

УДК [524.3-126:523.4-852]:520.82

ПОИСК СЛЕДОВ АТМОСФЕР У ЭКЗОПЛАНЕТ ПО МНОГОЦВЕТНЫМ ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ ТРАНЗИТОВ

© 2025 Е. В. Бекесов^{1,2}, К. А. Лызенко^{1,2*}, А. М. Черепашук²,
А. А. Белинский², Н. А. Масленникова^{1,2}, А. М. Татарников²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 6 августа 2024 года; после доработки 26 октября 2024 года; принята к публикации 29 октября 2024 года

В работе приведены результаты исследования экзопланетных систем HD 189733, HAT-P-13, HAT-P-16 и HAT-P-65. С использованием оборудования Кавказской горной обсерватории и Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ были проведены многоцветные, в синих и красных лучах, фотометрические наблюдения транзитов экзопланет в перечисленных системах. На основании полученных данных построены кривые блеска, из которых определены радиусы экзопланет. Показано различие радиусов экзопланет в разных фильтрах, что может свидетельствовать о наличии атмосфер у исследуемых экзопланет.

Ключевые слова: *методы: фотометрия — экзопланеты — планеты и спутники: обнаружение*

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени открыты многие тысячи экзопланет¹. Для некоторых из них спектральным методом исследованы параметры атмосфер и их химический состав, что важно для поиска биомаркеров (см., например, Mandell et al., 2013; Ahrer et al., 2023). Целью данного исследования является разработка и апробирование метода обнаружения атмосфер у экзопланет с использованием многоцветных фотометрических наблюдений транзитов. Фотометрические наблюдения значительно проще спектральных и могут быть реализованы как на космических, так и на наземных телескопах. Например, Valyavin et al. (2018) по итогам обработки многоцветных фотометрических наблюдений в CAO РАН и КрАО РАН показали, что радиус планеты WASP-33 b с точностью до погрешности не меняется в диапазоне 3800–12 000 Å, из чего сделан вывод о наличии у данной планеты плоского трансмиссионного спектра. При точности космических многоцветных наблюдений порядка 10^{-4} звездной величины, как показали Abubekrov et al. (2011) и Bekesov (2024), удалось обнаружить, что радиус экзопланеты в системе HD 189733 возрастает при уменьшении длины волны, что свиде-

тельствует о наличии у этой экзопланеты атмосферы, рассеивающей свет по рэлеевскому закону. Bekesov (2024) на основе этих результатов изучил структуру атмосферы экзопланеты в системе HD 189733. Автором было показано, что эта структура согласуется с рэлеевским законом рассеяния света в атмосфере, а характерная высота экспоненциальной атмосферы экзопланеты составляет около 1000 км. Таким образом, Bekesov (2024) продемонстрировал перспективность многоцветных фотометрических наблюдений транзитов для выявления наличия атмосфер у экзопланет. Экзопланеты, у которых фотометрическим методом будут выявлены следы атмосфер, могут служить «мишенями» для более детального изучения спектральным методом.

К сожалению, массовые высокоточные наблюдения транзитов экзопланет на космических обсерваториях Kepler и TESS проводятся только в одном цвете (полосы пропускания $\lambda \cong 4300\text{--}8900\text{ Å}$ и $\lambda \cong 6000\text{--}10\,000\text{ Å}$ соответственно). Лишь для двух систем, HD 189733 и HD 209458, получены высокоточные многоцветные кривые транзитов звезд экзопланетами с борта телескопа им. Хаббла (Knutson et al., 2007; Pont et al., 2007; 2008).

Особый интерес представляет попытка поиска следов атмосфер у экзопланет по наземным многоцветным фотометрическим наблюдениям транзитов, которые могут быть легко реализованы на

*E-mail: lyzenko.ka19@physics.msu.ru

¹<https://exoplanets.nasa.gov>

телескопах диаметром 0.6–1.0 м. Точность наземных фотометрических наблюдений по крайней мере на порядок ниже, чем у спутниковых, и составляет $(1-3) \times 10^{-3}$ звездной величины. При такой точности выявление зависимости радиуса экзопланеты от длины волны из анализа транзитных кривых блеска представляет собой трудную задачу. Однако если учесть тот факт, что радиус затмеваемой звезды R_s и наклонение орбиты системы i не должны зависеть от длины волны, а коэффициенты нелинейного закона потемнения к краю затмеваемой звезды могут быть заданы из современной, весьма продвинутой теории тонких звездных атмосфер (см., например, Claret and Bloemen, 2011), то задача интерпретации кривой затмения звезды экзопланетой для каждой длины волны становится однопараметрической. Поскольку мы исследуем транзиты, в которых затмеваемые звезды принадлежат к главной последовательности (ГП), где геометрическая толщина атмосферы порядка 10^{-3} радиуса звезды, предположение о независимости радиуса звезды от длины волны в оптическом и инфракрасном (ИК) диапазонах представляется разумным. При уменьшении числа искомым параметров с пяти до одного даже при имеющейся точности наземных фотометрических наблюдений шансы выявить зависимость радиуса экзопланеты от длины волны, обусловленной наличием у планеты атмосферы, возрастают. Если для исследуемой системы с экзопланетой получена высокоточная спутниковая кривая затмения, из ее анализа можно получить высокоточные оценки радиуса звезды R_s и наклонение орбиты i . Эти значения могут быть положены в основу решения обратной задачи определения зависимости радиуса экзопланеты от длины волны из наземных многоцветных фотометрических наблюдений данного транзита.

В такой постановке задача выявления следов атмосферы по многоцветным наземным фотометрическим наблюдениям транзита представляется небезнадежной.

В данной работе изучены возможности обнаружения следов атмосфер у экзопланет по наземным многоцветным фотометрическим наблюдениям транзитов. Показано, что в системе HD 189733 различие в радиусах экзопланеты, определенное по наземным фотометрическим наблюдениям в фильтрах g' и I_c (эффективная длина волны $\lambda_{\text{eff}} = 4750$ и $7865 \text{ \AA}$ соответственно), согласуется с соответствующим различием в радиусах экзопланеты, определенным по высокоточным космическим наблюдениям.

Материал статьи изложен в следующем порядке. В разделе 2 представлены результаты модельных расчетов и исследована чувствительность

нашей обратной задачи к изменениям радиуса экзопланеты в случае однопараметрической модели. Раздел 3 содержит описание методики наблюдений и результаты обработки наших фотометрических наблюдений для ряда транзитов. В разделе 4 приведены кривые блеска транзитов и детали процедуры их интерпретации в рамках описанной однопараметрической постановки задачи. В разделе 5 представлены результаты интерпретации. В разделе 4 обсуждаются полученные результаты.

2. РЕШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Перед обработкой наблюдательных данных мы оценили, с какой точностью метод наименьших квадратов позволяет определить радиус экзопланеты на основе транзитных кривых блеска. Для этого мы вначале провели интерпретацию модельных кривых блеска, построенных с помощью нашей программы (Bekesov et al., 2021) по заранее заданным параметрам. Нами была смоделирована планетная система, состоящая из звезды солнечного радиуса и горячего Юпитера радиусом $85\,680 \text{ км}$ ($1.2 R_{\text{Jup}}$). Период обращения мы приняли равным 2.8 суток, большую полуось — 0.0388964 а.е. , наклонение орбиты — $87^\circ 5'$. Орбита была взята круговой. Данный набор параметров достаточно близок к характеристикам рассматриваемых нами систем HD 189733 b и характеристикам рассматриваемых нами систем HD 189733 b и HAT-P-13 b. Потемнение к краю звезды описывалось квадратичным законом. Мы рассмотрели два случая, соответствующие наблюдениям звезды с характеристиками, похожими на HD 189733, в фильтрах B ($4420 \text{ \AA}$; коэффициенты потемнения к краю диска: $u_1 = 0.77618$ и $u_2 = 0.04921$) и H ($16\,500 \text{ \AA}$; $u_1 = 0.07159127$; $u_2 = 0.37713557$).

Шаг по времени задавался равным 60, 30 и 15 секундам. Таким образом, для каждого фильтра мы получили по три кривых блеска, состоящих из 203, 407 и 815 точек соответственно. Далее к каждой из кривых был добавлен шум, созданный в соответствии с предположением, что ошибки имеют нормальное распределение с заданным среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0.002$. Помимо этого для кривой, состоящей из 407 точек, мы по отдельности добавили шумы, подчиняющиеся нормальному распределению со среднеквадратическими отклонениями 0.0001, 0.001, 0.002 и 0.005.

Далее на получившиеся кривые блеска мы наложили теоретические кривые, для которых совпадали все параметры, кроме радиуса планеты, и определили, как меняется сумма квадратов разностей, рассчитанная по формуле для нормированного χ^2 в

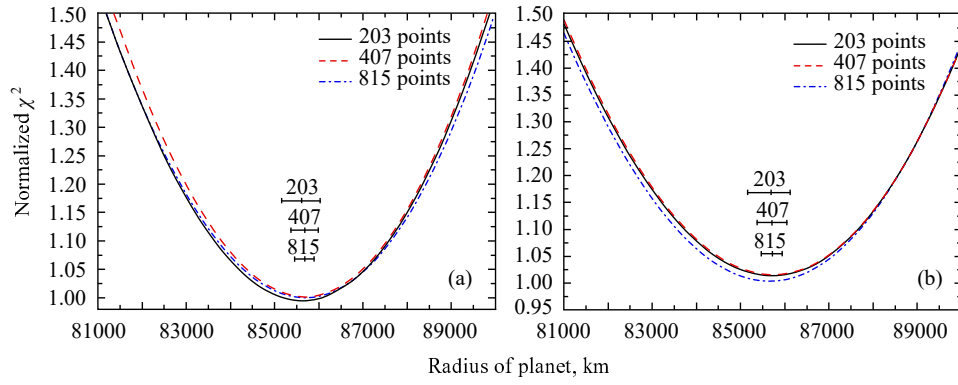


Рис. 1. Зависимость значений нормированного χ^2 от радиуса при обработке кривых блеска с разным количеством точек с добавленным шумом со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0.002$, построенных для коэффициентов потемнения к краю, соответствующих фильтрам B (a) и H (b). Также на графике отмечены значения для оптимального решения и границ интервала $1 - \sigma$ для разного количества точек.

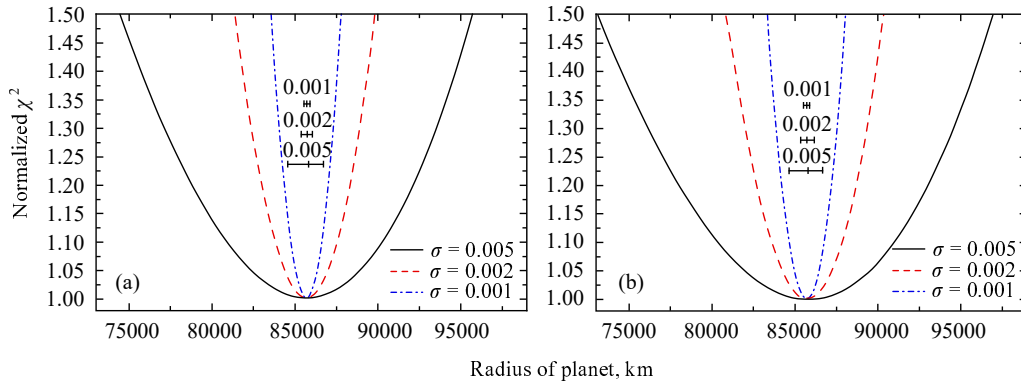


Рис. 2. Зависимость значений нормированного χ^2 от радиуса при обработке кривых блеска, состоящих из 407 точек, с различным среднеквадратическим отклонением добавленного шума, построенных для коэффициентов потемнения к краю, соответствующих фильтрам B (a) и H (b). Также на графике отмечены значения для оптимального решения и границ интервала $1 - \sigma$ для разного уровня шума.

зависимости от изменения радиуса планеты:

$$\chi^2(r_p) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{[I_i^o - I_i^c(r_p)]^2}{\sigma^2}, \quad (1)$$

где r_p — радиус планеты, N — количество точек в модельной кривой блеска, вычисленной для $r_p = 85680$ км и среднеквадратической ошибки шума σ ; I_i^o — блеск модельной кривой, I_i^c — блеск теоретической кривой, вычисленный с текущим значением радиуса планеты r_p .

Данный функционал с точностью до константы равен

$$\chi^2(r_p) = \frac{-2}{N-1} \sum_{i=1}^N \ln P[I_i^o - I_i^c(r_p)] = \frac{-2}{N-1} \ln L(r_p),$$

где $P[I_i^o - I_i^c(r_p)]$ — вероятность обнаружить соответствующее отклонение при фиксированных погрешностях, $L(r_p)$ — функция правдоподобия, максимум которой будет соответствовать наиболее оптимальному решению. Так как, согласно центральной предельной теореме, функция должна

стремиться к нормальному распределению, функционал χ^2 должен стремиться к параболе:

$$\chi^2(r_p) = \frac{1}{N-1} \frac{(r_p - r_{p0})^2}{\sigma_{r_p}^2} + \text{const}, \quad (2)$$

где r_{p0} — значение радиуса, соответствующее наименьшему значению χ^2 ; σ_{r_p} — среднеквадратическое отклонение радиуса планеты.

Таким образом, смещение оцениваемого радиуса на σ_{r_p} соответствует увеличению ненормированного $\chi^2(r_p)$ на 1. Данное соотношение мы использовали для определений погрешностей радиуса планеты.

На рис. 1 показана зависимость нормированного χ^2 от радиуса экзопланеты для кривых блеска с разным количеством точек N с одинаковой среднеквадратической ошибкой шума $\sigma = 0.002$ при коэффициентах потемнения к краю, соответствующих фильтрам B и H . Аналогично на рис. 2 показана та же зависимость для кривой блеска, состоящей из 407 точек, на которую были наложены

Таблица 1. Результаты обработки модельных кривых блеска в фильтре B для транзита планеты типа HD 189733 b. В столбцах: (1) — количество точек, (2) — индивидуальное отклонение, (3) — модельное значение радиуса экзопланеты, (4) и (5) — среднеквадратические ошибки, (6) и (7) — минимальное и максимальные значения границ интервала 1σ , (8) и (9) — минимальное и максимальные значения границ интервала 1.645σ

Характеристики модельной кривой			RMS, км		1σ -интервал, км		1.645σ -интервал ($P = 0.95$), км	
N	Δ_i	r_p , км	σ_-	σ_+	min	max	min	max
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
203	0.002	85 608	446	414	85 162	86 022	84 874	86 289
407	10^{-4}	85 687	16	15	85 671	85 702	85 661	85 712
407	0.001	85 688	155	143	85 533	85 831	85 433	85 923
407	0.002	85 687	309	287	85 378	85 974	85 179	86 159
407	0.005	85 686	858	832	84 828	86 518	84 275	87 055
815	0.002	85 677	229	212	85 448	85 889	85 300	86 026

Таблица 2. Результаты обработки модельных кривых блеска в фильтре H для транзита планеты типа HD 189733 b. В столбцах то же, что и в таблице 1

Характеристики модельной кривой			RMS, км		1σ -интервал, км		1.645σ -интервал ($P = 0.95$), км	
N	Δ_i	r_p , км	σ_-	σ_+	min	max	min	max
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
203	0.002	85 658	488	452	85 170	86 110	84 855	86 401
407	10^{-4}	85 691	17	16	85 674	85 707	85 663	85 718
407	0.001	85 722	173	160	85 549	85 882	85 437	85 985
407	0.002	85 718	348	320	85 370	86 038	85 146	86 244
407	0.005	85 820	951	889	84 869	86 709	84 256	87 282
815	0.002	85 714	245	227	85 469	85 941	85 311	86 087

шумовые дорожки с различными среднеквадратическими отклонениями.

В таблицах 1 и 2 приведены значения среднеквадратических ошибок радиуса в зависимости от количества точек и ширины шумовых дорожек и значения радиусов, соответствующие различным доверительным интервалам. Как видно из таблиц, существует определенная асимметричность кривых зависимости χ^2 от радиуса планеты (что связано с нелинейностью задачи), в результате чего среднеквадратическая ошибка в сторону уменьшения (σ_-) оказывается чуть больше, чем в сторону увеличения (σ_+). На рис. 3 показаны модельные кривые, соответствующие границам различных интервалов, определенных при обработке модельной кривой из 407 точек с точностью $\sigma = 0.002$.

Таким образом, даже при шумах, соответствующих наземным наблюдениям, точность определения радиуса планеты оказывается достаточной, чтобы заметить различия в радиусе планеты для разных длин волн. Как следует из работы Bekesov (2024), характерная высота атмосферы экзопланеты

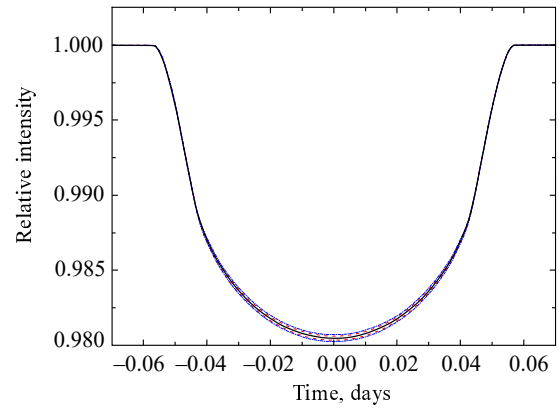


Рис. 3. Кривые блеска, соответствующие результатам обработки модельной кривой, состоящей из 407 точек со среднеквадратической ошибкой $\sigma = 0.002$. Сплошная линия — изначальная кривая; штриховой и штрихпунктирной линиями показаны границы диапазона на уровне 1σ и 1.645σ соответственно.

ты HD 189733 b составляет 1000 км. Нужно подчеркнуть, что данные значения точности опреде-

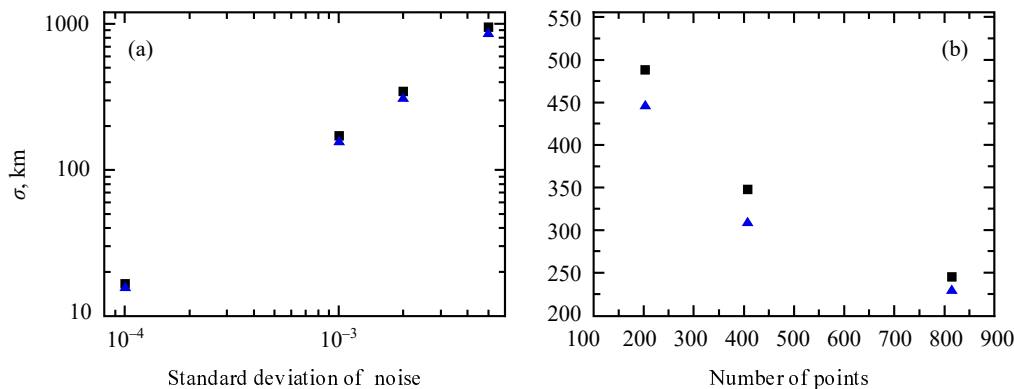


Рис. 4. Зависимость среднеквадратической ошибки определения радиуса планеты от ширины шумовой дорожки (a) и количества точек модельной кривой (b). Квадраты соответствуют условному фильтру H , треугольники — фильтру B .

ления радиуса были получены при интерпретации идеальных модельных кривых блеска с шумами, в точности описываемыми нормальным распределением с заранее известными параметрами звезды и орбиты экзопланеты, — в рамках однопараметрической задачи. При интерпретации наблюдательных данных по нескольким параметрам величина ошибки будет возрастать. Отметим, что, согласно данным таблиц 1 и 2, среднеквадратичная ошибка определения радиуса экзопланеты практически линейно возрастает при увеличении шума кривой блеска (при фиксированном числе точек кривой блеска) и убывает как корень квадратный из числа точек на кривой блеска (при фиксированной точности кривой блеска). Рисунок 4 поясняет сказанное.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения транзитов экзопланет HD 189733 b, HAT-P-13 b, HAT-P-16 b и HAT-P-65 b проводились на телескопах RC600 (ПЗС-фотометр Andor) и RC2500 (ИК-камера ASTRONIRCAM (ANC), расположенных на территории Кавказской горной обсерватории МГУ (КГО), а также на телескопе Z60-2 (ПЗС-фотометр FLI 16803), расположенном на территории Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ (КАС).

Наблюдения в полосе H были выполнены с инфракрасной камерой ASTRONIRCAM (Nadjir et al., 2017), установленной на 2.5-м телескопе КГО. При наблюдениях использовалось автогидирование во избежание возможных смещений звезд на кадрах. Процедуры первичной обработки и калибровки данных описаны в работе Tatarnikov et al. (2023).

В таблице 3 представлена основная информация о телескопах и инструментах, на которых проводились наблюдения.

3.1. Выбор экзопланет для наблюдения

Основаниями для выбора экзопланет служили опубликованные работы и оценки характеристик объектов, полученные другими исследователями. Мы целенаправленно выбирали горячие Юпитеры с небольшим периодом вращения ($P < 4^d$) и большой глубиной транзита ($r_p/R_s > 0.1$). Это обуславливалось невысокой точностью наземных наблюдений, а также ограниченным временем использования наблюдательного оборудования. Кроме того, для этих экзопланетных систем имеется значительный объем данных, полученных при проведении как наземных, так и космических наблюдений (Pont et al., 2007), параметров звезды и системы, которые мы использовали для того, чтобы задать входные данные, необходимые для реализации однопараметрической постановки задачи, а также для сравнения полученных результатов и оценки их надежности.

В таблице 4 указаны даты наблюдений, фильтры² с центральной длиной волны и количество снимков, приходящихся на транзит.

4. ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Калибровка данных выполнена стандартным для ПЗС-фотометрии способом (учет кадров подложки, темнового тока и плоских полей). Для обработки фотометрических данных мы используем программу *AstroImageJ*³ (Collins et al., 2016).

В таблице 4 представлена информация о полном количестве снимков транзитов. Однако из-за непредсказуемых погодных условий или особенностей телескопов не все снимки транзитов подходили для дальнейшей обработки. Были исключены

²Характеристики фильтра Bn идентичны таковым для фильтра B ; отличие в том, что у фильтра Bn больше пропускающая способность и отсутствует красная утечка.

³<https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>

Таблица 3. Характеристики наблюдательного оборудования (Nadjip et al., 2017; Berdnikov et al., 2020)

Телескоп	Детектор	Диаметр зеркала, см	Эквивалентное фокусное расстояние, м	Поле зрения, угл. мин.	Полосы	Система
RC600	Andor	60	4.2	22 × 22	$UBVR_c I_c$ $g'r'i'$ z'	Johnson–Cousins SDSS Pan-STARRS
RC2500	ANC	250	20	4.5 × 4.5	$YJHK$, узкие полосы H_2 , K_{cont} , CO, Br $_{\gamma}$, [Fe II], CH $_4$ (on/off)	MKO–NIR
Z60-2	FLI 16803	60	7.5	22 × 22	$UBVR_c I_c$ узкие полосы [O III]	Johnson–Cousins

Таблица 4. Журнал наблюдений. В колонках таблицы приведены: (1) — название планеты, (2) и (3) — место и дата проведения наблюдений, (4) — используемые фильтры, (5) — центральная длина волны, (6) — количество точек наблюдений, (7) — среднеквадратическая ошибка

Экзопланета	Место наблюдения	Дата	Фильтр	λ_c	N_{obs}	σ
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
HD 189733 b	КГО (RC600)	09.07.2022	g'	475 нм	803	0.0041
	КГО (RC600)	27.09.2022	I_c	786.5 нм	619	0.0099
HAT-P-16 b	КАС (Z60-2)	21.10.2022	B	442 нм	232	0.0027
	КГО (RC600)	21.10.2022	I_c	786.5 нм	235	0.0023
	КАС (Z60-2)	15.11.2022	B	442 нм	496	0.0032
HAT-P-65 b	КАС (Z60-2)	22.08.2023	B	442 нм	158	0.0055
	КГО (RC600)	22.08.2023	g'	475 нм	169	0.0031
HAT-P-13 b	КГО (RC600)	26.02.2024	Bn	442 нм	698	0.0035
	КГО (SAI25)	26.02.2024	H	1.65 мкм	1492	0.074

следующие данные: HAT-P-65 b — восемь снимков плохого качества в фильтре B ; HAT-P-16 b — 27 снимков в фильтре I_c ; HD 189733 b — 25 снимков в фильтре I_c .

Для оставшихся кадров параметры для обработки и опорные звезды были подобраны таким образом, чтобы кривые блеска имели минимальный уровень шума. Мы выбирали опорные звезды близкого с объектом исследования спектрального класса и звездной величины, однако учитывали, что для большей статистической значимости результатов опорных звезд должно быть не меньше трех. Также мы выбирали опорные звезды, расположенные близко к объекту исследования, поскольку чем ближе находится опорная звезда, тем меньше эффекты краевых искажений (что важно для расчета потоков от объектов).

Из-за неровности хода телескопа, скачков или атмосферных неустойчивостей звезды на кадрах смещаются, в результате чего увеличиваются шумовые дорожки. Чтобы устранить этот эффект, мы использовали модуль WCS программы AstroImageJ,

позволяющий минимизировать (компенсировать) смещение звезд на кадрах.

5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ КРИВЫХ БЛЕСКА

Интерпретация полученных наблюдательных данных проводилась с использованием нашей программы, принцип работы которой описали Bekesov et al. (2021). Период обращения и большая полуось орбиты фиксировались на основе данных, полученных для выбранных нами экзопланет другими исследователями. Используемые значения приведены в таблице 5. Ошибки для значений радиуса приведены для 95%-го интервала, расчеты проводились на основе распределения функционала χ^2 аналогично случаю модельных кривых из раздела 2. В качестве примера на рис. 5 показано распределение χ^2 как функция радиуса планеты при решении однопараметрической задачи для наблюдений HD 189733 b в различных фильтрах.

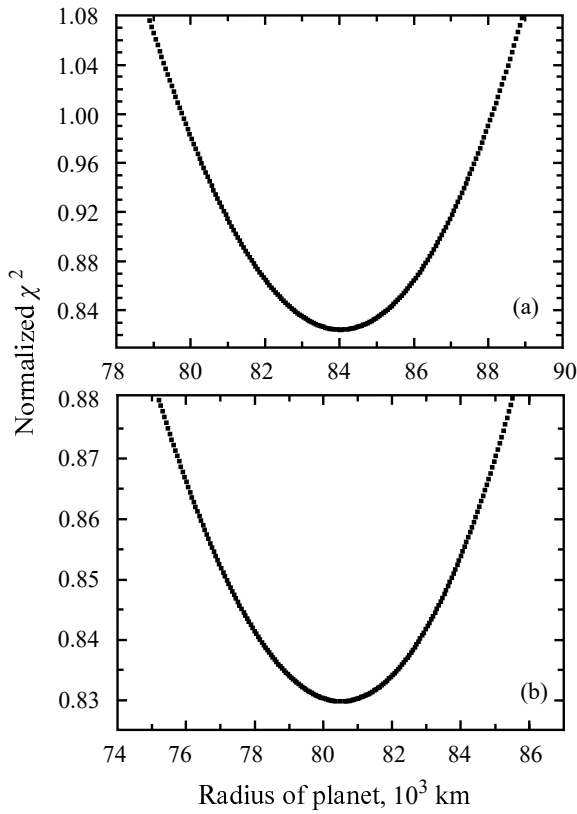


Рис. 5. Зависимость значений нормированного χ^2 от радиуса планеты для транзитов HD 189733 b в фильтрах g' (a) и I_c (b).

Таблица 5. Значения большой полуоси a , периода обращения P и радиуса звезд R_s , которые фиксировались при обработке кривых блеска

Экзопланета	a , а. е.	P , дни	R_s , $R_\odot$
HD 189733 b	0.03126^a	2.2185752^b	0.756^b
НАТ-Р-16 b	0.04134^b	2.7759712^b	1.237^d
НАТ-Р-65 b	0.04042^c	2.60544751^c	1.74
НАТ-Р-13 b	0.0427^b	2.9162383^b	1.56^e

Значения взяты из работ: ^aRosenthal et al. (2021), ^bВопомо et al. (2017), ^cKang et al. (2024), ^dBuchhave et al. (2010), ^eBakos et al. (2009).

5.1. HD 189733 b

При интерпретации кривых блеска экзопланеты HD 189733 b радиус звезды и наклон орбиты фиксировались и принимались равными тем, что были получены нами при обработке кривых блеска, полученных в ходе многоцветных фотометрических наблюдений на телескопе им. Хаббла в 2011 году (Bekesov, 2024; Pont, 2011). Кривые блеска с наложенными результатами аппроксимации представлены на рис. 6 и 7.

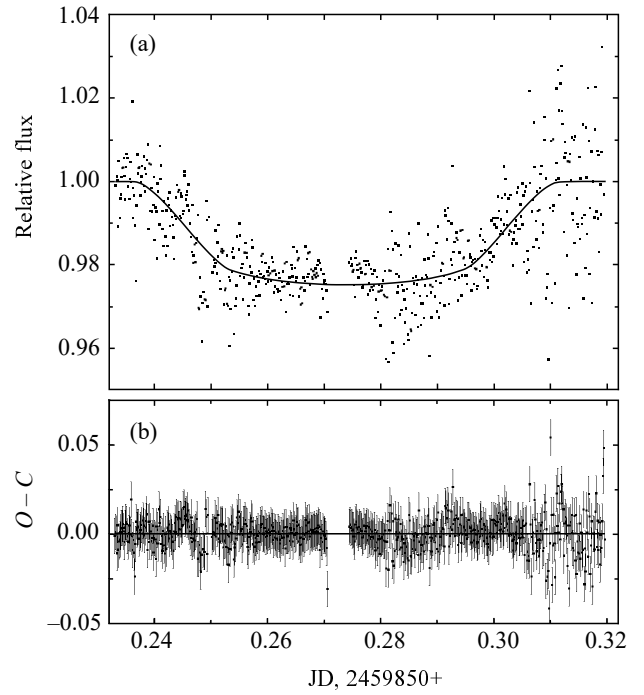


Рис. 6. Кривая блеска, полученная при наблюдении транзита HD 189733 b 27 сентября 2022 года в фильтре I_c , с наложенной кривой, полученной в результате аппроксимации (a); график разницы результатов наблюдений и аппроксимации (b).

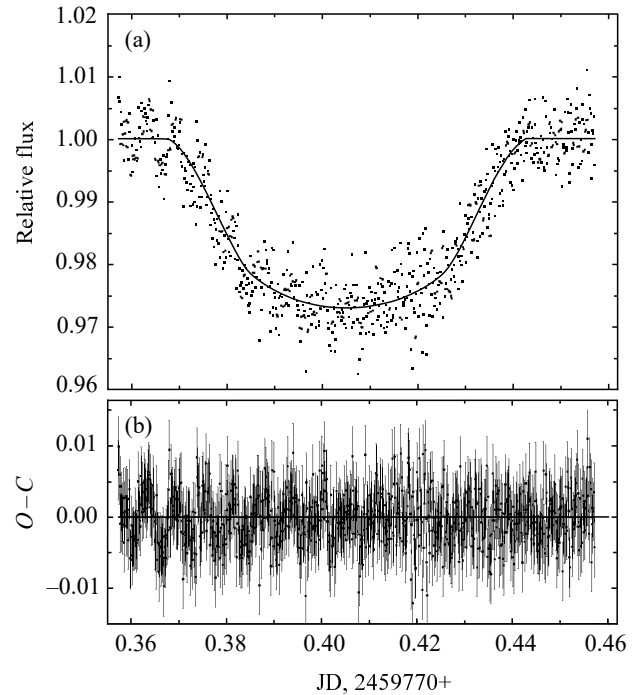


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но в фильтре g' .

5.2. НАТ-Р-16 b

Для звезды НАТ-Р-16 мы использовали оценки радиуса из работы Buchhave et al. (2010). Наклонение орбиты планеты НАТ-Р-16 b, равное $87^\circ.324$,

было определено из интерпретации кривой блеска, полученной 15 ноября 2022 года в фильтре *B*, для остальных двух транзитов оно задавалось как фиксированный параметр. Мы провели также аппроксимацию всех трех кривых блеска с фиксированным значением наклона орбиты, $i = 86^\circ 6$, взятым из работы *Wong et al. (2017)*. Кривые блеска с наложением результатов аппроксимации представлены на рис. 8–10.

5.3. HAT-P-65b

Радиус звезды HAT-P-65 мы определили из интерпретации кривой блеска, полученной в фильтре *B*. Таким же образом было определено наклонение орбиты для данной системы. Кривые блеска с наложенными результатами аппроксимации представлены на рис. 11 и 12.

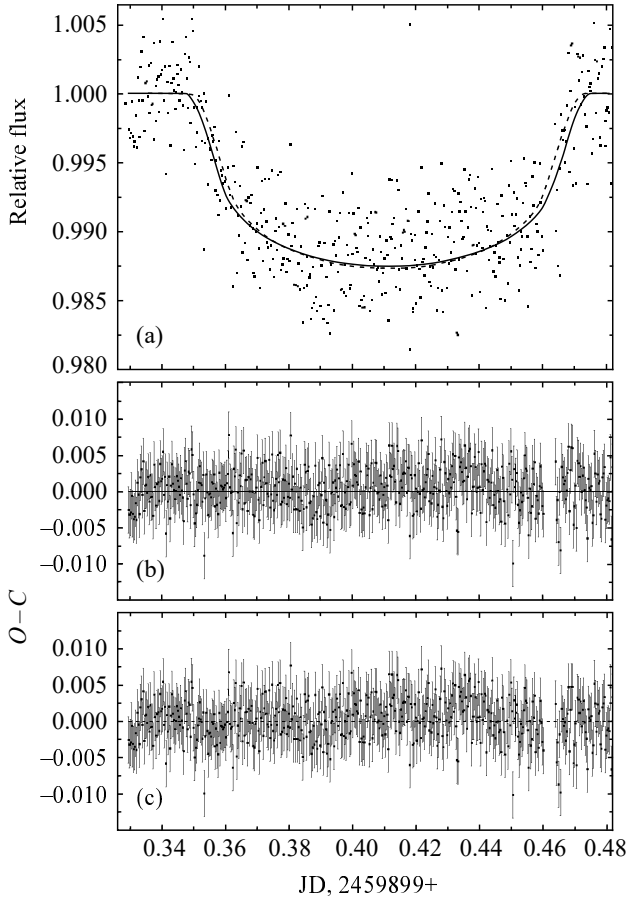


Рис. 8. Кривая блеска по данным наблюдения транзита HAT-P-16b 15 ноября 2022 года в фильтре *B*, с наложенной кривой, полученной в результате аппроксимации (а). Сплошная линия соответствует аппроксимации с наклонением орбиты $i = 87^\circ 324$, штриховая — аппроксимации с наклонением орбиты $i = 86^\circ 6$. Графики соответствующей разницы результатов наблюдений и аппроксимации показаны на панелях (b) и (c).

5.4. HAT-P-13b

Оценка радиуса звезды HAT-P-13 взята нами из работы *Vakos et al. (2009)*. Наклонение орбиты при интерпретации кривых блеска задавалось как свободный параметр. Попытка зафиксировать наклонение орбиты для кривой, полученной в фильтре *H*, привела к получению нефизичных результатов, что, возможно, связано с наличием тренда в наблюдениях. Кривые блеска с наложением результатов аппроксимации представлены на рис. 13 и 14.

5.5. Закон потемнения к краю

Все расчеты проводились с использованием квадратичного закона потемнения к краю (*Claret and Bloemen, 2011*), описываемого формулой

$$I(\rho) = I_0 \left[1 - u_1 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_s^2}} \right) - u_2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_s^2}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

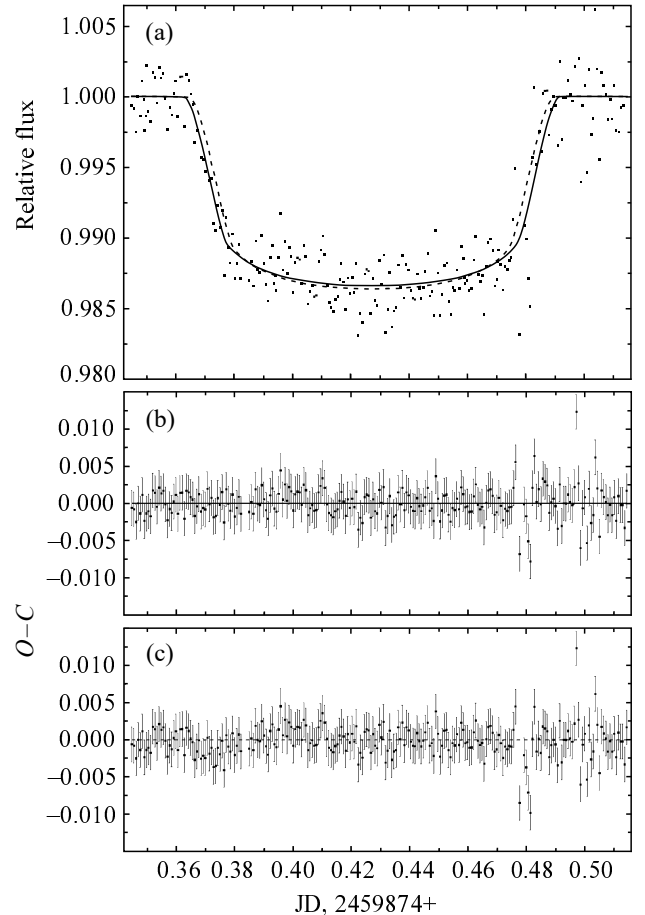


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, но по данным наблюдений транзита HAT-P-16b 21 октября 2022 года в фильтре *I_c*.

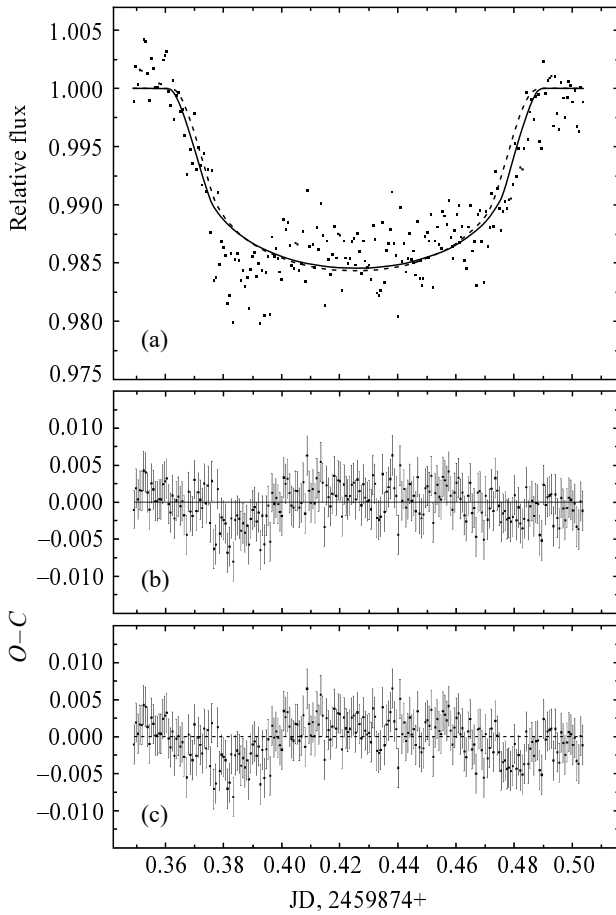


Рис. 10. То же, что и на рис. 9, но в фильтре B .

где ρ — полярное расстояние от центра диска звезды, I_0 — яркость в центре диска, R_s — радиус диска звезды, u_1 и u_2 — линейный и квадратичный коэффициенты потемнения к краю диска соответственно. Яркость в любой точке диска планеты предполагается равной нулю. Коэффициенты потемнения к краю брались из теоретических расчетов на основе моделей звездных атмосфер Claret and Bloemen (2011); их значения приведены в таблице 6.

Для экзопланеты HAT-P-16 b эксцентриситет орбиты был принят равным $e = 0.04$ при аргументе перигея $\omega = 214^\circ$ (Buchhave et al., 2010). Для остальных экзопланет орбиты считались круговыми. Наклонения орбит всех систем были получены из аппроксимации транзитов в фильтрах B и g' . В дальнейшем эти значения задавались фиксированными при обработке транзитов соответствующих планет в фильтрах I_c и Bn .

Подобный выбор параметров, используемых в качестве вводных при аппроксимации кривых, был сделан нами исходя из того, что ни радиус звезды, ни наклонение орбиты планеты, ни характеристики ее орбиты не должны зависеть от длины волны.

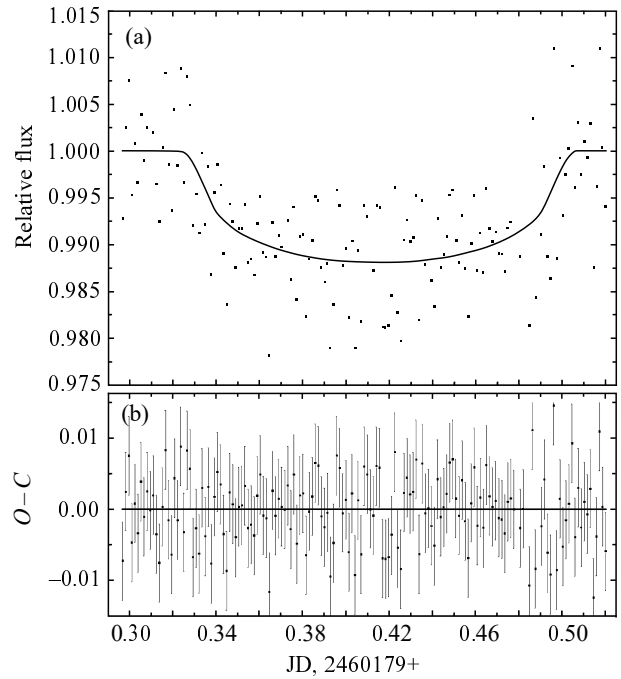


Рис. 11. Кривая блеска, полученная при наблюдении транзита HAT-P-65 b 22 августа 2023 года в фильтре B , с наложенной кривой, построенной в результате аппроксимации (a), и график разницы результатов наблюдений и аппроксимации (b).

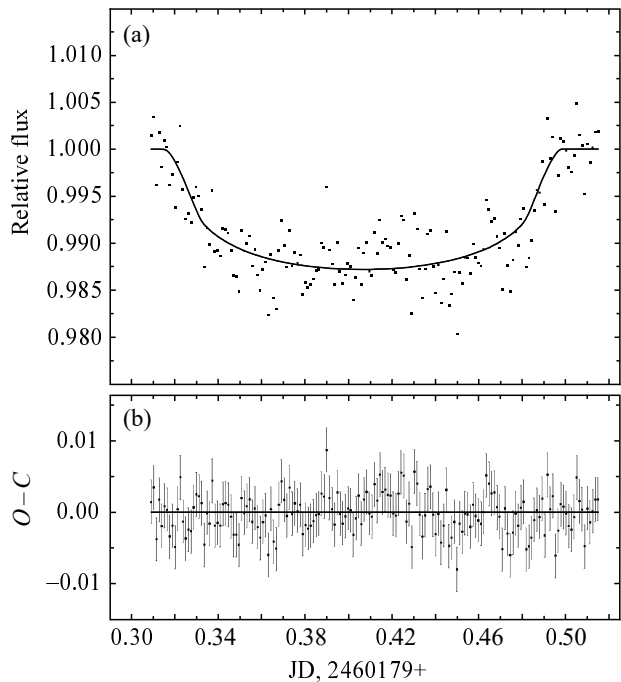


Рис. 12. То же, что и на рис. 11, но в фильтре g' .

Таким образом, задав их в качестве одинаковых параметров при аппроксимации кривых блеска в разных фильтрах, мы могли бы получить более точную картину зависимости радиуса планеты от

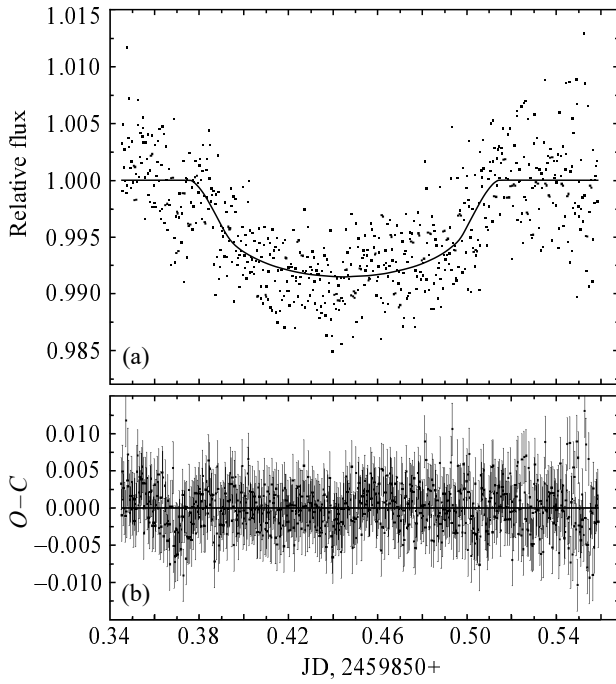


Рис. 13. Кривая блеска по данным наблюдений транзита НАТ-Р-13 b 26 февраля 2024 года в фильтре Bn , с наложенной кривой, полученной в результате аппроксимации (a), и график разницы результатов наблюдений и аппроксимации (b).

Таблица 6. Значения линейного и квадратичного коэффициентов потемнения к краю (u_1 и u_2), использовавшиеся при обработке кривых блеска

Звезда	Фильтр	u_1	u_2
HD 189733	g'	0.7762	0.0492
	I_c	0.4022	0.2107
НАТ-Р-16	B	0.5774	0.2139
	I_c	0.2394	0.3024
НАТ-Р-65	B	0.6527	0.1576
	g'	0.5693	0.2102
НАТ-Р-13	Bn	0.736	0.0932
	H	0.0601	0.3457

длины волны, которая является следствием поглощения света звезды в атмосфере планеты.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 7 приведены результаты интерпретации наблюдаемых кривых блеска в разных фильтрах, а также радиусы экзопланет с их ошибками, полученные при значениях радиуса звезды и наклона орбиты, одинаковых для синего и красного концов спектра. Также в таблице 7 приведено время средней точки транзита (transit midpoints).

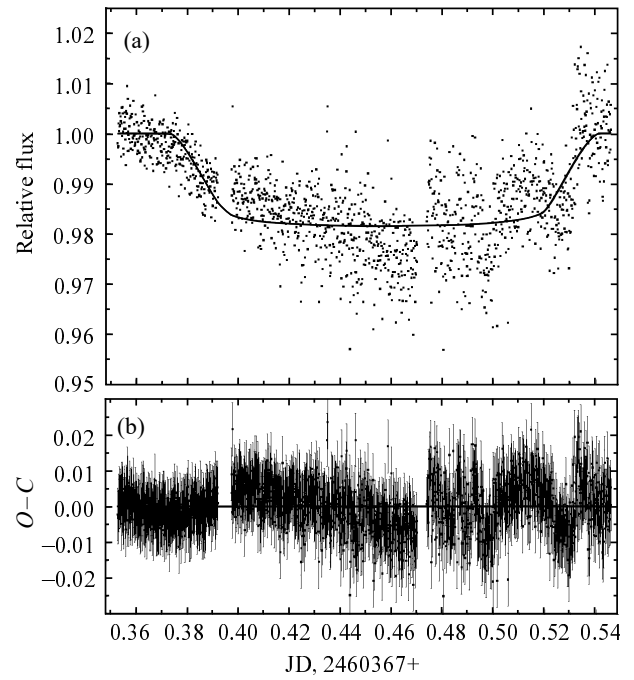


Рис. 14. То же, что и на рис. 13, но в фильтре H .

Поскольку обратная задача однопараметрическая, ошибка значения радиуса определялась путем отсечения зависимости $\chi^2(p)$ уровнем, соответствующим увеличению минимального значения ненормированного $\chi^2(p)$ на единицу. Так как во всех случаях минимальное значение нормированного (приведенного) $\chi^2(p)$ близко к единице, можно считать, что используемая нами однопараметрическая модель адекватна наблюдаемым кривым блеска. Это, в частности, позволяет утверждать, что значения коэффициентов в нелинейном законе потемнения (см. формулу (3)), которые мы задали, используя данные Claret and Bloemen (2011), хорошо согласуются с теоретическими как для синего ($\lambda \cong 4500 \text{ \AA}$), так и для красного ($\lambda \cong 8000 \text{ \AA}$) конца спектра. Таким образом, косвенно подтверждается справедливость теоретической зависимости коэффициентов потемнения к краю от длины волны (Claret and Bloemen, 2011). Рассмотрим результаты по каждой затменной системе в отдельности.

6.1. Система HD 189733 b

Точность транзитных кривых блеска в фильтре g' примерно равна $0^{\text{m}}004$, а в I_c -фильтре — $0^{\text{m}}01$. Наблюдается значимое различие радиусов экзопланеты в разных полосах: радиус экзопланеты ориентировочно на 3000 км (3.6%) больше в синих лучах по сравнению с красными. Ошибка определения радиуса экзопланеты, соответствующая 95%-му интервалу, приблизительно равна

Таблица 7. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска (звездочкой выделены значения, взятые из литературы)

Экзопланета	Дата наблюдения	Фильтр	Наклонение орбиты, град	Радиус планеты, км	Нормированный χ^2	Средняя точка транзита, MJD
HD 189733 b	09.07.2022	g'	85.72	$83\,614^{+498}_{-535}$	0.820982	59770.4053
	27.09.2022	I_c	85.72	$80\,496^{+1423}_{-1589}$	0.82982	59850.2739
HAT-P-16 b	21.10.2022	I_c	87.324	$93\,716^{+1079}_{-1170}$	0.80477	59874.4271
			86.6*	$94\,884^{+1041}_{-1133}$	0.88956	59874.4271
	21.10.2022	B	87.324	$95\,736^{+1091}_{-1191}$	0.90184	59874.4254
			86.6*	$97\,499^{+1077}_{-1153}$	1.05815	59874.4254
	15.11.2022	B	87.324	$86\,194^{+941}_{-1036}$	0.82662	59899.4113
			86.6*	$87\,700^{+898}_{-995}$	0.85432	59899.4113
HAT-P-65 b	22.08.2023	B	88.6594	$114\,675^{+4128}_{-4456}$	0.81405	60179.4163
	22.08.2023	g'	88.6594	$120\,200^{+2035}_{-2185}$	0.8234	60179.4068
HAT-P-13 b	26.02.2024	Bn	83.6694	$95\,338^{+1683}_{-1722}$	0.82927	60367.4451
	26.02.2024	H	86.1866	$142\,179^{+9875}_{-11\,222}$	0.85288	60367.4573

500 км для фильтра g' ($\lambda \cong 4750 \text{ \AA}$) и 1500 км для фильтра I_c ($\lambda \cong 7865 \text{ \AA}$). Параметры обнаруженной нами атмосферы качественно согласуются с результатами интерпретации многоцветных спутниковых высокоточных кривых блеска для этой системы (Bekesov, 2024), согласно которым характерная высота атмосферы экзопланеты, рассеивающей свет по рэлеевскому закону, составляет примерно 1000 км. Таким образом, мы показали возможность обнаружения следов атмосферы у экзопланеты по многоцветным наземным фотометрическим наблюдениям транзитов (в рамках однопараметрической модели). Рисунок 15 поясняет сказанное.

6.2. Система HAT-P-16 b

Точность транзитной кривой блеска в данном случае составляет около $0^{\text{m}}003$ в фильтре B и $0^{\text{m}}002$ в фильтре I_c . По наблюдениям, выполненным одновременно в фильтрах I_c (60-см телескоп Крымской станции ГАИШ) и B (60-см телескоп КГО) 21 октября 2022 года, радиус экзопланеты возрастает с уменьшением длины волны на 2020 км (2% от радиуса планеты): от $r_p \cong 93\,716$ км в фильтре I_c до $r_p \cong 95\,736$ км в фильтре B . Ошибка определения радиуса экзопланеты составляет 1000–1200 км, а разница в значениях r_p примерно равна 2000 км, то есть порядка двух величин интервала ($3-4\sigma_{r_p}$). Небольшое уменьшение наклонения орбиты, с $87^{\circ}324$ до $86^{\circ}6$, одинаковое в обоих фильтрах, увеличивает абсолютные значения

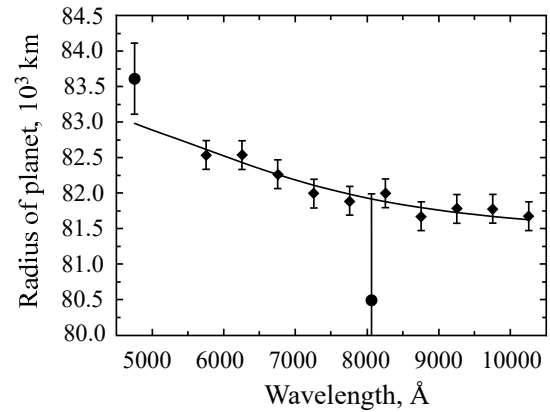


Рис. 15. Зависимость радиуса экзопланеты HD 189733 b от длины волны по результатам обработки кривых блеска, полученных телескопом им. Хаббла (ромбы), и обработки кривых блеска, полученных нами в фильтрах g' и I_c (кружки). Линия показывает результаты моделирования для рэлеевской атмосферы.

радиуса планеты, но почти не меняет различия в ее радиусах, которое составляет приблизительно 2600 км. Это демонстрирует устойчивость выявления различия радиуса экзопланеты в разных фильтрах в том случае, когда мы используем априорную информацию о независимости радиуса звезды и наклонения орбиты от длины волны. По наблюдениям, выполненным в фильтре B (60-см телескоп КГО) 15 ноября 2022 года, радиус экзопланеты получился равным 86 194 км, что на 9542 км меньше, чем для транзита, полученного в этом же фильтре 21 октября, и на 7522 км меньше (а не больше),

чем в фильтре I_c . При этом среднеквадратическая ошибка определения радиуса экзопланеты близка к 1000 км. Если усреднить значения радиуса экзопланеты в фильтре B , найденные по наблюдениям, выполненным 21 октября (95 736 км) и 15 ноября (86 194 км), то получаем среднее значение радиуса планеты за две ночи наблюдений, равное 89 955 км, что на 3761 км меньше (но не больше), чем значение радиуса 93 716 км в фильтре I_c . По-видимому, значительный разброс оценок радиуса экзопланеты вызван недостаточной точностью наблюдаемых кривых блеска. Либо на величине определяемого радиуса планеты сказываются отклонения нашей модели двойной системы от стандартной, например наличие и перемещение пятен на поверхности звезды. Этот результат еще раз подчеркивает необходимость принятия специальных мер по повышению точности кривых блеска (в частности, максимально точного определения внезатменного уровня блеска), а также использования наблюдений нескольких затмений. Отметим, что наше среднее значение радиуса планеты, 89 955 км, лежит в диапазоне существующих оценок радиуса данной планеты: 84 966–92 034 км (Buchhave et al., 2010; Turner et al., 2016; Womono et al., 2017).

6.3. Система HAT-P-65 b

По наблюдениям, выполненным 22 августа 2023 года одновременно на Крымской станции (фильтр B) и в КГО ГАИШ (фильтр g'), точность транзитных кривых сравнительно невысока (около $0^{\text{m}}005$), число точек на кривых блеска тоже невелико. Радиус экзопланеты равен 114 675 км в фильтре g' и 120 200 км в фильтре B . Разница значений равна 5525 км, что сравнимо с ошибкой определения радиуса 2000–4000 км. Поскольку длины волн в данном случае близки, можно использовать среднее значение радиуса, которое равно 117 438 км с ошибкой 3000 км (2.5% от радиуса планеты). Это величина согласуется со значениями радиуса планеты, определенными Kang et al. (2024): $115\,025 \pm 1714$ км.

6.4. Система HAT-P-13 b

По наблюдениям в фильтре Bn , выполненным в КГО ГАИШ 26 февраля 2024 года, точность транзитной кривой блеска составляет примерно $0^{\text{m}}0035$, число точек на кривой блеска равно 698. Соответствующее значение радиуса экзопланеты равно 95 338 км с ошибкой 1700 км (2% от радиуса планеты). Эта величина согласуется с оценкой радиуса планеты из работы Winn et al. (2010). В настоящее время мы планируем продолжать наблюдения в фильтрах G , H и K с целью повышения точности наблюдения.

В то же время наблюдения данной системы в фильтре H имели относительно невысокую точность, равную $0^{\text{m}}0074$, а также ярко выраженные тренды, вызванные погодными условиями, которые не удалось полностью редуцировать в ходе первичной обработки. Это привело к значительному отличию полученных для данной кривой блеска результатов интерпретации от ожидаемых. Найденный нами радиус планеты оказался равен 142 179 км, что почти в полтора раза превышает результат для наблюдений этой же планеты в фильтре Bn .

Зная оценки масс экзопланет (см. Buchhave et al., 2010; Kang et al., 2024; Stassun et al., 2017; Winn et al., 2010), мы можем уточнить величину их средней плотности, которая составляет $\rho = 0.936 \text{ г см}^{-3}$ для HD 18973 b, 0.178 г см^{-3} для HAT-P-65 b и 0.475 г см^{-3} для HAT-P-13 b. Эти значения плотности характерны для горячих Юпитеров. В то же время плотность 2.466 г см^{-3} для HAT-P-16 b значительно больше обычных значений для планет типа Юпитер и скорее характерна для класса Нептунов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наша работа нацелена на исследование возможности обнаружения следов атмосфер экзопланет по транзитным кривым блеска, полученным с помощью наземных многоцветных фотометрических наблюдений. Отметим, что впервые такая задача была поставлена в работе Valyavin et al. (2018). Это важно для методической проработки проблем, которые будут решаться на специализированных космических обсерваториях, проводящих многоцветные наблюдения транзитов экзопланет: космической обсерватории, приуроченной к 270-летию юбилею МГУ, космической обсерватории Спектр-УФ и др. Для интерпретации фотометрических наблюдений транзитов мы предлагаем использовать априорную информацию о том, что радиус звезды (для звезд ГП) и наклонение орбиты не зависят от длины волны. Это позволяет надеяться на успех даже при интерпретации наземных многоцветных наблюдений транзитов, а при интерпретации высокоточных спутниковых многоцветных фотометрических наблюдений транзитов использование этой важной информации позволит значительно увеличить точность определения радиуса экзопланеты в каждом спектральном диапазоне (см., например, Bekesov, 2024).

На примере системы HD 189733 нами показано, что возрастание радиуса экзопланеты с уменьшением длины волны, обусловленное наличием у планеты атмосферы, рассеивающей свет по рэлеевскому закону, найденное нами по высокоточным спутниковым наблюдениям (Bekesov, 2024),

подтверждается нашими наземными наблюдениями. В случае систем НАТ-Р-16b, НАТ-Р-65b и НАТ-Р-13b из-за сравнительно низкой точности определения радиуса экзопланеты по наземным фотометрическим наблюдениям нам не удалось «почувствовать» наличие атмосферы у экзопланеты. Мы можем лишь дать верхний предел на геометрическую толщину атмосферы: примерно 2–3% от радиуса планеты.

Для повышения точности определения радиуса экзопланеты необходимо принять особые меры по повышению точности наземных транзитных кривых блеска, например использовать данные, полученные для нескольких затмений в каждом фильтре. Важно также проводить наблюдения не только во время затмения, но и в далеких крыльях внезатменного блеска. Изменения радиуса экзопланеты вызывают главным образом изменения глубины затмения, и, чтобы увеличить точность определения радиуса экзопланеты, необходимо измерить уровень внезатменного блеска с максимально возможной точностью.

В дальнейшем мы планируем проводить многоцветные фотометрические наблюдения транзитов как на Крымской станции, так и в КГО ГАИШ, включая и наблюдения в фильтрах *ЖНК* на 2,5-м телескопе, и развивать методику интерпретации полученных данных с целью поиска следов атмосфер у экзопланет. Экзопланеты с найденными следами атмосфер могут служить целевыми объектами для более детальных спутниковых спектроскопических наблюдений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. K. Abubekrov, N. Y. Gostev, and A. M. Cherepashchuk, *Astronomy Reports* **55** (12), 1051 (2011). DOI:10.1134/S1063772911120018
2. G. Á. Bakos, A. W. Howard, R. W. Noyes, et al., *Astrophys. J.* **707** (1), 446 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/707/1/446
3. E. V. Bekesov, *Astronomy Reports*, **68** (8), 790 (2024). DOI:10.1134/S1063772924700689
4. E. V. Bekesov, A. A. Belinskii, and S. B. Popov, *Astronomy Reports* **65** (12), 1278 (2021). DOI:10.1134/S1063772921120015
5. L. N. Berdnikov, A. A. Belinskii, N. I. Shatskii, et al., *Astronomy Reports* **64** (4), 310 (2020). DOI:10.1134/S1063772920040010

6. A. S. Bonomo, S. Desidera, S. Benatti, et al., *Astron. and Astrophys.* **602**, id. A107 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629882
7. L. A. Buchhave, G. Á. Bakos, J. D. Hartman, et al., *Astrophys. J.* **720** (2), 1118 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/720/2/1118
8. A. Claret and S. Bloemen, *Astron. and Astrophys.* **529**, id. A75 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201116451
9. K. A. Collins, J. F. Kielkopf, K. G. Stassun, and F. V. Hessman, *arXiv e-prints astro-ph:1601.02622* (2016). DOI:10.48550/arXiv.1601.02622
10. E.-M. Ahrer et al. (JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team), *Nature* **614** (7949), 649 (2023). DOI:10.1038/s41586-022-05269-w
11. H. Kang, G. Chen, E. Pallé, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **528** (2), 1930 (2024). DOI:10.1093/mnras/stae072
12. H. A. Knutson, D. Charbonneau, L. E. Allen, et al., *Nature* **447** (7141), 183 (2007). DOI:10.1038/nature05782
13. A. M. Mandell, K. Haynes, E. Sinukoff, et al., *Astrophys. J.* **779** (2), article id. 128 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/779/2/128
14. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017). DOI:10.1134/S1990341317030245
15. F. Pont, *AAS/Division for Extreme Solar Systems Abstracts*, **2**, id. 11.02 (2011).
16. F. Pont, R. L. Gilliland, C. Moutou, et al., *Astron. and Astrophys.* **476** (3), 1347 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20078269
17. F. Pont, H. Knutson, R. L. Gilliland, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **385** (1), 109 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.12852.x
18. L. J. Rosenthal, B. J. Fulton, L. A. Hirsch, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **255** (1), id. 8 (2021). DOI:10.3847/1538-4365/abe23c
19. K. G. Stassun, K. A. Collins, and B. S. Gaudi, *Astron. J.* **153** (3), article id. 136 (2017). DOI:10.3847/1538-3881/aa5df3
20. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, N. I. Shatsky, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 384 (2023). DOI:10.1134/S1990341323600163
21. J. D. Turner, K. A. Pearson, L. I. Biddle, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (1), 789 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw574
22. G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 225 (2018). DOI:10.1134/S1990341318020086
23. J. N. Winn, J. A. Johnson, A. W. Howard, et al., *Astrophys. J.* **718** (1), 575 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/718/1/575

Searching for Traces of Exoplanet Atmospheres Using Multicolor Photometric Observations of Transits

E. V. Bekesov^{1,2}, K. A. Lyzenko^{1,2}, A. M. Cherepashchuk², A. A. Belinsky², N. A. Maslennikova^{1,2},
A. M. Tatarnikov²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

² Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

The paper presents the results of a study of the exoplanet systems HD 189733, HAT-P-13, HAT-P-16 and HAT-P-65. Multi-color photometric observations of exoplanet transits in the listed systems were carried out in blue and red light using the equipment of the Caucasian Mountain Observatory and the Crimean Astronomical Station of SAI MSU. Based on the results, light curves were plotted, from which the radii of the exoplanets were determined. The shown difference in the radii of the exoplanets in different filters may indicate the presence of atmospheres in the exoplanets under study.

Keywords: *techniques: photometric—exoplanets—planets and satellites: detection*