

УДК 524.338.2-735-565+524.338.2-75-565

## ОПТИЧЕСКАЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ЗВЕЗД ТИПА $\gamma$ CAS: HD 45995

© 2023 А. Ф. Холтыгин<sup>1\*</sup>, И. А. Якунин<sup>1,2</sup>, М. А. Бурлак<sup>3</sup>, Е. Б. Рыспаева<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>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия<sup>4</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

Поступила в редакцию 1 июня 2023 года; после доработки 24 июня 2023 года; принята к публикации 11 июля 2023 года

Настоящая работа посвящена исследованию переменности звезды HD 45995 типа  $\gamma$  Cas. Анализируются как ее оптические, так и рентгеновские спектры. Обнаружена переменность профилей линий в спектре HD 45995 на длительных (350–380 суток) и на коротких (11–87 минут) интервалах времени. По фотометрическим кривым блеска HD 45995, полученным на спутнике TESS, уточнен период вращения звезды:  $P = 0.8443 \pm 0.0009$  суток. В этих кривых блеска выявлены компоненты с типичными для нерадиальных пульсаций В-звезд периодами около 11 часов и компоненты с периодами около 4–14 суток, природа которых пока неизвестна. Отметим, что, в принципе, последние компоненты могут носить инструментальный характер, например, вследствие дрейфа спутника. Характер фотометрической переменности по данным TESS существенно меняется для разных эпох наблюдений в 2018/2019 и 2020/2021 гг. В рентгеновских кривых блеска HD 45995 заподозрено присутствие сверхбыстрых вариаций с периодом  $P = 48.5 \pm 0.5$  секунд.

Ключевые слова: звезды: Ве-звезды: отдельные: HD 45995

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Важным подклассом звезд спектрального класса В главной последовательности являются звезды Ве с эмиссионными линиями в спектре и скоростями вращения, близкими к критической (классические Ве-звезды). Особенность этой группы звезд — наличие у них околозвездного диска. Его существование обнаруживается по эмиссионным бальмеровским линиям водорода и, зачастую, эмиссионных линий других элементов в спектрах этих объектов. Форма спектров определяется структурой диска, физическими условиями в нем и углом, под которым диск виден наблюдателю, а эмиссионные линии часто являются двухкомпонентными. Оптические и рентгеновские спектры, а также светимость Ве-звезд характеризуются переменностью на коротких временных шкалах, а диски нестабильны, о чем свидетельствуют быстрые вариации профилей эмиссионных линий вплоть до почти полного их исчезновения.

Примерно у 10% В-звезд обнаружены сильные магнитные поля величиной до десятков килогаусс.

\*E-mail: afkholtygin@gmail.com

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), что позволяет предположить, что все Ве-звезды являются немагнитными (Grunhut et al., 2012; Wade et al., 2016). Большинство Ве-звезд — яркие рентгеновские источники с типичной рентгеновской светимостью  $L_X \sim 10^{29}$  эрг с<sup>-1</sup>.

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 звезд этого класса, и аномально высокой ( $kT \sim 5$ –30 кэВ) температурой плазмы, излучающей в рентгеновской области спектра. В то же время оптические спектры звезд данного типа подобны аналогичным спектрам других Ве-звезд.

Причины формирования необычного рентгеновского излучения звезд типа  $\gamma$  Cas до сих пор неясны. Пролить свет на их природу может сравнение переменности оптических и рентгеновских спектров звезд этого типа. В настоящей статье такое

сравнение проводится для яркой звезды HD 45995 (HR 2370, BD+11 1204).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлены физические параметры звезды. Сведения об анализируемых оптических и рентгеновских спектрах звезды даны в разделе 3. В разделе 4 анализируется спектральная, а в разделе 5 — фотометрическая и рентгеновская переменности HD 45995. Выводы к статье изложены в разделе 6.

## 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О HD 45995

Звезда отнесена к классу объектов типа  $\gamma$  Cas (Nazé et al., 2020) на основе анализа рентгеновских наблюдений на спутнике XMM-Newton в 2018 и 2019 гг. HD 45995 является двойной системой, состоящей из массивной Ве-звезды и маломассивного спутника с массой, близкой к солнечной, с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}} = 103^{\text{d}}1$  (Nazé et al., 2022). В настоящей работе анализируются спектры массивного Ве-компонента звезды HD 45995.

Параметры Ве-компонента системы HD 45995 представлены в таблице 1. Скорость вращения звезды,  $v \sin i = 260 \text{ км с}^{-1}$ , близка к критической. Согласно Abt et al. (2002) скорость вращения еще выше:  $v \sin i = 310 \text{ км с}^{-1}$ .

На определение параметров звезды существенное влияние оказывает ее быстрое вращение. Так, оценка эффективной температуры  $T_{\text{eff}} = 22\,674 \text{ К}$ , полученная Fremat et al. (2006), существенно превышает значение  $18\,493 \text{ К}$ , приведенное Soubiran et al. (2016) без учета поправок за быстрое вращение.

Период вращения звезды  $P = 0^{\text{d}}837$  ( $20^{\text{h}}09$ ), рассчитанный нами по данным таблицы 1, соответствует периоду  $P = 0^{\text{d}}844$ , определенному из анализа наблюдений HD 45995 на спутнике TESS (Balona and Ozuyar, 2021)<sup>1)</sup>.

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Анализируемые в настоящей статье наблюдения HD 45995 выполнялись нами на 1.25-м телескопе Крымской станции ГАИШ МГУ со спектрографом низкого разрешения A-Sp (Ikonnikova et al., 2021) и на 6-м телескопе БТА САО РАН в рамках программы «Быстрая переменность профилей линий в спектрах ОВА-звезд и природа их рентгеновского излучения» (ответственный заявитель —

<sup>1)</sup><https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/921/5>

**Таблица 1.** Параметры HD 45995

Параметр	Значение	Ссылка
Sp. класс	B2 Vpne	Nazé et al. (2020)
$m_V$	6.14	Nazé et al. (2020)
$T_{\text{eff}}$ , кК	22 674	Fremat et al. (2006)
$R^{\text{pol}}, R_{\odot}$	$5.9 \pm 0.6$	Vieira et al. (2017)
$\lg g$	3.81	Fremat et al. (2006)
$\lg(L/L_{\odot})$	$4.03 \pm 0.06$	Nazé et al. (2020)
$M/M_{\odot}$	$10 \pm 2$	Vieira et al. (2017)
$d$ , pc	669	SIMBAD <sup>a</sup>
$v \sin i$ , км с <sup>-1</sup>	260	Fremat et al. (2006)
$i$ , град	46.8	Fremat et al. (2006)
$\lg \tau$ , млн лет	7.27	Zorec et al. (2005)

Note: <sup>a</sup><http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>

**Таблица 2.** Журнал наблюдений HD 45995

Даты наблюдений	Телескоп, спектрограф	$T_{\text{exp}}$	Число спектров
10/10/2021	1.25-м, A-Sp	30 <sup>s</sup>	208
12/01/2023	БТА, ОЗСП	300 <sup>s</sup>	17
2008–2023	BeSS	1 <sup>h</sup> –2 <sup>h</sup>	29

А. Ф. Холтыгин, СПбГУ) при использовании спектрографа ОЗСП (Panchuk et al., 2014) с анализатором круговой поляризации и резателем изображений (Chountopov, 2016).

Полученные нами спектры HD 45995 были дополнены спектрами из базы данных BeSS<sup>2)</sup>. Структура и принципы построения базы описаны в работах Neiner (2011) и Neiner et al. (2018). Информация о всех используемых нами спектрах представлена в таблице 2.

Спектры HD 45995, приведенные в базе данных BeSS, получены астрономами-любителями на телескопах малого диаметра (25–40 см). По этой причине были использованы длительные экспозиции от 25 до 102 минут.

Первичная стандартная обработка ПЗС-кадров, полученных на 1.25-м телескопе, проводилась с помощью собственных программ, написанных на языке Python. Экстракция спектров выполнялась путем суммирования отсчетов внутри заданной

<sup>2)</sup><http://basebe.obspm.fr/basebe/Accueil.php>

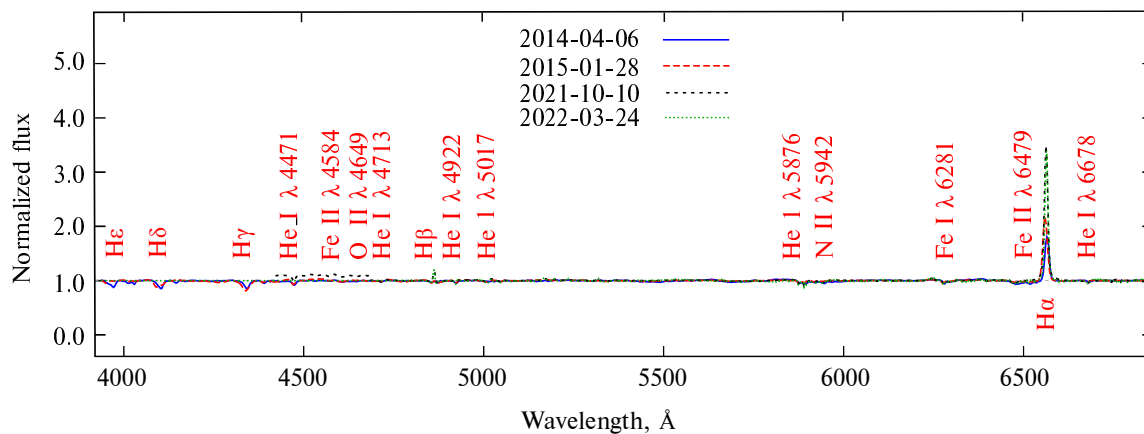


Рис. 1. Средние нормированные спектры HD 45995, полученные в разные эпохи наблюдений.

апертуры и вычитания фона неба, который определялся по участкам по обе стороны от объекта. Апертура принималась равной утроенной полной ширине на половине интенсивности ( $FWHM$ ), которая, в свою очередь, определялась с помощью аппроксимации вертикального профиля яркости вдоль щели гауссианой. В итоге ширина апертуры составляла 8–9 пикселей, что соответствует  $14''$ – $16''$ . Фон неба брался на расстоянии 12–13 пикселей ( $20''$ – $22''$ ) от центра звезды. Значение  $S/N$  большинства полученных спектров составляет 100–150. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием неон-аргоновой лампы.

По сравнению со спектрами с номерами 1–203 спектры 204–208, полученные на 1.25-м телескопе, оказались существенно хуже качеством, поэтому для дальнейшего анализа использовались только первые 203 спектра.

Первичная обработка и экстракция спектров, полученных на БТА, проводились в системе MIDAS с использованием контекста ZEEMAN (Kudryavtsev, 2000). При обработке спектров были задействованы стандартные процедуры: вычитание подложки ПЗС-матрицы (bias), вычитание рассеянного света, калибровка по длинам волн. На последнем этапе одномерные спектры были приведены к баррицентру Солнечной системы.

При калибровке по длинам волн для серии спектров использовался ближайший по времени спектр ThAg-лампы. Для нормировки спектров на континуум последний интерполировался кубическим сплайном при помощи пакета `spectool` среды IRAF<sup>3</sup>). Более подробно процесс обработки наблюдений, полученных на ОЗСП, описан в работах Kudryavtsev (2000), Semenko et al. (2017).

<sup>3</sup><http://iraf.noao.edu/projects/spectroscopy/spectool/spectool.html>

Первичная обработка и экстракция спектров, представленных в базе данных BeSS, проводилась с использованием пакетов обработки спектров ISIS<sup>4</sup>), AudeLA<sup>5</sup>), Spcaudace<sup>6</sup>) и Demetra<sup>7</sup>). Все спектры HD 45995, представленные в базе данных, получены и обработаны астрономами-любителями, поэтому к ним следует относиться с осторожностью.

Все полученные нами на 1.25-м телескопе и БТА, а также извлеченные из базы данных BeSS спектры были нормированы на континуум. Процедура нормировки описана в статье Kholtygin et al. (2006).

## 4. ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ HD 45995

### 4.1. Оптическая переменность

Среди спектров, извлеченных из базы данных BeSS, спектры низкого разрешения, полученные 06/04/2014, 28/01/2015 и 24/03/2022, охватывают большой интервал длин волн, включающий линии  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$  и другие линии бальмеровской серии водорода. Данные спектры в области длин волн 3920–6845 Å приведены на рис. 1 вместе со средним по всем индивидуальным спектрам звезды, полученным 2021/10/10 на 1.25-м телескопе Крымской станции ГАИШ.

Нормированные спектры HD 45995 на рис. 1 хорошо согласуются друг с другом, за исключением линий  $H\alpha$  и  $H\beta$ . Профили этих линий подвержены существенным вариациям как на коротких (часы и минуты), так и на длинных (годы) временных шкалах.

<sup>4</sup><http://www.astrosurf.com/buil/isis-software.html>

<sup>5</sup><http://audela.org/>

<sup>6</sup><http://spcaudace.free.fr/>

<sup>7</sup><https://www.shelyak.com/>

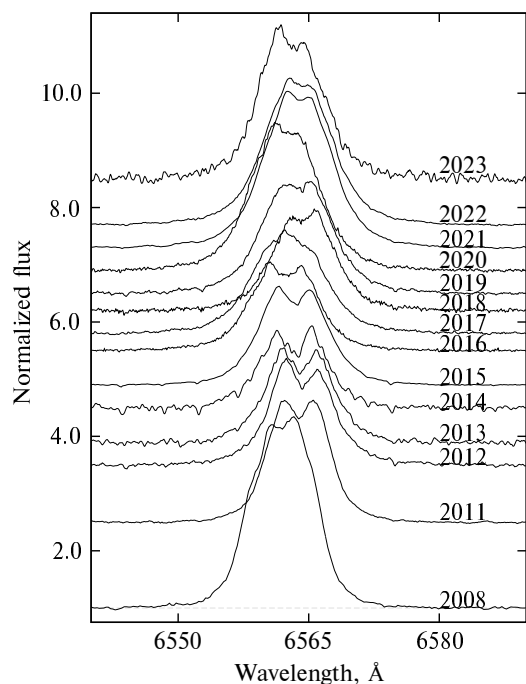


Рис. 2. Усредненные по годам профили линии  $H\alpha$  в спектрах HD 45995 из базы данных BeSS.

Переменность профиля линии  $H\alpha$  на длительных промежутках времени проиллюстрирована на рис. 2, на котором показаны профили линии  $H\alpha$  из базы данных BeSS, усредненные по всем годам наблюдений, за исключением 2008, 2014, 2016, 2018, 2021 и 2023 гг. Для указанных дат в базе данных имеется только по одному спектру за год.

Спектры, полученные в разные годы, были нормированы на локальный континуум и для наглядности сдвинуты по оси  $Y$ . Переменность, подобная переменности линии  $H\alpha$ , характерна и для линии  $H\beta$ , тогда как профили более высоких членов бальмеровской серии водорода являются абсорбционными и не имеют столь большой амплитуды переменности.

Форма профилей линии  $H\alpha$  соответствует ориентации диска звезды под малым углом к лучу зрения (см., например, Rivinius et al., 2013). Сравнение профилей, полученных в разные годы, показывает, что форма профилей практически не меняется, а меняются только максимальная интенсивность и эквивалентная ширина профиля, что означает неизменность ориентации околос звездного диска HD 45995.

При анализе вариаций профилей линий в спектре звезды целесообразно выбрать линии достаточной глубины и при этом без сильного блендирования. Исходя из этих принципов, мы выбрали линии  $H\alpha$  и  $H\beta$  и линии He I  $\lambda$  4471,  $\lambda$  4713,  $\lambda$  4922. Вариации профилей линий  $H\alpha$  и  $H\beta$  в спектрах HD 45995, полученных на 1.25-м телескопе,

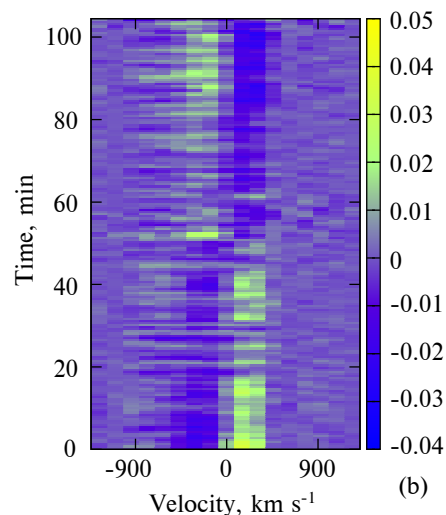
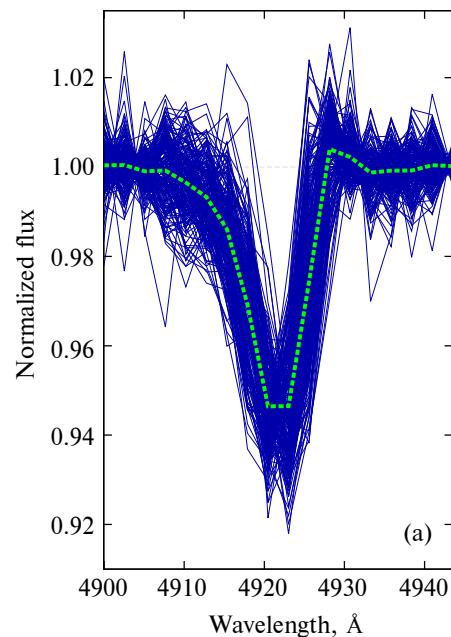


Рис. 3. Линия He I  $\lambda$  4922 в спектре HD 45995 по наблюдениям на 1.25-м телескопе Крымской станции ГАИШ МГУ: (a) — нормированные на континуум профили линии, пунктирной линией показан средний профиль; (b) — динамические спектры переменности профилей линии.

представлены на рис. 4 в статье Kholtygin et al. (2022). На рис. 3а иллюстрируются профили линии He I  $\lambda$  4922 в спектрах звезды, полученных на 1.25-м телескопе. В отличие от бальмеровских линий водорода линии He I в спектрах HD 45995 являются абсорбционными.

Амплитуда вариаций профилей линии  $H\alpha$  достигает 80% в единицах потока в соседнем с линией континууме, тогда как вариации профиля линии  $H\beta$  не превышают 15%. Амплитуда отклонений индивидуальных профилей линии He I  $\lambda$  4922 от ее среднего профиля (рис. 3а) не превышает 5%.

Для наглядного представления вариаций профилей линий определим разностные профили следующим соотношением:

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

где  $N$  — полное число спектров исследуемого объекта,  $F_i(\lambda)$  — 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 смещения  $V$  от лабораторной длины волны  $\lambda_0$  линии:  $V = c(\lambda/\lambda_0 - 1)$ , где  $c$  — скорость света.

На рис. 3b приведен динамический спектр вариаций профиля линии He I  $\lambda$  4922. Динамические спектры линий H $\alpha$  и H $\beta$  представлены на рис. 4 в статье Kholtygin et al. (2022). Анализ полученных динамических спектров свидетельствует о регулярном характере вариаций профилей.

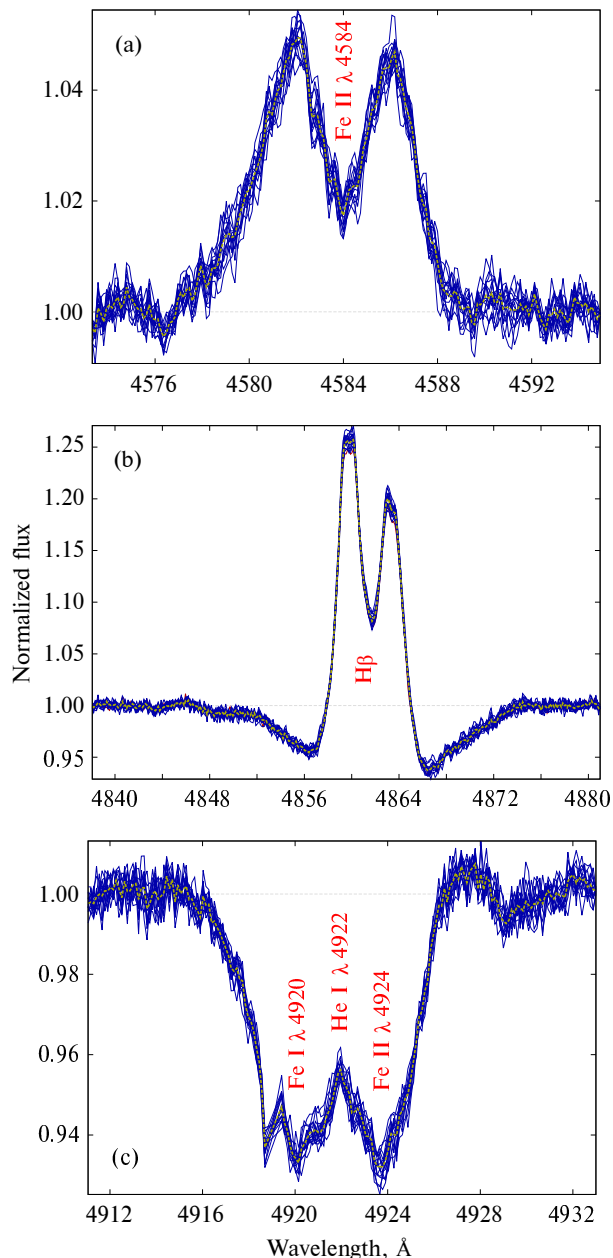
Спектры HD 45995, полученные на БТА со спектрографом ОЗСП, имеют существенно большее разрешение ( $R = 15\,000$ ), чем спектры с 1.25-м телескопа, что позволяет различить значительно больше деталей профилей. Это можно видеть на рис. 4, на котором показаны профили линий Fe II  $\lambda$  4584, H $\beta$  и He I  $\lambda$  4922, полученные на БТА.

Профили линий представляют собой наложение эмиссионного излучения околосредного диска на широкую ( $\pm 400$  км с $^{-1}$ ) абсорбционную линию излучения самой звезды. Абсорбционная подложка линии H $\beta$  дополнительно расширена электронным рассеянием в фотосфере. В центральной части эмиссионной компоненты хорошо видно поглощение излучения звезды веществом диска.

Особенностью спектров HD 45995 является наличие большого числа эмиссионных линий Fe II, типичный профиль которых представлен на рис. 4а, тогда как профили линий He I являются абсорбционными. Как видно из анализа рис. 4, эмиссионная компонента присутствует и в профиле линии He I  $\lambda$  4922. Подобные эмиссионные компоненты видны и в профилях других линий He I.

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.

На длительных временных шкалах эмиссия в линиях Fe II в спектре HD 45995 непостоянна. Так, Jaschek et al. (1969) отметили отсутствие эмиссии в этих линиях в 1943 и 1948 годах, что, возможно, связано с перестройкой структуры околосредного диска.



**Рис. 4.** Нормированные на континуум профили линий в спектре HD 45995: Fe II  $\lambda$  4584 (а), H $\beta$  (б) и He I  $\lambda$  4922 (с), полученные на БТА со спектрографом ОЗСП. Пунктирные линии — средние профили соответствующих линий.

#### 4.2. Регулярная переменность профилей линий в спектре HD 45995

Для поиска регулярных компонент в вариациях профилей линий в спектре HD 45995 нами был выполнен Фурье-анализ разностных профилей линий  $d(V)$ . Для каждой точки на профиле линии, соответствующей доплеровскому смещению  $V = V_k$ , совокупность значений  $d(V_k, t_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число анализируемых профилей, представляется собой анализируемый временной ряд.

**Таблица 3.** Частоты и периоды регулярных компонент вариаций профиля линии  $H\alpha$  в спектре HD 45995 по данным BeSS и регулярных компонент вариаций лучевой скорости  $V_{\text{rad}}$ , измеренной по профилю линии  $H\alpha$  согласно Nazé et al. (2022)

№	$\nu$ , дни <sup>-1</sup>	$P$ , дни	$\alpha$	Источник данных
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0.00265	$377.9 \pm 32.0$	$5E-3$	BeSS
2	0.00286	$350.3 \pm 27.5$	$2E-3$	BeSS
3	0.05168	$19.350 \pm 0.08$	$5E-3$	BeSS
4	0.25490	$3.923 \pm 0.003$	$1E-2$	BeSS
5	0.30141	$3.318 \pm 0.002$	$1E-3$	BeSS
6	0.00305	$327.8 \pm 102.5$	$1E-2$	$V_{\text{rad}}$
7	0.00296	$338.4 \pm 109.3$	$5E-3$	$V_{\text{rad}}$

**Таблица 4.** Частоты и периоды регулярных компонент вариаций профиля линии  $H\alpha$  в спектре HD 45995 по данным, полученным на 1.25-м телескопе и БТА

№	$\nu$ , days <sup>-1</sup>	$P$ , days	$\alpha$	H	He	Fe	Телескоп
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	16.54	$0.0604 \pm 0.0492$	$1E-3$	+	-	-	1.25-м
2	38.60	$0.0259 \pm 0.0092$	$1E-3$	+	-	-	1.25-м
3	107.0	$0.0093 \pm 0.0015$	$1E-2$	-	+	+	БТА
4	125.4	$0.0080 \pm 0.0011$	$5E-3$	+	+	+	БТА

Для поиска периодических компонент каждого из рядов для значений  $V_k$  в пределах профиля линии был использован метод 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 3 представлены найденные частоты (колонка 2) и периоды (колонка 3) возможных гармонических компонент вариаций профилей линии  $H\alpha$ , полученные на основе анализа спектров HD 45995, извлеченных из базы данных BeSS. Уровень значимости, соответствующий найденным компонентам, приведен в четвертой колонке таблицы 3.

Спектры, полученные 15/11/2008, 06/04/2014 и 28/01/2015, не были включены в анализ перио-

**Таблица 5.** Частоты и периоды периодических компонент вариаций блеска HD 45995 линии по данным TESS

№	$\nu$ , дни <sup>-1</sup>	$P$ , дни	2018/ 2019	2020/ 2021	Все данные
1	0.0697	$14.35 \pm 8.72$	-	+	-
2	0.1509	$6.63 \pm 1.86$	-	+	-
3	0.2554	$3.91 \pm 0.65$	-	+	-
4	1.0487	$0.954 \pm 0.038$	+	+	-
5	1.1844	$0.8443 \pm 0.0009$	+	+	+
6	2.0667	$0.484 \pm 0.010$	-	+	-
7	2.1286	$0.470 \pm 0.009$	-	+	-
8	2.1789	$0.459 \pm 0.009$	-	+	-
9	2.2552	$0.443 \pm 0.008$	+	-	-

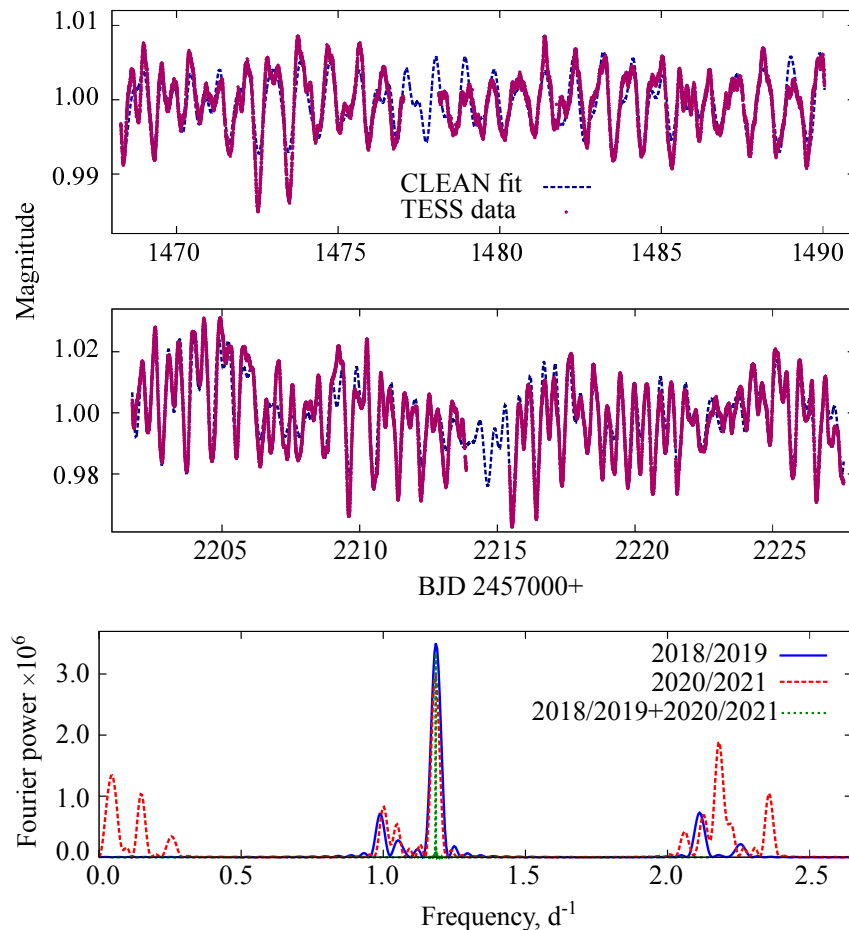
дичности вследствие слишком низкого их разрешения ( $R < 1000$ ), существенно отличного от разрешения остальных анализируемых спектров из базы данных BeSS.

Дополнительно в таблице 3 приведены частоты и периоды вариаций лучевой скорости HD 45995 (строки 6–7), рассчитанные по значениям  $V_{\text{rad}}$  для линии  $H\alpha$  из таблицы A3 (Nazé et al., 2022).

Для оценки ошибки найденных периодов было использовано стандартное соотношение  $\Delta\nu = 1/T$  согласно, например, Vityazev (2001), где  $T = 4455.87$  суток — полная длительность временного ряда наблюдений HD 45995 в базе данных BeSS и  $T = 1048.076$  суток — полный интервал времени измерений значений  $V_{\text{rad}}$ .

Полученные частоты и периоды не были ранее обнаружены при анализе спектральных и фотометрических вариаций HD 45995. Отметим соответствие в пределах ошибок измерений периодов вариаций профилей линии  $H\alpha$  и вариаций лучевой скорости  $V_{\text{rad}}$ , измеренной по профилю линии  $H\alpha$ . Природа вариаций с периодами около 300 суток неясна, однако можно предположить связь этих периодов с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}}$  ввиду их близости к значению  $3P_{\text{orb}} = 309.3$  суток.

Анализ вариаций профилей линий  $H\alpha$  и  $H\beta$  в спектрах HD 455995, полученных на 1.25-м телескопе, проведен Kholtygin et al. (2022). В первых двух строках таблицы 4 представлены частоты и периоды найденных регулярных компонент на уровне значимости  $\alpha = 10^{-3}$  (колонки (2) и (3) соответственно). Первая компонента имеет очень большие ошибки и ее реальность должна быть подтверждена более длительными наблюдениями. Выполненный в настоящей работе поиск регулярных компонент вариаций профилей линий He I и Fe II в спектрах HD 45995 не дал результатов,



**Рис. 5.** Кривые блеска TESS в 2018/2019 гг. (а) и в 2020/2021 гг. (б). Штриховыми линиями показана аппроксимация кривых блеска методом CLEAN. (с) — Фурье-периодограммы вариаций блеска для наблюдений в 2018/2019 гг. (сплошная линия), в 2020/2021 гг. (штриховая линия) и для полной кривой блеска (пунктир).

что отмечено знаком «—» в колонках (6) и (7) таблицы 4. В последней колонке таблицы 4 указан инструмент, на котором получены анализируемые спектры.

Аналогичным образом, как и в работе Kholtygin et al. (2022), сделан анализ вариаций профилей линий H, He I и Fe II в спектрах HD 45995, полученных на БТА. Обнаруженные регулярные компоненты вариаций профилей приведены в последних двух строках таблицы 4. Найденные периоды близки к типичным периодам быстрых вариаций профилей линий в спектрах OBA-звезд (см., например, Dushin et al., 2013; Kholtygin et al., 2018).

#### 5. TESS-ФОТОМЕТРИЯ И РЕНТГЕНОВСКИЕ КРИВЫЕ БЛЕСКА HD 45995

В настоящее время доступны фотометрические данные для OBA-звезд, полученные на спутнике TESS и описанные Jenkins et al. (2016). Звезда HD 45995 наблюдалась на TESS в две эпохи:

22 дня с 15/12/2018 до 06/01/2019 и 26 суток с 19/12/2020 до 13/01/2021. Данные фотометрии HD 45995 на TESS представлены на сайте TESS Data For Asteroseismology Lightcurves (TASOC)<sup>8</sup>. Извлеченные с сайта TASOC кривые блеска HD 45995 для указанных выше эпох представлены на рис. 5. Амплитуды вариаций блеска в эпоху 2020/2021 гг. более чем в два раза превосходят соответствующие величины в эпоху 2018/2019 гг.

С помощью методом CLEAN нами был выполнен анализ как отдельных фотометрических кривых блеска для первой (2018/2019 гг.) и второй (2020/2021 гг.) эпох, так и объединенной кривой блеска. На рис. 5с представлены соответствующие Фурье-периодограммы. Для удобства сравнения амплитуды Фурье-периодограмм для эпохи 2020/2021 гг. дополнительно умножены на 0,2, а

<sup>8</sup><https://archive.stsci.edu/hlsp/tasoc>

периодограммы объединенной кривой блеска — на 0.4. Все три периодограммы совпадают только для частоты  $\nu = 1.1844 \text{ d}^{-1}$ , соответствующей периоду вращения  $P = 0.8443 \pm 0.0009$  суток.

Найденные регулярные компоненты вариаций блеска даны в таблице 5. Весьма неожиданным оказалось то, что наборы частот (периодов) существенно различны для разных эпох. Совпадают только частоты компонент  $\nu_4$  и  $\nu_5$ , остальные компоненты значительно отличаются. Периоды компонент  $\nu_6$ – $\nu_9$  соответствуют типичным периодам нерадиальных пульсаций В-звезд (Dushin et al., 2013). В то же время природа компонент  $\nu_1$ – $\nu_3$  неясна. Возможно, эти компоненты связаны с прецессией околозвездного диска.

Отметим, что компоненты  $\nu_1$ – $\nu_3$  обнаруживаются только в эпоху 2020/2021 гг., что, вероятно, свидетельствует об их транзитной природе. Появление в кривой блеска в эту эпоху дополнительных периодических компонент  $\nu_1$ – $\nu_3$  привело к более чем двукратному увеличению амплитуды вариаций блеска. Эти компоненты могут, в принципе, носить инструментальный характер, например, вследствие дрейфа спутника.

На рис. 6 представлены профили линии  $\text{H}\alpha$  из базы данных BeSS в даты, максимально близкие к фотометрическим эпохам наблюдений TESS. Эквивалентная ширина линии в эпоху 2020/2021 гг. возрастает более чем в два раза по сравнению с ее эквивалентной шириной в эпоху 2018/2019 гг., как видно на рис. 6. Такое различие свидетельствует в пользу предположения о том, что увеличение амплитуды вариаций блеска в эпоху 2020/2021 гг. реально, а не связано с инструментальными эффектами.

Отметим, что 28/02/2022 в разных обсерваториях и на разных инструментах были получены два профиля линии  $\text{H}\alpha$ , разделенные по времени всего лишь тремя часами. Как видно из анализа рис. 6, эти профили весьма близки, а их различия могут быть связаны с более низким спектральным разрешением ( $R = 5000$ ) спектра, полученного на эпоху UT21<sup>h</sup>58<sup>m</sup>, в отличие от спектра, полученного в UT18<sup>h</sup>59<sup>m</sup> ( $R = 15\,000$ ). Таким образом, можно сделать вывод о возможности использования любительских спектров из базы данных BeSS для анализа вариаций профилей линий в спектре HD 45995.

Исследование рентгеновских спектров звезд ранних спектральных классов позволяет изучить структуру их звездных ветров и формирование горячего газа в них. Важным является то, что периоды вариаций профилей линий в спектрах некоторых из этих звезд соответствуют частотам вариаций их рентгеновского блеска (см., например,

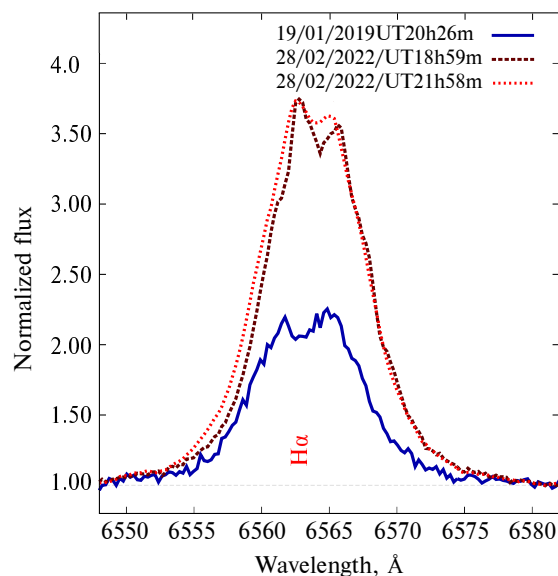


Рис. 6. Профили линии  $\text{H}\alpha$  в даты, близкие к эпохам наблюдения HD 45995 на спутнике TESS (указаны на рисунке).

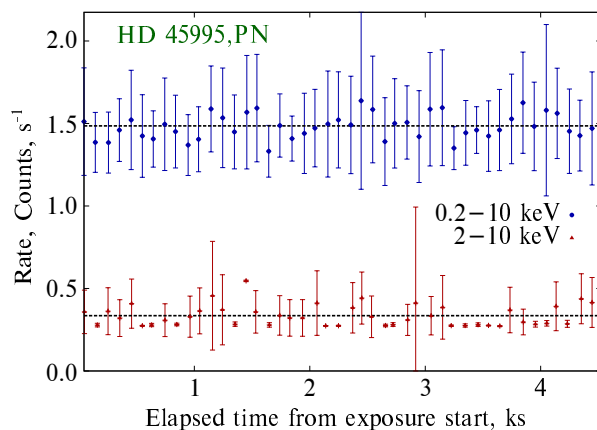


Рис. 7. Рентгеновские кривые блеска HD 45995 по наблюдениям на камере EPIC спутника XMM в областях энергий 0.2–10 кэВ и 2–10 кэВ, усредненные с шагом 100 с.

Kholtygin et al., 2022). Мы проанализировали архивные рентгеновские наблюдения HD 45995, которые выполнялись на спутнике XMM 24/09/2018 (ObsID = 820310401). Процедура обработки рентгеновских данных описана Rysraeva and Kholtygin (2021).

Полная длительность наблюдений HD 45995 составила 13 000 с (217 мин). К сожалению, значимые значения кривой блеска были получены только для промежутка в 4952 с (82.5 мин). Усредненная по интервалам времени 100 с кривая блеска по данным детектора PN приведена на рис. 7 отдельно для полной полосы наблюдений 0.2–10 кэВ и для более жесткого интервала энергий 2–10 кэВ.



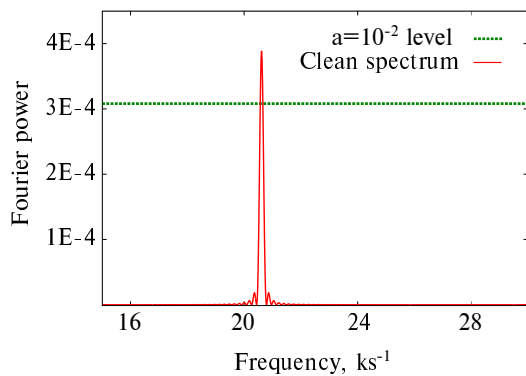


Рис. 8. Фурье-спектр мощности кривых блеска HD 45995 по наблюдениям на камере EPIC спутника XMM с детектором MOS1 в области энергий 0.2–10 кэВ.

Кривые блеска по данным детекторов MOS1 и MOS2 имеют аналогичный характер.

Результаты анализа кривой блеска методом CLEAN показали присутствие единственной регулярной компоненты с периодом  $P = 48.5 \pm 0.5$  с для данных, полученных с детектором MOS1 на уровне значимости  $\alpha = 0.01$  для полосы наблюдений 0.2–10 кэВ. Соответствующий Фурье-спектр мощности приведен на рис. 8. В данных детекторов MOS2 и PN и для интервала энергий 2–10 кэВ не было найдено никаких периодических компонентов.

Учитывая то, что указанная компонента найдена только по данным одного детектора и на не слишком малом значении уровня значимости, ее реальность должна быть подтверждена более длительными рентгеновскими наблюдениями.

Как показало моделирование рентгеновских спектров HD 45995, вклад жесткой части рентгеновского излучения в области 2–10 кэВ превышает 60% (Ryspaeva and Kholtygin, 2021). Спектр HD 45995 может быть представлен суммой теплового излучения с температурой  $kT = 2.94 \pm 1.05$  кэВ и степенной компоненты с фиксированным значением фотонного индекса  $G = 1.5$ . Вклад данной компоненты, свидетельствующей о присутствии нетеплового излучения в рентгеновском спектре HD 45995, в полную рентгеновскую светимость HD 45995 в интервале энергий 0.2–10 кэВ составляет 44.5%.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты исследования оптической и рентгеновской переменности звезды HD 45995 типа  $\gamma$  Cas. По результатам выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

- Профили линий в спектре HD 45995 переменны как на длительных (350–380 суток), так и на коротких (11–87 минут) временных интервалах.
- Анализ кривых блеска HD 45995, полученных на спутнике TESS, позволил уточнить период вращения звезды  $P = 0.8443 \pm 0.0009$  суток.
- В TESS кривых блеска HD 45995 присутствуют как компоненты с периодами 0.44–0.48 суток, типичными для нерадиальных пульсаций В-звезд, так и компоненты с периодами около 4–14 суток, природа которых неясна, но может быть связана со взаимодействием околозвездного диска с Ве-звездой. Возможна также инструментальная природа этих компонент.
- Характер фотометрической переменности по данным TESS существенно меняется для разных эпох наблюдения.
- В рентгеновских кривых блеска HD 45995 возможно присутствуют сверхбыстрые вариации с периодом  $P = 48.5 \pm 0.5$  с на уровне значимости  $\alpha = 10^{-2}$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО 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 данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. A. Abt, H. Levato, and M. Grosso, *Astrophys. J.* **573** (1), 359 (2002).
2. L. A. Balona and D. Ozuyar, *Astrophys. J.* **921** (1), id. 5 (2021).
3. J. C. Brown, J. P. Cassinelli, and M. Maheswaran, *Astrophys. J.* **688** (2), 1320 (2008).
4. G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 489 (2016).
5. V. V. Dushin, A. F. Kholtygin, G. A. Chuntunov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (2), 184 (2013).
6. Y. Fremat, J. Zorec, A. M. Hubert, and M. Floquet, *VizieR Online Data Catalog J/A+A/440/305* (2006).

7. J. H. Grunhut et al. (MiMeS Collab.), AIP Conf. Proc. **1429**, pp. 67–74 (2012).
8. S. Hubrig, I. Ilyin, A. F. Kholtygin, et al., *Astronomische Nachrichten* **338** (8), 926 (2017).
9. N. P. Ikonnikova, I. A. Shaposhnikov, V. F. Esipov, et al., *Astronomy Letters* **47** (8), 560 (2021).
10. M. Jaschek, C. Jaschek, and S. Malaroda, *Astron. and Astrophys.* **3**, 485 (1969).
11. J. M. Jenkins, J. D. Twicken, S. McCauliff, et al., SPIE Conf. Proc. **9913**, p. 99133E (2016).
12. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 471 (2018).
13. A. F. Kholtygin, T. E. Burlakova, S. N. Fabrika, et al., *Astronomy Reports* **50** (11), 887 (2006).
14. A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, et al., *Geomagnetism and Aeronomy* **62** (8), 1136 (2022).
15. D. O. Kudryavtsev, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Spec. Astroph. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2000), p. 84.
16. Y. Nazé, C. Motch, G. Rauw, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (2), 2511 (2020).
17. Y. Nazé, G. Rauw, S. Czesla, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510** (2), 2286 (2022).
18. C. Neiner, in *SF2A-2018: Proc. Annual Meeting French Soc. Astron. and Astroph.*, Eds. by P. Di Matteo, F. Billebaud, F. Herpin, N. Lagarde, J.-B. Marquette, A. Robin, O. Venot, (France, Bordeaux, 2018), p. 459.
19. C. Neiner, B. de Batz, F. Cochard, et al., *Astron. J.* **142** (5), article id. 149 (2011).
20. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
21. T. Rivinius, A. C. Carciofi, and C. Martayan, *Astron. and Astrophys.* **21**, article id. 69 (2013).
22. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
23. E. B. Ryspaeva and A. F. Kholtygin, *Open Astronomy* **30** (1), 132 (2021).
24. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, E. S. Semenova, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 384 (2017).
25. C. Soubiran, J.-F. Le Campion, N. Brouillet, and L. Chemin, *Astron. and Astrophys.* **591**, id. A118 (2016).
26. R. G. Vieira, A. C. Carciofi, J. E. Bjorkman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (3), 3071 (2017).
27. V. V. Vityazev, *Analysis of uneven timeseries* (SPbSU Press, St. Petersburg, 2001) [in Russian].
28. G. A. Wade, V. Petit, J. H. Grunhut, et al., *ASP Conf. Ser.* **506**, 207 (2016).
29. J. Zorec, Y. Frémat, and L. Cidale, *Astron. and Astrophys.* **441** (1), 235 (2005).

## Optical and X-ray Variability of $\gamma$ Cas: HD 45995 Stars

A. F. Kholtygin<sup>1</sup>, I. Ya. Yakunin<sup>1,2</sup>, M. A. Burlak<sup>3</sup>, and E. B. Ryspaeva<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034 Russia

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

<sup>3</sup> Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

<sup>4</sup> Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, 298409 Russia

The paper is devoted to the analysis of the variability of the  $\gamma$  Cas-type star HD 45995 in both optical and X-ray ranges. The variability of the line profiles of HD 45995 has been detected both for long (350–380 days) and short (11–87 minutes) time ranges. Based on the photometric light curves of HD 45995 obtained with the TESS satellite, we refined the rotation period of the star at  $P = 0.8443 \pm 0.0009$  days. These light curves reveal components with periods of about 11<sup>h</sup> typical for non-radial pulsations of B stars and components with periods of about 4–14 days, the nature of which is still unknown. We must note, that the latter components may be of an instrumental character, for example, due to the satellite drift. The pattern of the photometric variability, according to the TESS data, changes significantly for different observation epochs in 2018/2019 and 2020/2021. In the X-ray light curves of HD 45995, the presence of superfast variations with a period of  $P = 48.5 \pm 0.5$  seconds is suspected.

Keywords: stars: Be—stars: individual: HD 45995