

## МИКРОПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ ОБ-ЗВЕЗД II: $\delta$ Ori A

Холтыгин А.Ф.<sup>1</sup> Бурлакова Т.Е.<sup>2,3</sup>, Фабрика С.Н.<sup>2</sup>, Валявин Г.Г.<sup>2,3</sup>, Юшкин М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета  
e-mail: afk@theor1.astro.spbu.ru,

<sup>2</sup>Специальная Астрофизическая обсерватория РАН

<sup>3</sup>Bohyunsan Optical Astronomy Observatory (BOAO) Jacheon P.O.B.1, YoungChun, Kyung-Pook, 770-820, Korea

### Аннотация

Исследована переменность профилей линий в спектре звезды  $\delta$  Ori A, самого яркого компонента тройной системы  $\delta$  Ori. Получено 40 спектров звезды с отношением сигнал/шум  $\approx 500 - 800$  и временным разрешением 4 мин. Обнаружена переменность профилей линий HeII  $\lambda 4686$ , HeI  $\lambda 4713$ , H $\beta$  и эмиссии CII  $\lambda 5696$ . Амплитуда переменности составляет  $\approx 0.5 - 1\%$  в единицах интенсивности континуума. В динамическом вейвлет-спектре вариаций профилей этих линий обнаружены крупномасштабные компоненты в интервале масштабов 25-50 км/с, перемещающиеся в полосе  $-V \sin i \div V \sin i$  для главной звезды системы Aa<sup>1</sup> со временем пересечения полосы 4-5<sup>h</sup>. Однако, часть переменных деталей выходит за эту полосу, что может быть связано либо с эмиссионными газовыми неоднородностями в ветре звезды  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup>, либо с нерадиальными пульсациями более слабых компонентов системы Aa<sup>2</sup> или Ab. Найденная переменность, возможно, имеет циклический характер с периодом  $\approx 4^h$ . Предполагается, что обнаруженная переменность связана с нерадиальными пульсациями главной звезды системы в секторной моде  $(l, m) = (2, -2)$ .

## Содержание

<b>1</b>	<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Система <math>\delta</math> Ori A</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Наблюдения и обработка спектров</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Переменность профилей линий</b>	<b>5</b>
4.1	Вклады различных компонент системы в профили линий . . . . .	5
4.2	Вариации средних профилей. Разностные профили . . . . .	6
4.3	Анализ спектра временных вариаций разностных спектров . . . . .	9
4.4	Вейвлет-анализ вариаций профилей линий . . . . .	11
4.5	Поиск регулярной переменности . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Обсуждение результатов</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>19</b>

# 1 ВВЕДЕНИЕ

Спектральные наблюдения горячих звезд в УФ [1, 2], видимом [3, 1, 2, 5, 4, 7] и рентгеновском [8, 9] диапазонах свидетельствуют о присутствии в атмосферах этих звезд структур разных размеров и плотностей с временами жизни от долей часа до нескольких дней. Изменения профилей линий в спектрах ОВ звезд являются, главным образом, регулярными или квази-регулярными. В профилях многих линий в спектрах В-звезд и 6 звезд спектрального класса О обнаружены регулярные короткопериодические (3-12 часов) изменения профилей линий HeI, связываемые с их нерадиальными пульсациями (НРП) [7].

Одним из факторов, способствующим образованию крупномасштабных структур в атмосфере О-звезд, возможно является слабое (несколько сотен Гаусс на поверхности звезды) магнитное поле [11]. В настоящее время магнитное поле достаточно надежно обнаружено только у одной звезды спектрального класса О  $\theta^1$  Ori C [12] и у ряда звезд ранних подклассов спектрального класса В [13]. В отличие от звезд спектрального класса В, амплитуда вариаций профилей линий в спектрах звезд спектрального класса О относительно мала (1-3 %, см., например, [10]), так что следует говорить скорее о *микрпеременности* профилей линий в спектрах этих звезд. Обнаружение и, тем более, выяснение природы переменности требует проведения наблюдений с высоким временным и спектральным разрешениями и высоким отношением сигнал/шум  $\geq 300$ .

Настоящая статья является продолжением исследования микрпеременности горячих звезд, начатого нами в статье [10], в которой представлены результаты исследования переменности профилей линий в спектре сверхгигантов 19 Cep,  $\alpha$  Cam и  $\lambda$  Ori A (O9.5II).

В данной статье представлены результаты спектральных наблюдений спектрально-тройной системы  $\delta$  Ori A, главный компонент которой имеет тот же спектральный класс O9.5, что и  $\lambda$  Ori A. В параграфе 2 статьи приведены общие сведения о системе  $\delta$  Ori A, следующий параграф посвящен описанию наблюдений и обработки спектров. В параграфе 4 представлены методика и результаты анализа переменности линий в спектре  $\delta$  Ori A. Интерпретация наблюдений дана в параграфе 5. В заключении статьи представлены краткие выводы.

## 2 Система $\delta$ Ori A

Звезда  $\delta$  Ori является широкой визуальной тройной системой, состоящей из трех компонентов: А (HD 36486), В (Vd-00°983В) и С (HD 36485) с видимыми звездными величинами  $2.23^m$ ,  $14.0^m$  и  $6.85^m$  соответственно. Компоненты В и С находятся на расстояниях  $33''$  и  $53''$  соответственно от главного компонента А. Выполненные нами наблюдения относятся к ярчайшему компоненту  $\delta$  Ori A.

Компонент  $\delta$  Ori A (HD 36486, HR 1852) является физической тройной системой с основным компонентом  $\delta$  Ori Aa – затменной двойной с периодом обращения  $P = 5.73^d$  [14], и вторичным компонентом  $\delta$  Ori Ab с периодом обращения 224.5 года. Недавние детальные исследования методами доплеровской томографии [15] позволили уточнить характеристики тройной системы  $\delta$  Ori A. Параметры системы представлены в Табл. 1

Более яркий компонент  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup> является массивной звездой спектрального класса O9.5II с мощным звездным ветром со скоростью потери массы  $\lg(\dot{M}) \approx -6.0$  и предельной скоростью ветра  $V_\infty \approx 2000$  км/с. В работе [22] приводятся в 2 раза меньшие значения  $\lg(\dot{M}) \approx -6.3$ . По данным работ [23, 18]  $V_\infty \approx 2300$  км/с. Скорость вращения звезды,

Таблица 1: Параметры системы  $\delta$  Ori A

Параметр	Компоненты			Ссылки
	Aa <sup>1</sup>	Aa <sup>2</sup>	Ab	
Расстояние до звезды, пк	360	360	360	[17]
Расстояние до компонента Aa <sup>1</sup> , $R_{\odot}$	...	33	$\approx 25\,000$	[9]
Спектральной класс	09.5II	B0.5III	B (ранний подкласс)	[15]
Орбитальный период	...	5.7325 d	$\approx 200$ лет	[15]
Радиус ( $R_{\odot}$ )	11	4	...	[15, 9]
Масса ( $M_{\odot}$ )	11.2	5.6	$\approx 27$	[15]
Светимость, $\lg(L/L_{\odot})$	5.26	4.08	-	
$T_{eff}$ , К	33 000	27 000	...	[18, 19]
$\lg g$	3.4	3.8	...	[18, 19]
Вклад в оптическое излучение в области линии HeI $\lambda$ 6678 (%)	70	7	23	[15]
$V \sin i$ (км/с)	$157 \pm 6$	$138 \pm 16$	$\approx 300$	[15]
	133			[16]
$V_{\infty}$ , км/с	2000	1500	...	[20, 21]
Потеря массы $\dot{M}$ , $M_{\odot}/\text{год}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-7}$	...	[20, 21]

определенная разными авторами, существенно различается. В работе [15] (см. Табл. 1) получено относительно высокое значение скорости вращения главного компонента системы:  $V \sin i = 157 \pm 6$  км/с, тогда как Абт и др. [16] получили  $V \sin i = 133$  км/с.

В работе [18] приводится фотосферный радиус основного компонента Aa<sup>1</sup>  $R_* = 22R_{\odot}$ , что в 2 раза больше значения  $R_* = 11R_{\odot}$ , приведенного в таблице 1. Такое расхождение вероятнее всего связано с тем, что в работе [18] использовано большее, чем дано в Табл. 1 расстояние до звезды - 450 пк.

Компонент  $\delta$  Ori Aa<sup>2</sup> является звездой спектрального класса B0.5 III. Предварительные исследования показывают, что третий компонент системы  $\delta$  Ori Ab является, по-видимому, звездой раннего подкласса спектрального класса B с широкими линиями в спектре, что указывает либо на высокую скорость вращения звезды ( $V \sin i \approx 300$  км/с), либо на ее двойственность [15].

Харвин и др [15] определили наклон орбиты тесной двойной системы  $\delta$  Ori Aa ( $i \approx 67^{\circ}$ ) и оценили массы компонент:  $M(\text{Aa}^1) = 11.2M_{\odot}$  и  $M(\text{Aa}^2) = 5.6M_{\odot}$ . Вторичный компонент  $\delta$  Ori Aa<sup>2</sup> заметно слабее первичного (см. Табл. 1). Массы как главного, так и вторичного компонентов двойной системы Aa<sup>1</sup> и Aa<sup>2</sup> примерно в 2 раза меньше, чем массы звезд главной последовательности, соответствующие их положениям на диаграмме ГР [15]. Авторы статьи [15] предполагают, что в ходе своей эволюции система проходила через стадию с общей оболочкой и заполнением полости Роша обеими звездами системы и интенсивной потерей массы. После потери системой половины полной массы расстояние между компонентами увеличилось и потеря вещества прекратилась.

Масса третьего компонента системы - Ab не может быть определена из анализа лучевых скоростей системы. Приведенное в Табл. 1 значение  $M(\text{Ab}) \approx 27 M_{\odot}$ , определенное в работе [15], соответствует звезде главной последовательности со значением  $M_{\text{bol}} = -4^m.2$ . Звезда главной последовательности с массой  $27 M_{\odot}$  должна иметь спектральный класс

О8.5V [28], что противоречит ее спектральной классификации (см. Табл. 1). Для объяснения противоречия в работе [15] высказано предположение, что компонент Ab может быть тесной двойной системой, состоящей из двух звезд главной последовательности с массами  $\approx 19 M_{\odot}$  спектрального класса B0.5V.

### 3 Наблюдения и обработка спектров

Спектральные наблюдения системы  $\delta$  Ori A были выполнены в рамках программы поиска быстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов [10] в ночь с 10/11 января 2004 г. на 6-м телескопе САО. Использовался кварцевый эшелле-спектрограф НЭС [24], стационарно установленный в фокусе Нэсмита и оснащенный ПЗС-детектором 2048 x 2048 элементов (Uppsala CCD). Для увеличения проникающей способности спектрографа применялся резатель изображения на три среза [25]. В таком варианте наблюдений достигается спектральное разрешение  $R \approx 60000$  при дисперсии 0.033 Å/pix. Размер изображений во время наблюдений составлял около 3". В качестве спектра сравнения использовалась торий-аргоновая лампа.

Угловое расстояние между самыми далекими компонентами системы  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup> и Ab около 0.3" (см. Табл. 1), что означает, что полученный спектр системы  $\delta$  Ori A включает вклад всех компонентов. 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).

Первичная редукция ПЗС-изображений эшелльных спектров выполнена в среде MIDAS (см. [10]). Стандартные алгоритмы контекста ECHELLE пакета MIDAS были адаптированы нами для работы с данными, полученными с резателем изображения. Выполнена следующая последовательность обработки:

- 1) медианная фильтрация и усреднение кадров подложки (BIAS) с последующим вычитанием ее из остальных кадров, полученных в процессе наблюдений;
- 2) очистка кадров от следов космических частиц;
- 3) приготовление кадра *плоского поля* (flat-field);
- 4) определение положения спектральных порядков, при этом использовался метод Баллестера [26].
- 5) вычитание рассеянного света. Для определения функции вклада рассеянного света выделялось межпорядковое пространство на кадрах и далее производилась двумерная интерполяция. Эта функция записывалась в отдельные кадры, которые вычитались из исходных изображений.
- 6) экстракция спектральных порядков из редуцированных изображениях спектра звезды, *плоского поля* и спектра эталона длин волн. Редукция за *плоское поле*.
- 7) калибровка по длинам волн с использованием двумерной полиномиальной аппроксимации данных отождествлений линий спектра сравнения в разных спектральных порядках.

При использовании резателя изображений, каждый эшелльный порядок изображения представлен тремя подпорядками (срезами). Аппаратное смещение верхнего и нижнего среза в отдельном порядке относительно среднего среза определялось методом корреляции в изображениях спектров сравнения. Полученные таким образом три среза в

отдельно взятом порядке суммировались методом медианного среднего с учетом найденных аппаратных смещений.

Для исследования переменности профилей линий, обработанные спектры нормировались на континуум, построенный в каждом эшелле-порядке. Для проведения континуума в спектральных порядках, содержащих узкие спектральные линии применялась методика Шергина и др. [27], использующая сглаживание спектров с переменным гауссоподобным фильтром с шириной окна 25-30 Å с одинаковыми параметрами для всей последовательности спектров.

При проведении континуума в порядках, содержащих широкие (как правило, водородные) спектральные линии, использовалась следующая процедура. Широкие спектральные линии вырезались в фиксированных интервалах длин волн для всех 40 спектров. Для установления положения континуума использовалась полиномиальная аппроксимация для всех длин волн порядка, исключая области вырезанных широких спектральных линий. Параметры аппроксимации оставались неизменными для всех спектров ряда. Такая процедура построения континуума обеспечивает стабильность и воспроизводимость проведения континуума на всех спектрах с точностью до десятых долей процента. Это позволяет достичь высокой точности получения разностных профилей линий и регистрировать переменность в профилях широких линий на уровнях до 0.1%.

## 4 Переменность профилей линий

### 4.1 Вклады различных компонент системы в профили линий

Для детального исследования вариаций профилей нами были отобраны достаточно сильные неблендированные линии в спектре звезды. Критерием отбора абсорбционных линий было условие на остаточную интенсивность  $r_{\max} > 0.1$ . Таким образом были отобраны следующие линии HeII  $\lambda$  4686, HeI  $\lambda$  4713 и H $\beta$ . Дополнительно были исследованы профили эмиссионной линии CIII  $\lambda$  5696.

Система  $\delta$  Ori A состоит из трех звезд спектральных классов O и B, у каждой из которых профили линий могут быть переменными и в профили оптических линий вносят вклад все звезды системы. Из данных Табл. 1, следует, что свыше 2/3 потока системы в области линии HeI  $\lambda$  6678 приходит от главного компонента системы – звезды Aa<sup>1</sup>. Вклад компонент Aa<sup>2</sup> и Ab в этой области спектра существенно меньше.

В других спектральных областях вклад компонент Aa<sup>2</sup> и Ab могут отличаться от значений, представленных в Табл. 1. Для установления того, в какой мере каждая из звезд системы ответственна за переменность профилей, необходимо выяснить ее вклад в полные профили анализируемых линий. Кроме того, ввиду существенного разброса значений  $v \sin i$  для главного компонента системы Aa<sup>1</sup> (см. Табл 1) весьма желательны достаточно надежные оценки величин  $v \sin i$  компонент системы  $\delta$  Ori A.

Для решения этих задач мы промоделировали суммарные профили фотосферных линий HeII  $\lambda$  4686 и HeI  $\lambda$  4713 в спектре  $\delta$  Ori A. Мы предполагали, что суммарный профиль линий является суммой вкладов компонент, так как при указанных выше орбитальных фазах компоненты Aa<sup>1</sup> и Aa<sup>2</sup> не затмеваются. Для расчета профилей линий, уширенных вращением, использовались стандартные соотношения (см., например, [29]). Лучевые скорости компонент на момент наблюдения рассчитывались по эфемеридам, приведенным Харвин и др. [15].

На время проведенных нами наблюдений орбитальная фаза менялась в узком промежутке  $0.848 - 0.851$ . При столь малом изменении фаз можно считать скорости компонент постоянными во всем промежутке наблюдений. Полученные по эфемеридам [15] значения гелиоцентрических скоростей компонент:  $V(Aa^1) = -21$  км/с,  $V(Aa^2) = -102$  км/с.

Для удобства сравнения как рассчитанных, так и наблюдаемых профили линий были переведены в систему центра масс тесной двойной звезды  $\delta$  Ori Aa. В качестве нуль-пункта шкалы скоростей использовалось значение  $V_r \approx 23.0$  км/с [15]. Скорость третьего компонента в этой системе составляет  $V(Ab) \approx 27$  км/с [15].

Суммарный профиль фотосферной линии HeII  $\lambda 4686$ , рассчитанный с использованием данных параметров представлены на Рис. 1. Как видно из рисунка, наблюдаемые профили воспроизводятся вполне удовлетворительно. Имеющиеся небольшие различия наблюдаемых и рассчитанных профилей в области  $V = 150 - 250$  км/с могут быть связаны с вкладом звездного ветра основного компонента Aa<sup>1</sup>.

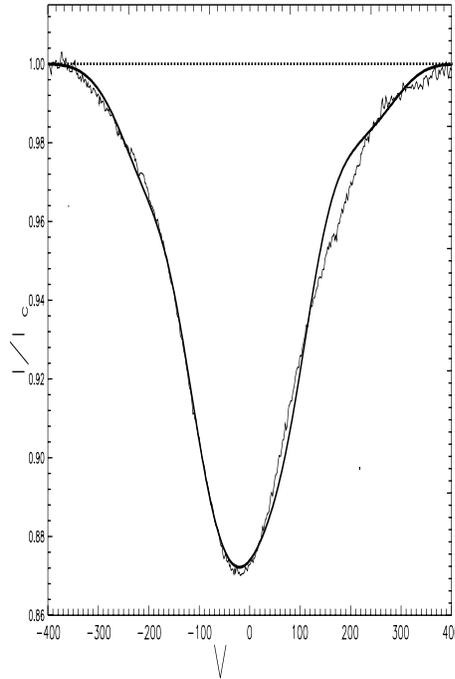


Рис. 1: Синтетический профиль линии HeII  $\lambda 4686$  (толстая сплошная линия) в сравнении с наблюдаемым профилем (тонкая линия) в шкале доплеровских смещений  $V$  от центра линии.

## 4.2 Вариации средних профилей. Разностные профили

Средние за ночь профили линий в спектрах звезд спектрального класса O часто показывают значительные изменения [7]. Изменения профилей линий на более коротких временных промежутках мало заметны. Для того, чтобы наглядно выявить вариации профилей линий в спектре  $\delta$  Ori A на промежутках времени 30-40 минут, мы разбили профили на 4 группы по 10 профилей в каждой группе и вычислили средние профили для указанных групп.

Средние по группам профили, представленные на Рис. 2, показывают заметные изменения на интервалах меньше часа. Особенно явно эти вариации выделены для линии HeI  $\lambda 4713$ . Видно, что при переходе от первой группы спектров к последующим трем

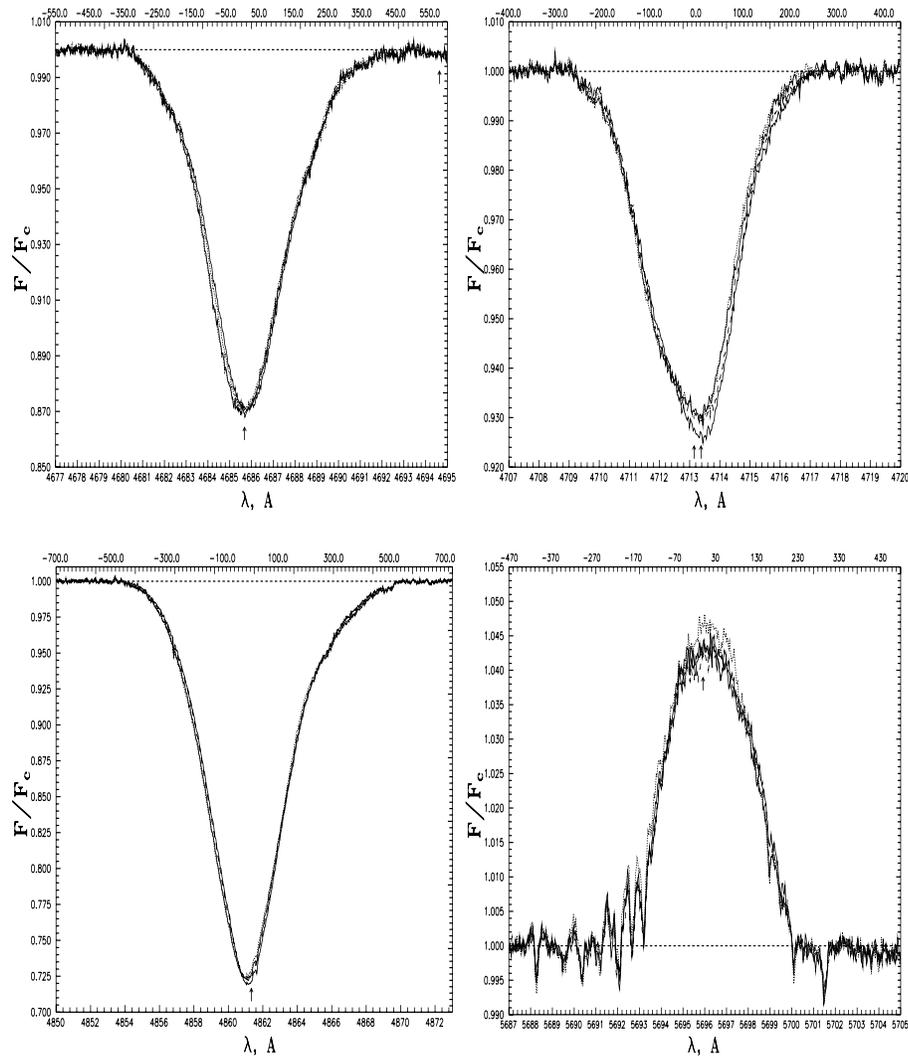


Рис. 2: Средние профили для спектров с номерами 1-10 (тонкая сплошная линия), 11-20 (длинный пунктир), 21-30 (толстая сплошная линия) и 31-40 (короткий пунктир) линий HeII  $\lambda$  4686, HeI  $\lambda$  4713 (вверху) и линий H $\beta$ , CIII  $\lambda$  5696 (внизу). Потоки в частотах линий  $F$  (ось ординат) выражены в долях потоков в соседнем с линией континуума  $F_c$ , длины волн (ось абсцисс) - в ангстремах. Стрелками показаны лабораторные длины волн соответствующих линий.

глубина линии уменьшается на 1-1.5 %. С этими вариациями коррелируют изменения в группах средних профилей эмиссионной линии CIII  $\lambda$  5696. При переходе от первой группы профилей к четвертой потоки в центральной области линии увеличиваются на  $\approx 1\%$ . Амплитуда вариаций потоков в линиях H $\beta$  и HeII  $\lambda$  4686 достигает 1-2%.

В синем крыле профиля линии CIII  $\lambda$  5696 присутствуют узкие абсорбционные детали с глубиной менее 0.01 в долях интенсивности континуума. Подобные детали, но меньшей глубины есть и в красном крыле линии. Проведенное нами исследование показало, что положение всех этих деталей совпадает с положением атмосферных линий поглощения, главным образом линий паров воды [31].

Для выделения переменных деталей профилей линий нами были построены разностные профили (индивидуальный минус средний профиль линии), причем для получения среднего профиля использовались все полученные нами 40 спектров  $\delta$  Ori A.

Для иллюстрации полученных результатов на Рис. 3 представлены динамические раз-

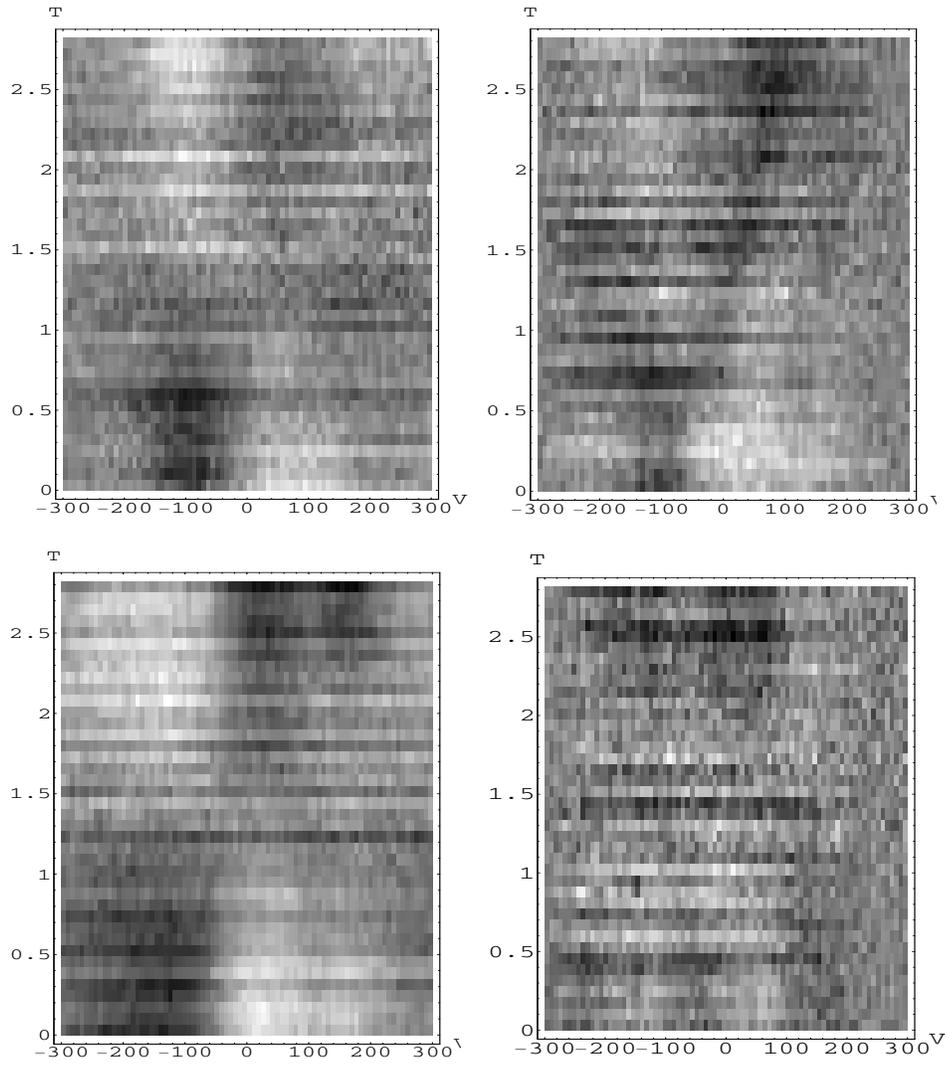


Рис. 3: Динамические спектры вариаций профилей линий в спектре звезды  $\delta$  Ori A. Вверху: линии HeII  $\lambda$  4686 и HeI  $\lambda$  4713, Внизу: линии  $H_{\beta}$  и CIII  $\lambda$  5696. Интервал между последовательными спектрами 4 мин. Ось времени (часы) направлена снизу вверх, лучевые скорости – в км/с. Темным областям на рисунках соответствуют более яркие участки относительно среднего профиля (горбы), светлым – менее яркие (впадины).

ностные профили исследуемых линий в спектре  $\delta$  Ori. Отклонения индивидуальных профилей от среднего по всем спектрам показаны оттенками серого цвета. Для наглядности шкала длин волн преобразована в шкалу доплеровских смещений от центра линии. В качестве нуль-пункта шкалы длины волн использовалось значение лучевой скорости центра масс системы  $\delta$  Ori A (см. пункт 4.1).

Для большей иллюстративности разностные профили представлены в *негативном* виде, то есть светлым областям на рисунках соответствуют участки профиля выше среднего (горбы профиля), тогда как более светлые области (впадины) означают, что в данной части профиля индивидуальный профиль лежит ниже среднего. На рисунках заметны в достаточной мере регулярные изменения профилей. На профилях линий HeII  $\lambda$  4686, HeI  $\lambda$  4713 и  $H_{\beta}$  видно, что перемещение горбов происходит от фиолетового к красному крылу профиля.

На рисунке видно присутствие широкой (50-100 км/с) переменной детали в области

линии HeII  $\lambda$  4686. Эта деталь появляется на скорости около -100 км/с на первых (нижних) разностных профилях. Со временем эта деталь смещается в область центра линии. На последних (верхних) профилях эта деталь видна в области положительных скоростей. Такое поведение разностных профилей характерно для нерадиальных пульсаций [32]. Для более слабых линий в спектре заметные на глаз вариации профилей от спектра к спектру в области линии практически отсутствуют, что связано как с коротким периодом наблюдений, так и с малой амплитудой самих изменений профилей. Для выявления вариаций профилей слабых линий использовалась методика, описанная в следующем пункте.

### 4.3 Анализ спектра временных вариаций разностных спектров

Для выяснения вопроса о переменности профилей линий часто используется методика, предложенная Фуллертоном и др. [33]. Опишем используемый нами вариант этой методики, существенно модифицированный по сравнению с предложенной в данной статье. Пусть в результате проведенных наблюдений получено  $N$  спектров исследуемого объекта. Обозначим через  $F_i(\lambda)$ ,  $i = 1, \dots, N$  - нормированный на континуум поток в  $i$ -м спектре звезды на длине волны  $\lambda$ . Пусть  $\bar{F}_i(\lambda)$  - средний по всем наблюдениям поток на длине волны  $\lambda$ . Тогда дисперсия случайной величины  $F_i(\lambda)$

$$D(\lambda) = TVS(\lambda) = \frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^n g_i [F_i(\lambda) - \bar{F}_i(\lambda)]^2 / \sum_{i=1}^n g_i \right), \quad (1)$$

где  $g_i$  - относительный вес наблюдения  $i$ , обратно пропорциональный величине  $\sigma_i^c$  - стандартного отклонения  $\bar{F}_i(\lambda)$  в области длин волн вблизи линии, переменность профиля которого исследуется. Такое определение величин  $g_i$  позволяет учесть разное качество наблюдений в анализируемой серии спектров. Величина  $TVS(\lambda)$ , называемая в работе [33] спектром временных вариаций, имеет распределение  $\chi^2/(N-1)$  при  $N-1$  степенях свободы.

При переменности профилей, амплитуда которой достаточно велика, величина  $TVS(\lambda)$  в области линии существенно превышает ее значения в области соседнего с линией континуума. Для того, чтобы убедиться, что это увеличение амплитуды вызывается реальной переменностью, задается малый уровень значимости  $\alpha \ll 1$  гипотезы о том, что это превышение вызвано случайной вариацией шумового компонента профиля. По данному уровню  $\alpha \ll 1$  обычным образом вычисляются квантили распределения  $\chi^2$  (см., например, [34]). Пусть величина  $\chi_\alpha^2$  определяется таким образом, что вероятность  $P(\chi^2/(N-1) > \chi_\alpha^2) = \alpha$ . Если вычисленная величина  $TVS(\lambda)$  превышает значение  $\chi_\alpha^2$ , то гипотеза о переменности профиля линии принимается.

Для линий, амплитуда изменений в профилях которых мала, а также при небольшом количестве полученных спектров использование функции  $TVS(\lambda)$ , как было отмечено в [10], не дает определенного ответа на вопрос о том, является ли профиль данной линии переменным или нет. Для решения вопроса о переменности профилей линий при отсутствии заметных на глаз их изменений использовалась следующая методика.

Перед получением спектра стандартного отклонения разностные спектры предварительно сглаживаются с использованием широкого по сравнению с размером пикселя фильтра. При этом, если ширина фильтра составляет  $\Delta\lambda$  в шкале длин волн, то после сглаживания амплитуда сглаженного случайного (шумового) компонента разностных профилей  $\overline{N_j(t)}$  уменьшается в  $\approx \sqrt{\Delta\lambda/\delta\lambda}$  раз, где  $\delta\lambda$  ширина отдельного пикселя в шкале длин

волн в области рассматриваемой линии. Если ширина переменного компонента не меньше ширины фильтра, то при сглаживании с таким фильтром амплитуда переменного компонента изменится мало и, после выполнения процедуры сглаживания, максимумы в спектре стандартного отклонения, соответствующие переменному компоненту, выделяются вполне уверенно.

Эмпирически было установлено, что наиболее удовлетворительные результаты получаются при сглаживании с гауссовым фильтром с шириной  $S = 0.5 - 1.0 \text{ \AA}$  (15-30 пикселей). Для наглядного представления методики поиска слабых вариаций профилей нами используется сглаженный спектр временных вариаций (**smooth Time Variation Spectra** или *smTVS* спектр), представляющий собой совокупность спектров нормированного стандартного отклонения  $\sigma(\lambda, S) = \sqrt{TVS(\lambda, S)}$  для сглаженных с гауссовым фильтром переменной ширины  $S$  разностных спектров.

Спектры временных вариаций профилей линий HeII  $\lambda 4686$  и  $H_{\beta}$  даны на диаграммах плотности на рисунке 4. Более темные области рисунка соответствуют бóльшим амплитудам smTVS-спектра. Приведены только значения на уровне значимости  $\alpha < 10^{-4}$  гипотезы о том, что профили непеременины. Из анализа диаграмм плотности видно, что переменность линий  $H_{\beta}$  и HeII  $\lambda 4686$  выявляется вполне отчетливо.

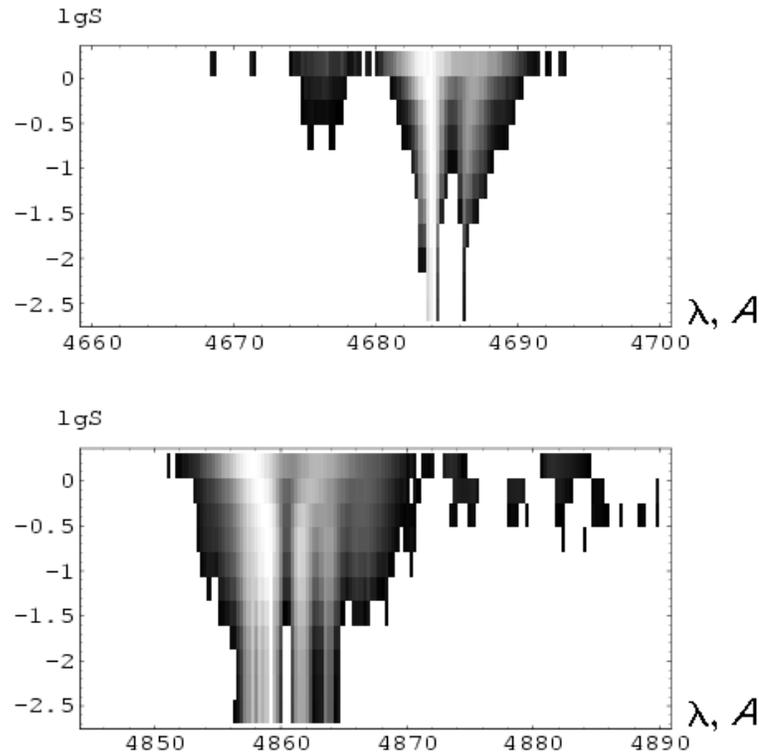


Рис. 4: Спектр временных вариаций профиля линии HeII  $\lambda 4686$  (вверху) и линии  $H_{\beta}$  (внизу). По оси ординат отложен логарифм ширины фильтра в ангстремах, по оси абсцисс – длина волны в  $\text{\AA}$ .

На smTVS-спектре профиля линии HeII  $\lambda 4686$  при ширине фильтра  $S > 0.3 \text{ \AA}$  видна переменность группы линий CIII 4673.95, OII 4673.75, 4676.234; NII 4674.909, 4678.14 и SiIII 4673.273, не обнаружимая обычными методами. При больших ширине фильтра становится заметна переменность большой группы линий OII, NIII и ArII в области длин волн  $\lambda \lambda 4871 - 4890 \text{ \AA}$ . Отметим, что хотя указанные линии крайне слабы, и их остаточные

интенсивности не превышают уровня шумов (на один пиксел по спектру) в области соседнего с указанными линиями континуума, их переменность видна вполне отчетливо. К сожалению, при больших ширинах фильтра, предложенная нами методика не позволяет точно локализовать слабые линии с переменными профилями.

Отметим, что эффективность описанной методики построения smTVS-спектров для поиска слабой переменности профилей чувствительна к числу полученных спектров и ее эффективность существенно возрастает с увеличением числа спектров.

#### 4.4 Вейвлет-анализ вариаций профилей линий

Анализ разностных профилей линий в спектрах исследуемой звезды (Рис. 3) показывает присутствие в них большого числа дискретных деталей. Значительная часть мелкомасштабных деталей связана с шумовым компонентом профилей, тогда как детали больших масштабов могут относиться к регулярному компоненту вариаций профилей [10]. Наиболее подходящим математическим аппаратом для исследования развития деталей профилей разных масштабов является вейвлет-анализ (см., например, [35, 5]), при этом в качестве анализирующего вейвлета (материнский вейвлет) целесообразно использовать так называемый МНАТ-вейвлет  $\psi(x)=(1-x^2)\exp(-x^2/2)$ , имеющий узкий энергетический спектр и равные нулю нулевой и первый моменты. Отметим, что МНАТ-вейвлет представляет собой вторую производную функции Гаусса (взятую со знаком минус), которая может быть применена для описания формы деталей разностных профилей линий.

Используя этот вейвлет, интегральное вейвлет-преобразование можно записать в следующем виде [35, 36]:

$$W(s, u) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{su}(x) dx. \quad (2)$$

где  $f(x)$  - исследуемая функция (в нашем случае - это разностный профиль линии). Плотность энергии сигнала  $E_W(s, u) = W^2(s, u)$  характеризует распределение энергии исследуемого сигнала в пространстве  $(s, u) = (\text{масштаб}, \text{координата})$ . В дальнейшем мы будем анализировать разностные профили линий в форме  $r(V) = F_i(V) - \bar{F}_i(V)$ , где в качестве координаты  $x$  использовано доплеровское смещение  $V$  от центральной частоты линии. В этом случае масштабная переменная  $s$  выражается в км/с.

Для изучения эволюции деталей разностных профилей нами были рассчитаны вейвлет-спектры  $W(s, V) = W(s, V, t)$  линий HeII  $\lambda 4686$ , HeI  $\lambda 4713$ , H $\beta$  и эмиссионной линии CIII  $\lambda 5696$  для всех моментов времени  $t$ , в которые получены спектры звезды. Совокупность функций  $W(s, V, t)$  назовем *динамическим вейвлет-спектром* вариаций профиля рассматриваемой линии в спектре звезды.

На Рис. 5 представлены диаграммы плотности динамических вейвлет-спектров изучаемых нами линий для значения масштабного параметра  $s = 50$  км/с. На рисунке представлены не сами значения функции  $W(s, V, t)$ , а отношение  $d = (W - W_{min})/\Delta W$ . Здесь  $\Delta W = W_{max} - W_{min}$ , где  $W_{max}$  и  $W_{min}$  - максимальное и минимальное значения величины  $W(s, V, t)$  для всех возможных значений  $t$  в промежутке скоростей  $V$  в пределах профиля линии. Более темные участки на рисунке соответствуют большим значениям величины  $W(s, V, t)$ . Для большей наглядности на рисунке отмечены только значения параметра  $d \geq d_{cut}$  - параметра обрезания вейвлет-спектра. На Рис. 5 использовано значение  $d_{cut} = 0.6$ .

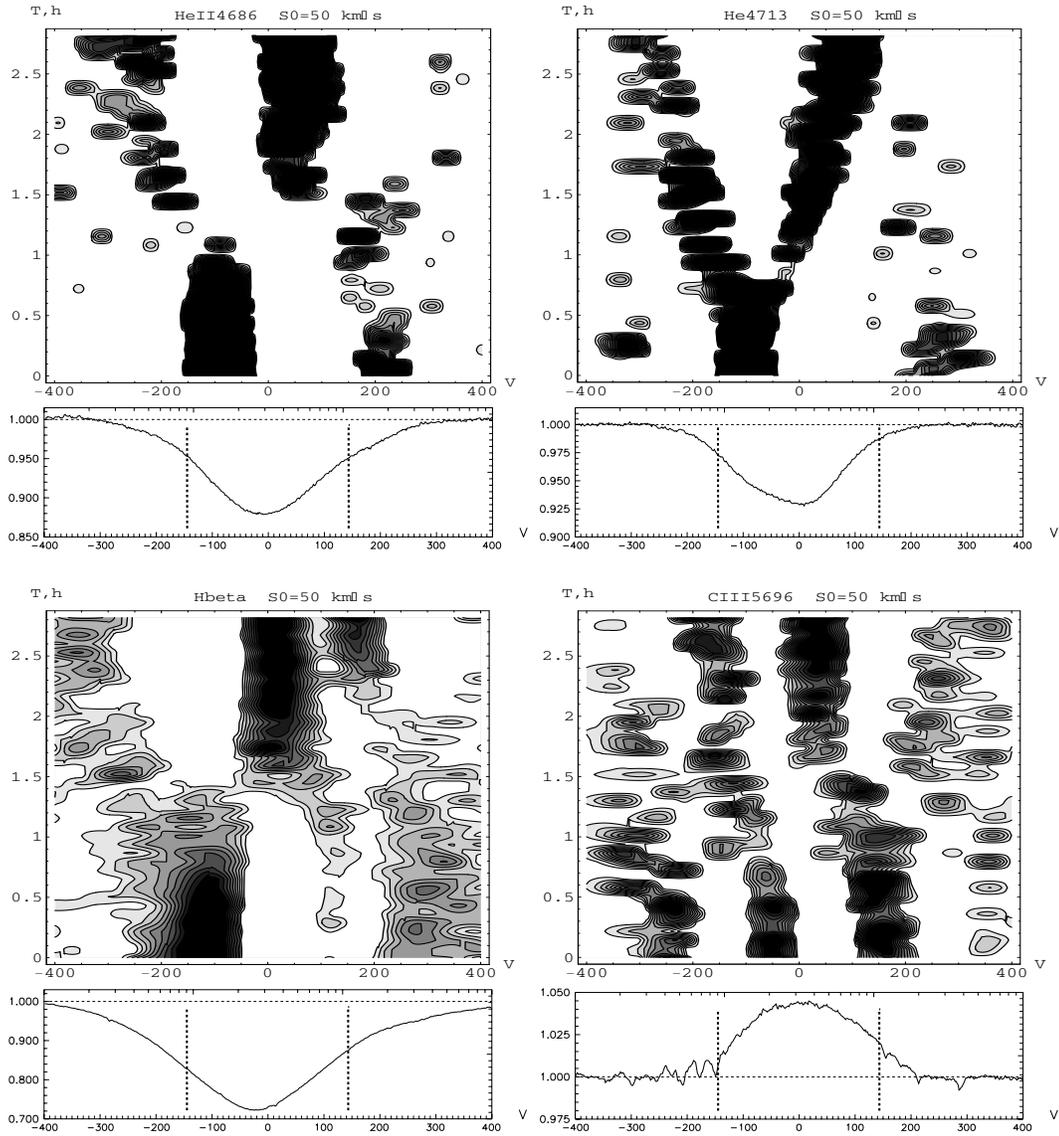


Рис. 5: Динамический вейвлет спектр вариаций профилей линий в спектре звезды  $\delta$  Ori A при значении масштабного параметра  $S_0=50$  км/с. Ось времени (часы) направлена снизу вверх, лучевые скорости – в км/с. В нижней части вейвлет-спектров даны средние по всем проведенным наблюдениям профили соответствующих линий. Пунктиром выделена область  $\pm V \sin i$  для главного компонента Aa<sup>1</sup> системы  $\delta$  Ori A.

Для сравнения ниже вейвлет-спектров даны средние профили соответствующих линий. Пунктирными линиями на средних профилях выделена область  $-V \sin i \div V \sin i$  для главного компонента Aa<sup>1</sup> (см. Табл. 1).

На рисунках видно, что во всех вейвлет-спектрах присутствуют широкие структуры, перемещающиеся вдоль профилей линий. Наиболее заметными из них являются детали, перемещающиеся от фиолетового к красному краю линии. В вейвлет-спектрах разностных профилей линий поглощения HeII  $\lambda$  4686, HeI  $\lambda$  4713 и H $\beta$  видны однотипные детали, перемещающиеся от  $-110 \div -100$  км/с до  $\approx 100 \div 110$  км/с за полное время наблюдений  $2^h 50^m$ . Оценка времени  $T_{\text{cross}}$  пересечения всей полосы  $-V \sin i \div V \sin i$  дает значение  $\approx 4^h$ . Отметим подобие динамического вейвлет-спектра и спектра временных вариаций профилей линий (см. пункт 4.2).

Линии HeI  $\lambda$  4713 и HeII  $\lambda$  4686 формируются в основном в фотосфере и поведение их динамических вейвлет-спектров очень похоже. Кроме главного компонента, смещающегося в красную часть профиля линии, присутствует еще один, более слабый компонент. Этот *вторичный* компонент появляется через  $\approx 40$  минут после начала наблюдений на скорости  $\approx -130 \div 150$  км/с и смещается в область отрицательных скоростей ( $\approx -300$  км/с) к концу наблюдений. Возможно, что данный компонент относится к звезде Ab системы  $\delta$  Ori A, так как вариации профилей, связанные с возможными пульсациями этой звезды должны прослеживаться до значения  $V = V_{min} \approx -300$  км/с (см. Табл. 1). Возможно также, что этот компонент формируется в мощном ветре главной звезды системы  $\delta$  Ori A.

Такой же, как для линий HeI  $\lambda$  4713 и HeII  $\lambda$  4686, но менее отчетливо выраженный *вторичный* компонент присутствует и в динамическом вейвлет-спектре линии H $\beta$ . Заметные детали динамического вейвлет-спектра линии H $\beta$  присутствуют даже вне полосы  $\pm V \sin i \approx 300$  км/с для наиболее быстровращающейся звезды Ab, что вероятнее всего связано с тем, что существенный вклад в профиль линии H $\beta$  вносит мощный звездный ветер главной звезды системы.

Динамический вейвлет-спектр разностных профилей эмиссионной линии CIII  $\lambda$  5696 существенно отличается от рассмотренных выше динамических вейвлет-спектров линий поглощения. На Рис. 5 присутствуют две основные детали, движущиеся почти параллельно в полосе  $-200 \div 200$  км/с от красной в фиолетовую часть профиля линии.

Наиболее заметны регулярные структуры вейвлет-спектра для M профиля линии HeI  $\lambda$  4713. Для детального исследования этих структур на рисунке 6 мы представили рассчитанный динамический вейвлет-спектр для этой линии при различных значениях параметра обрезания вейвлет-спектра  $d_{cut}$  и значения  $S = 25$  км/с. Из рисунка видно, что при увеличении значения  $d_{cut}$  выявляются наиболее сильные структуры вейвлет-спектра. На всех вейвлет-спектрах видно движение детали от -120 до 90 км/с. При значении  $d_{cut} \geq 0.75$  в вейвлет-спектре присутствует только эта основная деталь.

Для выяснения природы деталей, выявленных в вейвлет-спектрах разностных профилей, необходимо установить, являются ли связанные с этими деталями вариации профилей линий регулярными или нет. Эта задача решается в следующем пункте статьи.

## 4.5 Поиск регулярной переменности

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 [37] в модифицированном варианте, описанным Витязевым [38].

Для каждой из изучаемых линий, были построены временные ряды  $\Delta F(t, \lambda)$  - разностных потоков для заданного профиля в момент времени  $t$  для значения  $\lambda$ . Для удобства значения  $\lambda$  переведены в доплеровские смещения  $V$  от центра профиля в системе центра масс (см. пункт 4.1) тройной системы  $\delta$  Ori A.

Процедура CLEAN применялась для всех полученных значений  $V$  вдоль профиля исследуемой линии. Для сглаживания шумового компонента вариаций профилей значения  $\Delta F$  усреднялись в спектральном окне с шириной  $\Delta V = 5-6$  км/с. Результаты расчетов показали, что выбор различных значений  $\Delta V$  слабо влияет на результирующие фурье-спектры.

На Рис. 7 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

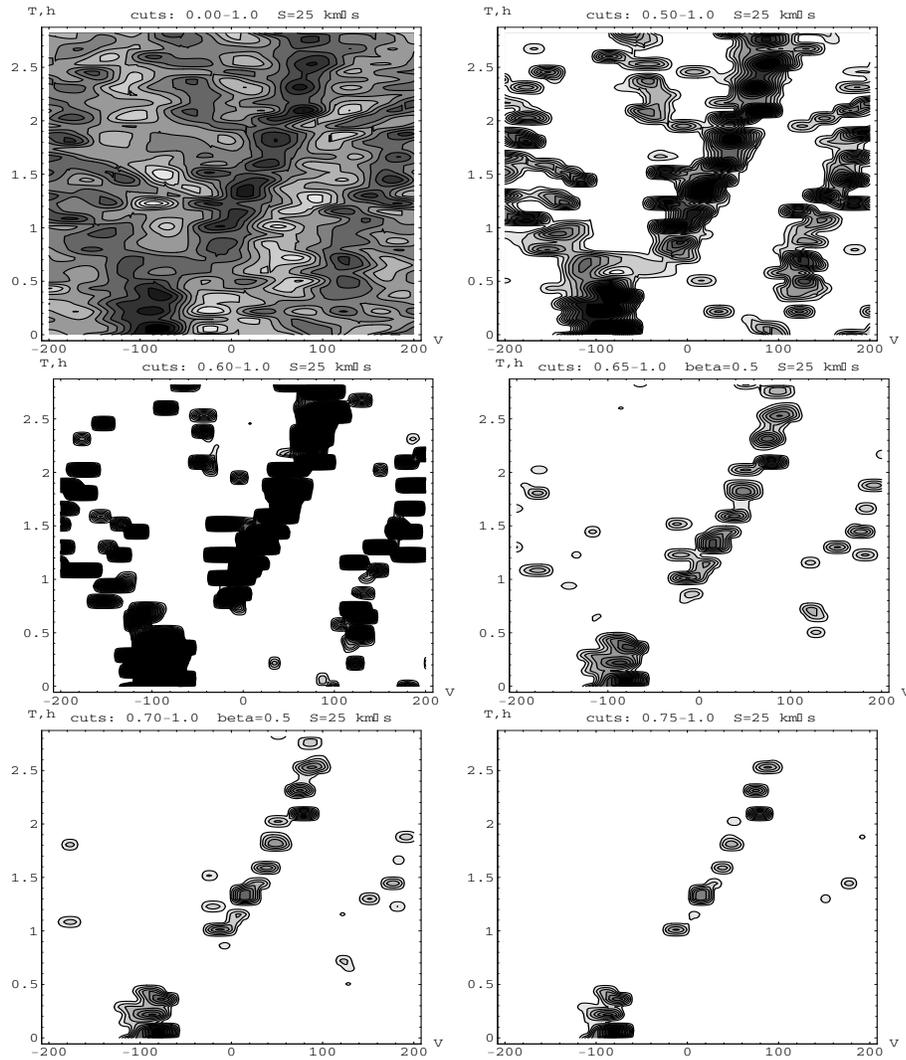


Рис. 6: Динамический вейвлет спектр вариаций профиля линии HeI  $\lambda$  4713 при  $S=25$  км/с и различных значениях параметров обрезания *cuts*

построении диаграммы плотности спектра мощности Фурье-преобразования для наглядности отбрасывались все значения периодограммы, соответствующие малому уровню значимости  $q = 10^{-7} - 10^{-3}$  гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме. Тем самым на графиках представлены только значимые на уровне  $\alpha = 1 - q > 0.999$  гипотезы о присутствии гармонического компонента в периодограмме.

На рисунке видно присутствие широкого пика на частоте  $\nu = 5.9 \pm 1 d^{-1}$ . Большая ширина пика связана с относительно низким разрешением Фурье-спектра из-за малой длительности периода наблюдений. Величина  $P = 1/\nu \approx 4^h.1 \pm 0^h.7$  больше длительности периода наблюдений, поэтому ее нельзя прямо отождествить с периодом регулярных вариаций профилей. Назовем, поэтому, эту величину *квази-периодом* регулярных вариаций профилей. Естественно, что 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 согласуются с периодом  $\approx 4.1 \pm 0.7^h$ , единым для всех исследованных нами линий.

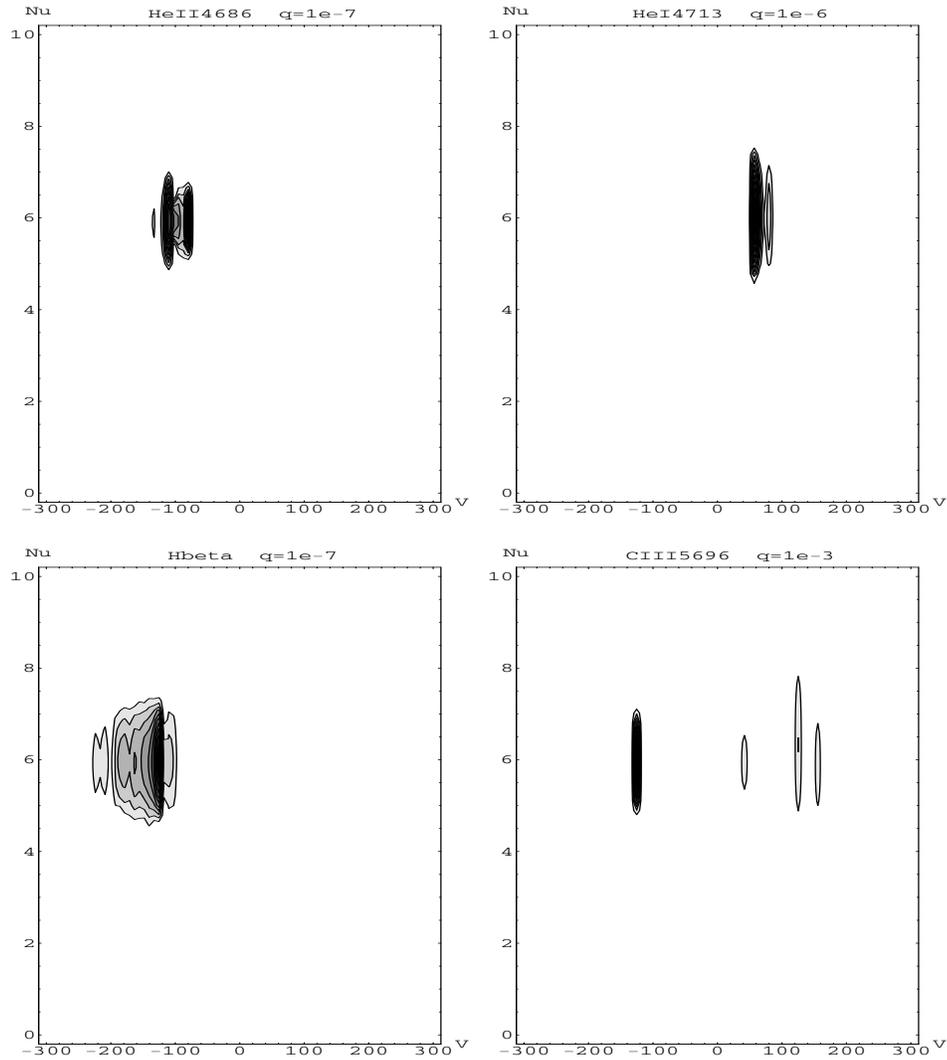


Рис. 7: Фурье-спектры мощности вариаций профилей линий в спектре звезды  $\delta$  Ori A. Представлены значения амплитуды фурье-спектров, соответствующие уровням значимости гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума  $q$ . Вверху: линии HeII  $\lambda$  4686 ( $q = 10^{-7}$ ) и HeI  $\lambda$  4713 ( $q = 10^{-6}$ ), Внизу: линии H $\beta$  ( $q = 10^{-7}$ ) и CIII  $\lambda$  5696 ( $q = 10^{-3}$ ). Более темные области на рисунках соответствуют большим значениям амплитуды Фурье-спектра.

## 5 Обсуждение результатов

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 [4].

Одной из причин быстрых вариаций профилей линий, наряду с нерадиальными пульсациями, может быть вращательная модуляция профилей. В модели, предложенной Капером и др. [1] считается, что наряду со сферически-симметричным истечением вещества в виде звездного ветра в атмосфере присутствуют более плотные компактные коротационные струи вещества, вращающиеся с угловой скоростью звезды. Предполагается, что дополнительное поглощение излучения звезды при появлении этих струй на луче зрения вызывает регулярные изменения профилей линий. Период таких изменений будет равен

$P_n = P_{rot}/n$ , где  $n$  — количество коротационных струй.

Период обращения  $P_{rot}$  основного компонента Aa<sup>1</sup>, оценивается на основе данных Табл. 1:  $P_{rot}/\sin i \approx 3.6$  дня. Реальное значение угла наклона  $i$  оси вращения главного компонента системы вероятно близко к наклону орбиты  $67 - 77^\circ$  [15], что соответствует  $P_{rot} \approx 3.3$  дня. Для получения квази-периода вариации  $P \approx 4^h.1$  в результате вращательной модуляции профилей необходимо иметь величину  $n = 21$ , что представляется маловероятным. Кроме того, в этом случае мы должны видеть не менее 10 регулярных компонент на всем профиле линии, что не наблюдается (см. Рис. 3).

Поэтому можно сделать вывод, что изменения профилей, вызываемые вращением компонента Aa<sup>1</sup> не могут быть причиной обнаруженных нами быстрых вариаций профилей, характеризуемых квази-периодом  $P \approx 4^h.1$ . Аналогичные оценки на основе данных Табл. 1 показывают, что вращение компонентов Aa<sup>2</sup> и Ab также не может быть причиной вариаций профилей в спектре  $\delta$  Ori A.

Таким образом, наиболее вероятной причиной, вызывающей регулярные изменения профилей, являются нерадиальные фотосферные пульсации звезд системы  $\delta$  Ori A. Для определения моды  $(l, m)$  НРП можно использовать соотношения  $l \approx 0.1 + 1.09 |\Delta\phi_0| / \pi$  и  $m \approx 1.33 + 0.54 |\Delta\phi_1| / 2\pi$ , где  $\Delta\phi_0$  — разность фаз Фурье-компонент вариаций профилей линии основной компоненты  $\nu_0$  НРП и  $\Delta\phi_1$  — та же величина для ее первой гармоники  $\nu_1 = 2\nu_0$  [32]. К сожалению, вследствие малой длины исследуемого ряда величины  $\Delta\phi_0$  и  $\Delta\phi_1$  не могут быть определены достаточно точно. Значение  $|\Delta\phi_0|$  для профиля линии H $\beta$  может быть определено только на интервале скоростей  $-18 \div 150$  км/с и равно  $\approx \pi$ . Предполагая, что это значение может быть экстраполировано на весь интервал скоростей  $\pm V \sin i$ , найдем  $l \approx 2$ .

Отметим, что вариации профилей исследуемых нами линий в спектре  $\delta$  Ori A качественно похожи на изменения профилей линий в спектре большого количества Ве звезд [41], которые могут быть описаны как результат нерадиальных пульсаций секторной моды  $(l, |m|) = (2, 2)$ .

Проанализируем вариации профилей линий в спектре звезды  $\delta$  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 [32]. [5 Зависимость скорости 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 написать приближенное равенство  $T_{NRP} \approx T_{cross}$ , где  $T_{cross}$  — время пересечения деталью разностного профиля полосы  $\pm V \sin i$ . Время  $T_{cross}$  мы нашли ранее из анализа вейвлет-спектров разностных профилей фотосферных линий HeII4686 и HeII4713 (см. Рис. 5). Для данных линий время  $T_{cross} \approx 3 - 4^h$ , что весьма близко к определенному нами квази-периоду вариаций профилей  $P \approx 4^h$ .

Можно заключить, что наблюдаемый характер вариации профилей не противоречат гипотезе о том, что они связаны с нерадиальными фотосферными пульсациями основного

компонента  $Aa^1$  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  $m < 0$  [32], 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  $Aa^1$ . 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  $Aa^1$ .

Так как:

- 1) оцененные нами вклады компонент  $Aa^2$  и  $Ab$  в профили основных линий относительно малы,
  - 2) эмиссия СИИ  $\lambda 5696$  появляется в спектрах только ярчайших горячих сверхгигантов (в нашем случае звезда  $Aa^1$ ) и
  - 3) переменность эмиссии СИИ выглядит причинно-связанной с переменностью фотосферных абсорбций и также выходит за границы полосы  $\pm V \sin i$ ,
- мы считаем, что переменность основных линий вызвана главным образом НРП в атмосфере сверхгиганта  $Aa^1$ , а также переменным вкладом эмиссии ветра главной звезды системы, модулированного ее НРП.

Во-вторых, переменность вне полосы  $\pm V \sin i$  может быть связана с компонентами  $Aa^2$  и  $Ab$ .

В динамическом вейвлет-спектре разностных профилей линии СИИ  $\lambda 5696$  (см. Рис. 5) присутствуют две четко выраженные параллельные структуры, связанные с перемещениями широких деталей вейвлет-спектра в сторону отрицательных скоростей. Правая компонента перемещается от скоростей  $\approx 180$  км/с до  $\approx 40$  км/с и целиком (с учетом собственной ширины профилей линий) находится в полосе  $\pm V \sin i$ . Время пересечения данной полосы этой компонентой составляет  $\approx 6^h$ , что значительно больше, чем для компонент, связываемых с НРП для линий HeII  $\lambda 4686$  и HeI  $\lambda 4713$ . Эти структуры, несомненно связаны с какими-то газовыми неоднородностями в атмосфере, дающими дополнительный эмиссионный вклад в излучение в частотах линии СИИ  $\lambda 5696$ , а не непосредственно с НРП основной звезды системы. О возможности генерирования квазирегулярных структур в ветре звезды, вызываемых нерадиальными фотосферными пульсациями, указано в работе [6].

В подтверждение этого предположения укажем, что рисунки динамических вейвлет-спектров, связанных с газовыми неоднородностями, регистрируемыми в эмиссии СИИ, 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 СИИ  $\lambda 5696$  (см. Рис. 5) показывает *избегание* вейвлет-спектров, то есть отсутствие деталей вейвлет-спектра эмиссии СИИ  $\lambda 5696$  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 ОВ-звезд, нанесем положения компонент  $Aa^1$  и  $Aa^2$  на диаграмму эффективная температура – период пульсаций в квадрупольной моде ( $l = 2$ ) горячих звезд главной последовательности (Рис. 6 и 7 в статье [42]). Представленные на Рис. 8 (вверху) положения компонент находят-

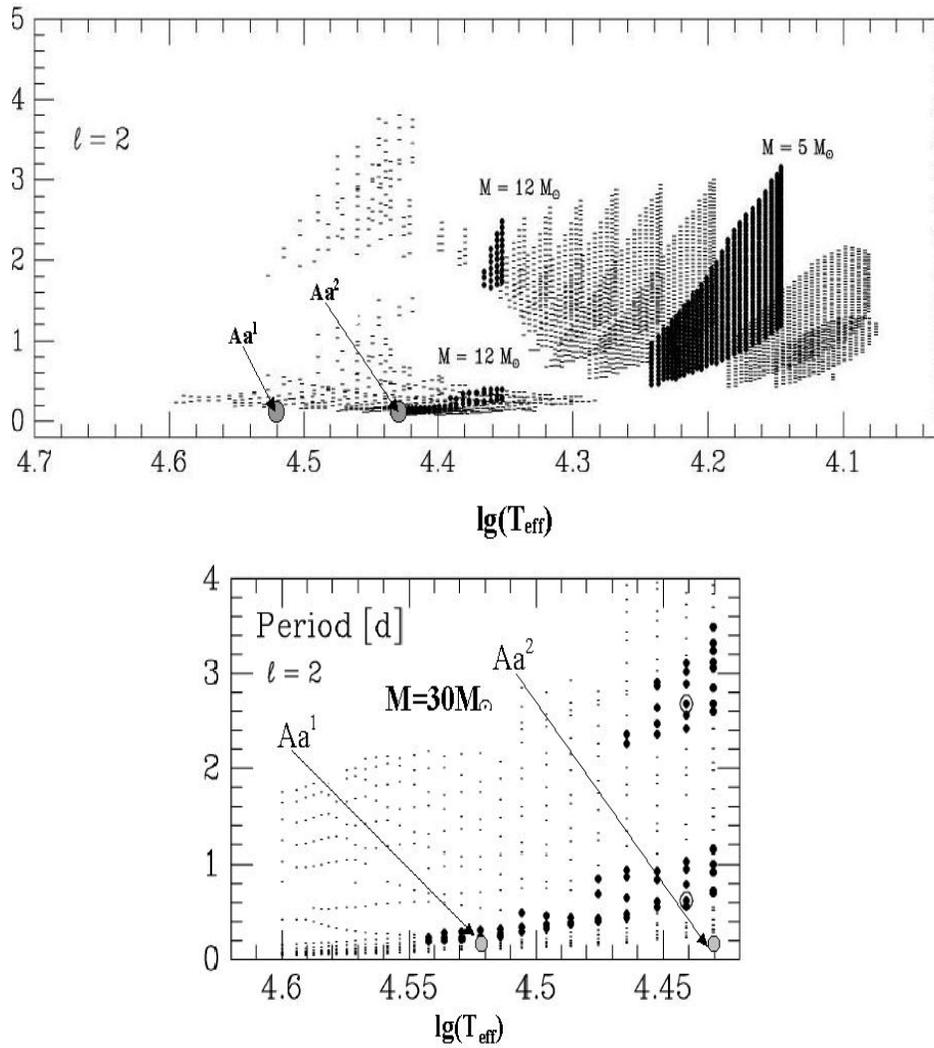


Рис. 8: Положение компонентов  $Aa^1$  и  $Aa^2$  (сплошные кружки) на диаграмме  $\lg T_{\text{eff}}$  (ось абсцисс) – период пульсаций  $P$  в днях (ось ординат) [42]. Вверху: периоды пульсационных мод звезд типа  $\beta$  Сер и SPB звезд. Точки – рассчитанные значения периодов, жирными точками выделены периоды пульсаций звезд главной последовательности с массами  $5M_{\odot}$  и  $12M_{\odot}$ . Внизу: периоды пульсационных мод звезды главной последовательности с массой  $30M_{\odot}$ .

ся ниже короткопериодической границы области пульсационной неустойчивости данных звезд и не соответствуют определенным в работе [15] массам компонентов (см. Табл. 1). В то же время положение компонента  $Aa^1$  на аналогичной диаграмме, но рассчитанной для массивной звезды главной последовательности с  $M = 30 M_{\odot}$  на Рис. 8, внизу точно соответствует области пульсационной неустойчивости этой звезды.

Можно высказать предположение, что даже при значительной потере массы звездой, ее внутренняя структура меняется незначительно, а периоды ее нерадиальных пульсации соответствуют периодам пульсаций звезды главной последовательности с массой, равной исходной массе звезды до потери массы.

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.

## 6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных наблюдений и их анализа можно сделать следующие выводы:

1. Все исследуемые линии имеют переменные профили. Амплитуда переменности составляет 0.5-1%. Вывод о переменности профилей достоверен на уровне значимости 0.999.
2. В динамическом вейвлет-спектре вариаций профилей линий HeII  $\lambda 4686$ , HeI  $\lambda 4713$ , H  $\beta$  и CIII  $\lambda 5696$  обнаружены крупномасштабные компоненты в интервале масштабов 25-50 км/с, перемещающиеся в полосе  $-V \sin i \div V \sin i$  для главной звезды системы Aa<sup>1</sup> со временем пересечения полосы 4-5<sup>h</sup>. Часть переменных деталей выходит за эту полосу, что может быть скорее всего связано с эмиссионными газовыми неоднородностями в ветре звезды  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup>. Возможен также вклад в переменность вне полосы  $-V \sin i \div V \sin i$  менее ярких компонентов системы Aa<sup>2</sup> или Ab.
3. В вариациях профилей исследованных линий обнаружены короткопериодические изменения с характерными временами  $\approx 4^h$ . Приведены свидетельства в пользу того, что эти изменения вызываются нерадиальными пульсациями главного компонента системы Aa<sup>1</sup> спектрального класса O9.5II в секторной моде  $(l, m) = (2, -2)$ .

*Авторы выражают благодарность В.Е.Панчуку за помощь в наблюдениях, а также признательность А.Б.Шнейвайсу за помощь в расчетах Фурье-спектров. Работа поддержана грантом РФФИ 05-02-16995а, грантом Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-1088.2003.3 и грантом Президента РФ по поддержке молодых кандидатов наук МК-874.2004.2. Г.Г.В. признателен за поддержку Korea MOST грант M1-0222-00-0005 и программам KOFST и KASI (Brain Pool program).*

## Список литературы

- [1] *Kaper L., Henrichs H.F., Fullerton A.W., Ando H. et al.* // *Astron. Astrophys.*, 1997. V. 327. P. 281.
- [2] *Kaper L., Henrichs H.F., Nichols J.S., Telting J.H. et al.* // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 344. P. 231.
- [3] *Kaufer A., Stahl O., Wolf B. et al.* // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 305. P. 887.
- [4] *de Jong J.A., Henrichs H.F., Schrijvers S., Gies D.R., Telting J.H., Kaper L., Zwarthoed G.A.* // *Astron. Astroph.* 1999. V. 345. P. 172.
- [5] *Lépine S., Moffat A.F.J.* // *Astrophys. J.* 1999. V. 514. P. 909.
- [6] *Owocki, S. P.; Cranmer, S. R.*, in *Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics*, eds. C. Aerts, T.R. Bedding, J.Christensen-Dalsgaard,, ASP Conf. Proc., **259**, 512 (1988)
- [7] *de Jong J.A., Henrichs H.F., Kaper L., Nichols J.S. et al.* // *Astron. Astroph.* 2001. V. 368. P. 601.
- [8] *Kahn S.M., Leutenegger M.A., Cottam J. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 365, P. 365.
- [9] *Miller N.A., Cassinelli J.P., MacFarlane J.J., Cohen D.H.* // *Astroph. J.* 2002. V. 499. P. L195.
- [10] *Холтыгин А.Ф., Монин Д.Н., Сурков А.Е., Фабрика С.Н.*, Письма в Астрон. ж., 2003. Т. 29. С. 208.
- [11] *Donati J.-F., Wade G.A., Babel J., Henrics H.F., de Jong J.A., Harries T.J.* // *Mothly Notices Roy. Astron. Soc.* 2001. V. 326. P. 1265.
- [12] *Donati J.-F., Babel J., Harries T.J., Howarth I.D., Petit P., Semel M.* // *Mothly Notices Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 333. P. 55.
- [13] *Neiner C., Hubert A.M., Floquet A.M., et. al.* // *Astron. Astroph.* 2002. V. 388. P. 899.
- [14] *Hoffleit D.* // *JAAVSO.* 1996, V. 24. P. 105.
- [15] *Harvin J.A., Gies D.R., Bagnuolo W.J., Jr., Penny L.R., Thaller M.R.* // *Astroph. J.*, 2002. V. 565. P. 1216.

- [16] *Abt H.A., Levato H., Grosso M.*// *Astroph. J.*, 2002. V.573 P. 359
- [17] *Maíz-Apelániz J. Walborn N.R.*// *Astroph. J. Suppl Ser.* 2004. V. 151. P. 103.
- [18] *Voels S.A., Bohannan B., Abbot D.C., Hummer D.G.*// *Astroph. J.* 1989. V. 340. P. 1073.
- [19] *Tarasov A.E. et al.*// *Astron. and Astroph. Suppl. Ser.* 1995. V. 110. P. 59.
- [20] *Lamers H.J.G.L.M, Leitherer C.* *Astroph. J.* 1993. V. 412. P. 771.
- [21] *Wilson I.R.G., Dopita M.A.*// *Astroph. J.* 1985. V. 149. P. 295
- [22] *Bieging J.H., Abbot D.C., Churcwell E.B.*// *Astroph. J.* 1989. V. 340, P. 518.
- [23] *Grady C.A., Snow T.P., Cash W.C.*// *Astroph. J.* 1984. V. 283. P. 218.
- [24] *Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ермаков С.В.*// *САО РАН. Препринт No. 169.* 2002.
- [25] *Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Наїденов И.Д.*// *САО РАН. Препринт No. 179.* 2003.
- [26] *Ballester P.*// *Astron. and Astroph.* 1994. V. 286. P. 1011
- [27] *Shergin V.S., Kniazev A.Yu., Lipovetsky V.A.*// *Astron. Nachr.* 1996. V. 317. P. 95.
- [28] *Howarth I.D., Prinja R.K.,* // *Astroph. J. Suppl. Ser.* 1989. V. 69. P. 527
- [29] *Грей Д.* Наблюдения и анализ звездных фотосфер. М.: Мир. 1980.
- [30] *Evans D.S.*//in *Proc. IAU Symp. No. 30.* 1979. V. 30. P. 57.
- [31] *Pierce A.K., Breckinridge J.B.*// *Preprint KPNO.* 1973. No. 1063.
- [32] *Telting J.H., Schrijvers C.*// *Astron. and Astroph. Suppl.Ser.* 1997. V. 317. P. 723.
- [33] *Fullerton A.W., Gies D.R. Bolton C.T.*// *Astroph. J. Suppl. Ser.* 1996. V. 103. P. 475.
- [34] *Брандт Э.* Статистические методы анализа наблюдений. М.: Мир. 1975.
- [35] *Астафьева Н.М.*// *Усп. физ. наук.* 1996. Т. 166. С. 1145.
- [36] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ, М.: Физматлит. 2003.
- [37] *Roberts D.H., Lehar J., Dreher J.W.*// *Astron. J.* 1987. V. 93. P. 968.
- [38] *Витязев В.В.*, Анализ неравномерных временных рядов, СПб.: Изд. СПбГУ. 2001.
- [39] *Холтыгин А.Ф., Шнейвайс А.Б.*// *Астрофизика.* 2005. готовится к печати
- [40] *Холтыгин А.Ф., Шнейвайс А.Б.*// *Астрофизика.* 2005. Т. 48. С. 87
- [41] *Rivinius Th., Baade D., SteflS.*// *Aston. Astroph.* 2003. V. 411. P. 229.
- [42] *Ратуатныкх А.А.* // *Acta. Astron.* **49**, 189 (1999)

# LINE PROFILES MICROVARIABILITY IN THE OB STAR SPECTRA II: $\delta$ Ori A

**A.F. Kholtygin, T.E. Burlakova, S.N. Fabrika, G.G. Valyavin, M.V. Yushkin**

Variability of line profiles in spectra of the brightest component of the triple system  $\delta$  Ori A have been studied. were fulfilled on January 10/11 2004. We have taken 40 spectra of the star with a signal to noise ratio  $\approx 500 - 800$  and a time resolution  $\approx 4$  minutes. A variability of the HeII  $\lambda 4686$ , HeI  $\lambda 4713$ , H  $\beta$  and CIII  $\lambda 5696$  line profiles was detected. The variability amplitude is  $\approx 0.5 - 1\%$  in the continuum units. In dynamical wavelet spectra of these line variations we have detected large-scale (25-50 km/s) components moving in a band  $-V \sin i \div V \sin i$  of the main star Aa<sup>1</sup>. A crossing time of the band is 4-5<sup>h</sup>. M However, some variable components are found outside this band, what could be related to emission of gas clumps in the stellar wind of  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup> or to non-radial pulsations of the fainter components (Aa<sup>2</sup> or Ab). The detected variability is probably cyclical with a period of  $\approx 4^h$ . It is the most probable that the variability is connected with non-radial pulsations of the main component. We found that the main component  $\delta$  Ori Aa<sup>1</sup> to be pulsate in the  $(l, m) = (2, -2)$ .