

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.1-45

СВЕРХБЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ γ Ori

А.Ф.ХОЛТЫГИН¹, В.Б.ПУЗИН², И.В.СОКОЛОВ², М.С.КУРДОЯКОВА¹

Поступила 4 декабря 2022

Принята к печати 3 февраля 2023

Представлены результаты наблюдений высокого временного разрешения ($\Delta T \sim 2$ мин) BV звезды γ Ori на 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол. Зарегистрированы регулярные компоненты вариаций профилей линий с периодами от ~ 57 мин до ~ 130 мин. Обсуждается природа таких вариаций.

Ключевые слова: *звезды: спектры - профили линий - переменность: индивидуальные: γ Ori*

1. *Введение.* Профили линий в спектрах OB звезд переменны на временных шкалах от дней до часов [1-3]. Вариации профилей линий традиционно интерпретируются как результат вращательной модуляции [4] или нерадиальных пульсаций (НРП) [5]. Для звезд спектрального класса A периоды вариаций профилей существенно возрастают. Так, согласно Kaufer et al. [6] период вариаций профилей линии в спектре A0 сверхгиганта HD 92207 в результате нерадиальных пульсаций составляет 26 дней.

Вариации профилей линий в спектрах OBA звезд на более коротких шкалах времени не ожидалось. Тем более удивительным было обнаружение быстрых изменений профилей в спектре HD 92207. Hubrig et al. [7] обнаружили изменения профилей линий Si II и Fe II в спектрах звезды на промежутках времени 1-2 мин с амплитудой 3-5% от потока в соседнем с линией континууме.

Эта работа стимулировала нашу программу исследования сверхбыстрой переменности на минутных шкалах в спектрах звезд ранних спектральных классов. Чтобы проверить, широко ли распространены подобные короткопериодические спектральные вариации среди OBA звезд, мы проанализировали вариации профилей линий в спектрах ярких OBA звезд, полученных с высоким (минута и меньше) временным разрешением при использовании редуктора светосилы 6-м телескопа БТА SCORPIO [8].

Наша программа поиска вариаций профилей линий на коротких временных шкалах была продолжена в 2019г. также на 6-м телескопе БТА, но уже с использованием спектрографа ОЗСП (Panchuk et al. [9]), оснащенного

анализатором круговой поляризации и резателем изображений [10].

В 2019-2021гг. спектральные наблюдения проводились также на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ [11] и на 1-м телескопе САО со спектрографом низкого разрешения UAGS [12], на котором было получено почти 1800 спектров трех ОВА звезд. И, наконец, с 2019 по 2021гг. были выполнены наблюдения на Многомодовом спектрографе MMCS фокуса Кассегрена телескопа Zeiss-2000 обсерватории Пик Терскол [13]. Было получено 424 спектра 17-ти ОВА звезд.

К настоящему времени по программе исследования сверхбыстрой переменности получено свыше 20-ти тысяч спектров 39-ти звезд OBAFGM звезд. В [14,15] представлены обзоры сделанных наблюдений.

Наиболее интересные результаты были получены Холтыгиным и др. [16] в результате анализа быстрых вариаций в спектрах В1а сверхгиганта ρ Leo. Были зарегистрированы регулярные вариации профилей линий H и He с периодами от 2 до 90 мин, а также нерегулярные вариации профилей линий на промежутке времени меньше 1 мин. Использование методов оконного Фурье-преобразования [17] позволило обнаружить транзистентные вариации профилей с временем жизни в несколько десятков минут и со слабопеременными периодами в области частот $0.1 - 0.5 \text{ мин}^{-1}$ (периоды 2-10 мин).

Наличие таких компонентов регулярных вариаций профилей линий было объяснено при предположении, что высокие моды нерадиальных пульсаций нестабильны и могут как затухать, так и генерироваться на коротких шкалах времени от 10 до 100 мин. Подобные транзистентные вариации профилей были также выявлены у быстровращающейся O9.5III звезды [14], что свидетельствует о возможности наличия такого типа спектральной переменности и у других ОВ звезд.

В настоящей работе исследуется переменность профилей линий в спектре В2III звезды γ Ori (Беллатрикс, 24 Ori, HR 1790, HD 35468, 2MASS J05250786+0620589) из анализа переменности профилей линий, полученных на 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол в ночи 18/19 и 20/21 января 2019г. Звезда γ Ori известна как низко амплитудная нерегулярная переменная [18]. Быстрая спектральная переменность γ Ori до настоящего времени не изучена, что делает ее интересным объектом исследования.

Настоящая статья организована следующим образом. В разделе 2 представлены основные сведения об изучаемом объекте. Выполненные наблюдения и процедура их обработки описаны в разделе 3. Вариации профилей линий в спектре γ Ori обсуждаются в разделе 4. Результаты Фурье-анализа вариаций профилей линий представлены в разделе 5, вейвлет анализа - в 6, в 7 - обсуждаются результаты исследования и выводы к статье.

2. *Основные сведения о звезде.* Звезда γ Ori является относительно медленно вращающейся звездой спектрального класса B2 II-III [19]. На диаграмме ГР звезда γ Ori находится в области переменных звезд типа β Сер ранних подклассов спектрального класса B [5,20].

Параметры звезды представлены в табл.1, где T_{eff} - эффективная температура звезды, g - ускорение силы тяжести, M - масса звезды, R - ее радиус, $\dot{M}$ - темп потери массы звездой, L - болометрическая светимость, $V \sin i$ - скорость вращения звезды, P_{rot} - период вращения, Age - возраст звезды. Содержание элементов в логарифмической шкале дано в фигурных скобках.

Эффективная температура звезды T_{eff} определяется не вполне надежно. Согласно Simon-Diaz et al. [21] $T_{\text{eff}} = 19500$ К, тогда как Gies et al. [22] (1992) приводят значение $T_{\text{eff}} = 22570$ К. Звезда γ Ori является ярким рентгеновским источником, что косвенно свидетельствует о наличии у нее магнитного поля. Рентгеновская светимость $L_x = 5.5 \cdot 10^{29}$ эрг/с с отношением рентгеновской светимости к болометрической $L_x/L_{\text{Bol}} = 2.2 \cdot 10^{-8}$ [23].

В то же время магнитное поле звезды до настоящего времени не обнаружено. Измерения Butkovskaya, Plachinda [24] дали 4 значения продольной компоненты магнитного поля B_l в интервале от -28.3 до 80.3 Гс. К сожалению, ни одно из этих значений не определено на уровне трех стандартных отклонений, поэтому вопрос о магнитном поле γ Ori остается открытым.

Возраст γ Ori определен нами по ее светимости и температуре, приведенных в табл.1 и положению (см. рис.1) относительно изохрон вращающихся массивных звезд [25]. Полученный возраст близок к возрасту звезд голубого потока Ориона (Orion blue stream), согласно Bouy, Alves [29] (рис.5),

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ γ Ori

Параметр	Значение	Ссылка
T_{eff} , К	22000	[19]
$\log g$	3.60	[19]
$M / M_{\odot}$	8.6 ± 0.3	[26]
$R / R_{\odot}$	5.75	[27]
$\log(\dot{M} / M_{\odot})$	-8.33 ± 0.09	[28]
$\log(L / L_{\odot})$	3.87	[28]
-	3.96	[27]
$V \sin i$ (км/с)	53	[21]
{He}	11.0	[19]
{C}	8.20 ± 0.16	[22]
{N}	7.81 ± 0.22	[22]
{O}	8.68 ± 0.14	[22]
Age (10^6 лет)	19.5 ± 2.5	Настоящая работа

что подтверждает эволюционную близость звезд голубого потока и γ Ori. Значение возраста γ Ori, согласно Tetzlaff et al. [26], равно $(25.2 \pm 2.7) \cdot 10^6$ лет, что представляется завышенным.

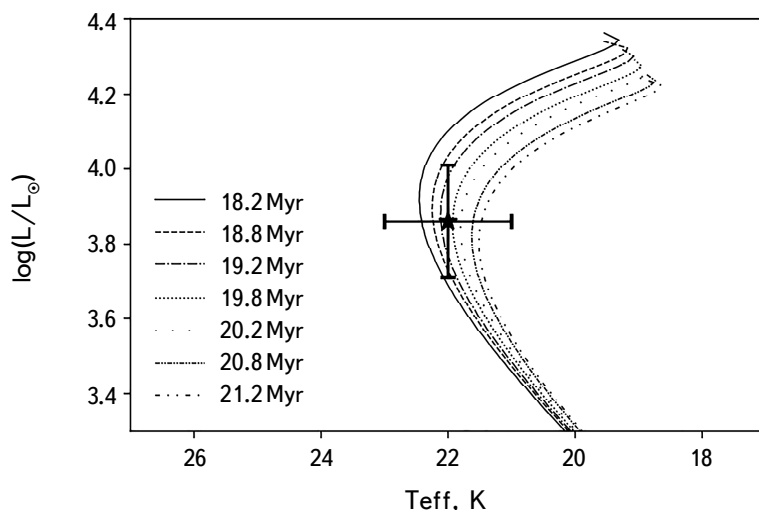


Рис.1. γ Ori на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Приведены изохроны для возрастов τ от 18.2 до 21.2 (в единицах 10^6 лет) согласно Brott et al. [25] для скорости вращения звезды 50 км/с.

3. *Наблюдения.* Наблюдения γ Ori были выполнены на 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол ТФ ИНАСАН в ночи 18/19 и 20/21 января 2019г. с использованием эшелле спектрометра MMCS в фокусе Кассегрена.

В табл.2 представлен журнал наблюдений γ Ori. Спектры с номерами 44136-44156, получены в ночь 18/19 января 2019г. с экспозицией 60 с, а для спектров, полученных в ночь 20/21 января 2019г., использовалась экспозиция 50 с.

Спектры были получены в области $\lambda\lambda 3598-7447 \text{ \AA}$ со спектральным разрешением ~ 15000 . Калибровка спектров была выполнена отдельно для каждого из 27 эшелле порядков. Чувствительность матрицы существенно падает к ее краям, поэтому для анализа переменности профилей выбирались линии ближе к середине порядка.

Полученные спектры нормировались на континуум. Для иллюстрации корректности процедуры нормировки усредненные за две наблюдательные ночи, нормированные спектры в области длин волн $\lambda\lambda 4588-4665 \text{ \AA}$ представлены на рис.2. Отличие нормированных спектров, усредненных за разные ночи, не превышает 1%.

4. *Вариации профилей линий.* Профили линий, пригодные для анализа

Таблица 2

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ γ Ori

No. спектра	MJD	No. спектра	MJD	No. спектра	MJD
44136	58501.93611	44150	58501.95972	44351	58503.85417
44137	58501.93750	44151	58501.96111	44352	58503.85556
44138	58501.93819	44152	58501.96319	44353	58503.85764
44139	58501.93958	44153	58501.96458	44354	58503.85972
44140	58501.94167	44154	58501.96667	44355	58503.86111
44141	58501.94375	44155	58501.96875	44356	58503.86319
44142	58501.94514	44156	58501.97014	44357	58503.86458
44143	58501.94722	44344	58503.83681	44358	58503.86667
44144	58501.94861	44345	58503.84167	44359	58503.86875
44145	58501.95069	44346	58503.84514	44360	58503.87153
44146	58501.95208	44347	58503.84653	44361	58503.87292
44147	58501.95417	44348	58503.84861	44362	58503.87500
44148	58501.95556	44349	58503.85069	44363	58503.87639
44149	58501.95764	44350	58503.85208	44364	58503.87847

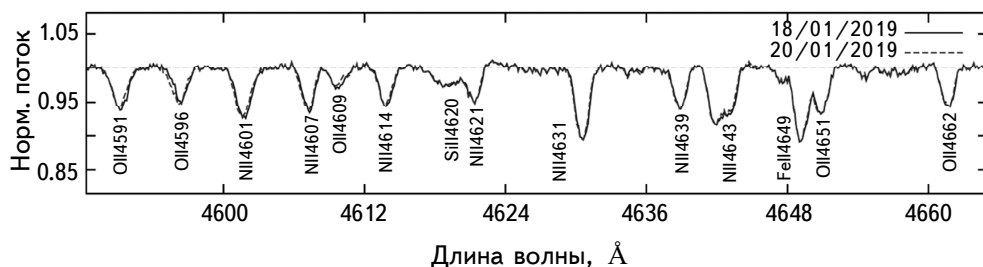


Рис.2. Нормированные спектры γ Ori в области $\lambda\lambda$ 4588 - 4665 Å, усредненные по всем индивидуальным спектрам, полученным в ночи 18 и 20 января 2019г.

их переменности, были нормированы на локальный континуум. Средние нормированные профили линии H β и HeI 4922, полученные в разные ночи наблюдений, показаны на рис.3. Видно, что профили линий меняются от ночи к ночи не более, чем на 1-2% в единицах интенсивности соседнего с линией континуума. В крыльях профиля линии HeI 4922 в спектре γ Ori видны слабые линии OII, SII и FeII.

Характер переменности виден на рис.4, на котором приведены разностные профили $d(V, t_i)$ линий HeI 4922 и HeI 5876, где:

$$d(V, t_i) = F(V, t_i) - \overline{F(V)}. \quad (1)$$

Здесь $F(V, t_i)$ - профиль линии в момент времени $t = t_i$, $V = (\lambda - \lambda_0)/c$ - доплеровское смещение от центральной длины волны линии λ_0 , c - скорость света, а $\overline{F(V)}$ - профиль линии, усредненный по всем анализируемым спектрам.

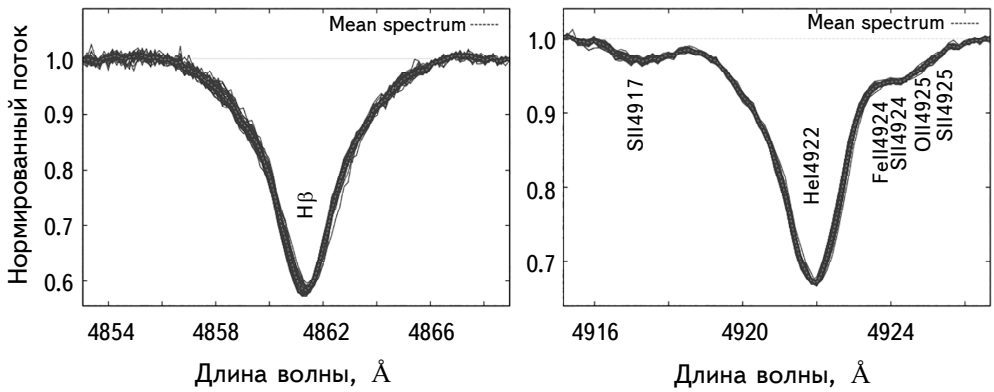


Рис.3. Средние нормированные профили линий H β (слева) и HeI 4922 (справа). Пунктирная линия - средний спектр по всем 42 наблюдениям.

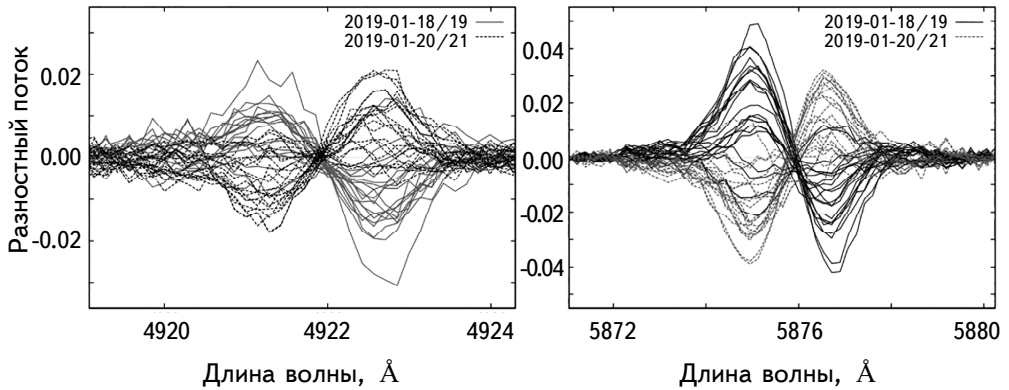


Рис.4. Разностные спектры вариаций профилей линии HeI 4922 (слева) и HeI 5876 (справа) в ночи наблюдений 18/19 января 2019г. (сплошные линии) и 20/21 января 2019г. (пунктир).

Динамические спектры вариаций профилей линий H β в ночи наблюдений 18/19 и 20/21 января 2019г. показаны на рис.5. Для большей наглядности все спектры представлены в единой шкале времени. Начало отсчета ($T=0$) соответствует дате MJD=58501.93611, конец - дате MJD=58503.87847 получения последнего спектра. Полная длительность наблюдений $\Delta T_{max} = 1.94236$ дня (см. табл.2). Как видно из анализа рисунков, характер переменности профилей подобен для разных дат наблюдений.

5. Фурье-анализ профилей линий. Для поиска периодических компонентов в вариациях профилей линий был выполнен Фурье-анализ разностных профилей линий в спектре γ Ori. Для каждой точки на профиле линии, характеризуемой каким-либо значением доплеровского смещения $V = V_k$,

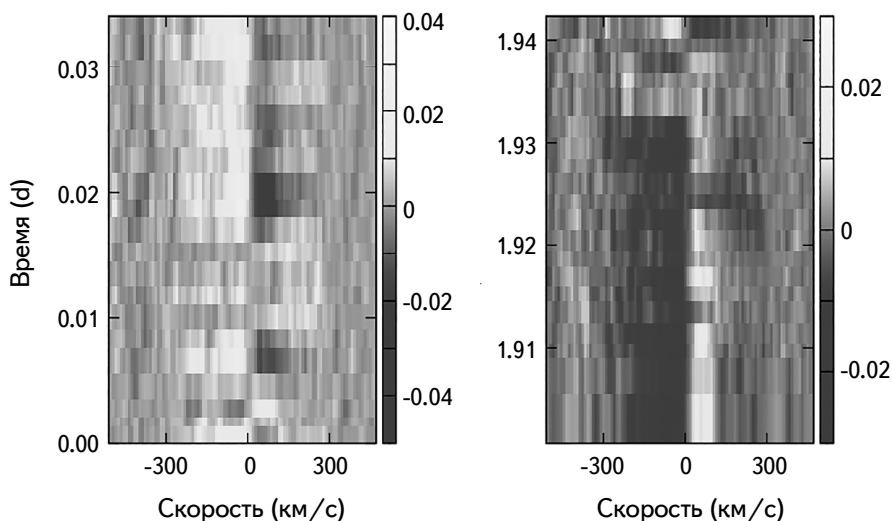


Рис.5. Динамические спектры вариаций профилей линий Н β в ночи наблюдений 18/19 января 2019г. (слева) и 20/21 января 2019г. (справа).

совокупность значений $\{d(V_k, t_i)\}$, $i = 1, \dots, N$, где N - число анализируемых профилей, представляет собой анализируемый временной ряд.

Для поиска регулярных компонентов каждого из таких рядов для всех значений V_k в пределах профиля линии был использован метод CLEAN [30]. В Фурье-спектре присутствуют регулярные компоненты с частотами, соответствующими максимумам амплитуды Фурье-спектра, которые превышают значение, соответствующее выбранному уровню значимости. В табл.3 представлены найденные частоты (колонка 2) и периоды возможных гармонических компонентов вариаций профилей анализируемых линий в часах (колонка 3) и минутах (колонка 4). Уровень значимости, соответствующий найденным компонентам, приведен в 5 колонке таблицы.

В колонках 6-8 табл.3 знак плюс указывает, что соответствующий компонент присутствует в Фурье-спектре, а знак минус -, что на данном уровне значимости он не обнаружен, хотя при большем уровне значимости он может быть зарегистрирован. В последней колонке указано число линий, в вариациях которых обнаружен данный компонент.

Из числа найденных гармонических компонентов вариаций профилей линий были удалены компоненты с частотой, большей частоты Найквиста ν^{Nq} . В силу наличия большого пропуска в рассматриваемом нами временном ряде вариаций профилей линий определим величину ν^{Nq} как наименьшее из значений ν_{18}^{Nq} и ν_{20}^{Nq} , где частота Найквиста для первой ночи наблюдений $\nu_{18}^{Nq} = 0.5/\Delta T^{mean}$, а средний промежуток времени между отсчетами первой

Таблица 3

**ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДЫ РЕГУЛЯРНЫХ КОМПОНЕНТОВ
ВАРИАЦИЙ ПРОФИЛЕЙ В СПЕКТРЕ γ Ori**

No.	ν , 1/день	P , час	P , мин	α	H	He	СII+SiII	N_{lines}
1	25.347	0.947 ± 0.019	56.8 ± 1.1	10^{-2}	+	+	+	5
2	17.556	1.367 ± 0.040	82.0 ± 2.4	10^{-4}	-	+	+	4
3	16.547	1.450 ± 0.045	87.0 ± 2.7	10^{-4}	-	+	-	7
4	15.480	1.550 ± 0.052	93.0 ± 3.1	10^{-3}	-	+	+	3
5	14.313	1.677 ± 0.060	100.6 ± 3.6	10^{-5}	-	+	-	4
6	13.515	1.776 ± 0.068	106.6 ± 4.2	10^{-5}	-	+	+	2
7	10.863	2.209 ± 0.105	132.5 ± 6.3	10^{-3}	-	+	+	3

ночи наблюдений $\Delta T^{mean} = T/(N-1)$. Здесь $T=0.0356$ дня - продолжительность наблюдений в ночь 18/19 января 2019г., а $N=21$ - число спектров, полученных за ночь. Аналогичным образом определяется величина ν_{20}^{Nq} . Полученное нами значение $\nu^{Nq} = 247$ день $^{-1}$.

Верхние пределы ошибок частот компонентов Фурье спектра в табл.3 оценены из соотношения $\Delta\nu \leq 1/T$ (см., например, [31]). Здесь $T=1.9424$ дня - полное время наблюдений γ Ori.

Кроме указанных в табл.3 регулярных компонентов в Фурье-спектре вариаций профилей были обнаружены компоненты с периодами 2.7, 6.7 и 13.0 часа, которые были исключены из таблицы, так как эти периоды превышают суммарную длительность двух рядов наблюдений 149 мин (2.5 часа). Найденные периоды $P_1 - P_7$ для γ Ori ранее не были обнаружены. В то же время подобные периоды были найдены нами для ρ Leo, α^2 CVn, ζ Ori и других звезд (см., например, [14,15]).

На рис.6 найденные частоты вариаций профилей в спектре γ Ori сравниваются с периодограммой кривой блеска γ Ori, полученной по наблюдениям звезды на мини-спутниках BRITe. Компоненты 2-6 табл.3 соответствуют пикам периодограммы. Компонент ν_1 находится вне области частот, представленных на рис.6. Компонент с номером 7 не соответствует никаким пикам периодограммы, что позволяет усомниться в его реальности.

В статье [32] звезда γ Ori с малой амплитудой вариаций блеска в 0.025 mmag рассматривается как опорная звезда для анализа фотометрической переменности ν Eri, однако совпадение пиков периодограммы б с положениями гармонических компонентов вариаций профилей линий противоречит предположению о постоянстве блеска γ Ori. Можно сделать предварительный вывод о принадлежности γ Ori к группе переменных тип β Ser малой амплитуды.

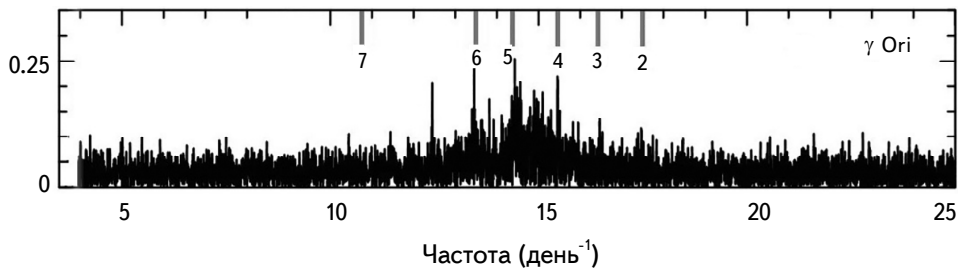


Рис.6. Сравнение найденных частот вариаций профилей в спектре γ Ori с полученными из анализа кривых блеска звезды согласно наблюдениям на спутниках BRITE [32], (рис.3). Цифры на рисунке соответствуют номерам компонентов в табл.3.

6. Вейвлет-анализ профилей линий. Анализ разностных профилей линий в спектрах γ Ori (рис.4) показывает присутствие в них дискретных компонентов. Мелкомасштабные детали профилей вероятно связаны с шумовым компонентом профилей, а детали больших масштабов могут относиться как к регулярному, так и нерегулярному компонентам вариаций профилей. Наиболее подходящим математическим аппаратом для исследования образования и эволюции деталей профилей разных масштабов является вейвлет-анализ с анализирующим МНАТ-вейвлетом:

$$\psi(x) = (1 - x^2) \exp(-x^2/2), \quad (2)$$

с узким энергетическим спектром и равными нулю первым и нулевым моментами.

Используя этот вейвлет, интегральное вейвлет-преобразование разностного профиля линии можно записать в следующем виде [33,34]:

$$W(S, V, t) = \frac{1}{S^\beta} \int_{-\infty}^{\infty} d(V', t) \psi\left(\frac{V - V'}{S}\right) dV', \quad (3)$$

где $d(V, t)$ - исследуемая функция (разностный профиль линии), полученная в момент времени t в пространстве скоростей V . В оригинальном представлении вейвлет-преобразования принимается значение $\beta = 1/2$. В то же время вариация этого параметра позволяет изменять амплитуды функции $W(S, V, t)$ в зависимости от масштаба. При значениях $\beta > 1/2$ увеличивается амплитуда вейвлет-преобразования на малых масштабах, а при $\beta < 1/2$ - на больших масштабах.

Плотность энергии сигнала $E(S, V, t) = W^2(S, V, t)$ характеризует распределение энергии исследуемого сигнала в пространстве $(S, V) = (\text{масштаб}, \text{координата})$ в момент времени t . В этом случае масштабная переменная S выражается в км/с.

Для изучения эволюции деталей разностных профилей нами были

рассчитаны величины $E(S, V, t) = W^2(S, V, t)$ для бальмеровских линий и линий нейтрального гелия для всех моментов времени t , в которые получены спектры звезды в наблюдательные ночи 18/19.01.2019 и 20/21.01.2019. Совокупность функций $E(S, V, t)$ для фиксированных масштабов S назовем *динамическим вейвлет-спектром* вариаций профиля рассматриваемой линии в спектре звезды.

На рис.7 представлены динамические вейвлет-спектры линии $\text{H}\alpha$ в спектре γ Ori, полученные 18/19.01.2019, и 20/21.01.2019. Из анализа рисунка видно, что характер вариаций для спектров, полученных в разные ночи, подобен. На относительно малых масштабах $S \leq 20$ км/с, меньших спектрального разрешения, в вейвлет вариациях профилей виден главным образом вклад шумового компонента профиля. На больших масштабах $S = 120$ км/с детали профилей размываются, а в то же время на масштабах $S = 40 - 80$ км/с детали вариаций профилей хорошо видны.

Для определения характерных масштабов деталей вариаций профилей линий в спектре γ Ori будем использовать усредненный по профилю линии

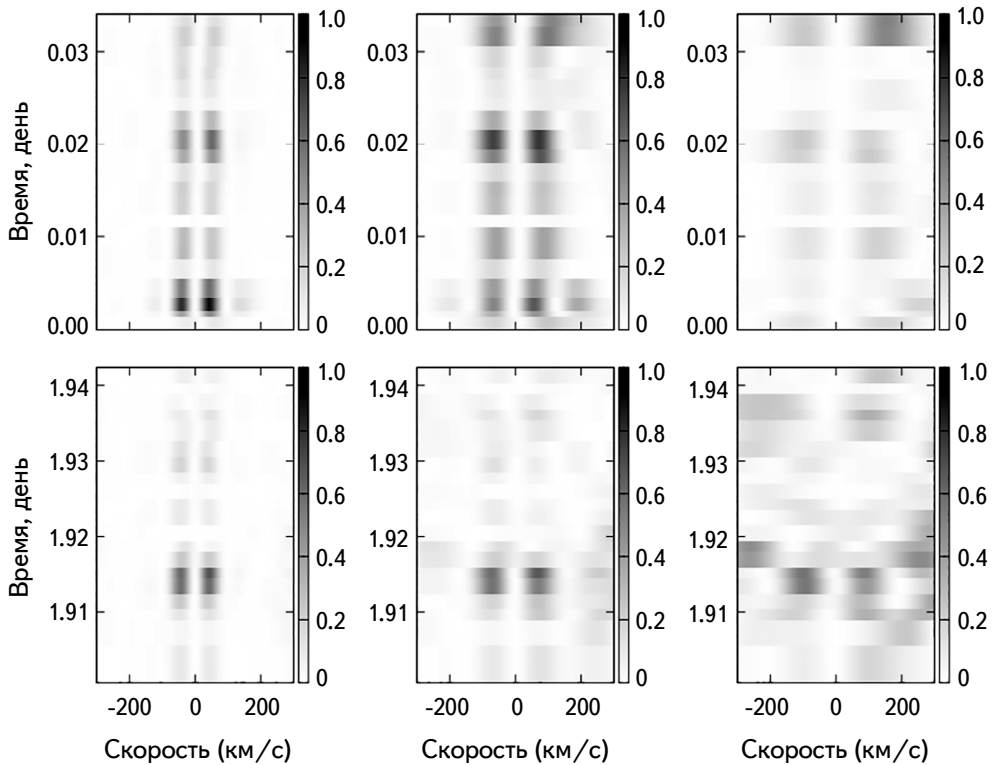


Рис.7. Динамический вейвлет-спектр вариации профилей линии $\text{H}\alpha$ с МНАТ материнским вейвлетом масштабом $S = 40$ км/с (слева), $S = 80$ км/с (посередине) и $S = 120$ км/с (справа) для спектров, полученных 18/19 января 2019г. (вверху) и 20/21 января 2019г. (внизу).

спектр энергии вейвлет-преобразования для спектра, полученного в момент времени t :

$$E_W(S, t) = \int_{-\infty}^{\infty} E(S, V, t) dV. \quad (4)$$

Индивидуальные спектры энергии вейвлет-преобразования сильно меняются со временем, поэтому определим глобальный спектр энергии:

$$E_W(S) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=0}^{N-1} E(S, V, t) \right), \quad (5)$$

где N - полное число анализируемых спектров.

Глобальный спектр энергии вейвлет-преобразования для линий $H\alpha$, $H\beta$ и HeI 4471 показан на рис.8. Для выявления размеров деталей разностных спектров было выбрано значение $\beta = 1.1$. На рис.8 видны 3 характерных масштаба: 11-12, 70-90 и 600-700 км/с. Последний масштаб соответствует характерной ширине профилей линий в спектре γ Ori.

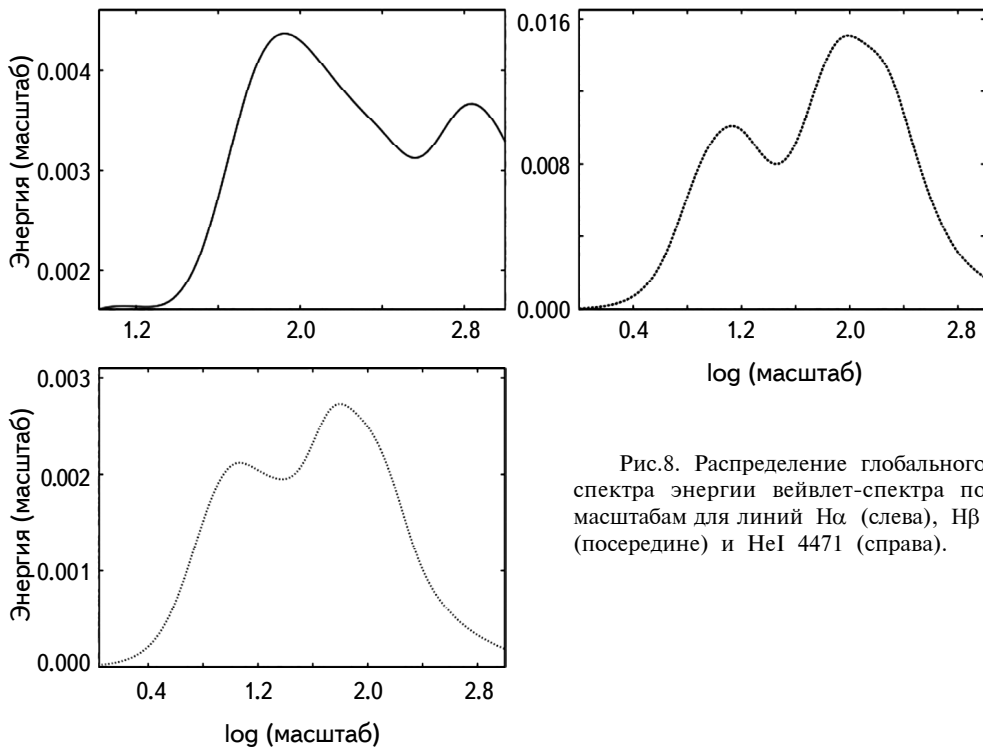


Рис.8. Распределение глобального спектра энергии вейвлет-спектра по масштабам для линий $H\alpha$ (слева), $H\beta$ (посередине) и HeI 4471 (справа).

Согласно оценкам в статье [35], дисперсия скоростей ~ 12 км/с соответствует размеру неоднородностей $\Delta R \sim 0.07 R_{\odot}$, что составляет $0.01 R_*$, где R_* - радиус γ Ori. Для компонента $S = 70 - 90$ км/с размер неоднородностей

$\Delta R \sim 0.4 R_{\odot}$ ($0.07 R_*$). Формирование неоднородностей такого размера в фотосфере или в ветре γ Ori вполне реально.

7. Обсуждение результатов и выводы. К настоящему времени по программе поиска сверхбыстрой переменности профилей линий нами проанализированы спектры 10 звезд: ζ Ori A (O9.2I), HD 93521 (O9Vp), γ Cas (B0.5IVpe), ρ Leo (B1Iab), π Aqr (B1III-IVe), ε Per (B1.5III), λ Eri (B2III), α And (B8IV-V), α^2 CVn (A0Vp) и γ UMi (A2III) [14-16,36]. Также могут быть использованы результаты анализа профилей линий в спектрах HD 92207 (A0Ia), полученных Hubrig et al. [7] со спектрографом FORS 2. Наиболее быстрые регулярные вариации профилей с периодом до 2 мин зарегистрированы в спектре ρ Leo. У этих же звезд найдены вариации профилей линий с периодами 3-5 часов, соответствующим типичным периодам нерадиальных пульсаций низких мод.

Исходя из выполненного анализа, можно сделать выводы о характере переменности профилей линий в спектрах звезд разных спектральных классов. В первую очередь следует отметить уменьшение периодов быстрых вариаций профилей линий в спектрах звезд при переходе от O и ранних B звезд к звездам спектрального класса A. В то время, как самые быстрые изменения профилей линий с периодами 3-5 мин обнаружены у O сверхгиганта HD 93521 и у B0.5IVpe звезды γ Cas, найденные периоды быстрых вариаций профилей у A звезд составляют $\sim 30 - 120$ мин.

Периоды вариаций профилей в спектрах B звезд являются промежуточными по сравнению с найденными для O и A звезд. Обнаружение Холтыгиным и др. [16] вариации профилей линий в спектре ρ Leo с периодом $\sim 18 - 19$ мин подтверждает этот вывод. В то же время выполненных до настоящего времени исследований пока недостаточно для анализа характера переменности профилей в зависимости от класса светимости звезды.

Обращаясь к анализу выполненного нами исследования вариаций профилей линий в спектре γ Ori отметим, что согласно работе [37], γ Ori исключена из списка переменных звезд типа β Cep. Авторы указанной статьи основываются на V-фотометрии γ Ori, представленной в работе Krisciunas, Fisher [38], Krisciunas [39] и Krisciunas & Luedeke [40], где говорится о низкоамплитудной и, возможно, нерегулярной переменности звезды и о малом числе измерений блеска для поиска регулярных компонентов их вариаций. Строго говоря, Stankov, Hundler [37] говорят лишь о недостаточности исследования переменности γ Ori. Настоящая статья дополняет анализ переменности γ Ori, выполненный в статьях [38-40], исследованиями спектральной переменности.

Важно отметить, что определенный вклад в переменность профилей линий могут вносить инструментальные эффекты, связанные с перемещением

изображения звезды внутри щели спектрометра в силу неточностей гидирования, эффектов гнута в системе телескоп-спектрометр, погодных условий и т.д. Не отрицая важность этих эффектов, следует отметить, что возможные случайные сдвиги за счет инструментальных эффектов в значительной степени компенсируются при анализе всех рассмотренных 42-х спектров звезды. Для тестирования гипотезы об инструментальном происхождении обнаруженной регулярной переменности профилей нами был выполнен статистический эксперимент.

Было предположено, что вся имеющаяся переменность профилей линий связана с их инструментальными сдвигами. В этом случае профили конкретной линии, полученные за все время наблюдений, являются одним и тем же профилем, случайно сдвинутым на величину порядка 1 пикселя с добавлением шумового компонента с отношением сигнал/шум таким же, как и реальных спектров. То есть предполагается, что реально профили линий не переменны, а все их вариации - это следствие вклада шумового компонента и инструментальных сдвигов.

При этом оказалось, что для всех рассмотренных линий такая процедура не привела к появлению каких-либо регулярных компонентов вариаций профилей. То есть существуют основания утверждать, что в вариациях профилей в спектре γ Ori присутствуют реальные регулярные компоненты.

Дополнительно была сделана проверка сдвига теллурических линий в спектрах относительно усредненного спектра. Сдвиг теллурических линий единичных спектров составил от $0.02 \text{ \AA}$ до $0.05 \text{ \AA}$, в среднем сдвиг определен на уровне $0.03 \text{ \AA}$. В отдельно взятых спектрах сдвиг исследуемых линий был разнонаправлен со сдвигом теллурических линий, что дополнительно указывает на то, что обнаруженная переменность не связана с инструментальными погрешностями. Результаты численного эксперимента показали, что добавление инструментального сдвига профилей линий в указанном интервале не меняет частот гармонических компонентов вариаций профилей линий.

Исходя из выполненного нами анализа вариаций профилей линий в спектре γ Ori, полученных на 2-м телескопе Цейс-2000 Терскольской обсерватории в январе 2019г., можно сделать следующие выводы:

- Обнаружены изменения профилей бальмеровских линий и линий HeI в спектре γ Ori на минутных шкалах времени на уровне 1-2% от потока в соседнем с линией континууме.
- В вариациях профилей линий H β , H γ , HeI 4471 и HeI 4922 в спектре γ Ori возможно присутствуют регулярные компоненты с периодами от ~ 57 до ~ 130 мин.
- Найденные в настоящей работе периоды регулярных вариаций профилей линий в спектре γ Ori на минутных шкалах времени не были ранее обнаружены.

- Можно предположить, что γ Ori относится к группе переменных звезд типа β Сер малой амплитуды.
- Проведенные спектральные наблюдения γ Ori и их анализ показывают возможность изучения быстрых вариаций профилей широких линий в спектрах ОВА звезд при использовании телескопов класса 1-2 м и, в частности, эшелле-спектрографа 2-м телескопа Цейс-2000.

Настоящее исследование поддержано грантом РФФИ № 19-02-00311 А.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия, e-mail: afkholtygin@gmail.com

² Институт Астрономии РАН, Россия

SUPERFAST LINE PROFILE VARIABILITY IN SPECTRA OF γ Ori

A.F.KHOLTYGIN¹, V.B.PUZIN², I.V.SOKOLOV², M.S.KURDOYAKOVA¹

Results of observations of high temporal resolution ($\Delta T \sim 2$ min) of the B2V star γ Ori at the 2-m telescope of the at Terskol Peak observatory are presented. Regular components of line profile variations with periods from ~ 57 to ~ 130 minutes were registered. The nature of such variations is discussed.

Keywords: *stars: spectra - line profiles: variability - individual: γ Ori*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Kaper, H.F.Henrichs, A.W.Fullerton et al.*, Astron. Astrophys., **327**, 281, 1997.
2. *S.Simón-Díaz, C.Aerts, M.A.Urbaneja et al.*, Astron. Astrophys., **612**, A40, 2018.
3. *Y.Nazé, A.Pigulski, G.Rauw et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **494**, 958, 2020.
4. *S.Hubrig, Z.Mikulášek, A.F.Kholtygin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **472**, 400, 2017.
5. *C.Aerts*, Reviews of Modern Physics, **93**, id. 015001, 2021
6. *A.Kaufer, O.Stahl, B.Wolf et al.*, Astron. Astrophys., **320**, 273, 1997.
7. *S.Hubrig, M.Schoeller, A.F.Kholtygin*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **440**, 1779, 2014.

8. *V.L.Afanasiev, A.V.Moiseev*, *Astron. Lett.*, **31**, 2005.
9. *V.E.Panchuk, G.A.Chuntunov, I.D.Naidenov*, *Astrophys. Bull.*, **69**, 339, 2014.
10. *G.A.Chountunov*, *Astrophys. Bull.*, **71**, 489, 2016.
11. *N.P.Ikonnikova, I.A.Shaposhnikov, V.F.Esipov et al.*, *Astron. Lett.*, **47**, 460, 2021.
12. *V.V.Komarov, A.S.Moskvitin, V.D.Bychkov et al.*, *Astrophys. Bull.*, **75**, 486, 2020.
13. *F.A.Musaev, S.I.Barabanov, A.V.Sergeev*, *INASAN Science Rep.*, **4**, 158, 2019.
14. *A.F.Kholtygin, A.V.Moiseeva, I.A.Yakunin et al.*, *Geomagnetism and Aeronomy*, **61**, 923, 2021.
15. *A.F.Kholtygin, A.V.Moiseeva, I.A.Yakunin et al.*, *Geomagnetism and Aeronomy*, **62**, 1136, 2022.
16. *A.F.Kholtygin, A.A.Batrakov, S.N.Fabrika et al.*, *Astrophys. Bull.*, **73**, 471, 2018.
17. *F.J.Harris*, *Proc. IEEE*, **66**, 51, 1978.
18. *S.Burssens, S.Simón-Díaz, D.M.Bowman et al.*, *Astron. Astrophys.*, **639**, A81, 2020.
19. *K.Lefever, J.Puls, T.Morel et al.*, *Astron. Astrophys.*, **515**, A74, 2010.
20. *A.A.Pamyatnykh*, *Acta. Astron.*, **49**, 189, 1999.
21. *S.Simón-Díaz, A.Herrero*, *Astron. Astrophys.*, **562**, A135, 2014.
22. *D.R.Gies, D.L.Lambert*, *Astrophys. J.*, **387**, 673, 1992.
23. *T.W.Berghoefer, J.H.M.M.Schmitt, J.P.Cassinelli*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **118**, 481, 1996.
24. *V.V.Butkovskaya, S.I.Plachinda*, *JQSTR*, **88**, 17, 2004.
25. *I.Brott, E. de Mink, M.Cantiello et al.*, *Astron. Astrophys.*, **530**, A115, 2011.
26. *N.Tetzlaff, R.Neuhäuser, M.M.Hohle*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **410**, 190, 2011.
27. *M.Challouf, N.Nardetto, D.Mourard et al.*, *Astron. Astrophys.*, **570**, A104, 2014.
28. *C.Cazorla, Y.Naze*, *Astron. Astrophys.*, **608**, A54, 2017.
29. *Y.Bouy, J.Alves*, *Astron. Astrophys.*, **584**, A26, 2015.
30. *D.H.Roberts, J.Lehar, J.W.Dreher*, *Astron. J.*, **93**, 968, 1987.
31. *B.B.Вутязев*, *Анализ неравномерных временных рядов*, СПб.: Изд. СПбГУ, 2001.
32. *G.Handler, M.Rybicka, A.Popowicz et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **464**, 2249, 2017.
33. *N.M.Astaf'eva*, *Physics Uspekhi*, **39**, 1085, 1996.
34. *A.A.Koronovskii, A.E.Khramov*, *Continuous wavelet analysis and its applications*, М., Fizmatlit (in russian), 2003.
35. *N.A.Kudryashova, A.F.Kholtygin*, *Astron. Rep.*, **45**, 287, 2001
36. *A.F.Kholtygin, M.A.Burlak, Yu.V.Milanova et al.*, *Astron. Tsirk.*, **1652**, 2022.
37. *A.Stankov, G.Hundler*, *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **158**, 193, 2005.
38. *K.Krisciunas, D.Fisher*, *IBVS*, No. 3227, 1988.
39. *K.Krisciunas*, *IBVS*, No. 4028, 1994.
40. *K.Krisciunas, K.U.Luedeke*, *IBVS*, No. 4355, 1996.