

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.1-87

## ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ МОЛОДОЙ ЗВЕЗДЫ TOI 1227 С ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗ АССОЦИАЦИИ LOWER CENTAURUS CRUX OB (MUSCA)

И.С.САВАНОВ

Поступила 21 декабря 2021

Принята к печати 16 февраля 2022

На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности блеска TOI 1227 - молодой звезды - члена группы Musca с возрастом 11 млн лет. Полученные результаты сопоставлены с данными о другой, изученной нами ранее, молодой звезде с экзопланетой - EPIC 205117205 (K2-33) из подгруппы Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen. TOI 1227 и K2-33 принадлежат к числу наиболее молодых из изученных по данным миссии Кеплер и TESS звезд с планетными системами. По всем доступным наблюдениям выполнены оценки периода ее вращения и амплитуды переменности блеска, а также по стандартной методике оценена величина параметра запятанности  $A$  в абсолютной мере. Площадь пятен на поверхности TOI 1227 составляет 14600 мдп и существенно превосходит площадь пятен на Солнце. Установлено, что для TOI 1227 за интервал наблюдений в трех секторах с космической миссией TESS, проявления вспышечной активности отсутствовали. Помимо своей молодости, система TOI 1227 представляет особый интерес вследствие существенно большего найденного радиуса планеты по сравнению с другими планетами у маломассивных звезд. Для уточнения свойств TOI 1227b и достоверности ее обнаружения требуются новые наблюдения и дальнейшие исследования.

**Ключевые слова:** *звезды: активность: пятна: фотометрия: переменность: планетные системы*

1. *Введение.* В недавно опубликованной работе авторы [1] сообщили об открытии TOI 1227b, планеты с радиусом  $0.85 \pm 0.05 R_J$  ( $9.5 R_{\oplus}$ ), вращающейся около маломассивной звезды ( $0.170 \pm 0.015$  масс Солнца) с периодом 27.26 сут. Кинематика TOI 1227 и наличие сильной линии поглощения лития подтверждают, что звезда является членом ранее обнаруженной подгруппы объектов ассоциации Crux OB Нижнего Центавра, которая в [1] была выделена, как группа Musca. Основываясь на данных об эквивалентной ширине линий лития, вращении и диаграмме цветовых показателей членов Musca, в [1] получена оценка возраста группы -  $11 \pm 2$  млн лет. Данные TESS и наземные наблюдения указали на наличие глубокого (2.5%) транзита. Наблюдения транзитов и лучевых скоростей были использованы в [1] для получения верхнего предела массы планеты  $0.5 M_J$ . Поскольку такие большие планеты редки вокруг старых звезд с малой массой, в [1] было высказано предположение

о том, что TOI 1227b все еще сжимается и в конечном итоге превратится в одну из наиболее распространенных планет с массой  $< 5 M_{\oplus}$ .

Как нами ранее указывалось (см. [2]), в таких молодых системах на физические и химические свойства формирующихся планет в значительной мере могут влиять все еще продолжающиеся процессы выпадения планетезималей, а также магнитная активность молодой звезды, которая проявляется в ее избыточном УФ и рентгеновском излучении. Перечисленные факторы могут изменять физические свойства атмосфер близких планет, включая разрушение этих атмосфер.

В [3] был опубликован обзор результатов программы поиска молодых планетных систем, основанный на данных миссии K2. Авторы [3] провели исследование (ZEIT) - поиск "зодиакальных экзопланет во времени", с целью изучения статистических свойств планетных систем в близлежащих молодых скоплениях, областях звездообразования и ассоциациях OB звезд.

В настоящее время группа исследователей (THYME) - TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets), проводит поиск и дальнейший анализ характеристик транзитных планет в молодых звездных ассоциациях (~10-20 млн лет) и в близлежащих молодых движущихся группах (YMG) (возраст <200 млн лет) (см. в [1] об этих работах). Эта программа является естественным продолжением ZEIT, а статья [1] - шестая по счету в серии публикаций THYME.

Ряд примеров наших исследований активности звезд из объектов программ ZEIT и THYME можно найти в выполненных ранее работах (см. их краткое описание в [2]). Были изучены проявления пятенной и вспышечной активности объектов, а также, на основании изучения диаграмм, связывающих площадь холодных пятен с возрастом, периодом вращения и числами Россби, сделан вывод о наличии общего характера зависимостей, как установленных нами ранее для 1570 M карликов и звезд солнечного типа, так и звезд с планетными системами.

В настоящей работе представлены результаты анализа переменности блеска TOI 1227 - молодой звезды - члена группы Musca с возрастом 11 млн лет [1]. Полученные результаты сопоставлены с данными об исследованных нами ранее молодых звезд с планетными системами, в частности - EPIC 205117205 (K2-33) из подгруппы Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen [4] с возрастом 11 млн лет, которая ранее являлась наиболее молодой из изученных по данным миссии Кеплер звезд с планетными системами.

2. *TOI 1227 - молодая звезда, член группы Musca.* Авторы [1] опубликовали результаты открытия планеты у звезды TOI 1227 (2MASS J12270432-7227064, TIC 360156606), молодого полностью конвективного холод-

ного карлика с массой  $M = 0.17 \pm 0.03$  масс Солнца. Звезда принадлежит к карликам спектрального класса M5V, ее блеск в фильтрах J и H составляет  $11^m.890$  и  $11^m.312$ , соответственно. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 5842480953772012928, его параллакс составляет  $\pi$  (mas) =  $9.9046 \pm 0.0242$ . На основе анализа кинематических свойств, содержания лития и оценок периода вращения подтверждено [1], что TOI 1227 является членом движущейся группы звезд Musca, возраст которых составляет  $11 \pm 2$  млн лет. Основываясь на кривой блеска из архива миссии TESS и обновленных данных о звездных параметрах, были получены оценки радиуса планеты, которая составила 9.6 радиусов Земли и орбитального периода 27.4 сут [1].

Звезда TOI 1227 отождествлена с X-ray источником 2RXJ J122703.8-722702 из каталога 2nd ROSAT PSPC Catalog. Рентгеновская светимость TOI 1227 составляет  $L_X = 2.09 \cdot 10^{28}$  эрг/с, что приводит к оценке  $\log(L_X/L_{bol}) = -2.66$ . На диаграммах, связывающих рентгеновскую светимость с другими параметрами, например, числами Россби, положение звезды соответствует области насыщения. Таким образом, к сожалению, параметр  $\log(L_X/L_{bol})$  не может служить для независимой оценки возраста объекта. Согласно [1], эффективная температура звезды равна  $3072 \pm 74$  К. Отметим, что перечисленные нами свойства звезды TOI 1227 приводятся согласно данным, указанным в [1] (табл.3).

Для TOI 1227 в архиве TESS имеются данные трех сетов наблюдений - 11, 12 и 38. Наша обработка была аналогична проводимой ранее в случае измерений для других объектов из архива космического телескопа Кеплер и из архива наблюдений миссии TESS (см., например, [2]). На рис.1 представлены кривые блеска TOI 1227 по наблюдениям в секторах 11, 12 и 38, соответствующие спектры мощности и фазовые диаграммы. Хорошо заметна периодическая модуляция блеска, обладающая заметной переменностью амплитуды. В течение всех трех сетов наблюдений звезда проявляла сопоставимую активность. На шкале времени порядка длительности наблюдений в одном секторе (около 30 сут), активность звезды претерпевала изменения как в форме фазовой кривой, так и в положениях максимумов и минимумов.

На построенных нами спектрах мощности имеется характерный пик, соответствующий величине периода вращения звезды  $P = 1.655 \pm 0.045$  сут (погрешность оценена по полуширине пика). В [1] была приведена величина периода вращения TOI 1227 -  $1.65 \pm 0.04$  сут, совпадающая с полученной нами. Амплитуда переменности блеска составляет 14.8, 15.8, 15.2% от уровня среднего блеска звезды (для секторов 11, 12 и 38, соответственно). По стандартной методике нами были оценены величины параметра запятненности TOI 1227, которые достигают 7.4 - 7.6% от площади поверхности звезды. Принимая оценку радиуса звезды  $R = 0.56 \pm 0.03$  радиусов Солнца из [1], можно получить величину площади поверхности  $A$  звезды в абсолютной мере

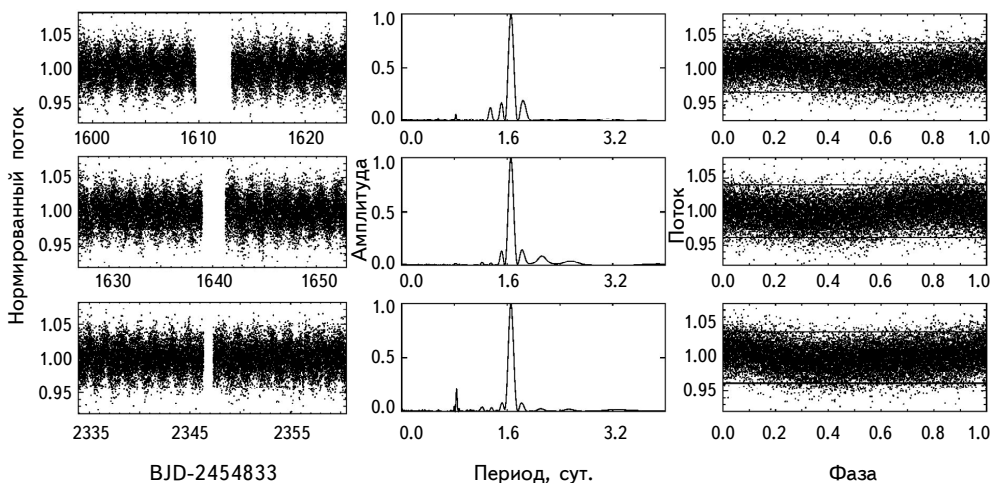


Рис.1. Слева - кривые блеска для TOI 1227, в центре - спектры мощности переменности блеска, справа - фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 11, 12 и 38.

(в миллионных долях видимой полусферы Солнца, мдп). На Солнце средние по размерам пятна имеют площадь 10 - 200 мдп (детали см. в [5]). Площадь пятен на поверхности TOI 1227 многократно превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и составляет величину порядка 14400 мдп, 15400 мдп и 14800 мдп (для секторов 11, 12 и 38, соответственно).

3. *Сопоставление с оценкой активности звезды с планетной системой K2-33.* На основе наблюдательного материала, полученного космическим телескопом Кеплер, в [4] нами были представлены результаты анализа активности двух других молодых звезд с планетными системами - EPIC 211901114 и K2-33. Звезда EPIC 205117205 (K2-33, 2MASS J16101473-1919095) входит в подгруппу Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen с возрастом около 11 млн лет. Основные сведения об этой звезде, собранные по литературным источникам, можно найти в [4]. Молодость звезды дает уникальную возможность изучения самых ранних стадий образования и эволюции планет и их атмосфер в условиях наибольшего воздействия со стороны молодой звезды (например, высокого уровня УФ излучения, вспышек и т.п.).

Для анализа активности звезды в [4] нами было отобрано в совокупности 3341 единичных измерений блеска K2-33. Наблюдения K2-33 длительностью порядка 70 суток были начаты в HJD 2452061.31. При рассмотрении кривых блеска нами были отмечены детали, которые были интерпретированы как вспышки. Блеск K2-33 в системе телескопа Кеплер составляет  $14^m.357$ . Масса и радиус звезды равны 0.56 масс Солнца и 1.05 радиусов Солнца. Для звезды

K2-33 были приняты значения эффективной температуры фотосферы и пятен - 3540 K и 3300 K, соответственно. В расчетах мы использовали данные сетки моделей PHOENIX. Установлен период вращения K2-33 -  $6.29 \pm 0.50$  суток. На рис.2 представлены кривые блеска K2-33 по наблюдениям миссии K2 (диаграмма представлена по образцу, аналогичному для TOI 1227, другие иллюстрации можно найти в [4]).

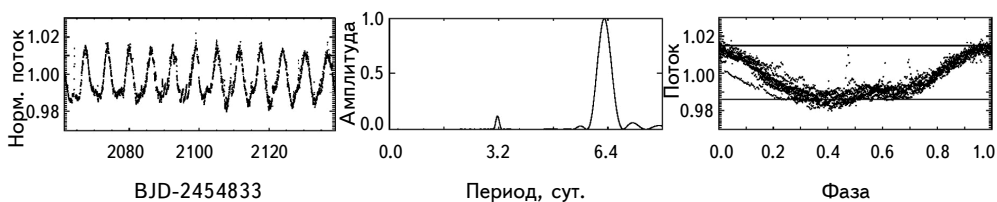


Рис.2. Слева - кривая блеска для K2-33, в центре - спектр мощности переменности блеска, справа - фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений с миссией K2.

В [4] приводятся карты температурных неоднородностей на поверхности K2-33. Для K2-33 получена оценка параметра дифференциального вращения  $\Delta\Omega = 0.0039 \pm (0.0020 - 0.0012)$  рад/сут. В случае K2-33 величина площади запятненной поверхности  $S$  в среднем составляла 4-5% от полной видимой поверхности звезды. В [4] было найдено, что положение K2-33 на диаграммах  $S$  - возраст,  $S$  - период вращения и  $S$  - числа Россби в целом соответствует общему характеру зависимостей, установленных нами ранее для M карликов [5].

В [4] также было проведено изучение вспышечной активности K2-33. В результате анализа для K2-33 нами было зарегистрировано 7 вспышек. Выполнены оценки частоты и амплитуд этих вспышек, а также времена их возгорания и угасания. Получены оценки энергии вспышек порядка  $1.6 \cdot 10^{32} \div 2.0 \cdot 10^{33}$  эрг.

По проявлениям активности рассматриваемые звезды K2-33 и TOI 1227 заметно различаются - доля поверхности, покрываемая пятнами для K2-33, составляет 4.7-5.1%, а для TOI 1227 - 7.4-7.6% от площади поверхности звезды. В абсолютной мере площади пятен равны 33000 мдп и 14600 мдп для K2-33 и TOI 1227, соответственно. То есть, доля поверхности, покрываемая пятнами, существенно выше у более холодной звезды TOI 1227, чем у K2-33, однако из-за различий в радиусах в абсолютной мере площадь пятен на поверхности выше у K2-33.

Наконец, имеется различие во вспышечной активности рассматриваемых звезд. В результате анализа для K2-33 нами было зарегистрировано 7 вспышек с энергией  $1.6 \cdot 10^{32} \div 2.0 \cdot 10^{33}$  эрг и частотой - примерно 1 вспышка за 8 сут, что соответствует также одной вспышке за 1.2 оборота. Для TOI 1227 за интервал наблюдений с космической миссией TESS общей длительностью около 90 сут вспышек не было зарегистрировано.

4. *Заключение.* На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности блеска TOI 1227 - молодой звезды - члена группа Musca с возрастом 11 млн лет [1]. Полученные результаты сопоставлены с данными о другой, изученной нами ранее, молодой звезде с экзопланетой - EPIC 205117205 (K2-33) из подгруппы Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen с возрастом 11 млн лет. TOI 1227 и K2-33 принадлежат к числу наиболее молодых из звезд с планетными системами, исследованных по данным миссии Кеплер и TESS.

По всем доступным наблюдениям мы выполнили оценку периода вращения звезды и амплитуды переменности блеска, а также по стандартной методике оценили величину параметра запятненности  $A$  в абсолютной мере. Площадь пятен на поверхности TOI 1227 составляет 14600 мдп и существенно превосходит площадь пятен на Солнце. Установлено что для TOI 1227 за интервал наблюдений в трех секторах с космической миссией TESS проявления вспышечной активности отсутствовали.

Согласно [1], на диаграмме радиус планеты - масса звезды TOI 1227 занимает ярко выделенное положение (см. рис.21 в [1]), вследствие существенно более высокого значения величины радиуса, по сравнению с другими маломассивными звездами с планетными системами. Для уточнения свойств TOI 1227b и достоверности ее обнаружения, требуются новые наблюдения и дальнейшие исследования. Например, первоначально (см. в [1]) звезда TOI 1227 была отнесена к скоплению  $\epsilon$  Cha с возрастом в 5 млн лет. В этом случае, радиус молодой звезды был бы больше, чем 0.56 радиусов Солнца [1], что в свою очередь привело бы к большему (по сравнению с указанным в [1]) радиусу планеты. Кроме того, желательны новые фотометрические наблюдения транзитов. В [1] отмечено, что транзиты имеют специфическую V - образную форму и большую глубину (см. рис.12 в [1]), при этом возможная принадлежность системы к затменным переменным в [1] отвергается.

Несомненно, обе изученные нами планетные системы TOI 1227 и K2-33 (уникальные вследствие своей молодости) требуют дальнейших наземных и космических наблюдений (которые в перспективе могут осуществиться с космической миссией Спектр-УФ). Предполагаемые исследования предоставят возможность изучения атмосфер планет, вероятно, находящихся в процессе образования и самого начала своей эволюции. Рассмотренные нами системы могут сыграть важную роль в нашем понимании эволюции планетарных систем в течение первой сотни миллионов лет после их образования.

Автор признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

ACTIVITY OF YOUNG STAR TOI 1227 WITH A  
PLANETARY SYSTEM FROM THE LOWER  
CENTAURUS CRUX OB ASSOCIATION (MUSCA)

I.S.SAVANOV

Using high-precision data from archive of the TESS space mission a study of the photometric variability of the brightness of TOI 1227, a young member of the Musca group with an age of 11 million years, was carried out. The obtained results are compared with data for another young star with an exoplanet that we studied earlier - EPIC 205117205 (K2-33) from the Upper Scorpius subgroup of the Sco-Cen association. TOI 1227 and K2-33 are among the youngest stars with planetary systems studied with the Kepler and TESS missions. Estimates of the rotational period of the star and the amplitude of the brightness variability were made from all available observations and the value of the spottedness parameter  $A$  was estimated using the standard method. The area of spots on the surface of TOI 1227 is 14600 MSH and significantly exceeds the area of spots on the Sun. It was found that for TOI 1227 there were no manifestations of flare activity during the observation interval in three sectors of the TESS space mission. In addition to its youth the TOI 1227 system is of particular interest due to the significantly larger radius of the planet found compared to other planets around low-mass stars. New observations and further research are required in order to clarify the properties of TOI 1227b and the reliability of its detection.

Keywords: *stars: activity: spots: photometry: variability: planetary systems*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *A.W.Mann, M.L.Wood, S.P.Schmidt et al.*, arXiv:2110.09531, 2021.
2. *I.S.Savanov*, *Astrophysics*, **64**, 178, 2021.
3. *A.C.Rizzuto, A.W.Mann, A.Vanderburg et al.*, *Astron. J.*, 154, **22**, 2017.
4. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko, S.Karmakar et al.*, *Astron. Rep.*, **62**, 532, 2018.
5. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Pevtsov*, *Astrophys. J.*, **906**, id. 27, 2021.