

УДК 524.312.7-56:520.84

# ОПТИЧЕСКАЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ЗВЕЗД ТИПА $\gamma$ CAS II: SAO 49725

© 2024 А. Ф. Холтыгин<sup>1\*</sup>, И. А. Якунин<sup>1,2</sup>, В. С. Бухаринов<sup>1</sup>,  
Д. Н. Мокшин<sup>1</sup>, Е. Б. Рыспаева<sup>3</sup>, О. А. Циопа<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>3</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

<sup>4</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 15 апреля 2024 года; после доработки 3 мая 2024 года; принята к публикации 5 мая 2024 года

Настоящая работа посвящена исследованию переменности звезды SAO 49725 типа  $\gamma$  Cas. Анализируются как оптические, так и рентгеновские спектры звезды. Обнаружена переменность профилей линий в спектре SAO 49725 на коротких (70–223 минут) шкалах. По фотометрическим кривым блеска SAO 49725, полученным на спутнике TESS, обнаружены регулярные вариации блеска с периодом 1.1989 дня, отождествленного с периодом вращения звезды. Характер фотометрической переменности по данным TESS существенно меняется для разных эпох наблюдений. Компоненты TESS кривых блеска SAO 49725 с периодами около 3–21 дня могут носить инструментальный характер. В рентгеновских кривых блеска SAO 49725, полученных на спутнике XMM, заподозрено присутствие вариаций с периодом  $P = 230 \pm 178$  минут.

Ключевые слова: звезды: с эмиссионными линиями, Ве-звезды: отдельные: SAO 49725

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Важным подклассом звезд спектрального класса В главной последовательности (ГП) являются звезды Ве с эмиссионными линиями в спектре и скоростями вращения, близкими к критической (классические Ве-звезды). Особенностью этой группы звезд является наличие у них околозвездного диска (присутствие которого обнаруживается по эмиссионным бальмеровским линиям водорода в спектре Ве-звезд) и, зачастую, эмиссионных линий других элементов.

Эти эмиссионные линии в спектрах Ве-звезд часто являются двухкомпонентными, при этом их форма определяется структурой диска, физическими условиями в нем и углом, под которым диск виден наблюдателю. Оптические и рентгеновские спектры и светимость Ве-звезд показывают переменность на коротких временных шкалах, а их диски нестабильны, о чем свидетельствуют быстрые вариации профилей эмиссионных линий, вплоть до почти полного их исчезновения. Большинство Ве-звезд являются яркими рентгеновскими источниками с типичной рентгеновской светимостью  $L_X \sim 10^{29}$  эрг с<sup>-1</sup>.

Примерно у 10% В-звезд обнаружены сильные магнитные поля величиной до десятков килогаусс. Многие модели образования дисков Ве-звезд требуют наличия у них магнитных полей (см., например, Brown et al., 2008). В то же время, несмотря на десятилетия поляризационных наблюдений Ве-звезд, ни у одной из них магнитное поле не было обнаружено, за исключением, возможно, звезды  $\lambda$  Eri (Hubrig et al., 2017). Этот факт позволяет предположить, что все Ве-звезды являются немагнитными (Grunhut et al., 2012; Wade et al., 2016). Согласно ud-Doula et al. (2018), присутствие у быстро вращающейся В-звезды даже слабого магнитного поля в 10–100 Гс приводит к быстрому разрушению диска.

Все указанные особенности Ве-звезд выражены у звезд типа  $\gamma$  Cas, выделенной группы Ве-звезд с рентгеновской светимостью на 1–2 порядка выше, чем у обычных Ве-звезд, и аномально высокой ( $kT \sim 5$ –30 кэВ) температурой плазмы, излучающей в рентгеновской области спектра. В то же время оптические спектры звезд типа  $\gamma$  Cas не выделяются среди аналогичных спектров других Ве-звезд.

Причины формирования необычного рентгеновского излучения звезд типа  $\gamma$  Cas до сих пор

\*E-mail: afkholtygin@gmail.com

неясны. Пролить свет на природу звезд типа  $\gamma$  Cas может сравнение переменности их оптических и рентгеновских спектров. В настоящей статье такое сравнение проводится для яркой звезды SAO 49725 (BD+47 3129, RX J2030.5+4751, MWC 1023, TIC 187940144).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлены сведения о физических параметрах звезды. Информация об анализируемых оптических и рентгеновских спектрах звезды дана в разделе 3. В разделе 4 рассматривается спектральная, а в разделе 5 — фотометрическая переменность звезды по данным TESS. Проведенное исследование рентгеновской переменности SAO 49725 описано в разделе 6. Выводы к статье изложены в разделе 7.

## 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗВЕЗДЕ

Звезда SAO 49725 отнесена к классу объектов типа  $\gamma$  Cas на основе анализа ее рентгеновских наблюдений (Smith et al., 2016). Она является двойной системой, состоящей из массивной Вe-звезды с массой около  $13 M_{\odot}$  и маломассивного спутника с массой  $0.2\text{--}0.5 M_{\odot}$  и с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}} = 26^{\text{d}}11$  (Nazé et al., 2022). Кривая лучевых скоростей допускает также решение с орбитальным периодом 137 дней и массой спутника  $0.5\text{--}0.7 M_{\odot}$ . В настоящей работе анализируются спектры массивного Вe-компонента звезды SAO 49725.

Параметры Вe-компонента системы SAO 49725 представлены в таблице 1. Оценка периода вращения  $P_{\text{rot}} = 1^{\text{d}}20$  получена из анализа наблюдений на спутнике TESS (см. раздел 5).

Светимость  $L_*$ , эффективная температура  $T_{\text{eff}}$  и ускорение силы тяжести  $\log g$  звезды были оценены по ее звездным величинам в полосах  $U$ -,  $B$ - и  $V$ -фильтров с помощью соотношений, представленных Nieva (2013). Величина поправки  $A_V$  за межзвездное поглощение в фильтре  $V$  вычислена с использованием библиотеки `dustmap` (Green, 2018). Расстояние до звезды определено по ее параллаксу из третьего релиза Gaia Collab. (2020). Радиус звезды мы оценили по формуле Стефана–Больцмана, используя определенные нами величины  $L_*$  и  $T_{\text{eff}}$ .

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Анализируемые в настоящей статье наблюдения SAO 49725 выполнялись нами на 6-м телескопе БТА САО РАН в рамках программы

**Таблица 1.** Параметры звезды SAO 49725

Параметр	Величина	Ссылка
Спектр. класс	B0.5 III–Ve	[1]
$m_V$ , mag	9.27	[1]
$T_{\text{eff}} \times 10^{-3}$ , K	33.9	[2]
$R_*, R_{\odot}$	7.17	[2]
$\log g$	4.35	[2]
$\log(L_*/L_{\odot})$	4.78	[2]
$M, M_{\odot}$	13	[3]
$d$ , pc	2384	[4]
$v \sin i$ , км с $^{-1}$	$182 \pm 33$	[5]
$i$ , deg	$37 \pm 8$	[2]
$P_{\text{rot}}$ , дни	1.20	[2]
$P_{\text{orb}}$ , дни	26.11, 137.0	[3]
$M_{\text{comp}}, M_{\odot}$	0.2–0.5, 0.5–0.7	[3]

[1] — Smith et al. (2016), [2] — настоящая работа, [3] — Nazé et al. (2022), [4] — Gaia EDR3, [5] — Lopes de Oliveira et al. (2006).

«Быстрая переменность профилей линий в спектрах ОВА-звезд и природа их рентгеновского излучения» (ответственный заявитель — А. Ф. Холтыгин, СПбГУ) при использовании спектрографа SCORPIO (Afanasiev and Moiseev, 2005) 17 августа 2021 года. Был получен 431 спектр звезды с экспозициями 5 с каждый.

Первичная обработка и экстракция спектров, полученных на БТА, проводилась в системе MIDAS. При обработке спектров были задействованы стандартные процедуры: вычитание подложки ПЗС-матрицы (bias), калибровка по длинам волн, после чего одномерные спектры были приведены к барицентру Солнечной системы. При калибровке по длинам волн для серии спектров использовался ближайший по времени спектр ThAg-лампы. Все полученные нами БТА-спектры были нормированы на континуум. Процедура нормировки описана в статье Kholtygin et al. (2006). Усредненный по всем полученным спектрам SAO 49725 и нормированный на континуум средний спектр звезды представлен на рис. 1.

## 4. ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ SAO 49725

### 4.1. Оптическая переменность

Анализ рис. 1 показывает, что линия  $H\beta$  чисто эмиссионная, тогда как бальмеровские линии  $H\gamma$

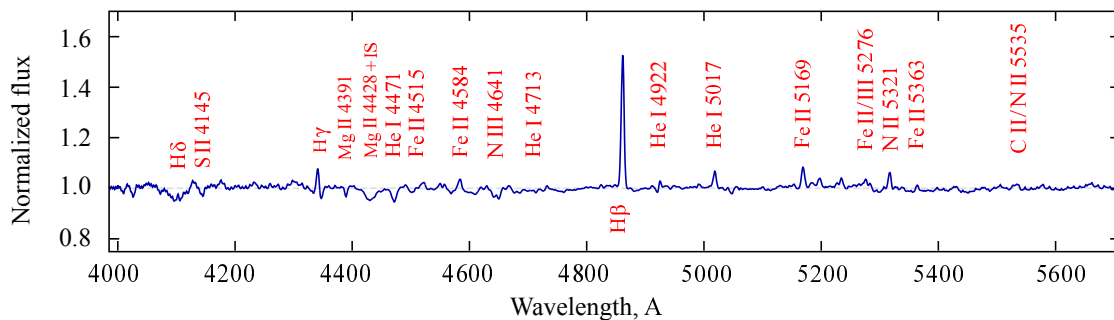


Рис. 1. Средний нормированный спектр SAO 49725, полученный на БТА CAO РАН 17/18 августа 2021 г.

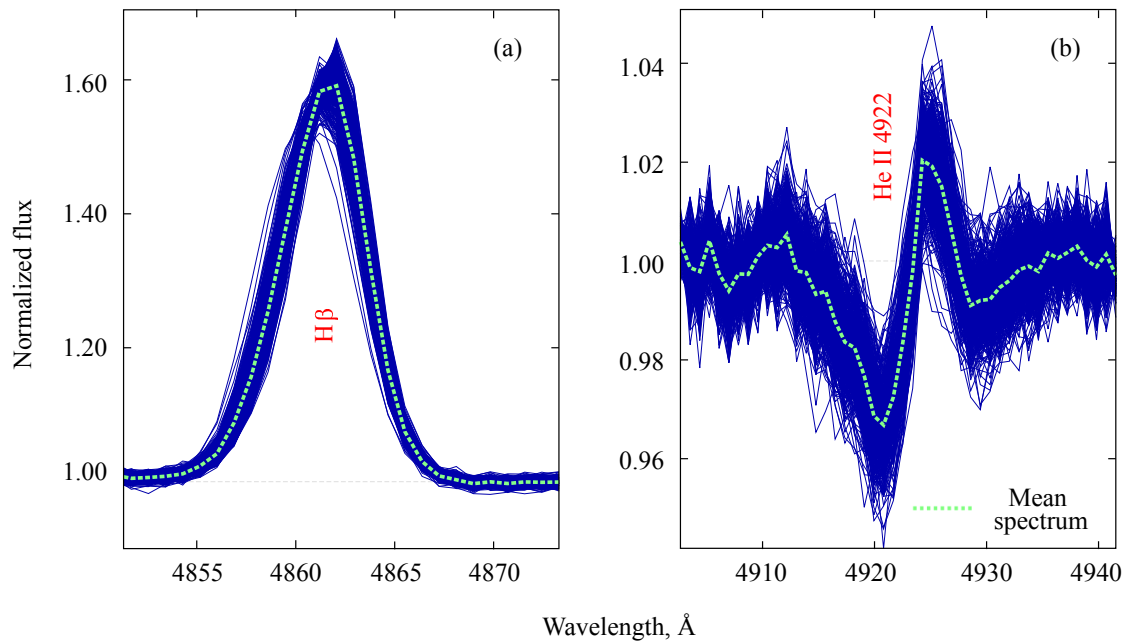


Рис. 2. Профили линий  $H\beta$  (a) и линии  $He I \lambda 4922$  (b) в спектре SAO 49725, полученные на БТА. Пунктирные линии — средние профили соответствующих линий.

и  $H\delta$  имеют значимую абсорбционную компоненту. Также эмиссионными являются многочисленные профили линий  $Fe II$ . Можно предположить, что появление линий  $Fe II$  в эмиссии объясняется малой глубиной абсорбционных компонент этих линий в спектре самой звезды. Суммарный профиль линий, являющийся суммой эмиссионной и абсорбционной компонент, оказывается эмиссионным.

Профили линий  $He I$ , как видно из рис. 1, могут быть как эмиссионными, так и абсорбционными. При анализе вариаций профилей линий в спектре звезды целесообразно выбрать линии достаточной глубины и без сильного блендирования. Исходя из этих принципов, мы выбрали бальмеровские линии водорода, линии гелия и линии иона  $Fe II$ .

Переменность профилей линий  $H\alpha$  и  $He I \lambda 4922$  в спектре SAO 49725 проиллюстрирована на рис. 2. Для каждой линии показаны 431 нормированный

профиль и средний профиль линии. Форма профиля линии  $H\beta$  соответствует ориентации диска звезды под малым углом к линии зрения (см., например, Rivinius et al., 2013). Профили линии  $He I \lambda 4922$  имеют типичную форму профилей типа P Cyg. Полная ширина профиля данной линии соответствует скорости расширения вещества звездного ветра около  $800 \text{ km s}^{-1}$ .

Для наглядного представления вариаций профилей линий воспользуемся их разностными профилями  $d(\lambda)$ :

$$d(\lambda) = F_i(\lambda) - \bar{F}_i(\lambda), \quad (1)$$

где  $F_i(\lambda)$  — нормированный на континуум поток в спектре с номером  $i$ ,  $\bar{F}_i(\lambda)$  — средний по всем наблюдениям поток на длине волны  $\lambda$ .

При анализе разностных профилей будем использовать вместо длины волны  $\lambda$  доплеровские

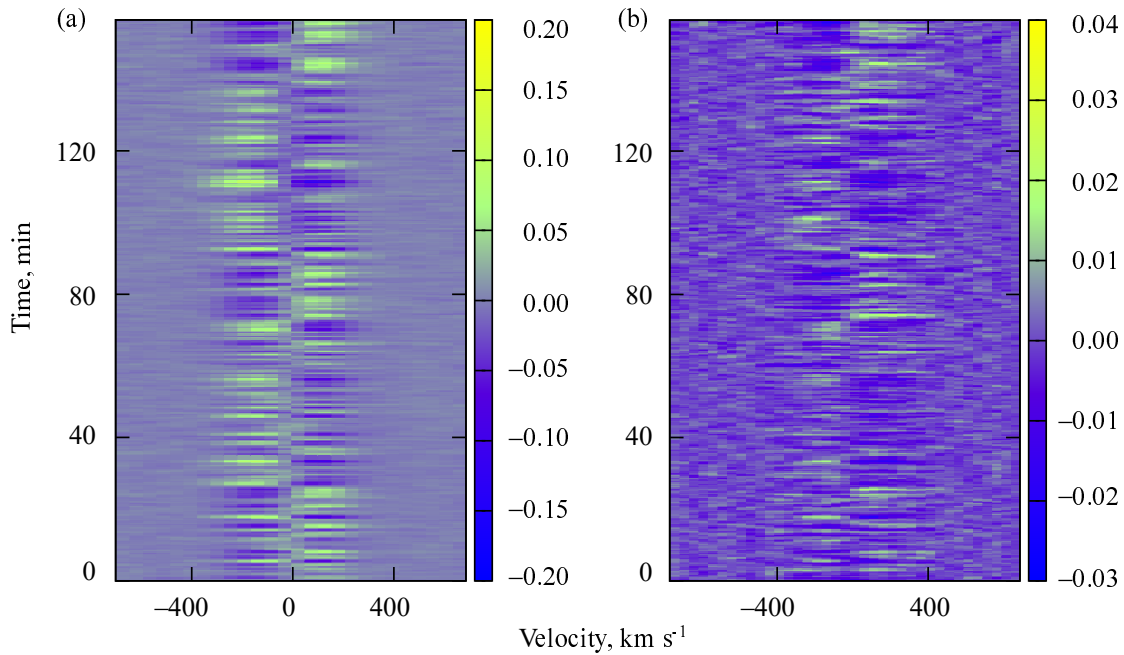


Рис. 3. Динамические спектры вариаций профилей линий  $H\beta$  (a) и  $He\ I\ \lambda\ 4922$  (b).

смещения (лучевые скорости)  $V$  от лабораторной длины волны  $\lambda_0$  линии,  $V = c(\lambda/\lambda_0 - 1)$ , где  $c$  — скорость света.

Амплитуда вариаций профилей линии  $H\beta$  достигает 12% в единицах потока в соседнем с линией континууме, тогда как вариации профилей линий  $He\ I$  и  $Fe\ II$  не превышают 3–5%. На рис. 3 представлены динамические спектры вариаций профилей линий  $H\beta$  (a) и линии  $He\ I\ \lambda\ 4922$  (b).

#### 4.2. Регулярная переменность профилей линий в спектре SAO 49725

Для поиска регулярных компонент в вариациях профилей линий в спектре SAO 49725 нами был выполнен Фурье-анализ разностных профилей линий  $d(V)$ . Для каждого значения длины волны  $\lambda_k$  на профиле линии, соответствующего доплеровскому смещению  $V = V_k$ , совокупность значений  $\{d(V_k, t_i)\}$ ,  $i = 1, \dots, N$  (где  $N$  — число анализируемых профилей), представляет собой анализируемый временной ряд.

Поиск периодических компонент каждого из рядов для значений  $V_k$  в пределах профиля линии осуществлялся методом CLEAN (Roberts et al., 1987). В Фурье-спектре (периодограммах Шустера) выбираются регулярные компоненты с частотами, соответствующими максимумам амплитуды Фурье-спектра, которые превышают значение, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$ .

В таблице 2 представлены частоты (колонка 2) и периоды (колонка 3) возможных гармонических

Таблица 2. Частоты и периоды регулярных компонент вариаций профилей линий в спектре SAO 49725 по данным, полученным на БТА

No.	$\nu$ , мин <sup>-1</sup>	$P$ , мин	$\alpha$	H	He I	Fe II
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0.00447	$223.61 \pm 319.47$	$10^{-3}$	+	+	+
2	0.00467	$214.27 \pm 293.33$	$10^{-6}$	+	+	+
3	0.01436	$69.61 \pm 30.96$	$10^{-6}$	+	+	+
4	1.12769	$0.89 \pm 0.01$	$10^{-2}$	+	–	+

компонент вариаций профилей линий H, He I и Fe II, найденные из анализа спектров SAO 49725, полученных нами на БТА. Уровни значимости обнаруженных компонент приведены в колонке 4 таблицы 2.

Для оценки ошибок выявленных периодов было использовано стандартное соотношение  $\Delta\nu = 1/T$  (согласно, например, Vityazev, 2001), где  $T = 156.52$  мин — полная длительность временного ряда наблюдений SAO 49725 на БТА. Полученные частоты и периоды не были ранее обнаружены при анализе спектральных и фотометрических вариаций SAO 49725. Найденные периоды близки к типичным периодам быстрых вариаций профилей линий в спектрах OBA-звезд (см., например, Dushin et al., 2013; Kholtygin et al., 2018).

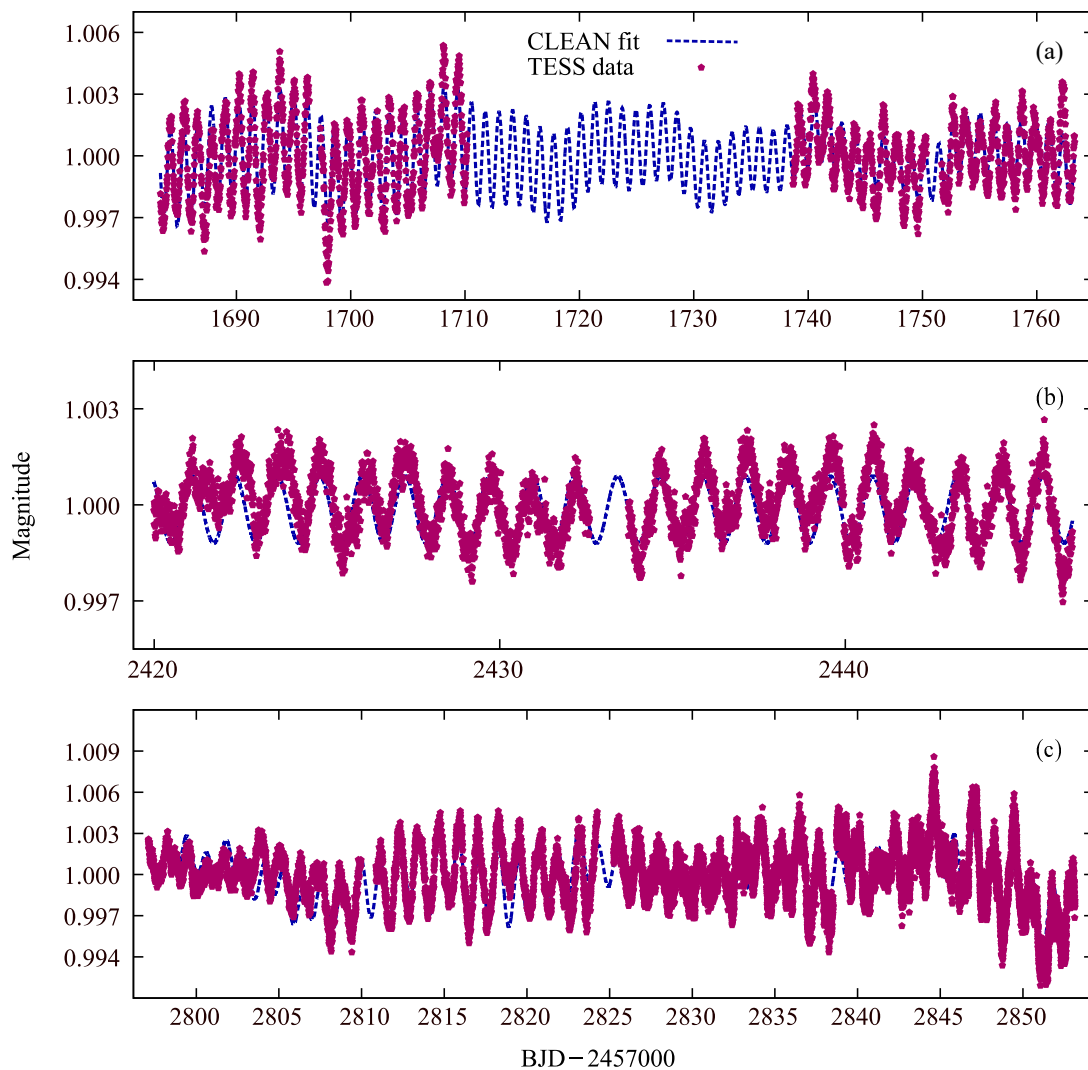


Рис. 4. Кривые блеска TESS SAO 49725 в 2019 г. (а), в 2021 г. (b) и в 2022 г. (с). Пунктирными линиями показана аппроксимация кривых блеска методом CLEAN.

## 5. TESS-ФОТОМЕТРИЯ SAO 49725

В настоящее время доступны фотометрические наблюдения OBA-звезд на спутнике TESS, описанные Jenkins et al. (2016). Данные фотометрии SAO 49725, выполненные на TESS, представлены на сайте TASOC<sup>1</sup>. Звезда SAO 49725 наблюдалась на TESS в 2019, 2021 и 2022 гг. Фотометрия TESS в 2019 г. выполнялась с 18 июля по 14 августа (28 дней) и с 12 сентября по 6 октября (25 дней); в 2021 г. — с 24 июля по 20 августа (28 дней); в 2022 г. — с 5 августа по 30 сентября (57 дней).

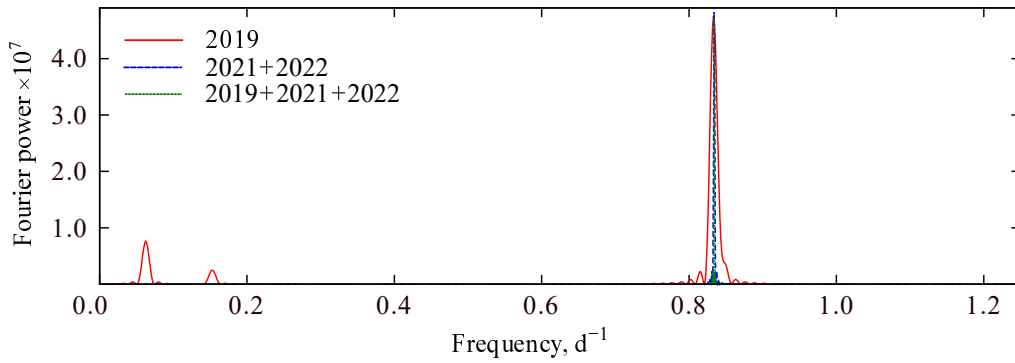
Извлеченные с сайта TASOC кривые блеска SAO 49725 для указанных выше эпох представлены на рис. 4. Минимальные амплитуды вариаций блеска звезды получены в 2021 году. В 2021 и

2022 гг. амплитуды вариаций блеска превышают эти величины в два и три раза соответственно.

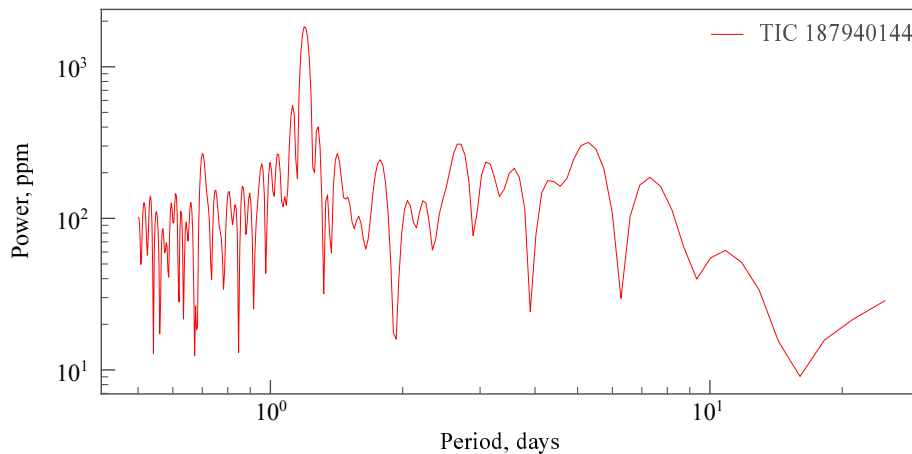
Мы выполнили анализ фотометрических кривых блеска в 2019, 2021, 2022 гг. и объединенной кривой блеска за все время наблюдений с помощью метода CLEAN. На рис. 5 представлены соответствующие Фурье-периодограммы. Для удобства сравнения их амплитуды для эпохи 2019 г. дополнительно умножены на 0.55, а периодограммы кривой блеска 2021–2022 гг. — на 1.10. Все три периодограммы совпадают только для частоты  $\nu = 0.8341 \text{ d}^{-1}$ , соответствующей периоду  $P = 1^{\text{d}}.1989 \pm 0^{\text{d}}.0012$ .

Наиболее вероятным является предположение, что период  $P = 1^{\text{d}}.1989 \pm 0^{\text{d}}.0012$  является периодом вращения звезды. В подтверждение данного предположения оценим возможные предельные значения периода вращения, используя данные

<sup>1</sup>TESS Data For Asteroseismology Lightcurves: <https://archive.stsci.edu/hlsp/tasoc>



**Рис. 5.** Фурье-спектр (периодограммы, полученные методом CLEAN) вариаций блеска TESS для наблюдений в 2019 г. (сплошная кривая), в 2021–2022 гг. (штриховая кривая) и для полной кривой блеска (пунктирная кривая).



**Рис. 6.** Фурье-спектр (периодограмма Ломбла–Скаргла) кривой блеска SAO 49725 по наблюдениям TESS в 2019 г. (сектор 14).

таблицы 1 и стандартное соотношение:

$$P_{\text{rot}} = \sin i \frac{50.61}{v \sin i} \left( \frac{R_*}{R_{\odot}} \right), \quad (2)$$

где  $V \sin i$  измеряется в  $\text{km s}^{-1}$ , а  $P_{\text{rot}}$  в днях. Согласно Nazé et al. (2022), угол наклона оси вращения звезды находится в промежутке  $[30^{\circ} - 70^{\circ}]$ , что соответствует значениям периода вращения в интервале  $0^{\text{d}}997 \leq P_{\text{rot}} \leq 1^{\text{d}}873$ , в который попадает найденный нами период  $P = 1^{\text{d}}1989 \pm 0^{\text{d}}0012$ . Это значение согласуется с типичными величинами периодов вращения Ве-звезд, поэтому можно принять, что период вращения SAO 49725 равен  $P_{\text{rot}} = 1^{\text{d}}1989 \pm 0^{\text{d}}0012$ . Использование этого значения и значения скорости вращения  $v \sin i$  из таблицы 1 позволяет уточнить угол наклона оси вращения:  $i = 37^{\circ} \pm 8^{\circ}$ .

Анализ данных таблицы 3 показывает, что в кривой блеска по данным TESS 2019 года присутствуют, кроме основного компонента, соответствующего периоду вращения звезды, компоненты  $\nu_1 - \nu_3$  с периодами  $15.99 \pm 9.53$ ,  $6.55 \pm 1.60$

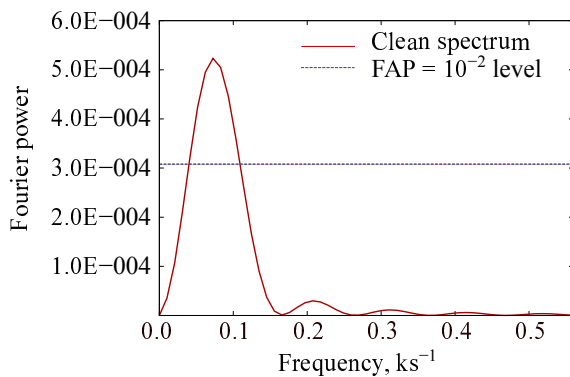
и  $3.11 \pm 0.36$  дня. Для кривой блеска SAO 49725, полученной в 2019 г. (сектор 14, наблюдения с 12 сентября по 6 октября), нами была также построена периодограмма Ломбла–Скаргла (Lomb, 1976; Scargle, 1982), приведенная на рис. 6. На этой периодограмме видны те же гармонические компоненты, что и представленные в таблице 3.

Природа этих компонент пока неясна, однако можно заметить, что они, согласно Kholtygin et al. (2023), в пределах ошибок определения соответствуют периодическим компонентам, полученным из анализа кривой блеска HD 45995 — звезды типа  $\gamma$  Cas — по данным TESS 2018–2019 гг.:  $14.72 \pm 8.72$ ,  $6.63 \pm 1.86$  и  $3.91 \pm 0.656$  дня.

Указанные компоненты зарегистрированы только в эпохи наблюдений 2018–2019 гг. и отсутствуют в 2020–2022 гг., что свидетельствует об их транзитной природе. Соответствие периодических компонент, полученных в близкие эпохи наблюдений, но для различных звезд, указывает на инструментальную природу вариаций блеска с приведенными выше периодами. Также инструментальный характер может носить компонента с

**Таблица 3.** Частоты и периоды периодических компонент вариаций блеска SAO 49725 по данным TESS

No.	$\nu$ , d <sup>-1</sup>	$P$ , days	2019	2021–2022	All data	$\alpha$
1	0.0471	21.23±1.041	–	+	–	10 <sup>-2</sup>
2	0.0625	15.99±9.53	+	–	–	10 <sup>-6</sup>
3	0.1526	6.55±1.60	+	–	–	10 <sup>-6</sup>
4	0.3215	3.11±0.36	+	–	–	10 <sup>-2</sup>
5	0.8341	1.1989±0.0012	+	+	+	10 <sup>-6</sup>

**Рис. 7.** Фурье-спектр рентгеновской кривой блеска SAO 49725 по наблюдениям 9 декабря 2003 г. на камере EPIC спутника XMM в областях энергий 2–10 кэВ.

периодом  $21.23 \pm 1.041$  дня, зарегистрированная при анализе наблюдений на спутнике TESS в 2021–2022 гг.

## 6. SAO 49725 В НАБЛЮДЕНИЯХ XMM-NEWTON

Анализ рентгеновских спектров и рентгеновских кривых блеска звезд ранних спектральных классов позволяет исследовать структуру их звездных ветров и формирование горячего газа в них. Периоды вариаций профилей оптических линий в спектрах ряда таких звезд соответствуют частотам вариаций их рентгеновского блеска (см., например, Kholtygin et al., 2022).

Мы проанализировали архивные рентгеновские наблюдения SAO 49725, выполненные на спутнике XMM 9 декабря 2003 г. (ObsID = 201200201). Процедуры первичной обработки данных описаны в работе Ryspaeva and Kholtygin (2021). Там же мы представили результаты исследования спектров SAO 49725. В настоящей статье мы приводим результаты анализа кривых блеска звезды.

### 6.1. Анализ рентгеновских кривых блеска

Полная длительность наблюдений SAO 49725 составила 11515 с (192 мин). Анализ кривой

блеска методом CLEAN показал присутствие единственной регулярной компоненты с периодом  $P = 230 \pm 178$  мин для данных, полученных с детектором PN на уровне значимости  $\alpha = 0.01$  для полосы наблюдений 0.2–10 кэВ (см. рис. 7).

Учитывая то, что указанная компонента найдена только на не слишком малом значении уровня значимости, а ее период больше периода наблюдений, реальность этой компоненты должна быть подтверждена более длительными рентгеновскими наблюдениями. Отметим, что третья гармоника данного периода,  $P/3 = 76.6 \pm 59.3$  мин, близка к периоду  $P_3 = 69.61 \pm 30.96$  мин вариаций профилей линий в спектре SAO 49725 (см. таблицу 2).

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты исследования оптической и рентгеновской переменности звезды типа  $\gamma$  Cas SAO 49725. Основываясь на анализе оптических и рентгеновских спектров и кривых блеска звезды, можно сделать следующие выводы:

- Профили линий в спектре SAO 49725 переменны на коротких (70–223 минут) временных интервалах. Возможно присутствие сверхбыстрых спектральных вариаций с периодом  $0.89 \pm 0.01$  минут.
- Анализ кривых блеска SAO 49725, полученных на спутнике TESS, позволил определить период вращения звезды ( $P = 1.^d1989 \pm 0.^d0012$ ) и уточнить угол наклона ее оси вращения ( $i = 37^\circ \pm 8^\circ$ ).
- В кривых блеска SAO 49725 по данным TESS за 2019 г. присутствуют компоненты с периодами порядка 3–21 день, природа которых пока неясна, но может носить инструментальный характер.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

А. Ф. Х., И. А. Я. и Е. Б. Р. признательны Российскому научному фонду за финансовую поддержку грантом РФФ № 23-22-00090.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005). DOI:10.1134/1.1883351
2. J. C. Brown, J. P. Cassinelli, and M. Maheswaran, *Astrophys. J.* **688** (2), 1320 (2008). DOI:10.1086/592558
3. V. V. Dushin, A. F. Kholtygin, G. A. Chuntunov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (2), 184 (2013). DOI:10.1134/S1990341313020065
4. Gaia Collab., *VizieR Online Data Catalog I/350* (2020). DOI:10.26093/cds/vizie1.1350
5. G. M. Green, *The Journal of Open Source Software* **3** (26), 695 (2018). DOI:10.21105/joss.00695
6. J. H. Grunhut et al. (MiMeS Collab.), *AIP Conf. Ser.* **1429**, 67 (2012). DOI:10.1063/1.3701903
7. S. Hubrig, I. Ilyin, A. F. Kholtygin, et al., *Astronomische Nachrichten* **338** (8), 926 (2017). DOI:10.1002/asna.201713401
8. J. M. Jenkins, J. D. Twicken, S. McCauliff, et al., *SPIE Conf. Ser.* **9913**, id. 99133E (2016). DOI:10.1117/12.2233418
9. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 471 (2018). DOI:10.1134/S1990341318040107
10. A. F. Kholtygin, T. E. Burlakova, S. N. Fabrika, et al., *Astronomy Reports* **50** (11), 887 (2006). DOI:10.1134/S1063772906110035
11. A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, et al., *Geomagnetism and Aeronomy* **62** (8), 1136 (2022). DOI:10.1134/S0016793222080126
12. A. F. Kholtygin, I. A. Yakunin, M. A. Burlak, and E. B. Ryspaeva, *Astrophysical Bulletin* **78** (4), 556 (2023). DOI:10.1134/S199034132360031X
13. N. R. Lomb, *Astrophys. and Space Sci.* **39** (2), 447 (1976). DOI:10.1007/BF00648343
14. R. Lopes de Oliveira, C. Motch, F. Haberl, et al., *Astron. and Astrophys.* **454** (1), 265 (2006). DOI:10.1051/0004-6361/20054589
15. Y. Nazé, G. Rauw, S. Czesla, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510** (2), 2286 (2022). DOI:10.1093/mnras/stab3378
16. M. F. Nieva, *Astron. and Astrophys.* **550**, id. A26 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201219677
17. T. Rivinius, A. C. Carciofi, and C. Martayan, *Astron. Astrophys. Rev.* **21**, article id. 69 (2013). DOI:10.1007/s00159-013-0069-0
18. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987). DOI:10.1086/114383
19. E. B. Ryspaeva and A. F. Kholtygin, *Open Astronomy* **30** (1), 132 (2021). DOI:10.1515/astro-2021-0018
20. J. D. Scargle, *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982). DOI:10.1086/160554
21. M. A. Smith, R. Lopes de Oliveira, and C. Motch, *ASP Conf. Ser.* **506**, 299 (2016).
22. A. ud-Doula, S. P. Owocki, and N. D. Kee, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478** (3), 3049 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty1228
23. V. V. Vityazev, *Analysis of Uneven Timeseries* (SPbSU Press, St. Petersburg, 2001) [in Russian].
24. G. A. Wade et al. (MiMeS Collab.), *ASP Conf. Ser.* **506**, 207 (2016).

Optical and X-Ray Variability of  $\gamma$  Cas Stars II: SAO 49725

A. F. Kholtygin<sup>1</sup>, I. Ya. Yakunin<sup>1,2</sup>, V. S. Bukharinov<sup>1</sup>, D. N. Mokshin<sup>1</sup>, E. B. Ryspaeva<sup>3</sup>, and O. A. Tsiopa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>2</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>3</sup>Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

<sup>4</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

This paper is devoted to studying the variability of the  $\gamma$  Cas variable star SAO 49725. We analyze both the optical and X-ray spectra of the star. The line profile variability in the spectrum of SAO 49725 was discovered on short (70–223 minutes) scales. Regular variations of the SAO 49725 light curves with a period of 1.1989 days are detected using the photometric light curves obtained with the TESS satellite, identified with the rotation period of the star. The pattern of the photometric variability of SAO 49725 according to the TESS data significantly varies at different observational epochs. The TESS components of the SAO 49725 light curves with the periods of about 3–21 days may be instrumental. The presence of variations with the period  $P = 230 \pm 178$  minutes in the SAO 49725 X-ray light curves, obtained by the XMM-Newton telescope, is suspected.

Keywords: stars: Be stars: individual: SAO 49725