АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, 2020, том 75, № 3, с. 322–332

УДК 524.3-563, 524.3-337, 524.35, 524.335.8

СВЕРХБЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ OBA ЗВЕЗД. III. A0 ЗВЕЗДА α^2 CVn, НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2020 А. Ф. Холтыгин[1*], А. В. Моисеева[2], И. А. Якунин[1,2], С. Хубриг[3]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

[2]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

[3]Потсдамский астрофизический институт (AIP), Потсдам, 14482 Германия

Поступила в редакцию 15 мая 2020 года; после доработки 8 июня 2020 года; принята к публикации 8 июня 2020 года

Настоящая работа является продолжением исследований сверхбыстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов. По наблюдениям со спектрографом ОЗСП 6-метрового телескопа БТА САО РАН, выполненным 5 января 2020 г., исследована переменность профилей линий в спектре химически пекулярной A0Vp звезды α^2 CVn. Обнаружены короткопериодические регулярные вариации линий Hβ, линий Fe II и Cr II с периодами приблизительно от 4 до 140 минут. Для всех выполненных наблюдений определено магнитное поле звезды. Измеренное среднее значение продольной компоненты магнитного поля за все время наблюдений примерно 600 Гс, что близко к получаемому по хорошо известной фазовой кривой магнитного поля.

Ключевые слова: *звезды:переменность, пульсации — звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные — звезды: индивидуальные: α^2 CVn*

1. ВВЕДЕНИЕ

В то время как переменность профилей линий в спектрах OBA звезд подробно исследована на шкалах времени от часов до дней (Dushin et al. 2013, Kaper et al. 1997, Kholtygin et al. 2003), вариации профилей на минутных и секундных шкалах до последнего времени остаются практически неизученными.

Открытие Hubrig et al. (2014) быстрых изменений профилей линий Si II и Fe II в спектрах A0 сверхгиганта HD 92207 на промежутках времени 1–2 минуты стимулировало наши исследования сверхбыстрой спектральной переменности звезд ранних спектральных классов на минутных шкалах времени.

Чтобы проверить, насколько широко распространены короткопериодические изменения профилей линий в спектрах OBA-звезд, мы проанализировали такие вариации с временным разрешением в минуты и доли минут при использовании спектрографа низкого разрешения (редуктора светосилы) SCORPIO 6-метрового телескопа БТА САО РАН (Afanasiev and Moiseev 2005), а также спектрополяриметра FORS 2 на 8-м телескопе VLT (Antu).

Обзор наблюдений, выполненных по программе поиска сверхбыстрых вариаций профилей в спектрах OBA-звезд, представлен в работах Batrakov et al. (2020), Tsiopa et al. (2020).

Kholtygin et al. (2017) представили результаты исследования сверхбыстрой переменности в спектре звезды HD 93521 (O9.5III) по наблюдениям на БТА САО РАН в 2015 г. Были зарегистрированы регулярные вариации с периодами 4–5 и 32–36 минут. Анализ профилей в спектре Be-звезды λ Eri, полученных на спектрополяриметре FORS2 (Hubrig et al. 2017), показал присутствие вариаций продольного компонента магнитного поля с периодом 13.6 минут. Такие же вариации обнаружены в профилях бальмеровских линий и линий He I.

Batrakov et al. (2019a; 2020), Kholtygin et al. (2018) представили результаты поиска быстрых вариаций в спектрах медленно вращающегося сверхгиганта ρ Leo (BIa). Обнаружены короткопериодические регулярные вариации линий H и He с периодами от 2 до 90 минут. Эта же звезда наблюдалась в октябре–ноябре 2019 г. на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ (Kholtygin et al. 2020b). Обнаружены короткопериодические вариации профилей линий на шкалах времени 15–25 минут.

*E-mail: afkholtygin@gmail.com

Анализ спектров A2 III гиганта γ UMi, полученных в январе 2017 г. на БТА с использованием спектрографа SCORPIO, показал присутствие гармонических компонент вариаций профилей линий с периодами в интервале 10–65 минут (Tsiopa et al. 2020).

Особый интерес представляет исследование химически пекулярной звезды и магнитного стандарта A0Vp звезды α^2 CVn. Несмотря на большое число публикаций, посвященных изучению этой звезды[1], ее переменность на коротких временных шкалах практически не исследована. Можно отметить только статью Kuvshinov and Plachinda (1983), в которой изучены вариации профилей линий в ядре линии Hγ и K линии Ca II. Сообщается об обнаружении нерегулярных вариаций профилей этих линий на шкалах времени от минут до часов.

В недавней статье (Kholtygin et al. 2020a) были проанализированы наблюдения α^2 CVn, выполненные 20/21 января 2015 г. на БТА со спектрографом SCORPIO. Обнаружены короткопериодические регулярные вариации бальмеровских линий и линий He с периодами примерно от 30 до 135 минут. С использованием оконного фурье-преобразования были обнаружены квазирегулярные транзиентные вариации профилей бальмеровских линий с периодами 3–6 минут.

В настоящей статье анализируются наблюдения α^2 CVn с временным разрешением 2–3 минуты, выполненные 6 января 2020 г. на БТА. Статья организована следующим образом. В разделе 2 описаны наблюдения и обработка спектров. Анализу вариаций профилей линий посвящен раздел 3. В разделе 4 представлены измерения магнитного поля звезды, а в разделе 5 — обсуждение полученных результатов. Выводы к статье изложены в разделе 6.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Химически пекулярная звезда α^2 CVn (HD 112413) является магнитным стандартом. Ее эффективная температура $T_{\rm eff} = 11320 \pm 600$ K (Sikora et al. 2019a) выше, чем типичная для A0-звезд Главной последовательности (примерно 9600 K). Весьма необычной особенностью звезды α^2 CVn является крайняя слабость ее рентгеновского излучения. Рентгеновские наблюдения на спутниках Chandra и XMM демонстрируют, что соответствующий поток $\lg L_{\rm X} < 26.0$ эрг/с, что на 3–4 порядка меньше типичных значений для звезд типа α^2 CVn (Robrade and Schmitt 2011).

Лучевая скорость α^2 CVn существенно меняется на промежутках времени более нескольких месяцев. Вариации лучевой скорости $V_{\rm rad}$, возможно, свидетельствуют о двойственности α^2 CVn и наличии маломассивного спутника (Romanyuk and Semenko 2007). Оценки лучевой скорости по наблюдениям САО РАН показывают, что период изменений $V_{\rm rad}$, вероятно, составляет 60 дней или больше.

Наблюдения звезды проводились на 6-м телескопе БТА в рамках программы «Микропеременность в OB-звездах» (ответственный заявитель — А. Ф. Холтыгин, СПбГУ) при помощи спектрографа ОЗСП (Panchuk et al. 2014) с использованием анализатора круговой поляризации (Chountonov 2007; 2016) и резателя изображений. Для устранения инструментальной поляризации циркулярно поляризованные спектры снимались попарно в двух положениях фазовой пластинки, изменяющей плоскость поляризации на 90°. Данная процедура позволяет последовательно получить ортогонально поляризованный сигнал на одних и тех же пикселах ПЗС-премника. Также для контроля получаемых значений были отсняты стандарты величины магнитного поля (обычно это звезды с хорошо известной магнитной фазовой кривой) и нулевой поляризации.

Первичная обработка и экстракция спектров 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, после чего одномерные спектры были приведены к барицентру Солнечной системы. При калибровке по длинам волн для серии спектров использовался ближайший по времени спектр ThAr-лампы. Для нормировки спектров на континуум последний интерполировался кубическим сплайном при помощи пакета spectool среды IRAF[2]. Более подробно процесс обработки наблюдений, полученных на ОЗСП, описан в работах Kudryavtsev (2000), Semenko et al. (2017).

Спектральное разрешение составляло около 15 000 (размер щели 0″.5), диапазон регистрируемых длин волн — 4425–4982 Å, средний S/N — приблизительно 700. В ходе наших наблюдений (полный интервал составил 156 минут) был получен 71 спектр звезды с одновременно регистрирумемыми левой и правой циркулярными поляризациями, экспозицией по 90 секунд каждый. Временное разрешение на один спектр с учетом считывания ПЗС-детектора — около 130 секунд.

[1] 637 ссылок в ADS на 22 апреля 2020 г.

[2] http://iraf.noao.edu/projects/spectroscopy/spectool/spectool.html

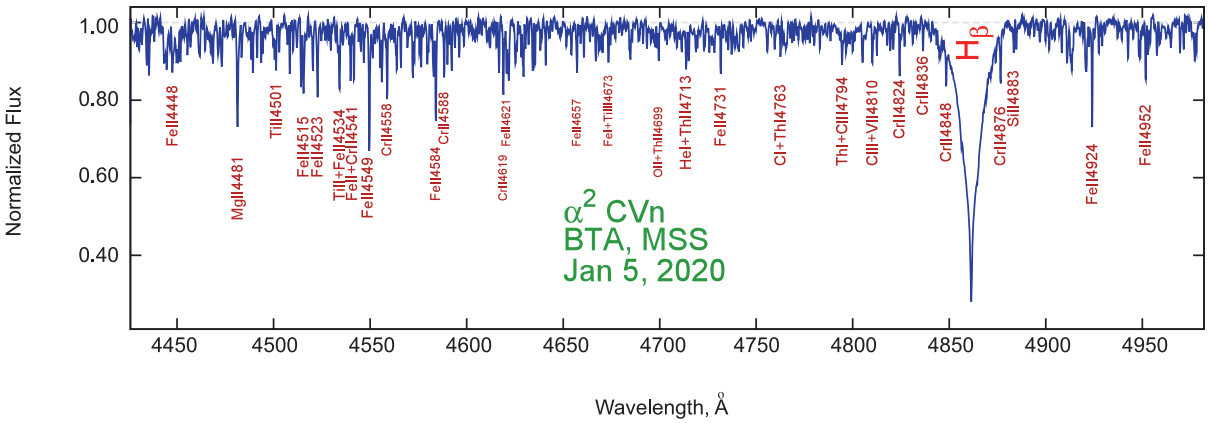

Рис. 1. Средний нормированный спектр α^2 CVn. Обозначены линии, которые исследовались на переменность профилей.

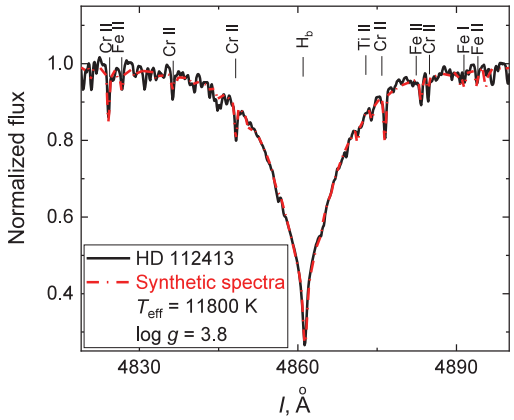

Рис. 2. Синтетический профиль линии Hβ

На рис. 1 показан нормированный на континуум полный спектр звезды α^2 CVn, усредненный по всем 71 наблюдениям на ОЗСП:

$$F(\lambda) = F_{\rm L}(\lambda) + F_{\rm R}(\lambda), \qquad (1)$$

где $F_{\rm L}(\lambda)$ — нормированная на континуум средняя интенсивность лево-поляризованной компоненты спектра, а $F_{\rm R}(\lambda)$ — право-поляризованной.

2.1. Модельный профиль линии Hβ

Для уточнения параметров α^2 CVn и определения лучевой скорости звезды был построен ее синтетический спектр с использованием ЛТР-моделей программы ATLAS9 (Kurucz 1993). Полученный нами синтетический профиль линии Hβ в сравнении с усредненным по всем полученным спектрам наблюдаемым профилем представлен на рис. 2. Параметры модели были взяты из статьи Kochukhov et al. (2002). Для лучшего согласия модельного и наблюдаемого профилей линии значение логарифма ускорения силы тяжести $\lg g = 4.02$, приведенное в таблице 3 статьи Kochukhov et al. (2002), было уменьшено до 3.8.Отметим, что как профиль самой линии Hβ, так и модельные профили слабых линий Cr II λ4848.24 и λ4876.39731 описываются с очень хорошей точностью.

Лучевые скорости $V_{\rm rad}$, определенные из сравнения модельного и наблюдаемого профилей линии Hβ по полученным нами спектрам α^2 CVn, представлены в последней колонке таблицы 1.

2.2. Учет инструментальных эффектов

При анализе быстрой спектральной переменности необходим аккуратный учет инструментальных погрешностей, которые неизбежно возникают вследствие термальной и вибрационной нестабильности прибора. Проблема позиционной стабильности ОЗСП неоднократно исследовалась (см. например, Chountonov and Najdenov 2009, Klochkova et al. 2008, Panchuk et al. 2014). В работе Panchuk et al. (2014) демонстрируется характер долговременного смещения спектра на интервале около полутора суток. Наряду с долговременными «уходами» спектра отмечены и быстрые изменения его положения. Эффекты, связанные с нестабильностью оптико-механической конструкции ОЗСП, и методика их минимизации описаны в статье Klochkova et al. (2008), а результаты исследования термальной стабильности приведены в препринте САО (Panchuk et al. 2007).

Были обнаружены смещения положений спектральных линий на 10 мкм/час. Характерные изменения положения спектра со временем в текущей

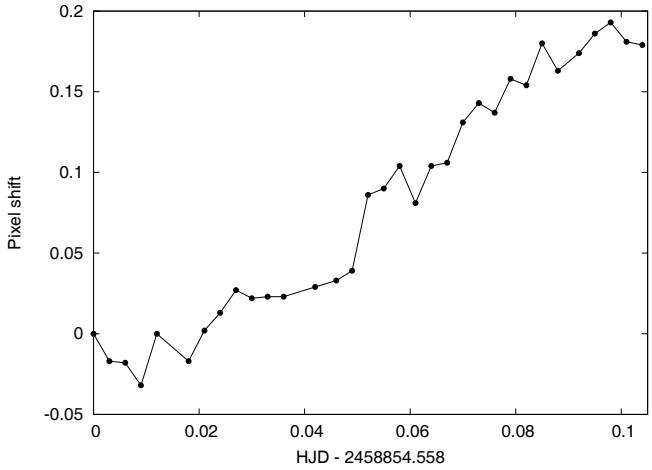

Рис. 3. Сдвиги спектров в шкале пикселей ПЗС-приемника спектрографа ОЗСП.

конфигурации ОЗСП с анализатором круговой поляризации и резателем изображений представлены на рис. 1 в работе Chountonov and Najdenov (2009). Видно, что дрейф смещения линеен и не превышает 0.3 пиксела за 2.5 часа. С учетом всего вышесказанного средняя точность определения лучевых скоростей спектральных линий по спектрам ОЗСП равна 1.5–2 км с$^{-1}$.

Для установления величины инструментального дрейфа спектральных линий в течение текущей серии наблюдений нами был проведен кросс-корреляционный анализ каждого последующего спектра с первым. Результаты измерения сдвигов спектров в шкале пикселей ПЗС-приемника показаны на рис. 3. Видны как долговременный линейный дрейф, так и кратковременные колебания. Общий сдвиг между первым и последним спектром серии составляет 0.18 пиксела. Кроме того, мы использовали полученные в начале и в конце серии спектры калибровочной лампы, интервал между которыми составил 2 часа 40 минут. Кросс-корреляция показала относительный сдвиг двух спектров величиной 0.194 пиксела. Обнаруженное долговременное изменение лучевых скоростей является главным образом инструментальным, что было учтено при дальнейшем анализе спектров α^2 CVn.

3. ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

При анализе вариаций профилей в спектре звезды целесообразно рассматривать линии достаточной глубины и при этом без сильного блендирования. Исходя из этих принципов, мы выбрали 6 линий: Mg II 4481, Fe II 4549, Fe II 4584, Cr II 4824, Fe II 4924 и Hβ.

Для иллюстрации на рис. 4 приведены все полученные нами профили линий Fe II 4549 и Fe II 4924

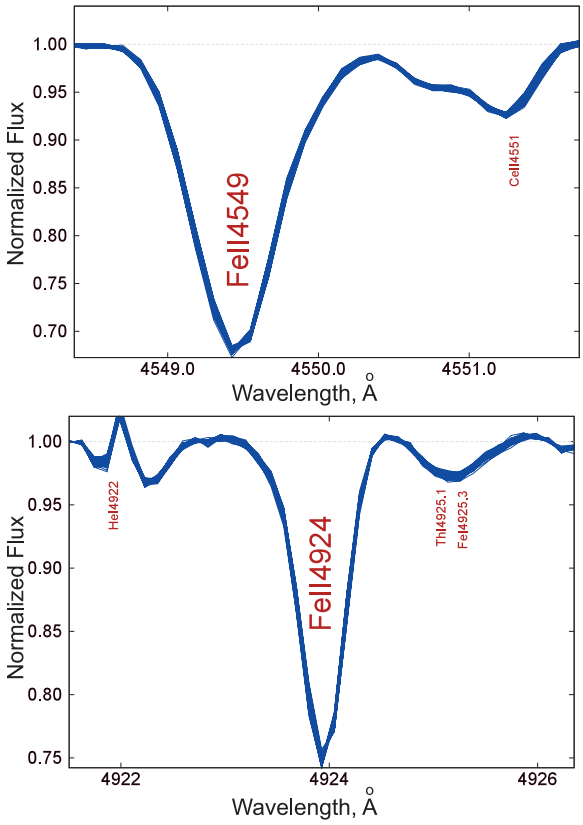

Рис. 4. Профили линий Fe II 4549 (a) и Fe II 4924 (b) всех 71 спектров α^2 CVn. Вариации индивидуальных профилей настолько малы, что они сливаются в один профиль, накладываясь друг на друга.

в спектре α^2 CVn. Их отклонения от средних профилей показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, амплитуда вариаций не превышает 1.5%. Изменения профилей линий могут быть связаны с вариациями поля скоростей в атмосфере звезды, например, вследствие нерадиальных пульсаций.

Обращает на себя внимание то, что амплитуда вариаций профиля линии Hβ (рис. 5, внизу) существенно меньше, чем амплитуды вариаций профилей линий Fe II 4549 и Fe II 4924, а также узких линий Fe II и Cr II внутри профиля линии Hβ (см. рис. 1–2). Можно предположить, что такие различия связаны с неоднородностью радиального распределения элементов (Silvester et al. 2014).

3.1. Регулярные компоненты вариаций профилей линий

Для поиска регулярных компонентов вариаций профилей определим разностные профили линий. Пусть в результате проведенных наблюдений получено N спектров исследуемого объекта. Обозначим через $F_i(\lambda)$, $i = 1, \ldots, N$ — нормированный на континуум поток в i–м спектре звезды на длине

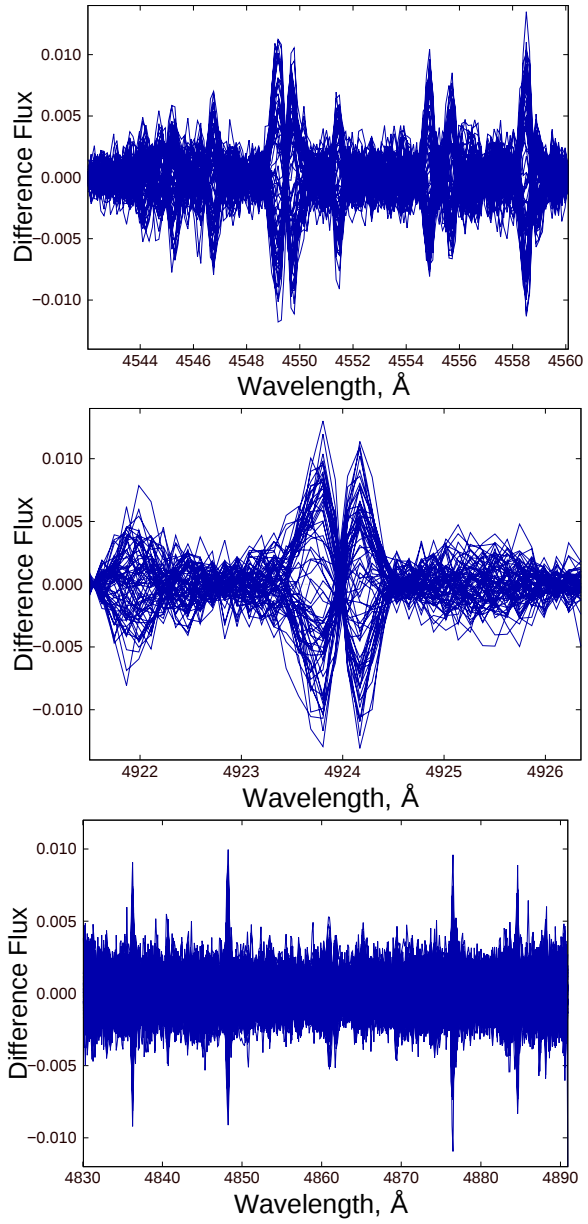

Рис. 5. Отклонения профилей линий Fe II 4549, Fe II 4924 и Hβ от соответствующих средних профилей (сверху–вниз).

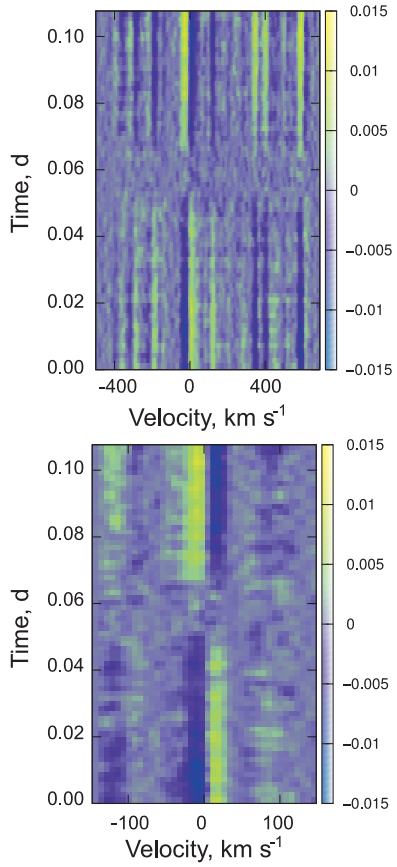

Рис. 6. Динамический спектр вариаций профиля линия Fe II 4549 (вверху) и Fe II 4924 (внизу).

волны λ. Пусть $\overline{F}_i(\lambda)$ — средний по всем наблюдениям поток на длине волны λ. Тогда разностный профиль линии

$$d(\lambda) = F_i(\lambda) - \overline{F}_i(\lambda). \qquad (2)$$

При анализе разностных профилей удобнее использовать вместо длины волны доплеровские смещения V относительно лабораторной длины волны λ_0 линии $V = c(\lambda/\lambda_0 - 1)$, где c — скорость света.

При существенном различии качества спектров следует при расчете среднего и разностных профилей линий использовать разные веса профилей g_i, пропорциональные квадрату отношения сигнал/шум в области континуума вблизи линии. Однако, так как во всех анализируемых нами профилях отношения сигнал/шум близки, можно положить $g_i = 1$.

На рис. 6 представлен динамический спектр вариаций профилей линий Fe II 4549 и Fe II 4924 в спектре α^2 CVn. Видны регулярные изменения профилей линий со временем. Можно заметить, что как для линии Fe II 4549, так и для соседних с нею линий Ti II, Cr II, Fe I и Fe II вариации профилей когерентны, что свидетельствует об едином механизме их переменности.

Поиск периодических компонент вариации профилей линий в спектре α^2 CVn нами был выполнен при использовании метода CLEAN Фурье-анализа (Roberts et al. 1987). Фурье-спектры вариаций разностных профилей линий Fe II 4549 и Cr II 4824 и Hβ (периодограммы) представлены на рис. 7 для уровня значимости $\alpha = 10^{-3}$.

В фурье-спектре присутствуют регулярные компоненты частот максимумов его амплитуды, которые превышают значение отсчета периодограммы белого шума, соответствующее выбран-

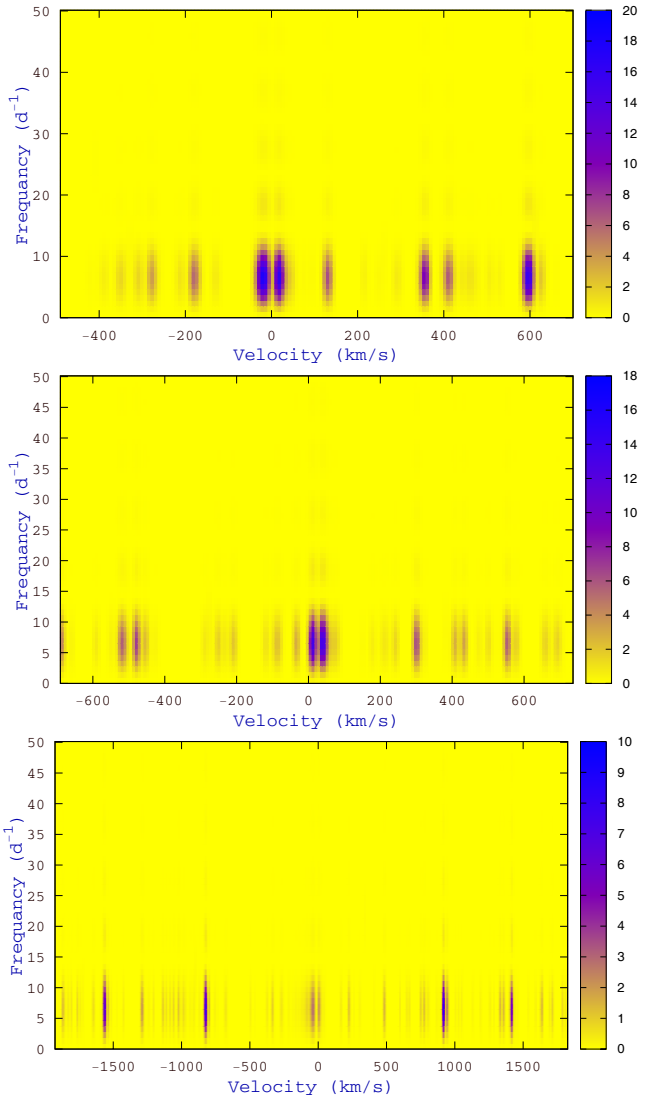

Рис. 7. Фурье-спектры вариаций профиля линии Fe II 4549, Cr II 4824 и Hβ (сверху-вниз).

ному уровню значимости. В таблице 1 представлены найденные частоты и периоды возможных гармонических компонент вариаций профилей анализируемых линий для уровней значимости $\alpha = 10^{-2}$–10^{-5}.

Для оценки сверху ошибки $\Delta\nu$ частот регулярных компонентов фурье-спектра использовалось выражение $\Delta\nu \leq 1/T$ (Vityazev 2001), где $T = 156$ минут — полная длительность наблюдений. Близкие компоненты фурье-спектра с разностью частот меньше $\Delta\nu$ считались одной компонентой с частотой, соответствующей среднему значению частот таких компонент.

Знак + в таблице 1 указывает, что соответствующая компонента в фурье-спектре присутствует, а знак – — то, что на данном уровне значимости она не обнаружена, хотя при большем уровне значимости может быть зарегистрирована.

С целью исключения компонент, соответствующим случайным выбросам периодограмм, в таблице 1 включены только компоненты фурье-спектра, обнаруженные в вариациях профилей не менее чем двух линий.

В предпоследнем столбце таблицы представлены частоты регулярных компонент вариаций профилей в спектре α^2 CVn по наблюдениям на БТА САО РАН в 2015 г. со спектрографом SCORPIO (Kholtygin et al. 2020a). Для всех найденных компонент в последнем столбце таблицы указаны соответствующие уровни значимости.

Компоненты ν_1–ν_4 соответствует периодам P, которые превосходят полную длительность наблюдений 156 минут. Для подтверждения их присутствия необходимы более длительные наблюдения. Регулярные вариации профилей линий в спектрах OB-звезд с периодами, близкими к периодам компонент ν_1–ν_4 с $P = 3^{\rm h}$–$6^{\rm h}$, связаны, вероятнее всего, с нерадиальными пульсациями звезды в квадрупольной ($l = 2$) и более высоких модах пульсаций (Pamyatnykh 1999). Обнаружение изменений профилей линий в области коротких периодов $P = 15$–$140^{\rm m}$ может свидетельствовать о присутствии высоких мод нерадиальных пульсаций с $l = 6$–12.

Три регулярных компоненты вариации профилей, ν_5, ν_7 и ν_8 в области частот $\nu > 10\,{\rm d}^{-1}$ соответствуют (с учетом ошибок) компонентам 135 ± 164 минут, 52 ± 25 минут и 17.7 ± 2.8 минут, обнаруженным в работе Kholtygin et al. (2020a), что подтверждает их реальность.

Использование оконного фурье-преобразование показало наличие в вариациях профилей линий в спектре α^2 CVn короткопериодических регулярных компонент с переменной частотой в интервале периодов 4.5–5.6 минут (Kholtygin et al. 2020a). Обнаруженная нами компонента ν_{10} соответствует данному интервалу частот.

Присутствие компонент вариаций профилей линий со столь короткими периодами в спектре HD 93521 было нами ранее интерпретировано как свидетельство существования высоких мод НРП с $l = 20$–60 (Kholtygin et al. 2017). Такая же интерпретация возможна для короткопериодических вариаций профилей в спектре α^2 CVn.

4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ α^2 CVn

Все спектры α^2 CVn были нами получены с использованием анализатора круговой поляризации, что позволяет оценить магнитное поле звезды. Для увеличения точности определения величины

Таблица 1. Частоты (в d^{-1}, колонка 2) и периоды (в минутах, колонка 3) регулярных компонент вариаций профилей в спектре α^2 CVn. Знак + в колонках 4–9 указывает, что данная компонента обнаружена в вариациях профиля линии, знак –, что не обнаружена. В колонке 10 указаны периоды вариаций профилей, найденные в работе Kholtygin et al. (2020a). В последней колонке указаны уровни значимости найденных компонент Фурье-спектра. Горизонтальная линия отделяет компоненты с периодами большими полной длительности наблюдений

№	ν (d^{-1})	P (мин)	Mg II 4481	Fe II 4549	Fe II 4584	Cr II 4824	Hβ	Fe II 4924	*	α
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	5.57 ± 9.23	259 ± 429	+	+	+	+	+	+	–	10^{-5}
2	6.50 ± 9.23	222 ± 315	+	+	+	+	+	+	–	10^{-5}
3	7.42 ± 9.23	194 ± 241	+	+	+	+	+	+	–	10^{-5}
4	8.35 ± 9.23	172 ± 190	+	–	–	+	+	–	–	10^{-5}
5	10.67 ± 9.23	135 ± 116	–	+	–	–	+	–	135 ± 164	10^{-2}
6	15.31 ± 9.23	94.0 ± 56.7	+	+	–	–	–	–	–	10^{-2}
7	26.91 ± 9.23	53.5 ± 18.3	+	+	–	–	+	–	52 ± 25	10^{-2}
8	86.31 ± 9.23	16.7 ± 1.8	–	–	–	–	+	+	17.7 ± 2.8	10^{-2}
9	111.37 ± 9.23	12.9 ± 1.1	–	–	+	+	+	–	–	10^{-2}
10	288.64 ± 9.23	4.99 ± 0.16	+	–	+	–	–	–	4.5–5.6	10^{-2}

* Kholtygin et al. (2020a)

параметра Стокса V были использованы последовательные наблюдения с разными углами поворота четвертьволновой пластинки:

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{2}\left\{\left(\frac{I^o - I^e}{I^o + I^e}\right)_{-45^\circ} - \left(\frac{I^o - I^e}{I^o + I^e}\right)_{+45^\circ}\right\}, \quad (3)$$

где I^o — интенсивность обыкновенного, а I^e — необыкновенного излучения.

Для определения величины продольной компоненты магнитного поля, усредненной по диску звезды (эффективного магнитного поля B_e), использовались два способа: 1) модифицированный метод Бэбкока, основанный на измерениях сдвигов центров тяжести (centers of gravity (cog)) поляризованных по кругу компонент линий (Borra and Landstreet 1973), и 2) метод регрессии, основанный на исследовании круговой поляризации спектральных линий (Hubrig et al. 2014) с использованием стандартного соотношения:

$$\frac{V}{I} = -\frac{g_{\rm eff} e}{4\pi m_e c^2}\lambda^2 \frac{1}{I}\frac{dI}{d\lambda} B_e, \quad (4)$$

где $g_{\rm eff}$ — эффективный фактор Ланде линии, λ — ее длина волны, e — заряд, m_e — масса электрона, I — неполяризованная интенсивность линии. Производная $dI/d\lambda$ вычисляется численно.

Значение величин B_e, полученных методами центра тяжести ($B_e^{\rm cog}$) и регрессии ($B_e^{\rm regr}$) и соответствующие стандартные отклонения представлены в таблице 2.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. Влияние инструментальных эффектов и атмосферной переменности на вариации профилей линий

Весьма важен вопрос, насколько найденные регулярные компоненты вариаций профилей в спектре α^2 CVn могут быть связаны с инструментальными эффектами и, в том числе, с колебаниями как самого телескопа, так и приемника излучения. Анализ большого массива наблюдений на БТА САО РАН показал, что колебания самого телескопа, скорее всего, нерегулярны и происходят на шкалах времени, не совпадающими с обнаруженными нами периодами (подробнее о причинах позиционных нестабильностей БТА можно найти, например, в работе Klochkova et al. (2008)). Что касается инструментального дрейфа спектральных линий, рассмотренного в разделе 2.2, то анализ вариаций лучевой скорости, представленных на рис. 3, показал, что после устранения тренда в вариациях $V_{\rm rad}$ присутствует маргинальный (уровень значимости $\alpha > 0.01$) период около 100 минут, не совпадающий ни с одним из периодов, представленных в таблице 1.

Отметим, что совпадение найденных нами периодов вариаций профилей линий в спектре α^2 CVn

Таблица 2. Результаты измерения магнитного поля и лучевой скорости α^2 CVn

MJD	Phase $P=5^{\mathrm{d}}.49800$	Phase $P=5^{\mathrm{d}}.46939$	Phase $P=5^{\mathrm{d}}.43730$	B_e^{cog}, Гс	B_e^{regr}, Гс	V_{rad}, км с$^{-1}$
58854.058	0.7308	0.8219	0.8850	-662 ± 29	-628 ± 11	-0.31 ± 2.00
58854.061	0.7314	0.8225	0.8855	-752 ± 30	-682 ± 10	-0.24 ± 1.90
58854.064	0.7319	0.8230	0.8861	-677 ± 32	-621 ± 11	-0.39 ± 1.90
58854.067	0.7324	0.8236	0.8866	-624 ± 31	-558 ± 11	-0.36 ± 2.10
58854.070	0.7330	0.8241	0.8872	-732 ± 33	-659 ± 10	-0.12 ± 1.80
58854.076	0.7341	0.8252	0.8883	-676 ± 40	-647 ± 11	-0.30 ± 1.90
58854.079	0.7346	0.8258	0.8888	-684 ± 38	-599 ± 13	-0.09 ± 2.10
58854.082	0.7352	0.8263	0.8894	-643 ± 31	-595 ± 11	-0.09 ± 2.00
58854.085	0.7357	0.8269	0.8899	-616 ± 30	-574 ± 10	-0.01 ± 2.00
58854.088	0.7363	0.8274	0.8905	-679 ± 28	-625 ± 10	-0.04 ± 1.90
58854.091	0.7368	0.8280	0.8910	-679 ± 26	-635 ± 10	0.06 ± 1.80
58854.094	0.7374	0.8285	0.8916	-766 ± 35	-667 ± 10	0.08 ± 1.90
58854.100	0.7385	0.8296	0.8927	-693 ± 28	-660 ± 10	-0.02 ± 2.10
58854.104	0.7392	0.8303	0.8932	-680 ± 29	-618 ± 10	0.09 ± 2.00
58854.107	0.7397	0.8309	0.8938	-732 ± 33	-627 ± 10	0.21 ± 2.00
58854.110	0.7403	0.8314	0.8943	-659 ± 31	-586 ± 11	0.28 ± 1.90
58854.113	0.7408	0.8320	0.8949	-638 ± 32	-579 ± 11	0.33 ± 1.80
58854.116	0.7414	0.8325	0.8954	-605 ± 30	-540 ± 10	0.46 ± 1.90
58854.119	0.7419	0.8331	0.8960	-647 ± 33	-574 ± 10	0.30 ± 2.10
58854.122	0.7425	0.8336	0.8965	-711 ± 41	-654 ± 11	0.47 ± 2.00
58854.125	0.7430	0.8342	0.8971	-785 ± 33	-699 ± 12	0.57 ± 2.00
58854.128	0.7435	0.8347	0.8976	-728 ± 36	-637 ± 12	0.74 ± 1.90
58854.131	0.7441	0.8353	0.8982	-672 ± 36	-568 ± 11	0.84 ± 1.80
58854.134	0.7446	0.8358	0.8988	-603 ± 34	-585 ± 11	0.69 ± 1.90
58854.137	0.7452	0.8364	0.8993	-705 ± 34	-622 ± 11	0.87 ± 2.10
58854.140	0.7457	0.8369	0.8999	-701 ± 33	-635 ± 12	0.83 ± 2.00
58854.143	0.7463	0.8375	0.9004	-674 ± 32	-594 ± 12	1.01 ± 2.00
58854.146	0.7468	0.8380	0.9010	-757 ± 30	-653 ± 11	0.76 ± 1.90
58854.150	0.7475	0.8388	0.9019	-731 ± 34	-655 ± 11	0.91 ± 1.80
58854.153	0.7481	0.8393	0.9024	-702 ± 31	-632 ± 12	0.89 ± 1.90
58854.156	0.7486	0.8399	0.9030	-740 ± 28	-698 ± 11	0.94 ± 2.10
58854.159	0.7492	0.8404	0.9035	-728 ± 30	-679 ± 11	0.91 ± 2.00
58854.162	0.7497	0.8409	0.9041	-769 ± 33	-700 ± 13	0.82 ± 2.00

с полученными в работе Kholtygin et al. (2020a) с использованием другого спектрографа SCORPIO с другим набором собственных колебаний также свидетельствует о реальности этих периодов. Набор частот и периодов вариаций профилей, полученных при анализе профилей линий разных OBA-звезд (см. ссылки во введении), существенно различен, что говорит об отсутствии связи детектированных в настоящей работе периодов вариаций профилей с конкретными особенностями используемых инструментов.

Следует также отметить, что некоторый вклад в вариации профилей линий в спектре может, в принципе, внести спорадическое изменение размера турбулентного диска звезды из-за атмосферных флуктуаций. Однако трудно ожидать, что вариации профилей линий, вызванные влиянием атмосферных флуктуаций будут сколько-нибудь регулярными. В то же время влияние таких флуктуаций на нерегулярные вариации профилей полностью исключить нельзя, что следует учитывать при анализе. Кроме того, при использовании резателя изображений, как в нашем случае, подобный эффект минимизируется.

5.2. Период вращения α^2 CVn и фазовая кривая магнитного поля

Период вращения α^2 CVn определен еще в работе Farnsworth (1932), $P = 5.46939$ d. В последующих исследованиях период был немного уточнен. Согласно, например, Sikora et al. (2019b) $P = 5.46913$ d. В последнее время стали доступны фотометрические наблюдения α^2 CVn спутника TESS (Jenkins et al. 2016) в течение 27 дней.

Анализ этих данных методом CLEAN дает значение $P = 5.43730 \pm 0.470$ d, что соответствует значениям, полученным другими авторами. Для уточнения периода необходимо анализировать более длительные ряды наблюдений. Ввиду некоторой неопределенности в определении периода вращения α^2 CVn мы варьировали значения периода в пределах ошибок его определения.

В колонках 3–5 таблицы 2 представлены фазы вращения α^2 CVn для периодов вращения $P = 5.46939$ d, $P = 5.49800$ d и $P = 5.43730$ d. Результаты нашего анализа показывают, что полученное из анализа наблюдений на спутнике TESS значение периода $P = 5.43730$ d позволяет лучше описать зависимость эффективного магнитного поля B_e от фазы вращения звезды (фазовую кривую).

Фазовая кривая для значения $P = 5^{\mathrm{d}}.43730$ представлена на рис. 8. Значения B_{e}, взятые из работ Gerth et al. (1999), Romanyuk et al. (2016; 2018), дополнены величинами, полученными

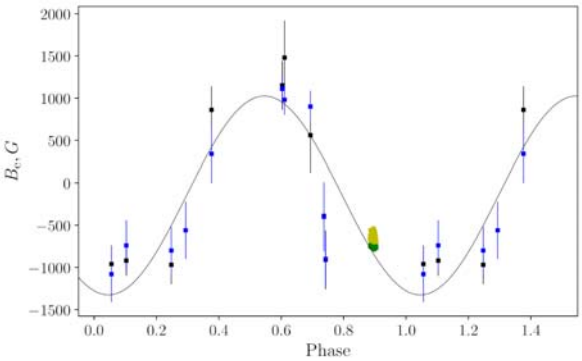

Рис. 8. Фазовая кривая эффективного магнитного поля B_e, α^2 CVn с фазами, соответствующими периоду вращения $P = 5.43730$ d. Значения B_e, полученные в настоящей работе, показаны зелеными (метод центра тяжести) и желтыми (метод регрессии) точками.

в настоящей работе. Определенные нами значения продольного магнитного поля хорошо ложатся на фазовую кривую. Средняя величина всех измеренных нами значений продольного магнитного поля $B_{\mathrm{e}} = 600 \pm 56$ Гс.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы вариации профилей линий в спектре звезды α^2 CVn с временным разрешением 2–3 минут по спектрополяриметрическим наблюдениям на БТА со спектрографом ОЗСП. Обнаружены регулярные компоненты вариаций профилей с периодами примерно 5–140 минут. Возможно присутствие более длинных регулярных компонент.

Определен период вращения α^2 CVn с использованием фотометрических данных спутника TESS, $P = 5.43730 \pm 0.470$ d. Измеренные значения магнитного поля соответствуют фазовой кривой магнитного поля для α^2 CVn.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи признательны И. И. Романюку за советы и рекомендации, способствующие улучшению текста статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

АХ и АМ благодарны гранту РФФИ 19-02-00311 А за поддержку. ИЯ выражает благодарность проекту № 19-32-60007 РФФИ за поддержку настоящей работы. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, Astronomy Letters **31** (3), 194 (2005).
2. A. A. Batrakov, A. F. Kholtygin, S. Fabrika, and A. Valeev, ASP Conf.Ser. **518**, 153 (2019a).
3. A. A. Batrakov, A. F. Kholtygin, and S. Hubrig, in *Stars and their variability observed from space*, Proc. Int. Cong. held in Vienna, Austria, August 19–23, 2019,in press (2020).
4. E. F. Borra and J. D. Landstreet, Astrophys. J.**185**, L139 (1973).
5. G. A. Chountonov, in *Spectroscopic methods in modern astrophysics*, ed. by L. Mashonkina and M. Sachkov, Proc. conf. held in Moscow, Russia, September 13–15, 2006, pp. 336–349 (2007).
6. G. A. Chountonov, Astrophysical Bulletin **71** (4), 489 (2016).
7. G. A. Chountonov and I. D. Najdenov, Astrophysical Bulletin **64** (1), 106 (2009).
8. V. V. Dushin, A. F. Kholtygin, G. A. Chuntonov, and D. O. Kudryavtsev, Astrophysical Bulletin **68** (2), 184 (2013).
9. G. Farnsworth, Astrophys. J. **76**, 313 (1932).
10. E. Gerth, Y. V. Glagolevskij, G. Hildebrandt, et al., Astron. and Astrophys. **351**, 133 (1999).
11. S. Hubrig, I. Ilyin, A. F. Kholtygin, et al., Astronomische Nachrichten **338** (8), 926 (2017).
12. S. Hubrig, M. Schöller, and A. F. Kholtygin, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **440** (2), 1779 (2014).
13. J. M. Jenkins, J. D. Twicken, S. McCauliff, et al., SPIE Conf. Proc. **9913**, 99133E (2016).
14. L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, et al., Astron. and Astrophys. **327**, 281 (1997).
15. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, and S. N. Fabrika, this issue (2020a).
16. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., Astrophysical Bulletin **73** (4), 471 (2018).
17. A. F. Kholtygin, S. Hubrig, V. V. Dushin, et al., ASP Conf. Ser. **510**, 299 (2017).
18. A. F. Kholtygin, N. P. Ikonnikova, S. N. Dodin, and Tsiopa, Astronomy Letters **46**, 175 (2020b).
19. A. F. Kholtygin, D. N. Monin, A. E. Surkov, and S. N. Fabrika, Astronomy Letters **29**, 175 (2003).
20. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, Astrophysical Bulletin **63** (4), 386 (2008).
21. O. Kochukhov, N. Piskunov, I. Ilyin, et al., Astron. and Astrophys. **389**, 420 (2002).
22. D. O. Kudryavtsev, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, Proc. Int. Conf. held at SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, Russia, September 24–27, 1999, pp. 84–88 (2000).
23. R. L. Kurucz, ASP Conf. Ser. **44**, 87 (1993).
24. V. M. Kuvshinov and S. I. Plachinda, Izvestiya Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii **66**, 154 (1983).
25. A. A. Pamyatnykh, Acta Astronomica **49**, 119 (1999).
26. V. E. Panchuk, G. A. Chuntonov, and I. D. Naidenov, Astrophysical Bulletin **69** (3), 339 (2014).
27. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and E. V. Emelyanov, Preprint № 212 (SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, 2007).
28. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, Astron. J. **93**, 968 (1987).
29. J. Robrade and J. H. M. M. Schmitt, Astron. and Astrophys. **531**, A58 (2011).
30. I. I. Romanyuk and E. A. Semenko, in *Physics of Magnetic Stars*, ed. by I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, O. M. Neizvestnaya, and V. M. Shapoval, Proc. Int. Conf. held at SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, Russia, August 28–31, 2006, pp. 32–60 (2007).
31. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, and A. V. Moiseevaa, Astrophysical Bulletin **71** (3), 302 (2016).
32. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., Astrophysical Bulletin **73** (2), 178 (2018).
33. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, E. S. Semenova, et al., Astrophysical Bulletin **72** (4), 384 (2017).
34. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **483** (2), 2300 (2019a).
35. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **483** (3), 3127 (2019b).
36. J. Silvester, O. Kochukhov, and G. A. Wade, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **444** (2), 1442 (2014).
37. O. Tsiopa, A. A. Batrakov, and A. F. Kholtygin, in press (2020).
38. В. В. Витязев *Анализ неравномерных времененых рядов* (Изд-во СПбГУ, С.-Петербург, 2001).

Superfast Line Profile Variations in the Spectra of OBA Stars. III. A0 Star α^2 CVn, New Results

A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, and S. Hubrig

This work is a continuation of the studies of the ultrafast variability of line profiles in the spectra of early-type stars. Line profile variations in the spectrum a chemically peculiar A0Vp star α^2 CVn are investigated using the January 6, 2020 observations carried out with the 6-meter BTA telescope at SAO RAS equipped with the MSS spectrograph. Regular short-term periodic variations of the Hβ, Fe II, and Cr II lines were detected with periods ranging from 4 to 140 minutes. The magnetic field of the star was determined for all observations. The average measured longitudinal magnetic field component over the entire duration of observations is about 600 G, which is close to the value expected from the well-known magnetic field phase curve.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—stars: individual: α^2 CVn*