

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 Arogee 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.

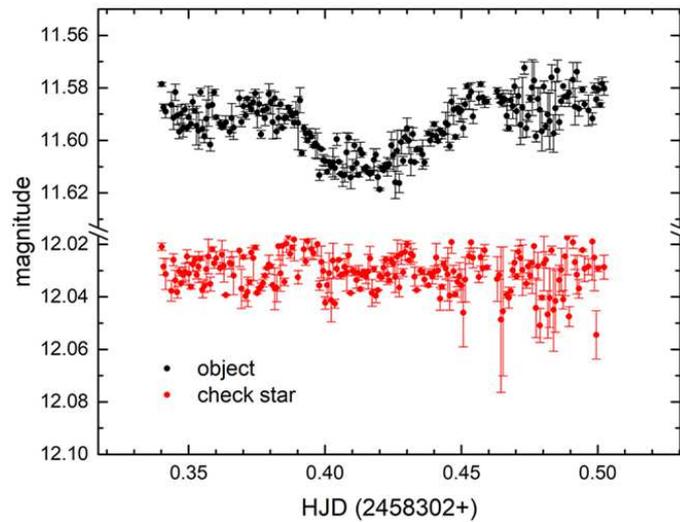


Рис. 1. Кривые блеска WASP-2 и звезды сравнения во время наблюдения транзитного явления

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-

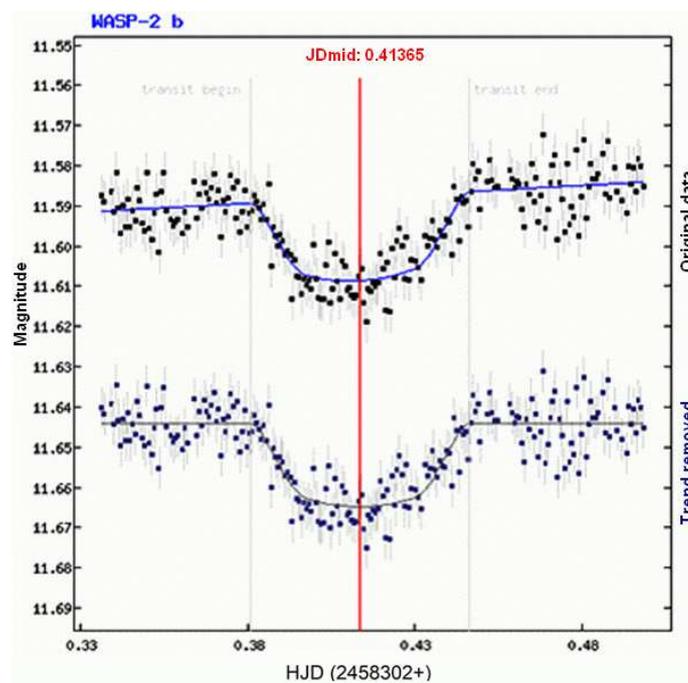


Рис. 2. Пример учета тренда и определения момента времени середины транзита с помощью модели

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

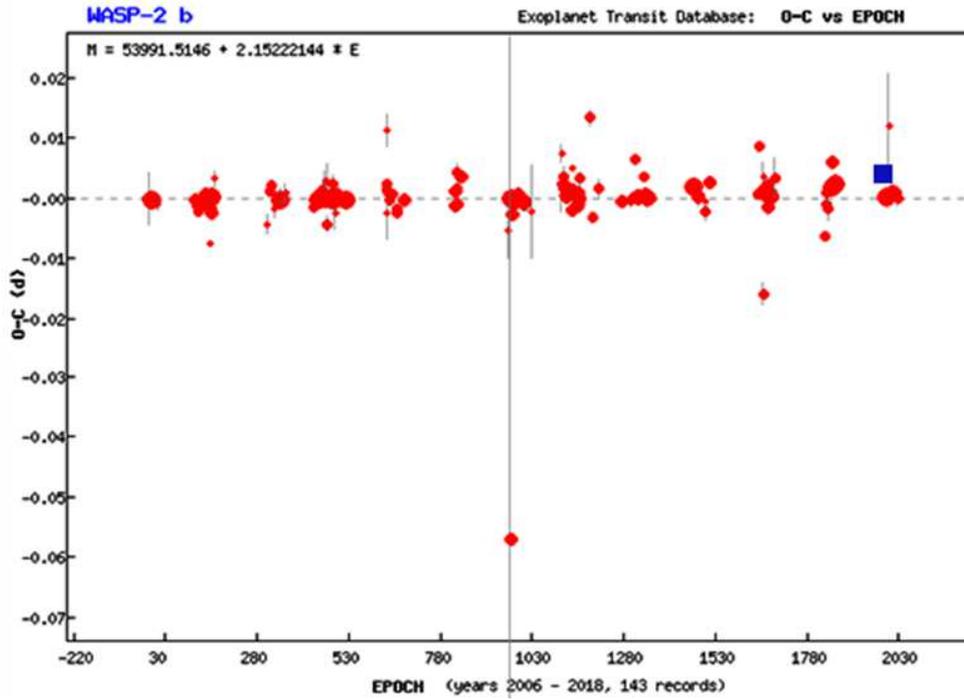


Рис. 3. Диаграмма О – С

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 |