

УДК 523.4:520.82-126

ВОСЕМЬ КАНДИДАТОВ В ЭКЗОПЛАНЕТЫ В ОБЗОРЕ НА ТЕЛЕСКОПАХ САО РАН

© 2023 О. Я. Яковлев^{1,2*}, А. Ф. Валеев^{2,3,4}, Г. Г. Валявин², А. В. Тавров^{1,5}, В. Н. Аитов², Г. Ш. Митиани², Г. М. Бескин^{2,6}, О. И. Кораблев¹, Г. А. Галазутдинов^{4,2}, В. В. Власюк², Э. В. Емельянов², Т. А. Фатхуллин², В. В. Сасюк⁶, А. В. Перков⁷, С. Ф. Бондарь⁷, Т. Е. Бурлакова^{2,4}, С. Н. Фабрика², И. И. Романюк²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

⁴Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

⁵Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141701 Россия

⁶Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

⁷АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», Москва, 111024 Россия

Поступила в редакцию 20 сентября 2022 года; после доработки 23 ноября 2022 года; принята к публикации 29 ноября 2022 года

В статье представлены восемь новых кандидатов в экзопланеты, обнаруженных в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук транзитным методом. Фотометрические наблюдения поля проводились на роботизированном 50-см телескопе в течение второго полугодия 2020 года. Транзиты глубиной $\Delta m = 0^m056-0^m173$ с периодом $P = 18^h8-8^d3$ обнаружены у звезд с $m = 14^m3-18^m8$. Все рассматриваемые звезды относятся к карликам с радиусом $R_* = 0.4-0.6R_\odot$ (с учетом неопределенности для одной звезды до $1.1R_\odot$). В результате моделирования сделаны оценки радиусов кандидатов (все более чем в 1.4 раза больше радиуса Юпитера), больших полуосей их орбит ($0.012-0.035$ а.е.), а также других орбитальных параметров. Для двух звезд представлены кривые блеска транзитов, полученные в 2022 году по их индивидуальным наблюдениям.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В САО РАН с 2020 г. введен в работу первый оптический роботизированный 50-см телескоп, предназначенный для исследования экзопланет. Главной задачей проводимых на нем наблюдений является обнаружение новых кандидатов в экзопланеты. Используется метод транзитной фотометрии — экзопланету обнаруживают и в дальнейшем изучают, анализируя фотометрические данные, полученные во время транзита (видимого прохождения планеты по диску звезды, вокруг которой она обращается). Кроме того, наблюдаются звезды с известными подтвержденными экзопланетами.

С целью обнаружения кандидатов в экзопланеты в течение второго полугодия 2020 года в САО

РАН на 50-см телескопе проводился фотометрический мониторинг избранной области размером $2^\circ5 \times 1^\circ5$ (далее обзорные наблюдения). Ни одной подтвержденной экзопланеты или кандидата в экзопланеты в этом поле ранее не найдено (NASA Exoplanet Archive¹, 2022). В результате анализа около 30 000 кривых блеска звезд с величинами $m = 13^m5-19^m5$ из исследованной площадки мы обнаружили восемь, у которых имеются периодические падения блеска, характерные (по периодичности, амплитуде, длительности и форме) для событий транзитов планет. Найденные кандидаты обозначены как SOI- N (SAO Object of Interest), где N — порядковый номер. С начала 2022 года в САО РАН проводятся целенаправленные наблю-

*E-mail: yko-v@ya.ru

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

дения этих объектов: многополосная фотометрия (телескопы 50-см, 1 м) и спектроскопия (БТА 6 м).

В центре площадки, которую мы выбрали для исследования, находится магнитный белый карлик WD 0009+501 ($m_G \approx 14^m2$) с восьмичасовой переменностью блеска амплитудой $\Delta m \approx 0^m01$ (Valeev et al. 2015). Структура полученной нами кривой блеска подтверждает этот результат. В процессе поиска транзитных событий обнаружено более 100 новых переменных звезд с вариациями блеска $\Delta m \approx 0^m01-0^m1$. Результатам их исследования будет посвящена отдельная публикация.

Глубина транзитов обсуждаемых в этой работе кандидатов в экзопланеты составляет 0^m06-0^m17 . Такое падение блеска соответствует транзиту планеты-гиганта размером больше Юпитера в 1.5–2 раза по диску звезды с радиусом Солнца или меньше (Yakovlev et al. 2022).

Длительность обзорных наблюдений (5 месяцев) и их скважность (в среднем, каждая третья ночь) обуславливают возможный интервал доступных для обнаружения периодов транзитных событий у найденных объектов, который составляет 1–2 суток и достигает чуть более одной недели. Такой период соответствует планетам на близких к звезде орбитам с большой полуосью менее 0.1 а.е. Эти наблюдаемые параметры (глубина и период падения блеска) находятся в согласии с проведенными ранее предварительными оценками (Valeev et al. 2015) и со статистическими данными для подтвержденных экзопланет (NASA Exoplanet Archive, 2022; Yakovlev et al. (2022)), найденных таким же образом (наземными инструментами транзитным методом).

Для каждого из представленных в этой статье кандидатов в экзопланеты имеются кривые блеска, покрывающие три и более полных транзитов, которые были аппроксимированы модельными кривыми с целью определения радиуса кандидата и его орбитальных параметров, в первую очередь, большой полуоси орбиты. Согласно этим моделям, наблюдаемые транзитные события могут быть вызваны прохождением планет по диску звезд. В настоящее время данных недостаточно, чтобы достоверно отвергать гипотезу о планетной природе кандидатов.

В работе публикуются координаты и другая информация о SOI-1–SOI-8, а также эфемериды транзитных событий. Подробнее наблюдения и процесс обработки данных описаны в работе Yakovlev et al. (2022). Дополнительные наблюдения другими инструментами будут полезны для подтверждения или опровержения гипотезы о планетной природе обнаруженных нами кандидатов.

Таблица 1. Журнал индивидуальных наблюдений кандидатов

Дата	Фильтры	Объект
2022-02-11	<i>B, V, R</i>	SOI-3
2022-02-13	<i>B, V, R</i>	SOI-3
2022-05-29	<i>B, V, R, I</i>	SOI-8
2022-06-02	<i>B, V, R, I</i>	SOI-3
2022-06-05	<i>V, I</i>	SOI-8
2022-06-28	<i>V, R, I</i>	SOI-2*
2022-07-04	<i>R</i>	SOI-7, SOI-8
2022-07-08	<i>I, V</i>	SOI-7, SOI-8

* — транзит не наблюдался

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились в два этапа. На первом этапе, с 25 августа 2020 г. по 21 января 2021 г., были получены кривые блеска более 35 000 звезд суммарной длительностью до 22^d8 за 56 ночей; всего съемка велась в течение 84 ночей. Это обзорные наблюдения широкого поля ($\Delta\alpha = 2^\circ45$, $\Delta\delta = 1^\circ56$) в крупном масштабе (1"34/пиксель) 50-см телескопом с приемником в главном фокусе с выдержкой 60 с. С февраля 2022 г. начался второй этап — наблюдение отдельных объектов, найденных в ходе обзора, на том же и на другом (с приемником во вторичном фокусе и масштабом 0"93/пиксель) 50-см телескопах в фильтрах *B, V, R, I* (см. таблицу 1). Более точная фотометрия транзитов по данным 1-м телескопа, а также спектры SOI, полученные на 6-м телескопе, будут использованы для уточнения параметров кандидатов в экзопланеты и опубликованы в будущем.

Обработка фотометрических данных проводилась в потоковом режиме с помощью стандартных процедур, включающих вычитание темновых кадров (кадры плоского поля не были получены), определение источников на кадре и привязку координат, апертурную фотометрию, кросс-идентификацию. Для этого использовался скрипт, написанный на языке программирования Python, с применением стандартных программ: *Astrometry.net* (Lang et al. 2009), *SExtractor* (Bertin and Arnouts 1999), *CCDPACK*² (Warren-Smith et al. 2014).

Далее проводилась калибровка кривых блеска. В качестве стандартных были выбраны яркие звезды (14^m0-15^m5), которые имеют высокий коэффициент корреляции инструментальных кривых

²<https://starlink.eao.hawaii.edu/devdocs/sun139.htx/sun139.html>

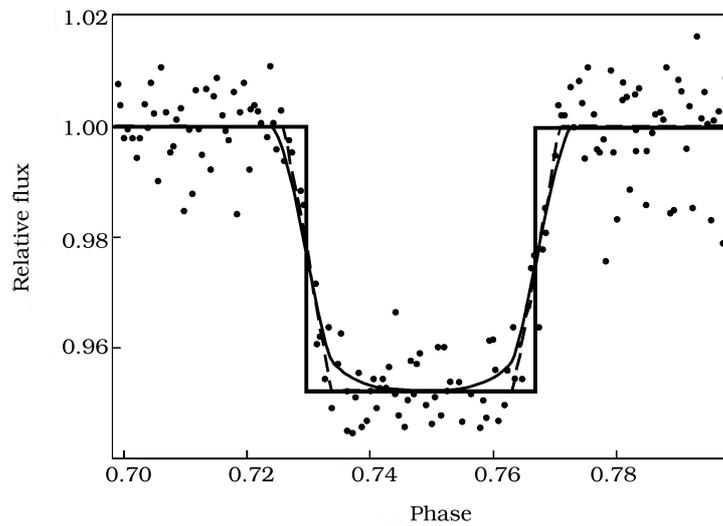


Рис. 1. Модели, аппроксимирующие транзитные события: box-shape (Kovacs et al. 2002, Price-Whelan et al. 2022) (толстая линия), в форме трапеции (штриховая) и *batman* (Kreidberg 2015) (тонкая линия). Точками показан фрагмент кривой блеска SOI-3 с одним из транзитов.

блеска со сравниваемой звездой и большое число точек наблюдений, близкое к максимальному.

3. АНАЛИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА

Полученные кривые блеска исследовались на наличие периодических падений яркости, ожидаемых из-за прохождения экзопланеты по диску звезды. Для этого использовался простой алгоритм Box Least Squares (BLS) (Kovacs et al. 2002), с помощью которого подбирались параметры двухуровневой модели, аппроксимирующей кривую блеска, с пробным периодом свернутую по фазе (Yakovlev et al. 2022). В этой модели кривая блеска вне транзита аппроксимируется одним (нулевым) уровнем, а во время транзита — другим (рис. 1).

Поиск кривых блеска с транзитными событиями осуществляется путем анализа периодограмм, статистически характеризующих степень соответствия сфазированной кривой выбранной модели. Основным параметром, который определяется на этом этапе с помощью алгоритма BLS, является период P — интервал времени между двумя последовательными транзитами (орбитальный период тела, вызывающего потемнение). Остальные параметры этой модели (длительность τ , глубина Δm и положение центральной точки t_0 транзита) уточняются с помощью других моделей, описанных ниже.

Для реализации алгоритма BLS используется библиотека *astropy* (Python) (Price-Whelan et al. 2022). Входными параметрами являются кривая блеска, сетки значений периода P и длительности

транзита τ . На основании длительности и скважности наблюдений, точности фотометрии, статистики параметров известных экзопланет, а также некоторых простых оценок (см. рис. 9 в работе Yakovlev et al. (2022)) выбраны следующие диапазоны определяемых параметров: $P = 0^d5-5^d$ и $\tau = 0^h1-5^h$ (кандидаты с периодами больше пяти суток, SOI-4 и SOI-5, изначально были найдены с меньшими кратными периодами).

Далее для определения параметров транзитных событий, а также физических и орбитальных параметров кандидатов в экзопланеты делается переход от относительных звездных величин Δm к относительным единицам потока

$$\Delta F = 1 - 10^{-\Delta m/2.5}.$$

Нулевой уровень (вне транзита) принимается равным 1.

Следующим приближением является кривая блеска в форме трапеции. Отличием от предыдущей модели (BLS) является наличие переходных участков между нулевым уровнем и «плоским дном», в течение которых тело только частично затмевает диск звезды. Эта модель описывается четырьмя временными параметрами: начало и конец транзита t_1, t_4 , начало и конец фазы максимального падения блеска t_2, t_3 . Глубина транзита ΔF определяется как медианное значение на участке t_2-t_3 , аналогично предыдущей модели.

По форме и амплитуде кривой блеска ($t_1, t_2, t_3, t_4, \Delta F$) можно определить радиус тела R_p и большую полуось его орбиты $smaj$ (semi-major axis) в единицах радиуса звезды R_* , сделав

Таблица 2. Параметры звезд с кандидатами в экзопланеты (ID по каталогу Gaia DR3 (Vallenari et al. 2022), координаты RA и Dec, видимая звездная величина m_G) и параметры транзитных событий (нулевая эпоха одного из транзитов JD_0 , период P между транзитами, длительность τ и максимальная глубина транзита Δm)

SOI	Gaia ID	RA, hh:mm:ss	Dec, dd:mm:ss	m_G , mag	JD_0	P , h	τ , h	Δm , mag
1	395249244499720320	00:10:30.08	+50:27:54.0	18.81	2459202.090	26.085	1.56	0.14
2	395239868590825472	00:12:31.18	+50:27:21.3	18.83	2459219.106	50.358	2.97	0.17
3	395281753112434304	00:08:26.77	+50:28:23.9	14.30	2459189.314	45.988	2.17	0.06
4	395220833295162112	00:11:10.60	+50:16:21.6	17.81	2459171.404	126.844	1.49	0.08
5	395229079635160320	00:13:17.88	+50:15:43.9	15.17	2459221.434	198.309	3.81	0.06
6	395282813962513536	00:07:59.73	+50:31:19.9	17.96	2459202.386	49.645	2.79	0.06
7	394596585565904000	00:16:33.19	+50:41:10.1	18.24	2459236.310	97.670	2.55	0.15
8	394573186584164096	00:16:01.05	+50:32:24.1	16.94	2459221.159	18.768	1.47	0.09

допущение, что орбита круговая (Seager and Mallen-Ornelas 2003):

$$R_p/R_* = \sqrt{\Delta F}, \quad (1)$$

$$sma/R_* = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 - b^2(1 - f_1)}{f_2}}, \quad (2)$$

где $f_1 = \sin^2(\pi t_T/P)$ и $f_2 = \sin^2(\pi t_F/P)$ — функции, зависящие от длительности всего транзита $t_T = t_4 - t_1$ и длительности максимальной глубины транзита $t_F = t_3 - t_2$, $b = f(\Delta F, f_1, f_2)$ — проекция расстояния между планетой и центром звезды в момент t_0 (см. уравнения (6)–(8) в работе Seager and Mallen-Ornelas (2003)).

Третьей моделью, наиболее точно (по сравнению с предыдущими) описывающей транзит, является **batman** (BAsic Transit Model cAlculationN) (Kreidberg 2015). Кривую блеска определяют восемь параметров: центральная точка транзита t_0 , радиус планеты R_p/R_* и большая полуось орбиты sma/R_* в единицах радиусов звезды; наклонение i (угол между плоскостью орбиты и картинной плоскостью), эксцентриситет e , долгота восходящего узла Ω орбиты; коэффициенты квадратичной функции потемнения к краю звезды a и b .

С помощью алгоритма с использованием первой модели (Box-shape) было найдено более 30 звезд с транзитными событиями. Для каждого из них определены эпохи транзитов JD_0 , период P , а также глубина Δm и длительность τ падений блеска. Затем на основании полученных оценок этих параметров был проведен отсев звезд с кандидатами в экзопланеты (SOI) от затменно-переменных звезд с $\Delta m \gtrsim 0^m2$, $P \gtrsim 5^h$, $\tau/P \gtrsim 0.25$, имеющих V-образную форму транзита или различающиеся по глубине τ четные и нечетные транзиты.

Параметры второй (в форме трапеции) и третьей (**batman**) моделей определялись методом максимального правдоподобия. Оценки параметров второй модели $t_1 - t_4$, ΔF использовались для определения рассматриваемых диапазонов входных параметров третьей модели (t_0 , R_p/R_* из (1), sma/R_* из (2)). Диапазоны орбитальных параметров: $i = 75-90^\circ$, $e = 0-1$, $\Omega = 0-360^\circ$. Коэффициенты квадратичной функции потемнения к краю звезды, a и b , взяты из таблицы Claret (2000) по параметрам звезды: эффективной температуре $T_{\text{эф}}$, ускорению свободного падения g и металличности [M/H] (Prusti et al. 2016, Vallenari et al. 2022).

На данном этапе моделирования стояла задача оценить период, длительность и глубину транзита, радиусы кандидатов в экзопланеты и большие полуоси орбит с целью проверки гипотезы о планетной природе этих тел (остальные параметры, орбитальные, им сопутствуют). В дальнейшем по фотометрическим данным 1-м телескопа Цейсс-1000 САО РАН и по спектральным данным 6-м телескопа БТА будет проведено уточняющее моделирование с оценкой ошибок.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате анализа кривых блеска звезд в исследуемом поле найдено восемь звезд, у которых наблюдаются периодические падения яркости, характерные для транзитных событий. Кривые блеска этих звезд (после вычитания тренда за каждую ночь, а также удаления выбросов и исключения данных, полученных в ночи с плохими погодными условиями) представлены на рис. 2. У наиболее ярких звезд SOI-3, SOI-5 ($m < 15^m$) и SOI-8 ($m \approx 17^m$) глубина транзита Δm превышает 3σ (рис. 2). У остальных — $m \approx 18^m-19^m$, для них $\Delta m < 3\sigma$.

Информация о звездах SOI-1–SOI-8 (идентификационный номер по каталогу Gaia DR3

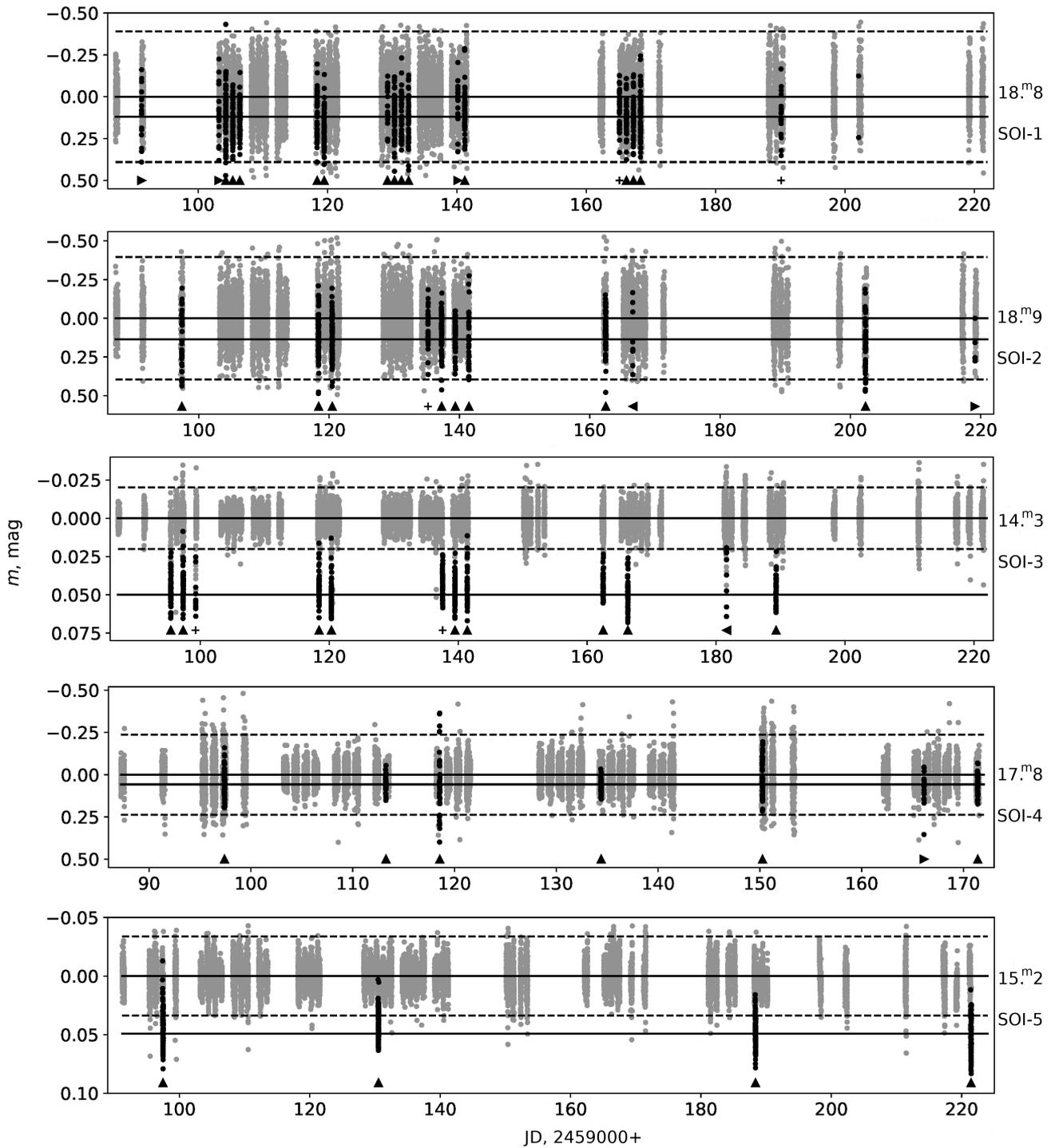


Рис. 2. Кривые блеска восьми кандидатов в экзопланеты за все время фотометрического мониторинга избранной области размером $2^{\circ}5 \times 1^{\circ}5$ (обзорного наблюдения). Горизонтальными сплошными линиями показаны нулевой уровень и максимальная глубина транзита, штриховыми — уровни $\pm 3\sigma$. Метками под кривыми блеска указаны ночи, в которых наблюдался транзит: только начало (стрелка влево), только окончание (стрелка вправо), середина с началом или окончанием (плюс) или полностью (стрелка вверх).

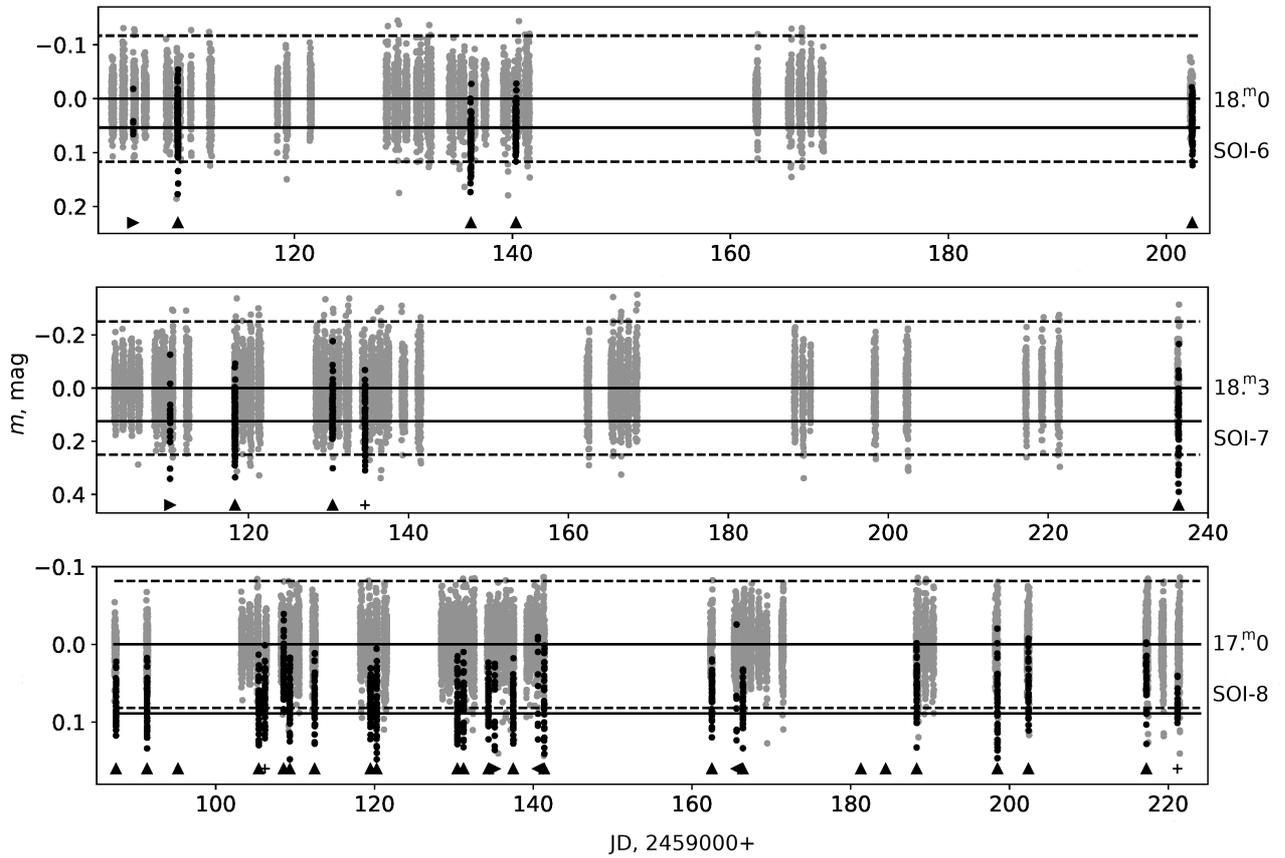


Рис. 2. (Продолжение.)

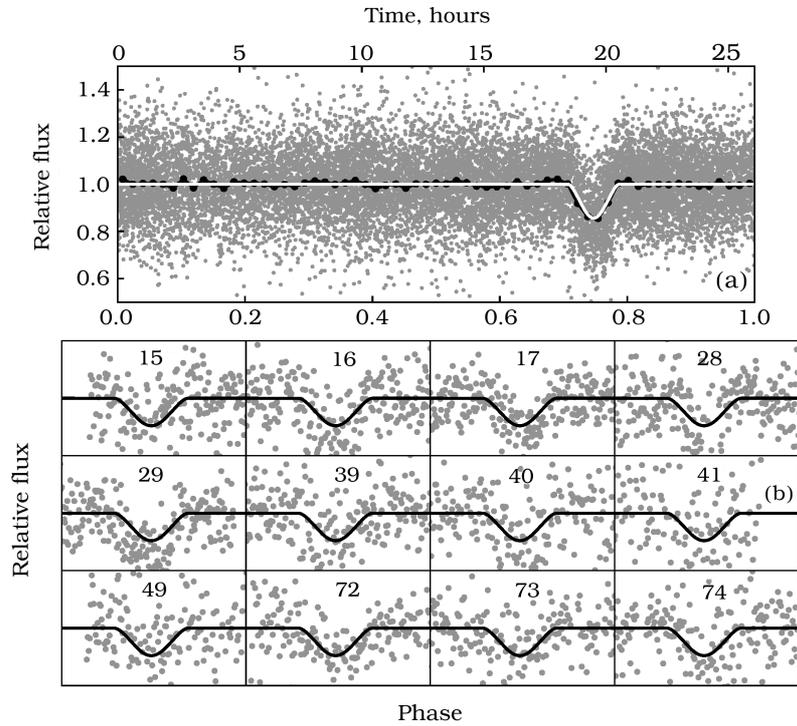


Рис. 3. Кривая блеска SOI-1: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 25$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты с индивидуальными транзитами и той же модельной кривой (черная линия), номер периода для каждого транзита указан; риски и метки осей опущены, чтобы не загромождать графики.

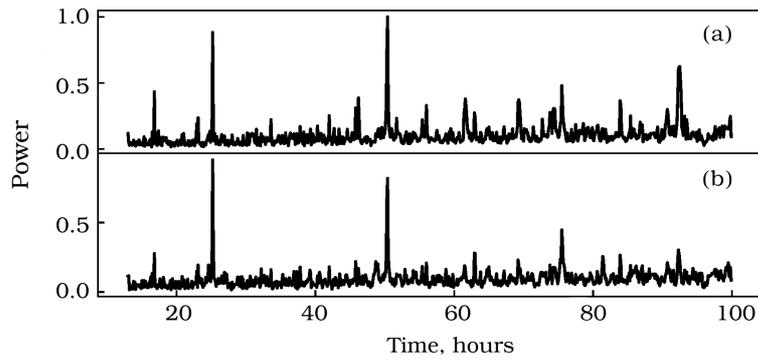


Рис. 4. Периодограммы BLS для SOI-2 до вычитания суточного тренда (b) и после (a).

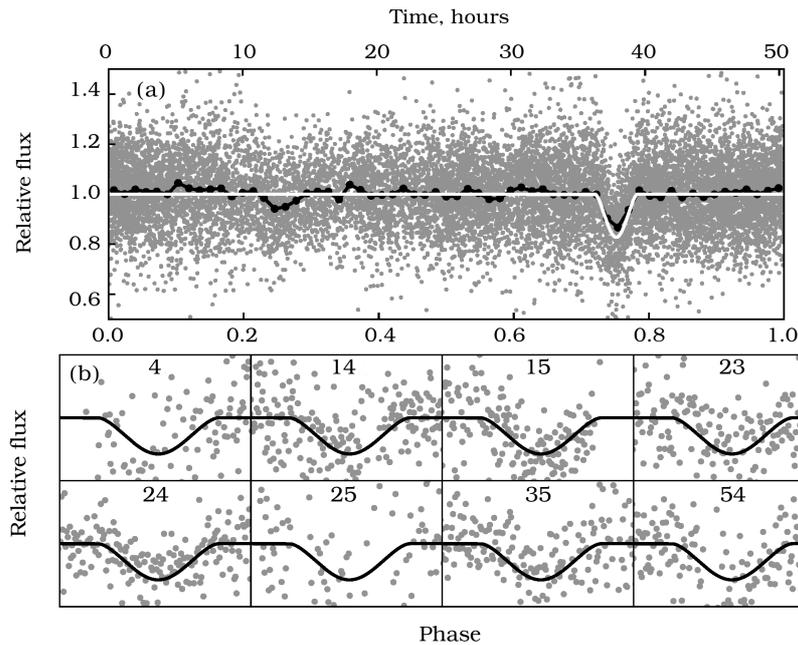


Рис. 5. Кривая блеска SOI-2: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 50$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты для индивидуальных транзитов с той же модельной кривой (черная линия); номер периода каждого транзита указан; риски и метки осей опущены, чтобы не загромождать графики.

(Vallenari et al. 2022), их блеск, координаты и физические параметры), а также полученные оценки наблюдаемых параметров транзитных событий (нулевая эпоха, период, глубина, длительность транзита) представлены далее в этом разделе, а также в сводных таблицах 2, 3 и 4. Частичные отличия значений перечисленных параметров для SOI-1–SOI-5 от опубликованных ранее в работе Yakovlev et al. (2022) объясняются использованием другого релиза Gaia (DR3 вместо EDR 3) и других моделей транзитов — в форме трапеции и *batman* (Kreidberg 2015).

4.1. SOI-1

У звезды SOI-1 с $m_G = 18^m81$ обнаружены падения блеска с периодом $P = 26^h09$, длительно-

стью $\tau = 1^h56$ и глубиной $\Delta m = 0^m144$ (рис. 3). За время обзорных наблюдений зарегистрированы 12 полных (от начала до конца) транзитов.

Коэффициенты потемнения к краю для SOI-1: $a = 0.354$, $b = 0.374$ ($\lg g = 4.90$, $\lg (M/H) = -1.69$). Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7501$, $R_p/R_* = 0.38$, $sm/R_* = 7.85$, $i = 83^\circ3$, $e = 0.60$, $\Omega = 307^\circ$.

4.2. SOI-2

Период транзитов SOI-2 с $m_G = 18^m83$ изначально определен как $P = 25^h2$ (такой указан в работе Yakovlev et al. (2022)). После вычитания

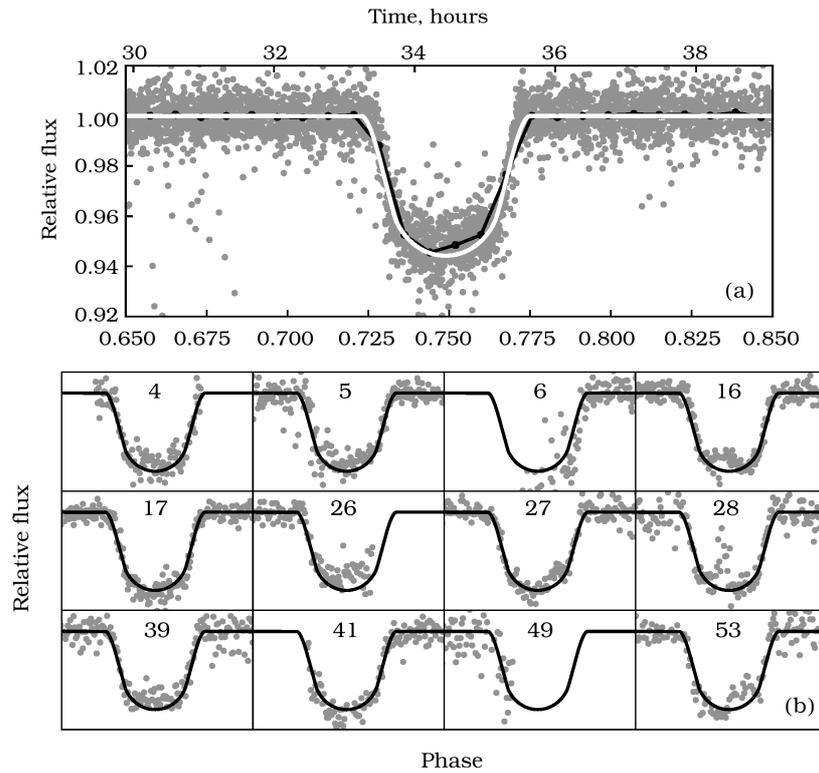


Рис. 6. Кривая блеска SOI-3: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 20$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты для индивидуальных транзитов с указанными номерами периода и той же модельной кривой (черная линия).

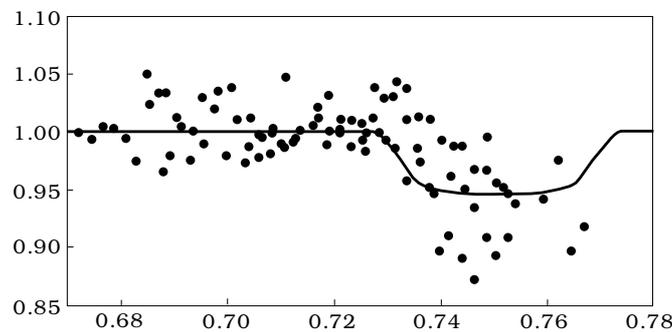


Рис. 7. Сфазированная кривая SOI-3 по индивидуальным наблюдениям в 2022 г. (фильтр V) и модельная кривая, полученная по данным 2020 года в ходе обзорных наблюдений, см. рис. 6.

суточного тренда период, соответствующий максимуму на периодограмме, увеличился в два раза (рис. 4).

При сложении в сфазированную кривую с $P = 50^{\text{h}}36$ выявляется вторичный минимум (рис. 5, $\phi \approx 0.25$), который принимался за главный наряду с минимумом $\phi \approx 0.75$. Длительность транзита $\tau = 2^{\text{h}}97$, глубина $\Delta m = 0^{\text{m}}173$. За время обзорных наблюдений зарегистрированы восемь полных транзитов.

Коэффициенты потемнения к краю для SOI-2: $a = 0.22$, $b = 0.44$ ($\lg g = 4.77$, $\lg (M/H) = -2.52$).

Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7500$, $R_p/R_* = 0.42$, $sm_a/R_* = 8.47$, $i = 83^{\circ}7$, $e = 0.50$, $\Omega = 219^{\circ}$.

4.3. SOI-3

Звезда SOI-3 — наиболее яркая из восьми рассматриваемых ($m_G = 14^{\text{m}}30$). В кривой блеска обнаружены падения яркости с периодом $P = 45^{\text{h}}99$, длительностью $\tau = 2^{\text{h}}17$ и глубиной $\Delta m = 0^{\text{m}}056$

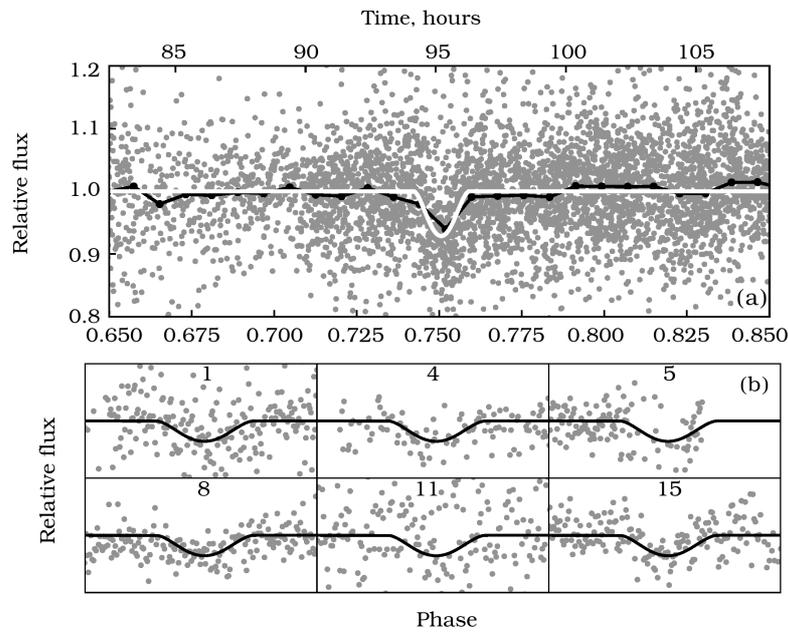


Рис. 8. Кривая блеска SOI-4: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta \approx 60$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — индивидуальные транзиты с указанием номера периода и той же модельной кривой (черная линия).

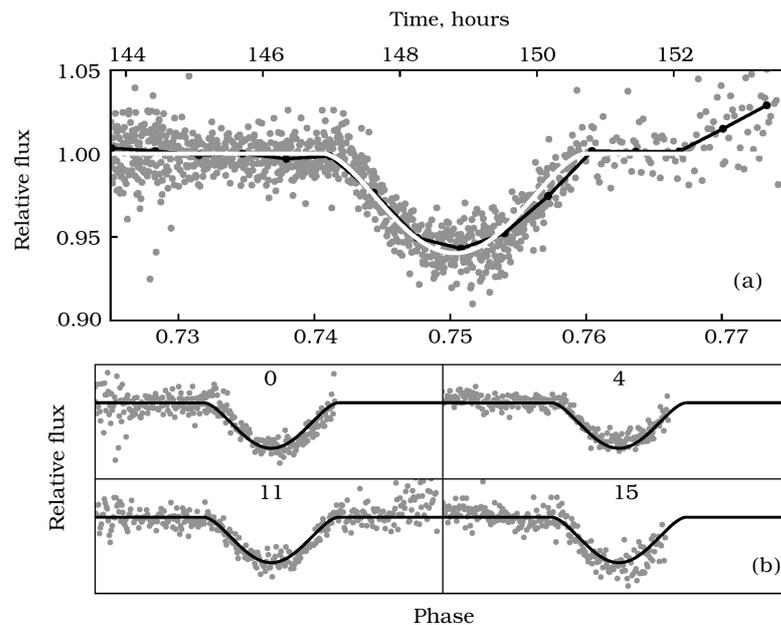


Рис. 9. Кривая блеска SOI-5: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 40$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты с индивидуальными транзитами и той же модельной кривой, указан номер периода.

(рис. 6). За время обзорных наблюдений зарегистрированы восемь полных транзитов, а также четыре частичных.

На периодах 16, 28 и 53 во время транзита наблюдается временное повышение потока на $0^{\text{m}}01\text{--}0^{\text{m}}02$. Это может быть связано с активностью в атмосфере звезды.

Коэффициенты потемнения к краю SOI-3: $a = 0.59$, $b = 0.19$ ($\lg g = 4.20$, $\lg (M/H) = -0.99$). Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7489$, $R_p/R_* = 0.24$, $sm_a/R_* = 4.50$, $i = 81^\circ 2$, $e = 0.45$, $\Omega = 90^\circ$.

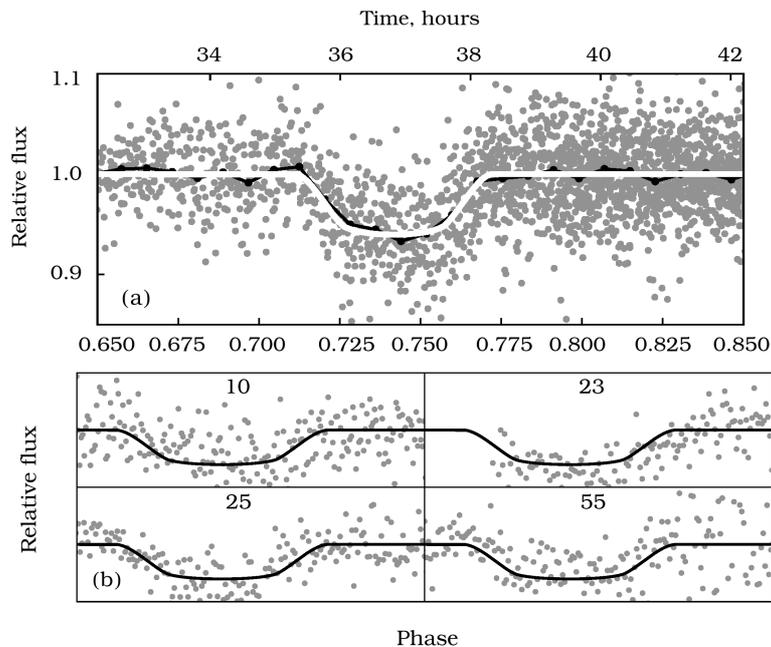


Рис. 10. Кривая блеска SOI-6: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 20$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты с индивидуальными транзитами и той же модельной кривой, указан номер периода.

В 2022 г. получены кривые блеска SOI-3 за три ночи, в которых прогнозировалось транзитное событие (рис. 7). Все три зафиксированных транзита наблюдались с фазой $\phi < 0.5$, т.е. на данный момент ни одного предсказанного транзита не удалось пронаблюдать полностью. Однако начало транзита на сфазированной кривой присутствует.

4.4. SOI-4

У звезды SOI-4 с $m_G = 17^m81$ обнаружены транзиты с периодом $P = 126^h85 \approx 5^d6^h$ длительностью $\tau = 1^h95$ и глубиной $\Delta m = 0^m071$ (рис. 8). За время обзорных наблюдений зарегистрированы шесть полных транзитов.

Коэффициенты потемнения к краю SOI-4: $a = 0.27$, $b = 0.48$ ($\lg g = 4.63$, $\lg(M/H) = -0.33$). Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7493$, $R_p/R_* = 0.30$, $sm_a/R_* = 13.22$, $i = 79^\circ8$, $e = 0.85$, $\Omega = 195^\circ$.

4.5. SOI-5

У звезды SOI-5 (ID 395229079635160320 в Gaia DR3, ID 395229079633073024 в EDR3) с $m_G = 15^m17$ обнаружены транзиты (см. рис. 9) с максимальным из восьми рассматриваемых звезд периодом больше недели $P = 198^h31 \approx 8^d6^h$, длительностью $\tau = 3^h81$ и глубиной $\Delta m = 0^m060$. За время обзорных наблюдений зарегистрированы

один полный транзит и три с фазой транзита до $\phi \approx 0.85$.

Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7501$, $R_p/R_* = 0.24$, $sm_a/R_* = 14.34$, $i = 85^\circ4$, $e = 0.30$, $\Omega = 170^\circ$, $a = 0.25$, $b = 0.42$. Параметры звезды SOI-5 неизвестны. Поэтому параметры a , b были определены в ходе моделирования.

4.6. SOI-6

У звезды SOI-6 с $m_G = 17^m96$ обнаружены транзиты с периодом $P = 49^h65$, длительностью $\tau = 2^h79$ и глубиной $\Delta m = 0^m060$ (рис. 10). За время обзорных наблюдений зарегистрированы четыре полных транзита.

Коэффициенты потемнения к краю SOI-6: $a = 0.25$, $b = 0.42$ (при $\lg g = 4.72$, $\lg(M/H) = -2.78$). Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7413$, $R_p/R_* = 0.25$, $sm_a/R_* = 9.58$, $i = 87^\circ6$, $e = 0.60$, $\Omega = 238^\circ$.

4.7. SOI-7

У звезды SOI-7 ($m_G = 18^m24$) мы обнаружили транзиты с периодом $P = 97^h67 \approx 4^d17^h$, длительностью $\tau = 2^h55$ и глубиной $\Delta m = 0^m153$ (рис. 11). За время обзорных наблюдений зарегистрированы три полных транзита и один с фазой транзита до $\phi \approx 0.5$.

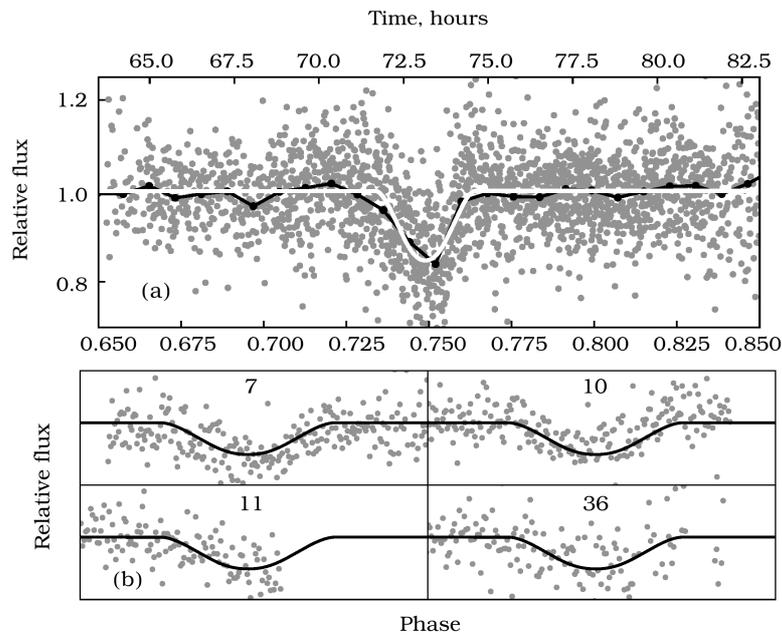


Рис. 11. Кривая блеска SOI-7. (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 45$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты для индивидуальных транзитов с указанием номера периода и той же модельной кривой (черная линия).

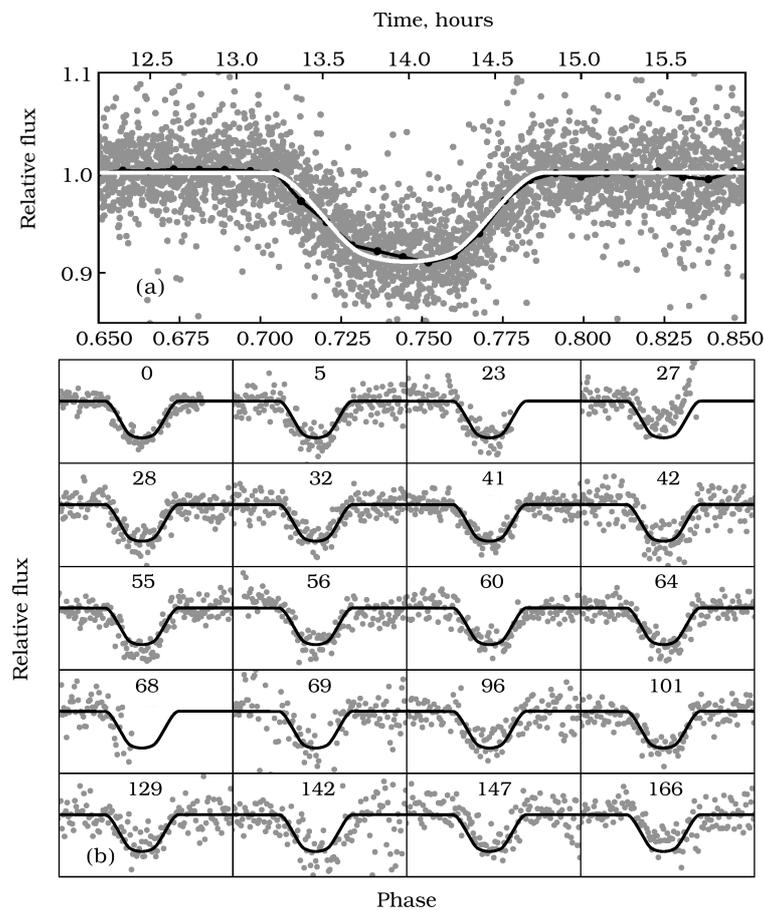


Рис. 12. Кривая блеска SOI-8: (a) — сфазированная кривая (точки), медианные значения с шагом $\Delta t \approx 9$ минут (черная линия) и модельная кривая (белая линия); (b) — фрагменты с индивидуальными транзитами, той же модельной кривой (черная линия) и указанным номером периода; риски и метки осей опущены, чтобы не загромождать графики.

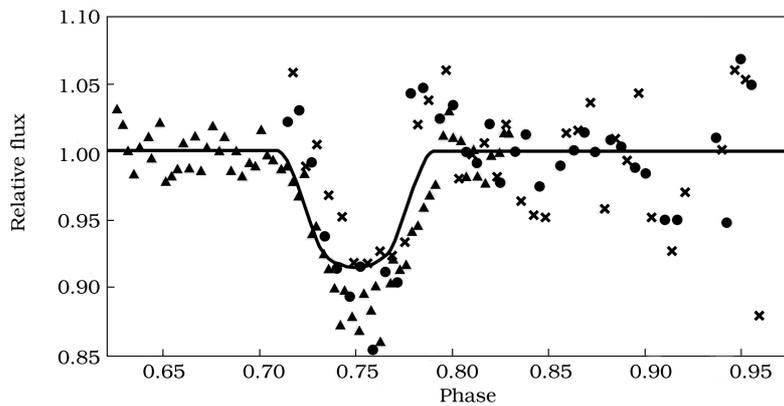


Рис. 13. Сфазированная кривая SOI-8 по индивидуальным наблюдениям в 2022 г. в фильтрах B (кружки), V (треугольники), R (крестики) и модельная кривая, полученная по данным 2020 года в ходе обзорных наблюдений (см. рис. 12).

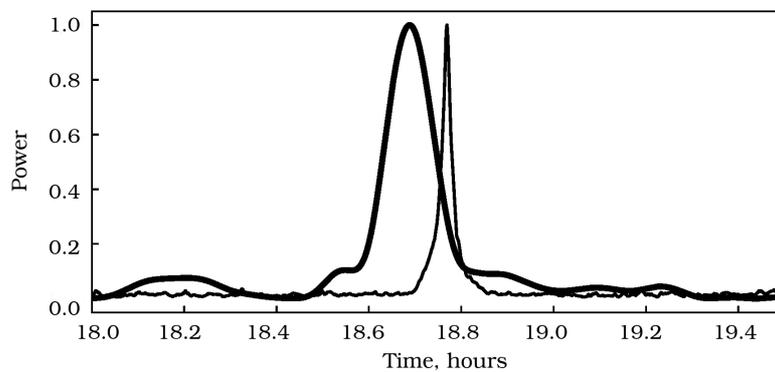


Рис. 14. Периодограммы SOI-8 после вычитания суточного тренда BLS (тонкая линия) и до вычитания тренда, но без учета транзитов (исключаются точки с фазой $\phi = 0.693-0.807$) Lomb–Scargle (толстая линия).

Коэффициенты потемнения к краю для SOI-7: $a = 0.37$, $b = 0.37$ ($\lg g = 4.79$, $\lg (M/H) = -1.52$). Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7493$, $R_p/R_* = 0.39$, $sm_a/R_* = 8.24$, $i = 81^\circ 5'$, $e = 0.55$, $\Omega = 40^\circ$.

4.8. SOI-8

У звезды SOI-8 с $m_G = 16^m 94$ зарегистрированы транзитные события с минимальным из восьми рассматриваемых звезд периодом меньше суток $P = 18^h 77$ (рис. 12). Длительность транзита $\tau = 1^h 47$, глубина $\Delta m = 0^m 089$. За время обзорных наблюдений зарегистрированы 19 полных транзитов, а также три частичных.

Коэффициенты потемнения к краю для SOI-8: $a = 0.50$, $b = 0.25$ ($\lg g = 4.72$, $\lg (M/H) = -1.03$). Подобранной модельной кривой транзита соответствуют следующие параметры: $\phi_0 = 0.7452$,

$R_p/R_* = 0.30$, $sm_a/R_* = 4.59$, $i = 82^\circ 8'$, $e = 0.05$, $\Omega = 273^\circ$.

В 2022 г. получены кривые блеска SOI-8 за четыре ночи, в которых прогнозировались транзитные события (рис. 13). Из них два наблюдались полностью в двух фильтрах (V , R), два — частично в трех (B , V , R).

Кроме транзитов у SOI-8 наблюдается переменность блеска (определена из анализа Lomb–Scargle периодограммы в работе VanderPlas (2017)) с периодом $P = 18^h 688$ и амплитудой $\Delta m \approx 0.1$ (см. рис. 14 и рис. 15). Этот период меньше периода транзитов $P_{tr} = 18^h 768$ примерно на 4.5 минуты. Также на рис. 15 представлена сфазированная кривая при $P = P_{tr}$ с исключением фазы транзитных событий.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Если найдено более двух транзитов одинаковой формы с согласующейся периодичностью на дли-

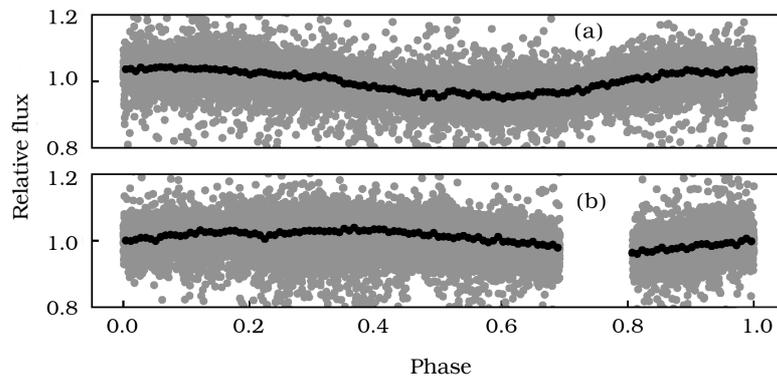


Рис. 15. Сфазированные кривые SOI-8 до вычитания тренда без учета транзитов (исключаются точки с фазой $\phi = 0.693\text{--}0.807$): с периодом $P = 18^{\text{h}}688$ (a) и периодом транзитов $P = 18^{\text{h}}768$ (b). Линией показаны медианные значения с шагом $\Delta \approx 9$ минут.

тельном интервале времени, можно исключить гипотезы о том, что вариации блеска вызваны наличием пятен у звезды, явлениями в атмосфере Земли или возникли при наблюдениях или обработке данных. И справедливо утверждение, что уменьшение блеска обусловлено видимым прохождением тела, гравитационно связанного со звездой, которое может быть звездой, коричневым карликом или планетой. Названные условия выполняются для всех SOI: детектированы четыре и более транзитов (как минимум, три полных) за несколько месяцев, для двух (SOI-3 и SOI-8), в том числе по наблюдениям 2022 г. в расчетное время по данным обзорных наблюдений 2020 г.; форма транзита повторяется (в моменты транзита отклонение кривой блеска от модельной кривой не превышает 3σ). Во все моменты времени, удаленные от нулевой эпохи на целое число периодов, наблюдается транзит (если имеются данные).

Метод транзитной фотометрии позволяет определить только радиус, масса тела остается неизвестной. Если транзит вызван телом, размер которого сопоставим с размером планет-гигантов, можно исключить наличие звездного компонента. Если радиус этого тела значительно меньше радиуса Юпитера, можно утверждать, что это тело — экзопланета. Все найденные нами кандидаты в экзопланеты имеют радиус, превосходящий радиус Юпитера, поэтому нельзя исключать, что эти кандидаты являются коричневыми карликами или небольшими звездами.

Масса является физическим параметром, различающим планеты и коричневые карлики. Это условная граница, которая принята равной $13 M_{\text{Jup}}$: если масса исследуемого объекта больше, то гипотеза о его планетной природе не подтверждается. Массу объекта можно определить по измерению кривой лучевой скорости звезды, вокруг

которой он движется. Лучевая скорость, обусловленная наличием экзопланеты у звезды, не превышает 15 м с^{-1} (по данным NASA Exoplanet Archive, 2022). Для измерения таких скоростей необходимо получить спектр высокого разрешения. Однако исследуемые звезды достаточно слабые: у SOI-3, SOI-5 $m = 14^{\text{m}}\text{--}15^{\text{m}}$, у SOI-4, SOI-6, SOI-8 $m = 17^{\text{m}}\text{--}18^{\text{m}}$, у SOI-1, SOI-2 $m \approx 19^{\text{m}}$ — их кривые блеска имеют низкое отношение S/N .

Вместо измерения лучевых скоростей звезд по спектрам высокого разрешения можно использовать другие способы проверки гипотезы о планетной природе, например, изучить зависимость глубины транзита по фотометрическим данным в различных спектральных полосах (трансмиссионная спектроскопия). Если глубина транзита не отличается в различных фильтрах, то транзитное тело можно считать серым и исключить гипотезу о звезде. Если имеется отличие глубины транзита (и оно не соответствует зависимости потемнения к краю от длины волны или наличию атмосферы у экзопланеты), то планетная гипотеза не подтверждается. Заметим, что у SOI-8 одно транзитное событие наблюдалось на 50-см телескопе в трех фильтрах (рис. 13), однако точек недостаточно для того, чтобы делать выводы.

Другим вариантом является измерение спектра звезды в разных фазах относительно транзита. В случае если второй компонент является звездой значительно отличающегося спектрального класса, то в различных фазах орбитального витка этого тела на спектрах будут отличаться смещения спектральных линий.

Еще один вариант — определение верхнего предела лучевой скорости звезды по измерениям спектра низкого разрешения. Если второй компонент — звезда, то можно измерить амплитуду лучевой скорости (десятки км с^{-1}) наблюдаемой

звезды; если планета — кривая лучевой скорости наблюдаться не будет.

Этими методами планируется в дальнейшем проверять гипотезу о планетной природе обнаруженных кандидатов в экзопланеты.

В результате моделирования (см. раздел 4 и таблицу 3) для всех SOI определены радиус R_p/R_* и большая полуось орбиты второго компонента sma/R_* в единицах радиуса звезды, вокруг которого он движется (таблица 3). Для определения размера второго компонента необходимо знать радиус изучаемой звезды. Согласно Vallenari et al. (2022), радиусы звезд SOI-1, SOI-2, SOI-4, SOI-6, SOI-7, SOI-8 лежат в диапазоне 0.4–0.58; SOI-3 — $0.64 R_\odot$ или $1.14 R_\odot$; радиус SOI-5 неизвестен. С целью проверки гипотезы используем далее эти значения для оценки радиусов и размера орбит вторых компонентов в первом приближении с помощью формул (1), (2) и сравним их со значениями этих параметров у известных подтвержденных экзопланет.

Для четырех кандидатов в экзопланеты, SOI-6, SOI-4, SOI-1, SOI-8, радиус R_p лежит в диапазоне $1.39–1.64 R_{\text{Юр}}$, для кандидата у SOI-7 $R_p = 1.96 R_{\text{Юр}}$, для кандидата у SOI-3 R_p равен $1.46 R_{\text{Юр}}$ или $2.62 R_{\text{Юр}}$, для кандидата у SOI-2 — $R_p = 2.22 R_{\text{Юр}}$. Согласно данным NASA Exoplanet Archive (2022), в настоящее время известны только две экзопланеты радиусом $R_p \approx 2.7 R_{\text{Юр}}$ и шесть — с радиусом $R_p = 2.0–2.2 R_{\text{Юр}}$, у которых масса оценена как $M \leq 13 M_{\text{Юр}}$, все остальные меньше. Полученные нами оценки радиусов кандидатов в экзопланеты SOI попадают в диапазон радиусов подтвержденных экзопланет. Таким образом, в зависимости от того, насколько радиус кандидата соответствует возможному радиусу экзопланет, восемь исследуемых звезд можно поделить на две группы: наиболее интересны для изучения SOI-6, SOI-4, SOI-1, SOI-8, SOI-7, далее SOI-3, SOI-2, SOI-5.

По данным NASA Exoplanet Archive (2022) у известных транзитных экзопланет ($M \leq 13 M_{\text{Юр}}$) минимальный орбитальный период $P_{\text{min}} = 4^{\text{h}}3$, минимальный размер большой полуоси $sma_{\text{min}} = 0.0058$ а.е. Минимальные значения этих параметров для SOI-1–SOI-8 составляют $P_{\text{SOI8}} = 18^{\text{h}}8$, $sma_{\text{SOI8}} = 0.012$ а.е. Всего же известно 76 транзитных экзопланет с $P_{\text{SOI8}} < P < P_{\text{min}}$ и 26 (те же, за исключением трех) с $sma_{\text{SOI8}} < sma < sma_{\text{min}}$. Таким образом, периоды и большие полуоси орбит кандидатов у SOI-1–SOI-8 соответствуют значениям известных экзопланет.

Другие параметры (e , Ω , i), определенные в ходе моделирования, для проверяемой гипотезы неважны. Эксцентриситеты SOI-1–SOI-7 превосходят

Таблица 3. Радиус звезд R_* по Gaia DR3 (Vallenari et al. 2022) и оценки параметров для кандидатов в экзопланеты: радиус планеты R_p и большая полуось ее орбиты sma . Для SOI-3 в скобках указано значение радиуса из Gaia EDR 3

SOI	R_*, R_\odot	R_p/R_*	sma/R_*
1	0.40	0.38	7.85
2	0.55	0.42	8.47
3	1.14 (0.64)	0.24	4.50
4	0.57	0.27	13.22
5	–	0.24	14.34
6	0.58	0.25	9.58
7	0.52	0.39	8.24
8	0.57	0.30	4.59

0.3. Всего известно менее 3% транзитных экзопланет с эксцентриситетами такой величины (NASA Exoplanet Archive, 2022). Долгота восходящего узла ничем не ограничена, распределена равномерно в диапазоне $\Omega = 0–360^\circ$. Эти два параметра имеют наибольшую относительную неопределенность. Наклонения орбит i обсуждаемых кандидатов лежат в диапазоне $79^\circ 8–87^\circ 6$, в котором насчитывается 26% транзитных экзопланет (NASA Exoplanet Archive, 2022).

Используемые радиусы звезд (Vallenari et al. 2022) определены по показателю цвета $B - R$ и параллаксу звезды в предположении, что объект одиночный. Поэтому нельзя сказать, что полученные оценки размера кандидатов в экзопланеты и их больших полуосей в достаточной степени достоверны. Однако по имеющимся данным нельзя и полностью отвергнуть гипотезу о планетной природе вторых компонентов SOI.

Также можно решить обратную задачу определения максимального значения радиуса звезды $R_{*\text{max}}$, зная отношение R_p/R_* и взяв $2.5 R_{\text{Юр}}$ в качестве предельного значения радиуса для экзопланеты. Для SOI-1–SOI-8 максимальные радиусы $R_{*\text{max}}$ получаются следующими: 0.66, 0.61, 1.07, 0.95, 0.66, 1.03, 0.66, $0.86 R_\odot$. Об отклонении проверяемой гипотезы можно будет говорить в том случае, если в дальнейшем определенные радиусы звезд будут соответственно превосходить эти оценки.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы пройден полный цикл поиска и исследования кандидатов в экзопланеты методом транзитной фотометрии: фотометрический мониторинг избранной области, проведение фотометрии и поиск транзитных событий

Таблица 4. Табличные и модельные параметры исследуемых звезд, кандидатов в экзопланеты и транзитных событий (подробнее см. в тексте)

Параметр	SOI-1	SOI-2	SOI-3	SOI-4	SOI-5	SOI-6	SOI-7	SOI-8
a	0.354	0.22	0.59	0.27	0.25	0.25	0.37	0.50
b	0.374	0.44	0.19	0.48	0.42	0.42	0.37	0.25
$\lg g$	4.90	4.77	4.20	4.63	—	4.72	4.79	4.72
$\lg (M/H)$	-1.69	-2.52	-0.99	-0.33	—	-2.78	-1.52	-1.03
i , deg	83.3	83.7	81.2	79.8	85.4	87.6	81.5	82.8
e	0.60	0.50	0.45	0.85	0.30	0.60	0.55	0.05
Ω , deg	307	219	90	195	170	238	40	273
ϕ_0	0.7501	0.7500	0.7489	0.7493	0.7501	0.7413	0.7493	0.7452

в кривых блеска, прогнозирование предстоящих транзитов и проведение дополнительных фотометрических наблюдений уже известных кандидатов, моделирование транзитов.

Обнаружено восемь новых кандидатов в экзопланеты. Полученные параметры транзитов, их радиусы, орбитальные периоды и большие полуоси орбит находятся в согласии с параметрами уже известных экзопланет. В дальнейшем планируется исследовать спектры рассматриваемых звезд и получить фотометрические данные на 1-м телескопе с целью более точного моделирования транзитов и определения параметров звезд и кандидатов в экзопланеты.

Глубина падения блеска во время транзита у найденных звезд соответствует случаям прохождения планет-гигантов по диску небольших звезд (0^m06-0^m17). Этим доказано, что в ходе экзопланетных наблюдений в САО РАН на 50-см роботизированном телескопе возможно обнаружение экзопланет размером больше Юпитера. И это справедливо, даже если в дальнейшем планетная природа этих кандидатов в экзопланеты не будет подтверждена.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этой работе использовались данные Европейского космического агентства (ЕКА), миссии Gaia, обработанные Консорциумом обработки и анализа данных Gaia. Также в исследовании использовался Архив экзопланет NASA (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>), который находится в ведении Калифорнийского технологического института по контракту с NASA в рамках программы исследования экзопланет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку в рамках гранта No 075-15-2020-780 (13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117** (1999).
2. A. Claret, *Astron. and Astrophys.* **363**, 1081 (2000).
3. G. Kovacs, S. Zucker, and T. Mazeh, *Astron. and Astrophys.* **391** (2002).
4. L. Kreidberg, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127** (957), 1161 (2015).
5. D. Lang, D. Hogg, K. Mierle, et al., *Astron. J.* **139** (2009).
6. A. M. Price-Whelan et al. (Astropy Collab.), *Astrophys. J.* **935** (2), id. 167 (2022).
7. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
8. S. Seager and G. Mallen-Ornelas, *Astrophys. J.* **585** (2), 1038 (2003).
9. A. Valeev, K. Antonyuk, N. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 318 (2015).
10. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), arXiv e-prints astro-ph:2208.00211 (2022).
11. J. VanderPlas, *Astrophys. J. Suppl.* **236** (1), id. 16 (2018).
12. R. Warren-Smith, P. Draper, M. Taylor, and A. Allan, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1403.021 (2014).
13. O. Yakovlev, A. Valeev, G. Valyavin, et al., *Front. Astron. Space Sci.* **9**, id. 903429 (2022).

Eight Exoplanet Candidates in SAO Survey

O. Yakovlev^{1,2}, A. Valeev^{2,3,4}, G. Valyavin², A. Tavrov^{1,5}, V. Aitov², G. Mitiani², G. Beskin^{2,6}, O. Korablev¹, G. Galazutdinov^{4,2}, V. Vlasyuk², E. Emelianov², T. Fatkhullin², V. Sasyuk⁶, A. Perkov⁷, S. Bondar^{†7}, T. Burlakova^{2,4}, S. Fabrika², and I. Romanyuk²

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

³St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

⁴Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia

⁶Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

⁷Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Moscow, 111024 Russia

We report eight new exoplanet candidates discovered at the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences using the transit technique. Photometric observations were performed with a 50-cm robotic telescope during the second half of 2020. Transits with depths of $\Delta m = 0^m056\text{--}0^m173$ and periods $P = 18^h8\text{--}8^d3$ were detected in $m = 14^m3\text{--}18^m8$ stars. All the stars considered are dwarfs with radii $R_* = 0.4\text{--}0.6R_\odot$ (with an uncertainty of up to $1.1R_\odot$ for a single star). We use simulations to estimate the candidate radii (all are greater than 1.4 times the Jovian radius), semimajor axes of their orbits (0.012–0.035 AU), and other orbital parameters. We report the transit light curves for two stars obtained in 2022 based on individual observations.

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