

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.3-371

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД С ПЛАНЕТАМИ В ЗОНЕ ОБИТАЕМОСТИ

И.С.САВАНОВ

Поступила 29 мая 2022

Принята к печати 8 августа 2022

На основе данных о звездах с планетами, находящимися в зоне обитаемости, выполнено изучение проявлений их активности. Для них по данным архива космического телескопа Кеплер были изучены кривые блеска, полученные в ходе наблюдений в сети Q3, и вычислены амплитуды переменности блеска с целью определить наличие и свойства пятен на их поверхности. Кроме того, получены величины периодов вращения объектов, которые носят оценочный характер. Рассмотрены диаграммы зависимости площади пятен A на поверхности звезд с экзопланетами по литературным данным (и в том числе, находящимися в зоне обитаемости), от эффективной температуры и периода вращения. Получены указания на то, что распределения звезд с экзопланетами, находящимися в зоне обитаемости, смещены в область меньших площадей пятен и периодов вращения, по сравнению с данными для всего массива звезд с экзопланетами. Проанализированы данные архива космического телескопа Кеплер для звезды с ярко выраженной вращательной модуляцией KOI-3497 (Kepler-1512, KIC 8424002). Отмечено, что скорее всего ее следует характеризовать как звезду спектрального класса K, а не M. KOI-3497 обладает вспышечной активностью (для нее зарегистрировано 47 вспышек с энергией E в диапазоне от $2 \cdot 10^{31}$ до $2 \cdot 10^{32}$ эрг).

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

1. *Введение.* Одна из основных научных программ космического телескопа Кеплер - определение числа и частоты встречаемости планет (в том числе земного типа), расположенных в зоне обитаемости (Habitable Zone, HZ). Как правило, под зоной обитаемости подразумевают область около звезды, в которой вода может находиться в жидком состоянии при соответствующем атмосферном давлении атмосферы планеты (см. подробнее, например в [1,2]). Параметр η частоты встречаемости планет земного типа, расположенных в зоне обитаемости, является предметом многочисленных исследований. В процессе определения η требуется работа со списками объектов, для которых имеются достаточно надежные определения параметров как звезды, обладающей планетной системой, так и параметров экзопланеты.

Авторы [2] представили обширный каталог объектов - кандидатов в планеты, расположенных в зоне обитаемости, на основе архивов наблюдений космического телескопа Кеплер (сети Q1-Q17). Используя консервативные

и оптимистичные оценки внешней и внутренней границ зоны обитаемости и данные о радиусах экзопланет, авторы [2] привели 4 списка объектов. Из них в нашем дальнейшем исследовании будет использоваться самый обширный (табл.4), для которого применялись оптимистичные оценки внешней и внутренней границ зоны обитаемости, ограничений на радиус экзопланеты не накладывалось.

Цель нашего исследования состоит в изучении проявлений активности звезд с планетами, находящимися в зоне обитаемости, на основе данных, доступных из архива миссии Кеплер.

2. *Звезды с планетными системами в зоне обитаемости.* Ранее в [3] по фотометрическим наблюдениям с космическим телескопом Кеплер для 737 звезд, обладающих планетными системами (экзопланетами), мы изучили зависимости величины параметра запятненности S их поверхности от эффективной температуры и от периода P их осевого вращения и не получили свидетельств того, что магнитная активность звезд с экзопланетами имеет ярко выраженные особенности, отличающие их от активности звезд более обширной выборки.

В [4] мы сопоставили параметры S и $T_{\text{эфф}}$, а также S и P , полученные по данным из [5,6], которые содержат необходимую для оценок параметра S информацию. Были переопределены величины S для звезд из [5] и найдены параметры запятненности для 67 звезд из [6]. Кроме того, принимая оценку радиуса звезд (согласно обновленным данным архива телескопа Кеплер archive.stsci.edu.k2), мы получили величины A площади пятен на поверхности звезд в абсолютной мере (в долях видимой полусферы Солнца, миллионных долях, м.д.п.). Если площадь большой группы пятен на Солнце может составлять 1-2 тысячи м.д.п., то площади пятен на поверхности звезд с экзопланетами существенно превосходят ее и, как правило, находятся в пределах от 8000 м.д.п. до 60000 м.д.п. (см. подробнее в [4]). Результаты, представленные в [4], указывают на хорошее согласие оценок характеристик пятен на поверхности звезд с экзопланетами, полученных по двум выборкам - в [5,6].

Данные о звездах с планетами, находящимися в зоне обитаемости, опубликованные авторами [2], позволили выполнить аналогичное изучение их активности. Для объектов, указанных в [2] в табл.4, по данным архива космического телескопа Кеплер мы рассмотрели их кривые блеска, полученные в ходе наблюдений в сети Q3 длительностью в 90 сут. Основная цель нашего анализа состояла в определении амплитуд переменности блеска, которая может характеризовать наличие и свойства пятен на их поверхности. Кроме того, нами были получены величины периодов вращения объектов из табл.4

[2], которые носят оценочный характер, поскольку нами рассматривался лишь один сет наблюдений Q3, а не максимально возможный набор данных для объекта. Анализ фотометрических данных был проведен с помощью модифицированной программы *Activity* [7]. Его результаты проиллюстрированы на диаграммах рис.1 для пяти объектов с наиболее выраженной вращательной модуляцией блеска. Кривые блеска объектов приведены на левой части рис.1. Обработка данных была аналогичной, выполненной нами ранее для карликов поздних спектральных классов.

Рассчитанные спектры мощности переменности блеска звезд (рис.1, средняя часть) указали на наличие пиков, соответствующих величинам периода вращения. Фазовые диаграммы переменности блеска представлены на правой части рис.1. Хорошо заметна переменность кривых блеска на временах, сопоставимых с периодами вращения звезд, что свидетельствует о быстрой эволюции пятен на их поверхности. Горизонтальные линии характеризуют

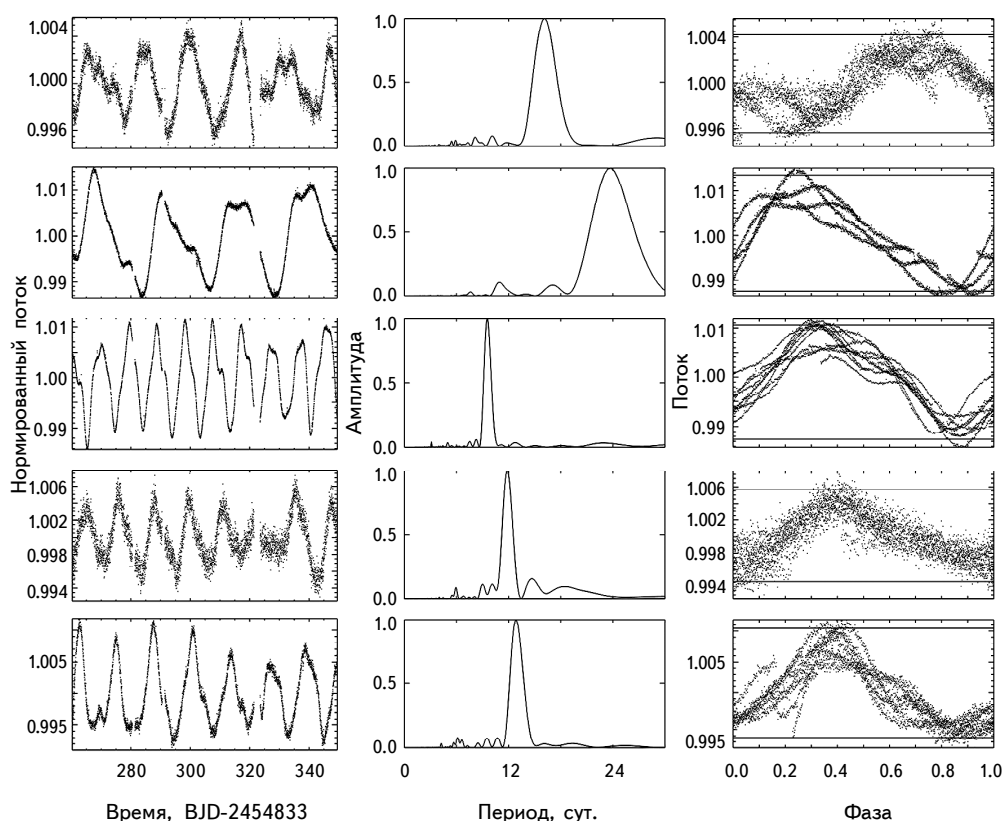


Рис.1. Слева - кривая блеска для пяти объектов из списка с хорошо выраженной вращательной модуляцией блеска, в центре - спектр мощности переменности блеска, справа - фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторе Q3.

величину R_{var} амплитуды переменности блеска объектов. Во многих случаях полная амплитуда переменности блеска достигает 2%, что несомненно является указанием на повышенную площадь пятен на поверхности. Используя упрощенную методику (см., например, [3]), на основе величин R_{var} и характеристик объектов из архива данных телескопа Кеплер можно получить значения параметра запятненности A . Следует отметить также, что амплитуда переменности блеска дает возможность получить только оценку площади пятен на поверхности звезды. Мы не располагаем сведениями о величине угла наклона оси вращения объекта к лучу зрения. Очевидно, что наличие полярных и равномерно распределенных по поверхности пятен не приводит к модуляции блеска и проч.

На рис.2 представлены диаграммы зависимости площади пятен A на поверхности звезд с экзопланетами (в том числе, находящимися в зоне

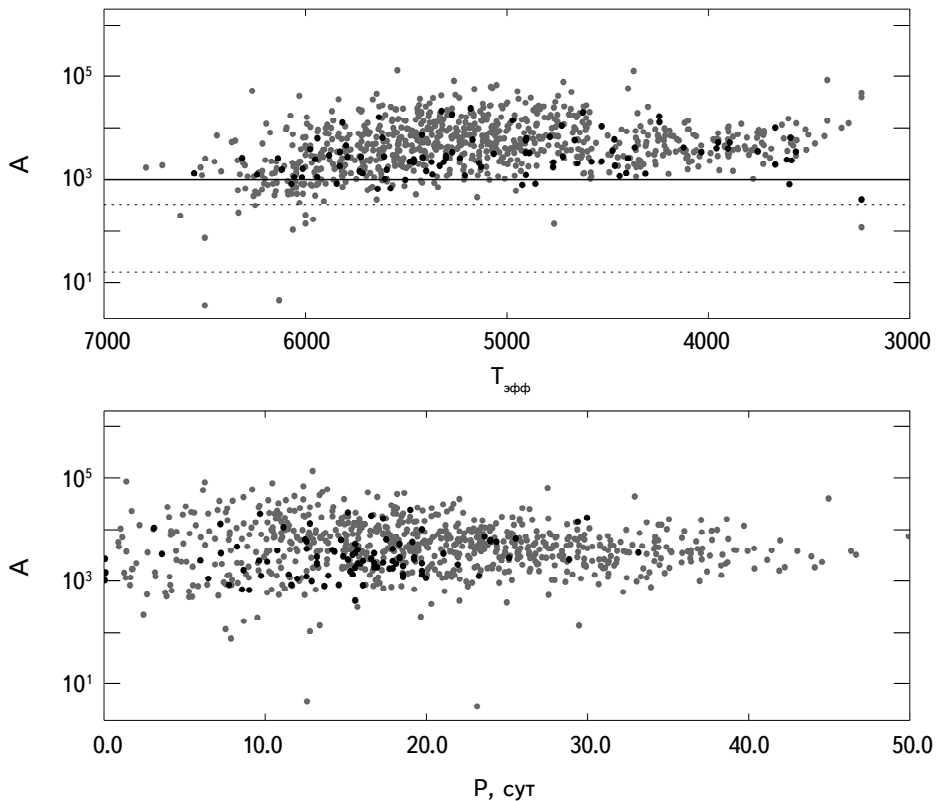


Рис.2. Зависимость площади пятен A на поверхности звезд с экзопланетами, выраженной в долях видимой полусферы Солнца (в миллионных долях, м.д.п.), от эффективной температуры (вверху) и периода вращения (внизу). Светлые кружки - данные из [5,6] темные точки - объекты из [2]. Штриховые линии соответствуют максимумам бимодального распределения параметра A для Солнца [8], а максимальное солнечное значение параметра A представлено сплошной линией.

обитаемости HZ), выраженной в долях видимой полусферы Солнца (миллионных долях, м.д.п.) от эффективной температуры и периода вращения. Штриховые линии соответствуют максимумам бимодального распределения параметра A для Солнца, а максимальное значение параметра A представлено сплошной линией (см. подробнее в [4,8]). Можно заключить, что различия между изменениями параметра A в зависимости от $T_{\text{эфф}}$ и P для звезд с экзопланетами, находящимися в HZ зоне, и звезд с планетными системами вне этой зоны, если и существуют, то они невелики. Вероятно, параметр A для первой группы объектов имеет меньшее значение, т.е. их активность несколько ниже. Более наглядно удалось провести сопоставление свойств двух выборок звезд с экзопланетами при рассмотрении гистограмм распределений их параметров - запятненности A и периодов P (рис.3).

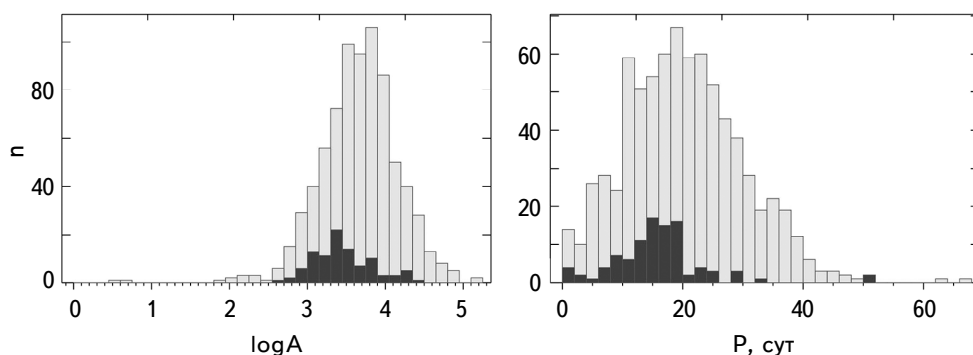


Рис.3. Гистограммы распределений параметров - запятненности A и периодов P для звезд с экзопланетами, находящимися в зоне обитаемости (темные столбцы), и звезд с планетными системами (светлые столбцы).

Согласно представленным диаграммам, распределения звезд с экзопланетами, находящимися в зоне обитаемости, перечисленные авторами [2], смещены в область меньших площадей пятен и периодов вращения, по сравнению с данными для всего массива звезд с экзопланетами.

По данным диаграммы на рис.3 (правая панель) большинство исследуемых нами объектов с экзопланетами, находящимися в HZ зоне, имеют величины периодов вращения в диапазоне 8-22 сут. Поскольку определения периодов вращений объектов носят оценочный характер и требуют уточнения, то мы в нашем исследовании не проводили определений возрастов объектов по гирохронологическим соотношениям. В идеальном случае следовало бы установить возраст объектов по отличающейся независимой методике, например, исходя из оценок хромосферной активности звезд [9].

3. Система KOI-3497. Среди объектов из [2] с ярко выраженной вращательной модуляцией наше внимание привлекла звезда KOI-3497 (Kepler-

1512, KIC 8424002). Кривая блеска этой звезды представлена на рис.1 (средняя панель). Согласно базе данных simbad.cds.unistra.fr, объект KOI-3497 является вращательной переменной и характеризуется, как звезда спектрального класса M3V. Это согласуется с тем, что в табл.4 в [2] приводятся параметры звезды $T_{\text{эфф}} = 3419 \pm 72$ К и $R = 0.34 \pm 0.06 R_{\odot}$ - соответствующие звезде класса M. Однако следует отметить, что практически во всех других литературных источниках (см. ссылки в simbad.cds.unistra.fr) для KOI-3497 приводятся параметры более горячей звезды спектрального класса K. В архиве exoplanets.org даны величины $T_{\text{эфф}} = 4372$ К и $R = 0.67 R_{\odot}$, а в архиве космического телескопа Кеплер для звезды указаны $T_{\text{эфф}} = 4623$ К и $R = 0.698 R_{\odot}$. В то же время в архиве (exo.mast.stsci.edu/exomast_planet) для KOI-3497 имеются ссылки на оба значения параметра $T_{\text{эфф}}$ - 4372 К и 3419 К. На рис.1, помимо кривой блеска объекта в течение наблюдений сета Q3 на космическом телескопе Кеплер, приводятся спектр мощности и фазовая кривая, построенная по данным наблюдений в этом сете. Согласно нашей оценке, период вращения звезды составляет 9.376 ± 0.010 сут. В обзорной работе по исследованию периодов вращения звезд поздних спектральных классов [10] данные для KOI-3497 отсутствуют. Также KOI-3497 не входит в число исследованных звезд авторами [11] каталога дифференциального вращения холодных звезд. Оценки величины P для KOI-3497 имеются в [12] (9.44 сут.) и в [13] (9.333 ± 0.03 сут), которые достаточно хорошо согласуются с нашим определением P . Отличительной особенностью кривой блеска звезды является наличие вспышек. В каталоге [12] содержатся данные о вспышечной активности KOI-3497. Всего представлены сведения о 47 вспышках с энергией E в диапазоне от $2 \cdot 10^{31}$ до $2 \cdot 10^{32}$ эрг, который близок к самым энергичным вспышкам на Солнце [14]. Наконец, отметим, что при параметрах атмосферы, принятых, например, согласно данным архива exoplanets.org, величина падающего на планету потока F_p будет существенно превосходить значение 0.87, приводимого в [2]. Мы планируем в будущем выполнить более подробное изучение этого интересного объекта.

4. **Заключение.** На основе данных о звездах с планетами, находящимися в зоне обитаемости, опубликованных авторами [2], выполнено изучение проявлений их активности. Для объектов, указанных в табл.4 в [2], по данным архива космического телескопа Кеплер были изучены их кривые блеска, полученные в ходе наблюдений в сете Q3, и определены амплитуды переменности блеска, которые могут характеризовать наличие и свойства пятен на их поверхности. Кроме того, нами были найдены величины периодов вращения объектов в табл.4 из [2], которые носят оценочный характер.

Рассмотрены диаграммы зависимости площади пятен A на поверхности

звезд с экзопланетами по данным [5,6] (и в том числе, находящимися в зоне обитаемости HZ по данным [2]), от эффективной температуры и периода вращения. Распределения звезд с экзопланетами, находящимися в зоне обитаемости, перечисленные авторами [2], смещены в область меньших площадей пятен и периодов вращения, по сравнению с данными для всего массива звезд с экзопланетами.

Проанализированы данные для звезды с ярко выраженной вращательной модуляцией KOI-3497 (Kepler-1512, KIC 8424002). В отличие от табл.4 в [2] (где указаны параметры звезды $T_{\text{эфф}} = 3419 \pm 72$ К и $R = 0.34 \pm 0.06 R_{\odot}$ - соответствующие звезде класса M) практически во всех других литературных источниках - архиве exo.mast.stsci.edu/exomast_planet и архиве космического телескопа Кеплер для KOI-3497 приводятся параметры более горячей звезды спектрального класса K. KOI-3497 обладает вспышечной активностью - в каталоге [12] представлены сведения о 47 вспышках с энергией E в диапазоне от $2 \cdot 10^{31}$ до $2 \cdot 10^{32}$ эрг.

Несомненно, изученные в [2] системы с планетами в зоне обитаемости открывают перспективы для первостепенных дальнейших исследований с помощью космических и наземных телескопов. Выполненные нами, а также последующие исследования активности родительских звезд предоставят возможность изучения ее влияния на атмосферы планет в HZ зоне.

Исследование выполнено в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение N 075-15-2019-1875)

Учреждение Российской академии наук Института астрономии РАН,
Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

ACTIVITY OF STARS WITH EXOPLANETS IN HABITABLE ZONE

I.S.SAVANOV

Based on data for stars with planets located in the habitable zone, we study their activity manifestations. Light curves obtained during observations in the Q3 set with the Kepler Space Telescope were studied and the amplitudes of the brightness variability were obtained in order to determine the presence and

properties of spots on their surface. In addition, the estimates for the rotation periods of objects were obtained. Diagrams of the dependence of the area of spots A on the surface of stars with exoplanets according to literature data (including those located in the habitable zone) on the effective temperature and rotation period are considered. Indications have been obtained that the distributions for stars with exoplanets located in the habitable zone are shifted to the region of smaller spot areas and rotation periods, compared with the data for the entire array of stars with exoplanets. The Kepler Space Telescope archive data for a star with pronounced rotational modulation KOI-3497 (Kepler-1512, KIC 8424002) are analyzed. It is noted that most likely it should be characterized as a star of spectral class K but not M. KOI-3497 has flare activity (47 flashes with energy E in the range from $2 \cdot 10^{31}$ to $2 \cdot 10^{32}$ erg were registered for it).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Kaltenegger*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **55**, 433, 2017.
2. *S.R.Kane, M.L.Hill, J.F.Kasting et al.*, Astrophys. J., **830**, 1, 2016.
3. *I.S.Savanov*, Astrophys. Bull., **70**, 83, 2015.
4. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, INASAN Sci. Rep., **5**, 272, 2020.
5. *A.McQuillan, T.Mazeh, S.Aigrain*, Astrophys. J. Lett., **775**, L11, 2013.
6. *A.W.Mayo, A.Vanderburg, D.W.Latham et al.*, Astron. J., **155**, 136, 2018.
7. *I.S.Savanov*, Astron. Rep., **62**, 814, 2018.
8. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Pevtsov*, Astrophys. J., **833**, 94, 2016.
9. *D.Lorenzo-Oliveira, F.C.Freitas, J.Meliendez et al.*, Astron. Astrophys. **619**, A73, 2018.
10. *A.McQuillan, S.Aigrain, T.Mazeh*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **432**, 1203, 2013.
11. *T.Reinhold, L.Gison*, Astron. Astrophys., **583**, A65, 2015.
12. *H.Yang, J.Liu*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **241**, 29, 2019.
13. *R.Angus, T.Morton, S.Aigrain et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **474**, 2094, 2018.
14. *K.Shibata, H.Isobe, A.Hillier et al.*, Publ. Astron. Soc. of Japan, **65**, 49, 2013.