

УДК 004.9 + 520.84

Наблюдение транзитного явления у звезды с экзопланетой WASP-2

В.К. Игнатов¹, М.А. Горбачев^{2,1}, А.А. Шляпников¹

¹ ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
ivk@crao.ru

² ФГАОУ ВО “Казанский (Приволжский) федеральный университет”, Казань, Татарстан, Россия, 420000
mark-gorbachev@rambler.ru

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

Аннотация. Представлены наблюдения транзита экзопланеты у звезды WASP-2, выполненные на телескопе МТМ-500 Крымской астрофизической обсерватории РАН. Рассмотрена краткая история открытия экзопланеты, представлены ее основные характеристики. Описаны наблюдения и процедура обработки. Выполнен анализ полученных результатов и проведено их сравнение с информацией из баз данных ETD и Архива экзопланет NASA. В приложении к статье приведены данные фотометрии звезды WASP-2 и звезды сравнения GSC 0052201406.

OBSERVATION OF THE EXOPLANETARY TRANSIT FOR WASP-2, *by V.K. Ignatov, M.A. Gorbachev and A.A. Shlyapnikov.* We present observations of the transit of an exoplanet from the WASP-2 star carried out with the MTM-500 telescope at the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. A brief history of the discovery of exoplanet WASP-2b is considered. The main characteristics are outlined. The observations and a processing procedure are described. Analysis of the obtained results was performed and compared with information from the ETD and NASA Exoplanet Archive databases. The photometry data of the WASP-2 star and the comparison star GSC 0052201406 are given in Appendix to the article.

Ключевые слова: экзопланеты, фотометрия

1 Введение

После подписания в 2016 году нового договора о совместных исследованиях между Крымской астрофизической обсерваторией РАН и Институтом астрономии Национального университета Цинь Хуа (Тайвань) в КраО проводятся систематические наблюдения звезд с обнаруженными экзопланетами (Москвин и др., 2018). С целью поиска возможных пекулярных явлений во время транзита в наблюдательную программу включены карлики нижней части главной последовательности, в том числе с активностью солнечного типа из каталога GTSh-10 (Гершберг и др., 2011).

В данной статье представлено наблюдение объекта WASP-2, которое было выполнено в дополнение к договору с вышеуказанным Институтом астрономии. Полученные наблюдения также пополняют базу данных фотометрических исследований звезд в КраО. Приведена информация об

объекте, результаты выполненных наблюдений, проведен сравнительный анализ полученных данных с ранее опубликованными.

Метод наблюдения прохождения планеты перед диском звезды (транзита экзопланеты) является на сегодняшний день наиболее продуктивным для ее обнаружения. Из 4099 подтвержденных планет¹, открытых у других звезд на 21 ноября 2019 года, 3157 были зафиксированы методом наблюдения транзитов. На втором месте по числу открытий (781 планета) стоит метод Доплера, основанный на изучении изменения радиальной скорости звезды, обусловленной наличием экзопланеты. Существуют и другие методы обнаружения планет у других звезд, но их вклад менее значим.

Основными инструментами, благодаря которым удалось обнаружить экзопланет транзитным методом, стали космические миссии CoRoT², Kepler³ и начавшийся в прошлом году проект TESS⁴. Среди наземных средств обнаружения экзопланет, при наблюдении их прохождения перед диском звезды, лидерами являются проекты WASP⁵, HATNet⁶ и KELT⁷.

Высокоточные фотометрические наблюдения транзитных явлений, большинство из которых приводит к уменьшению блеска звезды всего на 1–3 %, позволяют, прежде всего, определить радиус планеты. В сочетании с методом изучения изменения радиальной скорости звезды можно изучить ее плотность. Учитывая прохождение света звезды во время начала и окончания транзита через атмосферу планеты, есть возможность обнаружения данной атмосферы. Химический состав атмосферы определяется в сочетании со спектральными наблюдениями. При определенной конфигурации системы звезда – планета в картинной плоскости наблюдений возможно измерение температуры экзопланеты и определение наличия облачного покрова. Изменения в периодичности наблюдаемых покрытий звезды планетой объясняют наличием дополнительных планет в системе, которые не наблюдаются транзитным методом. Вариации длительности прохождения экзопланеты перед диском звезды могут свидетельствовать о наличии у планеты спутника. Это не полный перечень актуальной информации, которую можно извлечь из наблюдений экзопланет методом транзита. Все указанные выше данные о планетах, их радиусы, плотности, температуры, наличие атмосферы, ее химсостава, облачного покрова, открытие новых планет и спутников в системе были подтверждены благодаря методу наблюдения прохождения планет перед диском звезды.

Учитывая, что работы по наблюдению звезд с экзопланетами ведутся в КраО на базе Лаборатории звездного магнетизма, где, в частности, большое внимание уделяется изучению красных карликов с активностью солнечного типа, WASP-2 был выбран нами для наблюдений не случайно. Система WASP-2 описана ниже, где также приведена информация об обнаружении и основных параметрах WASP-2b. Экзопланета является горячим юпитером с орбитальным периодом $2^d.152175$, находящимся на расстоянии 0.03144 а.е. от звезды, с массой 0.931 и радиусом 1.081 в долях массы Юпитера. Столь близкое расстояние и, как следствие, нагрев до температуры, близкой к 2000 К, а также значительные размеры планеты приводят к тому, что во время прохождения ее перед диском звезды наблюдается переменность блеска с характерным временем, значительно меньшим времени самого транзита. Это явление получило название транзитных эффектов.

Среди транзитных эффектов, которые могут наблюдаться во время прохождения экзопланеты перед диском звезды, выделяют несколько. Приливные взаимодействия, следствием которых должны быть малоамплитудные плавные изменения блеска звезды, коррелирующие с периодом обращения планеты, либо взаимодействие с хромосферой, приводящее к значительным изменениям

¹ Архив экзопланет NASA (NASA Exoplanet Archive), <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

² CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits), <http://www.esa.int/esaMI/COROT/index.html>

³ Kepler, https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html

⁴ TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), <https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>

⁵ WASP (Wide Angle Search for Planets), <http://www.superwasp.org>

⁶ HATNet (Hungarian Automated Telescope Network), <https://hatnet.org/>

⁷ KELT (Kilodegree Extremely Little Telescope), <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/KELT.html>

блеска. Экранирование планетой пятен и факелов либо их групп, в результате чего будет наблюдаться увеличение или уменьшение регистрируемого блеска в период транзита.

Очевидно, что горячие юпитеры, по аналогии с Юпитером Солнечной системы, могут обладать мощными магнитными полями. Взаимодействие магнитных полей экзопланеты и звезды должно вызывать процессы, приводящие к возникновению транзитных эффектов. Одним из них может быть проявление активности в виде вспышек блеска во время, перед или после транзита. Все вышеперечисленные пекулярные явления, при их обнаружении, должны способствовать более глубокому пониманию физики происходящих процессов. Их наблюдениям и моделированию посвящено значительное число публикаций.

2 WASP-2 b: обнаружение и основные параметры

WASP-2 – двойная система, состоящая из карликовых компаньонов, находящихся на расстоянии $0''.7$, спектральных классов K1.5 и M1–M4 (Bergfors et al., 2013). Блеск системы в полосе V составляет $11^m.98$, а показатель цвета B–V равен $1^m.02$. Предположение о существовании экзопланеты в этой системе было сделано в рамках проекта SuperWASP (Street et al., 2003), запущенного в 2004 году. Подтверждением этой гипотезы стали дальнейшие наблюдения низкоамплитудных изменений лучевых скоростей, выполненные на спектрографе SOPHIE в Обсерватории Верхнего Прованса (Франция) в 2006 году. Обнаруженная в результате исследований экзопланета получила название WASP-2 b (Collier et al., 2007).

Таблица 1. Основные параметры экзопланеты WASP-2 b

Параметр	Единица измерения	Torres et al., 2008	Vonomo et al., 2017
Масса	M_{\oplus}	$290.802^{+28.603}_{-29.557}$	$294.0^{+25.7}_{-28.0}$
Радиус	R_{\oplus}	$12.005^{+0.897}_{-0.930}$	$12.00^{+0.90}_{-0.93}$

В таблице 1 представлены архивные данные об основных параметрах этой экзопланеты из работ (Torres et al., 2008; Vonomo et al., 2017).

3 Наблюдения WASP-2 в КрАО

В данной работе представлены наблюдения WASP-2, выполненные 2 июля 2018 г. на телескопе МТМ-500 (менисковый телескоп Максудова, D/F = 500/6000 мм). В качестве детектора использовалась ПЗС-матрица Aropgee U6 (2.4×2.4 см, 24 мкм/pix, 1024×1024 pix, $0''.72$ /pix, FOV = $12'.4 \times 12'.4$). Наблюдения выполнялись в близкой к стандартной полосе R_C .

Результаты фотометрии были получены с помощью модернизированной программы потоковой обработки наблюдений (Москвин, Шляпников, 2017). В качестве звезды сравнения была выбрана GSC 0052201100. Результаты наблюдений приведены в фотометрическую систему каталога GAIA DR2 (GAIA Collaboration, 2018).

На рисунке 1 показаны кривые блеска звезды WASP-2, обозначенной как object, и GSC 0052201406, обозначенной как check star. Каждая оценка блеска производилась по среднему из трех измерений с указанием соответствующей ошибки.

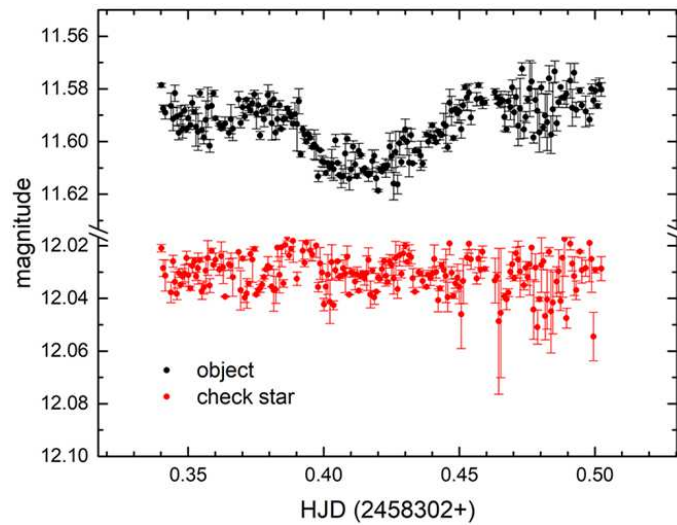


Рис. 1. Кривые блеска WASP-2 и звезды сравнения во время наблюдения транзитного явления

4 Анализ наблюдений в сравнении с информацией из сторонних баз данных

Для полученных результатов выполнен анализ с использованием таких баз данных, как ETD и Архив экзопланет NASA (Brat et al., 2010). База данных ETD предоставляет возможность аппроксимировать моделью загружаемую кривую блеска транзитного явления, убирать, в случае необхо-

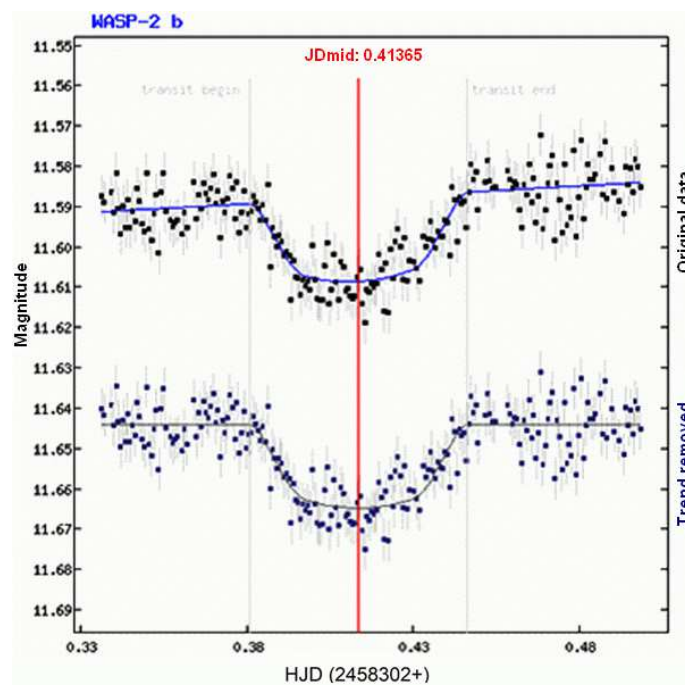


Рис. 2. Пример учета тренда и определения момента времени середины транзита с помощью модели

димости, возникающий тренд (рис. 2) и представить результаты на диаграмме О–С (наблюдаемый момент времени середины транзита минус моделируемый). Это позволяет верифицировать некоторые исследуемые параметры экзопланетных систем.

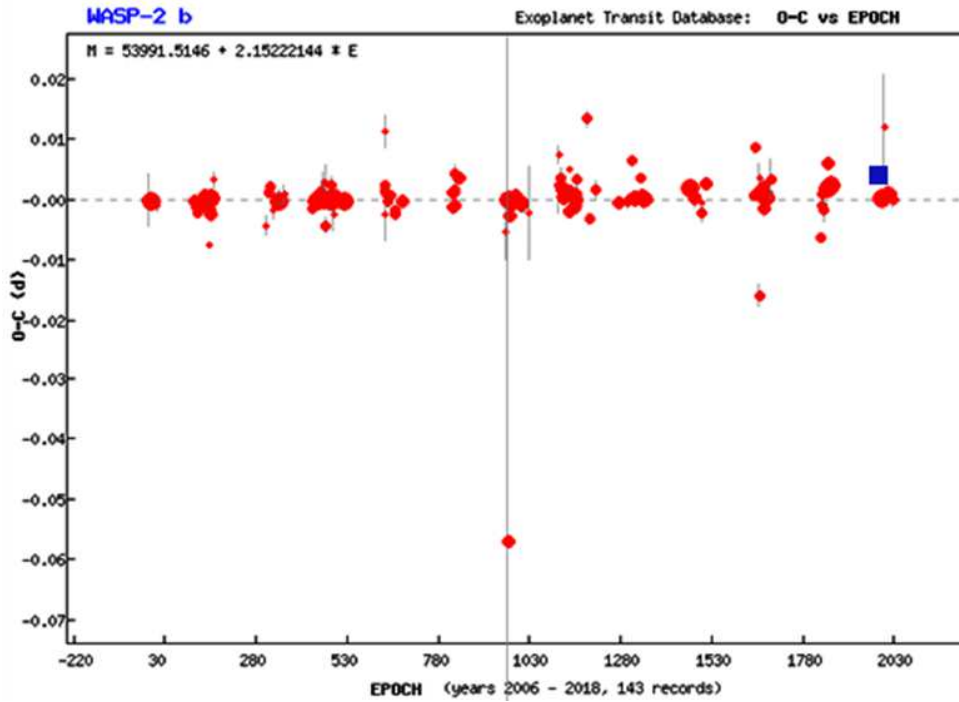


Рис. 3. Диаграмма О – С

На рисунке 3 показана диаграмма О – С из ЕТD, где квадратным маркером обозначены представленные в данной работе наблюдения, а круглыми маркерами – наблюдения, размещенные в базе данных ранее.

Аппроксимация кривой блеска транзитного явления в ЕТD позволяет определить такие параметры, как момент времени середины транзита, глубину и продолжительность. Для анализа этих параметров были выбраны данные из Архива экзопланет NASA.

Таблица 2.

Параметр	Единица измерения	Triaud et al., 2010	Valuev et al., 2015	Данная статья
Момент времени середины транзита*	сутки	$3991.51428^{+0.00020}_{-0.00021}$	5894.07919 ± 0.00015	8302.41824 ± 0.00066
Глубина транзита	звездная величина	$0.01802^{+0.00027}_{-0.00025}$	–	0.020728 ± 0.000903
Продолжительность	минут	106.14 ± 0.96	106.56 ± 1.02	94.1 ± 2.7

*гелиоцентрическая юлианская дата 2450000+.

В таблице 2 показано сравнение параметров транзитного явления, определенных по представленным в данной статье наблюдениям и в опубликованных ранее работах (Triaud et al., 2010; Valuev et al., 2015).

5 Фотометрические данные

В приложении к статье представлены данные фотометрии звезд WASP-2 и GSC 0052201406, которые продемонстрированы на рисунке 1. В первой колонке таблицы (HJD) указана гелиоцентрическая юлианская дата наблюдений в долях дня $HJD = 2458302.0000000+$. Во второй колонке (R1) приведены данные фотометрии WASP-2 и соответствующие ей ошибки в измерении звездной величины (errR1). Четвертая и пятая колонки содержат оценки блеска GSC 0052201406 (R2) и ошибки в его определении (errR2).

6 Заключение

В данной работе представлено наблюдение транзитного явления у звезды с экзопланетой WASP-2, выполненное на телескопе МТМ-500 в КрАО. Показана кривая блеска транзитного явления, расположение полученных данных на диаграмме O–C, а также выполнен сравнительный анализ результатов наблюдений с данными из опубликованных источников, который показал высокую точность полученного материала.

Благодарности. При подготовке данной статьи использовался Архив экзопланет NASA, который поддерживается Калифорнийским технологическим институтом по контракту с Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства в рамках Программы исследования экзопланет. При выполнении представленной работы также активно использовались приложения SIMBAD, VizieR и ALADIN, поддерживаемые Центром астрономических данных в Страсбурге. Авторы признательны всем, кто обеспечивает их работу.

Первый и второй авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за частичную поддержку подготовленной статьи за счет гранта № 18-32-00775.

Литература

- Гершберг Р.Е., Теребиж А.В., Шляпников А.А., 2011. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 107. № 1. С. 18. [Gershberg R.E., Terebizh A.V., Shlyapnikov A.A., 2011. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 107, no. 1, p. 18. (In Russ.)]
- Москвин В.В., Шляпников А.А., 2017. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., Т. 113. № 1. С. 83. [Moskvin V.V., Shlyapnikov A.A., 2017. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 113, no. 1, p. 83. (In Russ.)]
- Москвин В.В. и др., 2018. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 114. № 1. С. 85. [Moskvin V.V. et al., 2018. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.* vol. 114, no. 1, p. 85. (In Russ.)]
- Baluev R.V., Sokov E.N., Shaidulin V.Sh., et al., 2015. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 450, p. 3101.
- Bergfors C., Brandner W., Daemgen S., et al., 2013. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 428, p. 182.
- Bonomo A.S., Desidera S., Benatti S., et al., 2017. *Astron. Astrophys.*, vol. 602, p. A107.
- Brat L., Poddani S., Pejcha O., et al., 2010. *ASP Conf. Ser.*, vol. 435, p. 443.
- Collier C.A., Bouchy F., Hebrard G., et al., 2007. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 375, p. 951.
- GAIA Collaboration, 2018. *Astron. Astrophys.*, vol. 616, p. A1.
- Street R.A., Pollaco D.L., Fitzsimmons A., et al., 2003. *ASP Conf. Ser.*, vol. 294, p. 405.
- Torres G., Winn J.N. and Holman M.J., 2008. *Astrophys. J.*, vol. 677, p. 1324.
- Triard A.H.M.J., Collier C.A., Queloz D., et al., 2010. *Astron. Astrophys.*, vol. 524, p. A25.

А Приложение

HJD	R1	errR1	R2	errR2
1	2	3	4	5
.3362963	11.587	0.001	12.028	0.001
.3370139	11.589	0.001	12.031	0.003
.3391435	11.587	0.002	12.038	0.006
.3398611	11.591	0.005	12.026	0.004
.3405671	11.582	0.004	12.034	0.002
.3412847	11.590	0.003	12.038	0.004
.3419907	11.597	0.003	12.030	0.002
.3427083	11.590	0.003	12.035	0.002
.3434259	11.595	0.004	12.032	0.001
.3441319	11.588	0.004	12.031	0.003
.3448495	11.595	0.002	12.025	0.003
.3455556	11.591	0.001	12.031	0.002
.3462731	11.594	0.004	12.036	0.004
.3469792	11.585	0.002	12.028	0.001
.3476968	11.589	0.003	12.026	0.003
.3484028	11.594	0.001	12.032	0.002
.3491204	11.596	0.007	12.029	0.002
.3498264	11.582	0.007	12.025	0.006
.3505440	11.596	0.001	12.037	0.001
.3512500	11.599	0.003	12.036	0.003
.3519676	11.592	0.002	12.030	0.002
.3526852	11.587	0.007	12.025	0.005
.3533912	11.602	0.007	12.035	0.007
.3541088	11.587	0.002	12.022	0.003
.3548148	11.582	0.005	12.027	0.001
.3555324	11.591	0.001	12.025	0.002
.3569560	11.594	0.001	12.029	0.002
.3576620	11.595	0.001	12.024	0.002
.3583796	11.594	0.000	12.028	0.005
.3590857	11.593	0.002	12.039	0.006
.3605208	11.597	0.003	12.027	0.000
.3612269	11.592	0.002	12.028	0.002
.3619444	11.595	0.005	12.032	0.005
.3640741	11.584	0.004	12.022	0.007
.3647917	11.593	0.003	12.037	0.006
.3656019	11.587	0.002	12.025	0.007
.3663194	11.590	0.003	12.040	0.001
.3670255	11.584	0.001	12.038	0.002
.3677431	11.587	0.001	12.034	0.006
.3684607	11.588	0.001	12.023	0.001
.3691667	11.585	0.002	12.025	0.002
.3698843	11.582	0.004	12.021	0.009
.3705903	11.589	0.002	12.038	0.001

Продолжение на следующей странице

Приложение (продолжение)

HJD	R1	errR1	R2	errR2
1	2	3	4	5
.3713079	11.586	0.006	12.037	0.000
.3720139	11.598	0.004	12.036	0.001
.3727315	11.589	0.002	12.035	0.001
.3734375	11.592	0.002	12.032	0.001
.3741551	11.588	0.003	12.029	0.001
.3748727	11.582	0.002	12.028	0.000
.3755787	11.585	0.004	12.028	0.004
.3762963	11.593	0.004	12.035	0.001
.3770023	11.584	0.006	12.037	0.000
.3777199	11.597	0.002	12.037	0.008
.3784259	11.592	0.003	12.021	0.005
.3791435	11.586	0.004	12.031	0.005
.3798495	11.595	0.002	12.021	0.007
.3805671	11.592	0.000	12.034	0.007
.3812847	11.591	0.002	12.020	0.001
.3819907	11.587	0.001	12.017	0.003
.3827083	11.589	0.001	12.024	0.001
.3834144	11.591	0.001	12.021	0.002
.3841319	11.593	0.002	12.018	0.001
.3848380	11.590	0.002	12.016	0.008
.3855556	11.593	0.004	12.033	0.011
.3862731	11.585	0.010	12.010	0.002
.3869792	11.605	0.005	12.015	0.003
.3876968	11.595	0.001	12.022	0.002
.3884028	11.597	0.001	12.026	0.004
.3891204	11.600	0.001	12.019	0.001
.3898264	11.597	0.001	12.016	0.003
.3905440	11.599	0.002	12.022	0.001
.3912500	11.602	0.001	12.023	0.004
.3919676	11.601	0.001	12.015	0.002
.3926852	11.602	0.005	12.020	0.008
.3933912	11.613	0.005	12.036	0.004
.3941088	11.603	0.002	12.027	0.002
.3948148	11.608	0.000	12.030	0.006
.3955324	11.608	0.002	12.042	0.003
.3962500	11.612	0.002	12.036	0.002
.3969560	11.608	0.001	12.031	0.005
.3976736	11.610	0.001	12.041	0.007
.3983796	11.608	0.001	12.026	0.008
.3990972	11.611	0.005	12.043	0.007
.3998032	11.600	0.004	12.029	0.002
.4005208	11.608	0.002	12.026	0.003
.4012269	11.613	0.000	12.032	0.000
.4019444	11.613	0.000	12.031	0.001
.4026620	11.613	0.004	12.029	0.001
.4033681	11.605	0.003	12.031	0.003

Продолжение на следующей странице

Приложение (продолжение)

HJD	R1	errR1	R2	errR2
1	2	3	4	5
.4040857	11.599	0.007	12.024	0.007
.4047917	11.614	0.002	12.038	0.004
.4055093	11.611	0.004	12.030	0.000
.4062269	11.602	0.003	12.031	0.002
.4069329	11.609	0.002	12.034	0.001
.4076505	11.613	0.005	12.031	0.003
.4083565	11.604	0.001	12.037	0.003
.4090741	11.605	0.003	12.032	0.001
.4097801	11.611	0.000	12.030	0.001
.4104977	11.610	0.001	12.032	0.001
.4112153	11.612	0.000	12.030	0.002
.4119213	11.613	0.000	12.025	0.007
.4126389	11.612	0.002	12.038	0.004
.4133449	11.607	0.001	12.029	0.005
.4140625	11.606	0.004	12.040	0.001
.4147685	11.614	0.002	12.037	0.003
.4154861	11.619	0.004	12.032	0.000
.4162037	11.611	0.000	12.033	0.002
.4169097	11.611	0.001	12.029	0.002
.4176273	11.609	0.000	12.026	0.003
.4183333	11.610	0.001	12.031	0.001
.4190509	11.609	0.004	12.034	0.004
.4197569	11.602	0.002	12.026	0.001
.4204745	11.606	0.005	12.027	0.002
.4211921	11.616	0.006	12.032	0.004
.4218981	11.604	0.006	12.025	0.006
.4226157	11.616	0.008	12.036	0.006
.4233218	11.601	0.004	12.024	0.004
.4240393	11.608	0.004	12.031	0.004
.4247454	11.599	0.002	12.023	0.002
.4254630	11.595	0.002	12.020	0.003
.4261806	11.600	0.004	12.026	0.001
.4268866	11.608	0.005	12.024	0.000
.4276042	11.598	0.005	12.024	0.004
.4283102	11.608	0.002	12.032	0.002
.4290278	11.604	0.000	12.037	0.004
.4304514	11.604	0.001	12.030	0.000
.4311690	11.605	0.002	12.030	0.002
.4318750	11.608	0.005	12.033	0.001
.4332986	11.597	0.001	12.036	0.002
.4340162	11.600	0.001	12.031	0.001
.4347222	11.598	0.002	12.032	0.001
.4354398	11.594	0.002	12.031	0.003
.4361574	11.598	0.001	12.025	0.002
.4368634	11.600	0.002	12.030	0.005
.4375810	11.596	0.001	12.041	0.002

Продолжение на следующей странице

Приложение (продолжение)

HJD	R1	errR1	R2	errR2
1	2	3	4	5
.4382870	11.597	0.000	12.036	0.004
.4390046	11.597	0.002	12.027	0.001
.4397107	11.593	0.000	12.029	0.001
.4404282	11.594	0.004	12.031	0.004
.4411458	11.602	0.008	12.040	0.010
.4418519	11.585	0.002	12.019	0.006
.4425694	11.588	0.005	12.030	0.004
.4432755	11.599	0.005	12.039	0.002
.4439931	11.588	0.001	12.034	0.001
.4446991	11.589	0.000	12.032	0.002
.4454167	11.589	0.003	12.036	0.005
.4461227	11.595	0.004	12.046	0.006
.4468403	11.586	0.003	12.033	0.013
.4475579	11.579	0.002	12.007	0.009
.4482639	11.583	0.001	12.024	0.003
.4489815	11.582	0.005	12.019	0.003
.4496875	11.591	0.004	12.025	0.004
.4518287	11.584	0.003	12.032	0.004
.4525463	11.579	0.002	12.025	0.002
.4532523	11.584	0.001	12.029	0.003
.4539699	11.585	0.000	12.022	0.003
.4547801	11.585	0.002	12.029	0.002
.4585417	11.581	0.001	12.033	0.001
.4592593	11.583	0.001	12.032	0.009
.4599653	11.586	0.001	12.049	0.002
.4606829	11.584	0.000	12.045	0.028
.4613889	11.584	0.003	11.990	0.024
.4621065	11.591	0.002	12.039	0.001
.4628241	11.595	0.005	12.040	0.001
.4635301	11.585	0.001	12.038	0.004
.4642477	11.587	0.004	12.030	0.001
.4649537	11.580	0.005	12.027	0.003
.4656713	11.589	0.003	12.032	0.005
.4663773	11.583	0.005	12.023	0.001
.4670949	11.594	0.003	12.025	0.002
.4678125	11.587	0.007	12.030	0.007
.4685185	11.572	0.012	12.016	0.010
.4692361	11.595	0.002	12.035	0.003
.4699421	11.591	0.003	12.028	0.002
.4706597	11.584	0.002	12.032	0.002
.4713657	11.580	0.001	12.027	0.003
.4720833	11.577	0.011	12.021	0.012
.4727894	11.599	0.007	12.044	0.008
.4735069	11.584	0.002	12.028	0.011
.4742245	11.588	0.004	12.051	0.005
.4749306	11.597	0.008	12.040	0.007

Продолжение на следующей странице

Приложение (продолжение)

HJD	R1	errR1	R2	errR2
1	2	3	4	5
.4756481	11.580	0.007	12.027	0.001
.4763542	11.595	0.002	12.026	0.010
.4770718	11.590	0.001	12.047	0.003
.4777893	11.593	0.008	12.040	0.009
.4784954	11.576	0.011	12.022	0.011
.4792130	11.597	0.005	12.045	0.002
.4799190	11.588	0.007	12.042	0.016
.4806366	11.573	0.010	12.010	0.012
.4813542	11.593	0.004	12.034	0.002
.4820602	11.585	0.003	12.030	0.006
.4827778	11.579	0.002	12.041	0.008
.4834838	11.583	0.000	12.024	0.004
.4842014	11.583	0.001	12.017	0.015
.4849074	11.582	0.002	12.047	0.014
.4863426	11.577	0.005	12.019	0.004
.4870486	11.587	0.007	12.027	0.002
.4877662	11.574	0.007	12.031	0.003
.4884722	11.588	0.004	12.037	0.007
.4898958	11.581	0.003	12.022	0.004
.4906134	11.586	0.001	12.029	0.000
.4920370	11.589	0.002	12.028	0.005
.4934607	11.592	0.006	12.019	0.003
.4941782	11.580	0.002	12.025	0.015
.4948958	11.584	0.002	12.054	0.013
.4956019	11.581	0.003	12.029	0.009
.4963194	11.587	0.004	12.011	0.001
.4970255	11.578	0.001	12.009	0.010
.4977431	11.580	0.002	12.029	0.005
.4984491	11.585	0.002	12.038	0.005