

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 2, 5–12 (2024)

УДК 524

## Наблюдения транзитов экзопланет на телескопе МТМ-500\*

А.Н. Рублевский

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
anr@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 21 июля 2022 г.

**Аннотация.** В работе представлен анализ наблюдений транзитов экзопланет класса “горячие юпитеры”, проводившихся в 2021–2022 гг. Сделаны расчеты параметров планет и их орбит для сравнения с ранее известными данными. Цель исследования – определение возможностей телескопа МТМ-500 при исследовании внесолнечных планет класса “горячие юпитеры”.

**Ключевые слова:** транзиты экзопланет, горячие юпитеры, фотометрия

### 1 Введение

Изучение внесолнечных планет (экзопланет) представляет большой интерес для науки, т. к. позволяет сформировать общую теорию эволюции планетных систем. В настоящее время известно около 5000 подтвержденных экзопланет и столько же планет-кандидатов. Из-за многообразия параметров известных внесолнечных планет все еще нет полного понимания их происхождения, поэтому наиболее важны методы исследований, которые позволяют охватить большое количество объектов. Этому требованию соответствует транзитный метод, который благодаря своей простоте и возможности применения на малых телескопах в настоящее время является самым распространенным. Наблюдения транзитов позволяют получить информацию о параметрах планет и их орбит, наличии у них спутников, о звездных пятнах родительской звезды. Наблюдения на малых телескопах позволяют выбирать планеты для более детальных исследований на средних и больших телескопах, позволяющих значительно дополнить данные о планетных системах. Спектральные наблюдения транзита дают информацию об атмосфере планеты, измерение лучевых скоростей родительской звезды дает возможность определить массу планеты, а изучение возмущений орбит планет позволяет обнаружить наличие у них спутников и выявить другие планеты на близких орбитах. Основными инструментами, благодаря которым удалось обнаружить большое число экзопланет транзитным методом, стали космические миссии CoRoT и Kepler; среди проектов, использующих наземные телескопы, лидерами являются WASP, HATNet, KELT, TrES и др.

Большая часть экзопланет, открытых транзитным методом, является газовыми гигантами, по массе превышающими Юпитер. Эти планеты, вследствие своего размера, вызывают заметное падение блеска родительской звезды во время транзита, потому доступны для исследования на малых телескопах. Особенно доступны для исследований планеты класса “горячие юпитеры”, которые находятся на близких орбитах, благодаря чему имеют короткие периоды обращения и разогреваются родительскими звездами, что способствует высокой интенсивности их собственного излучения. Исходя из этих особенностей, планеты класса “горячие юпитеры” стали основным объектом исследований на телескопе МТМ-500. Наблюдения транзитов экзопланет на телескопе МТМ-500 в рамках совместных исследований с Институтом астрономии Национального университета Цинь Хуа (Тайвань) проводятся с 2014 г. Но возможности телескопа для этой задачи количественно не исследовались.

\* В связи с гибелью А.Н. Рублевского в марте 2024 года в зоне СВО редакция приняла решение опубликовать статью А.Н. Рублевского с минимальными правками, учтя только те замечания рецензента, которые не требуют авторского вмешательства.

В 2021 году, в связи с участием телескопа в проекте ИКИ РАН, возникла необходимость определения границ возможностей телескопа для наблюдения транзитов экзопланет и предпочтительных условий таких наблюдений. С этой целью в течение 2021–2022 гг. были проведены наблюдения ряда транзитов экзопланет, данные двенадцати из которых приведены в статье.

## 2 Наблюдения

Телескоп МТМ-500 с камерой Apogee U6 (поле  $1024 \times 1024$ , размер пиксела  $24 \times 24$  мкм) (Рублевский, Киселев, 2019) имеет поле зрения  $14 \times 14'$ , позволяющее использовать достаточное количество звезд сравнения, что дает возможность убедиться в отсутствии их переменности. При обработке наблюдений транзитов звезды сравнения выбирались близкими по блеску к родительской звезде планеты. Наблюдения по возможности начинались за час до начала транзита и заканчивались через час после его окончания. Большинство транзитов планет наблюдались в 2021 г. В 2022 г. проводились

Таблица 1. Наблюдения транзитов экзопланет

Планета	Дата	М	Фаза Луны	S/N	Кол-во	$v$	Эксп.	Фильтр	СКО
HAT-P-10b	10.10.21	0.1	0	3000	480	11.9	30		6.1
HAT-P-19b	10.11.21	0.2	0.4	500	380	12.9	40		4.9
KELT-16b	01.07.21	0.3	0	1400	240	11.7	60	r	2.6
Qatar-1b	26.10.21	0.2	0.6	1200	450	12.8	30		4.1
Qatar-9b	01.04.21	0.05	0	400	295	14	30		5
Tres-3b	10.05.21	0.4	0	1000	180	12.4	40		4.7
WASP-10b	15.07.21	0.7	0.3	1400	175	12.7	60	r	3
WASP-52b	05.11.21	0.16	0	1600	380	12	30		3.3
K2-30b	14.10.21	0.18	0	900	280	12.5	30		5.8
HAT-P-36b	06.07.21	0.3	0	2300	330	12.3	30		4.3
WASP-84b	22.03.22	1.7	0.7	2000	315	10.8	60	r	5.8
WASP-43b	26.03.22	0.5	0	1200	215	12.1	60	r	4.2

Таблица 2. Данные наблюдений транзитов, точность которых недостаточна для получения транзитных кривых

Планета	Дата	М	Фаза Луны	$v$	S/N	СКО
HAT-P-32b	03.03.21	1.4	0.7	11.3	1300	10
HAT-P-3b	05.13.21	0.02	0.6	11.9	1500	7.4
WASP-57b	06.08.21	1.3	0	13	600	13
HAT-P-5b	09.06.21	0.4	0	12	1400	8.7
HAT-P-11b	06.10.21	0.25	0	9.6	2000	8.6
WASP-103b	06.10.21	0.15	0	12	1000	11
WASP-74b	04.11.21	1.4	0	9.7	3600	13
HAT-P-25b	08.11.21	0.4	0	13.2	1200	4.1
WASP-76b	11.11.21	0.1	0.5	9.5	5200	13.5
WASP-13b	28.03.21	0.3	0	10.5	5000	9.2

наблюдения транзитов при расфокусировке изображений звезд, также проводились наблюдения при бинировании  $2 \times 2$ . Анализ результатов наблюдений не показал преимуществ бинирования, а достоинства метода наблюдений вне фокуса очевидны, особенно заметны его преимущества при нестабильности атмосферы и большом изменении воздушной массы объекта за время его наблюдения. Время экспозиции выбиралось таким, чтобы использовался линейный участок динамического диапазона ПЗС-матрицы. Полную информацию о сделанных наблюдениях можно найти в таблице 1, в которой приведены условия и полученные данные наблюдений 12 транзитов внесолнечных планет.

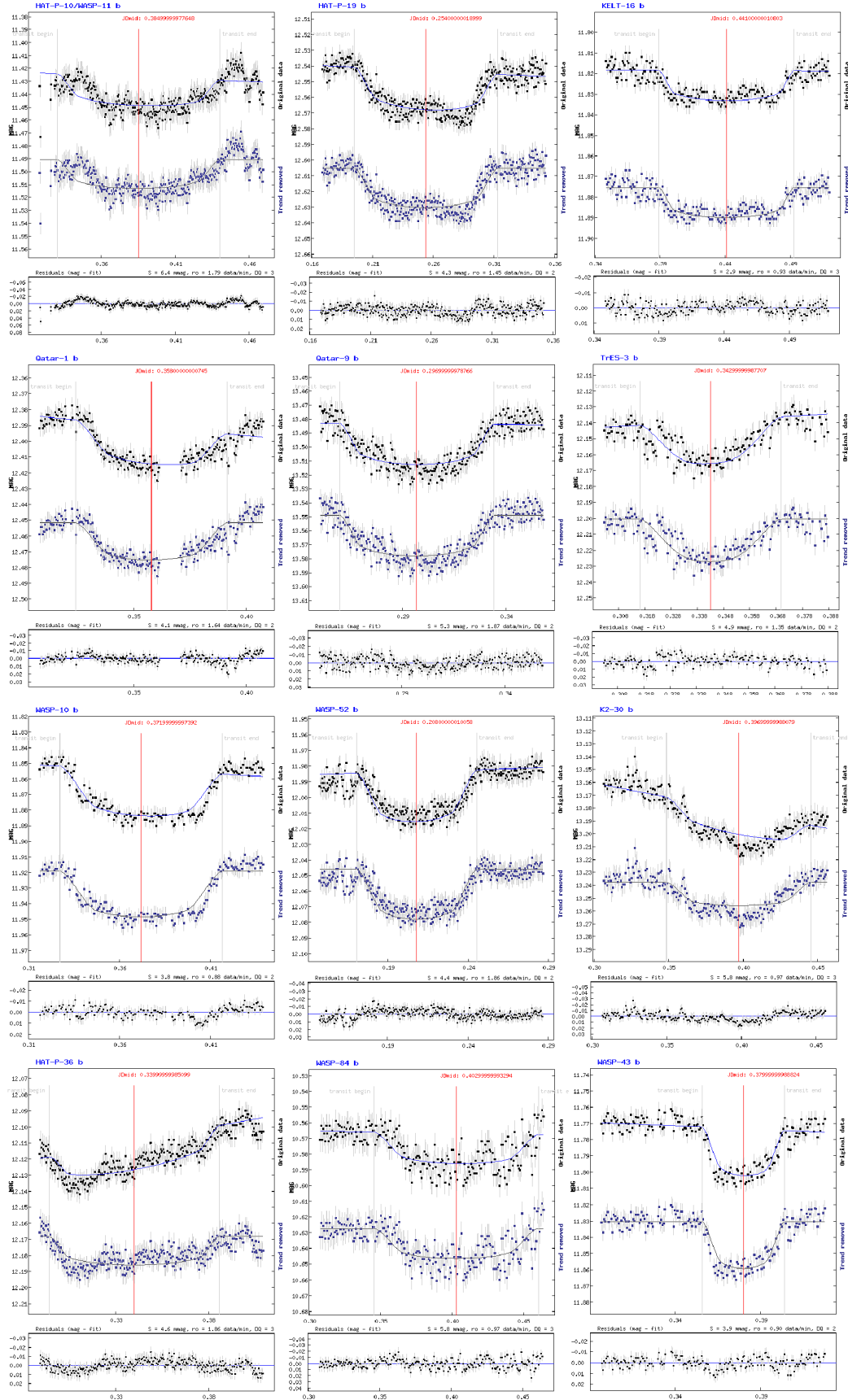


Рис. 1. Транзитные кривые, построенные по наблюдательным данным с помощью ресурса ETD

В таблице 2 приведены условия и результаты обработки наблюдений 10 транзитов, точность которых недостаточна для расчета параметров планет и их орбит. Из сравнений условий наблюдений, по которым удалось получить удовлетворительные результаты, и наблюдений, которые оказались непригодны для построения моделей транзитных кривых, можно сделать вывод, что большие изменения воздушной массы за время транзита снижают вероятность получения транзитной кривой характерной формы. Вероятность получения приемлемых результатов наблюдений транзитов при большом изменении воздушной массы (более 1) можно повысить, проводя внефокусные наблюдения; в этом случае снижается нестабильность величины родительской звезды и звезд сравнения за счет того, что их изображения имеют большую площадь и охватывают большее количество пикселей ПЗС-матрицы, что уменьшает погрешность, вносимую различной чувствительностью пикселей, и уменьшает случайные ошибки за счет усреднения большего количества измерений. Системы WASP-84 и WASP-43 наблюдались вне фокуса, и в случае наблюдения транзита планеты WASP-84b удалось получить удовлетворительные результаты расчетов параметров орбиты и самой планеты при достаточно большом изменении воздушной массы (1.7). Расфокусировка была такой, что изображение родительской звезды имело провал в центре, но при этом не имело формы тора (пончика), как рекомендуется в Southworth et al. (2009a, b).

При большой площади изображения звезды обработка наблюдений затрудняется, но, как показал опыт внефокусных наблюдений, даже небольшое увеличение площади изображения имеет очевидные преимущества. Однако при наблюдениях транзитов, когда изменения воздушной массы незначительны, использование внефокусных наблюдений нецелесообразно, поскольку в этом случае проявляются преимущественно их недостатки, особенно при малой глубине транзита. По данным наблюдений 12 транзитов планет, благодаря ресурсу ETD<sup>1</sup>, были построены транзитные кривые, представленные на рис. 1.

### 3 Анализ результатов

График зависимости среднеквадратической ошибки (СКО) от звездной величины объекта показан на рис. 2, расчет сделан на основе наблюдений 2021–2022 гг. Из графика можно сделать вывод, что возможно получить приемлемые результаты наблюдений транзитных явлений глубиной более 0.01 m и блеском менее 14 m.

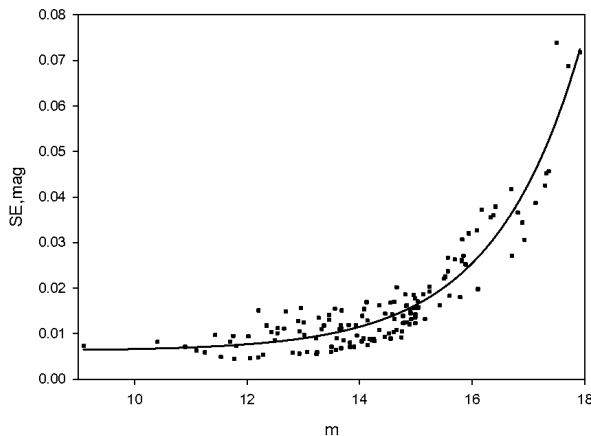


Рис. 2. Зависимость точности наблюдений от блеска объекта

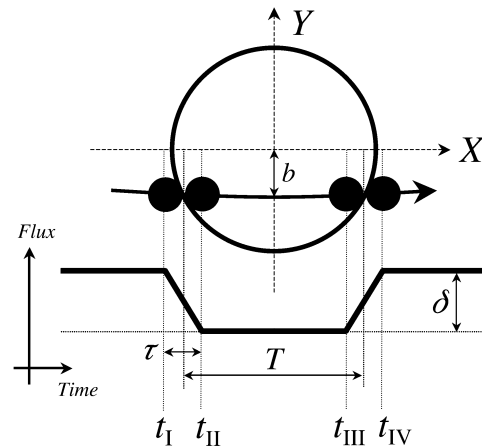


Рис. 3. Фазы транзита

Средний блеск родительских звезд и глубина транзитов планетных систем, по наблюдениям которых проводилось исследование, приближается к предельному для данного инструмента, поэтому

<sup>1</sup> <http://var2.astro.cz/ETD/index.php>

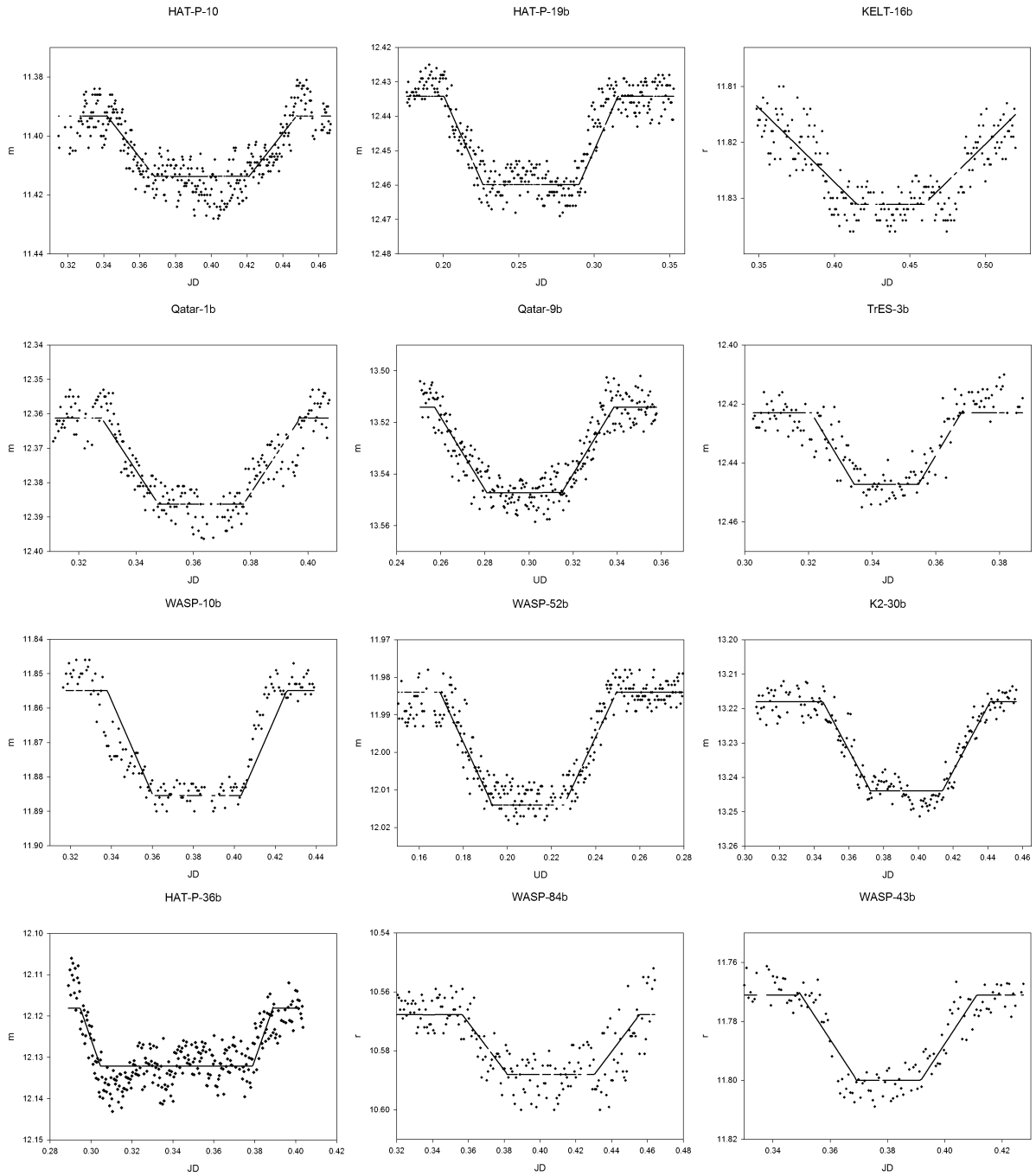


Рис. 4. Модели транзитных кривых

рационально смоделировать транзитные кривые с помощью кусочно-линейной аппроксимации полученных данных. Принцип упрощенного моделирования кривых блеска, приведенного в [Winn \(2010\)](#), демонстрирует рис. 3.

Участок полной фазы транзита  $t_F = t_{II} + t_{III}$  плоский, закон потемнения к краю звездного диска не учитывается, участки входа и выхода транзита  $\tau = t_I - t_{II} = t_{III} - t_{IV}$  аппроксимируются отрезками с равными по модулю угловыми коэффициентами. В общем случае время входа и выхода может быть различным вследствие сжатия орбиты планеты, но такое различие незначительно и в данной модели не учитывается.

Полученные модели транзитных кривых приведены на рис. 4. Из них можно получить разность блеска родительской звезды вне транзита и во время него, время полной фазы транзита и общее время. Из этих данных можно вычислить отношение радиусов планеты  $R_p$  и родительской звезды  $R_*$  и наклонение орбиты планеты. Отношение радиусов определяется выражением (1):

$$\Delta F = \frac{F_{\text{no trans}} - F_{\text{trans}}}{F_{\text{no trans}}} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\Delta F$  – разность светового потока родительской звезды при отсутствии транзита,  $F_{\text{no trans}}$ , и во время него,  $F_{\text{trans}}$ . При переходе от абсолютных значений разности потока к логарифмическим значениям разности блеска родительской звезды  $\Delta m$ , выраженных в звездных величинах, выражение (1) примет вид:

$$\frac{R_p}{R_*} = \sqrt{1 - 10^{-\frac{\Delta m}{2.5}}}. \quad (2)$$

Для расчета наклонения орбиты  $i$  и транзитного параметра  $b$ , исходя из точности полученных данных, целесообразно использовать упрощенные формулы (Winn, 2010). Величины наклонений орбит планет определены выражением (3):

$$i = \cos^{-1} \left( \frac{bR_*}{a} \right), \quad (3)$$

где  $a$  – большая полуось орбиты планеты. Транзитный параметр найден из выражения (4):

$$b = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - \left(\frac{t_F}{t_T}\right)^2(1 + \sqrt{\Delta F})^2}{1 - \left(\frac{t_F}{t_T}\right)^2}}, \quad (4)$$

где  $t_T$  – полное время транзита.

**Таблица 3.** Результаты расчетов

Планета	$R_p/R_*$		Наклонение		Наклонение	Длительность		Глубина р
	ЕРЕ	Расч.	ЕРЕ	Расч.		ETD	Расч.	
НАТ-P-10b	0.133	0.136	89.8	87.16	+5	159	155	1.8
НАТ-P-19b	0.142	0.152	88.6	87	+5	170	166	2.3
KELT-16b	0.095	0.107	84.5	81	-2	149.3	158	1.4
Qatar-1b	0.149	0.149	84	83	+1	96	98	1.8
Qatar-9b	0.15	0.163	89.2	85	+2	107	108	2.7
Tres-3b	0.157	0.158	81.9	82	-4	77.4	70	1.8
WASP-10b	0.142	0.164	86.8	85.8	-1	127.8	126	2.6
WASP-52b	0.165	0.165	85.3	84.2	+1	109	112	2.7
K2-30b	0.128	0.15	86.9	86.6	-2	139	139	5.8
НАТ-P-36b	0.118	0.113	86	86.9	-3	132.9	127	1.3
WASP-84b	0.124	0.144	88.36	88.08	+4	165	167	1.8
WASP-43b	0.16	0.162	82.3	80.9	+5	69.5	69.8	2.7

Рассчитанные значения относительных радиусов планет и наклонений их орбит приведены в таблице 3, в которой также даны для сравнения соответствующие значения ЕРЕ<sup>2</sup> и ЕТD. Расчетные значения относительных радиусов планет удовлетворительно сходятся с приведенными ЕРЕ. Значения наклонений орбит хорошо сходятся со значениями ЕРЕ, если учесть факт, что рассчитываемый угол зависит от угла наклона участков входа и выхода и небольшие его изменения приводят к большим изменениям значения наклонения. Длительность транзитов, определенная из наблюдений, в целом соответствует приведенной ЕТD, среднее время транзитов может значительно отличаться от ЕТD, что затрудняет выявление возмущений орбит планет по данным наблюдениям.

<sup>2</sup> <http://exoplanet.eu>

## 4 Заключение

В данной работе проведен анализ наблюдений 12 внесолнечных планет и рассчитаны их параметры. Исходя из сравнения рассчитанных значений параметров планет и их орбит с ранее известными можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости. Точность наблюдений недостаточна для исследования пятнистости родительских звезд, но такая возможность не исключается при многократных наблюдениях транзита отдельной планеты. Разность средних моментов транзитов, определенных из наблюдений и ресурса ETD, показывает, что возможен поиск спутников и планет, возмущающих орбиты, методом вариаций времени транзита (TTV). На телескопе МТМ-500 возможно исследование экзопланет класса “горячие юпитеры”, имеющих блеск до 14-й звездной величины и снижение блеска при транзите на 0.01 звездной величины. При хороших условиях наблюдений и многократных наблюдениях одного объекта возможны исследования планет у более слабых родительских звезд с меньшими падениями блеска во время транзита. Применение метода наблюдений вне фокуса в некоторых случаях позволяет снизить влияние больших изменений воздушной массы либо прозрачности атмосферы.

## Литература

- Рублевский А.Н., Киселев Н.Н., 2019. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 115. № 1. С. 63. [Rublevskiy A.N., Kiselev N.N., 2019. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 115, no. 1, pp. 63–67 (In Russ)].
- Southworth J., Hinse T.C., Jørgensen U.G., et al., 2009a. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., vol. 396, no. 2, pp. 1023–1031.
- Southworth J., Hinse T.C., Burgdorf M.J., et al., 2009b. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., vol. 399, no. 1, pp. 287–294.
- Winn J.N., 2010. In Seager S. (Ed.), Exoplanet Transits and Occultations. University of Arizona Press, Tucson, pp. 55–77.

Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ. 120, № 2, 5–12 (2024)

## Observations of exoplanet transits with the MTM-500 telescope

*A.N. Rublevskiy*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*anr@craocrimea.ru*

**Abstract.** The paper presents an analysis of observations of hot Jupiter exoplanet transits, carried out in 2021–2022. We aim to determine capabilities of the MTM-500 telescope in studying extrasolar hot Jupiter planets.

**Key words:** exoplanet transits, hot Jupiters, photometry