

ПЯТЕННАЯ И ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ ОДИНОЧНОГО G5 III–IV ГИГАНТА HD 199178 ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ МИССИИ TESS

© 2024 г. И. С. Саванов^{1,*}, А. Н. Тарасенков², Е. С. Дмитриенко²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение Российской академии наук

Институт астрономии, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: isavanov@inasan.rssi.ru

Поступила в редакцию 10.08.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

Цель работы — исследование активности звезды типа FK Com быстровращающегося G5 III–IV гиганта HD 199178 (V1794 Cyg) на основе доступных фотометрических данных миссии TESS в пяти секторах наблюдений. Изучены кривые блеска звезды, характеризующиеся переменностью, вызванной вращательной модуляцией из-за присутствия холодных пятен на поверхности, спектры мощности и фазовые диаграммы. На спектре мощности по объединенным данным всех секторов наблюдений доминирующий пик соответствует фотометрическому периоду $P = 3.28^d \pm 0.12^d$. Высказано предположение об уменьшении величины P со временем (за интервал примерно в 40 лет) от 3.337^d до 3.28^d , которое может быть обусловлено долговременной эволюцией положений активных областей (пятен) на поверхности дифференциально вращающейся звезды. Выполнен анализ изменений амплитуды переменности блеска и формы фазовых кривых блеска HD 199178 и установлено, что доля поверхности звезды, занимаемая пятнами, менялась от 7 до 12% от площади ее поверхности. Изучена вспышечная активность звезды. Для двух вспышек определены их параметры — амплитуды, длительности, энергии. Одна из рассмотренных вспышек является наиболее сильной за интервал наблюдений звезды в пяти секторах (5.1×10^{35} эрг) и по величине может характеризовать верхний предел энергий вспышек в данном состоянии активности звезды. Построены карты поверхностных температурных неоднородностей звезды.

Ключевые слова: звезды, активность, моделирование, пятна, вращение, вспышки

DOI: 10.31857/S0004629924120023 **EDN:** IDEFWO

1. ВВЕДЕНИЕ

В нашей работе на основе фотометрических данных миссии TESS мы провели исследование активности звезды типа FK Com HD199178 (V1794 Cyg). К этому типу звезд достоверно причислены всего 3 объекта: FK Com, ET Dra и HD199178 (V1794 Cyg) [1].

Небольшая группа звезд этого типа включает в себя одиночные G–K гиганты, обладающие высокой активностью, быстрым вращением. Она названа по имени ее прототипа — звезды FK Com. Эволюционный статус звезд этой группы до конца не определен. Сам прототип группы (FK Com) является быстровращающимся G гигантом. Во многом его активность подобна активности звезд типа RS CVn (за исключением признаков двойственности), у него наблюдается сильная эмиссия в линиях Ca II H и K, H α . Фотометрическая переменность обу-

словлена вращательной модуляцией излучения звезды, обладающей холодными пятнами на поверхности. Детальное изучение фотометрической переменности FK Com привело к открытию явления переключения активных долгот (flip-flop phenomenon, флип-флоп) [2]. Основные сведения о FK Com и звездах этого типа можно найти, например, в сериях статей Jetsu, Korhonen и их соавторов, в наших публикациях (см. [2, 3, 4, 5]).

Заключение о принадлежности HD199178 (V1794 Cyg) к группе звезд типа FK Com было сделано в работе [6]. Звезда является быстровращающимся одиночным G5 III–IV гигантом, имеющим величину проекции скорости вращения на луч зрения $v \sin i \sim 80$ км/с. В одном из первых детальных исследований [4] было установлено значение периода вращения звезды $P = 3.337484^d$, а по изменениям амплитуды блеска были найдены долгопериодические

циклы активности звезды, длительностью 9.07 лет и 2.84 года.

Основные результаты исследований HD199178 приведены в статьях [4, 5, 7, 8, 9], в дальнейшем изложении данные о параметрах звезды приведены согласно этим литературным источникам. Масса звезды составляет $1.65M_{\odot}$, ее светимость — L_{\odot} . Радиус звезды равен $5R_{\odot}$, уточненное значение параметра $v \sin i = 72$ км/с, угол наклона оси вращения к лучу зрения 60° . При моделировании (см. ниже) мы использовали следующие параметры атмосферы: $T_{\text{eff}} = 5300$ К и $\log(g) = 3.5$. Объект отождествлен с источником Gaia EDR32162964329341318656, его параллакс составляет $\pi = 8.8912 \pm 0.0147$ mas.

Температурные поверхностные неоднородности HD199178 неоднократно исследовались методом доплеровского картирования [7]. Авторы [7] построили 41 поверхностных карт HD199178 для интервала 1994–2017 гг. По имеющимся данным об изменениях амплитуды переменности блеска, переключениях долгот наиболее активной области и др. было найдено, что долгопериодические циклы активности лежат в интервале от 2 до 9 лет.

По уникальному ряду фотометрических данных за период более ста лет для HD199178 [1] было сделано заключение о существовании долговременных циклов фотометрической переменности с величинами порядка 25–60 лет и проведено сопоставление с другими оценками циклов активности звезды. Наиболее достоверным было признано существование цикла величиной 8.7–9 лет.

2. ДАННЫЕ АРХИВА TESS ДЛЯ HD199178

Новое исследование активности HD199178 было проведено на основе фотометрических данных миссии TESS. Для обработки данных из архива миссии TESS были разработаны специализированные алгоритмы. Они были реализованы в виде библиотеки Lightkurve [10] на языке программирования Python. На первом этапе проводился запрос к базе данных наблюдений TESS, и для каждого сектора скачивался набор файлов, содержащих вырезанные из полных кадров квадратные области с центром вблизи координат исследуемого объекта. Кадры, не прошедшие автоматическую фильтрацию по качеству данных, отбрасывались. Для проведения фотометрии в каждом ряде наблюдений проводилось наложение апертур объекта и фона, которые генерировались автоматически по заданным критериям отбора (индивидуальным для каждого объекта и длительности экспозиции). Затем с помощью алгоритмов Lightkurve производился расчет кривых блеска

суммированием потоков во всех пикселях апертуры объекта и вычитанием потока фона с учётом соотношения количества пикселей апертур. Затем удалялись дефекты кривых блеска, обусловленные артефактами при считывании и бликами в оптике космического аппарата. После этого кривые блеска нормировались на средний поток и использовались для дальнейшей обработки.

Чтобы исключить возможное влияние звезд поля на результаты фотометрии, при обработке были исследованы все звезды, попадающие в апертуру изучаемого объекта. Было проанализировано фотометрическое поведение звезд поля при наложении на них однопиксельной апертуры. При сравнении кривых блеска исследуемой звезды и близких звезд поля было выяснено, что вспышки, наблюдаемые на кривой блеска, демонстрируются именно исследуемой звездой, и звезды поля не вносят существенных искажений в кривую блеска. Всего для HD199178 было извлечено 5 кривых блеска. Наблюдения охватывают промежуток времени длительностью 1783^d (4.9 лет) (август 2019 – февраль 2024), сектора 15, 55, 56, 75 и 76.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ HD199178

Кривые блеска звезды, характеризующиеся переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на ее поверхности, спектры мощности и фазовые диаграммы представлены на рис. 1. На спектрах мощности для каждого сектора наблюдений имеется доминирующий пик, соответствующий периоду $P = 3.28^d \pm 0.30^d$ (рис. 1), при этом на спектре мощности по объединенным данным всех секторов наблюдений доминирующий пик соответствует периоду $P = 3.28^d \pm 0.12^d$ (рис. 2). В каждом случае погрешность величины определена по полуширине пика.

Бопп и др. [11] установили, что фотометрический период переменности звезды равен 3.337^d . Согласно результатам работы [4], уточненное значение периода составляет $P = 3.337484^d \pm 0.000043^d$. Наконец, на основе литературных данных и собственных наблюдений авторы [8] высказали предположение о наличии среднего фотометрического периода для HD199178, равного $P = 3.330025^d$. Отметим, что авторами [8, рис. 7] было выбрано среднее значение среди набора пиков в диапазоне от 3.25^d до 3.36^d . В пределах ошибок измерений найденная нами величина P совпадает с приведенной в исследованиях, упо-

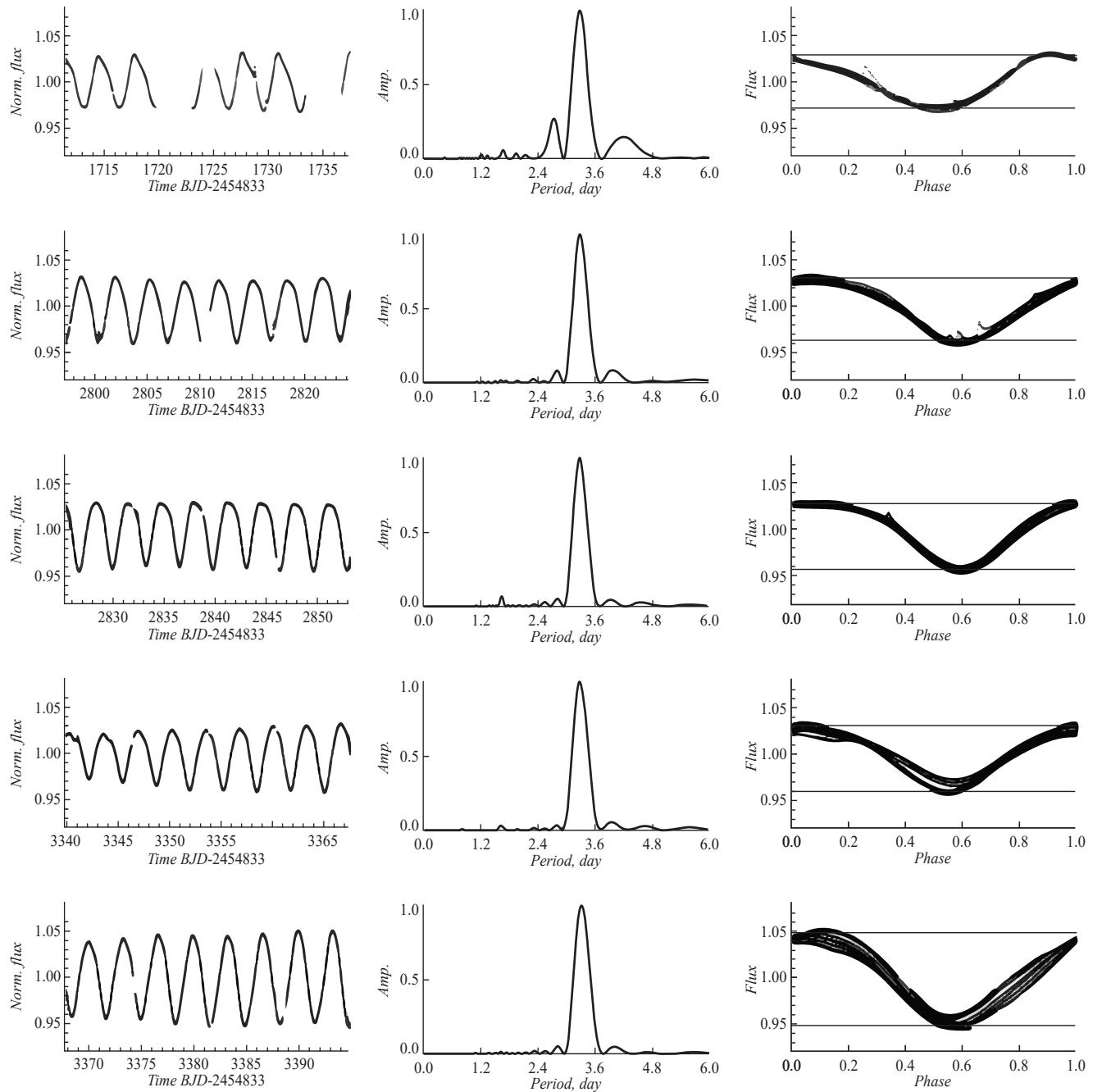


Рис. 1. Слева — кривые блеска для HD 199178, в центре — спектры мощности переменности блеска, справа — фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в 5 сетах.

мянных выше, но если принять во внимание хронологическую последовательность цитируемых источников, то можно высказать предположение об уменьшении величины P со временем (за интервал примерно в 40 лет) от 3.337^d до 3.28^d . Такое поведение величины фотометрического периода, в принципе, может быть обусловлено долговременной эволюцией положений активных

областей (пятен) на поверхности звезды, обладающей дифференциальным вращением (см. наше исследование [9] и результаты доплеровского картирования [7]).

К концу рассматриваемого промежутка наблюдений амплитуда переменности блеска звезды увеличивается (см. рис. 1, справа). Форма фазовых

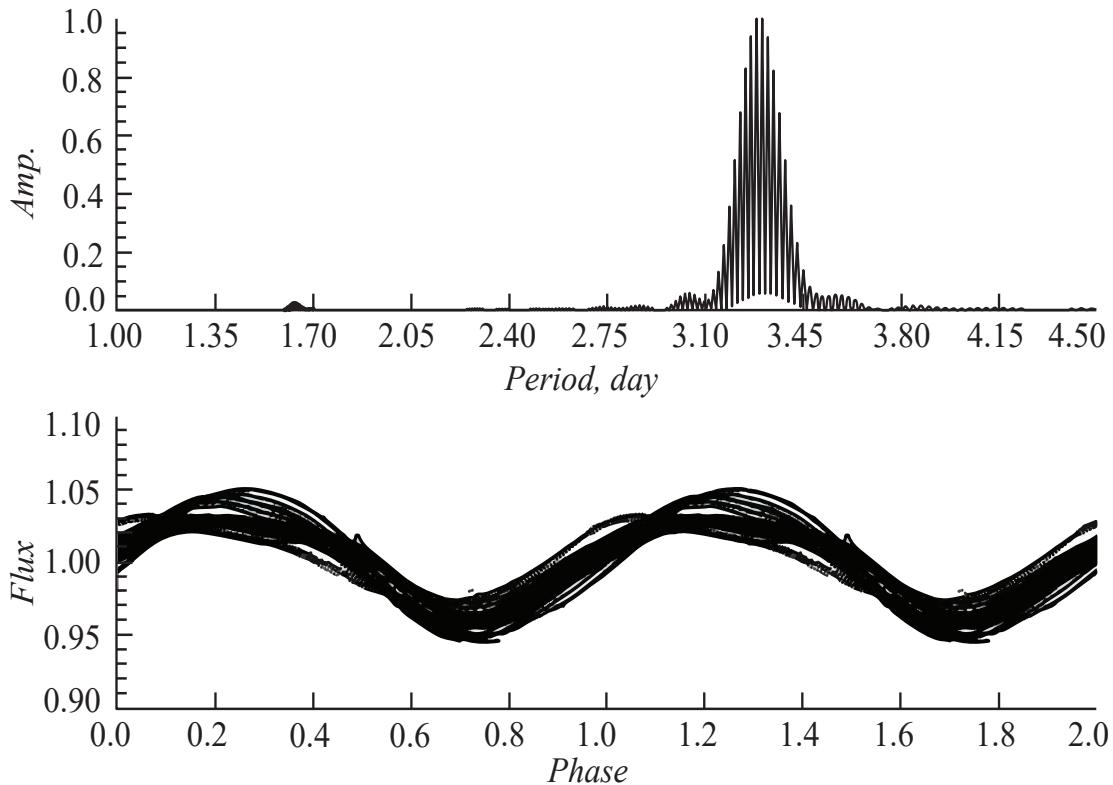


Рис. 2. Верхняя панель — спектр мощности переменности блеска HD 199178, нижняя — фазовая диаграмма.

кривых блеска HD199178, полученных по наблюдениям TESS в секторах 15, 55 и 56, практически не претерпевает изменений на интервале времени, сопоставимом с продолжительностью наблюдений в секторе. Для сектора 75 изменения формы фазовой кривой затрагивают данные в интервалах 0.0–0.2 (возможное положение второй, менее активной области) и 0.35–0.6 (основная область) (см. [9]). Фазовая кривая, построенная по данным сектора 76, претерпевает изменения в интервалах фаз 0.07–0.27 и 0.55–0.95.

Кроме того, мы выполнили анализ фотометрических данных с помощью модифицированной программы activity [12] с целью определения параметра запятненности. Площадь поверхности звезды, занимаемая пятнами, оценивалась в программе activity по методике, аналогичной, например, описанной в работе [13] (см. ур-я (1–8)). Используя применяемый нами ранее подход, мы установили, что доля поверхности HD199178, занимаемая пятнами, менялась от 7 до 12% площади ее поверхности, что сопоставимо с результатами определений параметра запятненности для звезды, найденного нами в работе [9, рис. 2]. Кроме того отметим, что

согласно данным [7] по результатам доплеровского картирования величина параметра запятненности звезды в 1994–2017 гг. лежала в интервале 6–15%.

4. ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Рассмотренные нами кривые блеска характеризуются вспышками разной амплитуды. В качестве примера на рис. 3 представлен участок кривой, содержащий две вспышки. Их форма имеет характерный для вспышек вид: резкий подъем и длительный период затухания. Анализ профилей вспышек затруднен тем, что они накладываются на переменность блеска звезды, вызванной вращательной модуляцией блеска.

Продолжительности первой и второй вспышек составляют около 0.354^d (510 мин.) и 0.146^d (210 мин.), а амплитуды – 1.0140 и 1.0057 от нормированного уровня блеска.

Общая энергия излучения в этих вспышках была вычислена нами по стандартной методике (см., напр., более подробное описание в работе [14, 15]). Измеренная нами относительная энергия вспышек RE составила 35.1 с и 6.3 с, соответственно. Энергия,

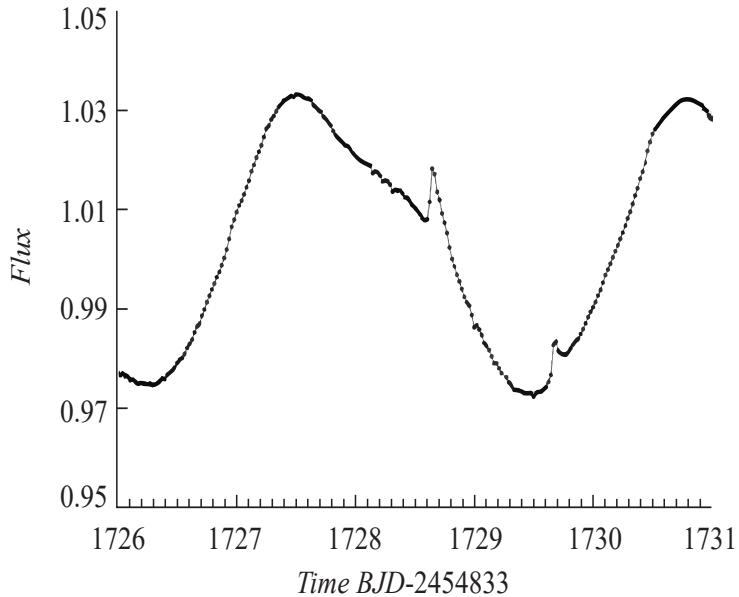


Рис. 3. Участок кривой блеска HD 199178 в интервале 1726.0 — 1731.0 сут. Шкала абсцисс соответствует формату TESS, BJD — 245 4833.

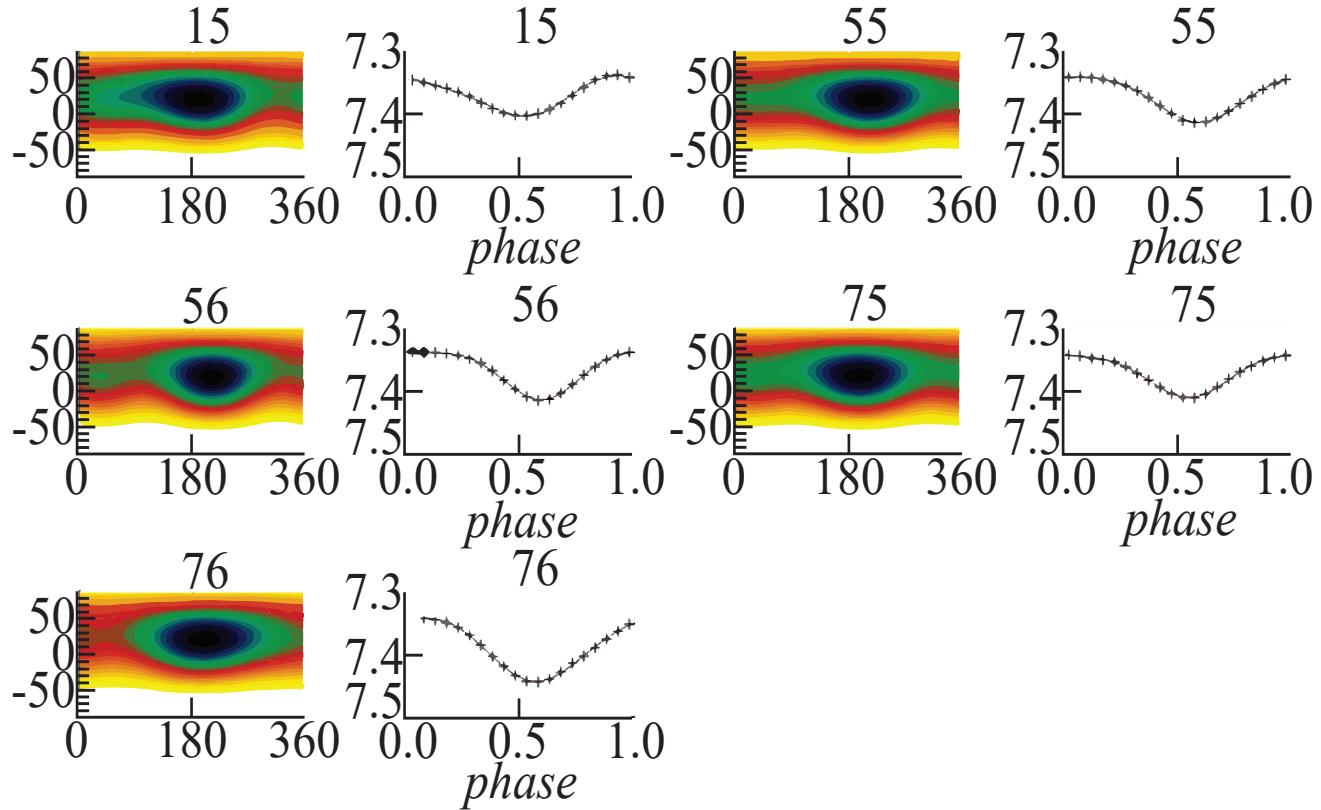


Рис. 4. Результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности HD 199178. Над картами и кривыми блеска указаны номера секторов.

излученная во вспышках, оказалась равной $E_{\text{TESS}} = 5.1 \times 10^{35}$ и 9.0×10^{34} эрг, соответственно.

Эти две вспышки не являются единственными на кривой блеска звезды, зарегистрированными по наблюдениям в 5 секторах TESS. Однако, по нашей оценке первая из рассмотренных вспышек оказалась наиболее сильной за интервал наблюдений звезды в пяти секторах и по величине может характеризовать верхний предел энергий вспышек в данном состоянии активности звезды.

5. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КАРТЫ

Методика восстановления карты поверхностных температурных неоднородностей была детально описана нами ранее в работе [16]. Дополнительные сведения о методике получения карт можно найти, например, в статье [17] и других наших публикациях. Кривые блеска для каждого сета были усреднены по 40 равноотстоящим фазам и проанализированы с помощью программы iPH [16]. Программа решает обратную задачу восстановления температурных неоднородностей звезды по кривой блеска в двухтемпературном приближении, при котором задаются температуры невозмущенной фотосферы и пятен. Построенные карты представлены на рис. 4. В наших новых вычислениях мы приняли, как и в статье [7], что температура фотосферы HD199178 составляет $T_{\text{eff}} = 5300$ К, а температура пятен ниже ее на 750 К. Для расчетов мы применяли данные из сетки моделей Куруца. Как указывалось выше, угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения близок к 60° . Блеск звезды, в предположении отсутствия пятен на ее поверхности, был принят равным $7.21''$. При моделировании поверхность звезды была разделена на элементарные площадки размером $6^\circ \times 6^\circ$. Факторы заполнения f были определены для каждой площадки. На рис. 4 также приведены наблюдаемые и теоретические (построенные по восстановленной модели) кривые блеска.

Возможно, некоторые из кривых блеска, как и распределения факторов заполнения на температурных картах, обладают несимметричной формой, указывающей на наличие второй области (холодного пятна), которая пространственно не разрешается.

6. ВЫВОДЫ

Цель нашей работы состояла в исследовании активности звезды типа FK Com HD199178 (V1794 Cyg) на основе доступных фотометрических данных миссии TESS в пяти секторах наблюдений. Были изучены кривые блеска звезды, характери-

зующиеся переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на поверхности, спектры мощности и фазовые диаграммы. На спектре мощности по объединенным данным всех секторов наблюдений доминирующий пик соответствует фотометрическому периоду $P = 3.28^d \pm 0.12^d$. Высказано предположение об уменьшении величины P со временем (за интервал примерно в 40 лет) от 3.337^d до 3.28^d . Такое поведение величины фотометрического периода может быть обусловлено долговременной эволюцией положений активных областей (пятен) на поверхности звезды, обладающей дифференциальным вращением. Выполнен анализ изменений амплитуды переменности блеска и формы фазовых кривых блеска HD199178. Установлено, что доля поверхности звезды, занимаемая пятнами, менялась от 7 до 12% площади ее поверхности, что сопоставимо с результатами предыдущих определений параметра запятненности. Выполнен анализ вспышечной активности звезды. Для двух вспышек определены их параметры: амплитуды, длительности, энергии. Одна из рассмотренных вспышек является наиболее сильной за интервал наблюдений звезды в пяти секторах (5.1×10^{35} эрг) и по величине может характеризовать верхний предел энергий вспышек в данном состоянии активности звезды. Построены карты поверхностных температурных неоднородностей звезды. Кривые блеска для каждого сектора наблюдений были усреднены по 40 равноотстоящим фазам и проанализированы с помощью программы, решающей обратную задачу восстановления температурных неоднородностей звезды по кривой блеска в двухтемпературном приближении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I.S. Savanov, A.N. Tarasenkov, N.N. Samus, and E.S. Dmitrienko, Astron. Rep. 67(10), 991 (2023).
2. L. Jetsu, J. Pelt, and I. Tuominen, Astron. and Astrophys. 278, 449 (1993).
3. V.B. Puzin, I.S. Savanov, E.S. Dmitrienko, I.I. Romanyuk, E.A. Semenko, I.A. Yakunin, and A.Yu. Burdanov, Astrophys. Bull. 71(2), 189 (2016).
4. L. Jetsu, J. Huovelin, I. Tuominen, O. Vilhu, B.W. Bopp, and V. Piironen, Astron. and Astrophys. 236, 423 (1990).
5. L. Jetsu, I. Tuominen, B.W. Bopp, O.V. Ezhkova, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 139, 513 (1999).
6. B.W. Bopp and R.E. Stencel, 247, L131 (1981).
7. T. Hackman, I. Iljin, J.J. Lehtinen, O. Kochukhov, M.J.

- Käpylä, N. Piskunov, and T. Willamo*, Astron. and Astrophys. 625, id. A79 (2019).
8. *K. Panov and D. Dimitrov*, Astron. and Astrophys. 467(1), 229 (2007).
 9. *I.S. Savanov*, Astron. Rep. 53(11), 1032 (2009).
 10. *J.V. de Miranda Cardoso, C. Hedges, M. Gully-Santiago, N. Saunders, et al.*, Astrophysics Source Code Library, ascl:1812.013 (2018).
 11. *B.W. Bopp, J.L. Africano, R.E. Stencel, P.V. Noah, and A. Klimke*, 275, 691 (1983).
 12. *I.S. Savanov*, Astron. Rep. 62(11), 814 (2018).
 13. *S. Aigrain, F. Pont, and S. Zucker*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 419(4), 3147 (2012).
 14. *I.S. Savanov, S.A. Naroenkov, M.A. Nalivkin, J.C. Pandey, and S. Karmakar*, Astron. Letters 45(9), 602 (2019).
 15. *M.N. Günther, Z. Zhan, S. Seager, P.B. Rimmer, et al.*, Astron. J. 159(2), id. 60 (2020).
 16. *I.S. Savanov and K.G. Strassmeier*, Astron. Nachricht. 329(4), 364 (2008).
 17. *K.G. Strassmeier, R. Briguglio, T. Granzer, G. Tosti, et al.*, Astron. and Astrophys. 490(1), 287 (2008).

SPOT AND FLARE ACTIVITY OF SINGLE G5 III IV GIANT HD 199178 FROM TESS OBSERVATIONS

I. S. Savanov¹, A. N. Tarasenkov², E. S. Dmitrienko²

¹*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

E-mail: isavanov@inasan.rssi.ru

The aim of our work is to study the activity of the FK Com type star rapidly rotating G5 III IV giant HD 199178 (V1794 Cyg) on the base of available photometric data from TESS mission in five sectors. The light curves of the star characterized the variability caused by rotational modulation due to the presence of cool spots on the surface, power spectra and phase diagrams are studied. The dominant peak corresponds to the photometric period $P = 3.28^d \pm 0.12^d$. It is suggested that the value of P decreases over time (over an interval of about 40 years) from 3.337^d up to 3.28^d may be due to the long-term evolution of the positions of the active areas (spots) on the surface of a differentially rotating star. The changes in the amplitude of the brightness variability and the shape of the phase curves of HD 199178 were analyzed and it was found that the fraction of the star's surface occupied by spots varied from 7 to 12% of its surface area. The flare activity of the star has been studied. The parameters of the amplitude, duration and energy of the flares are determined for two of them. One of the considered flares is the strongest during the observations in five sectors (5.1×10^{35} erg) and in magnitude can characterize the upper limit of the flare energies in a given state of star activity. Maps of the surface temperature inhomogeneities of the star are constructed.

Keywords: stars, activity, modeling, spots, rotation, flares