

УДК 524.3–337; 524.35; 524.3–563

СВЕРХБЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ ОВА-ЗВЕЗД. IV: ζ Ori A

© 2021 А. Ф. Холтыгин^{1*}, А. В. Моисеева², М. С. Курдюкова¹,
И. А. Якунин^{1,2}, А. Е. Костенков^{1,2}, Г. М. Каратаева¹

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

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 13 ноября 2020 года; после доработки 10 марта 2021 года; принята к публикации 10 марта 2021 года

Настоящая работа является продолжением исследований сверхбыстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов. Исследована переменность профилей линий в спектре двойной (O9.7Ib+V0III) звезды ζ Ori A с использованием спектрографа ОЗСП 6-м телескопа БТА по наблюдениям, выполненным 19 февраля 2019 г. Обнаружены короткопериодические регулярные вариации бальмеровских линий водорода и линий He I с периодами от 89 до 295 минут. Возможно также присутствие короткопериодических вариаций в интервале периодов 10–20 минут. Анализ вариаций блеска звезды по наблюдениям на спутнике TESS показал присутствие семи регулярных компонентов, один из которых вероятно является второй гармоникой периода вращения основного компонента Aa-звезды ζ Ori A. Определено магнитное поле звезды для всей серии наблюдений. Измеренное методом регрессии среднеквадратичное значение продольного компонента магнитного поля за все время наблюдений составляет 49 Гс.

Ключевые слова: *звезды: переменность, пульсации* — *звезды: магнитное поле* — *звезды: химически пекулярные* — *звезды: индивидуальные: ζ Ori*

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших наблюдательных задач звездной спектроскопии является исследование структуры и механизмов формирования расширяющихся атмосфер массивных звезд, теряющих вещество в виде звездного ветра. Такие исследования основываются на анализе регулярных и нерегулярных (стохастических) вариаций профилей линий в спектре звезды.

Регулярная переменность профилей линий в спектрах OВ-звезд подробно исследована на шкалах времени от часов до дней (Dushin et al. 2013, Karer et al. 1997, Kholtygin et al. 2003), вариации профилей на минутных и секундных шкалах до последнего времени остаются практически неизученными.

Нерегулярная переменность профилей линий свидетельствуют о присутствии в атмосферах этих звезд мелкомасштабных структур с временами жизни от долей часа до нескольких дней (Kudryashova and Kholtygin 2001).

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 OВА-звезд, мы проанализировали такие вариации с временным разрешением в минуты и доли минут при использовании спектрографа низкого разрешения (редуктора светосилы) SCORPIO 6-м телескопа БТА, а также спектрополяриметра FORS 2 на 8-м телескопе VLT (Antu).

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

Kholtygin et al. (2017) представили результаты анализа сверхбыстрой переменности в спектре звезды HD 93521 (O9.5III) по наблюдениям на БТА в 2015 г. Были зарегистрированы регулярные вариации с периодами 4–5 и 32–36 минут. Анализ вариаций профилей в спектре Ве-звезды λ Eri, полученных на спектрополяриметре FORS2 (Hubrig

*E-mail: afkholtygin@gmail.com

et al. 2017) показал присутствие вариаций продольного компонента магнитного поля с периодом 13.6 минут. Такие же вариации обнаружены в профилях линий H I и He I.

Kholtygin et al. (2018) и Batrakov et al. (2019; 2020) представили результаты поиска быстрых вариаций в спектрах медленно вращающегося сверхгиганта ρ Leo (B1a). 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 H β , H γ , He I 4471 и He I 4922 на шкалах времени 15–25 мин.

Анализ спектров A2III-гиганта γ UMi, полученных в январе 2017 г. на БТА с использованием спектрографа SCORPIO, показал присутствие гармонических компонентов вариаций профилей линий H β и H γ с периодами в интервале 10–65 минут (Tsiopa et al. 2020).

В недавних статьях Kholtygin et al. (2020a; c) проанализированы наблюдения звезды α^2 CVn, выполненные 20/21 января 2015 г. на БТА со спектрографом SCORPIO и 5 января 2020 г. с использованием спектрографа ОЗСП. Обнаружены короткопериодические регулярные вариации бальмеровских линий и линий He с периодами от 30 до 135 минут.

Использование оконного Фурье-преобразования позволило обнаружить квазирегулярные транзитные вариации профилей бальмеровских линий с периодами 3–6 минут. Измерено магнитное поле звезды для всех выполненных наблюдений со средним значением продольного компонента магнитного поля примерно 600 Гс, близким к получаемому по фазовой кривой магнитного поля.

В настоящей статье анализируются наблюдения двойной звезды ζ Ori A (O9.7 Ib+V0 III) со спектрографом фокуса Нэсмита ОЗСП с временным разрешением 2–3 минуты, выполненные 19 февраля 2019 г. на БТА.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описаны наблюдения и обработка спектров. Вариации профилей линий анализируются в разделе 3. В разделе 4 представлены измерения магнитного поля звезды, а в разделе 5 — обсуждение полученных результатов. Выводы к статье изложены в разделе 6.

2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗВЕЗДЕ. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Звезда ζ является кратной системой, состоящей из широкой пары, включающей тесную двойную звезду ζ Ori A и V0 III-гигант ζ Ori b, находящиеся на расстоянии около 59'' друг от друга (Buyschaert et al. 2017). В настоящей работе анализируются спектры компонента звезды ζ Ori A.

Согласно Buyschaert et al. (2017), Hummel et al. (2013) двойная система ζ Ori A состоит из двух близких компонентов, отстоящих друг от друга на 40 mas. Первый компонент Aa является сверхгигантом спектрального класса O9.2 Ib, второй компонент Ab — звездой спектрального класса B1 IV. Параметры компонентов системы ζ Ori A согласно данным работ Bouret et al. (2008), Buyschaert et al. (2017), Hummel et al. (2013) и полученные в настоящей работе представлены в Таблице 1.

Возраст компонента ζ Ori Aa определен по параметрам, данным в таблицы 1 и трекам эволюции массивных звезд по Brott et al. (2011). Положение звезды показано на диаграмме Герцшпрунга–Рассела (рис. 1), где нанесены линии равных возрастов со скоростями вращения, близкими к полученным для ζ Ori A. Это значение соответствует возрасту группы звезд B4, к которой принадлежит система ζ Ori согласно Zari et al. (2019).

Наблюдения ζ Ori A звезды проводилось 19 февраля 2019 г. на 6-м телескопе БТА в рамках программы «Микропеременность в ОВ-звездах» (отв. заявитель — А. Ф. Холтыгин, СПбГУ) при использовании спектрографа ОЗСП (Panchuk et al. 2014) с анализатором круговой поляризации (Chountonov 2007; 2016) и резателем изображений.

Для устранения инструментальной поляризации циркулярно поляризованные спектры снимались попарно в двух положениях фазовой пластинки, повернутой на $\pm 45^\circ$.

Данная процедура позволяет последовательно получить противоположно поляризованный сигнал на одних и тех же пикселах ПЗС-приемника. Для контроля получаемых значений были сняты стандарт магнитного поля HD 201601 (γ Equ) и стандарт нуля HD 33256 (68 Eri).

Первичная обработка и экстракция спектров проводилась 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

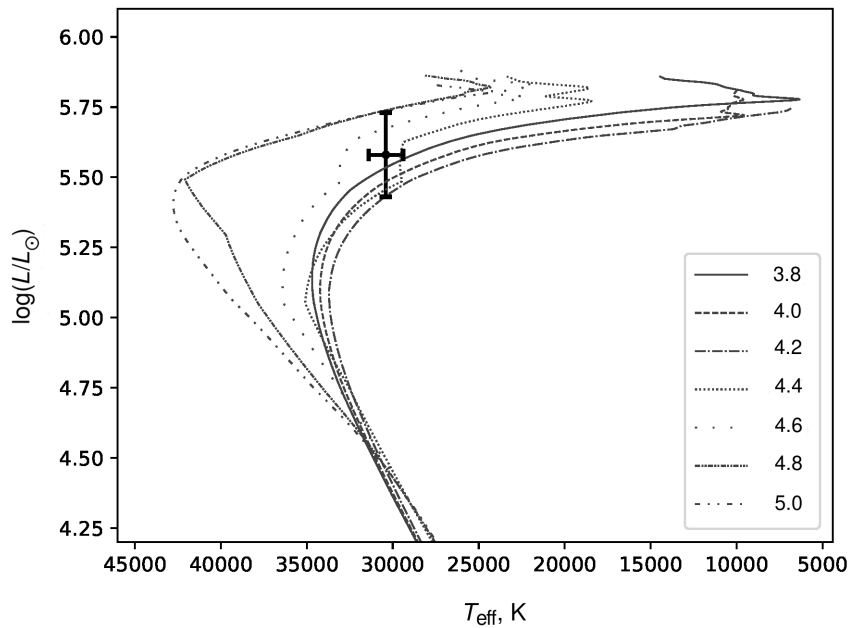


Рис. 1. Положение ζ Ori A на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Приведены кривые для различных возрастов τ , которые указаны на рисунке в единицах 10^6 лет, и скоростей вращения звезды в интервале $124\text{--}243$ км с $^{-1}$.

Таблица 1. Параметры звезды ζ Ori A

Параметр	Aa	Ab	Ссылка
Sp	O9.2 Ib	B1 IV	Buyschaert et al. (2017)
m_V	2.1	4.3	Hummel et al. (2013)
T_{eff} , kK	29.3 ± 0.5	29	Данная работа
R , R_{\odot}	20 ± 3.2	7.3 ± 1.0	Buyschaert et al. (2017)
$\lg g$, dex	3.25 ± 0.1	—	Данная работа
$\lg(L/L_{\odot})$	5.58 ± 0.15	—	Данная работа
M/M_{\odot}	40 ± 20	14 ± 3	Данная работа
P_{rot} , days	6.82 ± 0.19	—	Buyschaert et al. (2017)
$v \sin i$, km s $^{-1}$	127	<100	Buyschaert et al. (2017)
d , pc	294 ± 21		Hummel et al. (2013)
\dot{M} , M_{\odot} year $^{-1}$	$(1.65 \pm 0.25) \times 10^{-6}$		Данная работа
ξ_t , km s $^{-1}$	5		Данная работа
β	1.0 ± 0.1		Данная работа
v_{∞} , km s $^{-1}$	2100		Bouret et al. (2008)
Age, τ , Myr	4.0 ± 0.4		Данная работа
[C]	8.38		Bouret et al. (2008)
[N]	7.69		Данная работа
[O]	8.48		Данная работа

серии спектров использовался ближайший по времени спектр ThAg-лампы. Для нормировки спектров на континуум последний интерполировался кубическим сплайном при помощи пакета *spectool* среды IRAF¹. Более подробно процесс обработки наблюдений, полученных на ОЗСП, описан в работах Kudryavtsev (2000), Semenko et al. (2017).

Спектральное разрешение составляло примерно 15000 (размер щели 0".5), диапазон регистрируемых длин волн — 4425–4982 Å, средний $S/N \approx 700$. Полное время наблюдений составило около 180 минут.

В ходе наших наблюдений было получено 76 спектров звезды с одновременно регистрируемыми левой и правой циркулярными поляризациями. Спектры были получены с экспозицией 90 секунд. Временное разрешение на один спектр с учетом времени считывания ПЗС-детектора примерно 135 секунд.

То есть было получено 38 пар спектров для разных положений анализатора круговой поляризации. Пары спектров с номерами 30–32 оказались недостаточно высокого качества и были в дальнейшем исключены из анализа переменности профилей линий. Таким образом, для окончательного анализа были отобраны 35 пар спектров. Параметры Стокса I и V были усреднены по всем 35 парам спектров, соответствующим положениям фазовой пластинки $\alpha = \pm 45^\circ$.

На рис. 2 показан нормированный на континуум интегральный спектр звезды ζ Ori A, усредненный по всем отобраным 35 парам спектров на ОЗСП.

Для перевода длин волн в спектре в лабораторную систему отсчета было использовано значение радиальной скорости $V_{\text{rad}} = 18.10 \text{ км с}^{-1}$ из базы данных SIMBAD².

2.1. Модельный спектр ζ Ori A

Для уточнения параметров ζ Ori A и определения лучевой скорости звезды был построен ее модельный спектр с использованием не-ЛТР кода CMFGEN (Hillier and Miller 1998). Полученный нами модельный спектр в сравнении с усредненным по всем полученным спектрам наблюдаемым профилем представлен на рис. 3. Параметры наилучшей модели представлены в таблице 1. Базовые параметры модели были взяты из работы (Bouret et al. 2008).

¹<http://iraf.noao.edu/projects/spectroscopy/spectool/spectool.html>

²<http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>

Температура $T_{\text{eff}} = 29300 \text{ К}$ была определена по отношению потоков в линии He II $\lambda 5410$ и линии He I. Детальный спектр был рассчитан с турбулентной скоростью 5 км с^{-1} . При этом значении достигается наилучшее согласие наблюдаемого и модельного спектров. Зависимость скорости ветра от расстояния описывалась стандартным β -законом (см., например, формулу (1) в статье Hillier (1989)) со значением $\beta = 1.0$ для согласования наблюдаемых и модельных профилей линий Si II и линии He II $\lambda 4686$. Химическое содержание (по числу атомов) азота и кислорода по отношению к водороду равны 4.9×10^{-5} и 3.0×10^{-4} соответственно. Остальные параметры модели идентичны представленным в работе Bouret et al. (2008).

2.2. Учет инструментальных эффектов

При анализе быстрой спектральной переменности необходим учет инструментальных погрешностей, возникающий вследствие тепловой и вибрационной нестабильности прибора. Проблема позиционной стабильности ОЗСП неоднократно исследовалась и детально описана в работе Kholtygin et al. (2020c).

Для установления инструментального дрейфа спектральных линий в течение 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. 4. Видны как долговременный линейный дрейф, так и кратковременные колебания. Максимальный сдвиг между спектрами в полученной нами серии спектров составляет 0.31 пиксела.

Кроме того, нами были получены спектры калибровочной лампы в начале и в конце серии, разница между которыми составила 3 часа. Кросс-корреляция показала относительный сдвиг двух спектров величиной 0.12 пиксела. Обнаруженное долговременное изменение лучевых скоростей является главным образом инструментальным, что было учтено при дальнейшем анализе спектров ζ Ori A.

3. ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

При анализе вариаций профилей линий в спектре звезды целесообразно выбрать линии достаточной глубины и при этом без сильного блендирования. Исходя из этих принципов, было выбрано девять линий: H β , He I $\lambda 4471$, $\lambda 4713$, $\lambda 4922$, He II $\lambda 4542$, $\lambda 4686$ и Si III $\lambda 4553$, $\lambda 4568$, $\lambda 4575$. Отдельно были проанализированы вариации профилей бленды линий Si III и O II в области длин

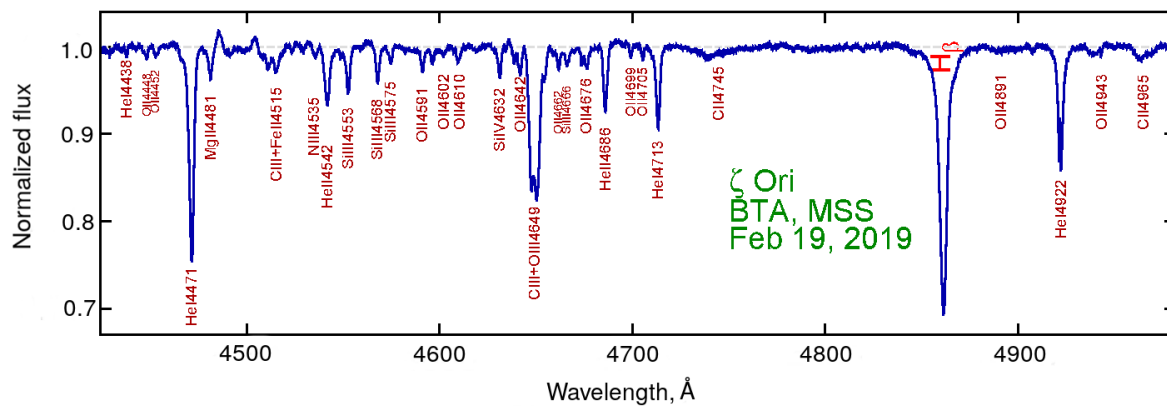


Рис. 2. Средний нормированный спектр ζ Ori A.

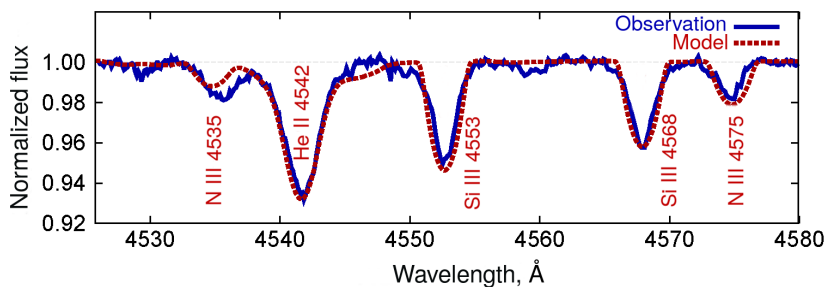


Рис. 3. Средний спектр ζ Ori A в области $\lambda\lambda$ 4526–4580 Å (сплошная линия) в сравнении с модельным спектром (пунктир).

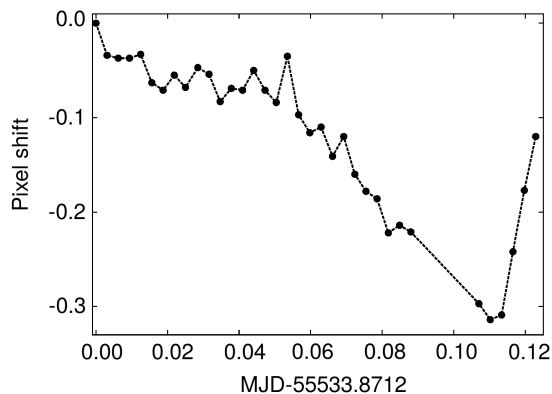


Рис. 4. Сдвиги спектров в шкале пикселей ПЗС приемника спектрографа ОЗСП в наблюдениях ζ Ori A.

волн $\lambda\lambda$ 4647–4650 Å и вариации профилей линии Mg II λ 4481 в крыле линии He I λ 4471.

В силу малой длительности наших наблюдений (около 3^h) по сравнению с орбитальным периодом разделить вклады в профили линий компонентов Aa и Ab не представляется возможным. Отметим, что компонент Ab более чем на две звездных величины слабее компонента Aa, поэтому вклад компонента Aa является определяющим. Подтверждением этого служит присутствие в спектре ζ Ori A

линий He II и Si III, характерных именно для O-звезд.

Для иллюстрации переменности профилей на рис. 5 показаны все полученные нами нормированные профили линий H β и He I λ 4922 в спектре ζ Ori A. В крыльях линии He I λ 4922 присутствуют слабые линии Fe I-II, O II и C V.

Отклонения профилей данных линий от их средних профилей показаны на рис. 6. Как видно из рисунка, амплитуда вариаций профилей 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 He I λ 4922 сравнима с амплитудами вариаций профилей слабых линий в крыльях профиля.

Отметим появление узкого абсорбционного компонента с длиной волны 4921.15 Å в красном крыле линии He I λ 4922. Природа этого компонента не вполне ясна. Вероятнее всего он связан с запрещенным переходом He I λ 4921 ($2p^1P - 4f^1F$) (Beauchamp and Wesemael 1998).

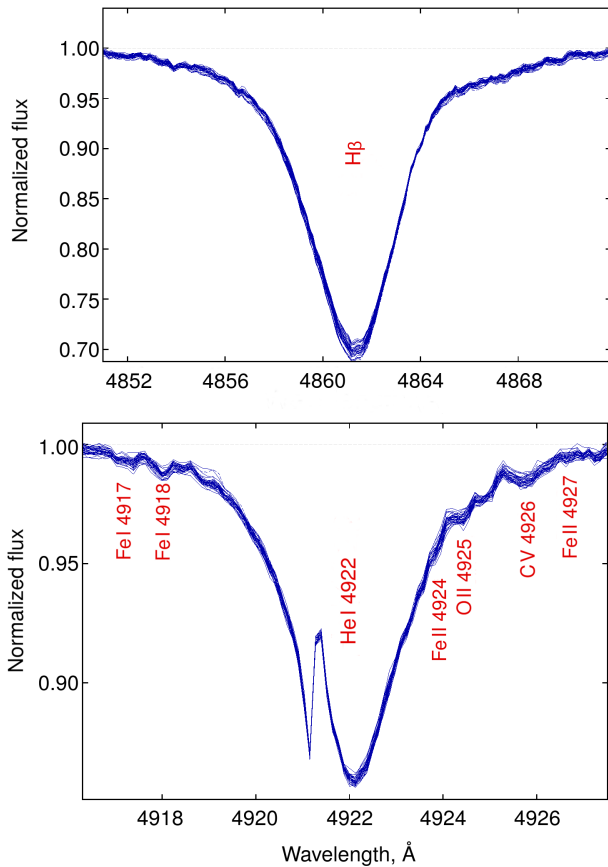


Рис. 5. Профили линии $H\beta$ (вверху) и $He I 4922$ в спектре ζ Ori A.

3.1. Регулярные компоненты вариаций профилей линий

Для поиска регулярных компонентов вариаций профилей определим разностные профили линий 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 λ .

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

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

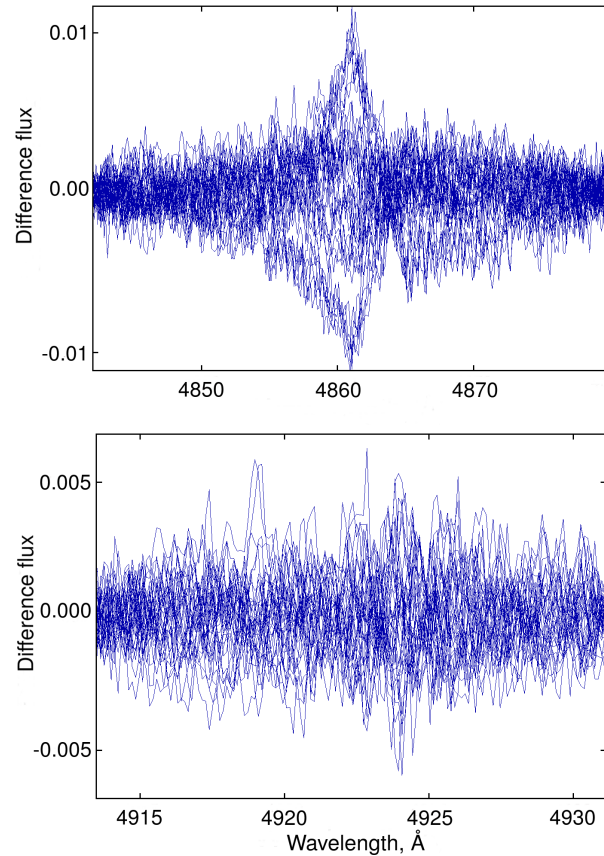


Рис. 6. Отклонения профилей линии $H\beta$ (вверху) и $He I 4922$ (внизу) от среднего профиля линии.

На рис. 7 представлены динамические спектры вариаций профилей линии $H\beta$ и $He I \lambda 4922$ в спектре ζ Ori A. Хорошо видны регулярные изменения профилей линий со временем.

Для линии $He I \lambda 4922$ можно отметить когерентность вариаций профилей как самой линии, так и указанных выше слабых бленд в крыле линии, что свидетельствует об едином механизме их переменности.

Поиск периодических компонентов вариации профилей линий в спектре ζ Ori A нами был выполнен при использовании метода CLEAN Фурье-анализа (Roberts et al. 1987). Фурье-спектры вариаций разностных профилей линий $He I \lambda 4713$, $\lambda 4922$ и $H\beta$ (периодограммы) представлены на рис. 8 для уровня значимости $\alpha = 10^{-3}$.

В Фурье-спектре присутствуют регулярные компоненты частот максимумов амплитуды Фурье-спектра, которые превышают значение отсчета периодограммы белого шума, соответствующее выбранному уровню значимости. Отметим, что как видно из анализа Фурье-спектра для линии $He I \lambda 4922$ на рис. 8 (внизу), в области эмиссионного пика не обнаружено регулярных вариаций

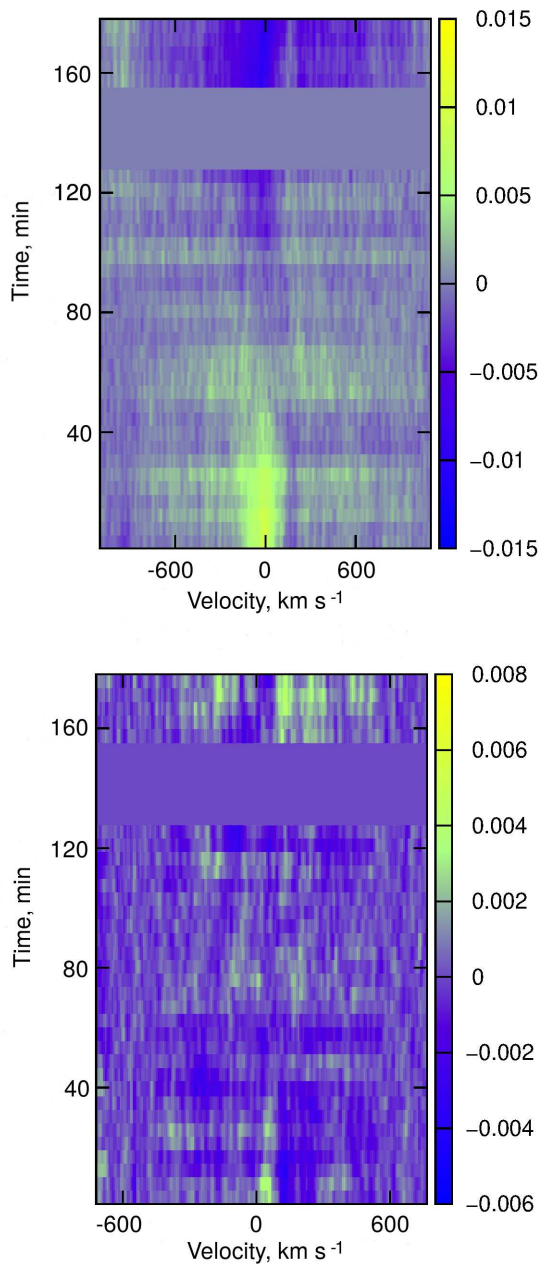


Рис. 7. Динамический спектр вариаций профиля линии $\text{He I } \lambda 4713$ (вверху) и $\text{He I } \lambda 4992$ (внизу).

профиля линии, хотя сами вариации эмиссионного компонента видны на рис. 5 (внизу). Возможно это связано с тем, что вариации профилей в области пика эмиссии нерегулярны.

В таблице 2 представлены найденные частоты и периоды возможных гармонических компонентов вариаций профилей анализируемых линий для уровней значимости $\alpha = 10^{-2} - 10^{-4}$.

Для оценки сверху ошибки $\Delta\nu$ частот регулярных компонентов Фурье-спектра использова-

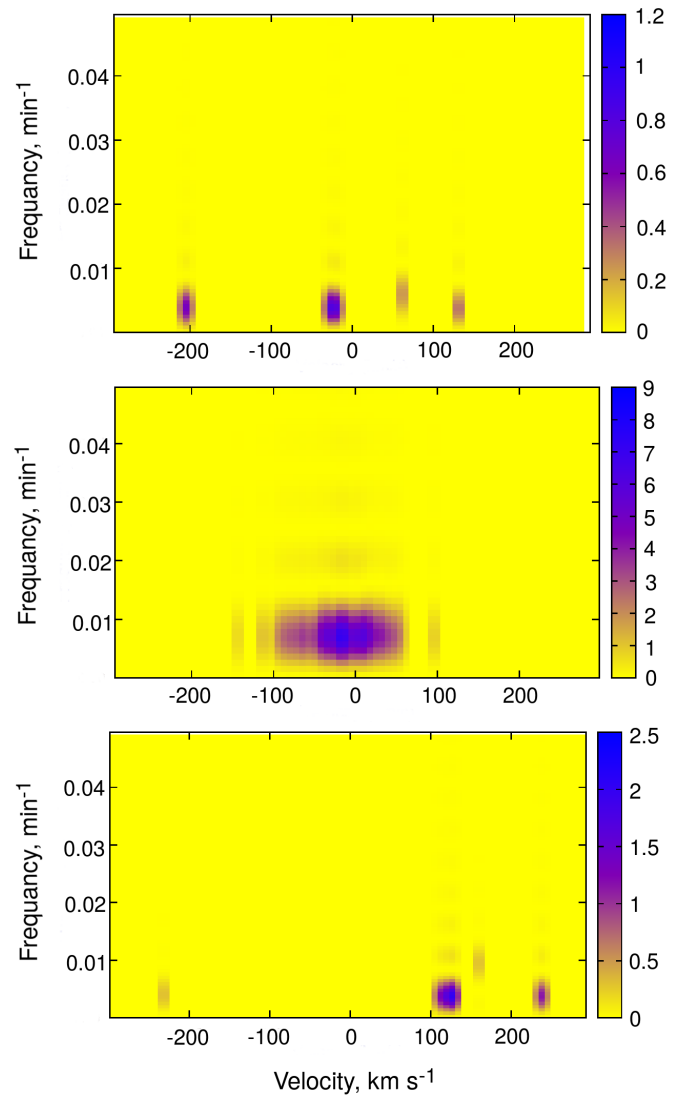


Рис. 8. Фурье-спектры вариаций профиля линии $\text{He I } \lambda 4713$ (вверху), $\text{He I } \lambda 4992$ (посередине) и $\text{He I } \lambda 4713$ (внизу).

лось выражение $\Delta\nu \leq 1/T$ (Vityazev 2001), где $T = 179.2$ минут — полная длительность наблюдений.

В предпоследнем столбце таблицы представлены частоты регулярных компонентов вариаций профилей в спектре $\zeta \text{ Ori A}$ по наблюдениям на БТА в 2009 г. со спектрографом НЭС Dushin et al. (2012). Для всех найденных компонентов в предпоследнем столбце таблицы указаны соответствующие уровни значимости.

Компоненты $\nu_1 - \nu_4$ соответствует периодам P , которые превосходят полную длительность наблюдений. Для подтверждения их присутствия необходимы более длительные наблюдения.

Регулярные вариации профилей линий в спектрах OB-звезд с периодами, близкими к периодам

Таблица 2. Частоты ($\text{мин}^{-1} \times 10^4$, колонка (2) и периоды (в минутах, колонка (3)) регулярных компонентов вариаций профилей в спектре ζ Ori A. В колонке (4) указано число линий, в вариациях профилей которых данный компонент обнаружен. В колонке (5) указаны уровни значимости найденных компонентов Фурье-спектра. В последней колонке указаны периоды вариаций профилей (в минутах), найденные в работе Dushin et al. (2012)

No.	ν	P	N_{lines}	α	Dushin et al. 2012
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	33.8 ± 56.5	295 ± 492	10	10^{-4}	—
2	39.5 ± 56.5	253 ± 362	10	10^{-4}	244
3	45.2 ± 56.5	221 ± 277	7	10^{-3}	—
4	50.8 ± 56.5	197 ± 219	1	10^{-3}	—
5	56.5 ± 56.5	177 ± 177	5	10^{-3}	—
6	62.1 ± 56.5	161 ± 147	3	10^{-2}	164
7	96.0 ± 56.5	104 ± 61.4	3	10^{-3}	—
8	102 ± 56.5	98.4 ± 54.7	3	10^{-3}	—
9	107 ± 56.5	93.2 ± 49.1	2	10^{-2}	—
10	113 ± 56.5	88.6 ± 44.3	2	10^{-2}	—
11	147 ± 56.5	68.1 ± 26.2	1	10^{-2}	71
12	486 ± 56.5	20.6 ± 2.40	1	10^{-2}	—
13	502 ± 56.5	19.9 ± 2.24	1	10^{-2}	—
14	689 ± 56.5	14.5 ± 1.19	1	10^{-2}	—
15	1101 ± 56.5	9.08 ± 0.47	1	10^{-2}	—

компонентов $\nu_1 - \nu_4$ с $P = 3-6^h$, 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 $P = 68-177$ мин может свидетельствовать о присутствии высоких мод нерадиальных пульсаций с $l = 6-12$.

Регулярный компонент вариации профилей, ν_2 , в области частот $\nu > 63 \pm 49 \text{ мин}^{-1}$ соответствуют (с учетом ошибок) компоненту 244 мин, обнаруженному в работе Dushin et al. (2012). Та же ситуация с компонентом ν_6 , соответствующим периоду 161 мин, близкому к периоду $P = 164$ мин, обнаруженному в работе Dushin et al. (2012).

Компонент $\nu_{11} = 113 \pm 56.5 \text{ мин}^{-1}$ соответствует периоду 68.1 ± 26.2 мин, совпадающему (с

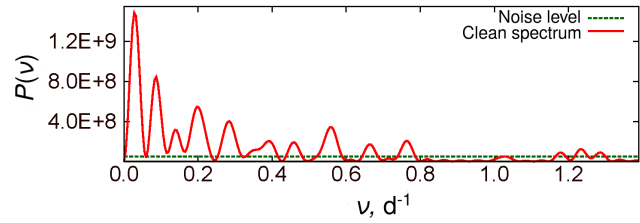


Рис. 9. Фурье-спектры вариаций блеска (сплошная линия) и максимальный уровень отсчета периодограммы белого шума, соответствующий уровню значимости $\alpha = 10^{-3}$ (пунктир).

Таблица 3. Частоты в мин^{-1} (вторая колонка) и периоды (минуты, третья колонка) фотометрических вариаций блеска ζ Ori A. В последней колонке указаны уровни значимости найденных компонентов Фурье-спектра

No.	ν, min^{-1}	P, days	α
(1)	(2)	(3)	(4)
1	0.078 ± 0.046	12.807 ± 7.5335	10^{-3}
2	0.202 ± 0.046	4.948 ± 1.1246	10^{-3}
3	0.289 ± 0.046	3.456 ± 0.5485	10^{-3}
4	0.335 ± 0.046	2.983 ± 0.4086	10^{-3}
5	0.455 ± 0.046	2.199 ± 0.2221	10^{-3}
6	1.231 ± 0.046	0.812 ± 0.0303	10^{-3}
7	1.272 ± 0.046	0.786 ± 0.0284	10^{-3}

учетом ошибок) с периодом $P = 71$ мин согласно Dushin et al. (2012). В то же время компонент ν_{11} найден только для одной линии, что указывает на необходимость проведения дополнительных наблюдений для выяснения того, насколько такой компонент реален.

Компоненты $\nu_{12} - \nu_{15}$ также обнаружены в вариациях профиля только одной линии и без новых наблюдений их реальность не вполне убедительна. В то же время компоненты с подобными короткими периодами обнаружены в вариациях профилей линий в спектрах ОВА-звезд, как отмечено во введении статьи, и возможность присутствия таких коротко периодических компонентов в вариациях профилей линий в спектре ζ Ori A вполне реальна.

3.2. TESS фотометрия ζ Ori A

В последнее время стали доступны фотометрические наблюдения ζ Ori A на спутнике TESS (Jenkins et al. 2016) в течение 22 дней. Нами был выполнен анализ фотометрической кривой блеска TESS методом CLEAN. На рис. 9

представлена соответствующая периодограмма Фурье-спектра. После исключения из Фурье-спектра гармоник основных компонент, и компонента с периодом $P = 32^{\text{d}}3$, большего полного интервала фотометрических наблюдений осталось семь регулярных компонент с периодами от $0^{\text{d}}8$ до 13^{d} . В таблице 3 представлены частоты и периоды этих компонент.

Найденные периоды регулярных компонент не пересекаются с представленными в таблице 2. В то же время следует отметить что отношение $P_6/4 = 292.5 \pm 43.6$ мин, где P_6 — период компонента № 6 в таблице 3. Данное отношение с учетом ошибок совпадает с периодом компонента ν_1 в таблице 2. Таким образом, можно сделать вывод, что компонент ν_1 является четвертой гармоникой периода P_6 фотометрических вариаций блеска ζ Ori A.

В работе Buysschaert et al. (2017) оценен период вращения ζ Ori A, $P_{\text{rot}} = 6^{\text{d}}82 \pm 0^{\text{d}}18$. Удвоенный период $2P_3 = 6^{\text{d}}9 \pm 1^{\text{d}}1$ компонента ν_3 фотометрических вариаций блеска ζ Ori A в таблице 3 соответствует периоду вращения. Можно сделать вывод, что компонент ν_3 является второй гармоникой периода вращения ζ Ori A.

4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ζ Ori A

Все спектры ζ Ori A были нами получены с использованием анализатора круговой поляризации, что позволяет оценить магнитное поле звезды. Для увеличения точности определения величины параметра Стокса V были использованы последовательные наблюдения с разными углами поворота четвертьволновой пластинки (подробнее см. раздел 2).

Для определения величины продольного компонента магнитного поля, усредненного 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 (Hubřig et al. 2014) с использованием стандартного соотношения:

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

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

Значение величин B_e , полученных методами центра тяжести (B_e^{cog}) и регрессии (B_e^{reg}) и соответствующие стандартные отклонения представлены в таблице 4.

Величины магнитного поля, измеренные с помощью методов центра тяжести и регрессии, для стандарта нуля 68 Eri соответственно составляют 6 ± 6 Гс и 4 ± 20 Гс, а для стандарта поля γ Equ — -876 ± 24 Гс и -790 ± 24 Гс. Полученные нами оценки поля γ Equ согласуются с хорошо известными значениями поля этой звезды с периодом вращения свыше 100 лет (см., например, Romanuyuk et al. 2020, Savanov et al. 2020).

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 ζ Ori A 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 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 Klochko et al. (2008)). Что касается инструментального дрейфа спектральных линий, рассмотренного в пункте 2.2, то анализ вариаций лучевой скорости, представленных на рис. 4, показал, что после устранения тренда в вариациях V_{rad} присутствует маргинальный (уровень значимости $\alpha > 0.01$ период около 100 мин, не совпадающий ни с одним из периодов, представленных в таблице 2).

Отметим также, что согласие найденных нами периодов вариаций профилей линий в спектре ζ Ori A с полученными в работе Dushin et al. (2012) с использованием другого спектрографа НЭС с другим набором собственных колебаний, также свидетельствует о реальности этих периодов. Набор частот и периодов вариаций профилей, полученных при анализе профилей линий разных ОВА-звезд (см. ссылки в разделе 1) 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 звезды может, в принципе, внести спорадическое изменение размера турбулентного диска звезды из-за атмосферных флуктуаций. Однако трудно ожидать, что

Таблица 4. Результаты измерения магнитного поля ζ Ori A. Курсивом выделено значение B_e , превышающее по абсолютной величине три стандартных отклонения

N_{sp}	MJD	B_e^{reg}, G	B_e^{cog}, G	N_{sp}	MJD	B_e^{reg}, Gs	B_e^{cog}, Gs
1	58533.871185	25 ± 27	395 ± 412	19	58533.927805	1 ± 40	-251 ± 227
2	58533.874302	-37 ± 37	-367 ± 227	20	58533.930952	32 ± 42	322 ± 557
3	58533.877414	-20 ± 33	53 ± 428	21	58533.934098	41 ± 47	86 ± 335
4	58533.880552	59 ± 39	-237 ± 281	22	58533.937295	84 ± 59	172 ± 306
5	58533.883676	76 ± 36	213 ± 253	23	58533.940417	55 ± 39	282 ± 251
6	58533.886807	1 ± 35	-92 ± 376	24	58533.943532	8 ± 40	380 ± 248
7	58533.889951	-75 ± 52	-399 ± 202	25	58533.946645	-30 ± 52	-208 ± 283
8	58533.893081	57 ± 45	-445 ± 379	26	58533.949758	11 ± 48	46 ± 474
9	58533.896201	-74 ± 35	-76 ± 214	27	58533.952883	69 ± 49	-311 ± 229
10	58533.899666	-23 ± 32	296 ± 218	28	58533.956042	34 ± 41	77 ± 400
11	58533.902778	0 ± 32	61 ± 317	29	58533.959181	46 ± 65	-107 ± 190
12	58533.905909	76 ± 42	-429 ± 234	33	58533.978202	38 ± 38	164 ± 272
13	58533.909030	9 ± 30	-301 ± 310	34	58533.981368	-9 ± 36	-143 ± 258
14	58533.912160	8 ± 36	90 ± 328	35	58533.984533	-17 ± 42	94 ± 429
15	58533.915272	7 ± 46	355 ± 325	36	58533.987713	-77 ± 33	344 ± 240
16	58533.918423	-48 ± 42	340 ± 259	37	58533.990886	-4 ± 51	-24 ± 312
17	58533.921567	-32 ± 31	-100 ± 228	38	58533.994065	-43 ± 43	-325 ± 250
18	58533.924699	<i>123 ± 31</i>	-100 ± 231	—	—	—	—

вариации профилей линий, вызванные влиянием атмосферных флуктуаций будут сколь-либо регулярными. В то же время влияние таких флуктуаций на нерегулярные вариации профилей полностью исключить нельзя, что следует учитывать при анализе.

Некоторый вклад в вариации профилей линий в спектре звезды могут вносить атмосферных флуктуации (например, Kholtygin et al. 2020c). При использовании резателя изображений, как в нашем случае, данный эффект минимизируется.

5.2. Магнитное поле ζ Ori A

Зависимость эффективного магнитного поля B_e , полученного в настоящей работе от времени наблюдения представлена на рис. 10. Среднеквадратичное магнитное поле $\langle B \rangle$ для метода регрессии составляет 49 Гс, а для метода центра тяжести — 254 Гс.

Согласно измерениям магнитного поля ζ Ori A в работе Bouret et al. (2008) его величина составляет

50–100 Гс. Dushin et al. (2012) получили значение $B_l = 20 \pm 100$ Гс. В работе Blazère et al. (2015) измерены значения продольного компонента B_l для обоих компонентов Aa и Ab ζ Ori A. Для компонента Aa значения B_l меняются от -27 Гс до -72 Гс, а для компонента Ab — от -126 Гс до 174 Гс.

Полученные нами значения B_e близки к измеренным в работе Blazère et al. (2015). Вопрос о принадлежности полученных значений эффективного поля компонентам Aa или Ab остается открытым.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы вариации профилей линий в спектре двойной звезды ζ Ori A с временным разрешением 2–3 мин по спектрополяриметрическим наблюдениям на БТА со спектрографом ОЗСП. Обнаружены регулярные компоненты вариаций профилей с периодами около 89–295 минут. Возможно присутствие короткопериодических вариаций в интервале периодов 10–20 минут. Измерено магнитное поле ζ Ori A. Полученное в настоящей работе методом регрессии

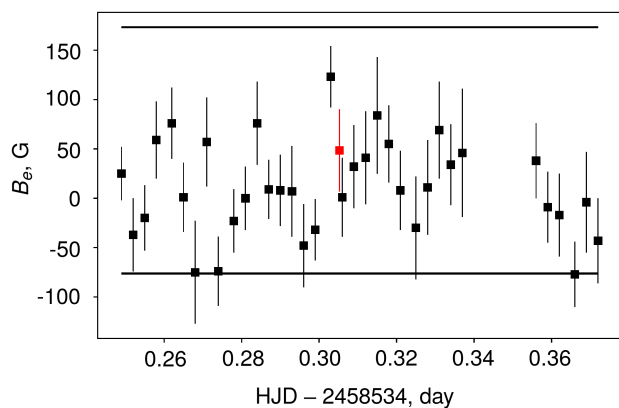


Рис. 10. Зависимость эффективного магнитного поля B_e ζ Ori A от времени. Красным прямоугольником с барами ошибок показано среднеквадратичное значение эффективного магнитного поля по всем выполненным наблюдениям. Черными сплошными линиями показаны значения $\pm 3\sigma$ для этого значения.

значение среднеквадратичного магнитного поля $B_e = 49$ Гс согласуется с измерениями других авторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность Д. О. Кудрявцеву за наблюдения ζ Ori A. Также авторы признательны И. И. Романюку за советы и рекомендации, способствующие улучшению текста статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

АХ, АМ, МК и АК благодарны поддержке грантом 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 No. 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Batrakov, A. F. Kholtygin, S. Fabrika, and A. Valeev, *ASP Conf. Ser.* **518**, 153 (2019).

2. A. A. Batrakov, A. F. Kholtygin, S. Hubrig, et al., in *Proc. conf. on Stars and their Variability Observed from Space, Vienna, 2019*, Ed. by C. Neiner, W. W. Weiss, D. Baade, et al. (University of Vienna, 2020), p. 163.
3. A. Beauchamp and F. Wesemael, *Astrophys. J.* **496** (1), 395 (1998).
4. A. Blazère, C. Neiner, A. Tkachenko, et al., *Astron. and Astrophys.* **582**, A110 (2015).
5. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **185**, L139 (1973).
6. J. C. Bouret, J. F. Donati, F. Martins, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389** (1), 75 (2008).
7. I. Brott, S. E. de Mink, M. Cantiello, et al., *Astron. and Astrophys.* **530**, A115 (2011).
8. B. Buysschaert, C. Neiner, N. D. Richardson, et al., *Astron. and Astrophys.* **602**, A91 (2017).
9. G. A. Chountonov, in *Proc. conf. on Spectroscopic Methods in Modern Astrophysics, Moscow, Russia, 2006*, Ed. by L. Mashonkina and M. Sachkov (2007), pp. 336–349.
10. G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 489 (2016).
11. V. V. Dushin, A. F. Kholtygin, and G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **67** (1), 67 (2012).
12. V. V. Dushin, A. F. Kholtygin, G. A. Chountonov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (2), 184 (2013).
13. D. J. Hillier, *Astrophys. J.* **347**, 392 (1989).
14. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.* **496** (1), 407 (1998).
15. S. Hubrig, I. Ilyin, A. F. Kholtygin, et al., *Astronomische Nachrichten* **338** (8), 926 (2017).
16. S. Hubrig, M. Schöller, and A. F. Kholtygin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (2), 1779 (2014).
17. C. A. Hummel, T. Rivinius, M. F. Nieva, et al., *Astron. and Astrophys.* **554**, A52 (2013).
18. J. M. Jenkins, J. D. Twicken, S. McCauliff, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9913**, 99133E (2016).
19. L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, et al., *Astron. and Astrophys.* **327**, 281 (1997).
20. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 471 (2018).
21. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 278 (2020a).
22. A. F. Kholtygin, S. Hubrig, V. V. Dushin, et al., *ASP Conf. Ser.* **510**, 299 (2017).
23. A. F. Kholtygin, N. P. Ikonnikova, A. V. Dodin, and O. A. Tsiopa, *Astronomy Letters* **46** (3), 168 (2020b).
24. A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, and S. Hubrig, *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 284 (2020c).
25. A. F. Kholtygin, D. N. Monin, A. E. Surkov, and S. N. Fabrika, *Astronomy Letters* **29**, 175 (2003).
26. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Astrophysical Bulletin* **63** (4), 386 (2008).
27. N. A. Kudryashova and A. F. Kholtygin, *Astronomy Reports* **45** (4), 287 (2001).

28. D. O. Kudryavtsev, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Special Astrophysical Observatory of Russian AS, 1999*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Special Astrophysical Observatory of Russian AS, 2000), p. 84.
29. A. A. Pamyatnykh, *Acta Astronomica* **49**, 119 (1999).
30. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
31. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
32. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 294 (2020).
33. I. S. Savanov, I. I. Romanyuk, and E. S. Dmitrienko, *Astron. Tsirkulyar*, No. 1647, 1 (2020).
34. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, E. S. Semenova, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 384 (2017).
35. O. Tsiopa, A. Batrakov, and A. Kholtygin, *Astron. J. Azerbaijan* **15**, 20 (2020).
36. V. V. Vityazev, *Analiz neravnomernykh ryadov* (SPbSU Press, St. Petersburg, 2001) [in Russian].
37. E. Zari, A. G. A. Brown, and P. T. de Zeeuw, *Astron. and Astrophys.* **628**, A123 (2019).

Super-Fast Line-Profile Variability in the Spectra of OBA Stars. IV: ζ Ori A

A. F. Kholtygin¹, M. S. Kurdoyakova¹, A. V. Moiseeva², I. A. Yakunin², A. E. Kostenkov², and G. M. Karataeva²

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The present study continues the investigation of the super-fast variability of line profiles in the spectra of stars of early spectral types. We studied the line-profile variability in the spectrum of the binary (O9.7Ib+B0III) star ζ Ori A using the MSS spectrograph of the 6-m BTA telescope based on observations carried out on February 19, 2019. Short-period regular variations of the hydrogen Balmer lines and He I lines with periods from 89 to 295 minutes were found. The presence of short-period variations in the period interval of 10–20 minutes is also possible. An analysis of the stellar brightness variations from observations by the TESS satellite showed the presence of seven regular components, one of which is probably the second harmonic of the rotation period of the main component of the Aa star ζ Ori A. The magnetic field of the star was determined for the whole series of observations. The longitudinal component of the root-mean-square magnetic field measured by the regression method over the whole observation period is 49 G.

Keywords: stars: early-type, variability, pulsations, line profiles: individual: ζ Ori A