

УДК 524.3-17+524.3-56

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ АКТИВНОСТИ К8V-КАРЛИКА FR CNC

© 2024 И. С. Саванов<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 2 января 2024 года; после доработки 6 марта 2024 года; принята к публикации 7 марта 2024 года

По данным архива космического телескопа TESS и другим литературным источникам представлены результаты изучения проявлений активности К8V-карлика FR CNC. В архиве миссии TESS содержатся результаты наблюдений FR CNC в трех секторах — 44, 45 и 46, общей длительностью 78.3 суток. Кривые блеска звезды характеризуются переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на поверхности. По объединенным данным трех секторов наблюдений выполнена оценка величины периода вращения звезды  $P_{\text{rot}} = 0.8257$  суток. Отмечены особенности изменений амплитуды переменности блеска звезды, формы фазовой кривой блеска, положения минимумов. Доля поверхности FR CNC, занимаемая пятнами, менялась в диапазоне 8.7–11.4% от видимой площади поверхности звезды. Кривые блеска FR CNC характеризуются большим количеством вспышек разной амплитуды. В качестве примера рассмотрена одна из вспышек, по выполненной оценке ее энергия составляет  $E_{\text{TESS}} = 1.9 \times 10^{34}$  эрг. Для определения долговременных циклов активности звезды FR CNC использованы данные проекта Digital Access to a Sky Century @ Harvard (DASCH) для интервала наблюдений 1886–1989 гг. длительностью в 103 года в фотографической системе, близкой к фотометрической в фильтре *B*. Независимая оценка величины  $P_{\text{cycl}}$  выполнена по данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) в фильтре *V*. Анализ данных этих обзоров указал на долговременную переменность блеска FR CNC с характерным временем порядка 4500–4600 суток (12.3–12.6 лет).

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: активность — звезды: маломассивные*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Активность звезды FR CNC (1ES 0829+15.9, BD +16° 1753, 1RSX J083230.9+154940, HIP 41889) была впервые установлена при ее отождествлении с источником мягкого рентгеновского излучения 1ES 0829+15.9. Яркость объекта составляет  $V = 10^{\text{m}25}$ , спектральный класс К8V. Более подробно о свойствах звезды см. в работах Golovin et al. (2012), Kozhevnikova et al. (2018) и Savanov et al. (2019). Отношение рентгеновской и болометрической светимостей составляет  $L_X/L_{\text{bol}} > 10^{-3.3}$ , что указывает на высокую корональную активность объекта (Pandey et al., 2021). Период вращения звезды составляет около 0.827 суток, фотометрическая кривая блеска существенно меняет свою форму и по фазе, и по амплитуде, что свидетельствует об эволюции пятен на поверхности звезды. В спектре FR CNC наблюдаются сильные и переменные линии водорода и ионизованного кальция. Параллакс звезды по данным архива Gaia DR3 (источник 657903507014610048) составляет  $\pi = 28.2309 \pm 0.0168$  mas, что соответствует расстоянию в 35.4 пк до объекта.

\*E-mail: isavanov@inasan.ru

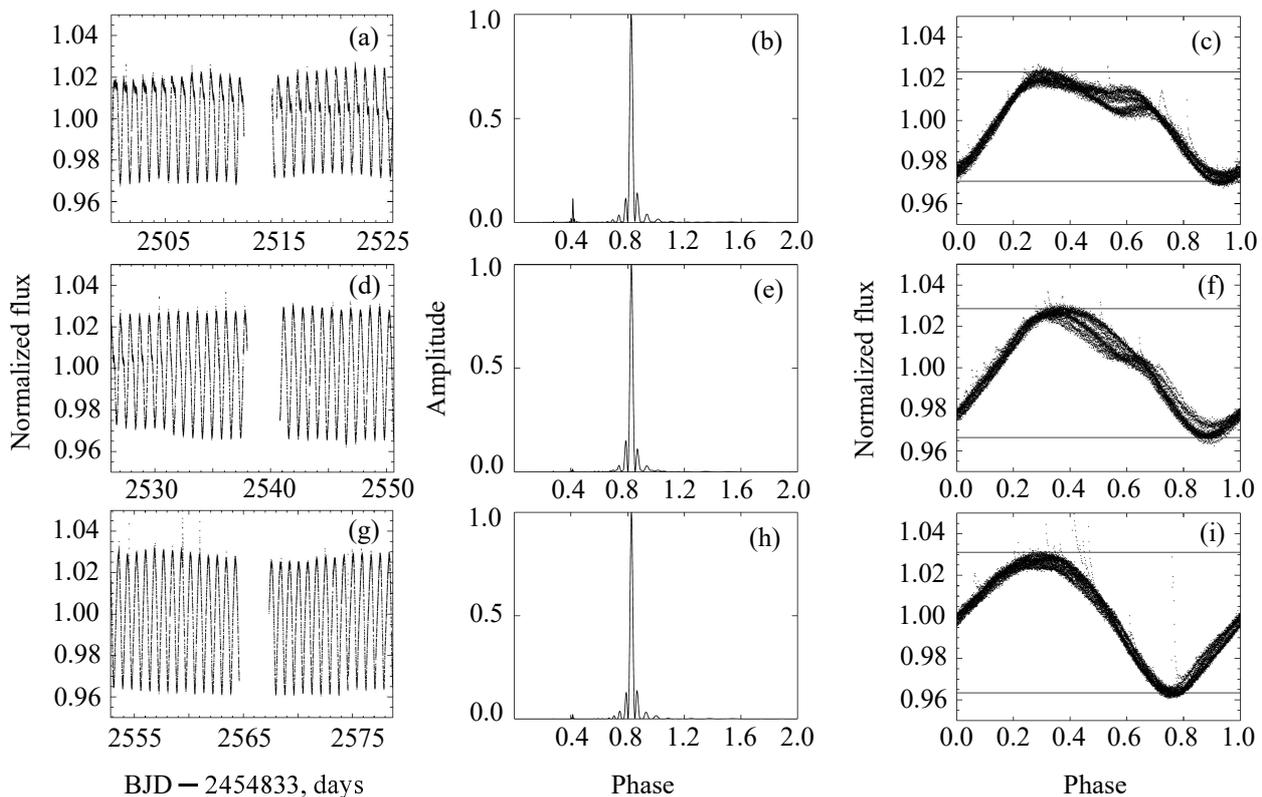
Кинематические свойства указывают на то, что FR CNC является молодой звездой (35–55 млн лет) главной последовательности, возможным членом сверхскопления IC 2391. Наблюдательных указаний на двойственность объекта не найдено.

Цель нашего исследования состоит в изучении проявлений активности звезды FR CNC по данным архива космического телескопа TESS и другим литературным источникам.

## 2. ВРАЩЕНИЕ И АКТИВНОСТЬ FR CNC

Основные данные о FR CNC (TIC 20496343) приводятся в цитируемых выше литературных источниках. Объект достаточно яркий, его блеск составляет:  $\text{TESS-mag} = 8^{\text{m}9988} \pm 0^{\text{m}0063}$ ,  $B = 11^{\text{m}42}$ ,  $V = 10^{\text{m}25}$ .

В архиве миссии TESS насчитывается 47 700 измерений по результатам наблюдений FR CNC, которые были выполнены в трех секторах — 44, 45 и 46, в периоды 12/10/2021–5/11/2021, 7/11/2021–2/12/2021 и 03/12/2021–30/12/2021 соответственно. Общая длительность наблюдений составляет 78.3 суток и охватывает интервал дат наблюдений 2500.201198–2578.706469 в системе



**Рис. 1.** Панели (a), (d), (g) — кривые блеска для FR Спс, панели (b), (e), (h) — спектры мощности переменности блеска, панели (c), (f), (i) — фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 44–46.

времени TESS (BJD — 2457000). Кривые блеска звезды, характеризующиеся переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на поверхности, спектры мощности и фазовые диаграммы представлены на рис. 1.

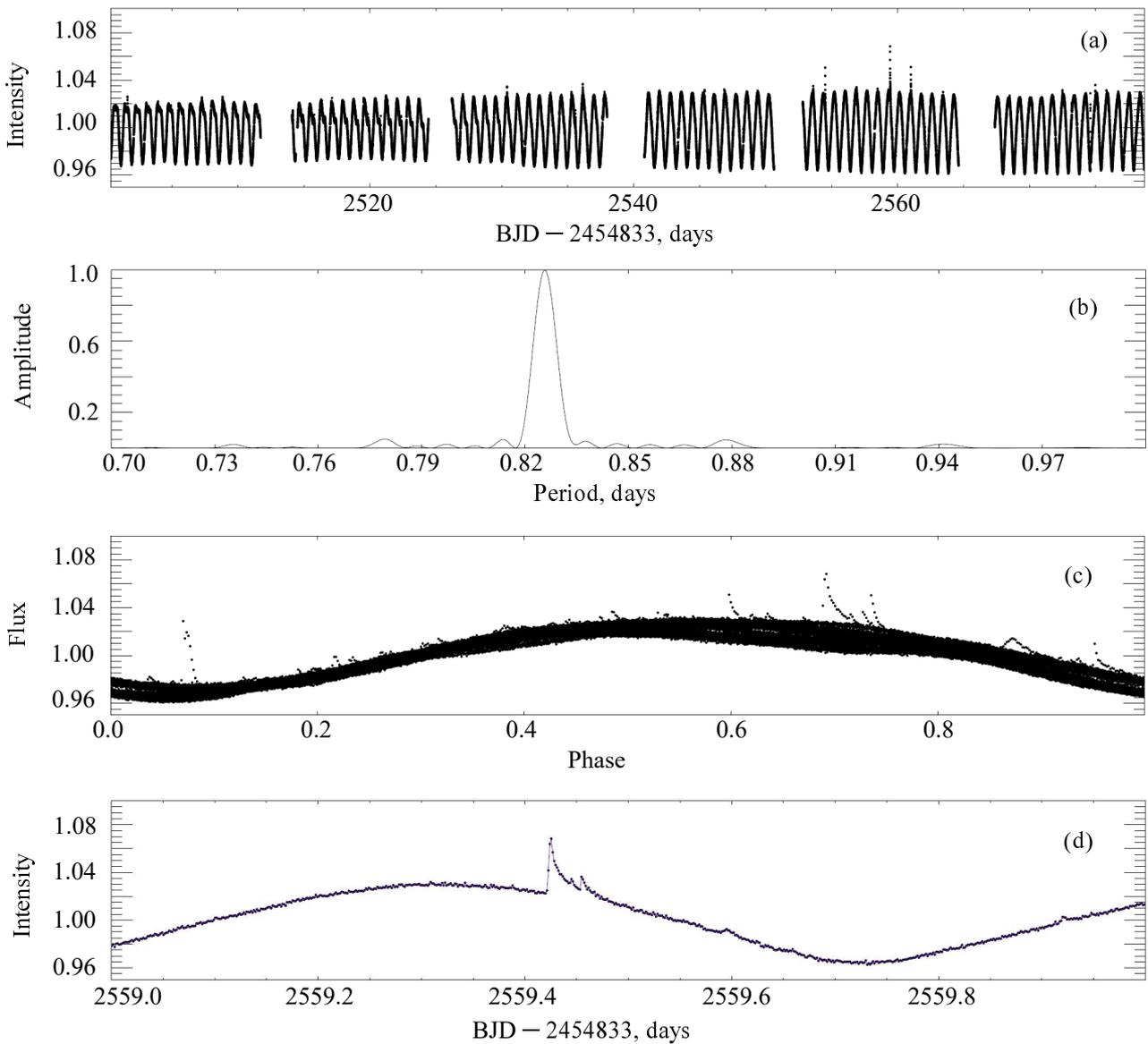
На спектре мощности по объединенным данным трех секторов наблюдений имеется доминирующий пик, соответствующий периоду вращения  $P_{\text{rot}} = 0.8257 \pm 0.010$  суток (погрешность величины определена по полуширине пика) (рис. 2). В пределах ошибок измерения найденная нами величина  $P_{\text{rot}}$  совпадает с приведенной в исследованиях Golovin et al. (2012) и Savanov et al. (2019).

Форма кривой блеска, полученная по данным TESS, претерпевает изменения. К концу рассматриваемого промежутка наблюдений амплитуда переменности блеска звезды увеличивается. Форма фазовой кривой блеска (см. рис. 1) меняется, основные изменения наблюдаются в интервале фаз 0.4–0.7, связанном с менее активной областью (пятном) на поверхности звезды. Вероятно, к концу наблюдений в секторе 46 более слабое пятно практически исчезает. Положение основного минимума (соответствующего доминирующей активной области) смещается по фазе от 0.95 до 0.78.

Анализ фотометрических данных был проведен с помощью модифицированной программы *activity* (Savanov, 2018), при этом площадь поверхности звезды, занимаемая пятнами, оценивалась по упрощенной методике, аналогичной, например, описанной в статье Herbst et al. (2021) (см. уравнения (7)–(8)).

Используя применявшийся нами ранее подход, мы установили, что доля поверхности FR Спс, приходящаяся на пятна, менялась от 8.7% до 11.4% от видимой площади поверхности звезды. По нашей оценке (Savanov et al., 2020), площадь пятен на поверхности звезды в начале 2019 года составила порядка 12% от площади ее поверхности. Запятненность звезды FR Спс в конце 2021 г. и начале 2022 г., по оценке, приводимой Naroenkov et al. (2022), составила 8%, что сопоставимо с нашей оценкой по данным миссии TESS. Отметим также, что, согласно данным Golovin et al. (2012), по результатам доплеровского картирования запятненность FR Спс в 2004 г. была 6%.

Рассмотренные нами кривые блеска характеризуются большим количеством вспышек разной амплитуды (рис. 1 и 2). В качестве примера на рис. 2d представлена одна из вспышек. Ее форма имеет характерный для вспышек вид — резкий подъем дли-



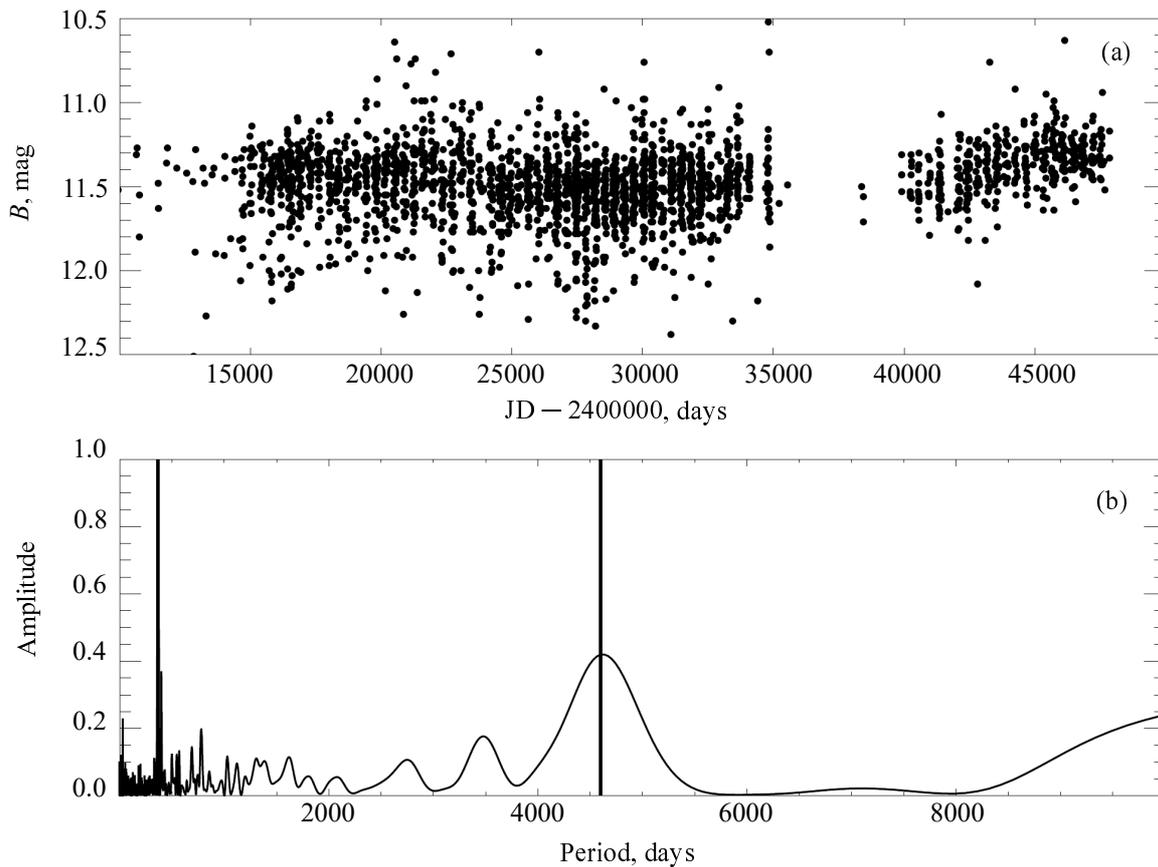
**Рис. 2.** Панель (a) — кривая блеска FR Cnc по наблюдениям в секторах 44–46; (b) — спектр мощности в интервале 0.7–1.0 суток; (c) — фазовая диаграмма; (d) — участок кривой блеска в интервале 2559.0–2560.0 TBJD (BJD – 2454833).

тельностью 6–8 минут и продолжительный период затухания, на который, вероятно, наложились еще две более слабые вспышки. Продолжительность вспышки составляет около 0.151 суток (217 минут), амплитуда — 1.047 от нормированного уровня блеска.

Общая энергия излучения во вспышке была вычислена нами по стандартной методике — см., например, более подробное описание в работах Kozhevnikova et al. (2018), Savanov et al. (2019). Измеренная нами относительная энергия вспышки  $RE$  оказалась равной 97.4 с. Энергия, излученная во вспышке, составила  $E_{TESS} = 1.9 \times 10^{34}$  эрг. Мы не можем сделать никаких заключений об увели-

чении блеска звезды после вспышки по сравнению с предвспышечным уровнем (подобно установленному в статье Kozhevnikova et al. (2018)). Скорее всего, он продолжал оставаться переменным, характерным для его вращательной модуляции. По имеющимся данным нельзя утверждать, что вспышки происходили преимущественно в какой-либо фазе.

Ранее мы представили результаты анализа наблюдений FR Cnc с помощью миссии космического телескопа Kepler/K2, которые проводились во время кампаний 5 и 18 (Savanov et al., 2020). Мы проследили за непрерывной эволюцией активных областей на поверхности звезды в течение 303 ее



**Рис. 3.** Панель (a) — кривая блеска FR Спс по данным проекта Digital Access to a Sky Century @ Harvard (DASCH) с 1886 по 1989 год. Панель (b) — спектр мощности для диапазона периодов 1–10 000 суток. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 365 суток (1 год) и 4600 суток (12.6 лет) (см. текст).

оборотов и получили оценки параметра запятнённости. Были отмечены изменения в форме кривых блеска, связанные с эволюцией пятен, особенно они проявились во время кампании 5. Наблюдения кампании 18 в режиме SLC (short-cadence light curve) свидетельствовали о большом количестве вспышек различной амплитуды. Savanov et al. (2020) отметили, что наибольшая частота вспышек приходится на фазы 0.1–0.6, которые близки, но не полностью совпадают с первой из активных областей. По нашей оценке, максимальная энергия вспышки в полосе пропускания телескопа Kepler составила  $5.1 \times 10^{33}$  эрг.

### 3. ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ

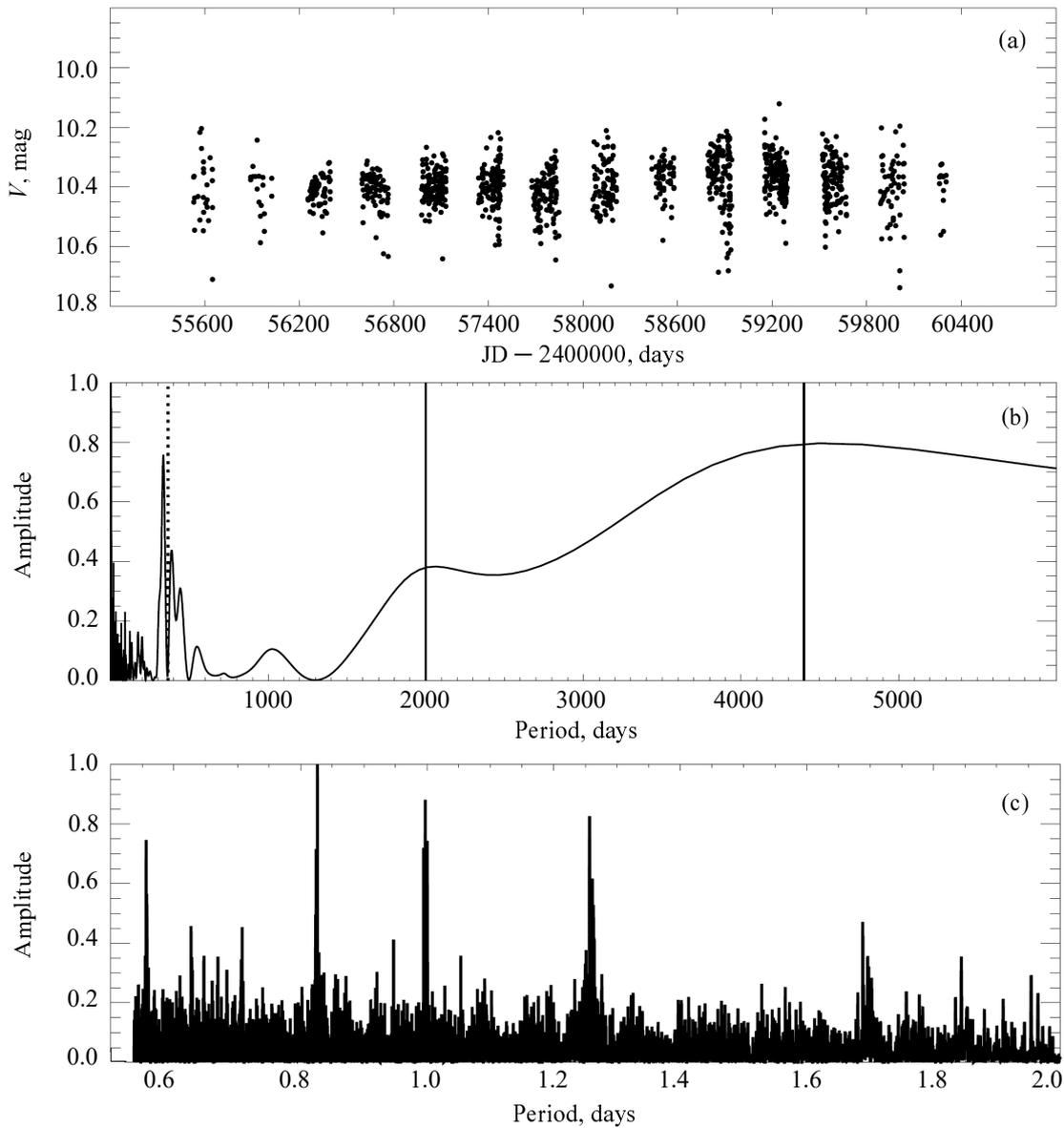
Для FR Спс имеются данные с отсканированных фотопластинок в цифровом формате проекта Digital Access to a Sky Century @ Harvard (DASCH) (Grindlay et al., 2009), которые охватывают интервал наблюдений с 1886 по 1989 г. длительностью в 103 года (рис. 4) и представляют беспрецедентные возможности анализа активности

звезды на продолжительном временном интервале.

Всего нами было рассмотрено 4180 измерений блеска звезды в фотографической системе, близкой к фотометрической в фильтре *B*. До 1890 года данные достаточно немногочисленны, кроме того, имеется пробел в данных в интервале с 1955 по 1963 г. До 1955 года блеск звезды характеризовался долговременной переменностью при относительно постоянном незначительном ослаблении уровня блеска, а после пробела в данных, начиная с 1963 года — более заметным поярчением. Возможно, в 1935–1945 годах звезда была наименее яркой за весь интервал имеющихся данных проекта DASCH. На основе построенного спектра мощности для блеска FR Спс можно предположить существование возможного цикла активности  $P_{\text{cycl}}$  порядка 4600 суток (12.6 лет) (рис. 4b). На этом рисунке вертикальной линией (справа) также отмечен пик, соответствующий годовому периоду.

По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS)<sup>1)</sup> нами была выполнена

<sup>1)</sup><http://kws.cetus-net.org>



**Рис. 4.** Панель (a) — кривая блеска FR Cnc в фильтре  $V$  по данным обзора KWS в интервале наблюдений с 2010 по 2023 г. Панель (b) — спектр мощности; сплошными вертикальными линиями отмечены периоды в 2000 и 4500 суток (5.4 и 12.3 года соответственно). Пунктирная линия соответствует 365-суточной сезонной переменности, присутствующей в данных. Панель (c) — участок спектра мощности в интервале 0.5–2.0 суток с максимальным по высоте пиком, соответствующим величине  $P_{\text{tot}} = 0.82$  суток (см. текст).

еще одна попытка проведения анализа переменности блеска FR Cnc. В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах  $B$ ,  $V$  и  $I_c$ , охватывающие длительный интервал наблюдений — с 2010 по 2023 г. (4775 суток, 13 лет) (HJD 2455529–2460304). Данные о блеске объекта в фильтре  $V$  являются наиболее многочисленными. Всего было рассмотрено 1112 оценок блеска звезды в этом фильтре. Представленные на рис. 5a данные свидетельствуют о присутствии возможной цикличности в изменении ее блеска.

На основе построенного спектра мощности для

блеска FR Cnc можно предположить существование возможных циклов активности около 2000 суток (5.4 года) и 4500 суток (12.3 года) (более значимого, но сопоставимого с длительностью интервала наблюдений) (рис. 5b).

Таким образом, из рассмотрения рис. 4 и 5 можно заключить, что данные обоих обзоров указывают на долговременную переменность блеска FR Cnc с характерным временем порядка 4500–4600 суток (12.3–12.6 лет).

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты изучения проявлений активности звезды FR Cnc (спектральный класс K8V) по данным архива космического телескопа TESS и по другим литературным источникам. В архиве миссии TESS содержатся результаты наблюдений FR Cnc в трех секторах — 44, 45 и 46, общей длительностью 78.3 суток. Кривые блеска звезды характеризуются переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на поверхности. На спектре мощности по объединенным данным трех секторов наблюдений имеется доминирующий пик, соответствующий периоду  $P_{\text{rot}} = 0.8257$  суток.

Отмечены особенности изменений амплитуды переменности блеска звезды, формы фазовой кривой блеска, положения минимумов. Установлено, что доля поверхности FR Cnc, занимаемая пятнами, менялась от 8.7% до 11.4% от видимой площади поверхности звезды, что согласуется с выполненными ранее оценками параметра запятанности. Кривые блеска FR Cnc характеризуются большим количеством вспышек разной амплитуды. В качестве примера рассмотрена одна из вспышек продолжительностью около 217 минут. Энергия вспышки составляет  $E_{\text{TESS}} = 1.9 \times 10^{34}$  эрг.

Для определения долговременных циклов активности звезды FR Cnc использованы данные проекта Digital Access to a Sky Century Harvard (DASCH), которые охватывают интервал наблюдений длительностью в 103 года — с 1886 по 1989 г. Всего рассмотрено 4180 измерений блеска звезды в фотографической системе, близкой к фотометрической в фильтре *B*. Независимая оценка величины  $P_{\text{cycl}}$  выполнена по данным многолетнего обзора KWS (1112 оценок блеска звезды в фильтре *V*). Анализ данных этих обзоров указал на долговременную переменность блеска FR Cnc с характерным временем порядка 4500–4600 суток (12.3–12.6 лет).

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашения № 075-15-2019-1875 и № 075-15-2022-1109).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Golovin, M. C. Gálvez-Ortiz, M. Hernán-Obispo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421** (1), 132 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.20262.x
2. J. Grindlay, S. Tang, R. Simcoe, et al., *ASP Conf. Ser.* **410**, 101 (2009).
3. K. Herbst, A. Papaioannou, V. S. Airapetian, and D. Atri, *Astrophys. J.* **907** (2), id. 89 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/abcc04
4. A. V. Kozhevnikova, V. P. Kozhevnikov, and I. Y. Alekseev, *Astrophysics* **61** (1), 30 (2018). DOI:10.1007/s10511-018-9513-1
5. S. A. Naroenkov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, and M. A. Nalivkin, *Astronomy Reports* **66** (9), 827 (2022). DOI:10.1134/S1063772922100109
6. J. C. Pandey, G. Singh, S. Karmakar, et al., *Journal of Astrophysics and Astronomy* **42** (2), article id. 65 (2021). DOI:10.1007/s12036-021-09702-w
7. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **62** (11), 814 (2018). DOI:10.1134/S1063772918110057
8. I. S. Savanov, S. A. Naroenkov, M. A. Nalivkin, et al., *Astronomy Letters* **45** (9), 602 (2019). DOI:10.1134/S1063773719090056
9. I. S. Savanov, S. A. Naroenkov, M. A. Nalivkin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, p. 168 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020a). DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2\_2020\_168

**Study of Activity Manifestations in K8 V Dwarf FR Cnc****I. S. Savanov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

The results of studying manifestations of activity of the K8V dwarf FR Cnc according to the data from the TESS space telescope archive and other literary sources are presented. The TESS mission archive contains the results of observations of FR Cnc in three sectors: 44, 45, and 46 of a total duration of 78.3 days. The light curves of the star are characterized by the variability due to rotational modulation caused by the presence of cool spots on the surface. Based on the combined data from three observation sectors, the value of the star's rotation period was estimated as  $P_{\text{rot}} = 0.8257$  days. Features of the amplitude changes of the stellar brightness variability, the shape of the phase light curve, and the position of the minima are highlighted. The fraction of the surface of FR Cnc occupied by spots varied in the range of 8.7–11.4% of the visible surface area of the star. The FR Cnc light curves are characterized by a large number of flares of different amplitudes. One of the flares is considered as an example; according to the estimate, its energy is  $E_{\text{TESS}} = 1.9 \times 10^{34}$  erg. To determine the long-term activity cycles of the star FR Cnc, the data from the Digital Access to a Sky Century @ Harvard (DASCH) project were used for the observation interval from 1886 to 1989 lasting 103 years in the photographic system close to the photometric one in the *B* filter. An independent estimate of  $P_{\text{cycl}}$  was made using the data from the long-term Kamogata Wide-field Survey (KWS) in the *V* filter. Analysis of the data from these surveys showed the long-term brightness variability of FR Cnc with a characteristic time of the order of 4500–4600 days (12.3–12.6 years).

Keywords: *methods: data analysis—stars: activity—stars: low-mass*