, маскування зорі. Серед сучасних висококонтрастних систем Gemini Planet Imager, VLT-SPHERE, SCExAO, які дозволили отримати зображення кількох десятків масивних молодих планет на далеких орбітах [7]. Крім професійних інструментів, з 2020-х років виявлення екзопланет стало можливим і за участі аматорів. Наприклад, телескопи Unistellar eVscope у рамках програми SETI дозволяють проводити високоточні спостереження, зокрема для підтвердження транзитів та оцінки контрастності сигналу [5].

- Непрямі методи

1. Транзитний метод

Цей метод полягає у спостереженні періодичного зменшення яскравості зорі, яке виникає, коли планета проходить перед її диском. Транзити дозволяють визначити розмір планети, період обертання, елементи орбіти та — за умови спектроскопії — склад атмосфери. Метод є найефективнішим за кількістю відкритих планет. Як зазначає Deeg & Alonso, транзитна фотометрія потребує надзвичайної стабільності даних, особливо при роботі з малими телескопами, де сигнал-перешкода може бути критичним [6]. Саме тому велику роль відіграє об'єднання зусиль професіоналів та аматорів — прикладом чого є програма Unistellar-SETI [5].

2. Метод радіальних швидкостей (ефект Доплера)

Цей підхід базується на фіксації зміщень спектральних ліній зорі, спричинених її коливанням навколо центру мас системи. Зміни в радіальній

швидкості дають змогу оцінити масу та ексцентриситет орбіти планети. Метод є ефективним для масивних планет на близьких орбітах .

3. Астрометрія

Метод передбачає вимірювання положення зорі на небі з мікросекундною точністю. Якщо зоря має планету, її положення змінюється з часом. До 2020-х років метод вважався допоміжним, однак із запуском космічної місії Gaia він почав приносити перші результати.

4. Гравітаційне мікролінзування

Виникає тоді, коли зоря-лінза (та, що проходить перед фоновою зорею) фокусує її світло завдяки гравітації, створюючи короткочасне посилення блиску. Якщо в зорі-лінзі є планета, вона викликає характерну аномалію. Метод дозволяє виявляти планети на далеких орбітах і навіть у центрі Галактики. Проєкт OGLE є одним із найуспішніших у застосуванні мікролінзування. Його результати охоплюють сотні подій посилення яскравості, де було виявлено екзопланети за гравітаційним ефектом [8].

Крім мікролінзування, у межах програм OGLE-III та OGLE-IV здійснювались спостереження транзитів зір. На офіційному сайті представлено каталог OGLE Exoplanet Transit Candidates, який містить понад 170 зоряних систем, де зареєстровано періодичні падіння яскравості, ймовірно спричинені транзитами екзопланет [9].

Інші методи виявлення екзопланет

5. Таймінг пульсарів

Пульсари випромінюють радіоімпульси з високою регулярністю. Планета, що обертається навколо пульсара, змінює відстань до Землі, що призводить до періодичних затримок або пришвидшень сигналу. Це відоме як затримка Ремера. Саме цим методом у 1992 році було вперше виявлено екзопланети (система PSR B1257+12).

6. Таймінг змінних зір

Деякі зорі мають стабільну періодичну пульсацію (наприклад, змінні типу δ Scuti або RR Lyrae). Якщо планета обертається навколо такої зорі,

вона може спричинити незначні зсуви у частоті пульсації, що виявляються у спектрі.

7. Варіації часу транзиту (TTV)

Наявність кількох планет у системі може спричинити відхилення від точного часу наступного транзиту, оскільки гравітаційна взаємодія між ними змінює орбітальну динаміку. TTV дозволяє виявляти не транзитні планети в багатопланетних системах.

8. Варіації тривалості транзиту (TDV)

У випадку, коли планета має супутник або рухається по ексцентричній орбіті, тривалість транзиту може змінюватись від одного обертання до іншого. Метод успішно використовується для підтвердження супутників або уточнення орбіт.

9. Модуляції відбиття/випромінювання

Планети, що знаходяться близько до зорі, мають різні фази, подібно до Місяця. Світло, відбите планетою, створює зміни яскравості системи протягом орбіти. Також можуть реєструватися температурні контрасти між денним і нічним боками.

10. Релятивістське випромінювання (beaming effect)

Рух зорі до/від Землі змінює її спостережувану яскравість унаслідок ефекту Доплера. Планета, що змушує зорю коливатись, спричиняє коливання її випромінювання у фотометричних даних.

11. Еліпсоїдні варіації

Масивні планети, розташовані близько до зорі, можуть деформувати її гравітаційно, змінюючи її форму на еліпсоїдну. Це створює регулярні зміни блиску зорі з періодом обертання планети. Розгляд таких додаткових проявів, як варіації часу і тривалості транзиту, зміни яскравості через відбиття світла або гравітаційні ефекти, надає глибше уявлення про структуру екзопланетних систем.

1.3. Фізична суть транзитного методу

Виявлення екзопланет методом транзитної фотометрії ґрунтується на точному вимірюванні світлового потоку від зорі та фіксації його періодичного зменшення, спричиненого проходженням планети перед диском зорі. Схему змін блиску зорі наведено на рис.1. У момент часу t_1 край планети починає перекривати світло зорі – цей момент називається входженням (англ. Ingress), і триває до часу t_2 . Під час цього етапу світність зорі поступово зменшується, бо частина її диска затінюється планетою. У проміжку між t_2 і t_3 вся планета знаходиться перед зорею – це фаза повного транзиту. У цей час світло зорі залишається майже постійним, на мінімальному рівні. Починаючи з моменту t_3 , планета починає виходити з диска зорі – ця фаза називається виходом (англ. Egress) і завершується в t_4 . Світність зорі при цьому знову зростає до початкового рівня. Час входу та виходу приблизно однаковий і зазвичай позначається символом τ .

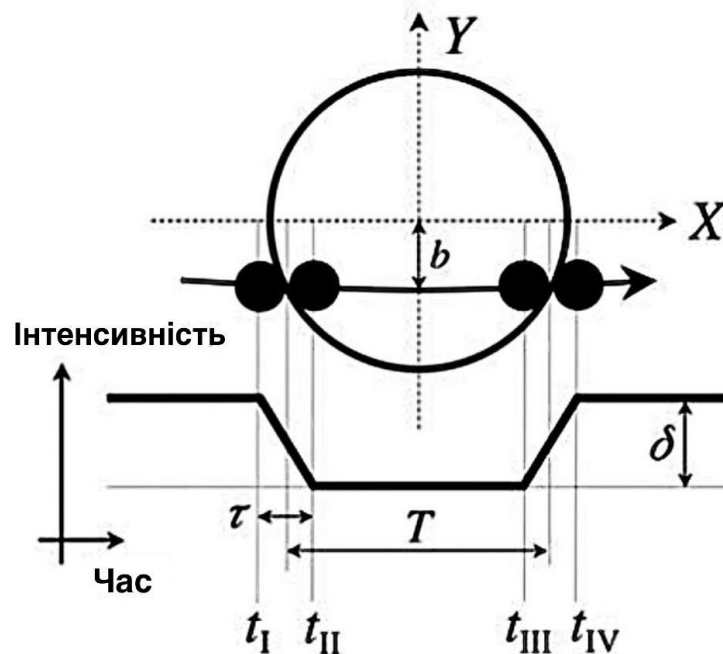


Рис. 1. Проходження планети по диску зорі. Схема взята зі статті: J. N. Winn, 2014. *Transits and Occultations*.

Тривалість самого транзиту можна рахувати по різному, але в цьому випадку зручно брати інтервал від t_1 до t_4 . Параметр b називається прицільним параметром і показує, наскільки шлях планети під час проходження зміщений від центру зорі.

Візуально крива блиску має чітку симетричну форму: плавне зниження, плато (максимум перекриття), та повернення до початкової яскравості. Форма цієї кривої залежить від співвідношення радіусів зорі та планети, а також від швидкості їхнього відносного руху.

Глибину транзиту можна оцінити за співвідношенням:

(2)

$$\Delta F = \frac{P_0 - P_{\text{транзиту}}}{P_0} = \frac{A_p}{A_*} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

де ΔF – глибина транзиту, тобто відносне зменшення яскравості зорі;

P_0 – яскравість зорі до транзиту;

$P_{\text{транзиту}}$ – яскравість зорі під час транзиту;

$A_p = \pi R_p^2$ – видимі площі дисків планети;

$A_* = \pi R_*^2$ – видимі площі дисків зорі;

R_p – радіус планети;

R_* – радіус зорі.

У реальних умовах спостережень значний вплив на точність реєстрації транзиту має зовнішнє світлове забруднення, особливо в умовах наземної фотометрії. Як зазначається у матеріалі Universe, навіть сучасні телескопи втрачають чутливість, якщо фонове підсвічування (наприклад, від міського освітлення) заважає фіксації мікрозмін яскравості зорі. Технології тотального усунення світлового забруднення, зокрема програмні фільтри та активне екранування, суттєво покращують якість спостережень - особливо для аматорських телескопів із малою апертурою [11].

Для фіксації та аналізу транзитів використовується цифрова фотометрія, що передбачає вимірювання яскравості зорі в одиницях потокової щільності. Важливими величинами для аналізу є: інтенсивність, фоновий рівень, співвідношення сигнал/шум, а також стабільність порівняльних зір на полі зору. Дані отримуються за допомогою ПЗЗ-матриць або CMOS-сенсорів, обробляються у спеціалізованих пакетах (IRIS, AstroImageJ) та калібруються з урахуванням темного шуму та плоских полів [12]. Фізична суть транзитного методу — це реєстрація періодичного часткового перекриття джерела світла непрозорим об'єктом, що моделюється за принципами геометричної оптики, вимагає фотометричної точності та сучасних засобів цифрової обробки даних.

1.4. Параметри транзитів: глибина, тривалість, крива блиску

Фотометричний аналіз транзитів екзопланет надає змогу не лише виявити сам факт існування планети, а й отримати важливу інформацію про її фізичні характеристики, зокрема: радіус планети, період її обертання навколо зорі, відстань до зорі, орбітальний нахил та навіть наявність супутників чи додаткових тіл у системі. Найважливішими параметрами, що визначаються під час аналізу кривої блиску, є: глибина транзиту, тривалість транзиту, момент середини транзиту та форма профілю кривої.

Кожен із цих параметрів відіграє критичну роль у точному визначенні властивостей планетної системи. Наприклад, глибина транзиту дозволяє оцінити радіус планети, а час між двома транзитами — період її орбіти. Аналіз симетрії кривої блиску може вказувати на наявність супутників або атмосферних ефектів.

У роботі Zeilnhofner & Dawson [13] підкреслено, що навіть за умови обмеженої точності наземних телескопів, детальний аналіз кривої блиску дає змогу визначити транзитні параметри з високою точністю, зокрема для систем WASP-3b, WASP-33b та HAT-P-32b. Автори продемонстрували, що

ключові параметри можна витягти навіть із кривих зі значним шумом, за умови застосування методів нормалізації, згладжування та відповідного математичного фітінгу кривої .

Таким чином, транзитний метод у поєднанні з ретельною фотометрією забезпечує точне визначення базових властивостей екзопланет і є одним з основних інструментів сучасної спостережної астрономії.

- Глибина транзиту

Глибина транзиту описує, наскільки знижується світність зорі під час проходження планети перед її диском. Вона прямо залежить від співвідношення площ планети та зорі. У роботі Yang H. [15] пояснюється, що чим більша планета, тим більша глибина транзиту, тобто провал на кривій блиску буде помітнішим .

Однак, як зазначено в цьому ж джерелі, одна лише глибина не дає повної інформації про розмір планети, адже вона залежить не лише від розміру самої планети, а й від розміру зорі. Тому для точного розрахунку радіуса планети необхідно знати радіус зорі, отриманий із незалежних джерел або з інших методів спостережень (наприклад, спектроскопічного аналізу або паралактичного методу).

У роботі Zeilhofer & Dawson [13] на практичних прикладах WASP-33b і HAT-P-32b показано, як на основі глибини транзиту оцінювався радіус планети відносно зорі. Автори також підкреслюють важливість якісної обробки кривих блиску, зокрема: нормалізації, видалення трендів, корекції на атмосферні ефекти та вибору зорі-порівняння. У випадках із WASP-3b та WASP-33b аналіз їх даних показав, що глибина транзиту може коливатися в межах від 0,7% до 1,4%, залежно від розміру планети та типу зорі, що відповідає планетам-гігантам типу гарячих юпітерів .

Також глибина транзиту може зазнавати впливу додаткових факторів: зоряної активності (плями, спалахи), відбитого світла від планети або наявності супутників. Наприклад, затемнення, що проходять через плями на зорі, можуть створити ілюзію збільшеної або зміненої глибини. Це потребує

проведення кількох спостережень одного й того ж об'єкта, щоб виявити потенційні аномалії та зменшити статистичну похибку. Глибина транзиту є одним із найінформативніших параметрів, але її коректне тлумачення можливе лише за умови наявності допоміжних астрометричних і спектроскопічних даних.

- Тривалість транзиту

Тривалість транзиту є часом, протягом якого екзопланета частково перекриває видиму поверхню зорі, спричиняючи зниження її яскравості. Цей параметр залежить від низки фізичних характеристик системи: швидкості руху планети по орбіті, радіусів планети та зорі, кута нахилу орбіти до площини спостереження, а також від ексцентриситету. Тривалість транзиту є важливим показником, який дозволяє зробити висновки щодо розташування планети на орбіті, а також величини великої півосі та середньої густини зорі.

У дослідженні Naponiello et al. проведено фотометричне спостереження кількох відомих екзопланет, зокрема WASP-77Ab та HAT-P-32b, за допомогою телескопа обсерваторії OPC (Osservatorio Polifunzionale del Chianti-багатофункціональна обсерваторія в Італії, що розташована в регіоні К'янти). Аналіз кривих блиску проводився із застосуванням методу диференціальної фотометрії та статистичного моделювання Markov Chain Monte Carlo (MCMC), що дозволило точно визначити часові параметри транзитів. Зафіксовані тривалості подій для цих планет становили приблизно 2–3 години, з узгодженням до літературних даних і похибкою менше 2% [14].

- Момент середини транзиту (епоха)

Момент транзиту (або час середини транзиту) визначає точку мінімального блиску на кривій. Цей параметр особливо важливий для визначення періоду обертання планети: якщо транзити фіксуються декілька разів, інтервал між ними дає період. У роботі Naponiello et al. [14] подано таблицю з точними значеннями моментів транзитів, наприклад для WASP-

77Ab: 2458462.4624 ± 0.0003 (у системі BJD_TDB), яка узгоджується з попередніми оцінками в літературі . Це дозволяє уточнювати епімериди - таблиці передбачень майбутніх транзитів, що є критично важливим для космічних місій на кшталт ARIEL.

- Форма кривої блиску

Крива блиску екзопланети - це графік зміни яскравості зорі протягом транзиту, який дозволяє визначити часові межі події, а також інтерпретувати просторові та фізичні характеристики планетної системи. Візуально транзит складається з кількох фаз: вхід планети на диск зорі (ingress), центральна частина транзиту (плато) та вихід з диска (egress). Кожна з цих фаз відповідає характерним змінам у рівні фотометричного потоку.

У дослідженні Yang H. [15] аналізується серія кривих блиску, отриманих за допомогою телескопа Kepler (рис.3). Автор підкреслює, що спостережувані падіння яскравості зорі залежать від розміру планети, її орбіти та стабільності інструменту.

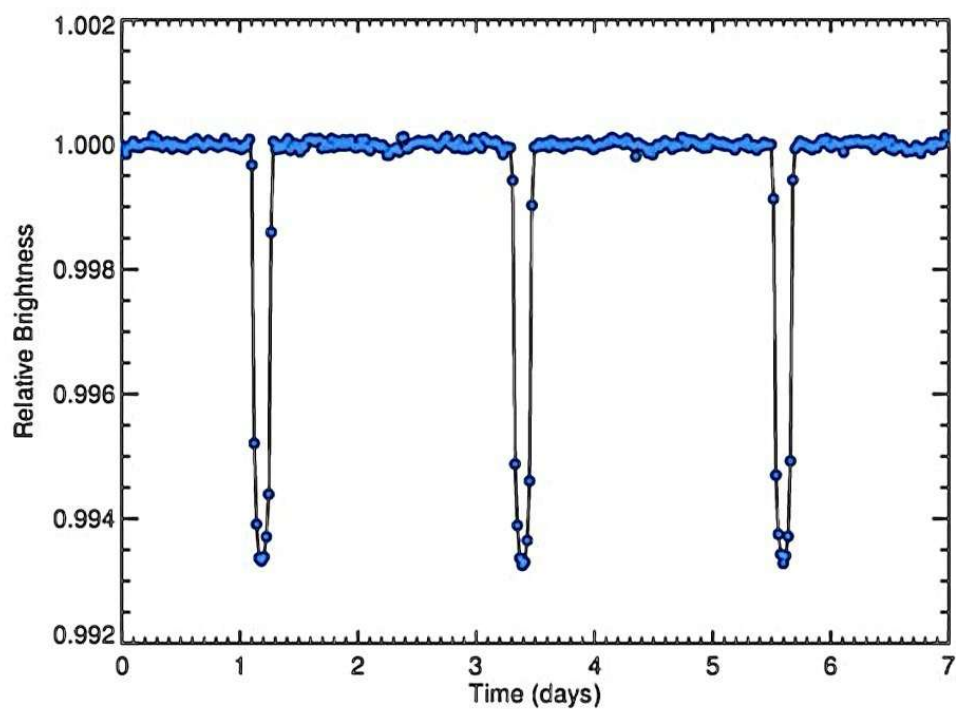


Рис. 3. Крива блиску зорі, отримана космічним телескопом Kepler: добре помітні три транзити екзопланети з характерним провалом яскравості. По осі абсцис - час (у днях), по осі ординат - відносна яскравість зорі [15].

У роботі демонструється, що для планети НАТ-R-7b типовий профіль транзиту має гладке плато з рівномірною яскравістю, що вказує на стабільність зоре-планетної геометрії під час транзиту [15].

Форма кривої блиску є критично важливою для побудови моделей орбіти та визначення нахилу, ексцентриситету, імпакт-параметра, а також для виявлення потенційних аномалій — таких як супутники, атмосферні хмари або зоряні плями.

Детальний аналіз форми кривої дозволяє не лише охарактеризувати окрему екзопланету, але й виявити складні архітектурні особливості всієї планетної системи, зокрема наявність резонансів, багатопланетності або нестабільних орбіт. Таким чином, форма кривої блиску є не просто індикатором затемнення, а інструментом високоточної діагностики динаміки системи.

2. СИСТЕМИ OGLE I UNISTELLAR У ТРАНЗИТНІЙ АСТРОНОМІЇ

2.1. Огляд OGLE: мета проєкту, технічні характеристики

Проект OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) — це один із наймасштабніших та найтриваліших астрономічних проєктів сучасності, що був започаткований у 1992 році групою польських астрономів з Варшавського університету. Головною метою проєкту на початкових етапах було виявлення та дослідження подій гравітаційного мікролінзування в напрямку Галактичного балджу, Магелланових Хмар і диску Чумацького Шляху [16; 17].

Протягом свого розвитку OGLE пройшов через чотири фази, кожна з яких відзначалася значним технічним оновленням та розширенням наукових цілей:

- OGLE-I (1992-1995) - перша тестова фаза проєкту, що реалізовувалась за допомогою 1-метрового телескопа Swore в обсерваторії Лас-Кампанас. Основним досягненням стало підтвердження працездатності методу мікролінзування та створення системи OGLE-EWS (Early Warning System) для автоматичного сповіщення про події [17].
- OGLE-II (1997-2000) - фаза розширення. Замість тестового обладнання було встановлено спеціально побудований 1.3-метровий Варшавський телескоп з ПЗЗ-камерою на 2048×2048 пікселів, що забезпечувала поле зору 14.2×14.2 кутових хвилин. Було зосереджено увагу на систематичному моніторингу мільйонів зір для пошуку змінних об'єктів та транзитів екзопланет. Саме в цій фазі були отримані перші високоточні криві блиску кандидатів на транзитні екзопланети, зокрема об'єкта OGLE-TR-56b [16].
- OGLE-III (2001–2009) - модернізована система з мозаїчною камерою на вісім сенсорів 2048×4096 пікселів. Завдяки цьому було розширено поле зору та значно підвищено обсяг і якість даних. У цій фазі OGLE став провідною платформою для відкриття екзопланет за транзитним методом та дослідження змінних зір у різних регіонах неба [17].

- OGLE-IV (2010-дотепер) - сучасна фаза з 32-чіповою камерою, що забезпечує поле зору понад 1.5 квадратного градуса та дозволяє щоденно моніторити понад мільярд зір. Серед основних завдань: виявлення транзитів, наднових, змінних зір, а також уточнення структури Галактики. Проєкт OGLE-IV характеризується відкритим доступом до великих масивів фотометричних даних і продовжує активно використовуватися в дослідженнях екзопланет. OGLE став не лише основою для спостереження мікролінзування, але й ключовим інструментом у розвитку транзитної астрономії, заклавши основу для відкриттів у галузі екзопланет з наземних телескопів.

2.2. Телескопи Unistellar: конструкція, принцип роботи, технології

Телескопи проєкту Unistellar — це новітній клас розумних астрономічних приладів, які поєднують класичну оптичну схему Ньютона з інноваційними технологіями обробки сигналів. Основна мета таких систем демократизація доступу до наукових астрономічних досліджень, зокрема спостереження транзитів екзопланет навіть у світлозабруднених умовах.

- Конструктивні особливості та технічні характеристики

Телескопи лінійки eVscope (зокрема eVscope 2, eQuinox, eQuinox 2) мають майже ідентичну конструкцію:

- оптична схема Ньютона,
- апертура 114 мм (4.5 дюйма),
- фокусна відстань 450 мм,
- фокусне співвідношення $f/3.9$,
- монтаж - азимутальна [19].

Усі телескопи оснащені CMOS-сенсорами високої чутливості, які відрізняються роздільною здатністю:

- eVscope 2 - 7.7 Мпікс (1 Мільйон пікселів) із полем зору $0.75^\circ \times 0.56^\circ$ (кутових градусів) [19],
- eQuinox 2 - 6.2 Мпікс, але з більшим кутовим полем огляду [19],

- eQuinox - 4.9 Мпікс із трохи меншим кутовим полем [19].

Кожен телескоп працює автономно до 9 годин (літій-іонний акумулятор на 15 000 mAh) та має вбудовану пам'ять 64 ГБ [19].

Також уся лінійка Unistellar обладнана інтерфейсом Wi-Fi (2.4 GHz радіус дії до 45 м), USB-C живленням та спеціальним рюкзаком для транспортування. Усе це робить систему надзвичайно портативною [18].

Ці телескопи не потребують ручного наведення чи складної юстування. Завдяки системі Autonomous Field Detection (AFD) пристрій самостійно розпізнає зоряне поле, порівнюючи його з вбудованою базою даних з мільйонами зір [19]. Це дозволяє:

- швидко орієнтувати телескоп у просторі,
- точно наводитися на об'єкти,
- ефективно відстежувати транзити.

Основна технологія обробки зображення — це Enhanced Vision. Цей режим дозволяє здійснювати спостереження слабких об'єктів за рахунок:

- акумуляції світла (stacking коротких експозицій),
- цифрового покращення контрасту,
- компенсації атмосферних коливань та обертання Землі [19].

У середньому, телескоп накопичує нові кадри кожні 4 секунди та формує зображення в реальному часі. Це дозволяє бачити галактики, туманності, комети та транзитуючі екзопланети навіть при сильному міському освітленні.

Unistellar застосовує унікальну Smart Light Pollution Reduction, яка за допомогою алгоритмів відсікає шумові компоненти зображення та підвищує контрастність у міських умовах. Це дозволяє проводити спостереження на балконі, у парку чи в навчальній лабораторії - без потреби виїжджати на темне небо.

Користувачі телескопів можуть надсилати свої дані на сервери Unistellar, де вони аналізуються фахівцями з SETI. Участь в наукових кампаніях є безкоштовною і доступною навіть для школярів. На офіційному

сайті SETI розміщено спеціальні освітні матеріали з фотометрії, аналізу кривих блиску та практичного використання телескопів Unistellar для навчання астрономії у школах та університетах [20].

Як наголошують García-Melendo et al., головна особливість Unistellar полягає не лише в апаратному забезпеченні, а в концепції “мережевого астронома” - тобто користувача, який стає частиною глобальної системи спостережень [21]. Тобто автори чітко підкреслюють, що суть Unistellar – не лише в оптичній системі чи автоматизації, а в створенні глобальної мережі спостережень, де кожен користувач - це частина колективного наукового процесу.

У липні 2017 року Unistellar об’єдналася з SETI Institute, щоб створити глобальну мережу розумних телескопів. У рамках цієї платформи користувачі беруть участь у таких наукових кампаніях:

- спостереження транзитів екзопланет,
- виявлення небезпечних астероїдів (Planetary Defense),
- спостереження покривтів зір астероїдами (астероїдні окультації),
- фіксація супернових

2.3. Порівняння апаратного забезпечення

Успішне спостереження транзитів екзопланет значною мірою залежить від параметрів апаратного забезпечення, таких як апертура телескопа (вхідний діаметр) та характеристики матриці детектора (тип, роздільність, розмір пікселя). У цьому підрозділі проаналізовано ці компоненти в системах OGLE-2 і Unistellar eVscope 2, які репрезентують два різні підходи до збору фотометричних даних: один - класичний професійний телескоп великого класу, інший - мобільний розумний телескоп для аматорської та громадянської науки.

За приклад порівняння взято систему OGLE-2, це обумовлено тим, що OGLE-3 і OGLE-4 - надмасивні системи з іншим класом задач

- OGLE-3 - мозаїка з 8 CCD, потужний кластер, автоматична обробка.
- OGLE-4 - система з 32 сенсорів, мільярди об'єктів, Big Data.

Тобто вже не релевантні для прямого технічного порівняння з Unistellar, оскільки Unistellar не дорівнює оглядовий телескоп, а індивідуальний пристрій з вузьким полем зору OGLE-2 - це ще не масив як OGLE-III чи OGLE-IV із гігантськими мозаїками.

Тому порівняння з мобільною системою на 114 мм виглядає логічним: обидві системи спрямовані на виявлення транзитів при помірному технічному оснащенні.

- Апертура телескопа: збір світла

Проект OGLE-2 (друга фаза Optical Gravitational Lensing Experiment), реалізований у 1997-2000 роках, використовував спеціально побудований 1.3-метровий Варшавський телескоп, розташований на території обсерваторії Лас-Кампанас у Чилі [16]. Така апертура дозволяла збирати велику кількість світла, що критично важливо для спостереження слабких змін блиску в щільно заселених зоряних полях. Завдяки цьому OGLE міг реєструвати транзити навіть у випадках, коли глибина падіння блиску становила лише кілька сотих зоряної величини.

У системах Unistellar, зокрема eVscope 2, використовується оптична система Ньютона з апертурою 114 мм, тобто фактично майже в десять разів меншою, ніж у OGLE. Очевидно, що за фізичним збором світла eVscope поступається, проте цей недолік частково компенсується за рахунок технології Enhanced Vision, яка дозволяє цифрово підсилювати зображення та накопичувати фотони з багатьох коротких експозицій [19].

У OGLE-2 використовувалась ПЗЗ-камера (CCD) з роздільною здатністю 2048×2048 пікселів, кожен розміром 24 мікрметри [16]. Завдяки великому розміру пікселя та точному охолодженню до -70°C , ця матриця забезпечувала надзвичайно низький рівень шуму, що було ключовим фактором для точної фотометрії мікролінзування та транзитів. Поле зору

становило 14.2×14.2 кутових хвилин, що дозволяло охоплювати великі ділянки неба за одне зображення [16].

У Unistellar eVscope 2 встановлено CMOS-сенсор із роздільною здатністю 7.7 мегапікселів (точна кількість пікселів не розкривається, але йдеться приблизно про 3850×2000), а поле зору - $0.75^\circ \times 0.56^\circ$, що приблизно відповідає $45' \times 34'$ у кутових хвилинах [19]. Сенсор не охолоджується активно, але за рахунок сучасних алгоритмів цифрової обробки та зменшення шумів досягається достатній рівень точності для аматорських транзитних спостережень.

- Технології обробки зображення

OGLE-2 працював у класичному форматі: зображення накопичувались уночі, зберігались на накопичувачах, і лише потім передавались на обробку у Варшаві. Уся фотометрична обробка виконувалась офлайн - що відповідало стандартам астрономії 1990-х років [16].

Unistellar eVscope 2, натомість, реалізує онлайн-обробку зображення завдяки вбудованому комп'ютеру. Завдяки алгоритму Enhanced Vision, телескоп щосекунди накопичує кадри, автоматично їх вирівнює та складає в одне покращене зображення. Система також виконує автоматичне затемнення фону, вирівнювання яскравості, корекцію руху об'єкта та усунення шуму. [19; 21].

OGLE-2 міг реєструвати зміни блиску в діапазоні до 20-21 зоряної величини (при довгій експозиції) завдяки великій апертурі й низькому шуму ПЗЗ [16].

Unistellar eVscope 2 декларує порогову зоряну величину до 18m - але вже в режимі накопичення зображення, тобто після кількох хвилин спостереження [19]. Порівняльний аналіз показує, що OGLE-2, як професійна система з великою апертурою та охолоджуваною CCD-матрицею, демонструє вищу глибину спостережень, стабільність та чутливість у широких зоряних полях. Саме тому OGLE-2 використовувався для масштабного моніторингу мільйонів зір і виявлення перших транзитних

кандидатів у галузі професійної астрономії [16]. Натомість Unistellar eVscope 2 реалізує концепцію розумного автономного телескопа, що фокусується на гнучкості, мобільності й доступності. Незважаючи на меншу апертуру, він дозволяє якісно спостерігати транзити в аматорських умовах завдяки цифровим підсилювальним алгоритмам і вбудованій обробці сигналу [19; 21]. Особливої уваги заслуговує те, що Unistellar не лише дозволяє проводити окремі спостереження, а й входить до глобальної розподіленої наукової мережі, яка забезпечує колективну участь у спостереженнях транзитів, астероїдних окультацій та транзієнтів, у співпраці з SETI Institute [21]. Технічні відмінності телескопів, як показано в табл. 4, узагальнено у порівняльній форм

Таблиця 4

Порівняльна характеристика апаратного забезпечення телескопічних систем OGLE-2 та Unistellar eVscope 2

Параметр	OGLE-2	Unistellar eVscope 2
Апертура телескопа	1300 мм	114 мм
Оптична схема	Класична рефлекторна система	Рефлектор Ньютона
Тип детектора	CCD (ПЗЗ-матриця)	CMOS-сенсор Sony IMX347
Роздільна здатність матриці	2048 × 2048 пікселів	~7.7 мегапікселів
Розмір пікселя	24 мкм	Не вказано у документації
Поле зору	14.2' × 14.2' (кутові хвилини)	0.75° × 0.56° ≈ 45' × 34'
Температурне охолодження сенсора	Так, до -70°C	Ні
Макс. зоряна величина об'єктів	до 20–21m (при тривалих експозиціях)	до ~18m (в режимі Enhanced Vision)
Спосіб обробки зображень	Постфактум (офлайн фотометрія)	У реальному часі (Enhanced Vision)
Автоматичне розпізнавання поля	Ні	Так - Autonomous Field Detection (AFD)
Інтелектуальні алгоритми	Відсутні	Так - цифрове складання, шумозаглушення, навігація
Призначення	Масштабний огляд зір для мікролінзування і транзитів	Індивідуальні спостереження транзитів, освітні кампанії

Джерело: складено автором.

Порівняння апаратного забезпечення систем OGLE-2 і Unistellar eVscope 2 демонструє два якісно різні підходи до спостереження транзитів екзопланет. OGLE-2, як професійна система з великою апертурою та охолоджуваною CCD-матрицею, забезпечує високу фотометричну точність і здатність спостерігати слабкі зорі у щільних зоряних полях. Натомість eVscope 2, попри значно меншу апертуру, компенсує це за рахунок цифрових технологій: інтегрованих алгоритмів обробки зображень, автоному розпізнавання зоряного поля та реального накопичення світла. Система OGLE-2 є прикладом масштабного професійного підходу, тоді як Unistellar демонструє потенціал індивідуальних та розподілених систем у громадянській та освітній астрономії.

2.4.Методики обробки фотометричних даних: OGLE, Unistellar

Фотометрія є центральною методикою транзитної астрономії, яка дозволяє виявляти періодичні падіння блиску зір, спричинені проходженням екзопланет перед диском зорі. Ефективність цієї методики безпосередньо залежить від точності обробки світлових кривих, яка істотно відрізняється між класичними наземними оглядовими проектами та сучасними мережевими телескопами нового покоління.

1. Фотометрична обробка в OGLE

У проєкті OGLE-2 використовувалась диференційна CCD-фотометрія, яка передбачала поетапну обробку зображень: калібрування за допомогою dark- і flat-фреймів, визначення зоряних величин, та зведення їх до системи Johnson–Cousins [16]. OGLE використовував метод диференційної фотометрії з фіксованою апертурою, що забезпечувало точність на рівні 0.008-0.015 зоряної величини для зір до 17m [16].

Усі знімки оброблялись централізовано, за допомогою автоматизованої системи OGLE Data Pipeline, яка на той момент була одним з найпередовіших інструментів у фотометрії для наземних проєктів. Отримані криві блиску зберігались у каталозі, доступному для подальшого

аналізу, зокрема для ідентифікації транзитних кандидатів, як це сталося з OGLE-TR-56b.

2. Методики фотометричної калібровки в Unistellar

Системи Unistellar реалізують більш автоматизований і “живий” підхід до фотометрії, але при цьому потребують ретельної стандартизації, оскільки дані надходять із різних телескопів, розташованих у різних умовах. У роботі Perrocheau et al. подано детальний опис методики калібрування фотометричних даних, отриманих з Unistellar, до системи Johnson–Cousins [23]. Ця методика включає:

- автоматичне зчитування зоряної величини цільового об’єкта та порівняльних зір,
- лінійну трансформацію до стандартної фотометричної системи (зокрема, B, V, R),
- врахування атмосферного поглинання через використання відповідних коефіцієнтів,
- виключення аномальних точок (outliers) на основі статистичних критеріїв

Тобто у проєкті OGLE-2 зображення одразу знімалися у фотометричній системі Johnson–Cousins, вся обробка та результати були від самого початку переведені у фільтри B, V, I. Для цього використовували стандартні зорі з каталогу [16].

У телескопах Unistellar ця система не використовується під час спостереження, але застосовується після збору даних. Як показано в дослідженні Perrocheau et al. для цього беруть відомі зорі з каталогу APASS DR9, з якими порівнюють отримані дані, і переводять у стандартні фільтри B, V, R [23]. OGLE одразу працював у цій системі, а Unistellar переводить свої дані у неї під час обробки.

Дослідження показувало, що після повної обробки похибка вимірювання не перевищує 0.05m, що є достатнім для виявлення транзитів глибиною понад 1% - тобто системи Unistellar придатні для досліджень гарячих Юпітерів та інших великих екзопланет.

На практиці фотометричні дані, отримані за допомогою телескопів Unistellar, характеризуються варіативністю умов спостереження, різним рівнем світлового забруднення та неоднорідністю технічних налаштувань пристроїв. Це вимагає проведення ретельного калібрування, зокрема приведення до стандартизованої системи Johnson–Cousins (Perrocheau et al., 2025).

На рис. 5 представлено приклад реального спостереження, проведеного автором, — розсіяне скупчення Owl Cluster, зафіксоване в листопаді 2024 року за допомогою телескопа Unistellar з експозицією 970,64 мс (46°N , 31°E).



Рис. 5. Розсіяне скупчення Owl Cluster, спостережене автором за допомогою телескопа Unistellar (970,64 мс, 46°N , 31°E , листопад 2024 р.).

Зображення містить велику кількість зір різної яскравості, однак ці значення подані в умовних одиницях і не відповідають жодній стандартній фотометричній системі. Це чітко демонструє ключову особливість підходу Unistellar — фотометричні значення не стандартизуються під час зйомки, на відміну від OGLE, де використовуються фільтри Johnson–Cousins уже на етапі спостереження. У випадку Unistellar необхідною є подальша обробка

даних: переведення у систему B, V, R (стандартні фотометричні фільтри: B — синій, V — візуальний (зелено-жовтий), R — червоний) за допомогою еталонних зір із каталогу APASS DR9, корекція атмосферного поглинання та виключення аномальних точок.

Переведення у фотометричну систему здійснюється шляхом калібрування спостережуваних зоряних величин за еталонними зорями, розташованими в межах поля зору телескопа. Для цього порівнюють виміряну яскравість цільової зорі зі значеннями зоряних величин найближчих зір з каталогу APASS DR9 у відповідному фільтрі (B, V або R), після чого обчислюють поправки.

Калібрування може виконуватися автоматично у фірмовому програмному забезпеченні Unistellar або за допомогою сторонніх інструментів, таких як VPhot чи AstroImageJ, які підтримують роботу з каталогами еталонних зір, зокрема APASS DR9.

Важливим аспектом є також забезпечення точного таймінгу спостережень. Точна синхронізація часу має ключове значення для проведення транзитної фотометрії екзопланет, оскільки навіть незначне зміщення у часових мітках може спричинити фазовий зсув кривої блиску та помилки у визначенні моменту середини транзиту.

Похибка у визначенні часу початку транзиту, зокрема навіть у межах 15 хвилин, може призвести до того, що зафіксовані дані не охоплюватимуть ключові фази явища, що знижує їхню наукову інформативність.

Смарт-телескопи Unistellar використовують GPS-навігацію або мережеву синхронізацію (NTP) для забезпечення точності часових штампів за шкалою UTC. Під час автоматичного наведення система поєднує небесне вирівнювання (plate-solving) з супутниковими координатами, що дозволяє кожному кадру присвоювати точний час та координати спостереження. Завдяки цьому всі отримані дані синхронізуються з універсальним координованим часом (UTC), що гарантує точне порівняння кривих блиску.

Для проведення спостережень за допомогою телескопів Unistellar слід перейти на офіційний сайт <https://science.unistellar.com/exoplanets/missions/>, (<https://science.unistellar.com/exoplanets/missions/>) де необхідно обрати місце розташування телескопа. У разі відсутності сталої локації потрібно вказати код спостерігача 200 («без постійної локації»), що передбачено в загальному списку точок спостереження. Після цього користувач отримує доступ до переліку доступних транзитів, пошукової карти та інструкцій щодо виконання спостережень.

На рис. 6 представлено приклад карти, що ілюструє зони потенційної видимості транзиту екзопланети.



Рис. 6. Карта регіонів, придатних для спостереження транзиту екзопланети у заданий час. (Світло-блакитними) зірочками позначено області з оптимальними умовами для повного охоплення транзиту. (Жовті трикутники) вказують на зони часткової видимості, а (помаранчеві ромби) — на регіони, де транзит не спостерігається. Фонове забарвлення відображає умови видимості зорі залежно від місця та часу доби. Карта створена автоматично системою Unistellar на основі ефемерид транзиту та геолокації.

Після вибору транзиту на сайті Unistellar користувачеві автоматично генерується індивідуальна пошукова карта, яка дозволяє точно зорієнтувати телескоп на цільову зорю у заданий час. Така карта містить поле зору телескопа, позначення об'єкта спостереження та навколишні зорі, що полегшує візуальну ідентифікацію потрібного об'єкта на небі. Крім того, пошукова карта враховує координати спостерігача, час початку транзиту, тривалість події та напрямок руху зорі, що робить процес наведення інтуїтивно зрозумілим навіть для користувачів без спеціальної підготовки. На рис. 7 представлено приклад такої карти для транзиту екзопланети TOI 1516b, де цільова зоря позначена хрестом, а прямокутний контур відображає межі поля зору телескопа Unistellar Equinox 2e.

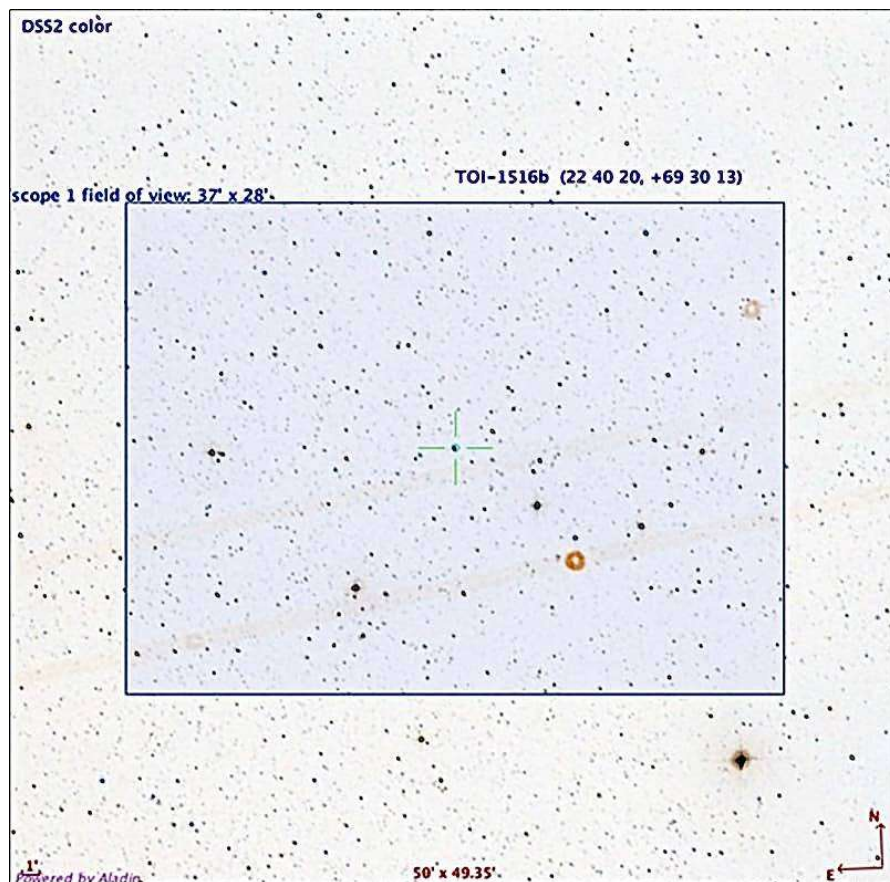


Рис. 7. Пошукова карта для спостереження транзиту TOI 1516b. Цільову зорю позначено хрестом, прямокутний контур відповідає полю зору телескопа Unistellar Equinox 2e (37' × 28'). Карта згенерована автоматичною системою Unistellar відповідно до координат об'єкта та параметрів транзиту

3. Мережеве спостереження та комбінована фотометрія

У статті Perrocheau et al., присвяченій наземному спостереженню транзиту Kepler-167e (тривалість понад 16 годин), продемонстровано, як поєднання фотометричних даних з десятків телескопів дозволяє побудувати науково придатну криву блиску [22]. Спостереження здійснювались у режимі «relay», де різні телескопи спостерігали різні фази транзиту, а далі дані зводились до спільного формату.

Автори вказують, що попередня обробка включала:

- часову нормалізацію сигналів (UTC),
- згладження трендів та шумів,
- масштабування амплітуд кривих,
- об'єднання у фазову діаграму з високим відношенням сигнал/шум [22].

4. Зіставлення з методами Kepler

Як приклад еталонної фотометрії часто наводиться місія Kepler, яка діяла в космосі й уникала атмосферних спотворень. У роботі Nazir & Kumar (2023) зазначено, що Kepler використовував SAP-фотометрію (Simple Aperture Photometry), де сигнал для кожної зорі фіксувався в межах визначеної апертури [24]. Далі застосовувався алгоритм BLS (Box-fitting Least Squares) для виявлення періодичних затемнень. Щоб усунути інструментальні спотворення, використовувався модуль PDC (Presearch Data Conditioning), який виводив тренди та нормалізував криві блиску до однакового рівня. Методика в OGLE і Unistellar базується на одній науковій основі - астрономічній диференційній фотометрії, але відрізняється реалізацією: OGLE - професійна централізована система, а Unistellar - гнучка, автоматизована і адаптована для участі громадян. Ключовим у всіх згаданих підходах є концепція високоточної диференційної фотометрії, що дозволяє мінімізувати систематичні похибки шляхом порівняння зорі-мішені з кількома стабільними зорями-порівняннями. Саме ця методика забезпечує достатню чутливість до змін яскравості в межах часток відсотка, що є критичним для виявлення дрібних транзитних сигналів. У випадку

OGLE використовувалась фіксована апертура та стандартна процедура калібрування (bias, flat, dark), тоді як в Unistellar інтегроване програмне забезпечення самостійно виконує всі етапи обробки в режимі реального часу. Попри різну технічну реалізацію, всі ці системи спрямовані на одне - виділення астрономічно значущого сигналу із шумового фону, що уможлиблює виявлення планет, супутників або навіть змінних зір.

3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КРИВИХ БЛИСКУ ТА ВЗАЄМОДІЯ З НАУКОВОЮ СПІЛЬНОТОЮ

3.1. Вибір екзопланет для аналізу

Для реалізації порівняльного аналізу фотометричних кривих блиску було обрано дві підтвержені транзитні екзопланети - OGLE-TR-113b та WASP-43b. Основними критеріями відбору об'єктів виступили: наявність високоякісних фотометричних спостережень, чітко виражена форма транзиту, наукова актуальність і можливість репрезентативного зіставлення результатів, отриманих за допомогою професійної та аматорської астрономії.

OGLE-TR-113b належить до добре вивчених екзопланет, виявлених у рамках проєкту OGLE, і є прикладом газового гіганта з коротким орбітальним періодом. Її транзити характеризуються симетричною U-подібною формою кривої блиску та значною глибиною (близько 3%), що забезпечує зручність для аналітичного опису й математичного моделювання. У дослідженні, проведеному Gillon та співавторами, для обробки спостережень цієї планети було застосовано метод деконволюційної фотометрії, який дозволив мінімізувати вплив систематичних похибок і досягти високої точності у визначенні параметрів транзиту [25].

WASP-43b - ще один представник класу газових гігантів, який активно спостерігається як у рамках професійних програм, так і за допомогою мережі телескопів Unistellar. Завдяки дуже короткому орбітальному періоду (0.81 доби), транзити цієї планети можуть бути повністю зареєстровані навіть протягом однієї ночі. У публікації, присвяченій фотометричному супроводу транзитів WASP-43b та TrES-3b, було висвітлено ефективність наземних спостережень із різних обсерваторій, зокрема з акцентом на аналіз варіацій часу транзиту (TTV), що є чутливим індикатором наявності інших масивних тіл у системі [26].

Обидві екзопланети належать до класу газових гігантів, і їхні криві блиску демонструють типовий транзитний профіль - з чіткими краями та плоским мінімумом [27]. Це дозволяє безпосередньо порівнювати форму транзиту, тривалість і симетрію падіння потоку, що є маркером стабільності орбіти та рівномірності зоряного диска.

Вибір OGLE-TR-113b та WASP-43b як об'єктів дослідження дозволяє провести репрезентативне порівняння транзитних характеристик, отриманих за допомогою професійної та аматорської фотометрії, а також продемонструвати ефективність сучасних методів аналізу екзопланетних систем.

3.2. Порівняння кривих блиску з баз OGLE та Unistellar

Порівняльний аналіз кривих блиску є одним із ключових методів верифікації транзитних сигналів, що дозволяє не лише визначити основні параметри екзопланет, а й оцінити якість та надійність даних, отриманих з різних джерел. Такий аналіз дає змогу зіставити точність фотометричних спостережень, характер шумів, особливості обробки та технічні умови, в яких були зафіксовані транзитні події. Зіставлення кривих блиску, отриманих у межах професійних астрономічних проєктів і громадянських ініціатив, дозволяє оцінити можливості кожного підходу в контексті наукової достовірності, практичного застосування та відтворюваності результатів. Буде проведено зіставлення двох кривих блиску, що репрезентують два різні типи спостережних платформ — централізовану професійну систему наземної астрономії та децентралізовану мережу аматорських телескопів. Порівняльний аналіз кривих блиску екзопланет OGLE-TR-113b та WASP-43b дозволяє оцінити відмінності у фотометричних характеристиках, що були отримані за допомогою професійного телескопічного проєкту OGLE та аматорської мережі

Unistellar. Таке зіставлення дає змогу не лише оцінити точність обох методів, а й зрозуміти вплив технічних умов на форму та якість транзиту.

На рис. 8 наведено криву блиску екзопланети OGLE-TR-113b, отриману під час двох окремих транзитів у межах проєкту OGLE.

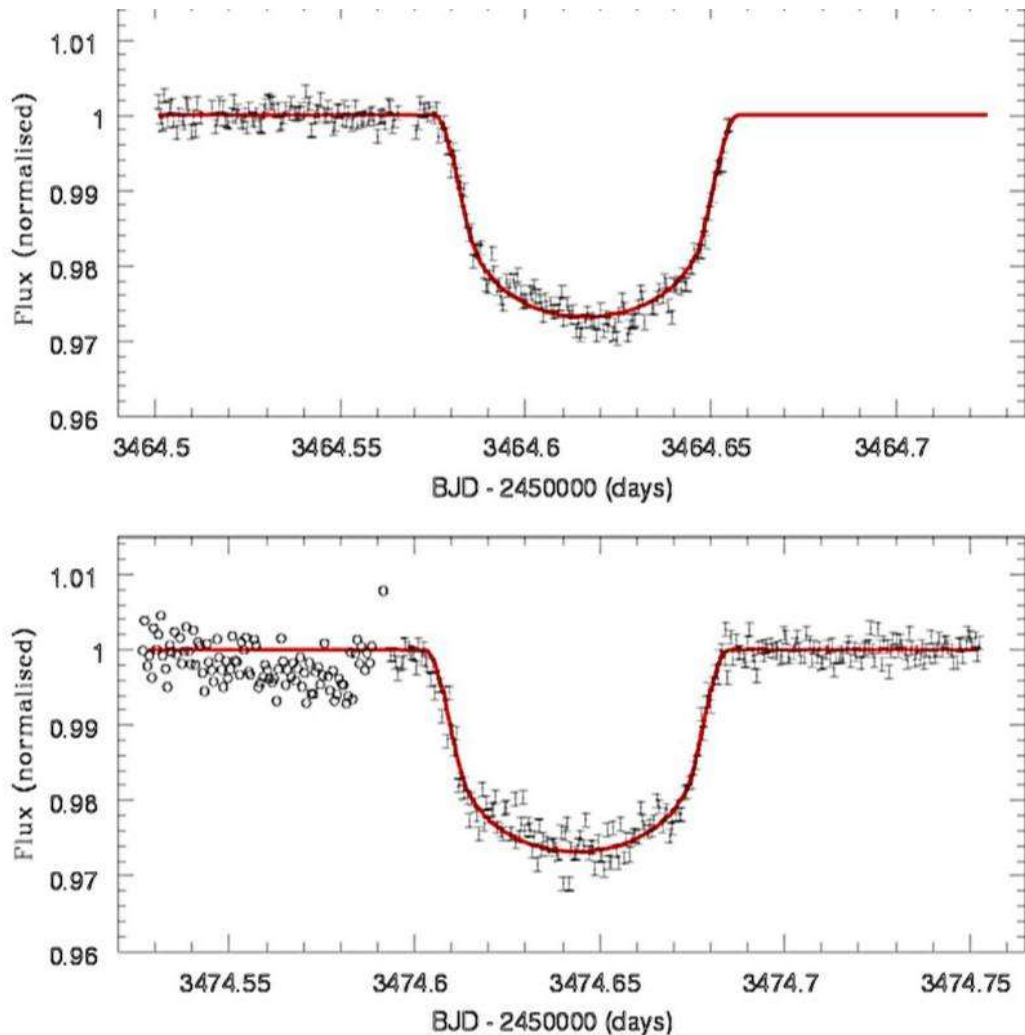


Рис. 8. Крива блиску OGLE-TR-113b, отримана за допомогою камери SUSI2 на телескопі NTT під час двох транзитів. Верхня частина - перше спостереження, нижня - друге, з накладеною моделлю транзиту. Коливання перед другим транзитом спричинені дефектом ПЗЗ. Обробка виконана методом деконволюції. [25]

Крива блиску OGLE-TR-113b демонструє класичний симетричний профіль із чітким спадом потоку світла під час транзиту. Глибина зниження блиску становить близько 3%, а «дно» кривої має рівномірний характер, що свідчить про стабільні умови зйомки, точну калібровку та незначні

статистичні відхилення. Дані були отримані за допомогою професійного CCD-детектора в межах довготривалих спостережень, що забезпечує високу достовірність результатів.

На рис. 9 наведено результат фотометричних спостережень транзиту екзопланети WASP-43b, отриманий 6 лютого 2025 року в межах мережі Unistellar учасником Tateki G.

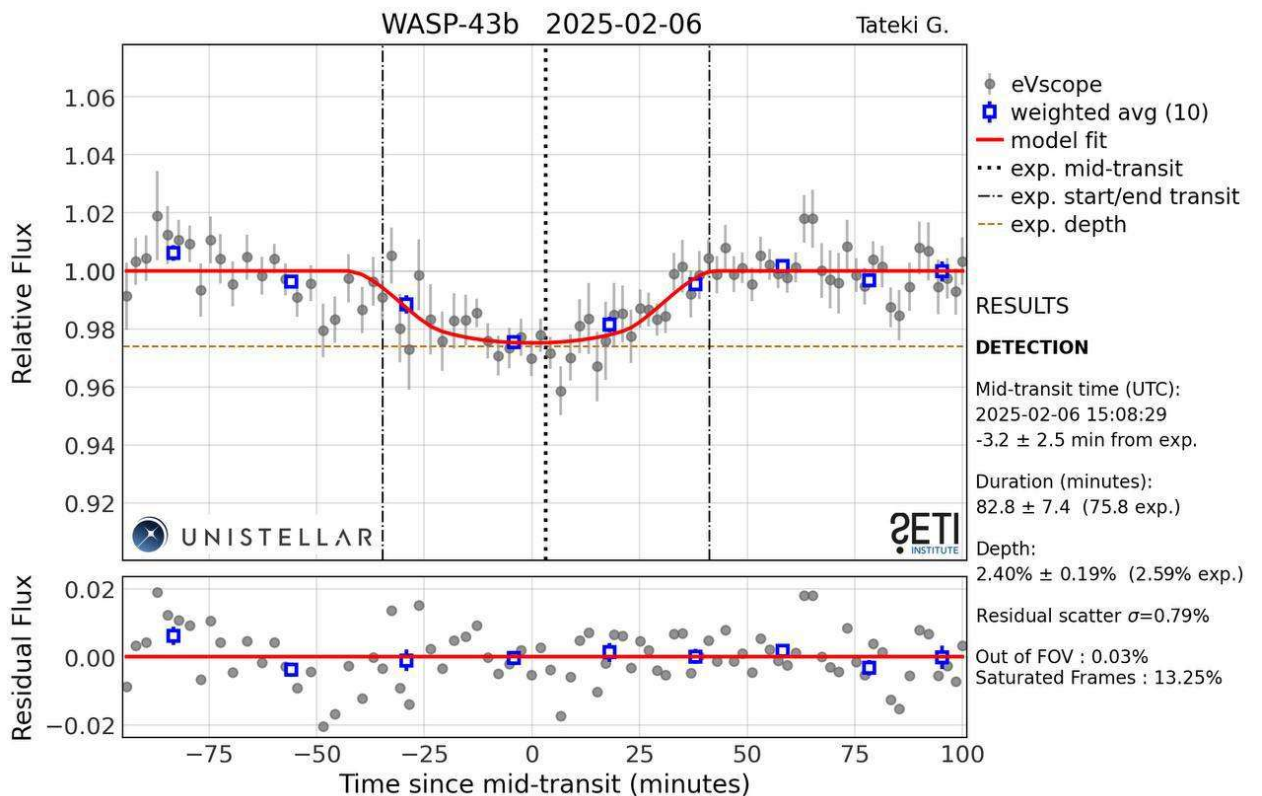


Рис. 9. Крива блиску екзопланети WASP-43b, отримана 6 лютого 2025 року учасниками мережі Unistellar, основний спостерігач Tateki G. за допомогою телескопа eVscope. Червона лінія - модель транзиту; точки - індивідуальні вимірювання; квадрати - усереднені значення; нижня панель - залишкова похибка. Справа подано основні параметри транзиту: час середини, тривалість, глибину, точність апроксимації та частку пересвічених кадрів. Запозичення кривої блиску для використання у роботі погоджене зі спільнотою Unistellar.

Натомість крива блиску на рис. 9, ілюструє інший підхід до транзитної фотометрії. Хоча окремі точки демонструють більшу дисперсію, після обробки та усереднення даних модель транзиту виявляє добре сформовану

структуру з глибиною близько 2.4% та тривалістю понад 80 хвилин. Незважаючи на аматорські умови спостереження, результат показує високу ступінь узгодженості з теоретичними очікуваннями.

Основні відмінності між кривими блиску полягають у рівні флуктуацій, точності фіксації початку й кінця транзиту та залишкових відхиленнях після апроксимації. Проте обидва приклади демонструють можливість достовірної реєстрації транзитів газових гігантів, як у професійних умовах, так і в рамках громадянської науки.

3.3. Інтерпретація отриманих даних

Порівняльний аналіз кривих блиску екзопланет OGLE-TR-113b та WASP-43b дозволяє зробити висновки щодо ефективності різних методів спостережень, якості обробки даних, а також фізичних характеристик самих планетарних систем. Основна увага в інтерпретації зосереджена на параметрах транзиту, таких як глибина, тривалість, форма мінімуму та симетрія, які є чутливими до геометрії орбіти, радіуса екзопланети, зоряної активності та точності приладів.

Для OGLE-TR-113b зафіксовано зниження яскравості на $\approx 3\%$, що є типовим значенням для планет типу спектрального класу K (газових гігантів, гарячих юпітерів). Симетричний профіль кривої та рівномірне плато в мінімумі свідчать про орбітальну стабільність, центральне проходження планети перед диском зорі та відсутність суттєвих пертурбацій, пов'язаних з активністю зорі або наявністю супутників. Додатково варто зазначити, що форма фазового профілю дозволяє апроксимувати параметри траєкторії обертання, включаючи нахил орбіти та співвідношення радіусів планети і зорі [25].

У випадку WASP-43b, попри значно вищу дисперсію окремих фотометричних точок, модель транзиту була побудована з достатнім рівнем відповідності теоретичному профілю. Глибина транзиту становить $\approx 2.4\%$,

що також відповідає планеті типу гарячого газового гіганта на короткоперіодичній орбіті. Порівняння отриманих результатів із очікуваними значеннями засвідчило узгодженість основних характеристик: момент середини транзиту, тривалість та глибина відхиляються від теоретичних лише в межах кількох відсотків. Залишкові похибки апроксимації, відображені в нижній частині графіка, є індикатором статистичної надійності, а також якості фільтрації шуму.

Також як у роботі Лободенка та співавторів показано, що за умови належного калібрування та узгодження даних із базами орбітальних телескопів TESS та Kepler, спостереження, отримані на Кометній станції в м. Київ, дозволяють формувати науково достовірні криві блиску транзитних екзопланет [28].

Порівняння результатів, отриманих у межах професійної обсерваторної платформи (OGLE) та глобальної аматорської мережі (Unistellar), дозволяє стверджувати, що за умови коректної фотометричної обробки та застосування стандартних процедур калібрування навіть напівааматорські дані можуть бути використані для науково обґрунтованого аналізу транзитних подій. Незважаючи на істотну різницю в апаратному забезпеченні, тривалості експозицій, фоточутливості детекторів і атмосферних умовах, результативність обох платформ підтверджує, що ключові параметри транзитів: глибина, тривалість, момент середини та симетрія профілю - можуть бути надійно відтворені у незалежних вимірюваннях.

Більш того, синтез спостережень із різних джерел, як централізованих телескопічних програм довготривалого моніторингу, так і незалежних аматорських спостережень, значно підвищує достовірність оцінок орбітальних та фізичних характеристик екзопланет. Такий підхід дозволяє виявляти потенційні систематичні похибки, характерні для окремих платформ, а також забезпечує крос-валідацію даних, що особливо важливо

при вивченні довгоперіодичних транзитів, слабких сигналів або спостережень із високою часовою роздільністю.

Інтеграція результатів з різнорідних джерел не лише підсилює емпіричну базу дослідження, а й відповідає сучасним тенденціям у розвитку астрономії спостережень - відкритості, багатоінструментальності та міжсегментній кооперації.

3.4. Роль непрофесійних телескопів у наукових ініціативах

Розвиток технологій та децентралізація наукових досліджень у ХХІ столітті стимулювали активне залучення аматорських телескопів до професійної науки. Однією з найяскравіших ініціатив у цій галузі є кампанія Unistellar Exoplanet Campaign, яка охопила понад 28 транзитних подій, зокрема спостереження тривалого транзиту Kepler-167e. Як зазначають Peluso та співавтори ці спостереження були проведені глобальною мережею користувачів смарт-телескопів eVscope, що дозволило досягти науково значущих результатів навіть без централізованого професійного обладнання [29].

Ключовими компонентами успіху стали уніфікована платформа, централізована передача даних і алгоритмічна обробка. В обсерваціях використовувалась автоматизована система Enhanced Vision, що акумулює світло шляхом стекінгу коротких експозицій, забезпечуючи поступове покращення зображення об'єкта, навіть за умов світлового забруднення.

На додаток до технічної інфраструктури, ініціативи громадянської науки все частіше поєднують наукову діяльність з освітнім компонентом і соціальною взаємодією. Наприклад, проєкт Cyber-Cosmos, представлений на Міжнародному астронавтичному конгресі, пропонує створення спостережних хабів у темних зонах Європи, де аматори можуть долучатися до реальних наукових спостережень. Ця ініціатива не лише дозволяє зібрати

високоякісні фотометричні дані, а й створює умови для залучення нових учасників до астрономічної спільноти [30].

Водночас, за результатами дослідження Creaner та ін. (2025), саме поєднання людського фактора та алгоритмів машинного навчання стає основою ефективною інтеграції непрофесійних телескопів у структуру наукових досліджень. У рамках проєкту Exoplanet Citizen Science Pipeline було створено платформу, здатну обробляти великі масиви даних від аматорів, сортувати їх за якістю та виявляти аномалії в кривих блиску - без залучення професійного персоналу на початковому етапі [31].

Таким чином, досвід використання телескопів Unistellar і подібних платформ засвідчує: сучасна громадянська наука здатна не лише доповнити традиційні астрономічні дослідження, а й створити умови для децентралізованого збору та обробки високоточних даних з мінімальним порогом входу. Одним із важливих аспектів участі аматорських телескопів у науці є підвищення часової роздільності та глобального покриття транзитних подій. Завдяки розосередженню спостерігачів у різних часових поясах, мережі на кшталт Unistellar можуть забезпечити безперервний моніторинг об'єктів протягом усього добового циклу. Це особливо важливо для транзитів з довгою тривалістю або тих, що відбуваються лише частково в межах однієї ночі в певній географічній точці. Така просторово-часова перевага дає змогу реєструвати більш повні криві блиску, що підвищує точність визначення орбітальних параметрів.

Поширення мобільних та автономних телескопів, які не потребують спеціальних навичок в оптичному калібруванні або ручному наведенні, розширює коло потенційних спостерігачів. Це відкриває можливості для залучення шкіл, аматорських об'єднань, локальних обсерваторій, а також індивідуальних користувачів до спільного збору даних для наукових цілей.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Робота присвячена дослідженню методів виявлення екзопланет за допомогою транзитної фотометрії, з особливим акцентом на застосуванні непрофесійних телескопів системи Unistellar у поєднанні з науковими підходами до обробки та калібрування даних. У дослідженні було враховано можливості порівняльного аналізу кривих блиску, отриманих з непрофесійних та професійних спостережень, а також проаналізовано перспективи громадянської науки у верифікації транзитних подій.

Були отримані наступні результати:

1. Якість спостережень телескопу Unistellar забезпечує детектування транзитів екзопланет на рівні зменшення потоку під час транзиту 1%. При послабленні блиску на рівні 2,5% транзит фіксується впевнено.

2. Використання телескопів Unistellar є перспективним з урахуванням розосередженої мережі однакових телескопів та уніфікації методів обробки спостережень.

3. Порівняння результатів спостережень транзитів екзопланет, що виконувалися одним сучасним стаціонарним телескопом проекту OGLE та мережевими телескопами спостерігачів Unistellar Community доводить, що використання громадської науки є перспективним напрямом розвитку наземної спостережної бази для спостережень транзитів екзопланет, які потребують підтвердження їхнього існування.

4. Залучення невеликих автоматичних телескопів, об'єднаних у спостережну мережу до транзитного моніторингу екзопланет має перспективу розвитку як інструмент глобального наукового співробітництва.

5. Верифікація транзитних подій може бути напрямом роботи студентів рамках освітньо-наукових ініціатив.

З наведених результатів можна зробити висновок, що навіть за умов обмежених технічних ресурсів, завдяки координованому збору та

централізованій обробці фотометричних даних, можливо отримати достовірні наукові результати. Це сприяє верифікації транзитів та розширенню каталогу підтверджених екзопланет.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані криві блиску та методичні рішення можуть бути використані як освітній матеріал, база для моделювання екзопланетних систем і підґрунтя для подальшої автоматизованої обробки великих обсягів даних із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Перспективним напрямом дослідження є розвиток багатоточкових спостережень у рамках мережі Unistellar, орієнтованих на поглиблене вивчення характеристик планет, потенційно придатних для життя.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Howard S. Exoplanets // Journal of the Washington Academy of Sciences. – 2011. – Fall. – P. 33–53. – Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/307628946_Exoplanets
2. Olson N. Exploring Exoplanets. – 2024. – Режим доступу::
https://www.researchgate.net/publication/385372028_Exploring_Exoplanets
3. Більчук М. Екзопланети: як ми шукаємо нові світи [Електронний ресурс] / Марія Більчук // Астроосвіта. – 2020. – 4 с. – Режим доступу:
<https://astroosvita.kiev.ua/infoteka/articles/eksoplanety.pdf>
4. Сальниченко І. Екзопланети та їх атмосфери: чи знайдемо ми коли-небудь другу Землю? / І. Сальниченко // ФізикаUA. – 2024. – Режим доступу: <https://www.fizykaua.com/post/exoplanety-ta-yikh-atmosfery>
5. Інститут SETI. Аматорська програма для підтвердження екзопланет транзитним методом // Universe. – 2022. – Режим доступу:
<https://universemagazine.com/amatorska-programa-dlya-pidverdzhennya-ekzoplanet-tranzytnym-metodom/>
6. Deeg H. J., Alonso R. Transit photometry as an exoplanet discovery method // Handbook of Exoplanets. – Springer, 2018. – Режим доступу:
<https://arxiv.org/pdf/1803.07867.pdf>
7. Світогляд : наук.-попул. зб. / Головна астрономічна обсерваторія НАН України. – 2020. – № 1 (15). – 100 с. – Режим доступу:
<https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/svitogliad/svit-2020-15-1/svitoglyad-1-2020-all.pdf>
8. Warsaw University Astronomical Observatory. OGLE Exoplanet Transit Candidates [Електронний ресурс]. – Optical Gravitational Lensing Experiment. – Режим доступу:
https://ogle.astrouw.edu.pl/cont/4_main/epl/

9. Warsaw University Astronomical Observatory. Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ogle.astrow.edu.pl>
10. Rauf J. Looking for Exoplanets. Session II. – OLLI at University of Cincinnati, Fall 2021. – 20p. – Режим доступу: <https://www.uc.edu/content/dam/refresh/cont-ed-62/olli/21-fall/exoplanets2.pdf>
11. Технологія тотального усунення світлового забруднення покращує астрофотозйомку // Universe. – 2023. – Режим доступу: <https://universemagazine.com/tehnologiya-totalnogo-usunennya-svitlove-zabrudnennya-pokrashhuye-astrofotozjomku/>
12. Kane S. R., Dragomir D., Ciardi D. R., Fischer D. A., Howard A. W., Latham D. W., Wright J. T. TERMS Photometry of Known Transiting Exoplanets // *The Astrophysical Journal*. – 2011. – Vol. 737, No. 2. – Article ID 58. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/231044432_TERMS_Photometry_of_Known_Transiting_Exoplanets
13. Zeilnhofer M., Dawson D. Light Curve Analysis of Transiting Exoplanets [Electronic resource] // Proceedings of the National Conference on Undergraduate Research (NCUR), April 11–13, 2013, University of Wisconsin, La Crosse. – 2013. – 7 p. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/325225935_Light_Curve_Analysis_of_Transiting_Exoplanets
14. Naponiello C., Cherubini C., Cortes P. C. та ін. Photometry of exoplanetary transits at Osservatorio Polifunzionale del Chianti // *Experimental Astronomy*. – 2020. – Vol. 50, № 2. – P. 169–183. – Режим доступу: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10686-020-09669-6.pdf>
15. Yang H. Exoplanet Detection of the Kepler Space Telescope through the Transit Method [Електронний ресурс] / Helin Yang // *Transactions on*

- Computer Science and Intelligent Systems Research. – 2024. – Vol. 7. – 6
 Режим.доступу:https://www.researchgate.net/publication/387720051_Exoplanet_Detection_of_the_Kepler_Space_Telescope_through_the_Transit_Method
16. Udalski A., Kubiak M., Szymański M. Optical Gravitational Lensing Experiment. OGLE-2 – the Second Phase of the OGLE Project [Электронный ресурс] // Acta Astronomica. – 1997. – Vol. 47, № 3. – P. 319–344. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710091>
17. Soszyński I. Three decades of the OGLE survey // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. – 2024. – Vol. 54, No. 2. – P. 234–248. – DOI:10.31577/caosp.2024.54.2.234.
 Режим доступа:
<https://www.astro.sk/caosp/Eedition/FullTexts/vol54no2/pp234-248.pdf>
18. UNISTELLAR Smart Telescopes Comparison Table [Электронный ресурс]. – Unistellar, 2024. – 2 с. – Режим доступа: <https://www.unistellar.com/wp-content/uploads/2024/01/UNISTELLAR-Smart-Telescopes-Comparison-Table.pdf>
19. Unistellar. eVscope Instruction Manual [Электронный ресурс]. – V&N Photo, 2020. – 32 с. – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/lit_files/967690.pdf
20. SETI Institute. Unistellar Education Materials [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://www.seti.org/unistellar-education-materials>
21. García-Melendo E., Marchis F., Lebreton J. та ін. Unistellar telescope network: concept, operation and science goals [Электронный ресурс] // Acta Astronautica. – 2020. – Vol.167. – P. 67–77. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576519312950>
22. Perrocheau A., Esposito T. M., Dalba P. A. та ін. A 16-Hour Transit of Kepler-167 e Observed by the Ground-Based Unistellar Telescope

- Network [Електронний ресурс] // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. – 2025. – (прийнято до друку). – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2211.01532>
23. Perrocheau A., Esposito T. M., Marchis F. та ін. Photometric calibration of the Unistellar telescopes to the Johnson-Cousins System [Електронний ресурс] // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. – 2025. – Vol. 11, № 2. – Art. 028002. – DOI: [10.1117/1.JATIS.11.2.028002](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.11.2.028002)
24. Nazir M. M., Kumar M. Exoplanet Detection of the Kepler Space Telescope through the Transit Method [Електронний ресурс] // ResearchGate. – 2023. – 5 с. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/387720051_Exoplanet_Detection_of_the_Kepler_Space_Telescope_through_the_Transit_Method
25. Gillon M., Pont F., Moutou C. Improved parameters for the transiting planet OGLE-TR-113b // Astronomy & Astrophysics. – 2006. – Vol. 459. – P. 249–255. – Режим доступу: <https://www.aanda.org/articles/aa/full/2006/43/aa5844-06/aa5844-06.html>
26. Photometric Follow-up Transit Primary Eclipse Observations of WASP-43 b and TrES-3 b and A Study on Their Transit Timing Variations // ResearchGate. – 2018. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/323328126>
27. Pollacco D., Skillen I., Collier Cameron A. та ін. WASP-3b: a strongly-irradiated transiting gas-giant planet [Електронний ресурс] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. – Vol. 385, № 3. – С. 1576–1584. – Режим доступу: <https://academic.oup.com/mnras/article/385/3/1576/1013033>
28. Лободенко М., Павленко Я. В., Кулик І., Нагурна А., Соломаха М., Баранський О. Порівняльний аналіз спостережень вибраних транзитів екзопланет, отриманих на Кометній станції Київ з базою даних орбітальних телескопів TESS та Kepler [Електронний ресурс] // Odesa

- Astronomical Publications. – 2023. – Т. 36. – С. 119–123. – Режим доступу: <http://oar.onu.edu.ua/article/view/268007>
29. Peluso D. O’C., Esposito T. M., Marchis F. та ін. The Unistellar Exoplanet Campaign: Citizen Science Results and Inherent Education Opportunities // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2023. – Vol. 135, № 1012. – P. 015001. – Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/aca558>
30. Zellem R. T., Pearson K. A., Blaser E. та ін. Utilizing small telescopes operated by citizen scientists for transiting exoplanet follow-up // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2020. – Vol. 132, № 1011. – P. 054401. – Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2003.09046.pdf>
31. Barbosa D., Coelho B., Bergano M. та ін. Cyber-Cosmos: A new citizen science concept in a dark sky destination : матеріали Міжнар. астронавт. конгресу (IAC-21.A6.4.5). – 2021. – Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2111.03458.pdf>
32. Creaner O., Preis A., Ryan C., Kaye N. The Exoplanet Citizen Science Pipeline: Human Factors and Machine Learning // arXiv. – 2025. – Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2503.14575.pdf>

Додаток А. Схематичне зображення проходження екзопланети по диску зорі

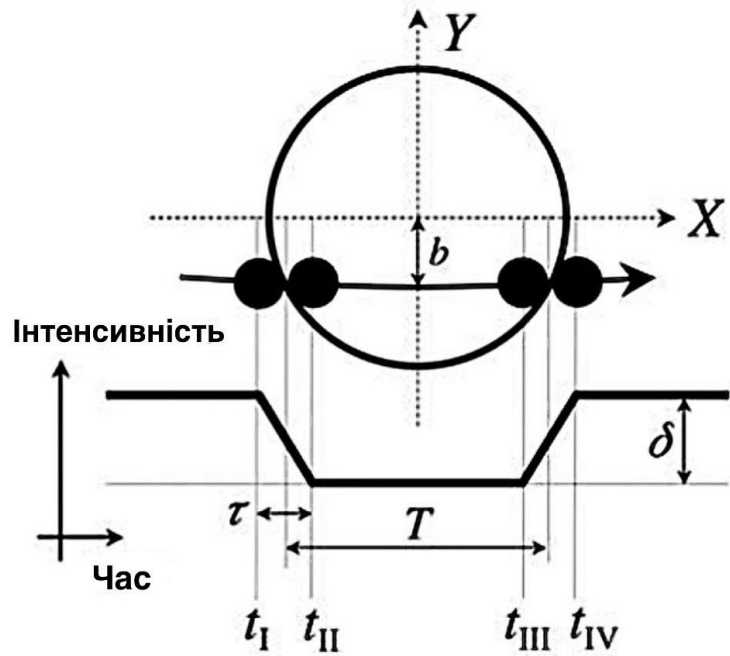


Рис. 1. Проходження планети по диску зорі. Схема взята зі статті: J. N. Winn, 2014. *Transits and Occultations*.

**Додаток Б. Формула глибини транзиту та інтерпретація
фізичних величин**

Глибину транзиту можна оцінити за співвідношенням:

(2)

$$\Delta F = \frac{P_0 - P_{\text{транзиту}}}{P_0} = \frac{A_p}{A_*} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

де ΔF - глибина транзиту, тобто відносне зменшення яскравості зорі;

P_0 - яскравість зорі до транзиту;

$P_{\text{транзиту}}$ - яскравість зорі під час транзиту;

$A_p = \pi R_p^2$ - видимі площі дисків планети;

$A_* = \pi R_*^2$ - видимі площі дисків зорі;

R_p - радіус планети;

R_* - радіус зорі.

Додаток В. Приклад типової кривої блиску з транзитами екзопланети за даними місії Kepler

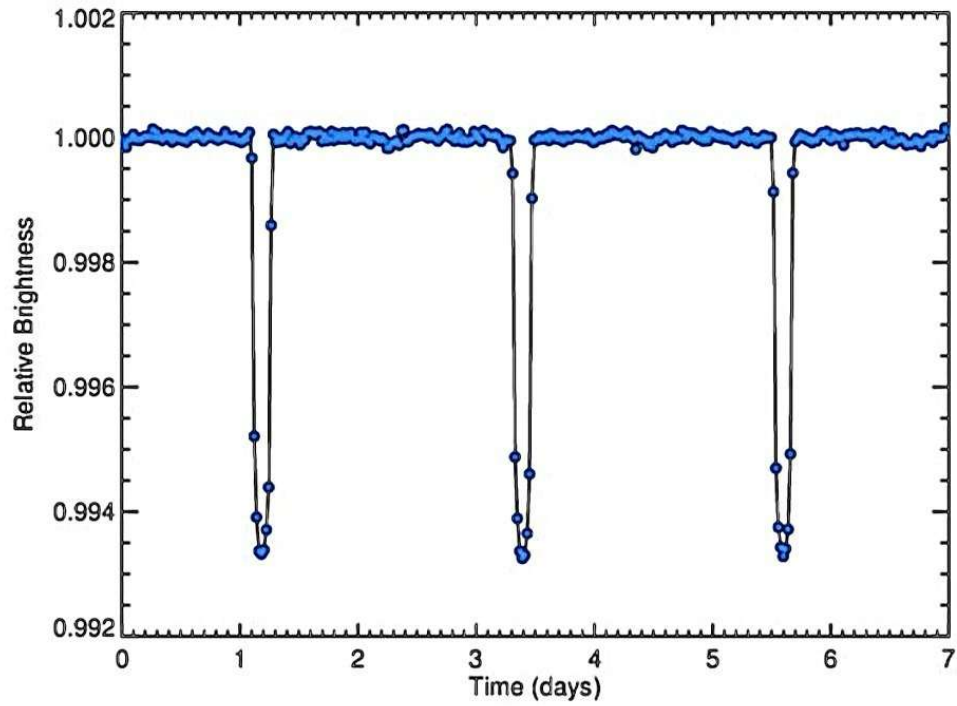


Рис. 3. Крива блиску зорі, отримана космічним телескопом Kepler: добре помітні три транзити екзопланети з характерним провалом яскравості. По осі абсцис - час (у днях), по осі ординат - відносна яскравість зорі [15].

**Додаток Г. Порівняльна таблиця технічних характеристик
телескопічних систем OGLE-2 та Unistellar eVscope 2**

Таблиця 4

Порівняльна характеристика апаратного забезпечення телескопічних
систем OGLE-2 та Unistellar eVscope 2

Параметр	OGLE-2	Unistellar eVscope 2
Апертура телескопа	1300 мм	114 мм
Оптична схема	Класична рефлекторна система	Рефлектор Ньютона
Тип детектора	CCD (ПЗЗ-матриця)	CMOS-сенсор Sony IMX347
Роздільна здатність матриці	2048 × 2048 пікселів	~7.7 мегапікселів
Розмір пікселя	24 мкм	Не вказано у документації
Поле зору	14.2' × 14.2' (кутові хвилини)	0.75° × 0.56° ≈ 45' × 34' [19, с. 8]
Температурне охолодження сенсора	Так, до -70°C	Ні
Макс. зоряна величина об'єктів	до 20–21m (при тривалих експозиціях)	до ~18m (в режимі Enhanced Vision)
Спосіб обробки зображень	Постфактум (офлайн фотометрія)	У реальному часі (Enhanced Vision)
Автоматичне розпізнавання поля	Ні	Так - Autonomous Field Detection (AFD)
Інтелектуальні алгоритми	Відсутні	Так - цифрове складання, шумозаглушення, навігація
Призначення	Масштабний огляд зір для мікролінзування і транзитів	Індивідуальні спостереження транзитів, освітні кампанії

Джерело: складено автором.

Додаток Д. Реальні спостереження зоряного скупчення Owl Cluster з використанням телескопа Unistellar (листопад 2024 р.)



Рис. 5. Розсіяне скупчення Owl Cluster, спостережене автором за допомогою телескопа Unistellar (970,64 мс, 46°N, 31°E, листопад 2024 р.).

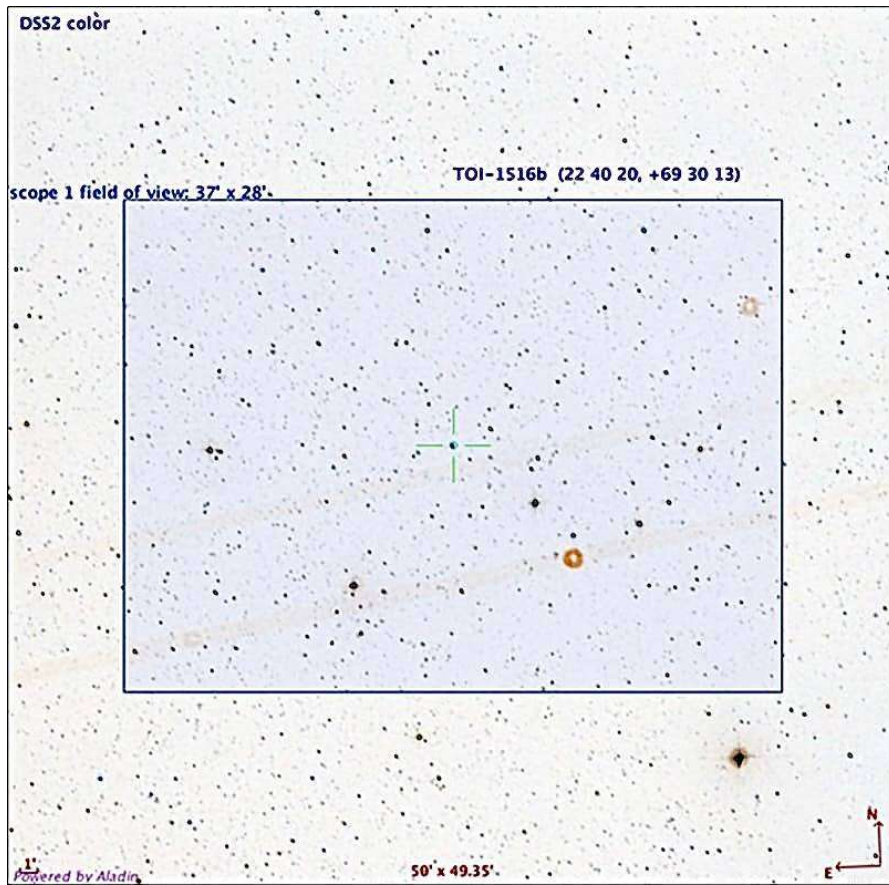
Додаток Ж. Пошукова карта наведення телескопа на зорю TOI 1516b

Рис. 7. Пошукова карта для спостереження транзити TOI 1516b. Цільову зорю позначено хрестом, прямокутний контур відповідає полю зору телескопа Unistellar Equinox 2e (37' × 28'). Карта згенерована автоматичною системою Unistellar відповідно до координат об'єкта та параметрів транзити

Додаток 3. Крива блиску екзопланети OGLE-TR-113b за результатами двох транзитів за даними OGLE

Крива блиску екзопланети OGLE-TR-113b, отримана під час двох окремих транзитів у межах проєкту OGLE.

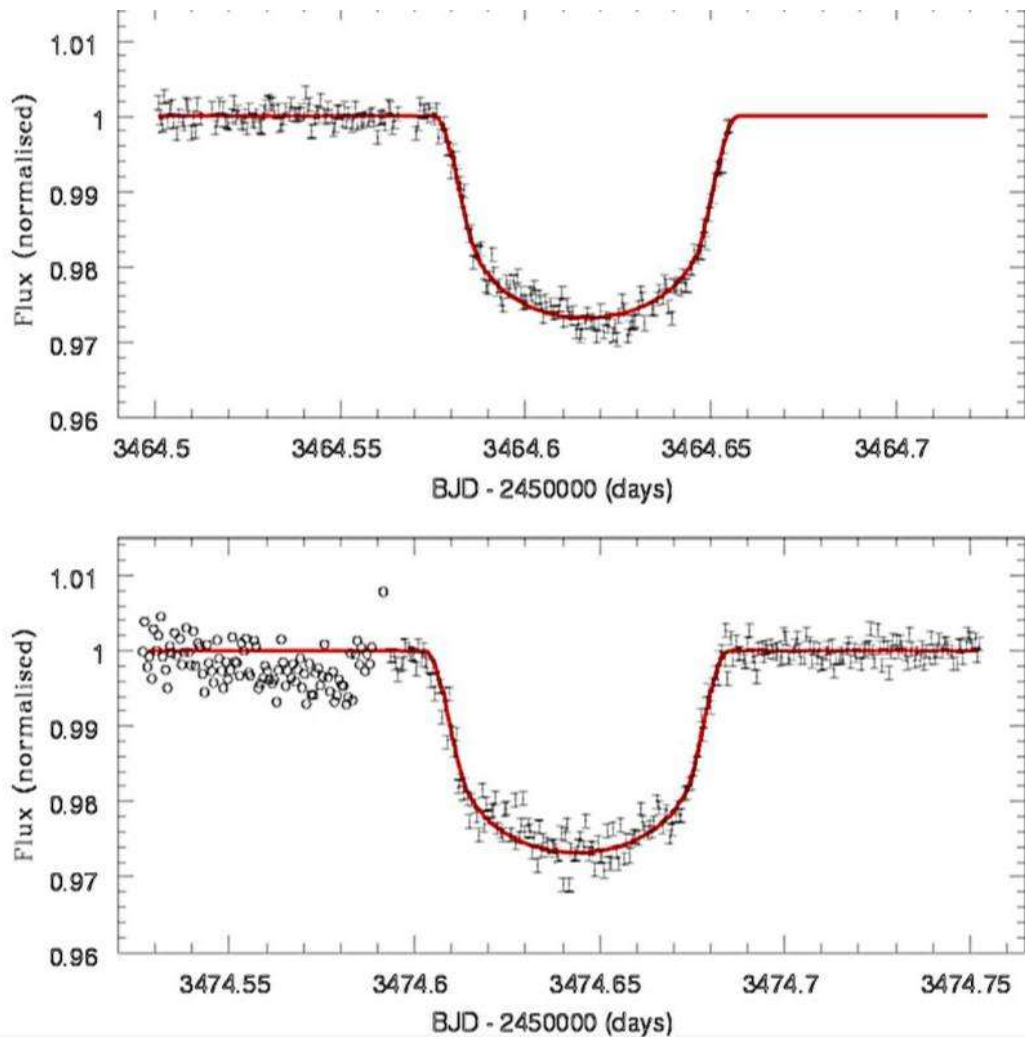


Рис. 8. Крива блиску OGLE-TR-113b, отримана за допомогою камери SUSI2 на телескопі NTT під час двох транзитів. Верхня частина - перше спостереження, нижня - друге, з накладеною моделлю транзиту. Коливання перед другим транзитом спричинені дефектом ПЗЗ. Обробка виконана методом деконволюції. [25]

Додаток II. Крива блиску екзопланети WASP-43b, отримана в межах Unistellar (2025)

Результат фотометричних спостережень транзиту екзопланети WASP-43b, отриманий 6 лютого 2025 року в межах мережі Unistellar учасником Tateki G.

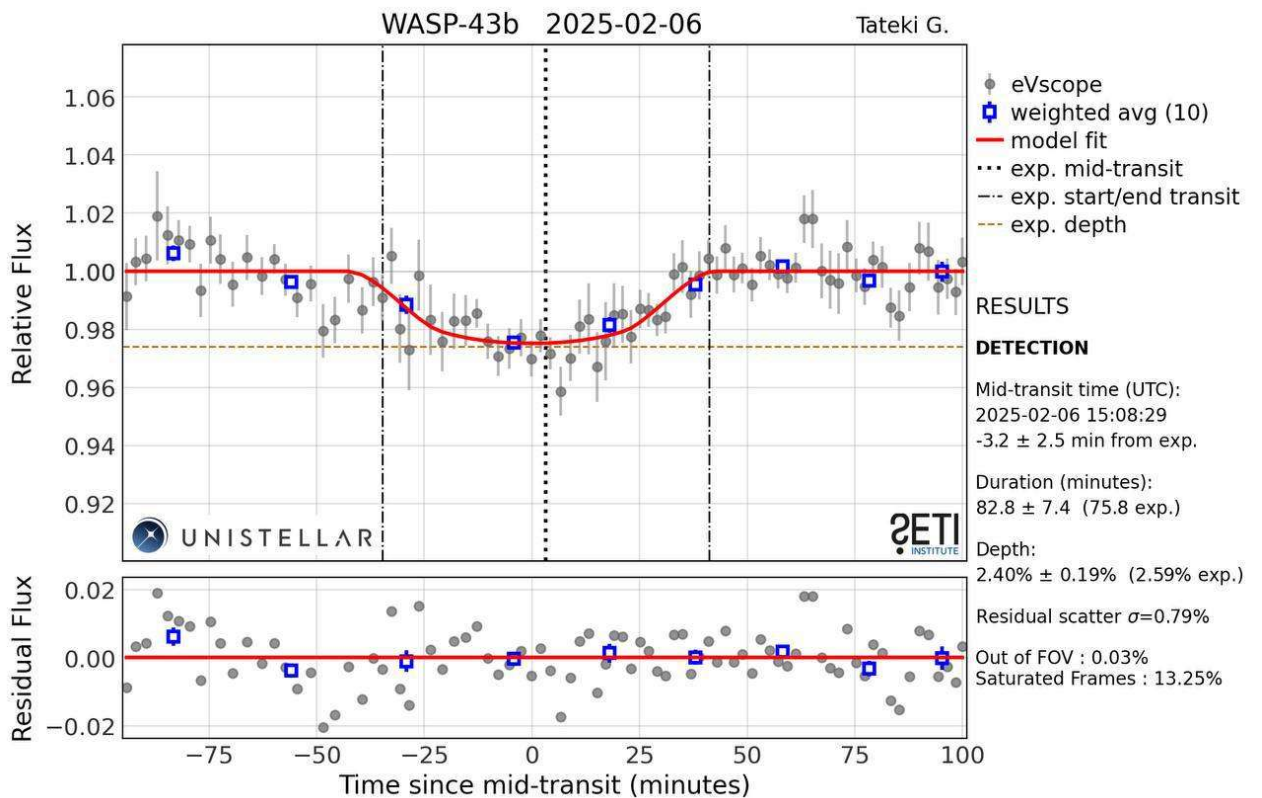


Рис. 9. Крива блиску екзопланети WASP-43b, отримана 6 лютого 2025 року учасником мережі Unistellar Tateki G. за допомогою телескопа eVscope. Червона лінія - модель транзиту; точки - індивідуальні вимірювання; квадрати - усереднені значення; нижня панель - залишкова похибка. Справа подано основні параметри транзиту: час середини, тривалість, глибину, точність апроксимації та частку пересвічених кадрів. Запозичення кривої блиску для використання у роботі погоджене зі спільнотою Unistellar.