

АКТИВНОСТЬ АНАЛОГОВ TRAPPIST-1

© 2022 г. Е. С. Дмитриенко^{1*}, И. С. Саванов²

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21.08.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Планетная система звезды TRAPPIST-1 обладает семью экзопланетами, три из которых находятся в зоне обитаемости. По литературным данным нами выполнен анализ свойств холодных карликов, которые могли бы рассматриваться в качестве аналога этого объекта. Используя имеющиеся в литературе данные (Сели и др., 2021) для ультрахолодных карликов, подобных TRAPPIST-1, мы определили величины параметра их запятненности S (доли поверхности, покрытой холодными пятнами) и площадей пятен в единицах долей площади поверхности Солнца. Получено, что в среднем TRAPPIST-1 вращается медленнее, чем большинство звезд из рассматриваемой выборки, а его запятненность выше, чем у них. Исследовано 7 объектов, для которых имеются достоверные сведения об их возрасте, вращении и пятенной активности. Найдено, что доля поверхности TRAPPIST-1, покрытая пятнами, превосходит аналогичные величины для других объектов, в том числе даже для более молодых звезд с возрастом 1–3 млрд лет. Выделены два объекта — TIC 302408306 и TIC 366567664 — с близкими характеристиками (возраст, вращение) к TRAPPIST-1. Их возраст оценивается в 9.0 и 7.9 млрд лет, соответственно. Эти звезды вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, а площадь поверхности, покрытая пятнами, у них несколько меньше, чем у TRAPPIST-1. Указанные объекты обладают более стабильными и более гладкими фазовыми кривыми с одним минимумом.

Ключевые слова: звездная активность, звездные пятна.

DOI: 10.31857/S0320010822110079

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку все больше и больше экзопланет обнаруживается вокруг холодных карликов спектрального класса M (самых распространенных объектов Галактики), изучение магнитной активности этих звезд и ее последствий для обитаемости планет приобретает первостепенное значение. Для обнаружения звездных вспышек и фотометрической переменности блеска, связанных с вращательной модуляцией и звездными пятнами, необходим непрерывный мониторинг, который наиболее оптимальным образом может быть достигнут с помощью космических обсерваторий, таких, например, как Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS).

К числу наиболее уникальных планетных систем около холодных карликов можно отнести следующие три (см. в Сели и др., 2021). Во-первых, это Проксима Центавра (M5.5 V) — ближайшая к Солнцу звезда, в обитаемой зоне которой находится планета с массой Земли. Другая система —

звезда Тигардена (2MASS J02530084 + 1652532, M7V), у которой обнаружены две планеты с массой Земли, являющиеся одними из планет с наименьшей массой, известными на момент открытия. Третий пример — TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285, M8V), который обладает семью транзитными экзопланетами, три из которых находятся в зоне обитаемости (Гиллон и др., 2016, 2017).

TRAPPIST-1 служит предметом многочисленных наземных и космических исследований (см. Сели и др., 2021; Гонзалес и др., 2019; Бургассер, Мамаджек, 2017; Вида и др., 2017; Дмитриенко, Саванов, 2018, и др., а также ссылки в них). Высокоточные фотометрические наблюдения проводились с космическими аппаратами Spitzer, Кеплер-K2, космическим телескопом им. Хаббла.

Обсуждение результатов определений основных параметров звезды TRAPPIST-1 можно найти в статьях Бургассер и Мамаджек (2017), Сели и др. (2021) и цитируемой в них литературе. Результаты детального анализа фотометрических наблюдений TRAPPIST-1 с космическим телескопом Кеплер

*Электронный адрес: issed@rambler.ru

Таблица 1

Gaia DR2 source ID	<i>S</i>	<i>A</i>	Gaia DR2 source ID	<i>S</i>	<i>A</i>
229155579195699456	0.009	206	3197623290976364544	0.037	875
1040681747033185152	0.021	510	3200303384927513088	0.006	145
1254110521784729856	0.059	1408	3475115115014143488	0.079	1874
1282632682337912832	0.014	325	3830128624846458880	0.018	440
1295931997030930432	0.029	682	4733265410022963200	0.093	2200
1303076623589331968	0.041	968	4967628688601250816	0.013	308
1412377317863375360	0.072	1698	4971892010576979968	0.007	162
1437716460972795392	0.060	1425	4989399774745144320	0.005	123
1454104436971779328	0.022	532	5809399363316630528	0.018	426
1618010323247026432	0.007	162	5856405272135504896	0.033	787
1656001233124961024	0.046	1082	5983189339421392896	0.101	2380
1821315795663331328	0.034	809	599891555546067072	0.016	391
1916411143300424704	0.052	1240	6135947032490329088	0.005	127
1998109946788787456	0.063	1504	6224387727748520960	0.007	162
2088442248714858240	0.074	1746	6525046188759705600	0.030	721
2137903951084527360	0.028	673	6783123184369906688	0.020	466
2177877452238558976	0.012	290	779689533779300736	0.028	655
2336406413104712192	0.024	580	847228998317017472	0.030	717
2349207644734247936	0.025	598	89186168428165632	0.032	752
2472387757755767296	0.025	598	901941452829250560	0.018	440
2883680659313632768	0.043	1029	977653372545774336	0.056	1324

Примечание. *S* приводится в долях площади видимой полусферы звезды, *A* — в м.д.п. (см. пояснения в тексте).

(его продолжением — миссией К2) были представлены нами в Дмитриенко и Саванов (2018). Вида и др. (2017) изучили вспышечную активность этого объекта, выделив и проанализировав 42 вспышки с энергиями в диапазоне $1.26 \times 10^{30} - 1.4 \times 10^{33}$ эрг, а также рассмотрели возможность влияния вспышек на атмосферы экзопланет.

Учитывая большой интерес, проявляемый к TRAPPIST-1, и его уникальность, по литературным данным нами был выполнен анализ свойств холодных карликов, которые могли бы рассматриваться в качестве аналога этого объекта.

АНАЛИЗ ХОЛОДНЫХ М КАРЛИКОВ, ПОДОБНЫХ TRAPPIST-1

Сели и др. (2021) представили результаты анализа ультрахолодных карликов, подобных TRAPPIST-1, используя данные полнокадровой фотометрии кадров TESS за первые два года. Была исследована выборка объектов в ограниченном объеме до 50 пк, состоящая из 339 звезд, фотометрические характеристики которых близки к характеристикам TRAPPIST-1 (на диаграммах цветовых показателей GAIA они расположены ближе, чем 0^{m5} к TRAPPIST-1). Были проанализированы 30-минутные кривые блеска 248 звезд в

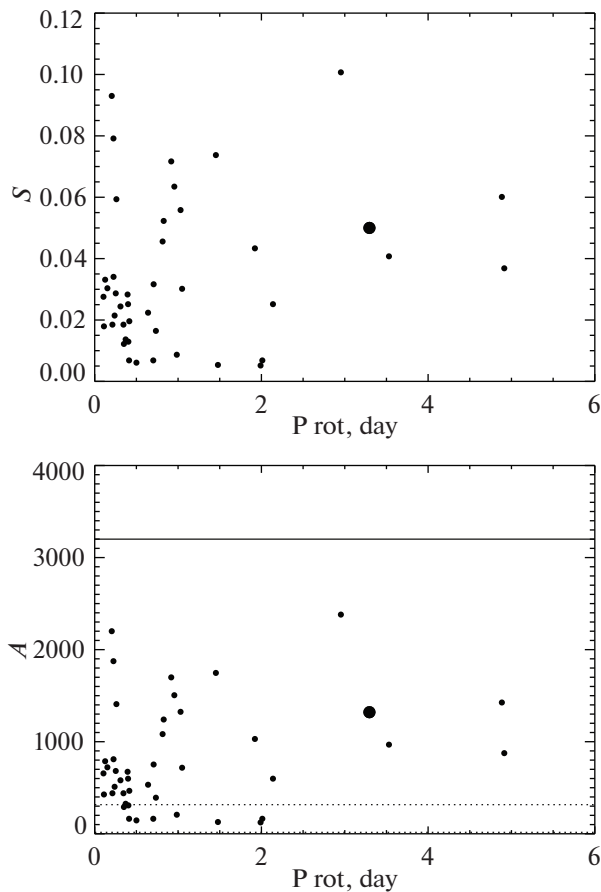


Рис. 1. Сопоставление величин параметра запятненности S (в относительной величине) (вверху) и A (в абсолютной мере, выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) (внизу) исследуемых объектов и периодов их вращения. Крупный кружок — данные для TRAPPIST-1. На нижней диаграмме штриховая линия соответствует максимумам бимодального распределения параметра A для Солнца, а максимальное солнечное значение параметра A представлено сплошной линией.

поисках вспышек и модуляции блеска, вызванной звездными пятнами. Суммарное распределение частоты вспышек (FFD) 94 идентифицированных вспышек показывает степенной закон с индексом, аналогичным найденному для TRAPPIST-1 (с учетом приведения в единую систему данных миссий Кеплер и TESS), и содержит вспышки до $E_{\text{TESS}} = 3 \times 10^{33}$ эрг. Для 42 звезд были определены периоды вращения менее пяти суток, что указывает на значительную долю быстрых ротаторов в выборке. Возраст 88 звезд из выборки был оценен с использованием нескольких подходов (кинематической информации).

Таблица A1 из Сели и др. (2021) содержит данные о величинах периодов и амплитуд переменности блеска 43 звезд-аналогов TRAPPIST-1. Используя информацию, необходимую для полу-

чения оценок параметра запятненности S (доли поверхности, покрытой холодными пятнами) — амплитуду переменности блеска объекта R_{var} и его эффективную температуру, по ранее примененной нами методике (см. Дмитриенко, Саванов, 2018; Саванов, 2015) было найдено 42 величины S (табл. 1). Как и в Сели и др. (2021), для всех исследуемых звезд была принята величина эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 2560$ К, используемой при исследовании TRAPPIST-1.

На верхней диаграмме рис. 1 представлено сопоставление величин параметра запятненности S (в относительной величине) и величин A площадей пятен (в абсолютной мере, выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) исследуемых звезд с величинами периода их вращения. Обе диаграммы позволяют сделать основные выводы, как об изменении активности звезд рассматриваемой выборки с изменением периодов вращения, так и о положении TRAPPIST-1 относительно звезд-аналогов.

Можно заключить, что большинство из объектов, отобранных Сели и др. (2021), вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, при этом площадь пятен на их поверхности сопоставима с величиной для TRAPPIST-1, или меньше. В среднем, TRAPPIST-1 вращается медленнее, чем большинство звезд из Сели и др. (2021), а его запятненность выше. Указанные выводы проиллюстрированы на рис. 2, на котором представлены гистограммы распределений величин периодов вращения и параметра запятненности S .

ВОЗРАСТ И ЗАПЯТНЕННОСТЬ

В принципе, такой результат можно ожидать, если большинство объектов из Сели и др. (2021) моложе, но с этим предположением плохо согласуется вывод о большей активности TRAPPIST-1. Объекты из Сели и др. (2021) были выбраны согласно их фотометрическим характеристикам, поэтому вполне естественно, что их возраст может различаться. Как указывалось, общепринятой оценкой возраста TRAPPIST-1 является 7.6 ± 2.2 млрд лет (Бургассер, Мамаджек, 2017). Первые оценки возраста объектов были получены Сели и др. (2021) по их кинематическим свойствам. Затем, привлекая данные обзора GAIA, была рассмотрена возможность определения возраста для объектов, входящих в широкие пары. Окончательные результаты представлены Сели и др. (2021) в табл. 2, диапазон изменения возраста объектов выборки составляет 0–13 млрд лет. Возраст объектов устанавливается с очень большой погрешностью,

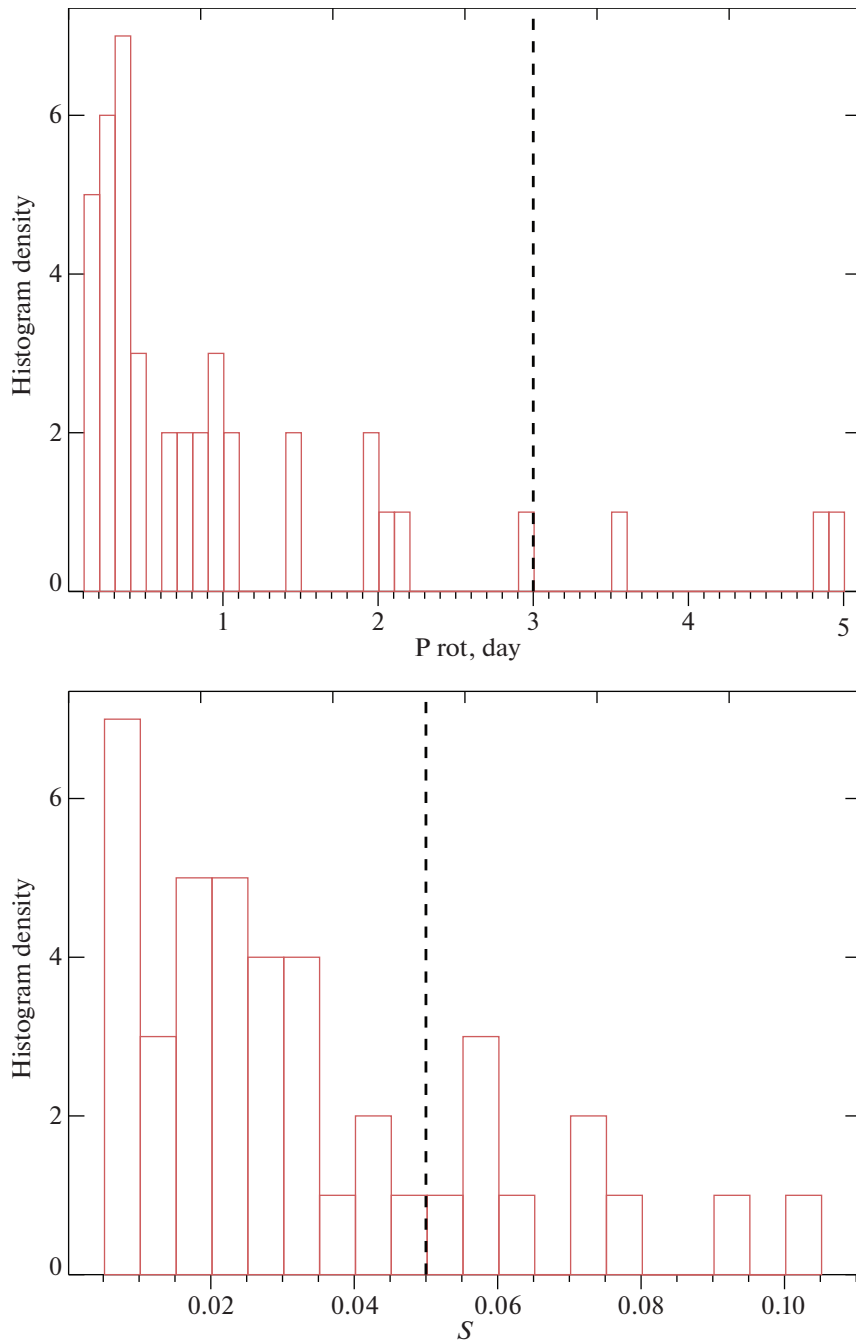


Рис. 2. Гистограммы распределений величин периодов вращения (вверху) и параметра запятненности S (в относительной величине) (внизу). Штриховые линии — данные для TRAPPIST-1.

так, например, при использовании кинематического метода погрешность определения составляет 2–3 млрд лет. В итоге было отобрано 19 пар объектов, но только для 9 из них имеются измерения лучевых скоростей. Наконец, не для всех звезд в Сели и др. (2021) приведены данные о периодах их вращения. Окончательно нами было выделено всего 7 объектов, для которых мы располагаем сведениями об их возрасте, вращении и пятенной

активности. На рис. 3 приведена диаграмма, на которой представлено сопоставление параметра S с возрастом объектов. Эти данные указывают на вероятное уменьшение параметра S с возрастом, подобно тому, как было отмечено нами ранее в Дмитриенко и Саванов (2017). При этом, как было указано выше, доля поверхности TRAPPIST-1, покрытая пятнами, превосходит величины S , полученные нами по данным Сели и др. (2021), в том

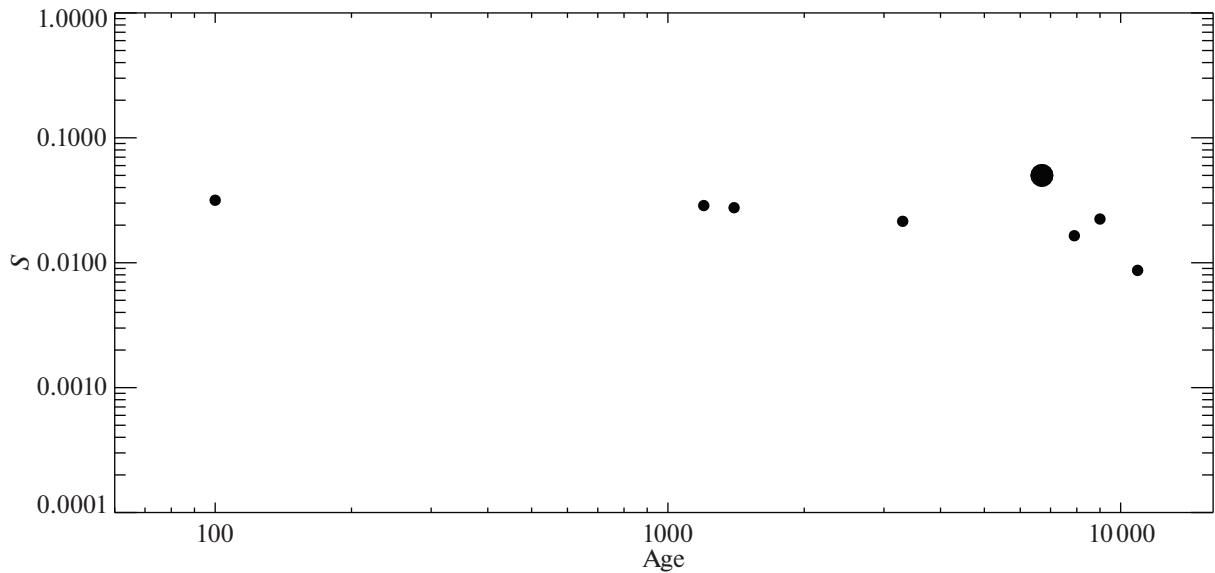


Рис. 3. Сопоставление параметра запятненности S с возрастом семи объектов, имеющих наиболее точные определения параметров (см. текст). Крупный кружок — данные для TRAPPIST-1. По оси абсцисс — возраст в млн лет.

числе для более молодых звезд с возрастом 1–3 млрд лет.

Согласно данным, представленным на рис. 3, наиболее близкими по своим характеристикам к TRAPPIST-1 (возраст, вращение) являются два объекта — TIC 302408306 и TIC 366567664. Их возраст, согласно Сели и др. (2021), составляет 9.0 ± 3.4 и 7.9 ± 3.3 млрд лет соответственно. Они вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, величины их периодов вращения равны 0.64 и 0.73 сут. Площадь поверхности, покрытая пятнами, у этих холодных карликов несколько меньше, чем у TRAPPIST-1, но рассматриваемые величины сопоставимы. У TRAPPIST-1 холодные пятна занимают примерно 5% от площади видимой поверхности звезды, а у TIC 302408306 и TIC 366567664 — 3.7 и 2.7% соответственно. На рис. А.1 в Сели и др. (2021) приведены кривые блеска для этих звезд. Можно отметить, что TIC 302408306 и TIC 366567664 обладают по сравнению с TRAPPIST-1 более стабильной и более выраженной вращательной модуляцией блеска (более гладкие фазовые кривые с одним минимумом). Для TRAPPIST-1 в Дмитриенко и Саванов (2018) было сделано заключение о быстрой переменности формы кривой блеска звезды — изменения происходили на характерных временах, сопоставимых с одним периодом вращения объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285) является холодным карликом спектрального класса M8, окруженным семью планетами. Этот объект

служит предметом многочисленных наблюдательных и теоретических исследований (число ссылок в базе данных SIMBAD более 700). Три из семи планет расположены в зоне обитаемости. Сели и др. (2021) представили результаты анализа ультрахолодных карликов, подобных TRAPPIST-1, используя архив космической миссии TESS. Для 42 звезд были определены периоды вращения менее 5 сут, что указывает на значительную долю быстрых ротаторов в выборке. Возраст 88 объектов из выборки был оценен с применением нескольких подходов, включая кинематический.

Используя имеющиеся данные для этих звезд, мы получили оценки параметра запятненности S (доли поверхности, покрытой холодными пятнами) и величины площадей пятен в единицах м.д.п. В результате мы пришли к заключению, что, в среднем, TRAPPIST-1 вращается медленнее, чем большинство звезд из Сели и др. (2021), а его запятненность выше. Нами было рассмотрено 7 объектов, для которых мы располагаем достоверными сведениями об их возрасте, вращении и пятенной активности. Сопоставление параметра S с возрастом объектов в целом указало на вероятное уменьшение параметра S с возрастом, при этом доля поверхности TRAPPIST-1, покрытая пятнами, превосходит аналогичные величины для других объектов, в том числе для более молодых звезд с возрастом 1–3 млрд лет.

Были выделены два объекта — TIC 302408306 и TIC 366567664 — с близкими характеристиками (возраст, вращение) к TRAPPIST-1. Их возраст, согласно Сели и др. (2021), равен 9.0 и 7.9 млрд лет (погрешность величин составляет около 3 млрд

лет) соответственно. Эти звезды вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, а площадь поверхности, покрытая пятнами, у них несколько меньше, чем у TRAPPIST-1, но рассматриваемые величины сопоставимы. Указанные объекты обладают по сравнению с TRAPPIST-1 более стабильными и более гладкими фазовыми кривыми с одним минимумом.

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

В настоящей работе использовались сведения из астрономической базы данных SIMBAD и архива космической миссии TESS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бургассер, Мамаджек (A.J. Burgasser and E.E. Mamajek), *Astrophys. J.* **845**, 110 (2017).
2. Вида и др. (K. Vida, Z. Kóvári, A. Pál, K. Oláh and L. Kriskovics), *Astrophys. J.* **841**, 124 (2017).
3. Гиллон и др. (M. Gillon, E. Jehin, S.M. Lederer, et al.), *Nature* **533**, 221 (2016).
4. Гиллон и др. (M. Gillon, A.H.M.J. Triaud, B.-O. Demory, et al.), *Nature* **542**, 456 (2017).
5. Гонзалес и др. (E.C. Gonzales, J.K. Faherty, J. Gagné, et al.), *Astrophys. J.* **886**, 131 (2019).
6. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), *Astron. Rep.* **61**, 122 (2017).
7. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), *Astron. Rep.* **62**, 412 (2018).
8. Наговицын, Певцов (Y.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **906**, 27 (2021).
9. Саванов (I.S. Savanov), *Astrophys. Bull.* **70**, 83 (2015).
10. Сели и др. (B. Seli, K. Vida, A. Moór, A. Pál, and K. Oláh), *Astron. Astrophys.* **650**, A138 (2021).