

О МЕДЛЕННОВРАЩАЮЩИХСЯ Ар ЗВЕЗДАХ. ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАМКАХ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ TESS

И.С.САВАНОВ

Поступила 22 октября 2019

Принята к печати 24 июня 2020

Рассмотрена возможность обнаружения кандидатов в медленновращающиеся магнитные Ар звезды с периодами от 2-3 десятков суток до нескольких сотен лет. Вопрос о доле объектов такого типа среди всех Ар звезд представляется важным с точки зрения понимания природы возникновения и эволюции магнитных звезд. Поиск таких объектов может быть выполнен на основе анализа их фотометрической переменности по результатам наблюдений в рамках космической миссии TESS. С этой целью первоначально планируется рассмотреть все объекты из соответствующих каталогов. Показано, как может быть применена предлагаемая методика на примере медленновращающейся Ар звезды HD 50169, для которой выполнен детальный анализ ее переменности и уже доступны наблюдения миссии TESS.

Ключевые слова: *звезды: фотометрия: магнитные звезды: переменность: вращение: магнитные поля*

1. *Введение.* Исследования последних лет привели к заключению, что периоды вращения P для значительной доли химически пекулярных магнитных Ар звезд могут превышать месяцы, в ряде случаев можно заподозрить, что они могут достигать величин в сотни лет. Например, в работе [1] в отдельную группу были выделены 33 Ар звезды с периодами более 30 дней, причем для 16 из них величина P превышала 1000 суток.

Другое, заслуживающее внимания обстоятельство заключено в том, что диапазон изменений величины P составляет не менее 5 порядков [2]. Если звезды, имеющие периоды вращения порядка суток (и менее), достаточно удобны для наблюдений и последующего анализа, то, очевидно, что получение кривой блеска для полного периода вращения самых медленновращающихся звезд представляет в ряде случаев еще не решенную задачу. Даже с учетом того, что измерения магнитных полей некоторых таких Ар звезд были начаты в середине прошлого века, данных, соответствующих полному периоду вращения, все еще не получено (мы можем располагать только оценками P). В качестве наиболее известного примера таких объектов можно указать химически пекулярную звезду γ Equ, которая в последние годы является предметом многочисленных исследований (см. подробнее [3] вместе с ссылками

на литературные источники). Она принадлежит к числу наиболее ярких Ар звезд ($V=4^m.66$) (спектральный класс A9p, подкласс SrCrEu) и относится к типу быстро-осциллирующих гоАр звезд. γ Eqr обладает сильным магнитным полем, величина продольной компоненты которого B_z медленно изменяется в пределах от 1000 Гс до -1600 Гс за последние 60 лет. γ Eqr принято считать прототипом звезд с экстремально длинным периодом вращения (по крайней мере величина P не менее 60 лет). Поляриметрические измерения [4] указали на величину периода вращения в 77 лет, которая сейчас может рассматриваться как его нижняя граница. Из анализа наших результатов и всех доступных литературных источников определений значений величины продольной компоненты магнитного поля B_z (441 измерение) в [3] нами был сделан вывод о существовании периода $P = 89.1 \pm 4.2$ года (32521 суток). При описании всего массива данных с помощью двух синусоид получены величины периодов, равные 95.5 и 17.4 года (с погрешностью около 3.5 и 2 года, соответственно). По нашей новой оценке переход к положительным значениям B_z вероятно произойдет позднее, чем считалось ранее, а именно - в 2031г.

Среди 33 звезд с периодами P более 30 суток только две не имеют в своих спектрах проявления наличия магнитного поля по расщеплению линий. В [2] отмечается, что поскольку изучение Ар звезд с большими периодами проводится, как правило, для объектов, у которых хорошо проявляется расщепление линий, возможны систематические ошибки в оценке числа таких медленновращающихся звезд. Обнаружение новых звезд с подобными свойствами является трудоемкой задачей, для которой, в первую очередь, необходимы критерии отбора соответствующих кандидатов.

2. Кандидаты в медленновращающиеся Ар звезды. К настоящему времени подавляющее большинство Ар звезд было идентифицировано путем анализа свойств их спектров и/или фотометрии (чаще всего $\Delta\alpha$ фотометрии [5]). Такой анализ позволяет также определить параметры атмосферы, тип пекулярности по присутствию характерных линий и результатам изучения содержаний элементов. Спектральные и спектрополяриметрические наблюдения дают возможность провести оценки магнитного поля (см., например, каталог [6] и ссылки в нем).

Дополнительные фотометрические наблюдения являются основой для определения или уточнения периода вращения Ар звезд. Как правило, амплитуды переменности блеска Ар звезд, вызванные вращательной модуляцией, невелики - они составляют не более нескольких десятых звездной величины. Лишь, сравнительно недавно, наблюдения с космическими телескопами CoRoT, Кеплер и миссией TESS, открыли новые возможности изучения переменности блеска Ар звезд. С помощью космических миссий стали доступны непрерывные

(в течение месяцев) высокоточные фотометрические наблюдения. Очевидно, что стало возможным открытие новых кандидатов в Ар звезды по изучению фотометрических данных из архивов космических телескопов. Анализ может быть применен для установления Ар звезд с периодами вращения до 30 суток, в этом случае могут быть получены высокоточные фотометрические кривые, изучена их морфология (в качестве примеров таких исследований можно указать [7,8]). Кроме того, мы предполагаем, что в случае отсутствия наблюдательной фотометрической переменности блеска у Ар звезд с недостаточно изученными свойствами, отсутствия оценок периода вращения, магнитного поля, а также недостаточной продолжительности ряда наблюдений для установления периода и т.д., среди них, благодаря нашей методике, могут быть выделены новые кандидаты в объекты с периодами вращения более 30 сут.

Основная цель работы космической миссии TESS [9] состоит в обнаружении и исследовании экзопланет. Кроме того, полученные TESS данные позволяют проводить широкий круг астрофизических исследований, в том числе изучение вращения и активности звезд различных спектральных классов. Подробный анализ фотометрической переменности Ар звезд и кандидатов в звезды данного типа (см. каталог [10]) может быть выполнен тогда, когда в ближайшем будущем будет завершен полный обзор всего неба космической миссией TESS. Однако уже сейчас мы можем рассмотреть, как может быть применена предлагаемая нами методика на примере медленновращающейся Ар звезды HD 50169, для которой выполнен детальный анализ переменности блеска [11] и уже доступны наблюдения миссии TESS.

HD 50169. HD 50169 (BD-81937, $B = 9^m.01$, $V = 8^m.98$) является звездой спектрального класса A3p SrCrEu типа [10]. Обсуждение ее свойств приводится в [11], там же можно найти все ссылки на результаты предшествующих исследований. Магнитное поле этой звезды было обнаружено Бебкоком [12] в 1958г. Престон [13] установил, что звезда обладает малым значением величины проекции скорости вращения на луч зрения и получил первые оценки модуля ее среднего магнитного поля - 5.6кГс. Компиляцию всех измерений магнитного поля звезды можно найти в статьях [1] и [11]. Первоначально автор [1] получил оценки периода вращения звезды, которые составили - от 7.5 до 40 лет.

Авторы [11] представили результаты определений периода вращения звезды. По их оценке он составил $P = 29.04 \pm 0.82$ лет. Ко времени выхода из печати статьи [11], HD 50169 являлась Ар звездой с максимальной длительностью периода вращения (29 лет), для которой были получены наблюдения продолжительностью более, чем один период.

3. Описание наблюдений HD 50169, их обработка и анализ.
В настоящей работе, как и в наших предыдущих исследованиях [14,15], для

HD 50169 мы использовали данные из архива космической миссии TESS (сектор 6), полученные с временным разрешением в 2 мин. Обработка данных была аналогичной проводимой нами ранее при анализе данных из архива космического телескопа Кеплер и миссии TESS (см., например, [16,17]).

На рис.1 (вверху) представлена кривая блеска HD 50169. Обращает на себя внимание отсутствие переменности блеска на временном интервале 1468 сут. - 1490 сут. (продолжительностью порядка 22 сут.), по нашей оценке амплитуда изменений интенсивности не превосходит 0.1%. При такой малой

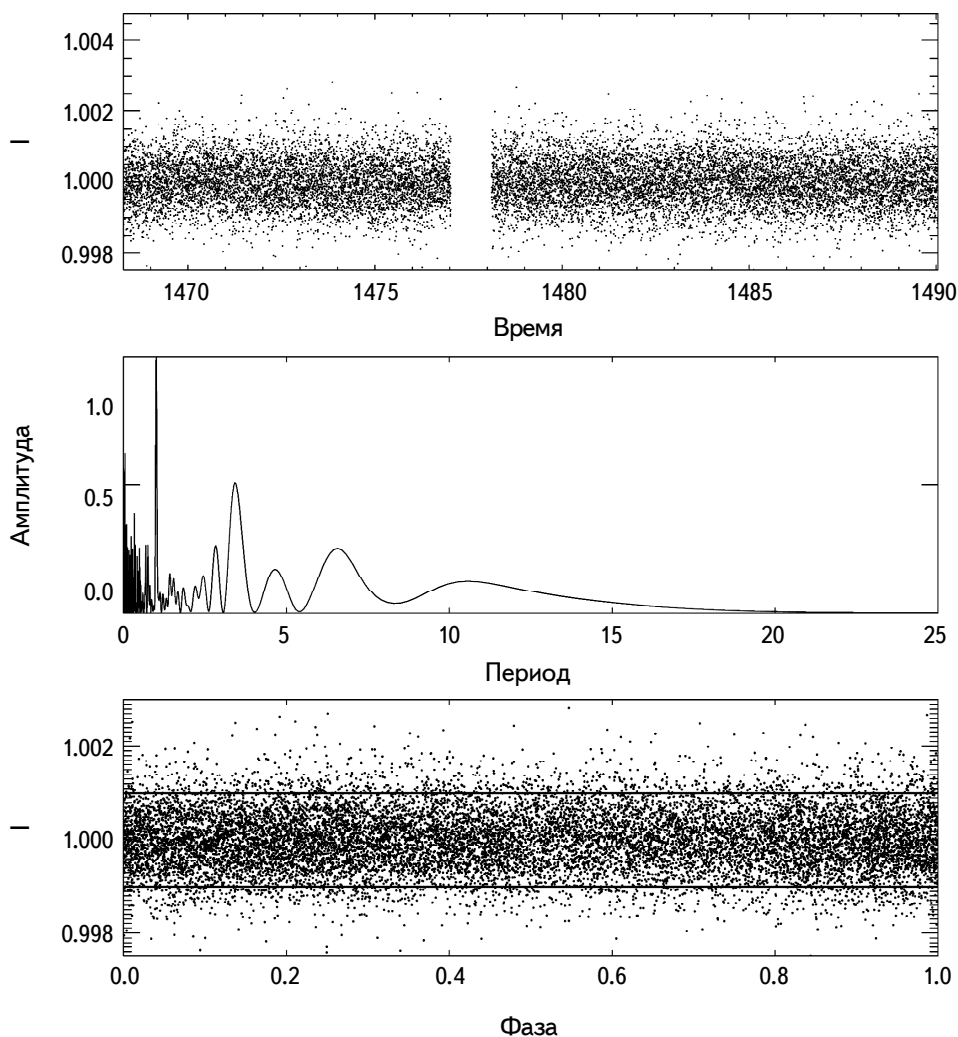


Рис.1. Вверху: кривая блеска HD 50169 по наблюдениям с космической миссией TESS. Середина: спектр мощности переменности блеска звезды. Внизу: кривая блеска звезды для периода в 3.42 сут.

амплитуде высокоточные наблюдательные данные телескопа TESS позволяют надежно судить об отсутствии периодичности изменений блеска (вызванных вращением звезды) на временах от единиц до 15-30 сут. Вопрос о коротко-периодических изменениях блеска (возможные пульсации, шкала переменности доли суток) требует дополнительного изучения по большему объему наблюдательного материала, вероятно, этой переменностью обусловлены изменения блеска, характеризуемые амплитудой в 0.1%. На построенном нами спектре мощности (рис.1, вторая сверху панель) имеются три пика: $P1 = 1.0039 \pm 0.0080$ сут. и два более широких пика меньшей амплитуды - $P2 = 3.42 \pm 0.60$ сут., $P3 = 6.6 \pm 1.2$ сут. Мы рассмотрели фазовые кривые, построенные для $P1 - P3$, и не смогли прийти к заключению о реальности найденных нами периодов - в качестве примера на нижней диаграмме рис.1 приведена кривая блеска для периода в 3.42 сут. По нашему мнению, периоды $P1 - P3$ являются артефактами и не меняют заключения об отсутствии периодических изменений блеска HD 50169 на интервалах времени, соответствующих наблюдениям с TESS. Согласно [11], период вращения HD 50169 составляет величину порядка 10600 сут. (29 лет), и вполне естественным является отсутствие периодической переменности блеска объекта в течение рассматриваемого интервала наблюдений в 22 сут.

Авторы [18] обратили внимание на то, что уже ранние архивы данных TESS могут быть использованы для поиска вращательной модуляции кривых блеска магнитных и немагнитных химически пекулярных звезд. Они представили результаты поиска пекулярных звезд спектрального класса A, которые показывают переменность их кривых блеска за счет вращательной модуляции на основе данных, полученных миссией TESS с 1 по 4 сектор. В результате поиска были установлены 134 вероятных переменных объекта. Примерно половина из них ранее была отождествлена как магнитные Ар звезды. Среди звезд полной выборки 60 объектов были установлены впервые. Сравнение подвыборок звезд, включающих магнитные Ар звезды и объекты, ранее не отнесенные к Ар звездам, выявило, что вторая из них статистически обладает более короткими периодами вращения и значительно меньшей амплитудой переменности блеска. Достоверность нашего вывода об отсутствии переменности блеска HD 50169 (см. выше) может быть подтверждена при сопоставлении диаграмм на рис.1 с графиками из [18] (рис.2), на которых представлены примеры фазовых кривых и спектров мощности для Ар звезд, у которых в [18] была установлена вращательная модуляция блеска.

На основе данных табл.1 из [18] мы построили график зависимости амплитуды переменности блеска ΔT 134 объектов от периодов их вращения (рис.2). Поскольку в [18] рассматривались только объекты, для которых были найдены периоды вращения, планируемое в будущем исследование по обна-

ружению кандидатов в долгопериодические Ар звезды будет дополнять данные [18] и должно не противоречить найденным в нем результатам (очевидно, что среди наших кандидатов объекты из [18] должны быть исключены). В качестве примера рассмотрим, как результаты нашего анализа фотометрической переменности долгопериодической Ар звезды HD 50169 могут быть сопостав-

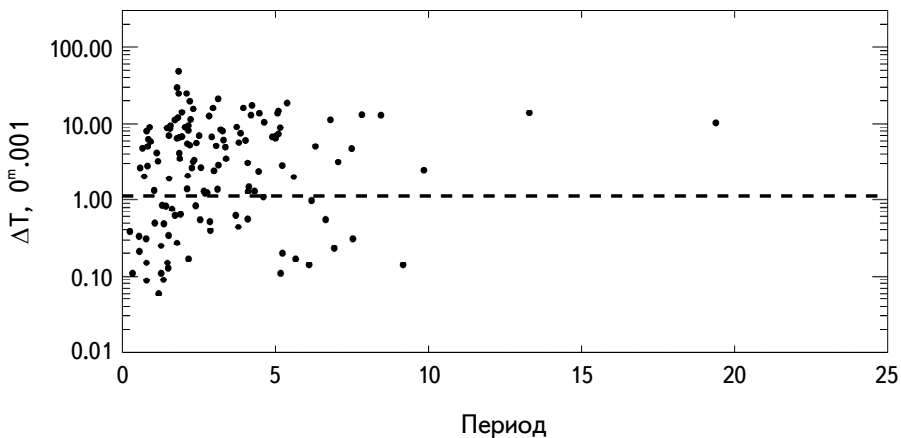


Рис.2. Сопоставление периодов вращения P и амплитуды фотометрической переменности ΔT для 134 звезд из [18]. Наша оценка параметра ΔT для Ар звезды HD 50169 представлена штриховой линией (см. текст).

лены с данными из [18]. Как было отмечено в [18], на рис.2 можно выделить две группы - условно их можно охарактеризовать, как объекты с параметром ΔT более $0^m.001$ и менее этой величины. Если бы мы не располагали точными данными о 29-летнем периоде переменности Ар звезды HD 50169, то по нашей оценке параметра ΔT для нее, которая составляет не более $0^m.001$ (она представлена на рис.2 штриховой линией), и по отсутствию периода изменений блеска с величиной, по крайней мере, до 22сут. мы несомненно отнесли бы этот объект к числу кандидатов в долгопериодические Ар звезды.

4. *Заключение.* Автором [2] проанализировано предположение о том, что среди долгопериодических Ар звезд должны быть объекты с периодами вращения вплоть до 2-3 сотен лет и, возможно, даже около тысячи лет и проводится обсуждение свойств этой подгруппы Ар звезд и ее связи с другими магнитными звездами. По мнению автора [2] и согласно приводимым им литературным источникам, нет оснований считать, что свойства долгопериодических Ар звезд значительно отличаются от свойств остальных магнитных звезд. Данное утверждение можно найти в статьях [19,20], вышедших в 70-х годах прошлого века, и оно не было опровергнуто последующими исследованиями Ар звезд. Не оспаривается применимость модели наклонного ротатора, а также

наличие обратно пропорциональной зависимости между величинами проекции экваториальной скорости вращения звезды и периодом вращения.

Автором [2] подробно рассматриваются возможные зависимости между периодами вращения Ар звезд и их магнитными характеристиками. К сожалению, к настоящему времени достоверность многих из них невысока, и для их изучения, несомненно, требуются дальнейшие исследования. Вот лишь некоторые из нерешенных вопросов: верно ли то, что наибольшие магнитные поля наблюдаются у звезд с периодами вращения менее 150 сут.? Есть ли различия в величинах угла между осью вращения и осью магнитного диполя для звезд с разными P и проч.?

Вопрос о доле медленновращающихся Ар звезд среди всех объектов этого типа представляется важным с точки зрения понимания природы возникновения и эволюции магнитных звезд. Для рассматриваемой подгруппы Ар звезд попытки найти объяснение долгопериодической переменности блеска, альтернативное вращению, не увенчались успехом. Как правило (см. [2]), предлагаются 2 механизма - прецессия и цикличность магнитной активности, в этой же статье рассмотрены аргументы, которые не позволяют считать эти механизмы действенными.

Нами предложены возможные пути и критерии поиска новых долгопериодических Ар звезд на основе анализа фотометрической переменности объектов этого типа по результатам наблюдений космической миссии TESS. Естественно, что основной критерий отбора базируется на отсутствии переменности блеска на временном интервале от суток до 20-30 сут., вызванной вращательной модуляцией. В наших исследованиях первоначально будут рассмотрены все объекты из каталога [6] с оценками величины магнитного поля. Объекты, для которых не будут установлены периоды P менее 20-30 сут., могут быть отнесены к кандидатам в долгопериодические Ар звезды. Отметим, что в качестве независимого результата наш анализ поможет подтвердить наличие переменности у звезд с P менее 30 сут. и уточнить величины периодов вращения. На последующих этапах кандидаты в долгопериодические Ар звезды будут устанавливаться на основе данных каталога [10]. Объекты, изменения блеска которых вызваны пульсационными колебаниями, будут исключены. Исследование будет выполнено, когда в ближайшем будущем космической миссией TESS будет завершен полный обзор всего неба.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект N 18-12-00423).

SLOW ROTATING AP STARS. PROSPECTS FOR THEIR OBSERVATIONS WITH THE TESS SPACE MISSION

I.S.SAVANOV

The possibility of detecting candidates of slow rotating magnetic Ap stars with periods from tens of days to several hundred years is considered. The question of the proportion of them among all Ap stars is important from the point of view of understanding the nature of the origin and evolution of magnetic stars. The search for such objects will be carried out based on the analysis of their photometric variability according to the results of observations by the TESS space mission. Initially, we plan to consider all objects from the corresponding catalogs. We demonstrated how proposed technique can be applied using the example of the slow rotating Ap star HD 50169 for which a detailed analysis of its variability has been performed and observations of the TESS mission are already available.

Keywords: *stars: photometry: magnetic stars: variability: rotation: magnetic fields*

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.Mathys*, Astron. Astrophys., **601**, A14, 2017.
2. *G.Mathys*, Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars, ASP Vol. 494, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 25-31 August 2014. Edited by Yu.Yu.Balega, I.I.Romanyuk and D.O.Kudryavtsev. San Francisco: Astron. Soc. Pacif., 2015, p.3.
3. *I.S.Savanov, I.I.Romanyuk, E.S.Dmitrienko*, Astrofiz. Bull., **73**, 463, 2018.
4. *J.L.Leroy, S.Bagnulo, M.Landolfi*, Astron. Astrophys., **284**, 174L, 1994.
5. *E.Paunzen, H.M.Maitzen*, Astron. Astrophys., **441**, 631, 2005.
6. *V.D.Bychkov, L.V.Bychkova, J.Madej*, in Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu.Yu.Balega, D.O.Kudryavtsev, I.I.Romanyuk and I.A.Yakunin. San Francisco: Astron. Soc. Pacif., 2017, p.233.
7. *M.S.Cunha, V.Antoci, D.L.Holdsworth et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **487**, 3523, 2019.
8. *A.David-Uraz, C.Neiner, J.Sikora et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **487**, 304, 2019.
9. *G.R.Ricker, J.N.Winn, R.Vanderspek et al.*, SPIE Conf. Ser., **9143**, 20, 2014.
10. *P.Renson, J.Manfroid*, Astron. Astrophys., **498**, 961, 2009.
11. *G.Mathys, I.I.Romanyuk, S.Hubrig et al.*, Astron. Astrophys., **624**, 32, 2019.

12. *H.W.Babcock*, *Astrophys. J. Suppl.*, **3**, 141 1958.
13. *G.W.Preston*, *Astrophys. J.*, **164**, 309, 1971.
14. *I.S.Savanov*, *Astrophysics*, **62**, 571, 2019.
15. *I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **62**, 814, 2019.
16. *I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **55**, 801, 2011.
17. *I.S.Savanov*, *E.S.Dmitrienko*, *Astron. Rep.*, **61**, 122, 2017.
18. *J.Sikora*, *A.David-Uraz*, *S.Chowdhury et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **487**, 4695, 2019.
19. *S.C.Wolff*, *Astrophys. J.*, **202**, 127, 1975.
20. *G.W.Preston*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **83**, 571, 1971.