

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

Кафедра астрономії та космічної інформатики

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

14.06.2024 р.



Оцінка « відмінно »

Голова ЕК
проф. Віктор ТИШКОВЕЦЬ

21.06.2024 р.



Дараган Михайло Сергійович

Пошук екзопланет за даними місії TESS

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



(підпис студента)

Науковий керівник – пр. наук. співр.
НДІ астрономії

О. П. Желєзняк



(підпис керівника)

Харків 2024

АНОТАЦІЯ

Дараган М. С. Пошук екзопланет за даними місії TESS

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

У цій роботі наведено коротку історію відкриття планет поза Сонячною системою - екзопланет. Розглянуто методи пошуку екзопланетних систем, і зокрема, застосування методу транзитів як найбільш ефективного на сьогодні. Обговорено можливості та переваги застосування методу транзитів для випадку спостережень з орбіти Землі. Зроблено огляд основних характеристик, мети та програми спостережень діючої космічної місії з пошуку екзопланет TESS. Для подальшої обробки з архіву даних TESS завантажено вибірку зображень, отриману ПЗЗ №1 камери 1 у секторі 54 (період спостережень - з 09.07 до 04.08.2022 р., 3604 зображення). Проаналізовано загальні характеристики зображень отриманої вибірки, зокрема, варіації параметрів ФРТ протягом періоду спостережень та вплив завад від розсіяного світла. Проведено апертурну фотометрію вибраних зір у полі ПЗЗ №1 камери 1. Зокрема, оброблено дані фотометрії відкритої раніше екзопланетної системи WASP-2b. Отримано складену криву інтенсивності, обчислено параметри екзопланети WASP-2b та проведено порівняння отриманих результатів з даними публікацій. Виконано порівняння складених кривих інтенсивності WASP-2b, отриманих за космічними (TESS) та наземними (АЗТ-22) спостереженнями. Шляхом аналізу кривих блиску зір у кількох ділянках зображень ПЗЗ №1 проведено пошук можливих транзитів. Встановлено, що зоря TYC 503-1272-1 демонструє періодичну змінність, характерну для екзопланетних систем. Виходячи з припущення про екзопланетну природу транзиту, отримано складену криву інтенсивності TYC 503-1272-1 та обчислено параметри ймовірної екзопланети. Наголошено, що для остаточного ототожнення та підтвердження наявності екзопланети в системі TYC 503-1272-1 необхідні додаткові спостереження.

Ключові слова: екзопланета, транзит, крива блиску, фотометрія.

ABSTRACT

Daragan M. S. Search for exoplanets with the TESS mission data

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

In this thesis, brief history of the discovery of planets outside the Solar System - exoplanets - is given. Methods of searching for exoplanetary systems are considered, and in particular, the use of the transit method as the most effective today. The possibilities and advantages of using the transit method for the case of observations from the Earth's orbit are discussed. An overview of the main characteristics, purpose and observation program of the active space mission for the search for exoplanets TESS is made. For further processing, a sample of images obtained by CCD No. 1 of camera 1 in sector 54 (observation period - from 07/09 to 08/04/2022, 3604 images) was downloaded from the TESS data archive. The general

characteristics of the images of the obtained sample were analyzed, in particular, the variations of FRT parameters during the observation period and the influence of interference from scattered light. Aperture photometry of selected stars was carried out in the CCD field #1 of camera 1. In particular, photometry data of the previously discovered WASP-2b exoplanet system were processed. A composite intensity curve was obtained, the parameters of the WASP-2b exoplanet were calculated, and the results were compared with published data. A comparison of composite WASP-2b intensity curves obtained from space (TESS) and ground (AZT-22) observations was made. A search for possible transits was made by analyzing the brightness curves of the stars in several areas of the images of CCD №1. It was established that the star TYC 503-1272-1 exhibits periodic variability characteristic of exoplanetary systems. Based on the assumption of the exoplanetary nature of the transit, the composite intensity curve of TYC 503-1272-1 was obtained and the parameters of the probable exoplanet were calculated. It is emphasized that additional observations are needed to definitively identify and confirm the presence of an exoplanet in the TYC 503-1272-1 system.

Keywords: exoplanet, transit, light curve, photometry.

Зміст

Вступ	5
1 Загальні відомості про позасонячні планетні системи.....	9
1.1 Перші невдалі спроби.....	9
1.2 Перше в історії відкриття екзопланети.....	11
1.3 Застосування методу транзитів	13
1.4 Космічні та наземні місії для детектування екзопланет	19
2 Місія TESS та її дані спостережень.....	22
2.1 Космічний апарат TESS	23
2.2 Орбіта та програма спостережень TESS.....	25
3 Дослідження та пошук екзопланетних систем за даними місії TESS	29
3.1 Екзопланетна система WASP-2b	30
3.1.1 WASP-2b в архіві зображень TESS	31
3.1.2 Доступ до даних місії TESS	33
3.1.3 Дані TESS для сектора 54 - загальна характеристика	35
3.1.4 Обробка даних та крива блиску WASP-2b	36
3.1.5 Обробка даних та крива відносної інтенсивності WASP-2b	41
3.1.6 Аналіз кривої блиску та визначення параметрів системи WASP-2b.....	45
3.1.7 Параметри екзопланетної системи TYC 503-1272-1.....	51
3.2 Пошук екзопланет у секторі 54: TYC 503-1272-1	55
3.2.1 Зоря TYC 503-1272-1	56
3.2.2 Перевірка гіпотези затемнено-подвійної зорі.....	58
3.2.3 Параметри екзопланетної системи TYC 503-1272-1	62
Висновки.....	67
Список використаних джерел	69

Вступ

Відкриття екзопланет, тобто таких планет, що обертаються навколо зір за межами Сонячної системи, наразі вважається одним з найвизначніших досягнень астрономії за останні 30 років: у 1980-1990х роках проводився ряд досліджень, які підтвердили, що об'єкти, придатні до віднесення їх до класу планет, знаходяться не тільки біля Сонця. Після отримання цих результатів екзопланетні дослідження швидко увійшли в число напрямів астрономічних досліджень, що розвиваються найбільш швидко: з 1990 років відбувається активне детектування нових тіл та детальне дослідження з подальшою класифікацією вже відкритих, розпочинаються назначені для таких цілей наземні та космічні спостережні місії, а визначним дослідникам, що зробили особливо великий вклад в розвиток цієї галузі, присуджуються престижні премії (прикладом можуть послужити Мішель Майор та Дідьє Кело, що стали лауреатами Нобелівської премії та ряду інших відзнак за детектування планети біля зорі, що подібна до Сонця, більш докладна інформація про це відкриття знаходиться у розділі 1). Ці відомості дають змогу однозначно говорити про актуальність досліджуваної теми на предмет написання роботи. Для підтвердження цієї тези нижче приведена статистика відкритих планет, а також присвячених ним наукових статей згідно із базою даних Nasa Exoplanet Archive за роками.

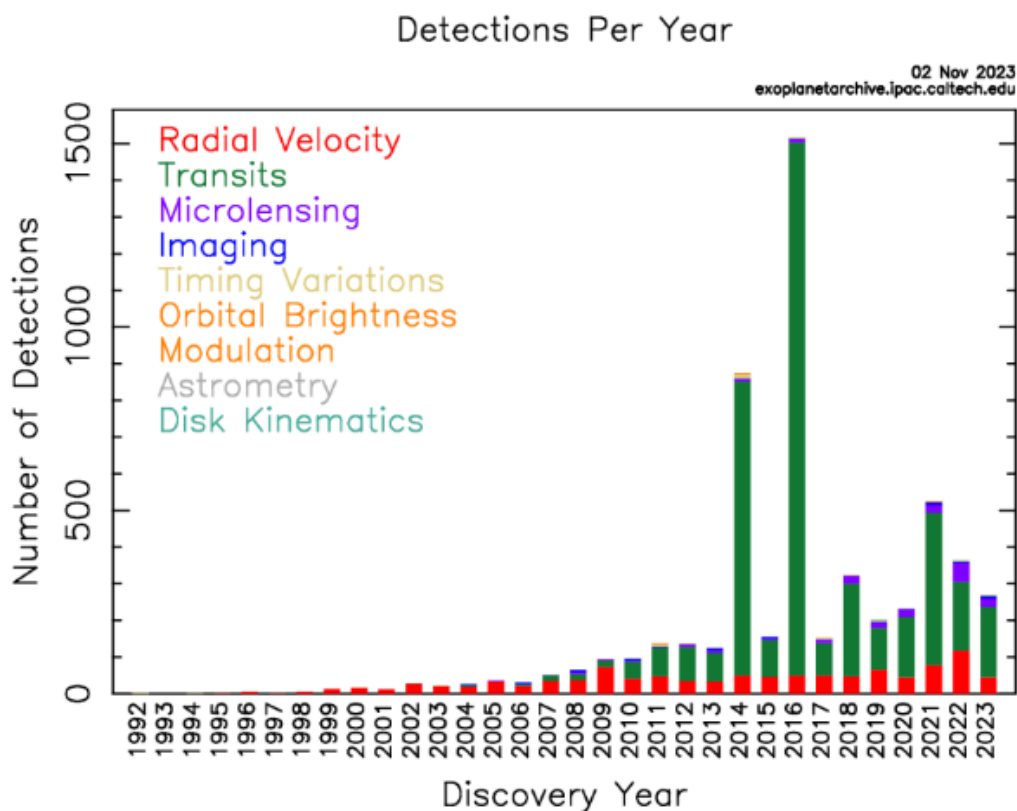


Рис. 1: Кількість відкритих екзопланетних систем за способами та за роками згідно із базою даних Nasa Exoplanet Archive [39] станом на початок листопаду 2023 р.

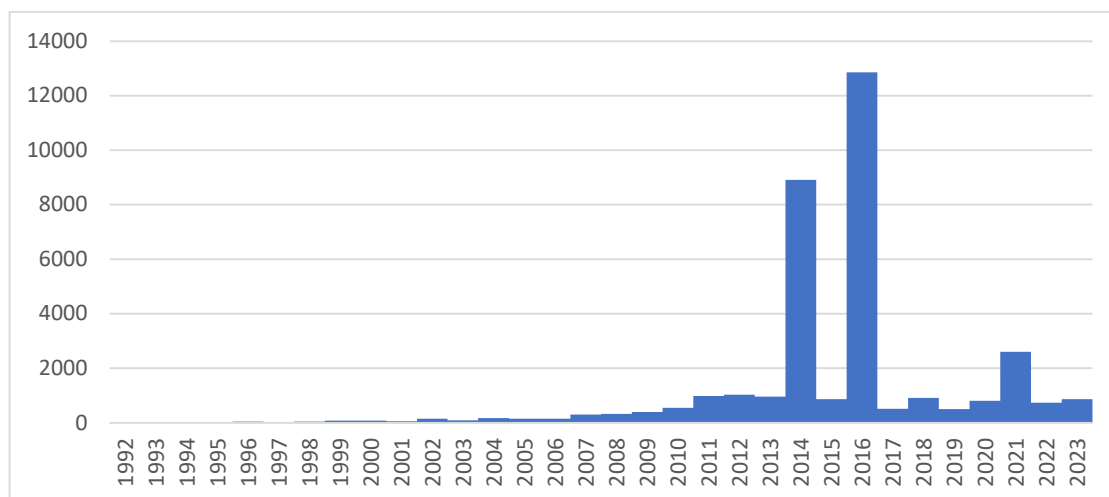


Рис. 2: Кількість публікацій, присвячених екзопланетним системам, за роками згідно із базою даних Nasa Exoplanet Archive [39] станом на початок листопаду 2023 р.

Протягом останніх 15 років знаходження нових позасонячних планетних систем стало ключовою задачею двох космічних спостережних місій NASA:

Kepler, що виконувалася з 2009 по 2018 рік, та її наступниці – TESS, програма якої виконується з 2018 року і по сьогоднішній день. Пошук позасонячних планет цими місіями спирається на так званий метод транзитів – спосіб отримання даних щодо планетних систем біля віддалених світил, що полягає у дослідженні кривих блиску останніх на предмет зменшення яскравості, викликаного проходженнями планет по диску материнської зорі (докладніше див. розділ 1).

Незважаючи на виключну результативність методу транзитів для виконання подібних задач, значна частка цікавих дослідникам об'єктів залишається не відкритими, а зорі, що можуть бути кандидатами на наявність позасонячних планетних тіл, часто оминаються пошуковими командами на користь більш перспективних кандидатів – виходячи з цього можна сказати, що навіть за умови прискіпливої уваги до екзопланетних досліджень з боку великої кількості дослідницьких колективів у них завжди залишається місце для нових відкриттів. Виходячи із цього я визначив напрямок подальшої роботи таким чином, щоби за умови відпрацювання методу на прикладі вже досліджених світил спробувати проаналізувати інші системи на предмет наявності планетних тіл, тим самим забезпечивши новизну проведених тут досліджень. Так, задачею цієї дипломної роботи було освоєння методу транзитів та його практичне застосування для знімків, отриманих за допомогою космічного телескопа вже описаної місії TESS, зокрема із метою виявлення нових позасонячних планетних систем. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

1. Ознайомитись з основними характеристиками, метою та програмою спостережень космічної місії TESS.
2. Отримати дані спостережень TESS для ділянки неба, що містить екзопланетну систему WASP-2b, та дослідити характеристики отриманої вибірки зображень.

3. Провести фотометрію зорі системи WASP-2b та визначити характеристики екзопланети за отриманою залежністю інтенсивності від часу.
4. Провести пошук ймовірних екзопланетних систем в межах ділянки неба, що містить WASP-2b, шляхом аналізу даних фотометрії вибраних зір.

Новизна запропонованого дослідження полягає у використанні щойно отриманих даних спостережень та розробці методики обробки великих об'ємів даних (тисячі зображень). Дослідження отриманих кривих блиску об'єктів може стати основою майбутніх алгоритмів автоматичного пошуку транзитних явищ та дає шанс відкрити нові екзопланетні системи.

Практичне значення роботи полягає у засвоєнні та практичному використанні методу транзитів для пошуку та дослідження екзопланет за даними космічних місій.

Наукове значення роботи полягає у напрацюванні підходів до обробки та аналізу великих об'ємів даних спостережень ("big data problem"). Окрім результатів досліджень екзопланетних систем, очевидний інтерес становить також інформація про змінність блиску зір у часі при неперервних спостереженнях протягом ~30 діб.

Розділ 1. Загальні відомості про позасонячні планетні системи

1.1 Перші невдалі спроби

Взагалі кажучи, перші припущення, які можна трактувати як вислови про можливу наявність планетних систем біля віддалених зір, датуються іще античністю – так, давньогрецький філософ Епікур у своєму листі до Геродота стверджував, що існує нескінченна кількість світів, що одночасно схожі і несхожі на наш, але тим не менш через протиріччя із більш авторитетним на той час поглядом Аристотеля про неможливість існування більше, ніж одного світу це твердження було швидко забуте. Наступний сплеск інтересу до розглядуваної тут теми припав на XVI – XVII століття: у своїй роботі 1584 року «Про нескінченність, Всесвіт та світи» (італ. “De l’infinito, universo e mondi”) Джордано Бруно описує модель Всесвіту, у якій незліченна кількість планет обертаються навколо численних світил подібно до того, як Земля та інші планети обертаються навколо Сонця [1], тим самим заперечуючи твердження Аристотеля, яке панувало в наукових колах на той момент. Перші же практичні спроби знайти позасонячну планету приписують Християну Гюйгенсу, який у XVII столітті застосовував пряме спостереження для дослідження властивостей віддалених світил. На відміну від ряду подвійних зір, можливі планетні системи не піддалися детектуванню за допомогою тогочасної оптики, хоча у своїй посмертно виданій у 1698 році роботі «Космотеорос» (лат. “ΚΟΣΜΟΘΕΩΡΟΣ”) вчений не тільки говорить про існування планет біля далеких зір, а й першим описує можливість наявності на них життя.

Перша ж більш-менш вдала спроба віднайти планетну систему біля віддаленої зорі належала капітану Вільяму Стівену Джейкобу, який у 1855 році спостерігав подвійну систему 70 Змієносця з обсерваторії в індійському місті Мадрас. Так, він помітив неспівпадіння фактичного обертання компонентів системи з теоретичним, яке було виведено з результатів

спостережень, проведених у 1779 році Вільямом Гершелем, та законів небесної механіки – траєкторія руху світил являла собою незамкнений еліпс [3], неспівпадіння якого із передбаченого першим законом Кеплера моделлю спиралося на невизначені гравітаційні збурення. Так, для системи було встановлене систематичне чергування відхилень положень її компонентів від передбачених: Джейкоб створив власний набір ефемерид для подвійної зорі та порівняв зафіксовані протягом історії спостережень положення із ними. Отримані результати говорили про випередження дійсними результатами очікуваних у періоди з 1823 до 1830 рр. та з 1833 до 1842 рр. та відставання з 1830 до 1832 рр., а також з 1846 до приблизно 1855 рр. (моменту опису досліджень у відповідній роботі). Єдиним можливим обґрунтуванням подібних відхилень дослідник назвав наявність в системі додаткового третього «темного тіла», що згідно його уявлень не відбиває світло та фактично є невидимим – пізніше зазначається, що це тіло цілком може бути планетою. Джейкоб також запропонував параметри руху цього об'єкта: так, велика піввісь його орбіти на небесній сфері мала б становити $0''.08$ (або близько 23.4 А.О. в метричних одиницях з урахуванням сучасних даних про відстань до системи), ексцентриситет орбіти – 0.15, а період обертання – 26 років в неінвертованому напрямку [2]. Пізніше результати цього дослідження були підхоплені іншими фахівцями, серед яких були Вільгельм Шур, Вільям Манн, Шерберн Веслі Бернґем та інші – ці фахівці фіксували результати власних спостережень, а також уточнювали вже отримані результати. Серед них виділяється американський астроном Томас Сі, який приділив особливу увагу можливій наявності планети біля зорі: так, він стверджує, що навколо подвійної системи обертається тіло, велика піввісь орбіти якого порівняна з такими для Урана або Нептуна, а розмір та маса – із Марсом [3], хоча його колега Форест Рей Мультон пізніше спростував цю заяву, аргументувавши це тим, що така система була б вкрай нестабільною [4]. Після цього висловлювався ще ряд точок зору з приводу того, чи дійсно у подвійній системі 70 Змієносця є планети [5][6][7], згідно ж сучасним уявленням,

сформульованим фахівцями Макдональдської обсерваторії у 2006 році, наявність екзопланет біля описаної системи ані спростована, ані підтверджена: якщо ж там є одна або декілька планет, то вони можуть мати маси в діапазоні від 0.46 до 12.8 мас Юпітера, а великі піввісі їхніх орбіт становлять від 0.05 до 5.2 А.О. [8].

Описаний випадок вважається не тільки першою науково обґрунтованою спробою віднайти планетну систему біля віддаленої зорі, а й першою спробою застосування астрометрії для подібних цілей. З опису цієї спроби можна зробити висновок про головний недолік подібного методу: його надзвичайну трудоемність при малій кількості кандидатів, що взагалі придатні для такої перевірки та можуть бути досліджені на предмет наявності планет за одне дослідження - більшість знайдених на даний момент планет знаходилися та перевірялися за допомогою інших методів.

1.2 Перше в історії відкриття екзопланети

Першим задокументованим відкриттям екзопланетної системи вважається відкриття Б. Кемпбелла, Г. Уокера та С. Янга, які спиралися на характерні властивості спектрів ряду зір та порівнювали їх із дійсними положеннями та формами (оскільки важливою властивістю у розгляді були також еквівалентні ширини) ліній поглинання певних елементів для них – дослідники дійшли висновку про доплерівський зсув відповідних спектрів, що, в свою чергу, говорило про радіальний рух зір, який часто був змінним. Саме на основі даних про останній були зроблені припущення про те, гравітаційна взаємодія із якими тілами може змушувати зорі рухатися певним чином – із 15 описаних у дослідницькій роботі об'єктів вчені виділили γ Цефея, про наявність планетної системи у якій було повідомлено у роботі [9] – вхідні дані щодо параметрів радіального руху та його впливу на еквівалентну ширину спектральних ліній зображено на Рис. 1.1, розраховані на основі цього параметри планетного тіла – на таблиці, зображеній на Рис. 1.2.

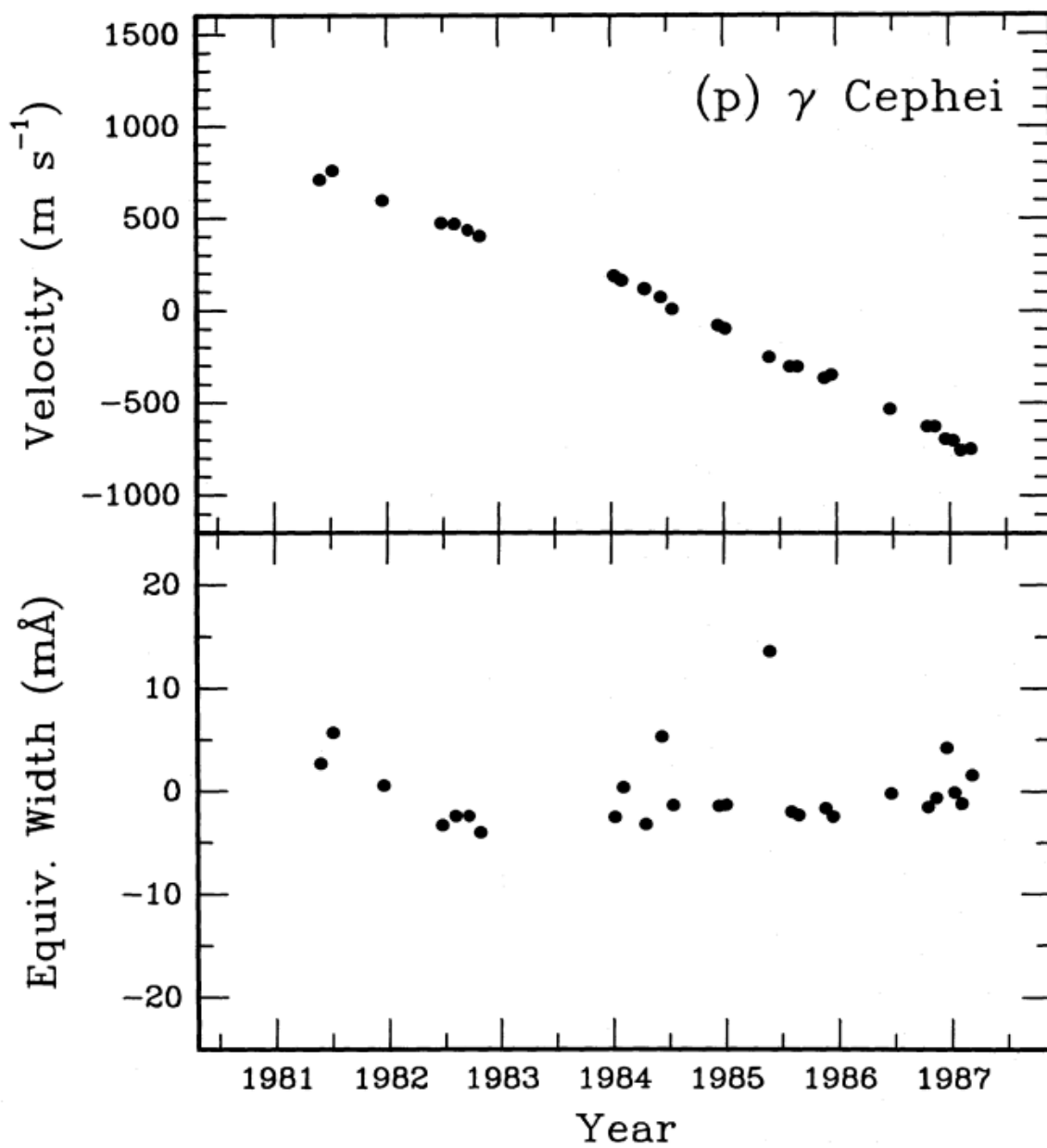


Рис. 1.1: Залежність радіальної швидкості та еквівалентної ширини характерних спектральних ліній від часу для γ Цефея

SUMMARY OF RESULTS								
HR (1)	Name (2)	Sp. (3)	S ($m s^{-1} yr^{-1}$) (4)	C ($m s^{-1} yr^{-2}$) (5)	$\langle \sigma_i \rangle$ ($m s^{-1}$) (6)	σ_e ($m s^{-1}$) (7)	$r(V, \Delta EW)$ (8)	Companion mass ^a (M_{\odot}) (9)
509.....	τ Cet	G8V	+2.0 \pm 1.2	-2.6 \pm 1.7	9.4	13.9	-0.05	<4.2
937.....	i Per	G0V	0.0 \pm 1.6	-2.6 \pm 1.8	11.3	13.7	-0.41	<13.3
1084.....	ϵ Eri	K2V	+2.3 \pm 1.7	-7.7 \pm 1.9	12.0	15.3	+0.02	1.2-4.7
1325.....	σ^2 Eri A	K1V	-1.1 \pm 1.6	+1.9 \pm 2.0	10.2	13.9	+0.06	<5.1
4112.....	36 UMa A	F8V	-4.7 \pm 1.6	+2.7 \pm 2.0	12.1	14.2	+0.67	1.2-14.7
4540.....	β Vir	F9V	-3.9 \pm 1.3	-0.4 \pm 1.5	10.7	12.9	-0.10	1.1-10.4
4983.....	β Com	G0V	-2.3 \pm 1.4	-3.3 \pm 1.7	11.4	14.0	+0.33	<9.6
5019.....	61 Vir	G6V	-0.6 \pm 1.7	+5.2 \pm 1.8	10.2	13.3	-0.05	0.9-7.4
5544.....	ζ Boo A	G8V	-7.3 ^b \pm 1.9	-4.3 ^b \pm 1.5	11.3	13.6	+0.04	1.6-7.5
7462.....	σ Dra	K0V	-1.2 \pm 1.4	+2.8 \pm 1.6	10.0	10.1	-0.25	<6.1
7602.....	β Aql A	G8IV	+3.9 \pm 1.2	+0.8 \pm 1.8	8.3	10.7	-0.17	1.1-14.3
7948.....	γ^2 Del	K1IV	+3.2 \pm 1.4	+5.1 \pm 2.0	8.5	13.3	+0.40	<6.0
7957.....	η Cep	K0IV	-0.6 \pm 1.6	+1.0 \pm 2.1	9.5	13.9	-0.09	<16.3
8085.....	61 Cyg A	K5V	+0.4 ^b \pm 1.9	+1.5 \pm 2.7	10.2	14.7	+0.01	<3.4
8974.....	γ Cep	K1III-IV	-263.2 \pm 4.8	-28.3 \pm 2.9	9.3	18.4 ^c	-0.02	1.7

^a Lower limits and value for γ Cep are $M_c \sin i$, upper limits are $M_c \sin^{1/3} i$.

^b Corrected for the effects of the visual binary companion.

^c Rms variation of velocity residuals about second order fit.

Рис. 1.2: Параметри планет, що могли б бути наявними біля ряду досліджених Кемпбеллом, Уокером та Янгом світил

Підтвердження наявності згаданої планетної системи припало на 2003 рік [10], а на даний момент метод радіальних швидкостей є одним з найбільш результативних - за його допомогою відкрито більш ніж 1000 об'єктів.

1.3 Застосування методу транзитів

Для нас же особливий інтерес становить метод транзитів для виявлення екзопланет, який, власне, і був використаний в цій роботі. Його застосування почалось із того, що у 1999 та 2000 рр. ціла група спостережних колективів за умов тісної співпраці задіяла його до планети біля зорі HD 209458, що зараз має власну назву Осіріс [12][14][15][16]. Взагалі кажучи, паралельно до цих спроб планету намагалися зареєструвати ще й за допомогою методу променевої швидкостей, оскільки HD 209458 була дуже імовірним кандидатом на наявність планети через схожість із зорею 51 Пегаса, що стала відомою після знакового відкриття швейцарських астрономів Мішеля Майора та Дідьє Кело, які за допомогою надчутливого спектрографу ELODIE знайшли біля неї планетне тіло [11]. Особливо важливим у цьому відкритті є той факт, що 51 Пегаса – зоря головної послідовності, подібна до Сонця, а підтвердження наявності екзопланети біля такого тіла у 1995 році було першим за всю історію спостережень - саме за це досягнення Майор та Кело стали лауреатами Нобелівської премії у 2019 році. Ще одним важливим

моментом є виділення цілого класу планет із результатів проведених швейцарськими дослідниками спостережень – до «подібних до 51 Пегаса» (англ. “51 Peg-like”) відносять газові планети, що мають як мінімум біля половини маси Юпітера та синхронно обертаються навколо зорі по орбіті із надзвичайно маленькою піввіссю: у випадку із 51 Pegasi b вона становить лише 0.0527 А.О. [11][12] Через вже названу схожість материнських зір наявність подібного планетного тіла біля HD 209458 була очікувана серед дослідників [12], тим паче, що наявність планетних тіл, масою та фізичними характеристиками схожих на Юпітер, що знаходяться на відстанях порядку 0.1 А.О. від материнської зорі, передбачувалася ще Отто Струве у 1952 році [13] у роботі, яка, щоправда, присвячена методу радіальних швидкостей. Взагалі кажучи, в рамках згаданих досліджень HD 209458 була не єдиною системою, перевіреною на наявність екзопланет: у своєму підході Грегорі Генрі, Джеффри Марсі та інші спочатку провели спектроскопічні дослідження на базі Кекської обсерваторії – у списку кандидатів зі спектрами, що відображають доплерівський рух, у 1996 році було 258 зір, а перспективне світило у сузір’ї Пегаса було додано до них лише у 1999 році [12]. Тільки точно визначивши закон зміни радіальної швидкості, дослідники приступили до фотометрії, заздалегідь знаючи деякі параметри транзиту, що очікувався біля розглянутої зорі – зокрема, його тривалість та періодичність. Спостереження від 7 листопада 1999 року показали, що тривалість транзиту становить близько 3.1 годин, а орбітальний період планети – близько 3.52 днів, що разом із даними про глибину транзиту та радіальну швидкість зорі внаслідок її взаємного руху із планетою дозволило зробити висновки про ряд параметрів, що достатньо повно описують властивості розглянутого планетного тіла. Відповідні фрагменти оригінальної статті “A TRANSITING “51 PEG-LIKE” PLANET” приведено нижче: профіль транзиту планети зображено на Рис. 1.3, таблиці на Рис. 1.4 та 1.5 показують деякі властивості як самого транзитного явища, так і дослідженої на його основі планети.

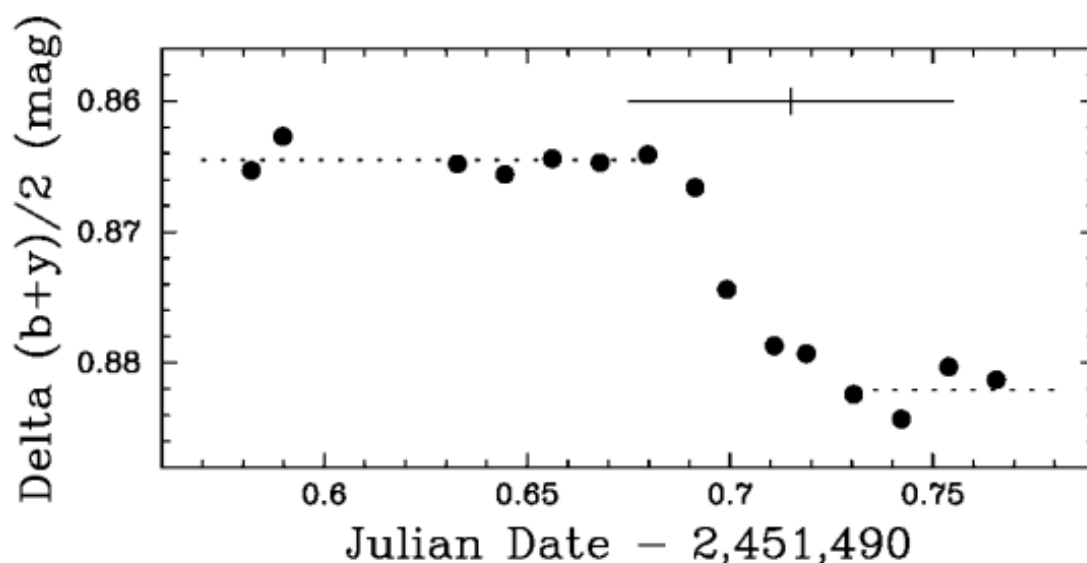


Рис. 1.3 – профіль транзити HD 209458b навколо материнської зорі, отриманий Г. Генрі, Дж. Марсі та іншими 7 листопада 1999 року за допомогою 0.8-м. автоматичного фотоелектричного телескопа (АТР) Т8 Фейрборнської обсерваторії в південній Аризоні. Параметр ординати $(b+y)/2$ визначається показниками кольору b та y за фотометричною системою Стрьомгрена

PHOTOMETRIC TRANSIT RESULTS

Parameter	Value	Uncertainty
Predicted time of midtransit (JD)	2,451,490.715	0.040
Observed time of midtransit (JD)	2,451,490.765	0.02
Photometric transit depth (mag)	0.017	0.002
Photometric transit depth (%)	1.58	0.18

Рис. 1.4 – параметри транзити, описаного на Рис. 1.3

DERIVED PLANETARY PROPERTIES		
Parameter	Value	Uncertainty
Radius (R_{Jup})	1.42	0.10
Mass (M_{Jup})	0.62	0.05
Mean density (g cm^{-3})	0.27	0.04
Semimajor axis (AU)	0.046	0.001

Рис. 1.5 – деякі властивості планети, що була досліджена в роботі “A TRANSITING “51 PEG-LIKE” PLANET”

Інший дослідницький колектив за участю Девіда Шарбонне, Мішеля Майора та інших з самого початку спостережень очікував побачити планету саме біля світила HD 209458 [14], поспостерігавши його з 1.2-метрового телескопа протягом 10 ночей з 26 серпня до 16 вересня 1999 року – незважаючи на великий розкид значень відносного світлового потоку через мерехтіння, спричинене атмосферою, на кривій було добре видно чіткі мінімуми, що можна однозначно відносити до транзитних явищ – фрагменти кривої, що демонструють їх типовий вид, зображено на Рис. 1.6 та 1.7.

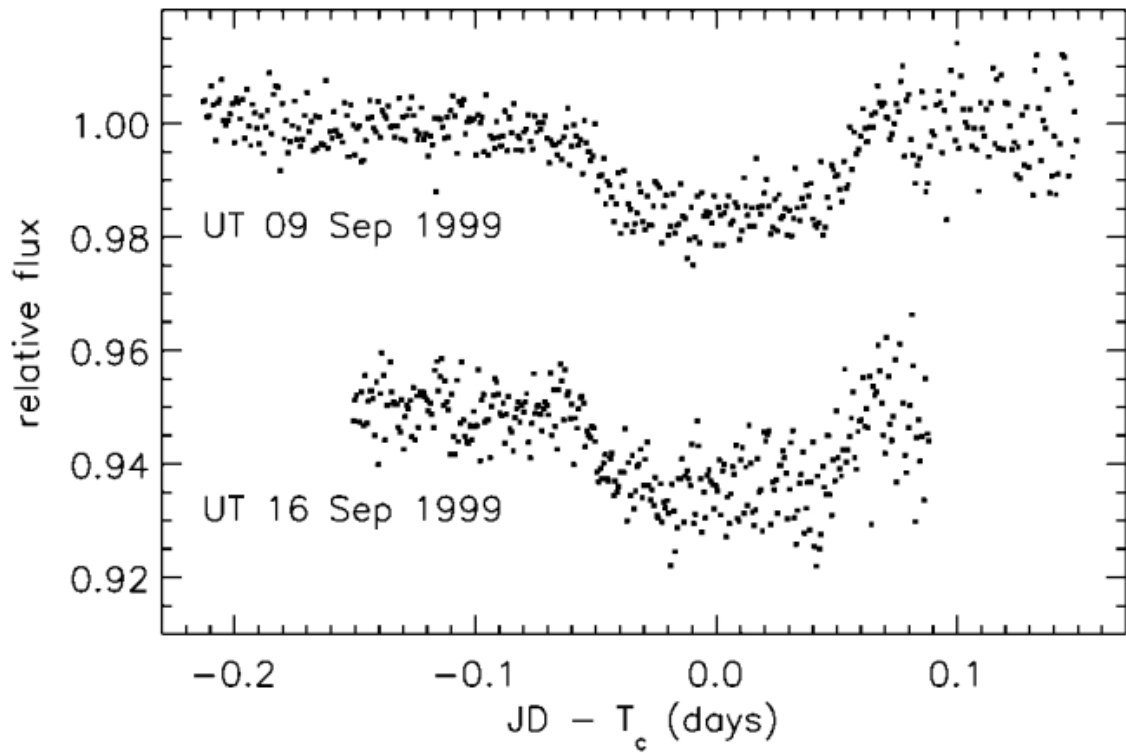


Рис. 1.6 – профіль кривої блиску HD 209458 під час транзитних явищ згідно із “DETECTION OF PLANETARY TRANSITS ACROSS A SUN-LIKE STAR”

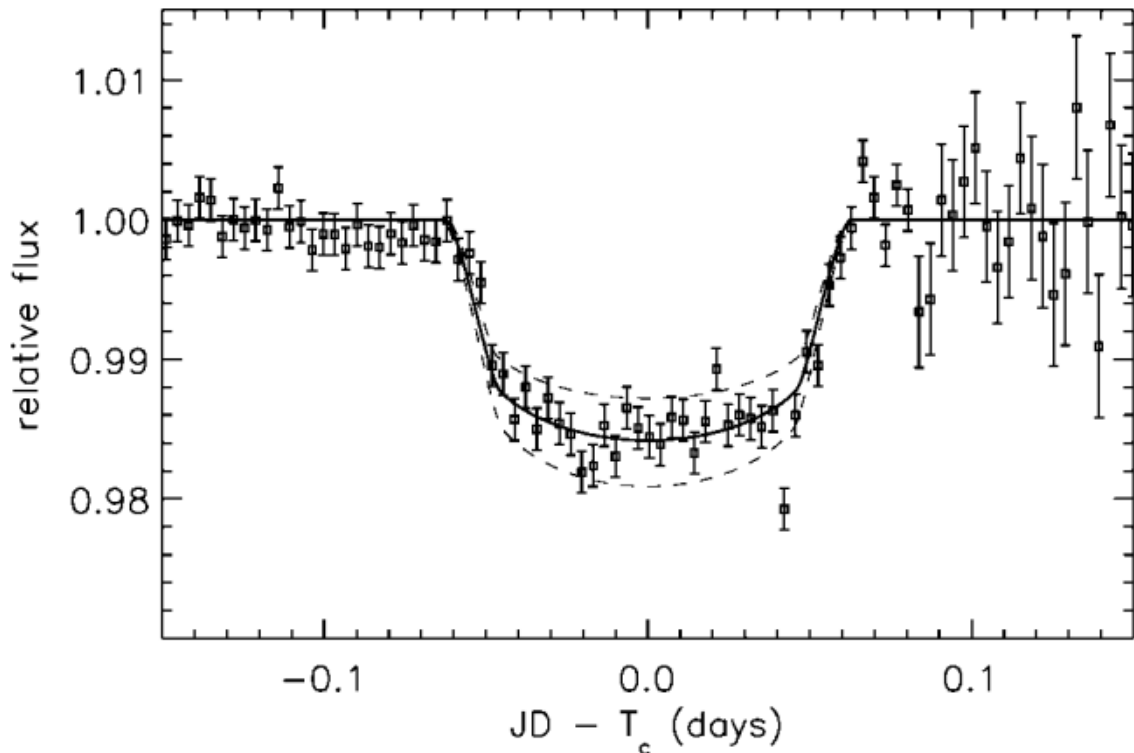


Рис. 1.7 – усереднений за допомогою зваженого методу найменших квадратів профіль кривої блиску під час явища транзити планетного тіла по диску HD 209458, також взятий з роботи Шарбоне, Майора та інших [14]

Також, після отримання даних щодо кривої блиску, було проведено дослідження радіальних швидкостей зорі з метою визначення додаткових параметрів планети HD 209458b, як, наприклад, орбітальний період $P = 3.5250 \pm 0.0003$ d, велика піввісь $a = 0.0467$ А.О. (згадаємо, що попередня група дослідників досягла такого самого результату, що добре узгоджується із теоретичними уявленнями про планети біля 51 Peg – like зір, на основі нахилу орбіти $i = 87^\circ.4$ була визначена також і маса планети $M_p = 0.63 M_{\text{Юр}}$).

Таким чином, незважаючи на те, що метод транзитів дозволяє відкрити лише біля 10-15% всіх позасонячних планет (оскільки саме такий відсоток можливих планет має такий нахил орбіти відносно променя зору земного спостерігача, що дозволив би його використовувати), він через швидкість і зручність використання є одним з найбільш ефективних методів для детектування позасонячних планетних систем, а у сукупності із іншими

доступними на даний момент методами (як, наприклад, метод променевих швидкостей) він також дозволяє визначати значну кількість планетних параметрів, як було показано в історичних прикладах вище.

1.4 Космічні та наземні місії для детектування екзопланет

Через описану в 1.3 ефективність та порівняно простий спосіб обробки спостережних даних цілий ряд місій, призначених для пошуку екзопланетних систем, використовують саме метод транзитів. Добре відомими серед них є проєкти SuperWASP та TRAPPIST, перша з яких стала однією з найуспішніших наземних місій з більш ніж 170 добре описаними об'єктами [39], а також OGLE – польсько-американська місія, спочатку призначена для проведення спостережень явищ гравітаційного мікролінзування, яка згодом використовувалася і для детектування екзопланет саме методом транзитів. Цей приклад показує ще одну важливу властивість методу транзитів, а саме можливість його використання на будь-якій апаратурі, якщо вона здатна фіксувати зміни блиску досліджуваного світила з достатньою точністю. Так, вже були спроби використання методу транзитів для пошуку екзопланет за допомогою даних місій James Webb та Hubble, які початково не були побудовані для детектування позасонячних планетних систем [40],[41].

Одним із ключових факторів можливостей дослідження знімків, отриманих космічними телескопами, на предмет наявності екзопланет на них, є висока якість даних, отриманих станціями за межами земної атмосфери. Ця якість є результатом ряду переваг, що полягають у відсутності або нівелюванні великої кількості збурюючих чинників, властивих для спостережень з поверхні Землі. Серед них можна виділити наступні:

- Можливість цілодобових спостережень. Для якісного дослідження транзитних явищ необхідна побудова неперервної кривої блиску на великих часових проміжках – у випадку зі спостереженнями з поверхні Землі можливість отримувати

безперервний набір даних для цього обмежуються зміною дня та ночі, а також погодними умовами. Ця проблема, як правило, вирішується залученням до спостережень великої кількості телескопів, що знаходяться у різних точках Земної кулі.

- Відсутність світлового забруднення та значної кількості розсіяного світла. Для реалізації методу транзитів необхідне проведення точної фотометрії із використанням чутливих світлоприймачів, дані від яких надмірне світлове забруднення може зіпсувати аж до повної непридатності для подальшої обробки. При спостереженнях із земної орбіти уникнути впливу розсіяного світла значно легше.
- Відсутність спотворень від атмосфери. Навіть за ідеальних спостережних умов вплив атмосфери на отримані дані може помітно знизити якість отриманих даних. Для того, щоб зменшити вплив земної атмосфери, зокрема, атмосферного поглинання та атмосферної турбулентності, спостереження проводяться у високогірних обсерваторіях. При космічних спостереженнях збурюючі фактори, властиві для земної атмосфери, повністю виключаються .
- Сприятливі умов для апаратури. Температура позаатмосферного простору може бути нижчою за атмосферну на 150-200 К, що само по собі забезпечує ефективне охолодження апаратури та, зокрема, ПЗЗ-матриць. За умови зменшення теплового шуму камери космічного апарату забезпечують більшу роздільну здатність, ніж їх аналоги на Землі. Окрім цього КА може використовуватися триваліший час без проведення технічного обслуговування (яке за умов виводу апарату на орбіту стає або вкрай технічно складним, або взагалі неможливим) через відсутність руйнівного впливу атмосферної вологи, забруднення, тощо.

Ці фактори стали вирішальними для планування космічних місій, спрямованих на відкриття позасонячних планетних систем, із використанням апаратів, що отримують дані про світила за межами земної атмосфери. Так, першим апаратом, що використовував цей метод, був космічний телескоп «CoRoT» (**C**onvection, **R**otation and planetary **T**ransits), запущений французьким космічним агентством у 2006 році. Взагалі кажучи, апаратура цієї місії, що першою в історії виконувала пошук позасонячних планетних тіл з 2006 по 2013 роки, була мало пристосована для пошуку екзопланет: вузьке порівняно з пізнішими місіями поле зору вкупі із невеликою роздільною здатністю ПЗС-матриць не дало того ефективного охоплення великих ділянок неба, яке було характерне для більш пізніх місій «Kepler» та критично важливої для нашої роботи «TESS», але тим не менш апарат французького космічного агентства став першим космічним телескопом, за допомогою якого був здійснений успішний пошук позасонячних планетних систем [17]. Наступним після місії «CoRoT» кроком в напрямку освоєння методу транзитів для пошуку екзопланет став запущений у 2009 році космічний телескоп «Kepler». Незважаючи на те, що апарат був розрахований на 3,5 роки функціонування, він залишався на орбіті більше 9 років [18], та на момент припинення функціонування у 2018 році став рекордсменом за кількістю відкритих позасонячних планетних систем із 2662 підтвердженими тілами. 25 липня 2018 року, за декілька місяців до того, як «Kepler» припинив свою роботу, відбувся ввід в стрій його наступника: останнього на даний момент космічного телескопа «TESS», що функціонує і на даний момент. Оскільки дані саме цього космічного апарата були використані в ході виконання даної роботи, наступний розділ буде присвячено детальному опису його систем, принципів роботи та особливостей обробки даних, отриманих за його допомогою.

Розділ 2. Місія TESS та її дані спостережень

Відсутність атмосфери, повністю або частково непрозорої для значної частини електромагнітного спектру, робить вигідним створення космічних телескопів – повністю автоматизованих спостережних станцій, що знаходяться на навколоземній орбіті: апарати такого типу дають змогу отримувати унікальні неперервні ряди даних порівняно із телескопами наземного базування. Отримані у цей спосіб дані підходять для виконання особливо вибагливих до якості вхідного набору задач, як-от детектування екзопланетних систем, а можливість проведення точної фотометрії робить особливо вигідним метод транзитів, на якому і базується принцип роботи місії Transiting Exoplanet Survey Satellite, або TESS. Тим не менш, окрім TESS в різний час на орбіті знаходилися інші космічні апарати, в основі роботи яких лежав той самий принцип, але принципово новою для розглянутого цього проекту є ідея отримання зображень всієї небесної сфери замість роботи із одним невеликим фрагментом, як, наприклад, у випадку місії Kepler. Так, місія TESS має на меті отримати дані про якомога більше планет земного типу, що знаходяться на віддаленні менше 200 світлових років від Землі – на момент запуску у 2018 році очікувалося, що з 20 тисяч відкритих апаратом екзопланет від 500 до 1000 будуть саме земного типу, а біля 70 будуть знаходитися в придатній для життя зоні [44]. Незважаючи на те, що подібні планетні системи для детектування не потребують настільки точного розгляду всього однієї ділянки, як у випадку з Kepler, можливість проведення точної фотометрії дозволила б якісно отримувати параметри планетних тіл у цілях подальшого більш детального розгляду із використанням інших методів досліджень [36].

Космічний телескоп TESS (загальний вигляд якого наведено на Рис. 2.1) вийшов на орбіту у 2018 році та став наступним після місії «Кеплер» кроком у організації космічних місій, призначених спеціально для пошуку планетних тіл поза межами Сонячної системи. Місія TESS зосереджена

головним чином біля зір спектральних класів G, K та M з видимою зоряною величиною більше 12 [36] (в подальшому буде описано кандидатуру на екзопланетну систему саме біля зорі K-класу). Цей апарат істотно відрізняється від свого ідейного попередника – КА “Kepler” – іншими характеристиками та цілями спостережень. Так, основною відмінністю є те, що TESS отримує дані від всієї небесної сфери, у той час як “Kepler” охоплював лише вузьку ділянку розміром 115 квадратних градусів в районі сузір’їв Лебедя та Ліри [38]. З одного боку, це забезпечує небачені до цього можливості вибору майже будь-якої ділянки неба для фотометричних і не тільки досліджень, з іншого ж боку, не можна очікувати такої самої точності спостережень, яку забезпечувала попередня місія – із цим пов’язана, зокрема, проблема ототожнення спостережуваних об’єктів - на одній ділянці неба може знаходитися значна кількість світил, які не розділяються, через що їх ототожнення за координатами через бази даних може виявитися неточним.

2.1 Космічний апарат TESS

Основою конструкції космічного апарату TESS є чотири ширококутні камери з ідентичними об’єктивами з полем зору $24^\circ \times 24^\circ$ [19]. Осі камер рознесені у вертикальній площині таким чином, що повне поле зору КА охоплює смугу небесної сфери $24^\circ \times 96^\circ$ починаючи від полюсам екліптики. Конструкція камери має три основні вузли: вузол детекторів, об’єктив та світлозахисну бленду.

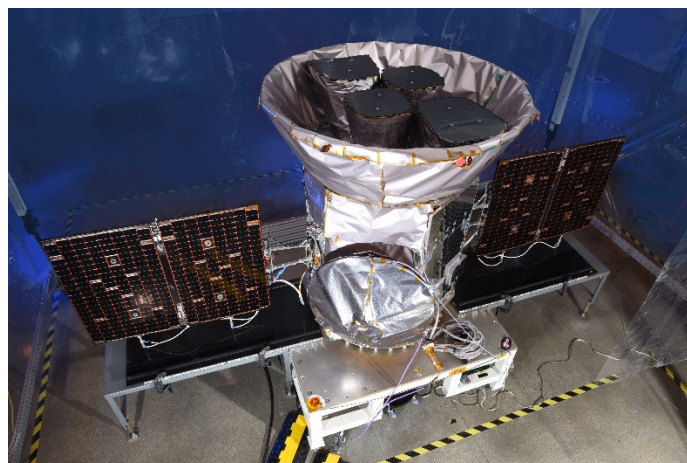


Рис. 2.1 – фотографія КА TESS перед його відправкою на орбіту [43]

Детектор світлового сигналу має лінійні розміри 63×63 мм та являє собою мозаїку з чотирьох ПЗЗ-матриць MIT/LL CCD-80 (число пікселів матриці - 2048×2048 , розмір пікселя - 15×15 мкм). Висока квантова ефективність ПЗЗ-матриць (90-95% у максимумі чутливості), виготовлених за технологією "освітлення з тилу" (backside illumination) дозволяє проводити фотометрію об'єктів до 13 зоряної величини.

Об'єктив камери складається з семи лінз та має ефективну апертуру 10.5 см. Оптична схема об'єктива представлена на Рис. 2.2. Збільшений розмір першого елемента оптичної системи забезпечує мінімальне геометричне віньєтування на знімках.

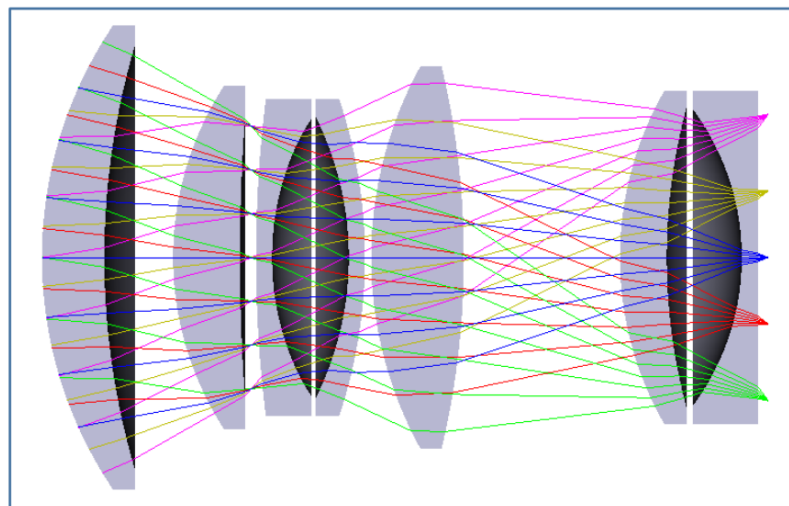


Рис. 2.2 – поперечний переріз лінзової системи об'єктива камери КА TESS зі схемою ходу пучків паралельних променів [19]

Всі елементи оптичної системи мають антиблікове покриття у діапазоні довжин хвиль від 600 до 1040 нм. Обмеження зі сторони коротких хвиль обумовлене фільтром на поверхні одного з елементів системи, зі сторони довгих – квантовою ефективністю ПЗЗ-матриць, яка на довжинах хвиль більше 1000 нм падає до нуля.

Для мінімізації впливу світла, розсіяного Землею та Місяцем кожна з камер космічного апарату оснащена блендою (щоправда, бленди на 1 та 4

камерах мають відмінну від 2 та 3 конфігурацію – 36° та 12° відповідно). Значне послаблення розсіяного світла, що надходить з кутів $> 10\text{-}20$ градусів від променю зору камери та його практично повна відсутність на кутах більше 30 градусів [19], вкупі з відсутністю атмосферних ефектів через знаходження апарату за межами щільної земної атмосфери дає змогу проводити фотометрію об'єктів навіть без проведення редукції темновими зображеннями та зображеннями рівномірного поля. Операційна температура об'єктивів камер КА становить -85°C , ПЗЗ-матриць - -80°C з відхиленнями менше 0.01°C за годину протягом 90% орбіти та знаходження апарату поза межами радіаційних поясів Землі (середня доза іонізуючого випромінювання, отриманого космічним апаратом, становить менше 1 кілорад) також відіграють значну роль в усуненні ефектів, не пов'язаних безпосередньо зі спостереженнями. Бортовий комп'ютер TESS забезпечує управління роботою камер, обробку та передачу на Землю отриманих даних.

2.2 Орбіта та програма спостережень TESS

TESS має еліптичну орбіту з періодом у 13.7 діб, тобто $\frac{1}{2}$ від такого для місячно-стаціонарного супутника. Перигей та апогей космічного апарату знаходиться на відстанях 108 та 375 тис. км відповідно, площина орбіти нахилена до площини екліптики, - щоб запобігти тривалих затемнень Землею та Місяцем. Апогей орбіти космічного апарату у будь-який момент часу знаходиться на віддалені у 90° від місячного, не усуваючи повністю, але усереднюючи гравітаційне збурення від Місяця [19]. Крім цього на орбіту космічного апарату впливає Сонце – збурення з його боку мають періодичність у 6 місяців, але тим не менш є короткочасними – вони не впливають на стабільність орбіти у масштабах десятиліть і більше. Довгострокові зміни ексцентриситету та нахилу орбіти мають періодичність у 8-12 років та викликані резонансними явищами, подібними до резонансу Лідова – Козаї [19]. Динаміку зміни елементів орбіти КА зображено на Рис. 2.3.

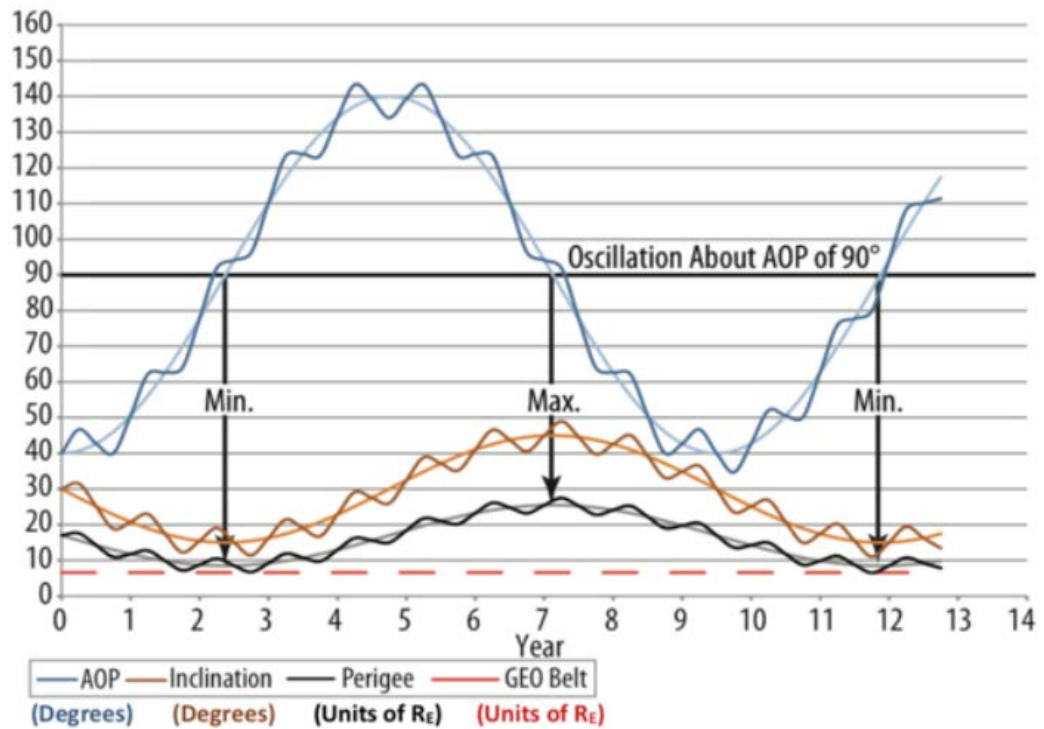


Рис. 2.3 – зміна елементів орбіти КА TESS із часом [19]

Для проведення спостережень місією TESS вся поверхня небесної сфери була розділена на сектори, спостереження одного сектору виконуються протягом проходження апаратом двох орбіт, або – згідно із орбітальним періодом апарату – близько 27 діб. Сектор для спостережень розміром $24^\circ \times 96^\circ$ орієнтується вздовж екліптичної довготи з позиціонуванням 4-ї камери на один із полюсів екліптики, причому для усунення світлових завад від Сонця, для спостережень обирається сектор вздовж протисонячної довготи. Після завершення зйомки одного сектору апарат переміщує своє поле зору на 27° на схід та продовжує зйомку як і у попередньому випадку, покриваючи таким чином 13 секторів на рік [19] (Рис. 2.4).

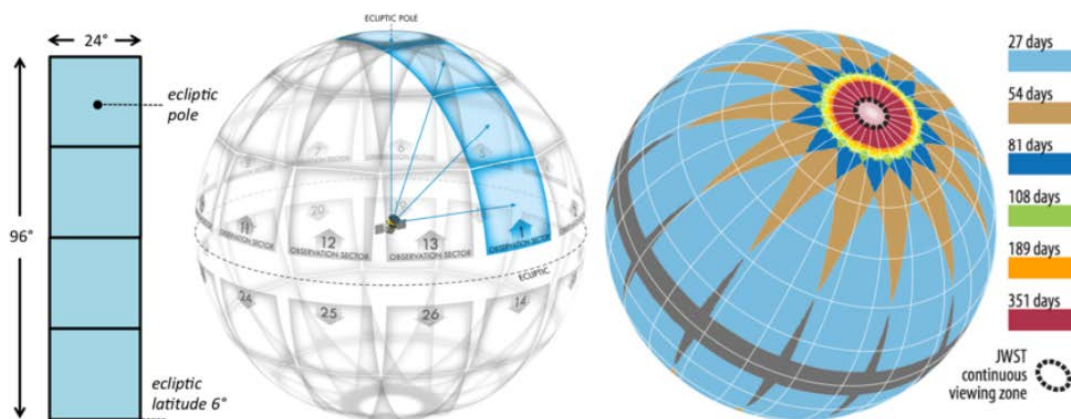


Рис. 2.4 – схема зйомки небесної сфери КА TESS протягом перших двох років спостережень. Як видно, при позиціонуванні 4-ї камери на полюс екліптики, на екліптичних широтах близько 30° починають з'являтися зони, зафіксовані більше ніж в одному секторі. Ділянка небесної сфери біля полюсу ($LAT > 73^\circ$) потрапляє в усі сектори, оскільки в усіх випадках четверта камера була наведена саме на неї [19].

Тим не менш, на практиці, через надмірний вплив розсіяного світла від Землі та Місяця сектори 14-16 та 24-26 за період другого року спостережень було необхідно зсунути (Рис. 2.6).

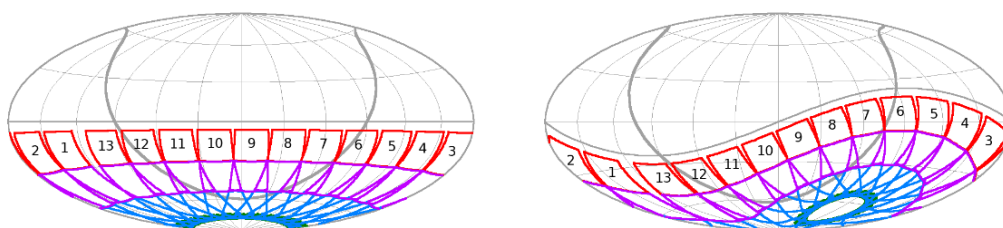


Рис. 2.5 Розташування секторів, знятих апаратом в південній півкулі екліптичної СК протягом першого року спостережень [21].

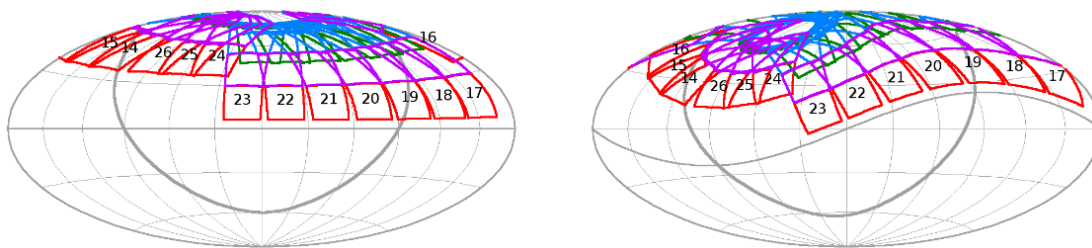


Рис. 2.6 Розташування секторів, знятих апаратом в північній півкулі екліптичної СК протягом другого року спостережень [21].

Протягом наступних років TESS виконував повторні спостереження зазначених областей, додатково спостерігаючи екліптику та окремі області в північній півкулі, де вплив розсіяного світла був вже не настільки суттєвим. На момент написання роботи отримано знімки 75 з 96 секторів – результатом роботи апарату за 7 років буде отримання даних з усієї поверхні небесної сфери (тут наведено лише деякі зі схем, що зображують розташування секторів спостережень).

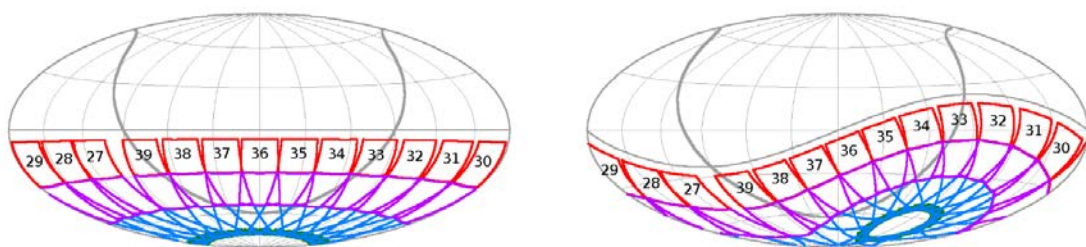


Рис. 2.7 Розташування секторів, знятих апаратом протягом третього року спостережень [21].

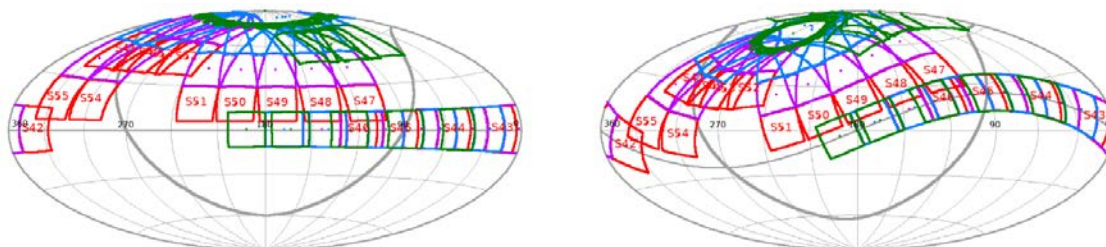


Рис. 2.8 Розташування секторів, знятих апаратом протягом четвертого року спостережень [21].

Під час спостереження сектора неба ПЗЗ-матриці всіх камер роблять експозиції тривалістю 2 секунди. Отримані зображення накопичуються

блоком обробки даних до досягнення сумарної 10-хвилинної експозиції. Зображення зберігаються до передачі на Землю під час проходження апаратом перигею. Відправлення даних на Землю відбувається із періодичністю у 27 діб (кожен другий орбітальний період після отримання даних з одного сектору). В подальшому відбувається додаткова обробка даних (за необхідності), створення декількох видів продуктів даних (калібровані та некалібровані повні знімки великих ділянок неба (секторів) Full Frame Images, що будуть використані далі; окремі файли з фрагментами неба, що містять особливо цікаві об'єкти Target Pixel Files; готові файли знятих кривих блиску Light Curve Files тощо) перед їх дослідженням та публікацією у загальному доступі (<https://archive.stsci.edu/missions-and-data/tess>) [22].

Розділ 3. Дослідження та пошук екзопланетних систем за даними місії TESS

Одним з головних завдань даної роботи є оцінка характеристик зображень архіву спостережень TESS та їх потенційних можливостей для пошуку і дослідження екзопланетних систем. Логічним кроком для виконання цього завдання є дослідження транзитів однієї з вже відомих екзопланет за даними TESS. Зокрема, цікаво порівняти криві блиску транзитів за наземними та космічними даними спостережень. В якості об'єкта для такого дослідження вибрано екзопланетну систему WASP-2b, яка спостерігалась в тому числі і з 1.5 м телескопом АЗТ-22 Майданацької Високогірної обсерваторії [47]. Крива блиску WASP-2b, отримана з телескопом АЗТ-22 приведена на Рис. 3.1. Протягом спостереження транзити з АЗТ-22 було отримано 330 ПЗЗ зображень з експозицією 20 с.

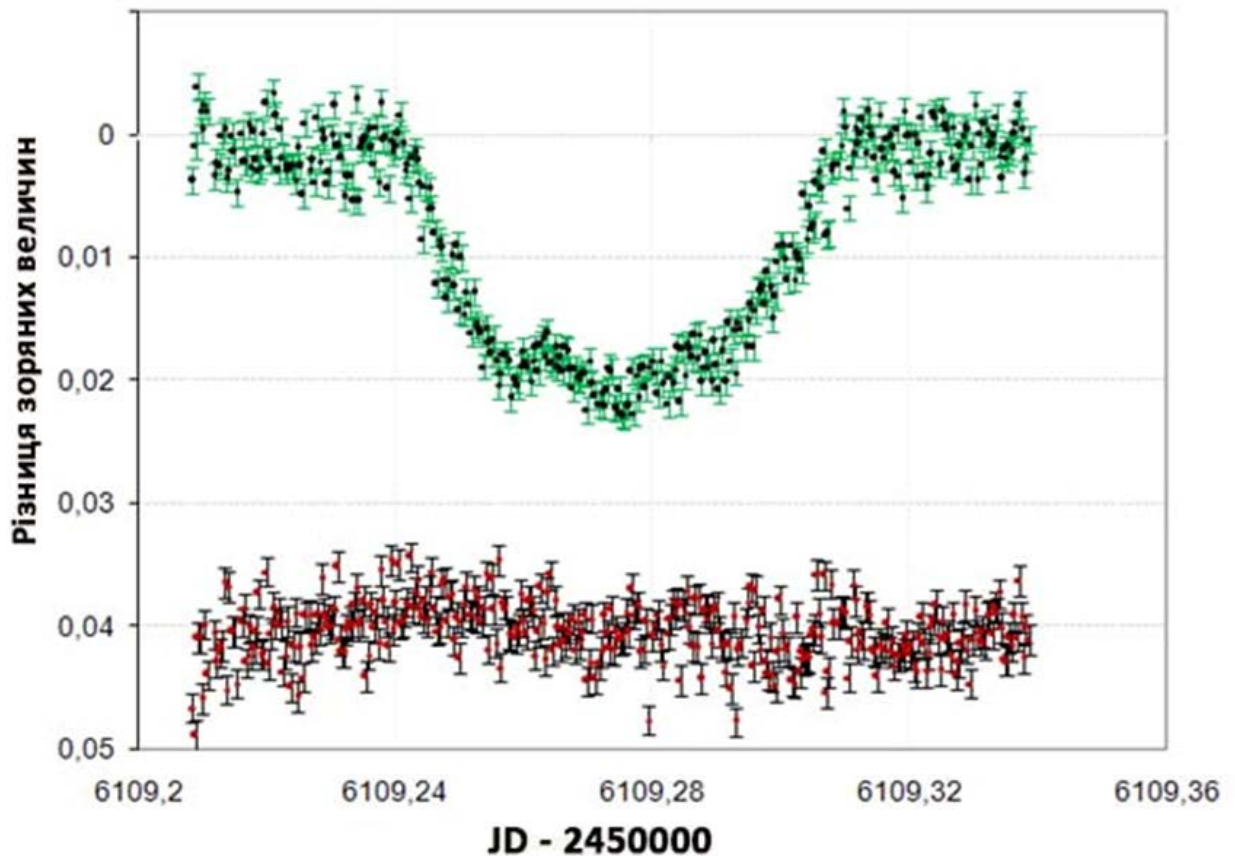


Рис. 3.1 Крива блиску WASP-2b, отримана за результатами спостережень з телескопом АЗТ-22 (вгорі) та крива блиску зорі порівняння (внизу)

3.1 Екзопланетна система WASP-2b

Система WASP-2b була відкрита у 2006 році роботизованим телескопом SuperWASP та підтверджена спектральними спостереженнями з спектрографом SOPHIE [25, 26]. WASP-2b є однією з найкраще вивчених екзопланет та яскраво вираженим представником так званих гарячих юпітерів – відносно нещодавно відкритого класу газових гігантів маси $M \approx 1M_{\text{Юр}}$ із надзвичайно малими ($a \sim 10^{-1} - 10^{-2}$ А.О.) відстанями до материнської зорі [46]. В ролі останньої в свою чергу зазвичай виступає карликова зоря класів від G до M, які, очевидно, є меншими та холоднішими за Сонце. Так, материнська зоря розглядуваної системи – WASP-2 – має спектральний клас K1V, масу $M = 0.79 M_{\odot}$ та радіус порядку $0.9 R_{\odot}$ - ці характеристики при подальших розрахунках будуть вважатися відомими. Сама ж планета має добре визначені орбітальні параметри, які включають в себе, зокрема, велику

піввісь орбіти ($a = 0.0307 \pm 0.0011$ А.О.), орбітальний період ($P = \sim 2.1522$ днів), нахил орбіти ($i = 87 \pm 3^\circ$), іноді також називають значення ексцентриситету, аргументу перицентру та орбітального періода. Сама по собі планета має розміри трохи більше юпітеріанських ($R = \sim 1.04 R_{Jup}$), але тим не менш має меншу щільність та меншу масу, ніж найбільша планета Сонячної системи – це обумовлено надмалою відстанню до материнської зорі та – як наслідок – високу температуру порядку $2.2 \cdot 10^3$ К [30,31,32]. Ця робота не має на меті отримати всі елементи орбіти WASP-2b, оскільки першочерговою задачею є використання даних, доступних із використанням методу транзитів, але тим не менш далі буде наведено порівняння розрахункових параметрів планети із доступними в літературі.

3.1.1 WASP-2b в архіві зображень TESS

Страсбурзька база даних містить інформацію про те, що WASP-2b розташована за координатами $\alpha = 20h30'54.12824''$, $\delta = +06^\circ 25' 46.3413''$, що в свою чергу дає точну вказівку на те, на яких знімках TESS необхідно її шукати. Схема на Рис. 2.8 дає змогу приблизно оцінити знаходження необхідного сектору (у випадку із WASP-2b це сектори 54 та 55), для більш точного ж визначення необхідного сектора пошуку можна скористатися зображенням з Рис. 3.2 [27], які достатньо точно зображують обрані для дослідження сектори.

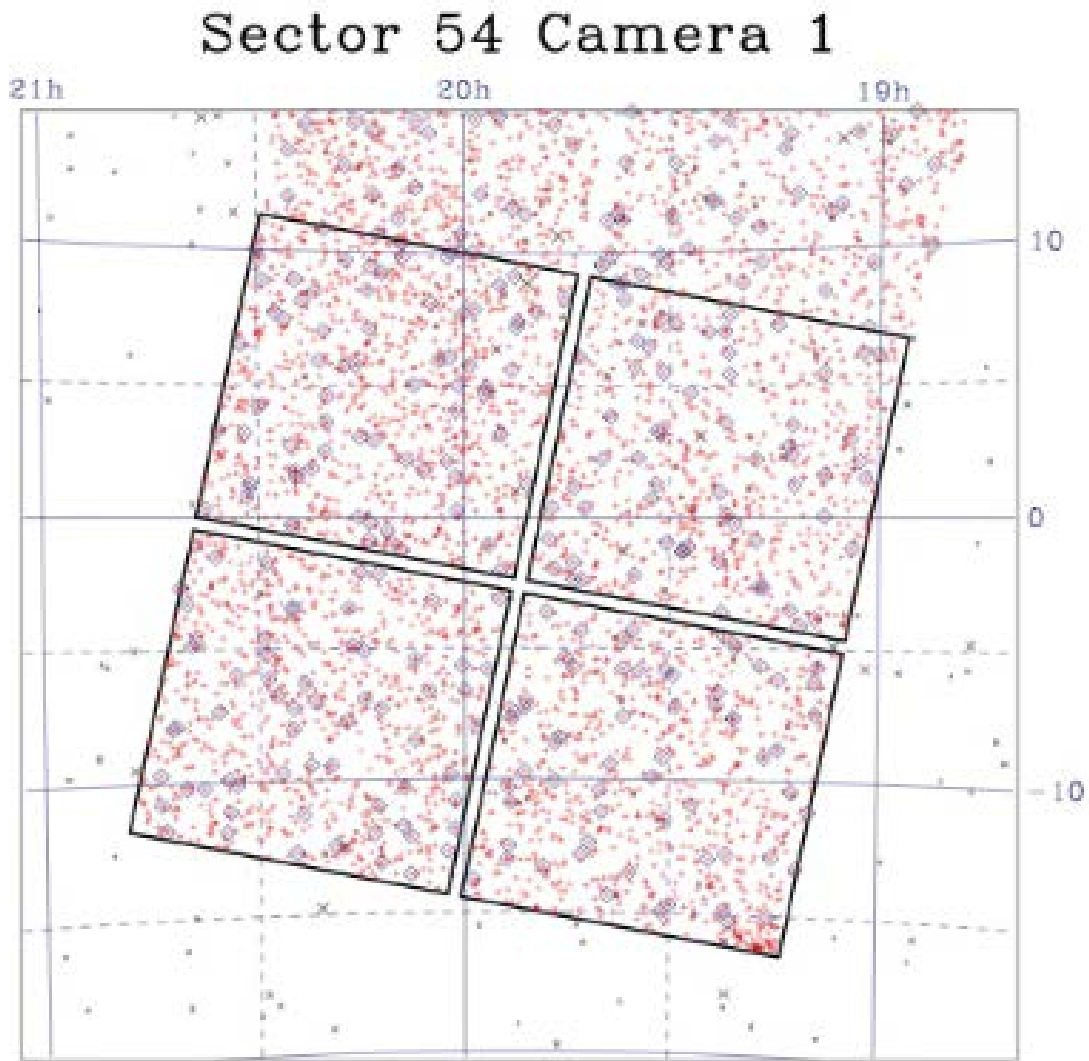


Рис. 3.2 Масштабоване зображення мапи ділянки зоряного неба у 54 секторі, покритої 1-ю камерою TESS. У полі зору ПЗЗ-1 (верхній лівий квадрат) знаходиться система WASP-2b [27]

Звідси, а також з сайту, звідки ці зображення були отримані [27], можна досить точно встановити, що об'єкт за необхідними нам координатами знаходиться у полі зору 1-ї камери у 54 секторі (Рис. 3.2) (камера була спрямована на точку небесної сфери з координатами RA (J2000): 290.1210° ; Dec (J2000): 32.6073° ; крен апарату відносно небесного меридіану становив 13.4565°). Представлена на Рис. 3.4 мапа сектору має виділені синім позначки світил, що представляють особливий дослідницький інтерес (General Investigation Targets) – у їхній список входять як вже добре досліджені (наприклад, WASP-2b), так і перспективні системи, що як правило

в подальшому розглядаються більш детально – однією з таких є об'єкт TYC 503-1272-1, більш детально розглянутий в подальшому.

Знаючи, у якому секторі знаходиться необхідний об'єкт, можна зекономити час та пам'ять комп'ютера при завантаженні відповідних знімків. Серія зображень, що містить WASP-2, була отримана у проміжок часу, зазначений у таблиці нижче (Таблиця 3.1 [28]), та збережена у стандартному форматі для астрономічних зображень FITS (файли мають розширення .fits, відкриваються та обробляються у спеціалізованих програмних оболонках MaxImDL, AstroImageJ тощо). Для обробки була обрана серія каліброваних знімків з Mikulski Archive for Space Telescopes [24].

Таблиця 3.1 Час проходження апаратом TESS 115 та 116 орбіт, протягом проходження яких були отримані знімки 54 сектору. Система та внутрішній для неї опис даних використовують калібровану для зручності обробки юліанську шкалу TJD, формула для якої зазначена на Табл. [28]

	UTC	TJD ^a	Cadence #
Orbit 115 start	2022-07-09 09:24:47	2769.89370	1110556
Orbit 115 end	2022-07-21 20:02:47	2782.33675	1119515
Orbit 116 start	2022-07-23 00:34:47	2783.52564	1120371
Orbit 116 end	2022-08-04 15:02:46	2796.12841	1129445

$$^a \text{TJD} = \text{TESS JD} = \text{JD} - 2,457,000.0$$

3.1.2 Доступ до даних місії TESS

Дані, отримані космічним телескопом, знаходяться у відкритому доступі та можуть бути переглянуті або завантажені з сайту архіву Mikulski Archive for Space Telescopes як у вигляді наборів суцільних експозицій з кожної з камер, так і у вигляді вирізок із окремими об'єктами – так, сервіс TESScut (<https://mast.stsci.edu/tesscut/>) дає змогу за назвою об'єкта та деякими додатковими параметрами завантажити набір зображень для його дослідження [23] (Рис. 3.3).

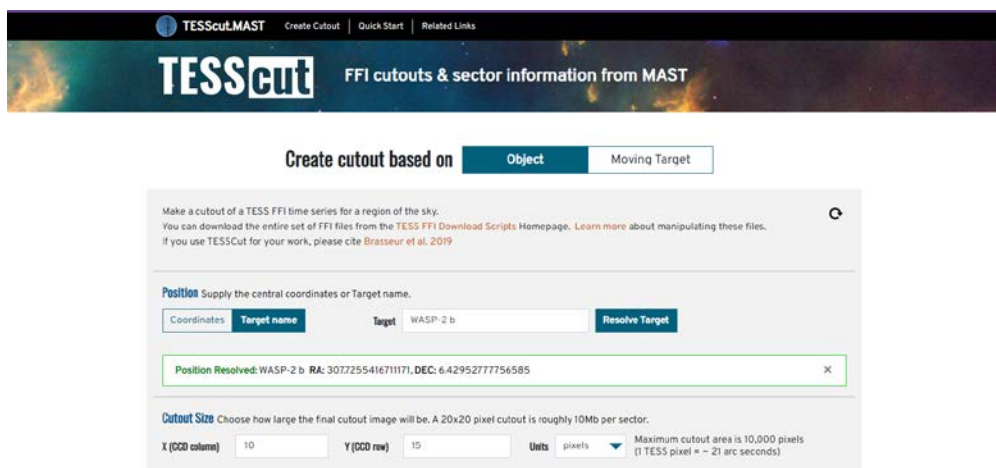


Рис. 3.3 Користувацький інтерфейс сервісу TESScut для завантаження ділянок зоряного неба із вибраним об'єктом [23]

Для виконання задач цієї роботи було використане завантаження суцільних знімків секторів зі сторінки Bulk Download (Рис. 3.4) (https://archive.stsci.edu/tess/bulk_downloads/bulk_downloads_ffi-tp-lc-dv.html) [24] через необхідність відпрацювання пошуку об'єкту на великому зображенні за відомими координатами та можливість використання тих самих даних у цілях пошуку нових планетних систем.

Full Frame Images				(Fast) Target Pixel, (Fast) Light Curve, and Data Validation Files			
Sector	Type	cURL File	DOI	Sector(s)	Type	cURL File	DOI
Calibrated FFIs							
Sector 75	Calibrated	tesscut_sector_75_ffi.sh	DOI	Sector 75	Target Pixel	tesscut_sector_75_tp.sh	DOI
Sector 74	Calibrated	tesscut_sector_74_ffi.sh	DOI	Sector 74	Target Pixel	tesscut_sector_74_tp.sh	DOI
Sector 73	Calibrated	tesscut_sector_73_ffi.sh	DOI	Sector 73	Target Pixel	tesscut_sector_73_tp.sh	DOI
Sector 72	Calibrated	tesscut_sector_72_ffi.sh	DOI	Sector 72	Target Pixel	tesscut_sector_72_tp.sh	DOI
Sector 71	Calibrated	tesscut_sector_71_ffi.sh	DOI	Sector 71	Target Pixel	tesscut_sector_71_tp.sh	DOI
Sector 70	Calibrated	tesscut_sector_70_ffi.sh	DOI	Sector 70	Target Pixel	tesscut_sector_70_tp.sh	DOI
Sector 69	Calibrated	tesscut_sector_69_ffi.sh	DOI	Sector 69	Target Pixel	tesscut_sector_69_tp.sh	DOI
Sector 68	Calibrated	tesscut_sector_68_ffi.sh	DOI	Sector 68	Target Pixel	tesscut_sector_68_tp.sh	DOI
Sector 67	Calibrated	tesscut_sector_67_ffi.sh	DOI	Sector 67	Target Pixel	tesscut_sector_67_tp.sh	DOI
Sector 66	Calibrated	tesscut_sector_66_ffi.sh	DOI	Sector 66	Target Pixel	tesscut_sector_66_tp.sh	DOI
Sector 65	Calibrated	tesscut_sector_65_ffi.sh	DOI	Sector 65	Target Pixel	tesscut_sector_65_tp.sh	DOI
Sector 64	Calibrated	tesscut_sector_64_ffi.sh	DOI	Sector 64	Target Pixel	tesscut_sector_64_tp.sh	DOI
Sector 63	Calibrated	tesscut_sector_63_ffi.sh	DOI	Sector 63	Target Pixel	tesscut_sector_63_tp.sh	DOI

Рис. 3.4 Сторінка для завантаження серій знімків секторів, знятих місією TESS, TESS Bulk Download [24]

Data Release Notes (нотатки до випуску даних) у свою чергу доступні за окремим посиланням: https://archive.stsci.edu/tess/tess_drn.html. Користувачу надається файл скрипту з розширенням .sh для завантаження серії зображень безпосередньо у потрібну локальну директорію. Під час виконання дипломної роботи файл скрипту було модифіковано для отримання зображень тільки з однієї ПЗЗ (№1) першої камери, оскільки саме ця ПЗЗ реєструвала зображення WASP-2b.

3.1.3 Дані TESS для сектора 54 - загальна характеристика

Архів даних TESS для ПЗЗ №1 камери 1 сектору 54 включає 3604 зображення, які було завантажено з використанням скрипту на локальний комп'ютер.

Усі зображення вибірки мають розмір 2136×2078 пікселів та збережені у файлах формату FITS розміром 17 МБ кожен. Використання FITS, або Flexible Image Transport System, має ряд переваг перед іншими форматами даних: так, окрім безпосередньо зображення, файли цього розширення мають заголовок у форматі ASCII – Header – із фіксованим розміром, кратним 2880 байтів, у якому містяться метадані даного зображення. Серед іншого це забезпечує інформацію про просторове та фотометричне калібрування зображення, прив'язку його до певного моменту часу, зберігає інформацію про можливі похибки вимірювань, тощо [44]. При попередній обробці даних командою TESS моменти експозицій кадрів приведено до барицентричної шкали часу, тобто виключено вплив руху Землі навколо Сонця та положення КА на орбіті.

3.1.4 Обробка даних та крива блиску WASP-2b

Обробка отриманої вибірки зображень проведена з використанням програмної оболонки AstroImageJ [45] (Рис. 3.5). Ця оболонка розроблена спеціально для фотометрії транзитів екзопланет та надає можливість обробки

масивних рядів зображень з синхронним отриманням кривих блиску сотень зір. Для вимірювання блиску (або потоку випромінювання) в AstroImageJ застосовується метод апертурної фотометрії. Окрім даних фотометрії, AstroImageJ надає можливість роботи з координатами об'єктів та має цілий ряд корисних підпрограм для моделювання та графічного представлення результатів. Всі отримані дані акумулюються у вигляді таблиць, які можна зберегти у вигляді текстових файлів для подальшого використання .

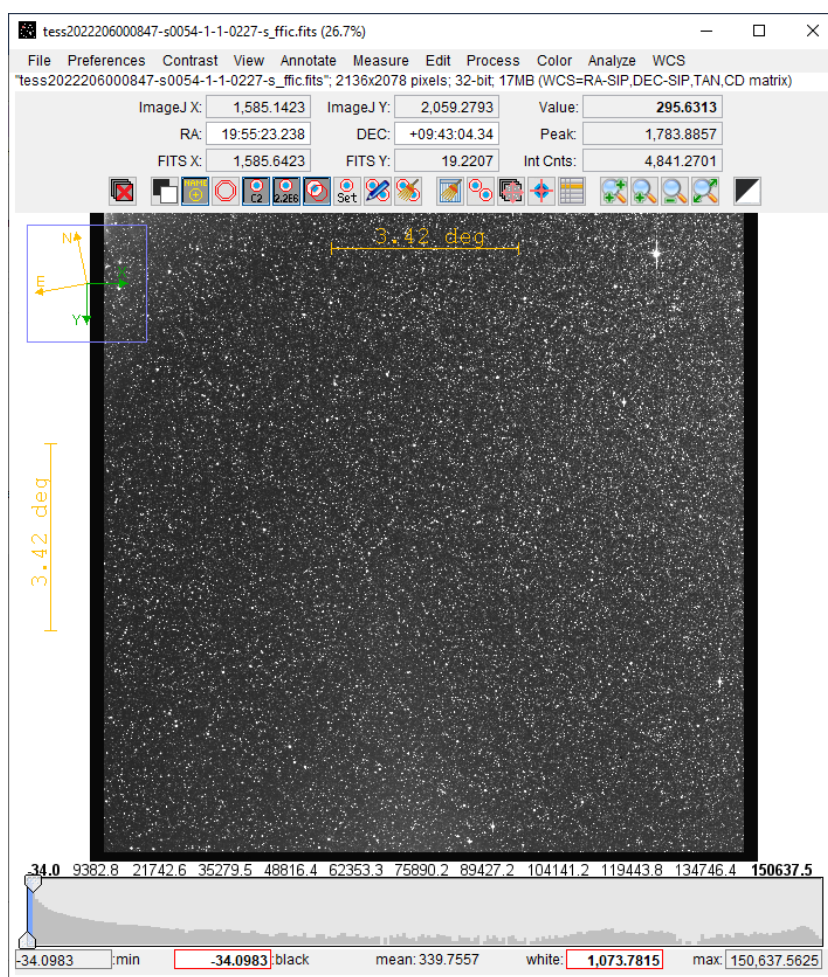


Рис. 3.5 Вікно роботи з зображенням AstroImageJ з першим знімком
завантаженої послідовності зображень TESS

За допомогою AstroImageJ було виконано попередній загальний аналіз серії зображень з ПЗЗ №1 камери 1 сектора 54. Вимірювання величини фону неба для всіх зображень серії одразу виявило частину кадрів, які були забруднені розсіяним світлом та мали підвищені значення фону (Рис. 3.6)

Висока інтенсивність розсіяного світла (за рахунок відбитого з боку Землі та Місяця сонячного світла) на зображеннях, отриманих з 14 до 20 липня та 29-30 липня по 2 серпня 2022 року робить їх непридатними для обробки. Це підкреслюється у Data Release Notes команди TESS щодо сектору 54 [28], та добре простежується на графіку Рис. 3.6.

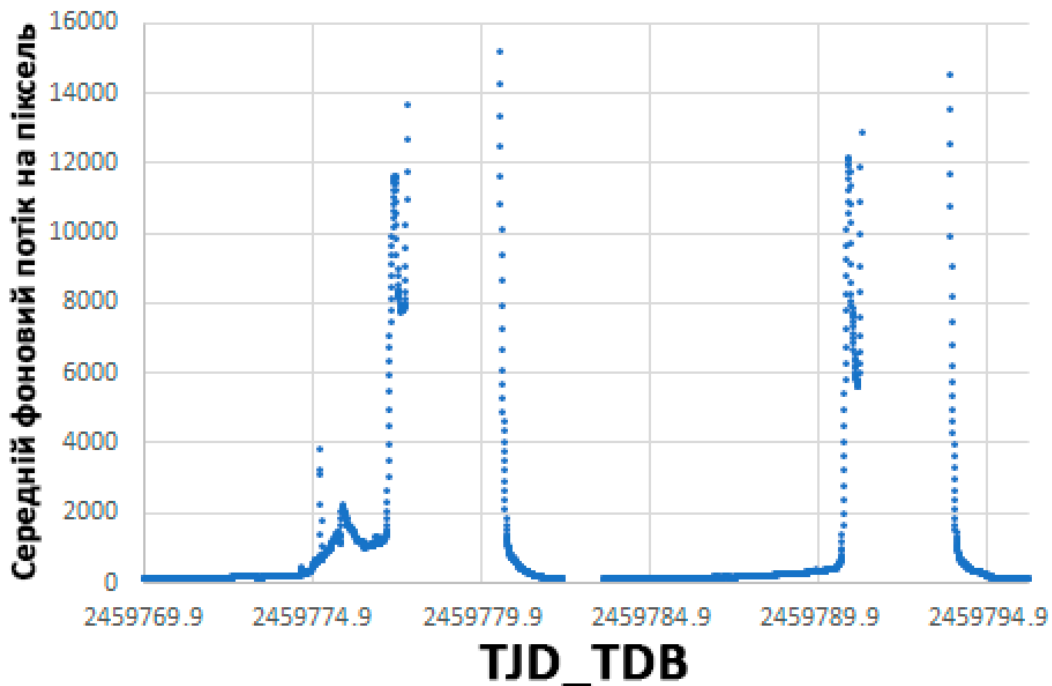


Рис. 3.6 Медіанний потік від фону неба на один піксель по кільцевій діафрагмі за період спостережень сектору 54. Видно сильне зростання потоку у періоди, вказані в тексті [28].

Слід відзначити, що розподіл інтенсивності розсіяного світла для частини кадрів є нерівномірним та має виражений характер бліків в оптиці. Деякі кадри засвічені лише частково, а невелика частина - повністю пересвічені (переповнення ПЗЗ). Оскільки високоточна фотометрія неможлива при наявності значної сторонньої засвітки, кадри з явними завадами від розсіяного світла були виключені з вихідної вибірки, при цьому кількість придатних для фотометрії зображень скоротилась до ~ 2800 . Вся подальша обробка зображень проводилась саме з цією скороченою вибіркою.

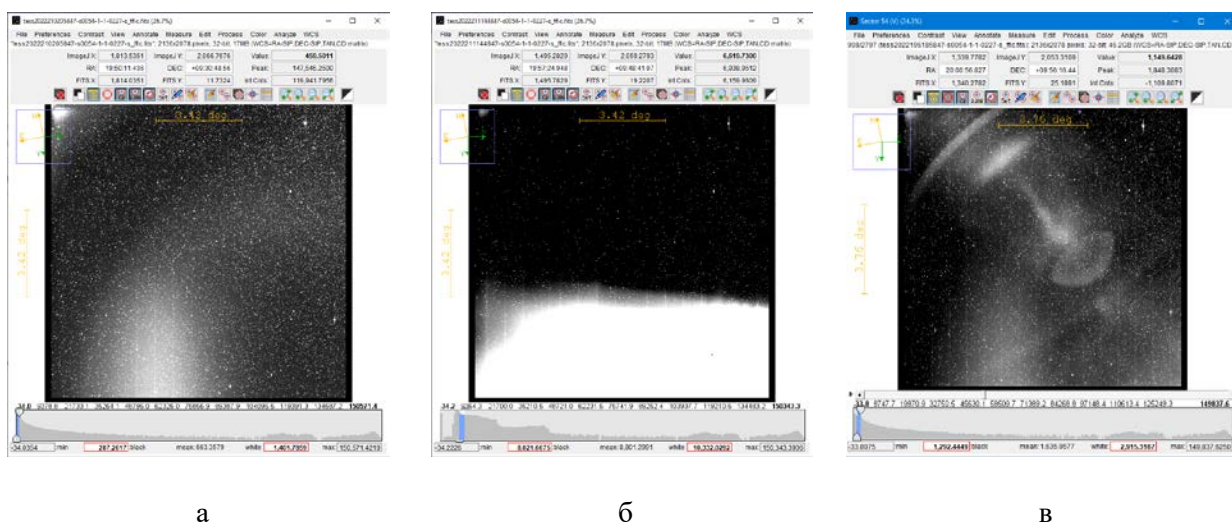


Рис. 3.7 Кадри зі слабким (а) та сильним (б) засвітленням, а також кадр з білками в оптиці камери (в).

Важливим фактором, що впливає на точність апертурної фотометрії серії зображень, є розподіл інтенсивності у зображенні зорі (функція розсіювання точки = ФРТ) та його еволюція в межах серії зображень. AstroImageJ надає можливість оцінки загальноприйнятих параметрів ФРТ - розміру зображення зорі на рівні 0.5 інтенсивності (FWHM) та його еліптичності (відхилення розподілу інтенсивності від центральної симетрії). Приклад профілю ФРТ, отриманого з AstroImageJ по ізольованому зображенню зорі у одному з кадрів вибірки сектора 54 наведено на Рис. 3.8.

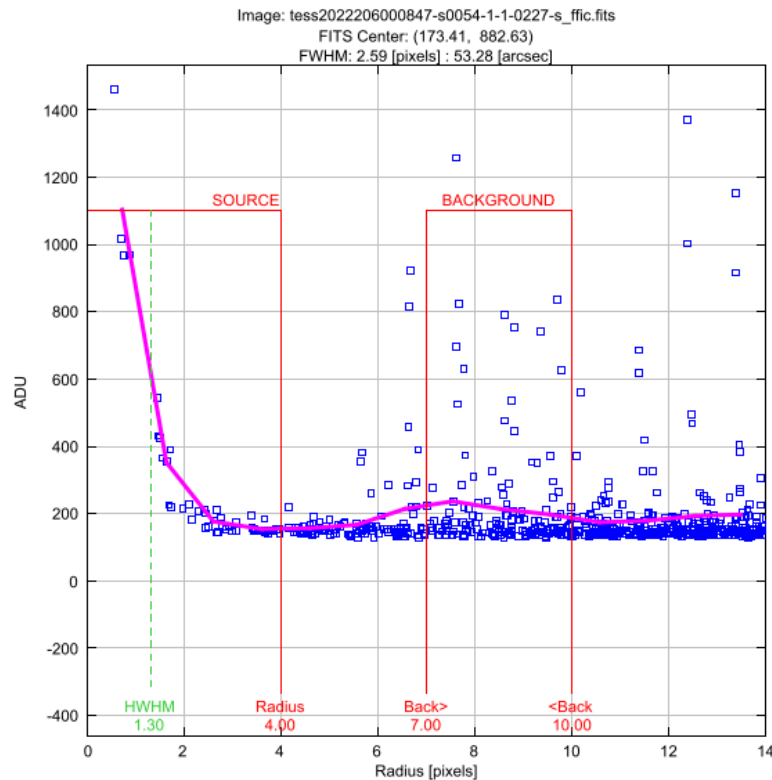


Рис. 3.8 Профіль розподілу інтенсивності у ФРТ ізольованого зображення зорі, отриманий з AstroImageJ. Показані параметри ФРТ та рекомендовані розміри фотометричних апертур.

Для оцінки параметрів ФРТ було обрано ізольовану зорю середньої інтенсивності. Оцінка параметрів ФРТ з AstroImageJ для всіх кадрів вибірки показала незмінність розміру зображення зорі (FWHM) та його еліптичності з точністю до похибок вимірювання. Лише у декількох кадрах виявлено незначні збурення еліптичності, пов'язані, очевидно, з роботою систем орієнтації КА.

Як добре відомо, чутливість (квантовий вихід) окремих пікселів ПЗЗ матриць може відрізнятись на певну величину. Ця відмінність не компенсується на 100% при процедурах первинної обробки зображень, і тому може бути джерелом похибок при апертурній фотометрії серій зображень у випадках, коли зоря від кадру до кадру змінює положення відносно пікселів ПЗЗ. Ця похибка відсутня в тому ідеальному випадку, коли зоря не змінює свого положення від кадру до кадру, тобто, її сумарна інтенсивність

формується одними і тими ж пікселями на протязі всього періоду спостережень. Програмна оболонка AstroImageJ має можливість вимірювання положення центроїду інтенсивності зорі відносно системи координат, прив'язаної до пікселів ПЗЗ матриці з точністю краще 1%. Використовуючи відповідну процедуру AstroImageJ, було проведено вимірювання координат X,Y центроїду вибраної ізольованої зорі для всіх кадрів вибірки сектора 54. Результати вимірювання координат представлені на Рис. 3.9а, б. З Рис 3.9а видно, що на протязі всього періоду спостережень вибірки центроїд зорі практично не змінював положення і переміщувався в межах менше ± 0.1 пікселя. На Рис 3.9б ці переміщення представлені в кутовій мірі - з урахуванням масштабу зображення $21''/\text{піксель}$. Еволюції центроїду зорі на Рис 3.9б в межах $\pm 1.5''$ напряду відображають роботу системи позиціонування КА TESS на протязі часу отримання серії зображень сектору 54. Таким чином, така висока стабільність позиціонування дозволяє сподіватись на відсутність пов'язаних із цим похибок при фотометрії цих даних.

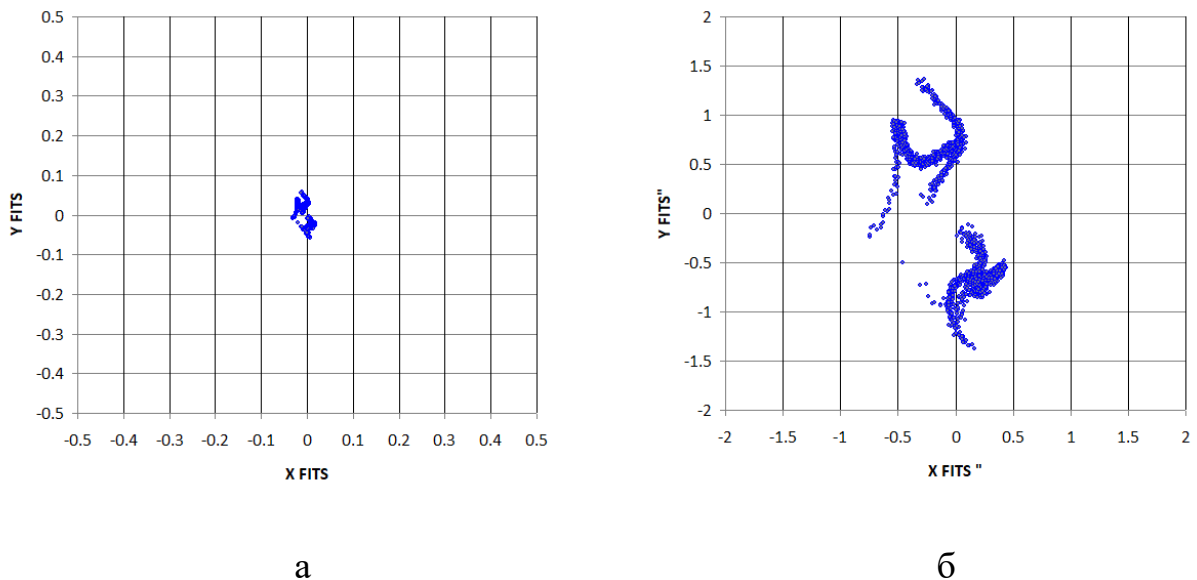


Рис. 3.9 Зміни положень центроїду зорі відносно пікселів ПЗЗ-матриці (а) та в кутових секундах (б) для всіх зображень вибірки сектору 54

Розглянуті вище результати загального аналізу характеристик серії зображень сектора 54 TESS показали високу стабільність параметрів отриманих зображень з часом впродовж періоду спостережень (27 діб), що дає підстави очікувати високоточних результатів фотометрії спостережуваних об'єктів.

3.1.5 Обробка даних та крива відносної інтенсивності WASP-2b

Першим кроком у отриманні даних фотометрії стало ототожнення WASP-2b на зображенні на основі інформації про об'єкт, відомої з загальнодоступних баз даних. Для цього був використаний інтерактивний атлас зоряного неба Aladin із додатком у вигляді астрономічної бази даних CDS SIMBAD, за допомогою якого можливий пошук відомих систем за назвами та зручне отримання виключної інформації про систему, як-от координати на небесній сфері, параметри зорі тощо.

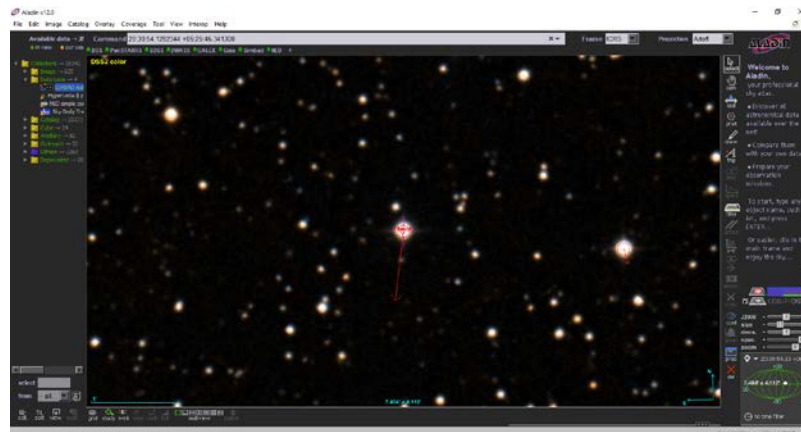


Рис. 3.10 Система WASP-2b та її найближче оточення в атласі Aladin

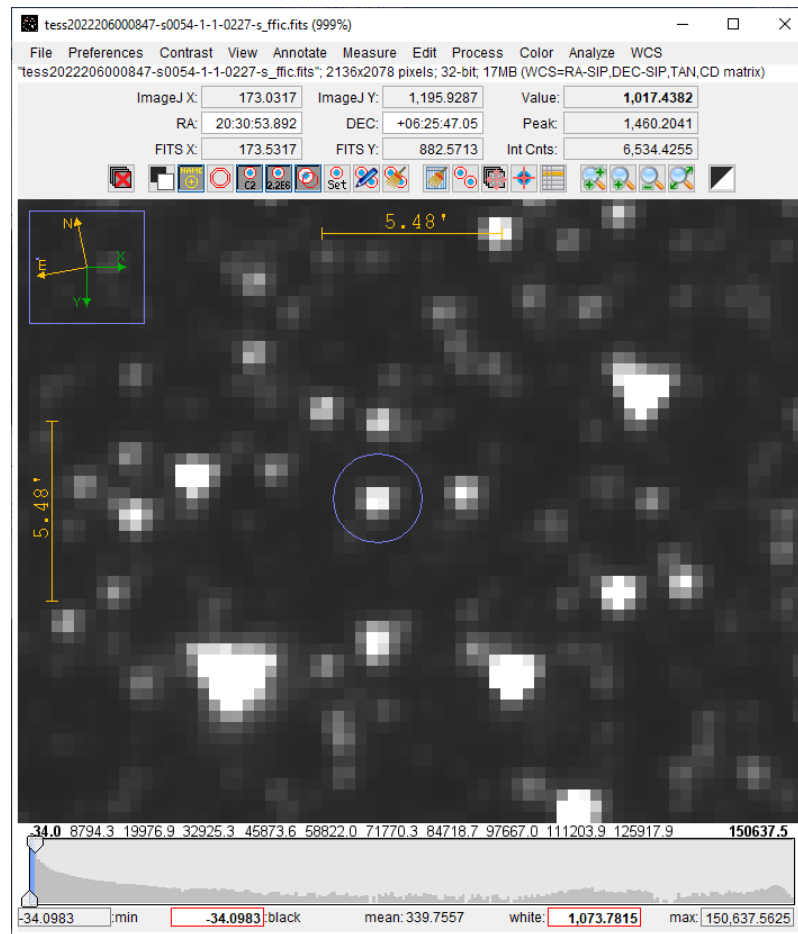


Рис. 3.11 Ототожнення системи WASP-2b на ПЗЗ зображенні TESS у вікні роботи з зображенням AstroImageJ. Зоря екзопланетної системи показана кільцем, її координати в системі пікселів ПЗЗ матриці X, Y та небесній сфері RA, DEC показані вгорі у відповідних віконцях.

Наступним кроком після ототожнення є проведення апертурної фотометрії обраного об'єкта – для більш точних результатів доцільно використовувати диференціальну фотометрію, засновану на порівнянні сигналу від обраного об'єкту із сигналом від спеціально обраних для цього зір порівняння. Програма AstroImageJ дає змогу обирати радіус у пікселях робочої апертури (відображається у користувацькому інтерфейсі у вигляді видимого кільця), а також внутрішньої та зовнішньої меж кільцевої апертури для вимірювання фону неба (рис.3.8). В якості зір порівняння найдоцільніше використовувати яскраві стаціонарні зорі, у яких немає чітко виражених ознак змінності. Доцільно обирати зорі порівняння в безпосередньому

оточенні об'єкта – при виникненні локальних збурень як-от, вплив розсіяного світла, можна частково або повністю компенсувати їх вплив. Набір апертур, що використовувався для проведення фотометрії системи WASP-2b, показано на Рис 3.12.

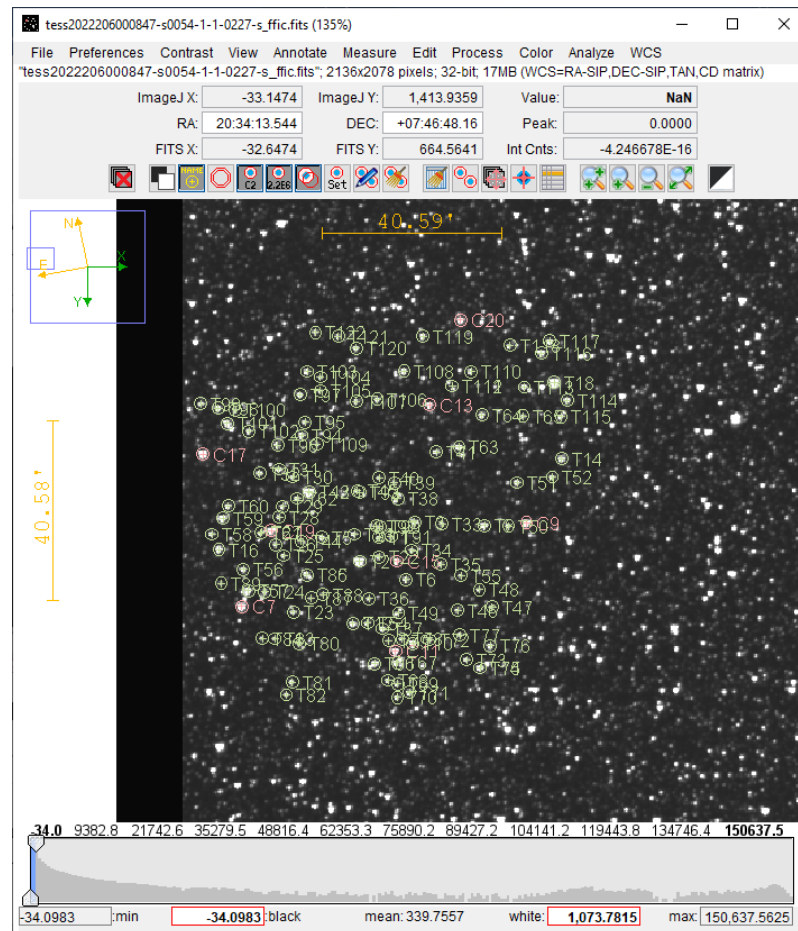


Рис. 3.12 Набір апертур, що використовувався для проведення диференціальної фотометрії системи WASP-2b (апертура WASP-2b позначена як T1).

В результаті фотометрії вибірки зображень з AstroImageJ отримано величину відносної інтенсивності WASP-2b для кожного з кадрів вибірки. Залежність нормованої інтенсивності від часу показана на графіку 3.13.

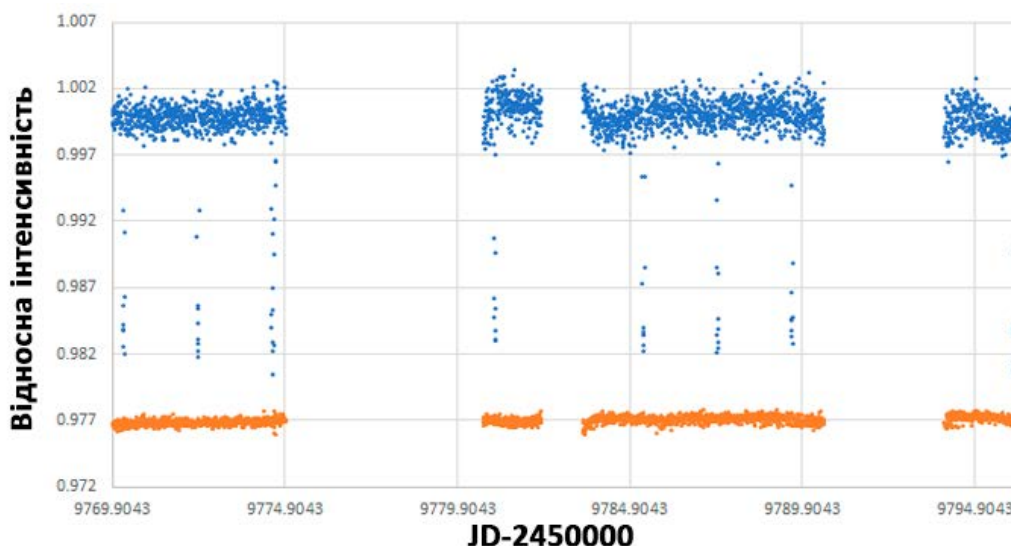


Рис. 3.13 Нормована крива інтенсивності для системи WASP-2b (вгорі, сині точки) за даними фотометрії вибірки зображень сектору 54 отриманих КА TESS. Нижній графік (помаранчеві точки) – зоря порівняння.

На графіку 3.13 добре видно періодичні короткочасні зменшення відносного світлового потоку від зорі – саме вони і є свідченням транзитів, тобто проходжень екзопланети по диску зорі, внаслідок чого частина світла зорі екранується і не досягає спостерігача. Амплітуда мінімумів, що відповідають транзитам, становить трохи менше 2%.

Важливим питанням для подальшої роботи з отриманими даними є їх точність. Зображення TESS для сектору 54, розміщені в базі даних, вже пройшли всі процедури попередньої обробки. Внаслідок цього виключається можливість оцінити імовірні похибки традиційним шляхом - оцінкою та урахуванням окремих джерел шуму. Тому, в рамках даної роботи, за імовірну похибку вимірювання величини інтенсивності об'єкта приймається середньоквадратична флуктуація цієї величини для вибірки вимірювань на незбуреній ділянці кривої інтенсивності, де потік від об'єкта можна вважати незмінним. Для WASP-2b імовірна похибка величини інтенсивності оцінена у $\pm 0.1\%$.

3.1.6 Аналіз кривої блиску та визначення параметрів системи WASP-2b

Наступним кроком при обробці даних фотометрії WASP-2b є побудова складеної кривої блиску, що включає всі наявні транзити на кривій відносної інтенсивності. Перехід від часового аргументу до фазового для побудови відповідного графіка виконується за формулою (3.1):

$$\varphi = \left(\frac{t-t_0}{T} \right) - INT \left(\frac{t-t_0}{T} \right) \quad (3.1)$$

(3.1) Обчислення фази для побудови складеної кривої блиску, де φ – фаза, t та t_0 – поточний час та час початку відліку відповідно, T – обраний для системи період, із яким відбувається транзит.

Значення T обирається таким, щоб точки, що відповідають однаковим стадіям транзиту, накладалися одна на одну, формуючи таким чином один суцільний графік. У випадку системи WASP-2 остаточний варіант складеної кривої блиску наведено на Рис. 3.14:

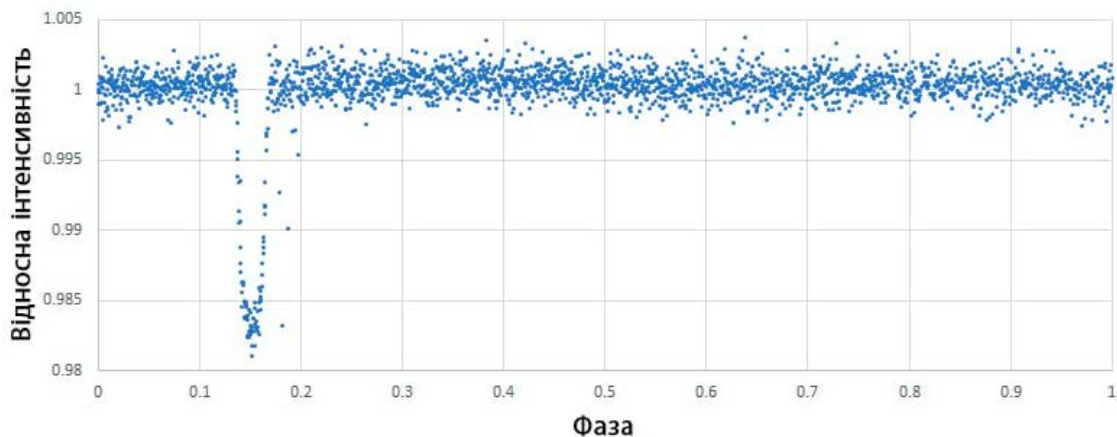


Рис. 3.14 Складена крива відносної інтенсивності для системи WASP-2b

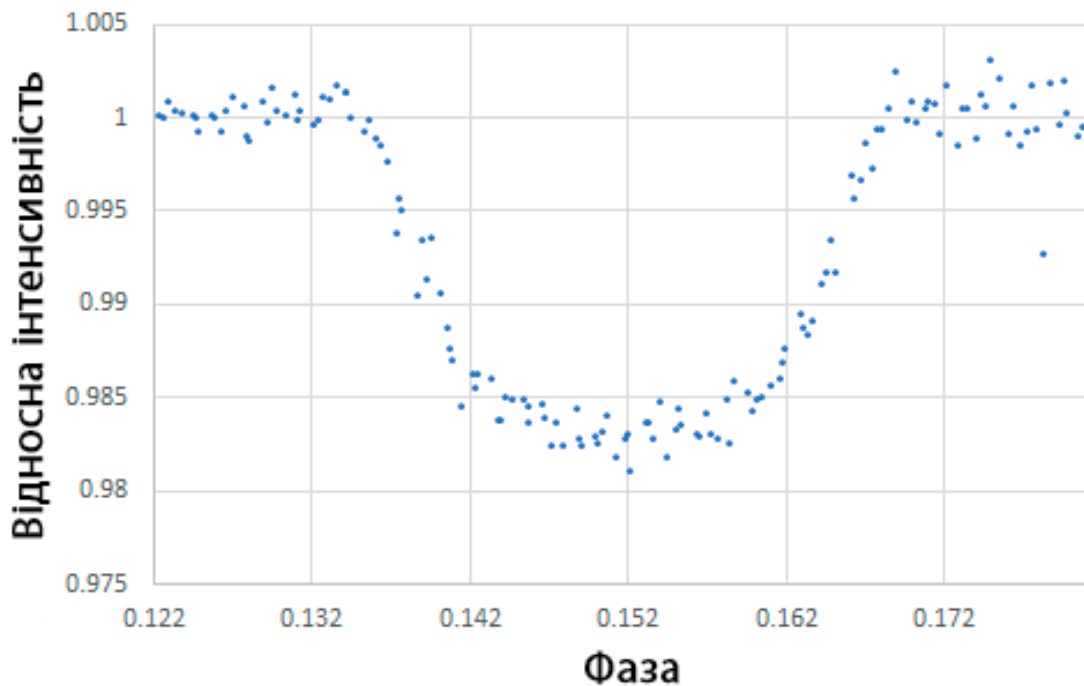


Рис. 3.15 Фрагмент складеної кривої відносної інтенсивності із транзитом для системи WASP-2b

Але так чи інакше крива вище не надає однозначної інформації стосовно відносної інтенсивності на певній фазі – для цього було необхідне проведення усереднення отриманих даних. Для цього до набору даних, що складав криву відносної інтенсивності, було застосовано усереднення за заданими значеннями – так, весь ряд даних розбивався на рівні фрагменти (однакові відрізки фази – 0.001223 або по 4 зображення у випадку WASP), від усіх значень відносної інтенсивності всередині кожного з яких бралось середнє арифметичне:

$$N = \text{int} \left(\frac{\varphi}{T} \right), \quad (3.2)$$

$$n = [0; N], \quad (3.3)$$

$$I_n = \frac{\sum_{i=1}^T I_{n_i}}{T}, \quad (3.4)$$

де N – кінцева кількість точок на заданому інтервалі (тут – ціла частина від загальної розглянутої фази φ , поділеної на задану довжину інтервалу T); n – індекс, що позначає порядковий номер точки, значення для якої

обчислюється розрахунком середнього арифметичного; I_{ni} – елемент i ділянки вибірки (або ж майбутньої точки графіку) n . Ця операція була проведена в програмній оболонці MathCAD. Окрім цього важливо було оцінити можливі похибки, що виникали б при використанні подібного усереднення. Для цього тут було застосовано формулу середньоквадратичного відхилення для спостережних даних та результатів усереднення (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{x}_i|}{n-1}}, \quad (3.5)$$

де σ – саме відхилення, що у випадку усередненої кривої відносної інтенсивності системи WASP-2b дорівнює $\sim 0.6\%$, $n - 1$ – кількість розглянутих точок, x_i та \tilde{x}_i – значення відносної інтенсивності на певній фазі за спостережними та усередненими даними відповідно. За результатами цих розрахунків було побудовано усереднену криву відносної інтенсивності на Рис. 3.15.

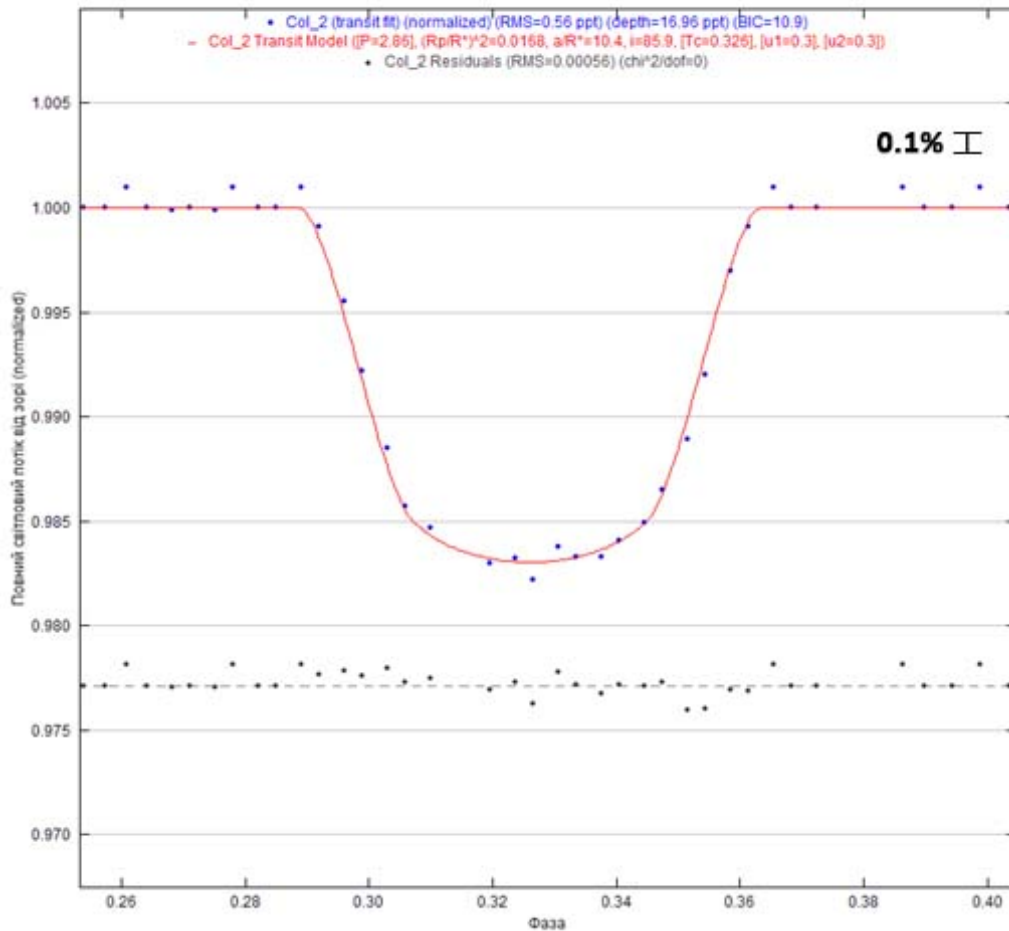


Рис. 3.16 Усереднений фрагмент складеної кривої відносної інтенсивності із транзитом для системи WASP-2b, на основі якого у програмній оболонці AstroImageJ була побудована модельна крива відносної інтенсивності (параметри – Таблиця 3.2, «Побудова модельної кривої»)

Саме ця крива була в подальшому використана для обрахунку параметрів планети WASP-2b та її орбіти. Методика описаної вище обробки даних для системи WASP-2 із незначними змінами була використана також у подальшому для перевірки змінної зорі на предмет наявності екзопланети.

В першу чергу був оцінений радіус планети за допомогою розрахунку глибини транзиту відносно континууму. Для розв'язку цієї задачі було зроблено припущення про рівномірність світлового потоку від диску зорі, тобто планетний диск під час проходження диском зорі, деякі властивості якого як-от потемніння до краю були відкинуті, повністю блокує частину

світлового потоку від нього. Так, використовуючи відношення для світлових потоків та елементарні геометричні перетворення для площ кіл, отримуємо:

$$\frac{F_{tr}}{F_{cont}} = \frac{S_{tr}}{S_{cont}} = \frac{R^2}{R^2 - r^2}, \quad (3.6)$$

де F_{tr} та F_{cont} – світлові потоки, а S_{tr} та S_{cont} – площі диску зорі, від яких отримуються ці потоки, у транзитному мінімумі та у континуумі відповідно, R – радіус зорі (тут вважається відомим з даних зоряних каталогів), а r – радіус планети. Тоді для r маємо:

$$r = R * \sqrt{\frac{F_{cont} - F_{tr}}{F_{cont}}} \quad (3.7)$$

Формула (3.3) дає змогу дати оцінку планетного радіуса точності достатньої для того, аби зробити висновок з приводу типу планети. Відстань від планети до зорі можна розрахувати за часовим проміжком між мінімумами двох послідовних транзитів, а орбітальний період взагалі тотожно дорівнює цьому проміжку. Для того, щоб визначити відстань від зорі до планети (або велику піввісь у наближенні колової орбіти), слід використати формулу першої космічної швидкості у поєднанні із періодичністю транзитних мінімумів. Нижче приведено робочу формулу після всіх необхідних перетворень (3.4).

$$R = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}, \quad (3.8)$$

де G – гравітаційна стала, M – маса зорі (вважається відомою з зоряних каталогів), T – орбітальний період або періодичність настання транзитних мінімумів. Результати використання цих формул для практично отриманих результатів наведено нижче у таблиці 3.2.

Для подальших висновків були використані результати, отримані у роботі “A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar

Planet Transit Light Curve” авторства Seager та Mallén-Ornelas, зокрема формулу для нахилу орбіти відносно променю зору спостерігача [33]:

$$i = \arccos\left(b * \frac{R_s}{a}\right), \quad (3.9)$$

де $a \equiv R$ з формул вище (відстань від зорі до планети, що за умови колової орбіти вважається великою піввіссю орбіти), а параметр b визначається через (3.6):

$$b = \sqrt{\frac{(1-\sqrt{\Delta F})^2 - \left(\frac{\sin\left(\frac{t_f * \pi}{T}\right)}{\sin\left(\frac{t_t * \pi}{T}\right)}\right)^2 * (1-\sqrt{\Delta F})^2}{1 - \left(\frac{\sin\left(\frac{t_f * \pi}{T}\right)}{\sin\left(\frac{t_t * \pi}{T}\right)}\right)^2}}, \quad (3.10)$$

де t_f та t_t – період тривання повного транзиту та транзитного мінімуму відповідно, а параметр ΔF – як співвідношення (3.7):

$$\Delta F = \frac{F_{cont} - F_{tr}}{F_{cont}}, \quad (3.11)$$

Таким чином, форма транзитного мінімуму визначає, наскільки далеко від центру зоряного диску проходить планета під час транзиту:

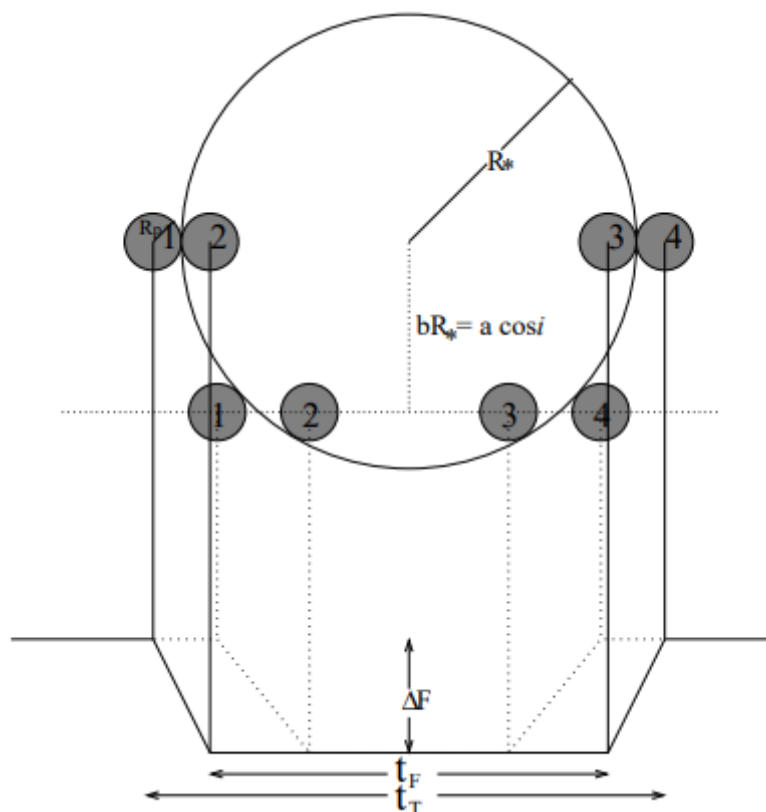


Рис. 3.17 Схема проходження планети диском зорі при різних значеннях нахилу орбіти i

3.1.7 Порівняння планетних параметрів із попередньо отриманими в літературних джерелах, моделювання проходження планети диском зорі та кривої блиску

Із даними, використаними у цій роботі, деякі параметри орбіти за Кеплером залишаються невідомими: головною проблемою є практична неможливість визначити ексцентриситет орбіти за властивостями малого фрагменту орбіти, який досліджується за допомогою методу транзитів – через це, а також через невизначеність деякої площини відліку у системі залишаються невизначеними висхідний кут орбіти, аргумент перицентру та середня аномалія, необхідні для вичерпного опису орбіти за Кеплером. Але так чи інакше вище зазначених параметрів достатньо для того, щоб побудувати геометричну модель проходження планети диском зорі та порівняти отримані результати із отриманими раніше, а також із тими, що

найкраще підійшли для побудови модельної кривої в програмній оболонці AstroImageJ (таблиця 3.2). При розрахунках орбіта планети вважається ідеально коловою, похибки отримані за допомогою формул для похибок непрямих вимірювань.

Таблиця 3.2 Порівняння параметрів екзопланети, отриманих за допомогою описаних вище формул, із значеннями, що найкраще підійшли для побудови модельної кривої, та попередніми результатами у літературі

Параметр	Результати розрахунків	Побудова модельної кривої	Cameron, 2007 [31]	Becker, 2013 [30]
T_0	$2459769.90426971 \pm 0.0001$ [BJD-TDB]		2453991.5146 ± 0.0044 [HJD]	$2453991.5148944 \pm 0.0001232$ [BJD]
T [d]	2.1522 ± 0.0008	2.1522 ± 0.0008	$2.152226 \pm 4E-06$	$2.1522 \pm 9.83102E-07$
R_p/R_s	0.13 ± 0.007	0.131404	0.13 ± 0.0105	0.1315 ± 0.0003
a/R_s	8.08 ± 0.013	7.546931	9.6 ± 2.026	8.06 ± 0.04
i [deg]	$89.985^{+0.015}_{-3.369}$	84.0216	86.095 ± 1.953	84.89 ± 0.05

Робота «Observations of the WASP-2 System by the Apostle Program» авторства Бекера, Кундурті та інших [31] розглядає дані, отримані в рамках спостережної програми «Apostle» за допомогою спостережної апаратури Обсерваторії Апачі-Пойнт протягом 2007-2010 років. Стаття «WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE» Кемерона, Буші та інших [30] у свою чергу використовувала дані, отримані між 2004 та 2006 роками за допомогою проекту SuperWASP, а також спектрографу SOPHIE, розташованого в Обсерваторії Верхнього Провансу. Так чи інакше, обидві роботи базуються на результатах наземних

спостережних місій. Виходячи з цього факту можна зробити висновки щодо різниці між результатами, отриманими за допомогою наземних та космічних місій: так, добре збігаються отримані дані щодо періоду, розміру планети, а також її відстані до материнського світила, що отримуються за допомогою аналізу періодичності настання мінімумів на кривій інтенсивності, а також їхньої глибини. Більші розбіжності спостерігаються в отриманих значеннях нахилу орбіти, що можна обґрунтувати необхідністю точно знати параметри транзитного мінімуму – оскільки це потребує проведення більш точної фотометрії, ніж зазвичай доступна наземним спостерігачам, ці значення істотно різняться навіть для наземних місій.

Таким чином можна зробити висновок про те, що застосовані в цій частині дипломної роботи формули та методи справедливі при отриманні параметрів позасонячної планетної системи із точністю, задовільною для оцінки параметрів останньої. В наступному розділі вони будуть використані для іншого об'єкта – імовірної системи з екзопланетою TYC 503-1272-1.

В сенсі оцінки якості даних TESS особливий інтерес становить порівняння результатів наземних та космічних спостережень, враховуючи і те, що наземні спостереження можуть виконуватись з набагато потужнішими телескопами.

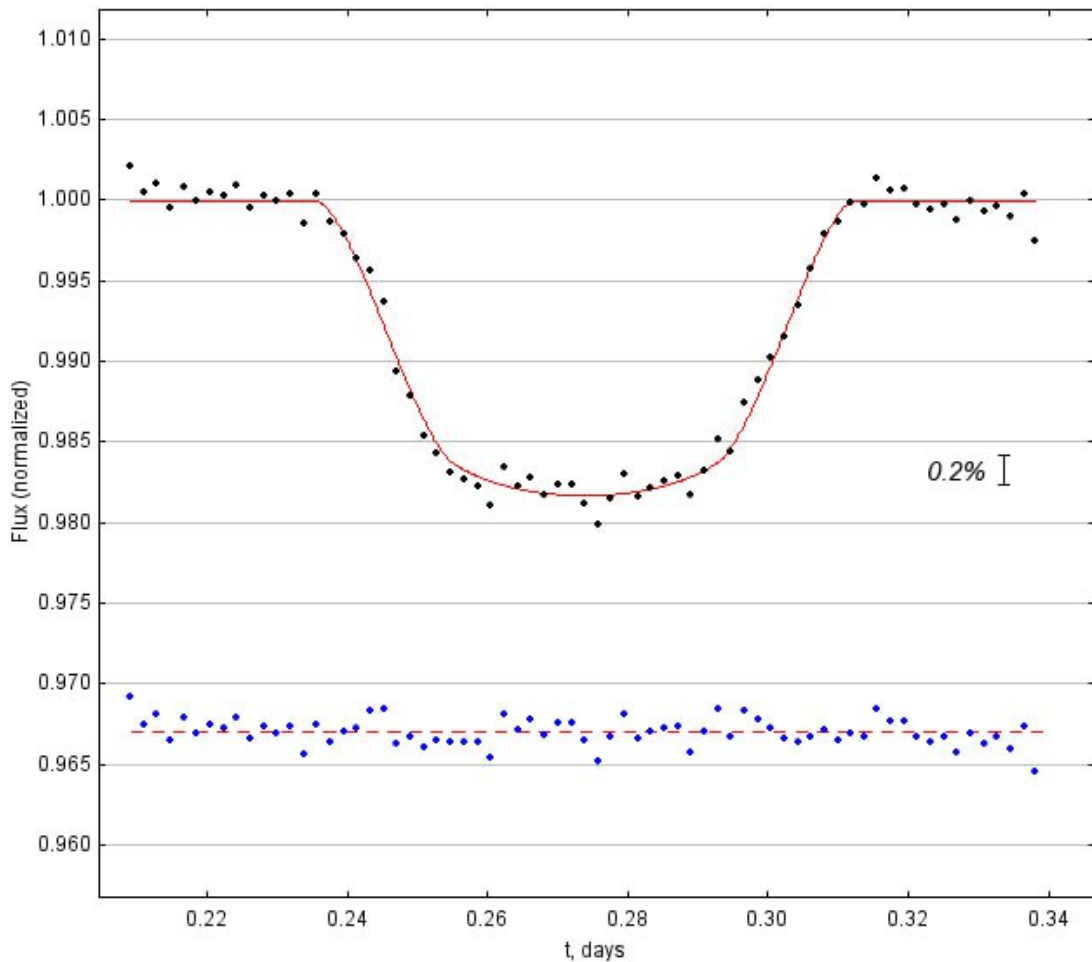


Рис. 3.18 Нормована крива відносної інтенсивності WASP-2b (верхній графік, чорні точки), отримана за даними АЗТ-22 шляхом усереднення по 5-ти точкам. Червона лінія - модельна крива транзиту AstroimageJ, у якій використано дані колонки «Побудова модельної кривої» (Таб. 3.2), нижній графік (сині точки) - різниця "спостережні дані - модель".

Ми порівняли дані фотометрії WASP-2b, отримані 1.5 метровим телескопом АЗТ-22 (одичний транзит) та дані фотометрії TESS (накопичено дані 5-ти транзитів). На Рис. 3.18 наведено нормовану криву відносної інтенсивності WASP-2b, отриману шляхом усереднення даних фотометрії АЗТ-22 (Рис. 3.1) по 5-ти точкам. Таким чином, ефективна експозиція кожної з точок складає 100 сек. З графіка залишків на Рис. 3.18 видно, що модельна крива достатньо добре представляє спостережні дані.

Безпосереднє порівняння складених кривих за даними TESS (Рис. 3.15) і АЗТ-22 (Рис. 3.18) дозволяє зробити висновок про співставність результатів фотометрії в обох випадках. Звичайно, треба приймати до уваги і час спостережень (3 год. vs 27 діб), і неспівмірні розміри апертур (11 см vs 150 см), і різні умови спостережень (космос-Земля). Тим не менш, для певного класу задач, як-то, пошук та дослідження транзитних систем, змінних зір та ін., у випадках відносно яскравих об'єктів та тривалого накопичення інформації, невеликий телескоп на орбіті цілком здатен забезпечити якість фотометрії, співставну з великими наземними телескопами.

3.2 Пошук екзопланет у секторі 54: ТУС 503-1272-1

Пошук екзопланет методом транзитів базується на виявленні невеликих періодичних мінімумів на кривій блиску зорі. Зображення TESS для ПЗЗ-1 сектору 54 містять близько 80000 зір, і наступним завданням даної роботи був пошук імовірних транзитів шляхом отримання та аналізу кривих блиску частини з наявних об'єктів. Для обробки вибирались ділянки ПЗЗ-зображень розміром 400×400 пікселів ($2.3^\circ \times 2.3^\circ$). Для отримання кривих блиску з AstroImageJ обирались достатньо яскраві зорі, фотометрія яких дає похибку біля 1% (0m.01) або краще. Такий відбір дає близько 400 зір в межах ділянки 400×400 пікселів. Отримані криві блиску аналізувались візуально шляхом перегляду у вікні графіків AstroImageJ.

В першу чергу було перевірено ділянку, що включає околиці WASP-2b. Зір з імовірними транзитами виявлено не було. Варто відмітити, що більшість зір демонструє помітну змінність на масштабах часу біля 30 діб. Частина перевірених об'єктів є типовими класичними змінними різних типів, як-от затемнювано-подвійні та змінні зорі різних конфігурацій, тощо (Рис. 3.19):

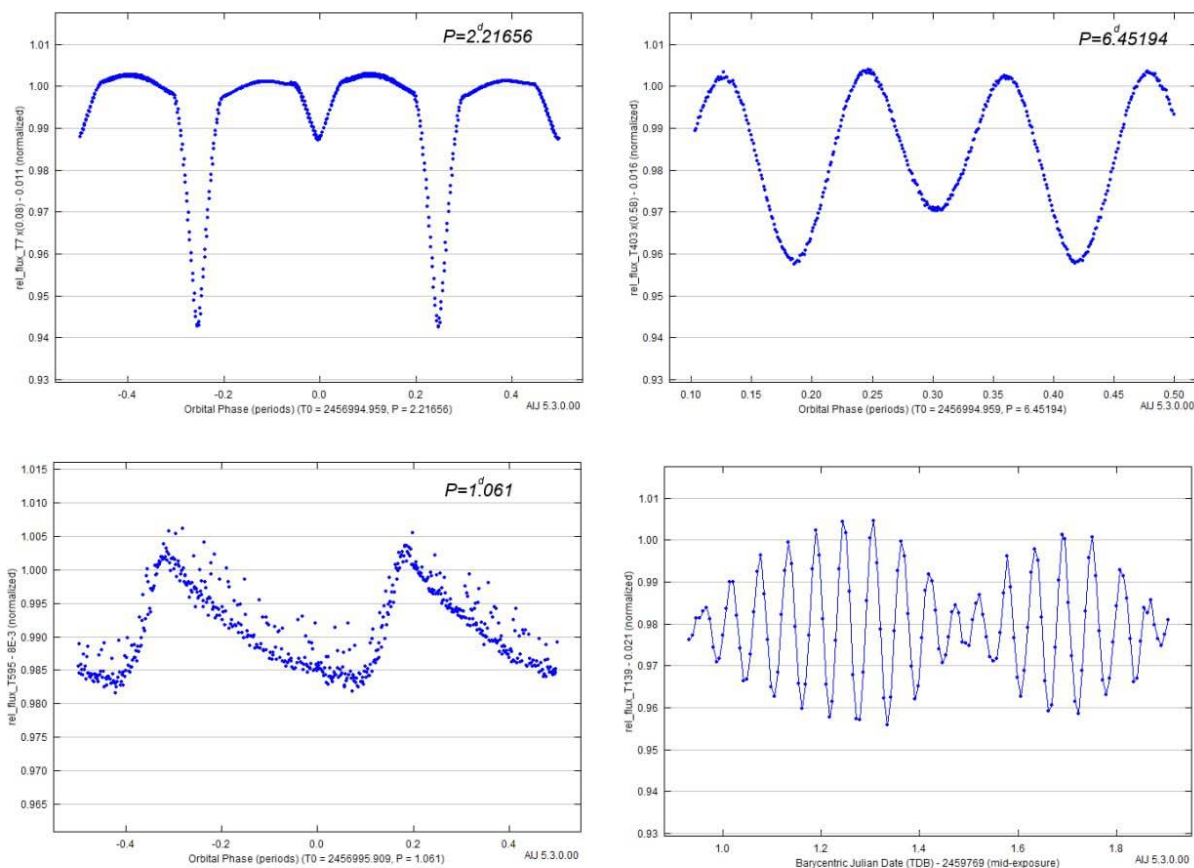


Рис. 3.19 Приклади кривих відносної інтенсивності змінних об'єктів, присутніх у полі зору камери 1 у 54 секторі. Типи змінних – β Per (вгорі зліва), W Uma (вгорі справа), RR Lyr (внизу зліва), δ Sct (внизу справа) Обчислені періоди для складених кривих позначені в полі графіків вгорі.

3.2.1 Зоря ТУС 503-1272-1

В ході пошуку можливих транзитів на ділянці поблизу центра кадра ПЗЗ-1 (Рис. 3.20) було виявлено зорю з декількома характерними мінімумами на кривій нормованої інтенсивності.

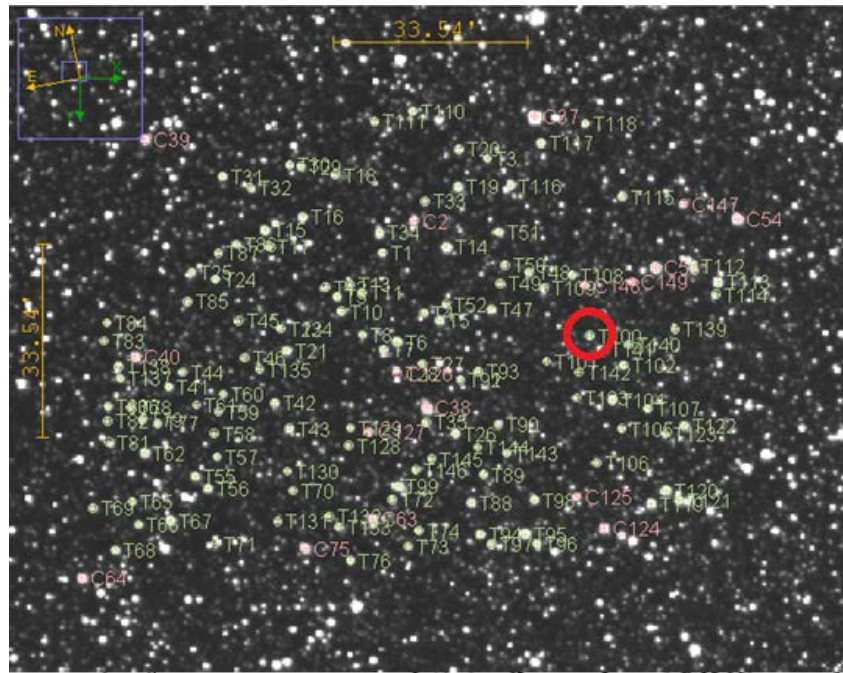


Рис. 3.20 Обрана для дослідження ділянка неба з проставленими апертурами, червоним кільцем позначено розташування зорі T100

Зоря з тимчасовим номером фотометричної апертури T100 - найяскравіший об'єкт в фотометричній апертурі, має координати $\alpha = 20^{\text{h}}11^{\text{m}}18.111^{\text{s}}$, $\delta = +05^{\circ}26'49.96''$. Фрагмент його кривої відносної інтенсивності з одним із транзитів наведено на Рис. 3.21, повна крива блиску по всій вибірці зображень – на Рис. 3.22. Згідно зі Страсбурзькою базою даних найближче до цих координат знаходиться зоря TYC 503-1272-1 із зоряною величиною 12.8^{m} , за яку в подальшому і був прийнятий об'єкт T100. Ця зоря не входить в каталог цільових об'єктів TESS (TOI), а Страсбурзька база даних не містить інформації щодо її змінності [27][48]. Таким чином, TYC 503-1272-1 є новим та цікавим кандидатом для подальших екзопланетних досліджень. Як видно з Рис. 3.22 повна крива відносної інтенсивності для нього містить ряд короточасних періодичних мінімумів з амплітудою біля 2%, характерних для проходжень екзопланети диском зорі. Деякі параметри зорі, на основі яких були оцінені її радіус та маса, також були взяті зі Страсбурзької бази даних.

Першим кроком у обробці отриманої кривої була побудова складеної кривої блиску за алгоритмом, описаним у розділі 3.1. Отриманий в результаті орбітальний період ймовірної екзопланети становить 2.86 ± 0.0008 діб.

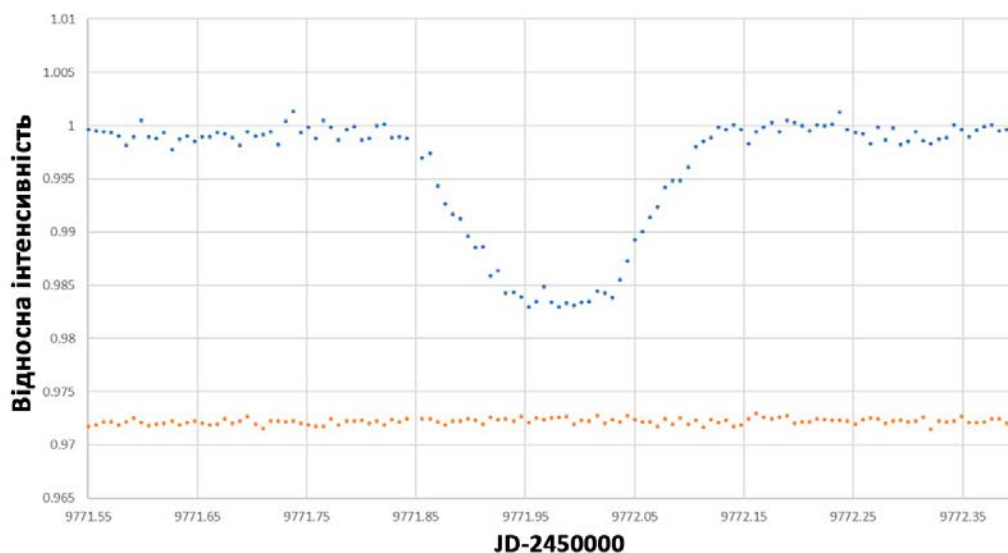


Рис. 3.21 Фрагмент кривої відносної інтенсивності об'єкту T100 з характерним профілем ймовірного транзиті між TJD 59785 та 59788

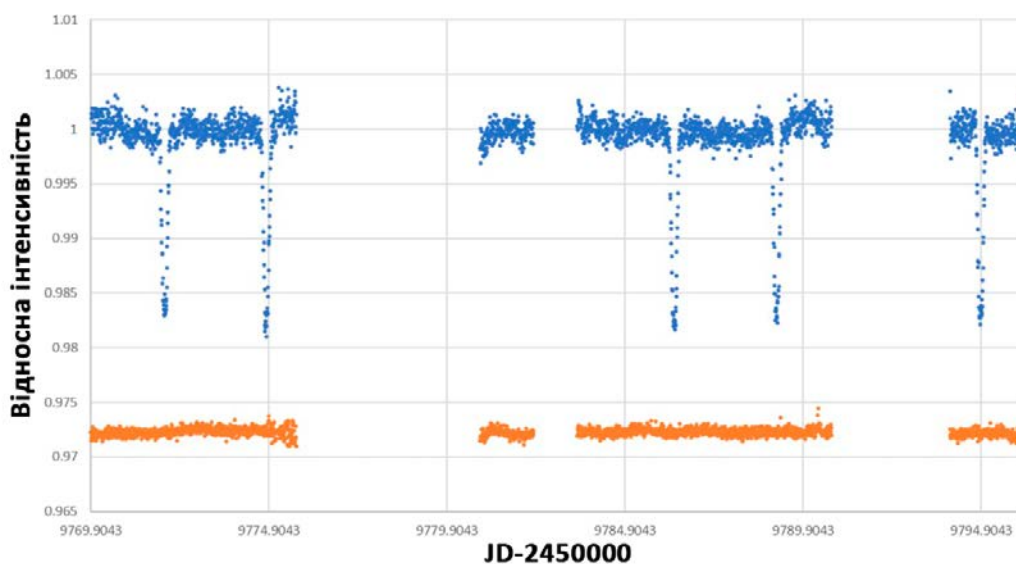


Рис. 3.22 Повна крива залежності відносної інтенсивності від часу для T100 (верхній графік, сині точки) для всієї вибірки зображень. Нижній графік (помаранчеві точки) зоря порівняння.

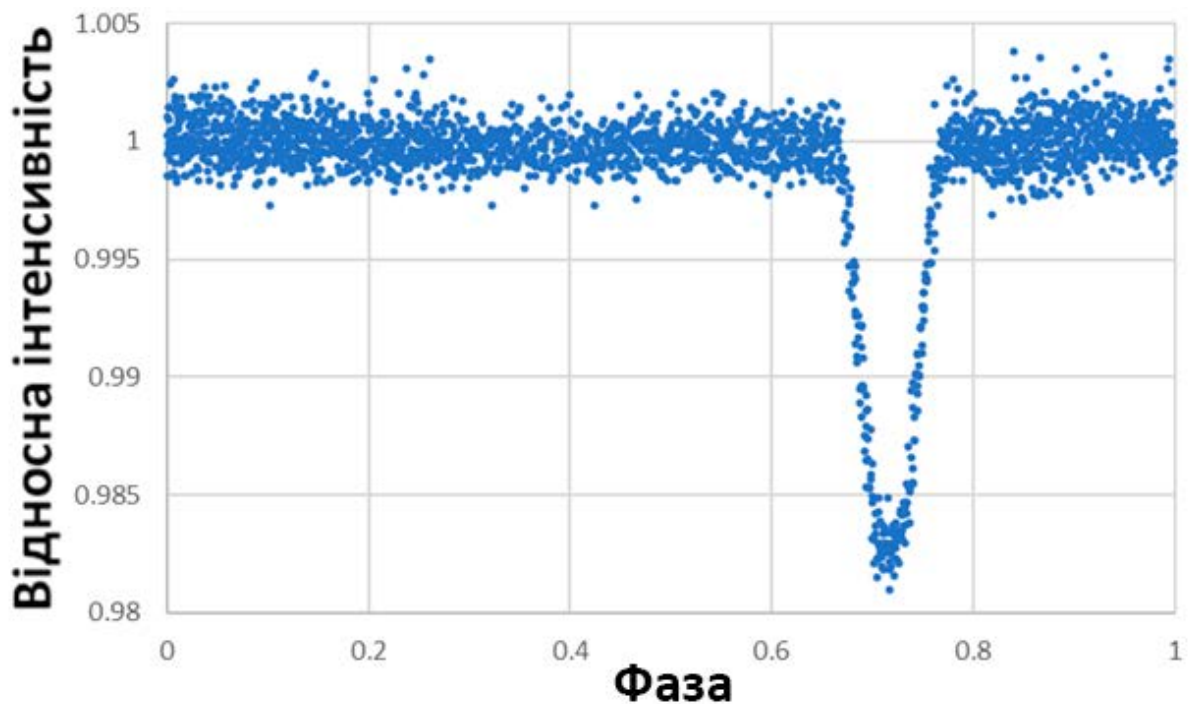


Рис. 3.23 Складена крива блиску ТУС 503-1272-1

3.2.2 Перевірка гіпотези затемнено-подвійної зорі

Із кривої відносної інтенсивності ТУС 503-1272-1 на Рис. 3.22 видно, що глибина послідовних мінімумів дещо відрізняється. Величина цієї відмінності практично відповідає імовірній похибці фотометрії (0.2%), але може і свідчити про те, що ми маємо справу з затемнювано-подвійною системою типу Алголя (див. рис. 3.19).

Гіпотеза затемнено-подвійної зорі для ТУС 503-1272-1 передбачає дві можливі конфігурації: 1) змінна із періодом $T = \sim 2.8$ діб, коли головним мінімумам відповідають всі 5, що спостерігаються на повній кривій рис. 3.22; 2) змінна із періодом $2 \cdot T = \sim 5.6$ діб, коли обидва компонента системи мають близькі розміри та схожий спектральний клас, і відповідно, глибина головних та вторинних мінімумів мало відрізняється.

Першу конфігурацію можна одразу виключити шляхом аналізу складеної кривої транзиту рис. 3.23 – очікуваний невеликий вторинний мінімум в районі $T/2 = \sim 1.4$ доби – відсутній.

У випадку другої конфігурації затемнювано-подвійної зорі на кривій інтенсивності мають бути помітними періодична зміна глибини мінімумів та відмінності у їх формі (див., напр., рис.3.25).

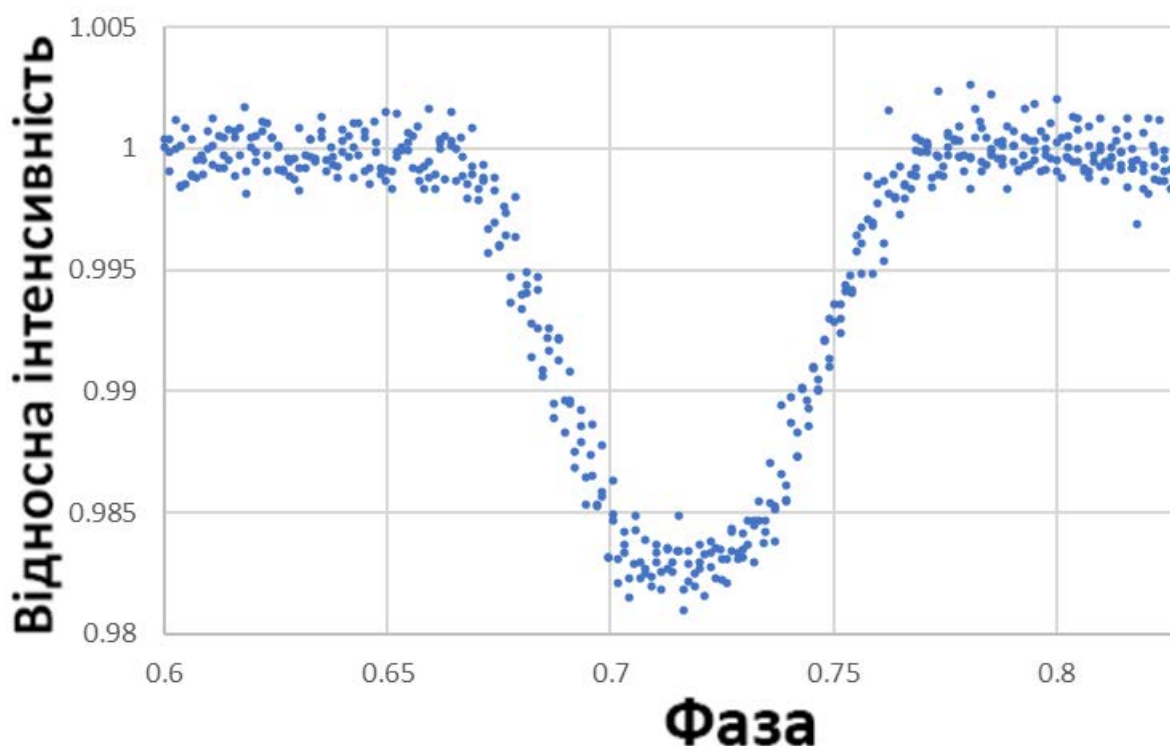


Рис. 3.24 Фрагмент складеної кривої відносної інтенсивності із транзитом для системи TYC 503-1272-1

Для перевірки поведінки глибини мінімумів системи було оцінено амплітуду кожного з п'яти транзитних мінімумів повної кривої (Рис. 3.22) відносно континууму.

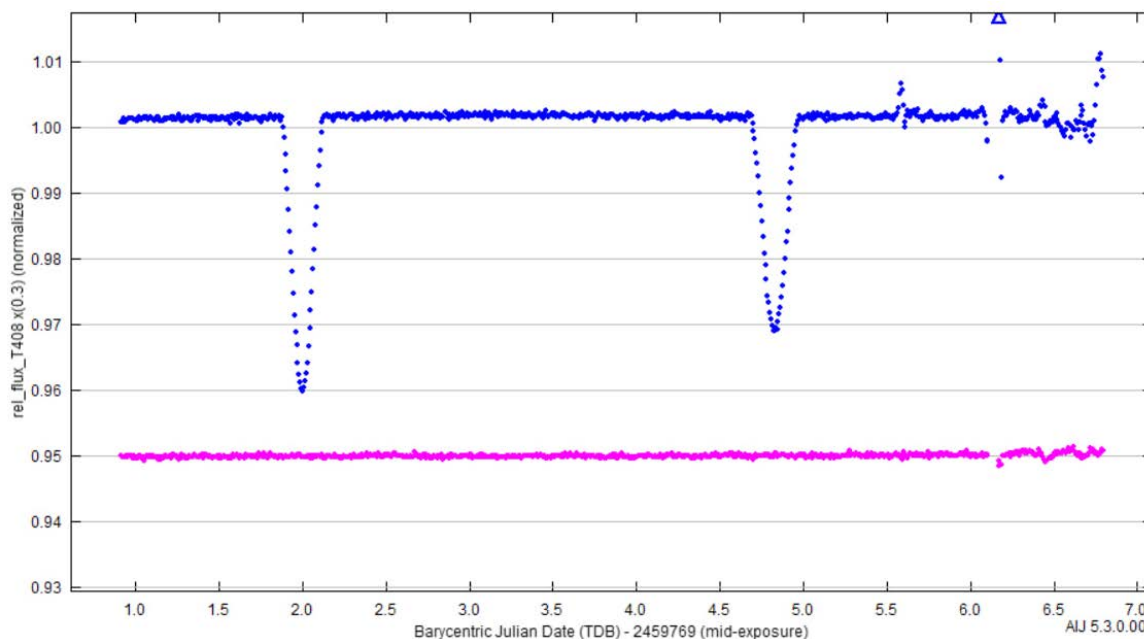


Рис. 3.25 Приклад фрагменту кривої відносної інтенсивності змінної зорі типу Алголя (один із об'єктів в полі сектору 54 TESS). Видно, що головний та вторинний мінімуми мають близьку глибину та дещо різну форму.

На рис. 3.26 приведено діаграму зміни оціненої глибини мінімумів (сині стовбці), співставлених з “ідеальною” затемнювано-подвійною системою того ж періоду (помаранчеві стовбці). Для затемнювано-подвійної системи слід було б очікувати однакової глибини на 1, 7 та 9 мінімумах (головний мінімум), та однакової меншої глибини на 2 та 6 мінімумах (вторинний мінімум). Як видно з рис. 3.26, фактична динаміка змін глибини мінімумів транзитів відрізняється від очікуваної.

Про можливу відмінність у формі транзитних мінімумів може свідчити складена крива Рис. 3.24, де видно розкид точок вздовж осі X (“потовщення”) на висхідній і низхідній ділянках кривої транзиту. Можливим джерелом варіацій форми мінімумів, окрім похибок фотометрії, може бути ще один змінний об'єкт, що потрапляє у фотометричну апертуру та не розділяється внаслідок обмеженої просторової роздільної здатності TESS (див. рис. 3.29).

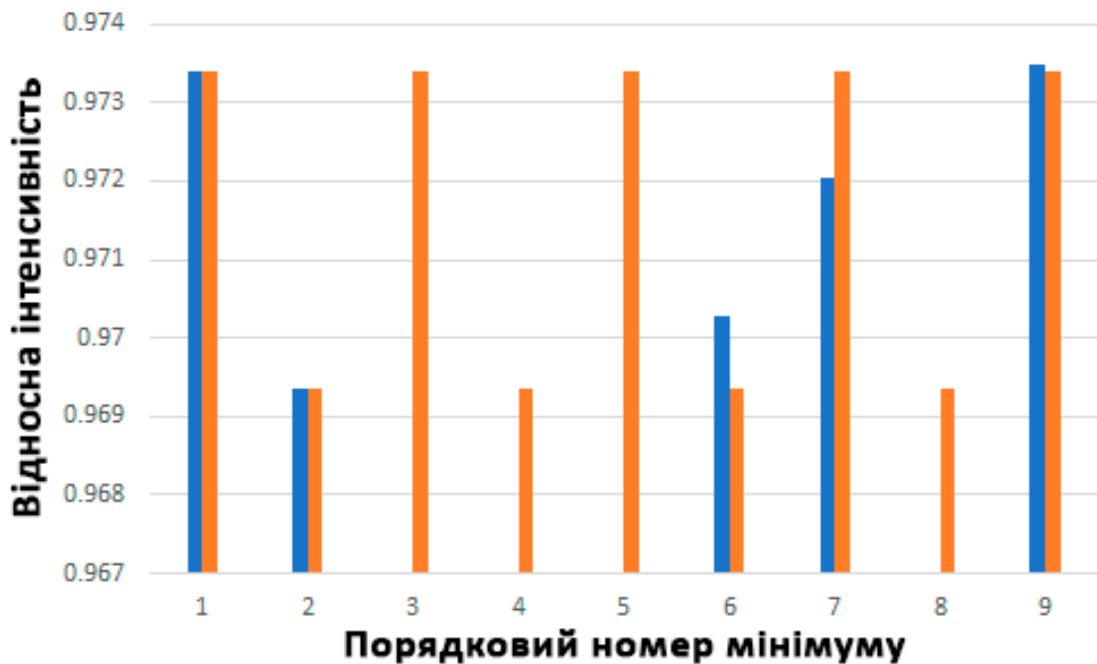


Рис. 3.26 Прогнозована для зорі типу Алголя (помаранчеві стовпці) та реальна (сині стовпці) динаміка змін глибини транзитів на кривій відносної інтенсивності для системи TYC 503-1272-1

Таким чином, виявлені розбіжності у глибині та формі мінімумів знаходяться на рівні імовірних похибок вимірювань та не показують очікуваної системності, тому, на базі наявних даних, гіпотеза затемнено-подвійної зорі для TYC 503-1272-1 не знаходить підтвердження.

Виходячи з цього, надалі розглянемо TYC 503-1272-1 як ймовірну екзопланетну систему.

3.2.3 Параметри екзопланетної системи TYC 503-1272-1

За допомогою описаного вище алгоритму було отримано усереднену криву транзиту шляхом усереднення величин відносної інтенсивності складеної кривої рис. 3.24. Далі властивості системи досліджувалися саме на основі усередненої кривої транзиту.

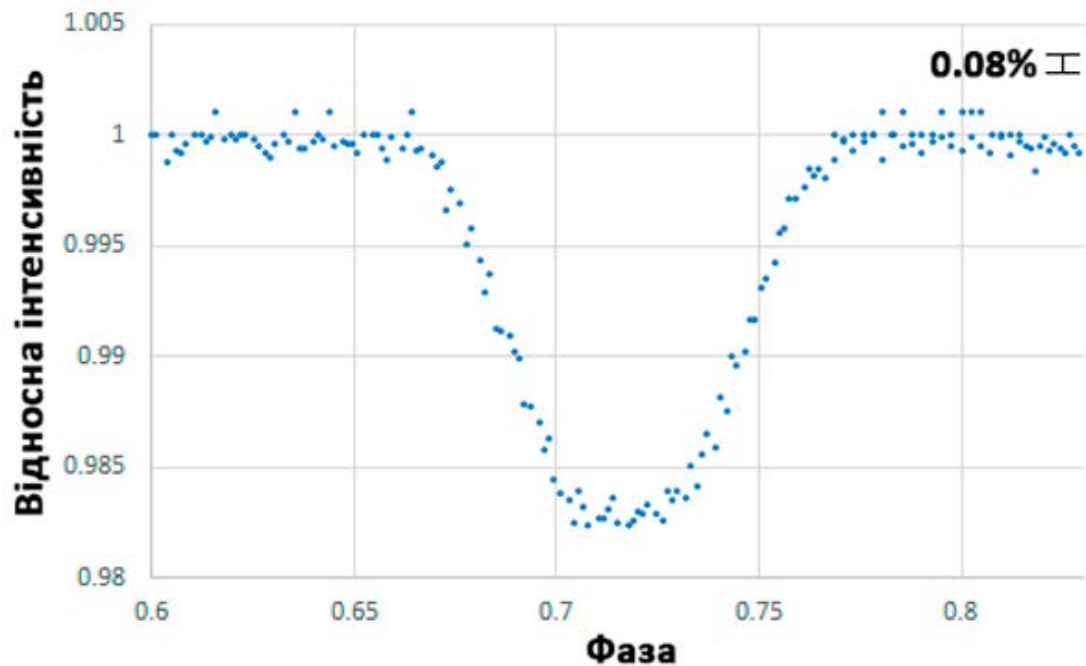


Рис. 3.27 Транзитна крива, отримана усередненням даних складеної кривої з рис. 3.24.

Для визначення параметрів езопланетної системи було прийнято характеристики зорі згідно Страсбурзької бази даних [34]: оскільки показник кольору $B-V$ для ТУС 503-1272-1 відомий і становить $B-V = 1.36$, можна оцінити розмір зорі та її масу на основі спектрального класу, для якого такий показник є характерним. Так, $B-V = 1.36$, і, виходячи з цього, можна зробити висновок, що ТУС 503-1272-1 належить до спектрального класу $K8V$ та має радіус, близький до $R_s = 0.615 R_\odot$ [37] - саме він і буде використаний у подальших розрахунках. Використавши для системи формули (3.6) – (3.11), а також дані з отриманої кривої інтенсивності, отримуємо параметри системи, наведені в таблиці 3.3 (стовбець «За результатами розрахунків»). Наведені похибки параметрів отримано обчисленням похибок непрямих вимірювань для розрахункових результатів.

Інший набір параметрів (стовбець «За результатами моделювання» таблиці 3.3) отримано шляхом моделювання транзитної кривої в AstroImageJ. Результат моделювання транзитної кривої в AstroImageJ та

отримані параметри, що відповідають найкращому узгодженню зі спостережними даними, наведено на рис. 3.28.

Помітна розбіжність отриманих величин деяких параметрів у таблиці 3.3, отриманих обома методами, може виникати внаслідок нестандартної конфігурації екзопланетної системи ТУС 503-1272-1. Форма кривої транзиту (рис. 3.24) показує плавний характер падіння та зростання інтенсивності між 1-м і 2-м, та 3-м і 4-м контактами, а також невелику тривалість періоду між 2-м та 3-м контактами. Це може свідчити про систему з великим прицільним параметром, на що прямо вказує моделювання з AstroImageJ ($i \sim 58^\circ$). У випадку такої системи в ході транзиту планета проектується на крайову зону диска зорі (див. рис. 3.17), і відповідно, зростає чутливість моделі до похибок у вхідних параметрів для розрахунку, зокрема, до характеру падіння яскравості до краю диска зорі. Тобто, невеликі похибки у вхідних параметрах можуть давати великі розбіжності у результатах розрахунків.

Таблиця 3.3 Параметри екзопланети, отриманих за допомогою описаних вище формул та за результатами моделювання

Параметр	За результатами розрахунків	За результатами моделювання
T_0 [BJD-TDB]	$2459769.90426971 \pm 0.0001$	
T [d]	2.8646 ± 0.0008	2.8646
R_p/R_s	0.158 ± 0.007	0.4087
a/R_s	11.768 ± 0.0013	2.3803
i [deg]	86.005 ± 4.222	58.3437

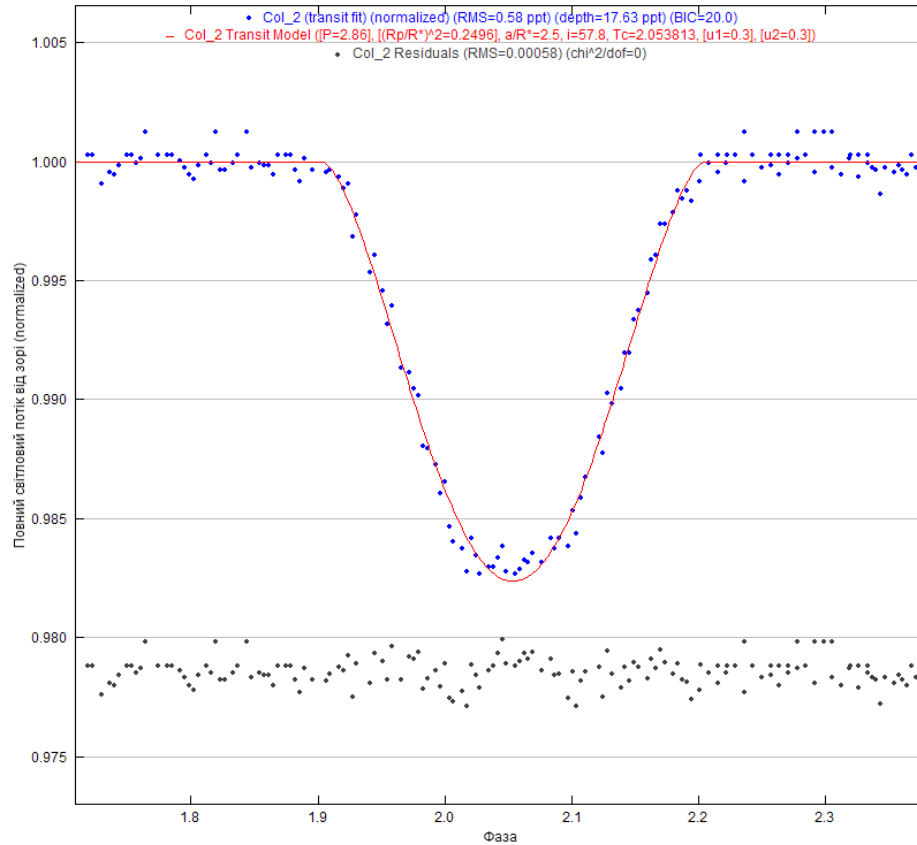


Рис. 3.28 Фрагмент складеної кривої блиску із транзитним явищем для ТУС 503-1272-1, побудований в програмній оболонці AstroImageJ. Сині точки – спостережні дані, червона лінія – модельна крива транзити, сірі точки – різниця спостережних даних і модельної кривої.

Параметри системи, отримані моделюванням в AstroImageJ виглядають більш реалістичними, оскільки враховують всі наявні точки складеної кривої транзити.

Із отриманих результатів можна зробити висновок про те, що можлива екзопланета тіло біля досліджуваної зорі ТУС 503-1272-1 має параметри, характерні для гарячих юпітерів: короткий період обертання, невелика відстань від планети до зорі, розташування біля світила пізнього спектрального класу.

Остаточну відповідь на питання, чи маємо ми справу з екзопланетною системою, можуть дати лише наступні спостереження з вищою роздільною здатністю та належною точністю фотометрії. Такі спостереження дозволять:

- виключити невизначеність при ототожненні об'єкту, що виникає внаслідок низької роздільної здатності TESS. На рис. 3.29 показано фотометричну апертуру, що використовувалась при фотометрії зображень TESS (зелене кільце), накладену у відповідному масштабі на зображення ділянки неба з ГҮС 503-1272-1 (атлас Aladin). Видно, що до центрованої на ГҮС 503-1272-1 апертури потрапляє декілька об'єктів, варіації блиску яких можуть спотворювати результати фотометрії.

- отримати точну криву блиску транзиту, вільну від впливу сторонніх факторів.

Таким чином, знайдена в ході даної роботи ймовірна екзопланетна система є достатньо цікавою та вимагає подальших досліджень.

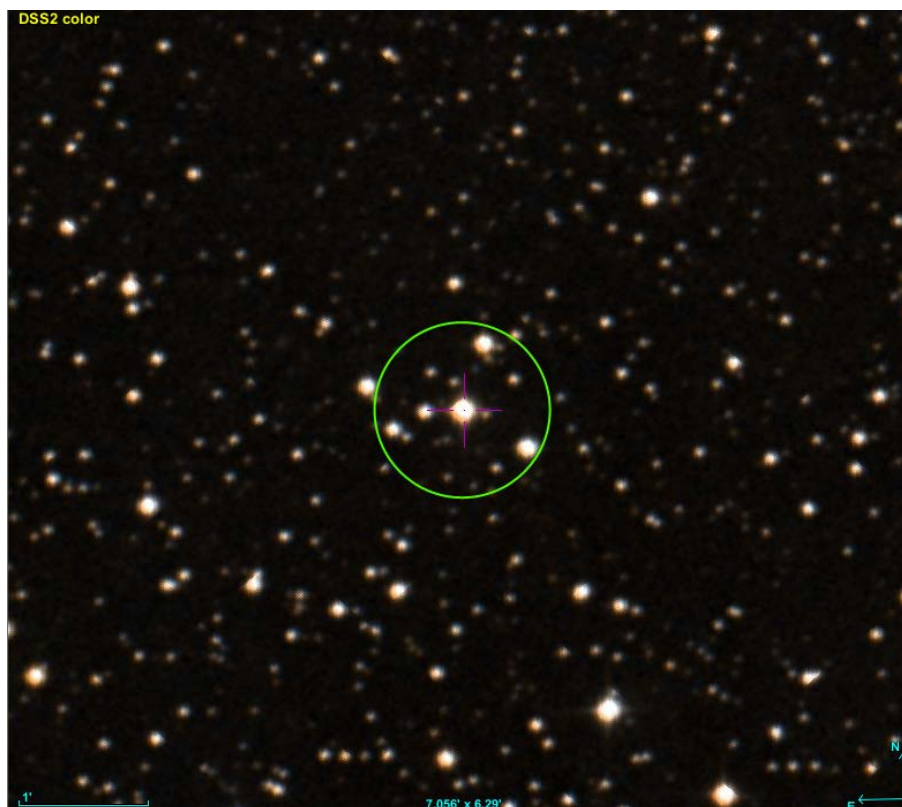


Рис. 3.29 Зображення ділянки зоряного неба, що містить зорю ГҮС503-1272-1, за даними атласу Aladin. Зоря ГҮС503-1272-1 позначена хрестиком, кільце навколо неї показує апертуру, що використовувалась при фотометрії зображень TESS.

Висновки

В ході виконання дипломної роботи було виконано наступні завдання та отримано такі результати:

- з архіву даних космічної місії TESS завантажено повну серію зображень, отриманих при спостереженні сектору 54 ПЗЗ №1 камери 1. Проаналізовано деякі загальні характеристик зображень серії та показано їх придатність для проведення високоточної фотометрії;
- за даними вибірки TESS проведено фотометрію відкритої раніше екзопланетної системи WASP-2b. Побудовано складену криву інтенсивності WASP-2b, за якою оцінено основні параметри екзопланетної системи. Показано, що отримані величини параметрів добре узгоджуються з оцінками, отриманими раніше іншими авторами;
- проведено порівняння даних фотометрії транзиту WASP-2b, отриманих наземним телескопом АЗТ-22 та місією TESS. Показано, що за рахунок високої стабільності умов спостережень та тривалого накопичення сигналу космічна місія з невеликим телескопом може давати дані фотометрії, співставні по точності з великим наземним телескопом;
- з метою пошуку транзитних явищ виконано фотометрію зір у кількох ділянках зображень вибірки TESS. Виявлено змінність інтенсивності більшості об'єктів на масштабах $\sim 1\%$ або більше впродовж періоду спостережень ~ 27 діб. Частина зір є класичними змінними відомих типів.
- виявлено, що зоря ГYC 503-1272-1 має змінність, характерну для транзитів екзопланет. Побудовано складену криву блиску та оцінено параметри ймовірної екзопланетної системи ГYC 503-1272-1, яка являє собою типовий “гарячий Юпітер” біля зорі спектрального класу K8V;

- обґрунтовано необхідність подальших спостережень ТУС 503-1272-1 для підтвердження екзопланетної природи системи та уточнення її параметрів.

Перелік використаних джерел

1. G. Bruno, A. Bönker-Vallon. De l'infinito, universo et mundi / Über das Unendliche, das Universum und die Welten - Felix Meiner Verlag Hamburg, 2006. – 427 с.
2. W. S. Jacob. On certain Anomalies presented by the Binary Star 70 Ophiuchi – Royal Astronomical Society, 1855. – 3 с.
3. T. J. J. See. Researches on the orbit of F.70 Ophiuchi, and on the periodic perturbation in the motion of the system arising from the action of an unseen body – American Astronomical Society, 1896. – 9 с.
4. T. J. Sherrill. A Career of controversy: the anomaly OF T. J. J. See - Journal for the History of Astronomy, 1999. – 50 с.
5. L. Berman. 70 Ophiuchi as a triple system – University of California publications, 1932. – 7 с.
6. Peter van de Kamp. Stars nearer than five parsecs – Astronomical Society of the Pacific, 1945. – 8 с.
7. M. D. Worth, W. D. Heintz. Parallax, orbit and mass of the binary star 70 Ophiuchi - American Astronomical Society, 1974. – 4 с.
8. Wittenmyer, M. Endl, W. D. Cochran, A. P. Hatzes, G. A. H. Walker, S. L. S. Yang, D. B. Paulson. Detection Limits from the McDonald Observatory Planet Search Program – The Astronomical Journal, 2006. – 11 с.
9. B. Campbell, G. A. H. Walker, S. Yang. A search for substellar companions to solar-type stars – The Astrophysical Journal, 1988. – 20 с.
10. A. P. Hatzes, W. D. Cochran, M. Endl, B. McArthur, D. B. Paulson, G. A. H. Walker, B. Campbell, S. Yang. A Planetary Companion to Gamma Cephei A - The Astrophysical Journal, 2003. – 2 с.
11. M. Mayor, D. Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star – Nature, 1995 – 5 с.
12. G. W. Henry, G. W. Marcy, R. P. Butler, S. S. Vogt. A transiting “51 Peg-like” planet – The Astrophysical Journal, 2000 – 4 с.
13. O. Struve. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work – The Observatory, 1952. – 2 с.
14. D. Charbonneau, T. M. Brown, D. W. Latham, M. Mayor. Detection of planetary transits across a sun-like star - The Astrophysical Journal, 1999 – 4 с.
15. T. M. Brown. Photometric Detection of Transits by Extrasolar Planets - The Third MONS Workshop: Science Preparation and Target Selection, Proceedings of a Workshop held in Aarhus, Denmark, 2000 – 4 с.
16. T. Mazeh, D. Naef, G. Torres, D. W. Latham, M. Mayor, J.-L. Beuzit, T. M. Brown та інші. The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458 - The Astrophysical Journal, 2000 – 4 с.

17. C. Moutou, M. Deleuil, T. Guillot, A. Baglin, P. Bordé, F. Bouchy та інші. CoRoT: Harvest of the exoplanet program – Elsevier, 2013 – 10 с.
18. Kepler/K2 – NASA Science, URL: <https://science.nasa.gov/mission/kepler/> (дата звернення – 15.01.2024).
19. R. Vanderspek, J. P. Doty, M. Fausnaugh та інші. TESS Instrument Handbook - NASA Science Mission Directorate, 06.12.2018 – 72 с.
20. V. Suntharalingam, I. Prigozhin, K. Warner та інші. CCD imagers for the Transiting Exoplanet Survey Satellite from benchtop to space environment – Astronomical Notes, 2023 – 10 с.
21. TESS Observations – TESS, URL: <https://tess.mit.edu/observations/> (дата звернення – 02.04.2024).
22. TESS – Mikulski Archive for Space Telescopes, URL: <https://archive.stsci.edu/missions-and-data/tess> (дата звернення - 02.04.2024).
23. TESScut – TESScut.MAST, URL: <https://mast.stsci.edu/tesscut/> (дата звернення – 03.04.2024).
24. TESS Bulk Downloads - Mikulski Archive for Space Telescopes, URL: https://archive.stsci.edu/tess/bulk_downloads.html (дата звернення – 03.04.2024).
25. D. Charbonneau, J. N. Winn, M. E. Everett та інші. Precise Radius Estimates for the Exoplanets WASP-1b AND WASP-2b - The Astrophysical Journal, 2007 – с. 1322-1323.
26. A. Collier Cameron, F. Bouchy, G. Hébrard та інші. WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007 – с. 951-957.
27. Observing dates – NASA TESS, URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/sector.html> (дата звернення - 03.04.2024)
28. M. M. Fausnaugh, C. J. Burke, D. A. Caldwell та інші. TESS Data Release Notes: Sector 54, DR78 – NASA/TM, 21.09.2022 – с. 1.
29. P. Tenenbaum, J. M. Jenkins. TESS Science Data Products Description Document - NASA/TM, 2018 – с. 15-16.
30. A. C. Becker, P. Kundurthy, E. Agol та інші. Observations of the WASP-2 System by the Apostle Program, The Astrophysical Journal Letters, 2013 – с. 3.
31. A. C. Cameron, F. Bouchy, G. Hébrard та інші. WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007 – с. 951-957.
32. M. I. Saeed, S. N. Goderya, F. A. Chishtie. Multi-color photometry and parameters estimation of Jupiter-sized exoplanets; TRES-3b, WASP-2b and HATP-30b, New Astronomy 2020 – с. 9.

33. S. Seager, G. Mallén-Ornelas. A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve, *The Astrophysical Journal*, 2003 – с. 1040-1043.
34. CDS Portal - Strasbourg astronomical Data Center, URL: <http://cdsportal.u-strasbg.fr/> (дата звернення – 29.04.2024)
35. W. D. HEINTZ. DOUBLE STARS, Department of Astronomy, Swarthmore College, Swarthmore, U.S.A., 1978 – с. 93.
36. Exoplanet Space Missions – Sara Seager Exoplanets, URL: [Sara Seager \(archive.org\) / http://seagerexoplanets.mit.edu/exoplanet.htm](http://seagerexoplanets.mit.edu/exoplanet.htm) (дата звернення – 06.05.2024)
37. Martin V. Zombeck - Handbook of Space Astronomy and Astrophysics, Cambridge University Press, 1990 – с. 71-73.
38. Space and Mission Systems – BAE Systems, URL: [Space & Mission Systems | BAE Systems](#) (дата звернення – 09.05.2024)
39. NASA Exoplanet Archive – NASA Exoplanet Science Institute, URL: [Planetary Systems \(caltech.edu\)](#) (дата звернення – 13.05.2024)
40. J. K. Barstow, S. Aigrain, P. G. J. Irwin та інші - Transit spectroscopy with James Webb Space Telescope: systematics, starspots and stitching, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015 – с. 2546-2561.
41. NASA's Hubble Measures the Size of the Nearest Transiting Earth-Sized Planet – HubbleSite, URL: [NASA's Hubble Measures the Size of the Nearest Transiting Earth-Sized Planet | HubbleSite](#) (дата звернення - 13.05.2024)
42. К. О. Кравченко - Екзопланетна система WASP-2: спостереження, моделювання та аналіз транзиту, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2013 – с. 8.
43. Transiting Exoplanet Survey Satellite – Wikipedia, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Transiting_Exoplanet_Survey_Satellite#cite_note-NYT-20180920-1 (дата звернення – 04.06.2024)
44. D. C. Wells, E. W. Greisen, R. H. Harten - FITS - A Flexible Image Transport System, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 1981 – с. 363.
45. AstroImageJ - ImageJ for Astronomy - Astronomy at the University of Louisville, URL: <https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/> (дата звернення – 05.06.2024)
46. J. J. Fortney, R. I. Dawson, T. D. Komacek - Hot Jupiters: Origins, Structure, Atmospheres, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021.
47. А. В. Сергеев, О. А. Бурхонов, В. Н. Дудинов, А. П. Железняк, Ю. Н. Круглый, И. Е. Молотов, В. М. Шульга, Ш. А. Эгамбердиев, В. В. Коничек, А. В. Кочетов Модернизация телескопа АЗТ-22 Майданакской высокогорной обсерватории: результаты тестирования // [Радиофизика и радиоастрономия](#). - 2014. - Т. 19, № 1. - С. 20-25.

48. TYC 503-1272-1 - SIMBAD Astronomical Database – CDS, URL:
<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=TYC++503-1272-1&NbIdent=1> (дата звернення – 08.06.2024)