

# Нерадиальные пульсации звезд ранних спектральных классов

Холтыгин А.Ф.

*Астрономический институт СПбГУ, Россия*

**Абстракт** Представлены результаты поиска и анализа микропеременности профилей линий в спектрах ярких сверхгигантов спектральных классов О и В с временным разрешением 3-15 минут. Получено свыше 1000 спектров  $\delta$  Ori A,  $\lambda$  Ori A,  $\alpha$  Cam, 19 Cep,  $\iota$  Her,  $\rho$  Leo и других звезд на 6-м и 1-м телескопах САО и 1.8-м телескопе обсерватории Бохинсанской Астрономической обсерватории (Южная Корея). Обнаружена регулярная переменность профилей на временных масштабах от часов до дней, которая связывается с нерадиальными пульсациями исследуемых звезд. Впервые обнаружены квази-регулярные изменения профилей линии СИИ  $\lambda$  5696 в спектре звезды  $\delta$  Ori A.

**Abstract** Kholtygin A.F. **Nonradial pulsations in early spectral class stars.** The results of the searching and analysis of the microvariability of the line profile in spectra of bright OB-stars are presented. More than 1000 spectra of  $\delta$  Ori A,  $\lambda$  Ori A,  $\alpha$  Cam, 19 Cep,  $\iota$  Her,  $\rho$  Leo and other stars were obtained with using 1-m and 6-meter telescope of Special Astrophysical Observatory and 1.8-m telescope of Bohinsan Astronomical Observatory (Korea) were obtained. The regular line profile variability (lpv) on the time scales from hours to days, connected with the non-radial pulsations, was revealed. At the first time the quasi-regular СИИ  $\lambda$  5696 line profile variations in the spectra of  $\delta$  Ori A was detected.

## 1. Введение

Как теоретические, так и наблюдательные исследования показывают, что значительная часть звезд являются пульсирующими. Если радиальные пульсации характерны, в основном, для звезд поздних спектральных классов, то нерадиальные пульсации (НРП) охватывают звезды практически всех спектральных классов [38].

Поверхностное поле скоростей звезды при нерадиальных пульсациях можно представить комбинацией сферических гармоник (пульсационных мод)  $Y_l^m(\vartheta, \phi)$  (см., например, [11, 39]). Для определения мультипольности пульсационных мод  $l$  и азимутального параметра  $m$  звезд верхней части главной последовательности часто используются

следующие соотношения [45]:

$$l \approx 0.076 + 1.110 \cdot \Delta\Phi_0 / \pi, \quad m \approx -1.028 + 0.613 \cdot \Delta\Phi_1 / \pi. \quad (1)$$

где  $\Delta\Phi_0$  - полное изменение фазы  $\Phi_0$  исследуемого периодического компонента вариаций профиля линии вдоль профиля линии в полосе  $\pm V \sin i$ , а  $\Delta\Phi_1$  - та же величина для его первой гармоники.

Особо сложной наблюдательной задачей представляется обнаружение нерадиальных пульсаций горячих ОВ-звезды, для которых амплитуда вариаций профилей, связанных с пульсациями, мала [7, 8]. В настоящей работе изложены результаты исследований переменности звезд ранних спектральных классов, в которых найдены свидетельства присутствия НРП в вариациях профилей линий по наблюдениям, выполненным в 2004-2006 г. на БТА и 1.8-м телескопе Бохинсанской астрономической обсерватории (ВОАО, Южная Корея).

## 2. Объекты и программа наблюдений

Исследование быстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов является наиболее эффективным способом изучения структуры атмосфер звезд. Переменные звезды верхней части главной последовательности делятся на две большие группы: звезды типа  $\beta$  Сер и медленно пульсирующие В звезды (SPB звезды), выделенные как отдельная группа переменных звезд в работе [50]. В группу SPB звезд входят звезды спектральных классов В2 - В5, обладающие мультипериодическими фотометрическими вариациями на временных шкалах от нескольких часов до  $\approx 2$  d. Обычно эти вариации приписываются  $g$ -модам нерадиальных пульсаций высокого порядка (см., например, [38]), тогда как звезды типа  $\beta$  Сер пульсируют в более быстрых  $p$ -модах НРП.

Анализ имеющихся в литературе наблюдений профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов [20, 28] показал, что для уверенного выявления как нерегулярных (стохастических), так и регулярных (связанных, в частности, с НРП) изменений профилей необходимо достижение спектрального разрешения  $R \geq 30000$ , отношения сигнал/шум (S/N) в области исследуемых линий 200-300 и выше и достаточно хорошее временное разрешение ( $\leq 10$ -30 минут).

Таблица 1. Список программных звезд

HD	Имя	Сп.Кл.п.	$m_V$	$V_{\text{rad}}$	$V \sin i$	$V_{\infty}$	$-\lg \frac{M}{M_{\odot}}$	$\frac{M}{M_{\odot}}$	$\frac{R}{R_{\odot}}$	$\frac{T_{\text{eff}}}{10^3}$	$\lg \frac{L_{\text{bol}}}{L_{\odot}}$	$\frac{P_p}{\text{d}}$	ссылки
2905	$\kappa$ Cas	B1Iae	4.19	-2.3	55	2050	5.60	29	35	24.0	5.39	340	a, b, c, j
3360	$\zeta$ Cas	B2IV	3.67	2.0	17	1295	6.64	21	23	21.2	4.90		a, b, d
24398	$\zeta$ Per	B2ab	2.88	-	67		6.90	20	12	20.3	4.86		a, b, j, o
24760	$\varepsilon$ Per	B0.5IV	2.90	1.30	155		5.80	21	26	35.4	5.40		a, b
24912	$\xi$ Per	O7.5III	4.04	65	213	2350	5.20	31	29	30.0	5.79		a, b, o
30614	$\alpha$ Cam	O9.5I	4.29	10.6	80	1500	5.97	10	11	33.0	5.17		a, h
36486	$\delta$ Ori A*	O9.5II	2.23	16.0	145	2000	6.10	28	10		5.13		a, i
36861	$\lambda$ Ori A*	O8III	3.66	35.4	65	2175							a, a
37018	42 Ori	B1V	4.59	30.0	20			12	6	29.0	5.2		a, a
37020	$\theta^1$ Ori A	B0.5V	6.73	33.4	75								a, a
37021	$\theta^1$ Ori B	B0V	7.96	24.0	162	1060		43	8	45.5	5.4	1100	a, f, m
37022	$\theta^1$ Ori C	O6pe	5.13	28	80			10	6	30.0			a, a
37023	$\theta^1$ Ori D	B0.5Vp	6.71		183	1050		21		35.5	4.8	530	a, a
37041	$\theta^2$ Ori	O9.5Vpe	5.08	35.6	190			25	20	32.0	5.19		a, e
37490	$\omega$ Ori	B3IIIe	4.57	+21.8	124	1860	5.80	27	9	39.5	5.09		a, a
37742	$\zeta$ Ori A	O9Iab	1.79	12.8	124	2110	6.22	22	27	20.3	5.06		a, j, n
47839	15 Mon	O7Ve	4.66	19.6	67	1110	5.95	24	8	34.0	4.9		a, j, m
91316	$\rho$ Leo*	B1Ib	3.84	42.0	60	400:							a, a
93521		O9.5V	7.06	-16	431			8	5	17.5	3.26	250	a, a
120315	$\eta$ Uma	B3V	1.85	-10.9	226								a, a
156633	68 Her	B1.5Vp+	4.80	-21.0	105			8					a, k
160762	$\iota$ Her*	B3IV	3.79	-20.0	10								a, a
163472	$v_{2052}$ Oph	B2IV-V	5.83	-17	127								a, e
166182	102 Her	B2IV	4.35	-14.5	30								a, a
180968	2 Vul	B0.5IV	5.47	1.	300								a, a
203064	68 Cyg	O8e	5.04	-3.9	115	2550	5.85	36	16	34.5	5.50		a, a
205021	$\beta$ Cep	B2III	3.22	-8.2	27	800						360	a, g
209975	19 Cep	O9.5I	5.11	-12.8	95	2010		31	18	30.2	5.4		a, m
210839	$\lambda$ Cep	O6Iab	5.09	-75.9	219	2300		55	19	38.0	5.8		a, m
214680	10 Lac	O9V	4.87	-9.7	35	1140		31	9	38.0	5.1		a, m

Ссылки: a - [37], b - [48], c - [47], d - [34], e - [33], f - [18], g - [17], h - [29], i - [32], j - [26], k - [22], l - [40], m - [25], n - [46], o - [31], \* параметры относятся к главному компоненту двойной (тройной) системы

Исходя из этого, для поиска НРП нами были отобраны яркие ОБ-звезды ( $V \leq 7^m$ ), спектры которых могут быть получены с необходимым качеством с использованием 1-2 метровых телескопов. Список программных звезд дан в Табл. 1. В таблице даны значения лучевых скоростей звезд  $V_{\text{rad}}$ , скоростей вращения  $V \sin i$ , терминальных скоростей ветра  $V_{\infty}$ , темпа потери массы  $\dot{M}$ , массы и эффективной температуры звезды, болометрической светимости и полярной напряженности магнитного поля  $B_p$  (для дипольной конфигурации поля).

При выборе подходящих дат программные звезды можно наблюдать почти всю ночь, что обеспечивает за 3-6 ночей получение длинных рядов наблюдений (2-3 периода вращения звезды), необходимых для надежного выделения регулярного компонента переменности профилей линий. В период с 2001 по 2004 год по данной программе получено свыше 1000 эшелле-спектров звезд спектральных классов О и В.

### 3. Анализ наблюдений в САО и ВОАО

#### 3.1. $\iota$ Her

Спектрально-двойная звезда  $\iota$  Her состоит из яркой ( $V=3.80^m$ ) звезды спектрального класса В3IV и слабого маломассивного спутника ( $\Delta m = 7.5^m$  [14]). Параметры звезды приведены в Табл. 1.

Наблюдения  $\iota$  Her проводились 25, 29 Мая и 2-го июня 2004 года с помощью оптоволоконного эшелле спектрографа BOES [13] 1.8-м телескопа ВОАО, оснащенного ПЗС приемником  $2048 \times 4096$ . Получено 69 эшелле-спектров со спектральным разрешением  $R \approx 44000$  в области  $3782 < \lambda < 9803 \text{ \AA}$ . Общее время наблюдения  $\approx 8.5$  часов. При экспозиции около 3-7 минут достигнуто отношение  $S/N \approx 300$ .

Изображения обрабатывались стандартным образом с помощью пакета IRAF. Последующая редукция спектров проводилась с использованием модифицированной версии Dech20T пакета Dech [3]. Для исследования переменности профилей линий спектры нормировались на континуум. Длины волн были переведены стандартным образом в гелиоцентрическую шкалу. В качестве нуля-пункта шкалы длин волн было использовано среднее значение лучевой скорости центра масс системы  $\iota$  Her:  $V_{\text{rad}} = -19.9 \text{ км/с}$  [14].

### 3.1.1. Переменность профилей

В полученном нами спектре отождествлено свыше 100 линий H, He, ионов C, N, O и других элементов. Для детального анализа были отобраны неблендированные линии с остаточными интенсивностями в центре линии  $r \leq 0.8$ : HeI 4437.551 Å, SiIII 4552.616 Å, SiIII 4567.82 Å, H $\beta$ , HeI 4713.1455 + 4713.376 Å, и HeI 5875.621 + 5875.966 Å.

Для выделения переменных деталей профилей линий всех полученных спектров строились динамические спектры (временные последовательности разностных профилей линий). Для иллюстрации характера вариаций профилей линий на рис. 1 представлены карты плотности динамических спектров исследуемых линий в спектре  $\iota$  Her, полученные по наблюдениям, выполненным 2 июня 2004 г. Изменения профилей присутствуют только вблизи центра линии в области скоростей  $\pm 30$  км/с. Отсутствие вариаций профилей в области больших скоростей связано с малой амплитудой изменений профилей в области вне полосы  $\pm(V \sin i + W)$ , где  $W \approx 20$  км/с - ширина слабых линий в спектре звезды на половине максимума интенсивности.

В начале наблюдений вблизи центра всех линий на скорости  $\approx -10$  км/с видна квази-абсорбционная деталь профиля (выделена черным цветом). С течением времени эта деталь сначала смещается в область отрицательных скоростей (до  $\approx -20$  км/с), затем переходит в область положительных скоростей, и в конце наблюдений снова перемещается к центру линии. Симметрично квази-абсорбциям профиля располагаются квази-эмиссионные детали (выделены белым и светло серым цветами). Перемещение квази-эмиссионных деталей всех исследованных профилей симметрично смещению квази-абсорбций профилей. Такая картина переменности типична для вариаций профилей, вызываемых НРП (см., например, [39, 45]).

### 3.1.2. Фурье-анализ вариаций профилей линий

Для выяснения механизма, вызывающего переменность профилей, необходимо определить, являются ли изменения профиля в той или иной степени регулярными (циклическими) или нерегулярными (стохастическими). Для этих целей в данной работе использованы методы Фурье-анализа.

Для каждой из изучаемых линий были построены временные ряды  $\Delta I(t, \lambda)$  - разностных интенсивностей профиля линии в момент вре-

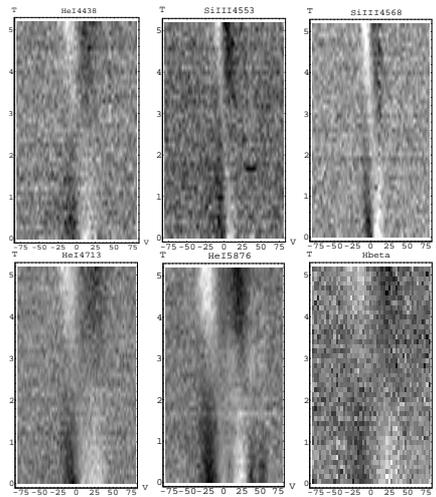


Рис. 1. Динамические спектры вариаций профилей линий в спектре звезды  $\iota$  Her 2 июня 2004 г. Отклонения индивидуальных профилей линий от среднего показаны оттенками серого цвета. Светлым областям на рисунке соответствуют участки профилей, лежащие выше уровня среднего профиля, темным – ниже среднего. Интервал между последовательными спектрами – 7 мин. Время (в часах от момента начала наблюдений) отсчитывается снизу вверх.

мени  $t$  на длине волны  $\lambda$ . Значения  $\lambda$  переведены в доплеровские смещения  $V$  от центра профиля (в системе отсчета, связанной со звездой). Для полученных временных рядов рассчитывалась плотность спектра мощности дискретного преобразования Фурье (значения периодограммы Шустера [1, 42]). Для очистки Фурье-спектра от ложных пиков использовался алгоритм CLEAN [41] в варианте [2] с учетом методики [6].

Ввиду сложности и малой изученности статистических свойств периодограмм белого шума для существенно неоднородных рядов [42] для более надежного выделения значимых пиков периодограммы мы использовали значение уровня значимости гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума  $q \leq 10^{-3}$ , меньшее чем обычно применяемая величина  $q \leq 10^{-2}$  (см. детали в [7]).

При построении Фурье-спектров вариаций профилей линий использовались разностные профили, полученные вычитанием из инди-

видуальных профилей линий среднего профиля за все 3 ночи наблюдений. В рассчитанных периодограммах присутствует несколько десятков отдельных пиков, но только в промежутке частот  $\nu = 0 - 4 \text{ d}^{-1}$  найдены значимые компоненты.

В результате анализа Фурье-спектра вариаций профилей линий в спектре  $\iota$  Her нами выделено 8 гармонических компонентов в интервале частот  $0.3 \leq \nu \leq 3.4 \text{ d}^{-1}$  с периодами от  $7.1^h$  до  $2.9^d$ . Возможное наличие четырех добавочных компонент Фурье-спектра в интервале  $0.12 \leq \nu \leq 2.1 \text{ d}^{-1}$  нуждается в дополнительном подтверждении. В Табл. 2 приведены компоненты спектра мощности Фурье-преобразования, которые присутствуют в профилях *не менее двух линий*. Погрешности частот в Табл. 2 составляют  $\approx 1/T_{\text{observ}}$ , где  $T_{\text{observ}} = 7.24 \text{ d}$  – полная продолжительность наблюдений.

Таблица 2. Частоты ( $\nu$ ) и периоды ( $P$ ) периодических гармоник вариаций профилей линий в спектре  $\iota$  Her,  $\sigma$  – безразмерная частота пульсаций (см. пункт 3.1..3.). Знак + в колонке, относящейся к какой-либо конкретной линии, означает, что компонент данной частоты присутствует в периодограмме. Символ + в последней колонке означает, что компонент с данной частотой, по-видимому, реален, а символ : отмечает, что данная гармоника может относиться к ложным пикам периодограммы

No	$\nu, \text{d}^{-1}$	$\sigma$	P	HeI	SiIII	SiIII	HeI	H $\beta$	HeI	Статус
				4438	4553	4568	4713	H $\beta$	5876	
1	$0.12 \pm 0.14$	0.03	$8.3^d$	+	+	+	+	+	+	:
2	$0.34 \pm 0.14$	0.08	$2.9^d$	+	+	+	+	+	+	+
3	$0.49 \pm 0.14$	0.12	$2.0^d$	+	+	+	+	+	+	:
4	$0.82 \pm 0.14$	0.20	$1.3^d$	-	+	-	-	+	+	+
5	$1.1 \pm 0.14$	0.26	$21.8^h$	-	-	-	+	+	+	+
6	$1.45 \pm 0.14$	0.35	$16.6^h$	+	-	-	-	-	+	:
7	$1.8 \pm 0.14$	0.43	$13.3^h$	-	+	+	+	-	-	+
8	$2.1 \pm 0.14$	0.51	$11.4^h$	-	+	-	-	+	-	:
9	$2.4 \pm 0.14$	0.58	$9.2^h$	+	+	+	-	-	+	+
10	$2.8 \pm 0.14$	0.68	$8.6^h$	+	-	-	-	-	+	+
11	$3.1 \pm 0.14$	0.75	$7.7^h$	+	+	+	+	-	-	+
12	$3.4 \pm 0.14$	0.82	$7.1^h$	-	-	+	-	+	+	+

### 3.1.3. Эволюционный статус $\iota$ Her

Во многих исследованиях, посвященных  $\iota$  Her, делается предположение о наличии у звезды спектральных характеристик, характерных как для медленно пульсирующих SPB звезд, так и для более горячих звезд типа  $\beta$  Cep [43, 44, 30]. Положение  $\iota$  Her на диаграмме ГР в верхней части области SPB-звезд [19] не противоречит данному пред-

положению.

Мы сравнили полученные нами частоты регулярной переменности профилей линий в спектре  $\iota$  Her с результатами расчетов пульсационной неустойчивости звезд верхней части главной последовательности [12]. В данной работе были рассчитаны параметры неадиабатических осцилляций звезды в области безразмерных частот  $0.05 \leq \sigma \leq 6$ , где согласно [12]:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\pi\nu}}{\sqrt{G\bar{\rho}}} = 0.067 \times \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{3/2} \times \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-1/2}. \quad (2)$$

Здесь  $G$  - постоянная тяготения,  $\bar{\rho}$  - средняя плотность звезды,  $R$  и  $M$  - ее масса и радиус, соответственно. Численное значение коэффициента в формуле рассчитано для частот  $\nu$  в  $\text{d}^{-1}$ . Вычисленные значения  $\sigma$  даны в 3-м столбце Табл. 2. Если исключить из приведенных в данной таблице частот гармонических компонентов сомнительные результаты, то найденные нами значения  $\sigma$  находятся в интервале  $[0.06 - 0.85]$ .

Наклонной штриховкой на диаграмме показана область пульсационной нестабильности SPB звезд, связанная с высокими  $g$  - модами НРП. Точки в левом верхнем углу диаграмм отмечают безразмерные частоты пульсационной неустойчивости звезд типа  $\beta$  Ser, которые, вероятнее всего, относятся к  $p$  - модам. Цифры в правом верхнем углу диаграмм указывают значения мультипольности пульсационных мод. Из анализа рисунков видно, что SPB звезды устойчивы относительно чисто радиальных колебаний ( $l = 0$ ), а дипольные и квадрупольные колебания ( $l = 1, 2$ ) возможны только в очень узком интервале безразмерных частот  $\sigma \approx 0.2$ .

Из сравнения положения найденного нами массива частот гармонических компонент вариаций профилей (черный прямоугольник на Рис. 2) с областью пульсационной неустойчивости звезд верхней части главной последовательности [12] видно, что все найденные нами частоты находятся в области частот пульсаций SPB звезд, причем значения мультипольности пульсационных мод  $l = 4 - 8$  наиболее вероятны. Характерные для звезд типа  $\beta$  Ser быстропериодические вариации профилей линий в спектре  $\iota$  Her отсутствуют.

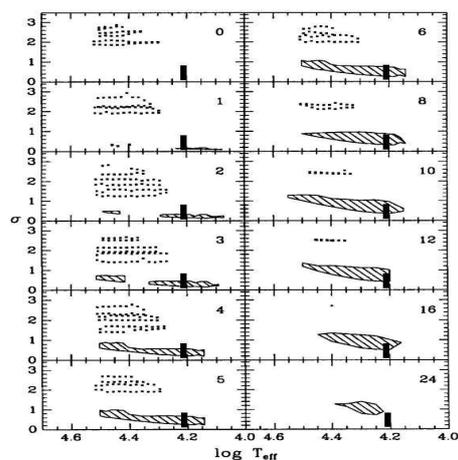


Рис. 2. Массив частот вариаций профилей линий в спектре  $\iota$  Her (черный прямоугольник) на диаграммах  $\lg T_{\text{eff}} - \sigma$ . Мультипольность пульсационных мод указана в правом верхнем углу диаграмм. Заштрихована область частот пульсаций SPB звезд. Точки в левом верхнем углу диаграмм – частоты пульсаций звезд типа  $\beta$  Ser.

### 3.2. $\delta$ Ori A

Звезда  $\delta$  Ori A (HD 36486, HR 1852) является физической тройной системой с основным компонентом  $\delta$  Ori Aa – затменной двойной с периодом обращения  $P = 5.73^d$  [24], и вторичным компонентом  $\delta$  Ori Ab с периодом обращения 224.5 года. Самая яркая звезды системы Aa<sup>1</sup> (09.5II) дает около 70% вклада в полное излучение системы, компоненты Aa<sup>2</sup> (B0.5III) и Ab дают вклад 7% и 23% соответственно [23]. Согласно данным работ [10, 23] значения скоростей вращения  $V \sin i$  компонентов Aa<sup>1</sup>, Aa<sup>2</sup> и Ab равны  $157 \pm 6$  км/с,  $138 \pm 16$  км/с и  $\approx 300$  км/с соответственно. Быстро вращающийся компонент Ab согласно [23] является В-звездой раннего подкласса.

Наблюдения  $\delta$  Ori A были выполнены 10/11 января 2004 г. на БТА. Использовался кварцевый эшелле-спектрограф НЭС [4], установленный в фокусе Нэсмита и оснащенный ПЗС-детектором  $2048 \times 2048$  элементов (Uppsala CCD). Для увеличения проникающей способности спектрографа применялся резатель изображения на три среза [5]. В таком варианте наблюдений спектральное разрешение  $R \approx 60000$  при дисперсии 0.033 Å/pix.

За полное время наблюдений  $\approx 2^h 50^m$  было получено 40 спектров звезды с экспозицией 180 сек. С учетом времени считывания ПЗС временное разрешение составило 260 сек. Отношение сигнал/шум на один пиксел составило 500 для *синей* области спектра (4500 Å) и 800 для *красной* (6000 Å). Угловое расстояние между самыми далекими компонентами системы  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup> и Ab около 0.3 что означает, что полученный спектр системы  $\delta$  Ori A включает вклад всех компонентов.

Первичная редукция ПЗС-изображений эшелльных спектров выполнена в среде MIDAS. Стандартные алгоритмы контекста ECHELLE пакета MIDAS были адаптированы для работы с данными, полученными с резателем изображения. Для исследования переменности профилей линий спектры нормировались на континуум, построенный в каждом эшелле-порядке.

### 3.2.1. Поиск регулярной переменности профилей

С целью поиска периодических вариаций профилей нами был выполнен Фурье-анализ переменности профилей линий в спектре  $\delta$  Ori A. Для очистки Фурье-спектра от ложных пиков использовался алгоритм CLEAN (см. пункт 3.1.1.).

На Рис. 3 представлены контурные графики квадрата модуля амплитуды Фурье-преобразования (Фурье-спектры) для линий HeII  $\lambda$  4686, HeI  $\lambda$  4713, CIII  $\lambda$  5696 и H $\beta$ . При построении диаграммы плотности спектра мощности Фурье-преобразования для наглядности отбрасывались все значения периодограммы, соответствующие малому уровню значимости  $q \leq 10^{-3}$  гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме.

На рисунке видно присутствие широкого пика на частоте  $\nu \approx 5.9 d^{-1}$ . Большая ширина пика связана с относительно низким разрешением Фурье-спектра из-за малой длительности периода наблюдений. Величина  $P = 1/\nu \approx 4^h.1$  больше длительности периода наблюдений, поэтому ее нельзя прямо отождествить с периодом регулярных вариаций профилей. Эту величину можно назвать *квази-периодом* регулярных вариаций профилей. В дальнейшем регулярность изменений профилей линии с предполагаемым периодом должна быть подтверждена дополнительными более длительными наблюдениями. В настоящий момент мы можем утверждать только то, что вариации разностных профилей в спектре звезды  $\delta$  Ori A могут быть аппроксимированы

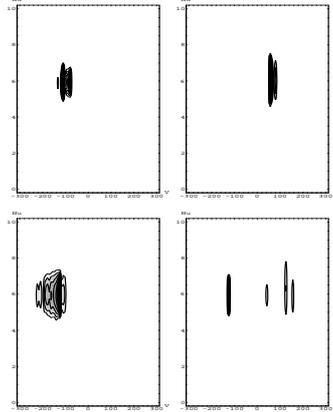


Рис. 3. Фурье-спектры мощности вариаций профилей линий в спектре звезды  $\delta$  Ori A. Более темные области на рисунках соответствуют бóльшим значениям амплитуды Фурье-спектра. Уровни значимости гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума  $q = 10^{-7}$  и  $q = 10^{-6}$  для линии He II  $\lambda$  4686 и He I  $\lambda$  4713 (вверху). Внизу: линии H $\beta$  ( $q = 10^{-7}$ ) и C III  $\lambda$  5696 ( $q = 10^{-3}$ ).

отрезками синусоиды с с периодом  $\approx 4.1$ , единым для всех исследованных нами линий.

### 3.2.2. Моды пульсаций $\delta$ Ori A

Выполненный нами анализ, показывает возможность присутствия регулярных изменений профилей линий в спектре системы  $\delta$  Ori A с характерным временем  $P = 4 - 6$  часов. Такие значения  $P$  характерны для вариаций профилей в результате нерадиальных пульсаций звезд спектрального класса O [16]. Для определения моды  $(l, m)$  НРП можно использовать соотношения (65). Значение  $|\Delta\phi_0|$  для профиля линии H $\beta$  было определено на интервале скоростей  $-18 \div 150$  км/с и равно  $\approx \pi$ . Предполагая, что это значение может быть экстраполировано на весь интервал скоростей  $\pm V \sin i$ , было найдено, что  $l \approx 2$ .

Вариации профилей исследуемых нами линий в спектре  $\delta$  Ori A качественно похожи на изменения профилей линий в спектре большого количества Be звезд [36], которые могут быть описаны как результат нерадиальных пульсаций секторной моды  $(l, |m|) = (2, 2)$ .

Нами были проанализированы вариации профилей линий в спек-

тре  $\delta$  Ori A в предположении, что они связаны с нерадиальными пульсациями моды  $(2, \pm 2)$ . Скорость элемента объема звезды при НРП в сферической системе координат  $\propto Y_{ml}(\theta, \phi) \exp(i\omega t)$ , где  $Y_{22}(\theta, \phi) \propto (1 - \cos 2\theta) * \exp(im\phi)$  - сферическая функция,  $\omega$  - угловая частота пульсаций [45].

Зависимость скорости элемента поверхности звезды от времени определяется множителем  $\exp(im\phi + \omega t)$ , где  $2\pi/\omega$  - период пульсаций. Фазовая скорость распространения возмущений по поверхности звезды  $\omega_{NRP} = 2\pi * \omega/m$ . Это соотношение означает, что период распространения возмущений в два раза больше периода пульсаций.

Распространению возмущений скорости вещества в фотосфере соответствует перемещение деталей разностных профилей (горбов и впадин) с теми же периодами. Это означает, что за время  $T_{NRP}$ , где  $T_{NRP}$  - период НРП, деталь профиля, связанная с НРП, пересекает полосу  $\pm V \sin i$ . Таким образом, можно считать, что верно приближенное равенство  $T_{NRP} \approx T_{cross}$ , где  $T_{cross}$  - время пересечения деталью разностного профиля полосы  $\pm V \sin i$ . Время  $T_{cross}$  найдено нами из анализа вейвлет-спектров разностных профилей линий HeII  $\lambda 4686$  и HeI  $\lambda 4713$  (см. [8]). Для данных линий время  $T_{cross} \approx 3 - 4^h$ , что близко к определенному нами квази-периоду вариаций профилей  $P \approx 4^h$ .

Можно заключить, что наблюдаемый характер вариации профилей не противоречит гипотезе о том, что они связаны с нерадиальными фотосферными пульсациями основного компонента Aa<sup>1</sup> системы  $\delta$  Ori A секторной моды  $(l, |m|) = (2, 2)$ . Так как на вейвлет-спектрах детали профиля перемещаются из фиолетовой области профиля линии в красную, то  $m < 0$  [45], что дает для моды НРП  $(l, m) = (2, -2)$ .

Кроме уже рассмотренных деталей динамических-вейвлет спектров, связанных предположительно с НРП, в них заметны более слабые детали в фиолетовом и красном крыльях линии вне полосы  $\pm V \sin i$ . Такие особенности не могут быть вызваны изменениями в фотосфере главной звезды системы Aa<sup>1</sup>. Возможны два объяснения данных особенностей вариаций профилей линий. Во-первых, эти вариации могут быть связаны с процессами, происходящими в звездном ветре в расширяющейся атмосфере главной звезды системы Aa<sup>1</sup>. Во-вторых, переменность вне полосы  $\pm V \sin i$  может быть связана с компонентами Aa<sup>2</sup> и Ab.

Особый интерес представляет впервые обнаруженная нами регулярная переменность профиля эмиссионной линии CIII  $\lambda 5696$  в спек-

тре  $\delta$  Ori A. Вклады компонентов Aa<sup>2</sup> и Ab в профили эмиссионных линий пренебрежимо малы, поэтому эмиссия СШ  $\lambda$  5696 связана только со звездой Aa<sup>1</sup>. Переменность эмиссии СШ выглядит причинно-связанной с переменностью фотосферных линий и также выходит за границы полосы  $\pm V \sin i$ . Так как переменность фотосферных линий вызвана, вероятнее всего, НРП в атмосфере сверхгиганта Aa<sup>1</sup>, то регулярные вариации профиля линии СШ  $\lambda$  5696 можно объяснить переменным вкладом эмиссии ветра главной звезды системы. О возможности генерирования квазирегулярных структур в ветре звезды, вызываемых нерадиальными фотосферными пульсациями, указано в работе [35].

В подтверждение этого предположения укажем, что рисунки динамических вейвлет-спектров, связанных с газовыми неоднородностями, регистрируемыми в эмиссии СШ, а также детали вейвлет-спектра, видимые в других линиях вне полосы  $\pm V \sin i$  выглядят взаимно дополняющими друг друга. Совмещение вейвлет-спектров фотосферной линии HeI $\lambda$ 4713 и оболочечной линии СШ  $\lambda$  5696 (см. [8]) показывает *избегание* вейвлет-спектров, то есть отсутствие деталей вейвлет-спектра эмиссии СШ  $\lambda$  5696 в той области скоростей, в которой есть детали в вейвлет-спектре фотосферной абсорбции HeI $\lambda$ 4713.

Для выяснения того, насколько найденный квази-период вариаций профилей линий в спектре системы  $\delta$  Ori A соответствует возможным периодам пульсаций OB-звезд, мы нанесли положения компонентов Aa<sup>1</sup> и Aa<sup>2</sup> на диаграмму эффективная температура – период пульсаций в квадрупольной моде ( $l = 2$ ) горячих звезд главной последовательности (Рис. 6 и 7 в статье [38]). Представленные на Рис. 4 вверху положения компонентов находятся ниже короткопериодической границы области пульсационной неустойчивости данных звезд и не соответствуют определенным в работе [23] массам компонентов:  $11.2M_{\odot}$ ,  $5.6M_{\odot}$  и  $\approx 27$  [23] соответственно. В то же время, положение компонента Aa<sup>1</sup> на аналогичной диаграмме, но рассчитанной для массивной звезды главной последовательности с  $M = 30 M_{\odot}$  (Рис. 4 внизу), точно соответствует области пульсационной неустойчивости этой звезды.

Для подтверждения реальности найденного периода и для выяснения природы вариаций профилей линий необходимо получить спектры  $\delta$  Ori A в течение 2-3 ночей, что позволит охватить 4-6 циклов НРП.

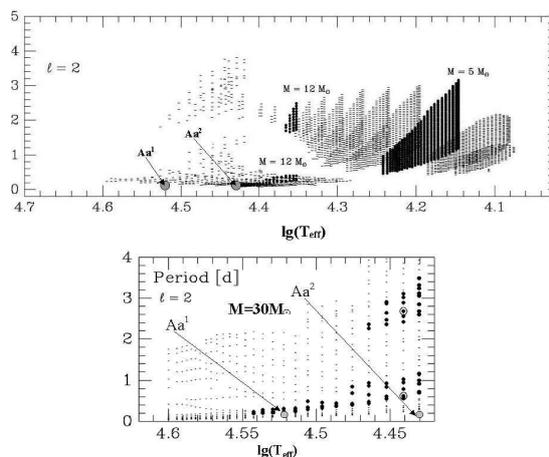


Рис. 4. Положение компонентов  $Aa^1$  и  $Aa^2$  (сплошные кружки) на диаграмме  $\lg T_{\text{eff}}$  (ось абсцисс) – период пульсаций  $P$  в днях (ось ординат) [38]. Вверху: периоды пульсационных мод звезд типа  $\beta$  Сер и SPB звезд. Точки – рассчитанные значения периодов, жирными точками выделены периоды пульсаций звезд главной последовательности с массами  $5M_{\odot}$  и  $12M_{\odot}$ . Внизу: периоды пульсационных мод звезды главной последовательности с массой  $30M_{\odot}$ .

### 3.3. $\rho$ Leo

Сверхгигант  $\rho$  Leo (HD91316) является медленно вращающейся звездой спектрального класса V1 Iab. Параметры звезды даны в Табл. 1. Эффективная температура звезды  $T_{\text{eff}}$  определяется неуверенно. В работе [31] дано значение  $T_{\text{eff}} = 20260$  К. Согласно [21]  $T_{\text{eff}} = 24200$  К. Значение  $T_{\text{eff}} = 22000$  К приведено в работе [15].

Звезда наблюдалась в 2004-2005 гг. в CAO на БТА и в 2004 г на 1.8м телескопе ВАО. Спектральные наблюдения звезды, выполненные в CAO, проводились 10/11 января 2004 г. Получено 30 эшелле-спектров с использованием кварцевого эшелле-спектрографа НЭС с резателем изображения (см. пункт 3.2.). Первичная редукция ПЗС-изображений эшелльных спектров выполнена в среде MIDAS. Для исследования переменности профилей линий, обработанные спектры нормировались на континуум, построенный в каждом эшелле-порядке.

Спектральные наблюдения звезды, выполненные в ВАО, проводились в течение 4-х наблюдательных ночей 11, 14, 15 января и 5

февраля 2004 года с помощью оптоволоконного эшелле спектрографа BOES [13]. Получено 17 эшелле-спектров со спектральным разрешением  $R \approx 44000$  в широкой спектральной области  $3782 < \lambda < 9803 \text{ \AA}$ . Звезда является достаточно ярким объектом, поэтому при времени экспозиции 4-10 минут было достигнуто высокое значение отношения  $S/N \approx 300$ . Интервал времени между получением последовательных спектров в каждую ночь составил 6-10 минут. Обработка спектров выполнялась также, как в случае звезды  $\iota$  Her (см. пункт 3.1.).

### 3.3.1. Поиск регулярной переменности профилей

С целью поиска регулярных компонентов вариаций профилей нами был выполнен Фурье-анализ переменности профилей линий в спектре  $\rho$  Leo. Для очистки Фурье-спектра от ложных пиков использовался алгоритм CLEAN (см. пункт 3.2..1.). При построении полного Фурье-спектра вариаций профилей использовались все полученные наблюдения. Наши оценки показали, что точность определения периода составляет  $\approx 0.1 \text{ d}^{-1}$ , что связано с наличием большого промежутка в  $\approx 21$  день между основным массивом наблюдений и последними четырьмя спектрами, полученными в ВОАО 5 февраля 2004 г.

В рассчитанных периодограммах присутствует несколько десятков отдельных пиков. Однако только в промежутке частот  $\nu = 0.1 - 6.5 \text{ d}^{-1}$  найдены значимые на уровне  $q = 10^{-3}$  компоненты.

### 3.3.2. Природа регулярных вариаций профилей в спектре $\rho$ Leo

Найденные частоты регулярных вариаций профилей можно разделить на три группы. К первой группе относится частота  $\nu_1 \approx 0.14 \text{ d}^{-1}$ , связанная, вероятнее всего, с периодом вращения звезды.

Вторая группа частот от  $\nu_2 \approx 0.60 \text{ d}^{-1}$  до  $\nu_5 \approx 1.74 \text{ d}^{-1}$  соответствует периодам 0.6 - 1.8 дня. Причиной быстрых вариаций профилей линий звезды спектрального класса B1 с периодами 1-2 дня является, вероятнее всего, вращательная модуляция профилей линий [27].

В то же время нельзя исключить возможность пульсационной природы вариаций профилей с частотами этой группы. Для проверки этого предположения частоты вариаций профилей из второй группы были нанесены на диаграмму  $T_{\text{eff}} - P$  – период радиальных ( $l = 0$ ), дипольных ( $l = 1$ ) и квадрупольных ( $l = 2$ ) пульсаций горячих звезд

главной последовательности (Рис. 5 в статье [38]). Все найденные частоты находятся вне области пульсационной неустойчивости ОВ-звезд (см. Рис.5), что делает гипотезу о пульсациях звезды как о причине вариаций профилей с указанными частотами маловероятной.

Третья группа регулярных частот вариаций профилей от  $3.9 \text{ d}^{-1}$  до  $6.2 \text{ d}^{-1}$  соответствует периодам  $P$  вариаций от  $\approx 4^h$  до  $\approx 6^h$ . Такие значения  $P$  характерны для вариаций профилей в результате нерадиальных пульсаций (НРП) ОВ-звезд [16].

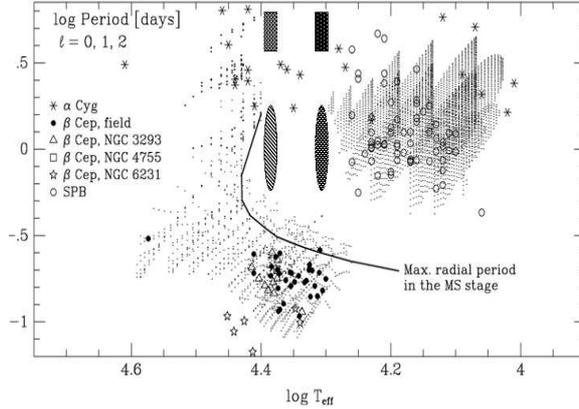


Рис. 5. Периоды пульсаций звезд типа  $\beta$  Сеп (точки) и медленно пульсирующих SPB-звезд (незаполненные кружки). Прямоугольники – области частот  $[3.9 - 6.2] \text{ d}^{-1}$  регулярных компонентов вариаций профилей в спектре  $\rho$  Leo, овалы – области частот  $[0.60 - 1.74] \text{ d}^{-1}$ . Левые прямоугольник и овал соответствуют значениям  $T_{\text{eff}} = 24\,200 \text{ K}$ , правые –  $T_{\text{eff}} = 20\,260 \text{ K}$ .

Мода  $(l, m)$  НРП может быть определена из соотношения (65). Значение  $|\Delta\phi_0|$  для профиля линии  $\text{HeI } \lambda 5876$  возможно определить только на интервалах скоростей  $-80 \div -50 \text{ км/с}$  и  $-100 \div -50 \text{ км/с}$ . Экстраполируя разность фаз на весь интервал скоростей  $\pm V \sin i$ , было найдено, что значение мультипольности пульсаций  $l \geq 2$ .

Для выяснения того, насколько найденные периоды вариаций профилей линий в спектре  $\rho$  Leo соответствует возможным периодам пульсаций ОВ-звезд, положения частот компонентов группы 3 были нанесены на диаграмму  $T_{\text{eff}} - P$ . Представленные на Рис. 5 положения гармонических компонентов при  $T_{\text{eff}} = 24\,200 \text{ K}$  находятся на границе пульсационной неустойчивости звезд типа  $\beta$  Сеп. В то же время поло-

жения этих же компонентов, но при  $T_{\text{eff}} = 20\,260$  К, лежат вне области пульсационной неустойчивости ОВ-звезд. Хотя, по-видимому, нельзя непосредственно прилагать теорию, развитую для звезд главной последовательности, к ОВ-сверхгигантам, все же можно сделать вывод, что значение  $T_{\text{eff}} = 24\,200$  К лучше согласуется с общей картиной вариаций профилей линий в спектре  $\rho$  Leo.

### 3.3.3. Влияние магнитного поля на переменность профилей.

Проведенный нами анализ вариаций профилей линий показывает, что регулярные вариации профилей выходят за границу полосы  $\pm V \sin i = \pm 75$  км/с. К подобному эффекту может привести наличие умеренного магнитного поля у  $\rho$  Leo. Одним из следствий наличия магнитного поля является образование квазирегулярных структур (коротационных струй) в атмосфере звезды [27, 28]. В присутствии магнитного поля нерадиальные фотосферные пульсации могут формировать регулярные флуктуации плотности ветра звезды, приводящие к периодическим вариациям профилей вне полосы  $\pm V \sin i$  [35].

Сделанные нами оценки показывают, что вплоть до  $\approx 2R_*$ , где  $R_*$  – радиус звезды, магнитное давление  $B^2/8\pi$  будет больше газового при умеренном значении  $B \approx 100$  Гс. В этом случае регулярная переменность профилей может прослеживаться до  $\pm 2 \cdot V \sin i$  в соответствии с наблюдаемой картиной переменности профилей. Выполненные нами наблюдения  $\rho$  Leo на БТА с анализатором циркулярной поляризации [9] указывают на возможное присутствие слабого магнитного поля звезды с напряженностью продольного компонента  $\approx 100$  Гс, что свидетельствует в пользу высказанного нами предположения.

## 4. Заключение

На основании проведенных нами наблюдений ОВ-звезд и анализа вариаций профилей линий в их спектре можно сделать следующие выводы:

1. Все исследуемые линии в спектрах программных звезд имеют переменные профили.
2. В вариациях профилей исследованных линий обнаружены регулярные компоненты вариаций профилей с периодами от  $4^h$  до  $\approx 7^d$ .

3. Найденные компоненты с периодами  $P = 0.6 - 2^d$  могут быть связаны с вращательной модуляцией профилей. Обнаруженные короткопериодические вариации профилей с  $P \in [4^h - 2^d]$  в профилях исследованных линий, вероятнее всего, соответствуют нерадиальным пульсациям исследуемых звезд.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 05-02-17860-а и 06-02-17096-а. Автор также благодарит С.Н.Фабрику, Г.Г.Валявина, Т.Е.Бурлакову и Г.Галазутдинова за обсуждение результатов работы.

## Список литературы

1. Витязев В.В., 2001, Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов, 2001. Санкт-Петербург: Изд. СПбГУ
2. Витязев В.В., 2001, Анализ неравномерных временных рядов, Санкт-Петербург, Изд. СПбГУ
3. Галазутдинов Г.А., DECH 2.0, Препринт САО  $\epsilon$  92. 1992
4. Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Ключкова В.Г., и др. 2002, Препринт САО No. 169
5. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Найденов И.Д. 2003 Препринт САО No. 179
6. Холтыгин А.Ф., Шнейвайс А.Б. 2005, *Астрофизика*, 48, 87
7. Холтыгин А.Ф., Галазутдинов Г., Бурлакова Т.Е., и др. 2006, *АЖ*, 83, 252 KholtyginEtAl2006
8. Холтыгин А.Ф., Фабрика С.Н., Бурлакова Т.Е., и др. 2006, *АЖ*, 83, 990 KholtyginEtAl2006
9. Холтыгин А.Ф., Чунтонов Г.А., Фабрика С.Н., и др. , 2006, *АЖ*, (подготовлено в печати)
10. Abt H.A., Levato H., Grosso M. 2002, *ApJ*, 573, 359
11. Aerts C., Waelkens C. 1993, *A&A*, 273, 135
12. Balona L.A., Dziembowski W.A. 1999, *A&A*, 309, 221
13. <http://www.boao.re.kr/BOES/BOESppt3.files/frame.htm>
14. Chapellier E., Mathias P., Le Contel J.-M., et al. 2000, *A&A*, 362, 189
15. Crowther P.A., Lennon D.J., Walborn N.R. 2006, *A&A*, 446, 279
16. de Jong J.A., Henrichs H.F., Schrijvers S., et al. 1999, *A&A*, 345, 172
17. Donati J.-F., Wade G.A., Babel J., et al. 2001, *MNRAS*, 326, 1265

18. Donati J.-F., Babel J., Harries T.J., et al. 2002, MNRAS, 333, 55
19. Dziembowski W.A., Moskalik P., Pamyatnykh A.A. 1995, MNRAS, 265, 588
20. Eversberg T, Lépine S., Moffat A.F.J., 1998, A&A, 494, 799
21. Gies D.R., Lambert D.L. 1992, ApJ, 387, 673
22. Grigsby J.A. 1991, ApJ, 380, 606
23. Harvin J.A., Gies D.R., Bagnuolo W.J., et al. 2002, ApJ, 565, 1216
24. Hoffleit D. 1996, JAAVSO, 24, 105
25. Howarth I.D., Prinja R.K. 1989, ApJS, 69, 527
26. Howarth I.D., Siebert K.W., Hussain G.A.J., Prinja R.K. 1997, MNRAS, 284, 265
27. Kaper L., Henrichs H.F., Fullerton A.W., et al. 1997, A&A, 327, 281
28. Kaper L., H.F.Henrichs, J.S.Nichols, et al. 1999, A&A, 344, 231
29. Markova N. 2002, A&A, 385, 479
30. Mathias P., Waelkens C., 1995, 300, 200
31. Morel T., Marchenko S.V., Pati A.K., et. al. 2004, MNRAS, 351, 552
32. Miller N.A., Cassinelli J.P., Waldron W.L., et al. 2002, ApJ, 577, 951
33. Neiner C., Hubert A.M., Floquet M. et al. 2003, SPF2A, 237
34. Neiner C., Geers V.C., Henrichs H.F. et al. 2003, A&A, 406, 1019
35. Owocki S. P., Cranmer S. R. 1988, in *Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics*, eds. C. Aerts, T.R. Bedding, J.Christensen-Dalsgaard, ASP Conf. Proc., 259, 512
36. Rivinius Th., Baade D., Stefl S. 2003, A&A, 411, 229
37. База данных Simbad: <http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>
38. Pamyatnykh A.A. 1999, Acta. Astron. 49, 189
39. Schrijvers C., Telting J.H., Serts C., et al. 1997, A&AS, 121, 343
40. Repolust T., Puls J., Herrero A. 2004, A&A, 415, 349
41. Roberts D.H., Lehar J., Dreher J.W. 1987 AJ, 93, 968
42. Scargle D.S., 1982, ApJ, 263, 835
43. Smith M.A. 1978, ApJ, 224, 927
44. Smith M.A. 1981, ApJ, 246, 905
45. Telting J.H., Schrijvers C. 1997, A&A, 317, 723

- 
46. *Underhill A.B.* 1971, ApJ, **168**, 283
  47. *Vacca W.D., Garmany C.D., Shull J.M.*, Astroph. J., **460**, 914 (1996)
  48. *Vardya M.S.* 1985, ApJ, 299, 255
  49. *Vityazev V.V.* 1995, A&ATr, 11, 159
  50. *Waelkens C.* 1991, A&A, 305, 887