

УДК 524.358;539.186

БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ О-ЗВЕЗД

© 2003 г. А. Ф. Холтыгин^{1*}, Д. Н. Монин², А. Е. Сурков², С. Н. Фабрика²

¹Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Поступила в редакцию ???

Описана программа поиска и анализа переменностей профилей в спектрах ярких сверхгигантов спектрального класса О с временным разрешением 5–30 минут. Представлены предварительные результаты спектральных наблюдений звезд λ Ori, α Cam и 19 Ser на 1-м телескопе САО в 2001 г. Обнаружена переменность профилей линий в спектрах всех исследованных звезд, причем переменность в линиях $H\alpha$ и $CIII$ $\lambda 5696 \text{ \AA}$ в спектре звезды λ Ori впервые. Амплитуда переменных деталей профиля составляет 2–5% от уровня континуума, а ширина — 2–4 \AA (100–200 км/с). Обнаружены циклические изменения профилей линий в спектре звезды λ Ori.

Ключевые слова: звезды — переменные и пекулярные; горячие звезды, переменность профилей линий.

ВВЕДЕНИЕ

Одной и важнейших проблем физики звезд является проблема образования сложной внутренней структуры расширяющихся атмосфер звезд ранних спектральных классов WR, O и B, т.е. механизм формирования звездного ветра. Наблюдения этих звезд в УФ (Капер и др., 1997, 1999), видимом (Капер и др., 1997; Лепин, Моффат, 1999; де Йонг и др., 1999, 2001) и рентгеновском (Кан и др., 2001) диапазонах свидетельствуют о присутствии в их атмосферах неоднородностей разного размера и плотности.

В профилях линий спектров звезд типа WR присутствуют переменные детали (пики), смещающиеся от центра к крыльям линии, связанные с компактными структурами (обычно называемыми облаками) в атмосфере. В отдельных пиках содержится не более 1–2% полной энергии, излучаемой в линии, а сами пики согласно Лепину и др. (1996)

и Лепину, Моффату (1999) являются короткоживущими деталями профиля. Пики с максимальным потоком имеют ширины до 200–300 км/с и прослеживаются в профилях до 1–2 сут, тогда как самые мелкие из обнаружимых пиков с ширинами около 50 км/с видны в профилях не более 1–2 ч. Предполагается, что в атмосферах присутствуют и малые облачка, образующие узкие пики с ширинами 10–40 км/с (Холтыгин, 1995), не обнаружимые в профилях линий при имеющихся в настоящее время возможностях звездной спектроскопии.

Такой характер переменности профилей может быть интерпретирован в рамках *стохастической облачной модели атмосфер*, предложенной в работах Холтыгина и др. (2000) и Кудряшовой, Холтыгина (2001). В этой модели, являющейся обобщением облачной модели атмосфер звезд типа Вольфа–Райе (Антохин и др., 1998, 1992), расширяющаяся атмосфера (оболочка) звезды представляется совокупностью плотных мелкомасштабных неоднородностей (облаков), находящихся в разреженной межоблачной среде. Образование и раз-

*Электронный адрес: afk@theor1.astro.spbu.ru

рушение облаков в атмосфере рассматривается как стохастический процесс. Использование облачной модели позволяет рассчитывать как ионизационную и тепловую структуры атмосфер, так и переменные профили линий, формирующихся в атмосфере (Антохин и др. 1992; Кудряшова, Холтыгин, 2001). Концепция стохастической облачной модели использована для разработки *трехфазной облачной модели* атмосфер звезд ранних спектральных классов (Холтыгин 2001; Холтыгин и др., 2002), в которой предполагается, что из полной совокупности облаков может быть выделен ансамбль *горячих* ($T = 10^6 - 10^7$ К) облаков, формирующих рентгеновское излучение звезды, и *холодных* облаков, в которых сохраняются ионы относительно низких стадий ионизации (HeII, SiII, NII и др.).

Картина переменности профилей линий в спектрах O- и B-звезд значительно сложнее. Наиболее ярким ее проявлением является появление в профилях резонансных и субординатных УФ-линий NIV, SiIV и других ионов переменных абсорбционных деталей, называемых дискретными абсорбционными компонентами (ДАК). Эти детали обнаруживаются в фиолетовых частях профиля на частотах, соответствующих доплеровским смещениям от -300 до -800 км/с, затем они смещаются в сторону больших значений отрицательных скоростей вплоть до достижения края профиля, соответствующего терминальным скоростям ветра ($1500 - 2500$) км/с. Процесс формирования ДАК происходит циклически. Циклы эволюции ДАК повторяются через 1–2 сут, а общая картина образования ДАК является стабильной на протяжении нескольких лет, причем длина циклов остается фактически постоянной на протяжении всего периода наблюдений (де Йонг и др., 1999), что свидетельствует в пользу гипотезы о том, что образование ДАК является периодическим процессом.

Появление ДАК обычно связывается с формированием крупномасштабных структур в атмосферах звезд в областях коротации звезды и звездного ветра (Капер и др., 1997; де Йонг и др., 2001). С этими же структурами связывается и переменность профилей линий NI и HeI в видимой области спектра O-звезд. В пользу такой гипотезы говорит близость периодов изменений в профилях оптических линий и периодов формирования ДАК (Капер и др., 1997).

Несмотря на длительность изучения вариаций профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов, причина образования крупномасштабных структур до настоящего времени остается не вполне ясной. В качестве одной из причин их формирования предлагается наличие в фотосферах областей с различными скоростями и темпами истечения вещества. Образование подобных

областей связывается с нерадиальными пульсациями O- и B-звезд, индикатором которых служат короткопериодические (3–12 ч) изменения профилей линий HeI, обнаруженные у многих B-звезд и шести звезд спектрального класса O (Де Йонг и др., 2001). Одним из факторов, способствующих образованию крупномасштабных структур в атмосфере, возможно, является слабое (несколько сотен Гс) магнитное поле на поверхности звезды (Донати и др., 2001). Однако свидетельств наличия магнитного поля у звезд спектрального класса O пока не обнаружено (Капер и др., 1997).

Расчеты динамики расширяющихся атмосфер звезд ранних спектральных классов (Овоки, 1998) предсказывают радиационную нестабильность атмосфер WR-, O- и ранних B-звезд и образование в атмосферах широкого спектра неоднородностей, как крупномасштабных, так и мелкомасштабных. Вследствие образования мелкомасштабных неоднородностей в атмосфере профили оптических линий в спектрах всех звезд ранних спектральных классов должны показывать не только регулярную, но и нерегулярную (стохастическую) переменность профилей, характерную для звезд типа WR. Переменность такого типа обнаружена у ярчайшей O-звезды ζ Pup. В профилях линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ в спектре данной звезды обнаружены перемещающиеся к крыльям линии пики, связанные с неоднородностями малых масштабов (Эверсберг и др., 1998). Свидетельств стохастической переменности профилей линий других звезд спектрального класса O еще не найдено.

Следует отметить, что и само образование крупномасштабных структур в областях коротации является стохастическим процессом ввиду неустойчивости ударного фронта в области раздела быстрых и медленных потоков вещества. Такая неустойчивость может привести к разбиению соосно вращающихся со звездой струй вещества в ее атмосфере на отдельные фрагменты, следствием чего также будет нерегулярная переменность профилей линий в спектрах звезд.

По этой причине весьма актуальной задачей представляется детальное исследование как регулярной, так и нерегулярной (стохастической) переменности профилей линий в спектрах ярких O-звезд, связанной с присутствием мелкомасштабных неоднородностей (облаков) в их атмосферах. Настоящая статья является первой из серии статей, описывающих результаты такого исследования. В данной работе излагается программа поиска стохастической переменности профилей линий спектров звезд спектрального класса O и приведены первые результаты анализа профилей линий звезд α Cam, 19 Ser и λ Ori, полученных на 1-м телескопе САО в 2001 г.

Таблица 1. Список программных звезд

HD	Имя	Спектральный класс	V	V_{∞}	$V_{\sin i}$, км/с	V_r , км/с
24212	ξ Per	O7.5III	4.04	2330	213	64.6
30614	α Cam	O9.5I	4.29	1590	129	6.1
36486	δ Ori	O9.5II	2.23	2060	144	118.3
36861	λ OriA	O8III	3.66	2175	74	35.4
37742	ζ OriA	O8III	1.79	1860	124	12.8
47839	15Mon	O7Ve	4.66	2110	67	19.6
91316	ρ Leo	B1Iab	3.84	1110	75	42.0
203064	68Cyg	O8e	5.04	2340	115	-3.9
209975	19Ser	O9.5I	5.11	2010	95	-12.8
210839	λ Ser	O6Iab	5.09	2300	219	-75.9
214680	10Lac	O9V	4.87	1140	35	-4.7

Таблица 2. Список звезд, наблюдаемых в 2001 г.

Объект	Экспозиция, мин	Число спектров	Общее время наблюдений, ч
4–7 сентября 2001 г.			
ξ Per	10	4	0.7
α Cam	10	11	1.8
19 Ser	15	22	6.0
10 Lac	10/15	39	10.5
29–7 декабря 2001 г.			
ξ Per	5	5	0.4
α Cam	10	6	1.0
λ Ori A	10	75	12.5
ζ Ori A	2	36	1.2
10 Lac	15	27	6.7

ПРОГРАММА ПОИСКА ПЕРЕМЕННОСТИ

Исследования переменности профилей звезд ранних спектральных классов (Капер и др., 1999; Эверсберг и др., 1998; Холтыгин и др., 2000) показывают, что для уверенного выявления как регулярных, так и стохастических изменений профилей необходимо высокое качество спектроскопии: спектральное разрешение $R \geq 40\,000$, отношение сигнал/шум (S/N) в области исследуемых линий 200–300 и выше и достаточно хорошее временное разрешение, 10–30 мин.

Исходя из этого нами были отобраны яркие

звезды ($V \leq 5^m.5$) спектрального класса O северного неба, спектры которых могут быть получены с необходимыми для поиска переменности параметрами в фокусе кудэ с использованием кудэ–эшелле-спектрометра CEGS 1-м телескопа САО (Мусаев, 1996). Список программных звезд дан в табл. 1. Дополнительно в список добавлена яркая звезда ρ Leo спектрального класса B1 для изучения изменения характера переменности профилей при переходе от поздних O- к ранним B-звездам, при котором происходит резкое падение темпа потери массы. В последних столбцах таблицы представлены значения терминальных скоростей ветра V_{∞} (Ховарт и др., 1997), скоростей вращения $V \sin i$ (Капер и др., 1997) и лучевых скоростей (Конти и др., 1977; Вилсон, 1950).

При выборе подходящих дат наблюдений включенной в программу звезды можно наблюдать фактически всю ночь, что обеспечивает при их наблюдении в течение 3–6 ночей получение длинных рядов наблюдений (2–3 периода вращения звезды), необходимых для достаточного точного выделения регулярной компоненты переменности профилей линий. Предлагается следующая стратегия наблюдений: получение длительных рядов наблюдений на 1-м телескопе САО с целью выявления общего характера переменности программных звезд и подробное исследование тех звезд, у которых обнаружена переменность профилей или какие-либо необычные спектральные особенности, с помощью 6-м телескопа САО. При использовании 6-м телескопа возможно получение спектров исследуемых звезд с более высоким разрешением ($R \approx 60\,000$) и высоким отношением сигнал/шум ($S/N \approx 500–1000$) при небольших экспозициях до 10–15 мин, что существенно выше, чем получено ранее для данных звезд (см., например, Капер и др., 1999).

НАБЛЮДЕНИЯ ВКЛЮЧЕННЫХ В ПРОГРАММУ ЗВЕЗД В 2001 г.

Первые наблюдения по описанной выше программе были проведены 4–7 сентября и 29 ноября–6 декабря 2001 г. на 1-м телескопе САО. В табл. 2 представлены общие данные о проведенных наблюдениях.

Общее число спектров, полученных в 2001 г., превышает 200. В данной статье мы рассмотрим результаты наблюдений трех звезд: α Cam, 19 Ser и λ Ori A. Результаты наблюдений остальных звезд программы будут представлены в следующих публикациях. Для достижения необходимого для поиска переменности отношения $S/N > 200$ в случае более слабой звезды 19 Ser суммировались два полученных в соседние моменты времени спектра с экспозициями по 15 мин.

*Организация наблюдений и обработка
спектрального материалов*

Наблюдения включенных в программу звезд проводились с использованием кудэ-эшелле-спектрометра SEG5 1-м телескопа САО. Конфигурация инструмента описана Мусаевым (1996). В качестве приемника была использована ПЗС система фирмы Wright Instruments с размером приемника 1242×1152 пикселей. При ширине входной щели спектрографа $2''$ в диапазоне длин волн от 4000 до 8000 Å достигается спектральное разрешение $R = 45\,000$ (0.08 Å/пиксел в области H α).

Редукция спектров проводилась с помощью пакета MIDAS. Процесс обработки ПЗС-изображений включал следующие этапы: удаление рассеянного света, определение положения эшелле-порядков, удаление следов космических частиц, выделение отдельных эшелле-порядков, проведение континуума, учет попиксельной неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы и линеаризация спектра в шкале длин волн.

Выполнение описанных этапов проводилось с использованием стандартных средств пакета MIDAS, поэтому мы дадим комментарии только к тем процедурам, которые отличаются от обычно используемых. Для определения положения порядков использовались непосредственно эшелле-спектры исследуемых звезд. Применялась одна и та же маска положения порядков для всех спектров данной звезды, полученных в данную ночь.

Для исследования переменности профилей линий спектры нормировались на континуум. Континуум был проведен отдельно в каждом эшелле-порядке с использованием широкого гауссоподобного фильтра (Шергин и др., 1996). Для всей последовательности спектров данной звезды применялись одинаковые параметры фильтра с шириной окна фильтра 25–30 Å. В трех порядках в спектре звезды λ Ori A, содержащих линии H α , CII λ 5696 Å и HeII λ 4686 Å, континуум проводился иным способом: спектр сглаживался скользящим средним, причем области спектральных линий исключались из процедуры. Последний способ также был исследован авторами и проверен по спектроскопии звезд разных типов. Он дает устойчивые результаты в проведении континуума, даже если в спектре есть широкие и переменные линии или при изменении погодных условий во время наблюдений.

Для учета попиксельной неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы наблюдалась яркая быстровращающаяся звезда α Leo ($V \sin i = 329$ км/с). Для этой звезды была получена

последовательность спектров с высоким отношением S/N. В результате последующего усреднения спектров звезды подавлялся фотонный шум и его вклад в общий шум становился значительно меньше, чем вклад неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы. Далее производилось сглаживание спектра с использованием гауссового фильтра (около 7 Å) и последующая нормировка исходного спектра на сглаженный. После выполнения этой операции крупномасштабные детали спектра, в том числе и широкие линии звезды, исчезают, а в нормированном спектре содержатся только попиксельные неоднородности и узкие линии земной атмосферы. Спектры исследуемых звезд делятся на полученный спектр неоднородностей чувствительности ПЗС-матрицы. В результате, отношение S/N в индивидуальном спектре увеличивается (в зависимости от уровня сигнала на 20–50%). Кроме того, из спектра целиком или частично удаляются линии земной атмосферы.

Дисперсионная зависимость находилась по спектру рассеянного солнечного света и ее точность составила 10 мÅ. Используемая нами процедура редукции гарантирует одинаковую обработку всей последовательности спектров данной звезды, что дает возможность корректного анализа переменности профилей линий. При получении шкалы длин волн для каждой звезды учитывались поправки за вращение Земли и за обращение вокруг Солнца.

Переменность профилей

Выяснение вопроса о переменности профилей проводилось с использованием стандартной методики. Все спектры исследуемой звезды суммировались с целью получения среднего спектра. Определенные указанным способом средние профили линий H β и H α в спектрах исследуемых звезд представлены на рис. 1. Для перевода шкалы длин волн в систему отсчета, связанную со звездой, использовались значения лучевых скоростей, приведенные в табл. 1.

Для выделения переменных деталей профилей линии всех полученных спектров находились разностные профили (индивидуальный профиль линии минус средний). В разностных профилях линий в спектрах всех исследованных нами звезд обнаружены переменные детали. Для иллюстрации на рис. 2 приведены разностные профили линий H α и HeI λ 5876 Å в спектре звезды 19 Ser в единицах интенсивности континуума. Для наглядности последовательные профили сдвинуты по шкале интенсивностей. Из рисунка ясно видно присутствие в красной части профиля (≈ 90 км/с) переменной детали с максимальной амплитудой 4–5%. Данная

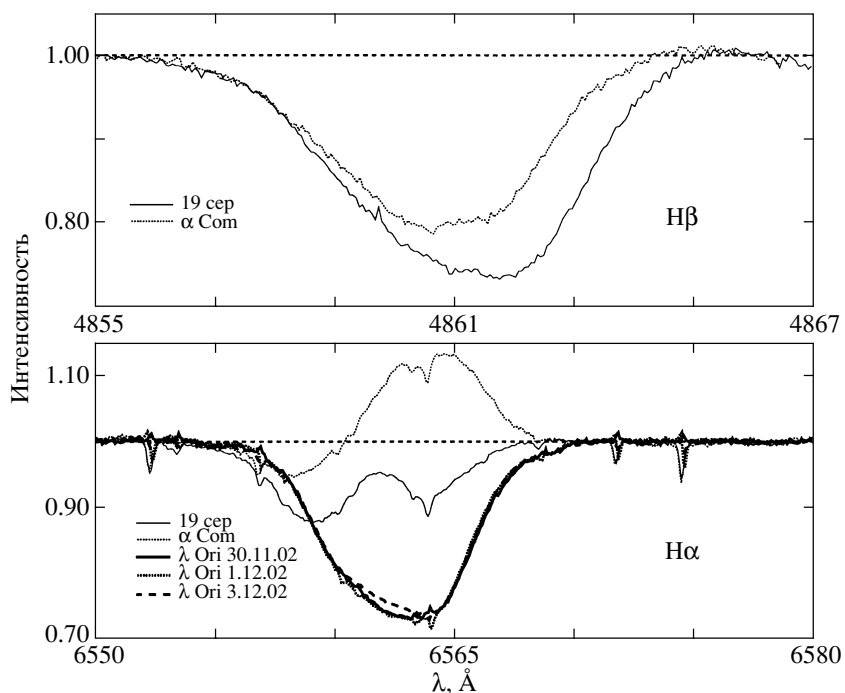


Рис. 1. Сравнение профилей линий Hα и Hβ в спектрах звезд 19 Сеп, α Сат и λ Ори. Интенсивности (ось ординат) выражены в долях интенсивности континуума.

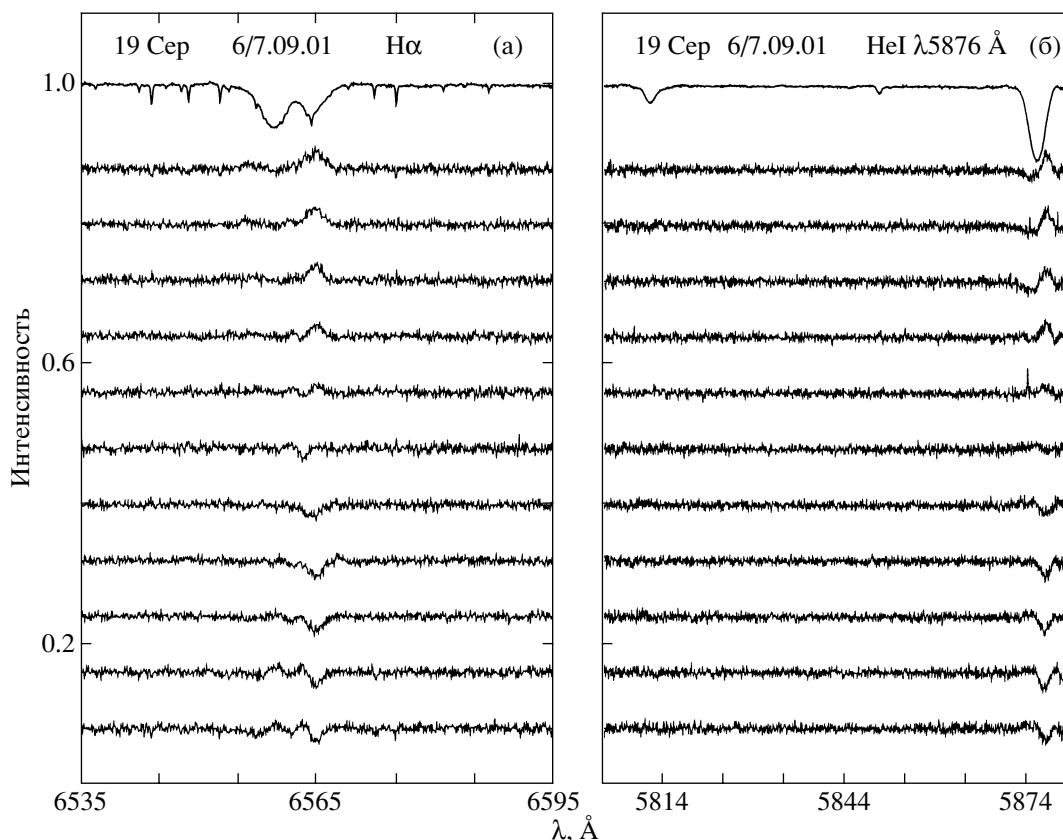


Рис. 2. Разностные профили линии Hα (а) и (б) He I λ5876 в спектре звезды 19 Сеп. Интенсивности выражены в долях интенсивности континуума. Индивидуальные профили сдвинуты по оси Y на 0.08 в тех же единицах. Ось времени направлено снизу вверх. Верхние кривые — сжатые в 2.5 раза средние профили соответствующих линий.

Таблица 3. Линии с переменными профилями в спектрах звезд α Cam, 19 Ser и λ Ori A

Звезда	Время наблюдения	Переменные линии	Возможна переменность
19 Ser	09.2001	H β , H α , HeI λ 5876 Å	—
α Cam	09.2001	—	HeI λ 4713 Å, H β , H α
λ Ori A	11–12.2001	H α , HeII λ 4686 Å, CIII λ 5696	HeI λ 4713 Å

деталь практически не смещается за все время наблюдений звезды (6 ч). Подобные переменные детали с таким же смещением по скорости в спектре этой звезды обнаружены и в профиле линии H β .

Амплитуда вариаций профиля в спектрах других исследуемых звезд заметно меньше, чем для 19 Ser, поэтому для решения вопроса о том, является ли профиль той или другой линии переменным, используется следующий подход. Для всех значений длин волн λ в пределах профиля линии вычисляется величина $\sigma_{\text{line}}(\lambda)$ — стандартное отклонение случайной величины $\Delta(\lambda, t)$ — разности индивидуального и среднего профиля линии для заданного значения длины волны λ в момент времени t . Одновременно находится значение σ_{cont} — аналогичной величины для области континуума вблизи рассматриваемой линии.

Измеряемый поток в разностном спектре на длине волны λ_j в момент времени t_i можно представить в виде $F_j = F_j(t_i) = S_j + N_j$, где $S_j = S_j(t_i)$ — искомый сигнал, а $N_j = N_j(t_i)$ — шумовой компонент. В пределах одного порядка величину $N_j(t)$ можно считать нормально распределенной случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_{cont}^2 . Пусть мы анализируем m разностных спектров для последовательных моментов времени t_1, t_2, \dots, t_m . В предположении об отсутствии переменности профилей ($N_j \gg S_j$) случайная величина $S_{m-1} = \sigma_{\text{line}}(\lambda)$ будет иметь распределение $\sigma_{\text{cont}}^2 \sqrt{F(\chi^2)/(m-1)}$, где $F(\chi^2)$ — распределение χ^2 с $m-1$ степенью свободы (см., например, Брандт, 1975).

Зададимся некоторым уровнем значимости α . Пусть рассчитанная для данного значения λ случайная величина

$$\sigma_{\text{line}}(\lambda) > S_{m-1}^\alpha, \quad (1)$$

где значение S_{m-1}^α , определяется таким образом, что вероятность того, что данная случайная величина превосходит $\sigma_{\text{line}}(\lambda) > S_{m-1}^\alpha$, равна α . Тогда предположение о постоянстве потока излучения в линии на уровне значимости α отвергается и принимается гипотеза о присутствии в линии переменного компонента.

Описанная выше процедура поиска переменности профилей линий близка к используемой Фуллертоном и др. (1996). В цитируемой работе используется также процедура выравнивания спектра стандартного отклонения $\sigma_{\text{line}}(\lambda)$ за счет изменения чувствительности приемника вдоль профиля линии. Используемая нами методика устранения эффектов вариации чувствительности матрицы (попиксельной неоднородности) оказалась достаточно эффективной, поэтому дополнительного выравнивания спектра $\sigma_{\text{line}}(\lambda)$ не требуется.

Для иллюстрации используемой методики поиска переменности на рис. 3 приведены спектры стандартного отклонения $\sigma(\lambda)$ для областей вблизи линий H α , HeII λ 4686 Å и CIII λ 5696 Å в спектрах звезд 19 Ser, α Cam и λ Ori. Из рисунков видно, что линии в спектрах всех звезд, за исключением α Cam, удовлетворяют критерию переменности (1). Положение максимума в спектре стандартного отклонения соответствует максимуму амплитуды переменности профиля линии. Для увеличения надежности определения переменных профилей в спектрах исследуемых звезд использовались дополнительные критерии выявления переменности, основанные на анализе изменений профилей линий в спектре конкретной звезды:

а) отсутствие зависимости картины изменений профиля от положения линии внутри спектрального порядка и подобие изменений профилей одной и той же линии в двух соседних порядках (например, линии H β и HeI λ 5876 Å);

б) одинаковый характер изменений профиля у разных линий одного элемента и у линий различных элементов (например, H, He и C);

в) близкие амплитуды переменности у разных линий;

г) близость лучевых скоростей переменных деталей профиля у разных линий.

Отметим, например, что переменная деталь в профиле линии H α в спектре звезды 19 Ser смещена на 86 км/с, а линии H β — на 88 км/с.

В табл. 3 приведен список линий для всех рассматриваемых звезд, удовлетворяющих условию (1) с учетом приведенных выше дополнительных критериев (а–г). Переменность профилей найдена у всех исследуемых нами звезд. Переменность

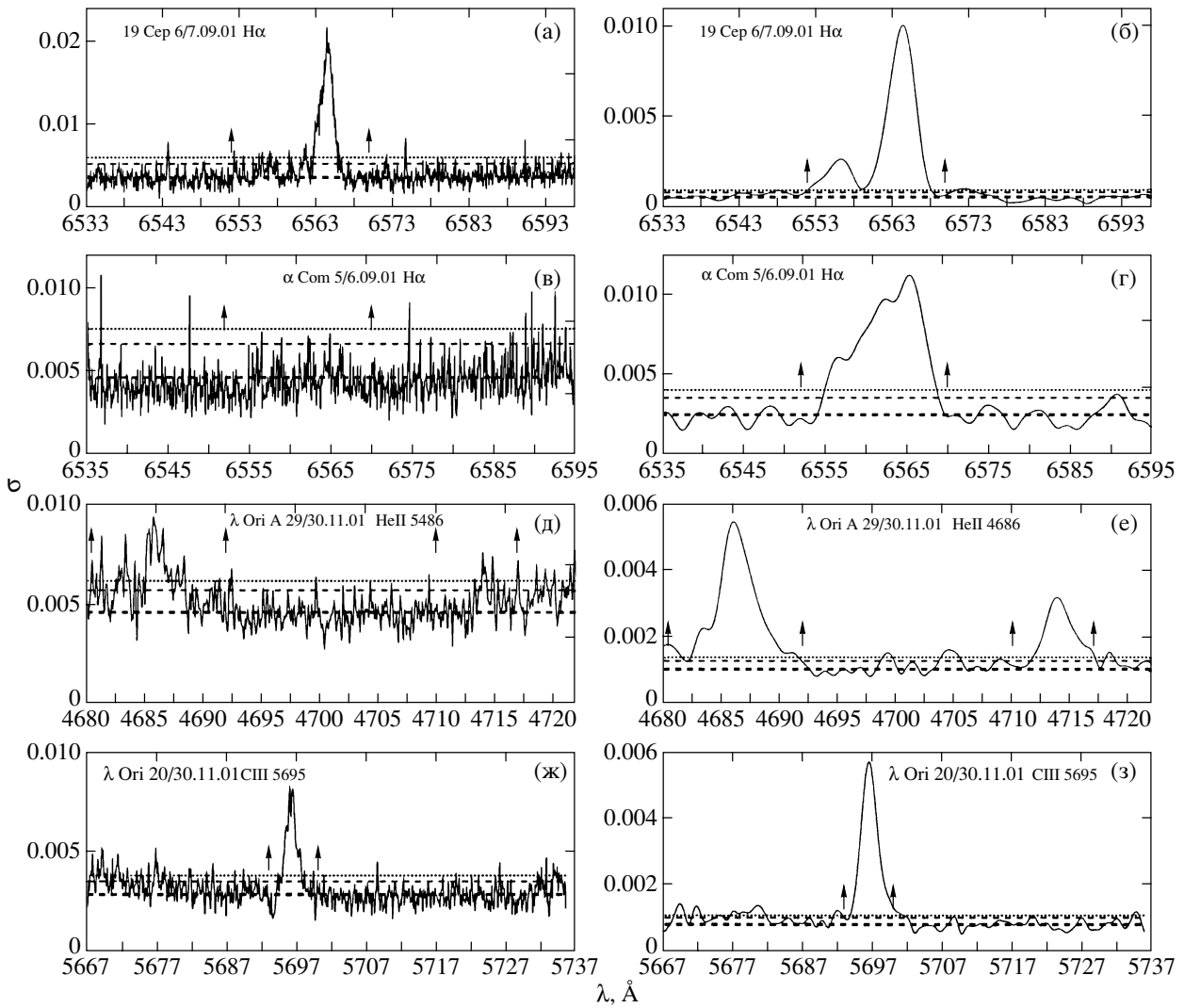


Рис. 3. Стандартные отклонения разностных профилей линии $H\alpha$ в спектре звезд 19 Cep, α Com и λ Ori A в долях интенсивности континуума. Горизонтальные линии на всех рисунках соответствует уровням значимости гипотезы об отсутствии переменности профилей, равным 0.01, 0.05 и 0.50 (снизу вверх). Стрелки показывают коротковолновые и длинноволновые границы профилей линий. На левой половине рисунка для вычисления стандартных отклонений использованы несглаженные разностные профили линий, на правой — сглаженные с использованием гауссового фильтра с шириной 1.0 \AA .

же профилей линий $H\alpha$ и $\text{CIII } \lambda 5696 \text{ \AA}$ в спектре звезды λ Ori A обнаружена первые (см. Капер и др., 1999). Подобие списков переменных линий у изучаемых звезд связано с тем, что в таблицу попали самые яркие линии в их спектрах. Для обнаружения переменности профилей слабых линий требуется существенное увеличение отношения сигнал/шум.

Отсутствие линий, удовлетворяющих критерию (1), в спектрах звезды α Com, полученных в сентябре 2001 г. связано как с коротким периодом наблюдения (менее 2 ч), так и с малым (11) числом спектров (см. табл. 2). В то же время выполненные нами наблюдения профилей линий в спектре этой

звезды в 1997 г. показали переменность профилей линий $\text{HeII } \lambda 4686 \text{ \AA}$ и $H\alpha$ на шкалах времени 2–4 ч (Холтыгин и др., 2000).

Для решения вопроса о переменности профилей линий при отсутствии заметных на глаз их изменений используется 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 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 после выполнения процедуры сглаживания максимумы в спектре стандартного отклонения, соответствующие переменному компоненту, выделяются вполне уверенно. Рис. 3б, 3г, 3е, 3з иллюстрируют использование процедуры сглаживания профилей для анализа их переменности.

Эмпирически было установлено, что наиболее удовлетворительные результаты получаются при сглаживании с гауссовым фильтром с шириной $0.5\text{--}1.0 \text{ \AA}$ (7–15 пикселей). Анализ рис. 3 показывает, что даже если в несглаженном спектре стандартного отклонения (рис. 3в) не обнаруживается присутствия значимых вариаций профиля, предварительное сглаживание разностных спектров позволяет выделить такие вариации вполне уверенно (см. рис. 3г). Для ряда линий в спектрах исследуемых звезд критерий (1) выполняется только для сглаженных разностных спектров. Список таких линий представлен в последнем столбце табл. 3.

Отдельно следует остановиться на вопросе о влиянии ошибок проведения континуума на обнаружение переменности профилей. Исследование таких ошибок показало, что они возрастают с шириной линии, но даже для наиболее широких линий абсолютные ошибки проведения континуума не превосходят 1%. В более узких линиях, таких, как СиII $\lambda 5696 \text{ \AA}$ или НеII $\lambda 4686 \text{ \AA}$, они существенно меньше. Кроме того, для всех спектров используется одинаковая процедура определения уровня континуума, и тем самым даже возможные малые ошибки проведения континуума сказываются одинаковым образом на всех спектрах.

Описанная выше процедура поиска переменности профилей дает ответ только на вопрос о том, является ли профиль данной конкретной линии переменным или нет. В то же время для выяснения механизма, вызывающего переменность профилей, необходимо, как отмечено во введении, ответить на вопрос, являются ли изменения профиля в той или иной степени регулярными (циклическими), нерегулярными (стохастическими) или суперпозицией регулярных и нерегулярных изменений. Для ответа на данный вопрос целесообразно применение методов Фурье (см., например, Робертс и др., 1987; Витязев, 2001) и вейвлет-анализа (Добеши, 2001; Кудряшова, Холтыгин, 2001). Результаты такого анализа описаны в следующих разделах настоящей работы.

АНАЛИЗ ПЕРЕМЕННОСТИ

Вейвлет-анализ

Анализ средних профилей линий в спектрах исследуемых звезд (рис. 1) и соответствующих разностных профилей (рис. 2) показывает, что полный

профиль линии может быть представлен совокупностью среднего профиля и большого числа дискретных деталей. Наиболее подходящим математическим аппаратом для исследования переменности таких профилей является вейвлет-анализ (см., например, Лепин и др., 1996), при этом в качестве анализирующего вейвлета (материнского вейвлета) 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, которая может быть применена для описания формы деталей в разностных профилях линий.

Используя этот вейвлет, интегральное вейвлет-преобразование можно записать в следующем виде (Лепин и др., 1996; Добеши, 2001):

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

Плотность энергии сигнала $E_W(s, u) = W^2(s, u)$ характеризует распределение энергии исследуемого сигнала в пространстве (s, u) (масштаб, координата). В нашем случае координата x — длина волны, поэтому масштабная переменная s может быть выражена в \AA .

Полная энергия распределена по масштабам в соответствии с глобальным спектром энергии вейвлет-преобразования:

$$E_W(s) = \int_{u_1}^{u_2} W^2(s, u) du = \int_{u_1}^{u_2} E_W(s, u) du. \quad (3)$$

Эту функцию называют также спектром мощности вейвлет-преобразования. Масштаб a , где функция $E_W(s)$ достигает максимума, называется доминирующим масштабом исследуемого сигнала $f(x)$ на промежутке u_1 и u_2 (Лепин и др., 1996).

Нами были получены вейвлет-спектры мощности для всех профилей линий в спектрах исследуемых звезд, для которых обнаружена или заподозрена переменность. В качестве значений u_1 и u_2 использовались фиолетовый и красный края профиля. Таким образом, мы рассматриваем спектр мощности вейвлет-преобразования на интервале длин волн, соответствующем полной ширине профиля. Некоторые из полученных спектров представлены на рис. 4. Анализ спектров мощности

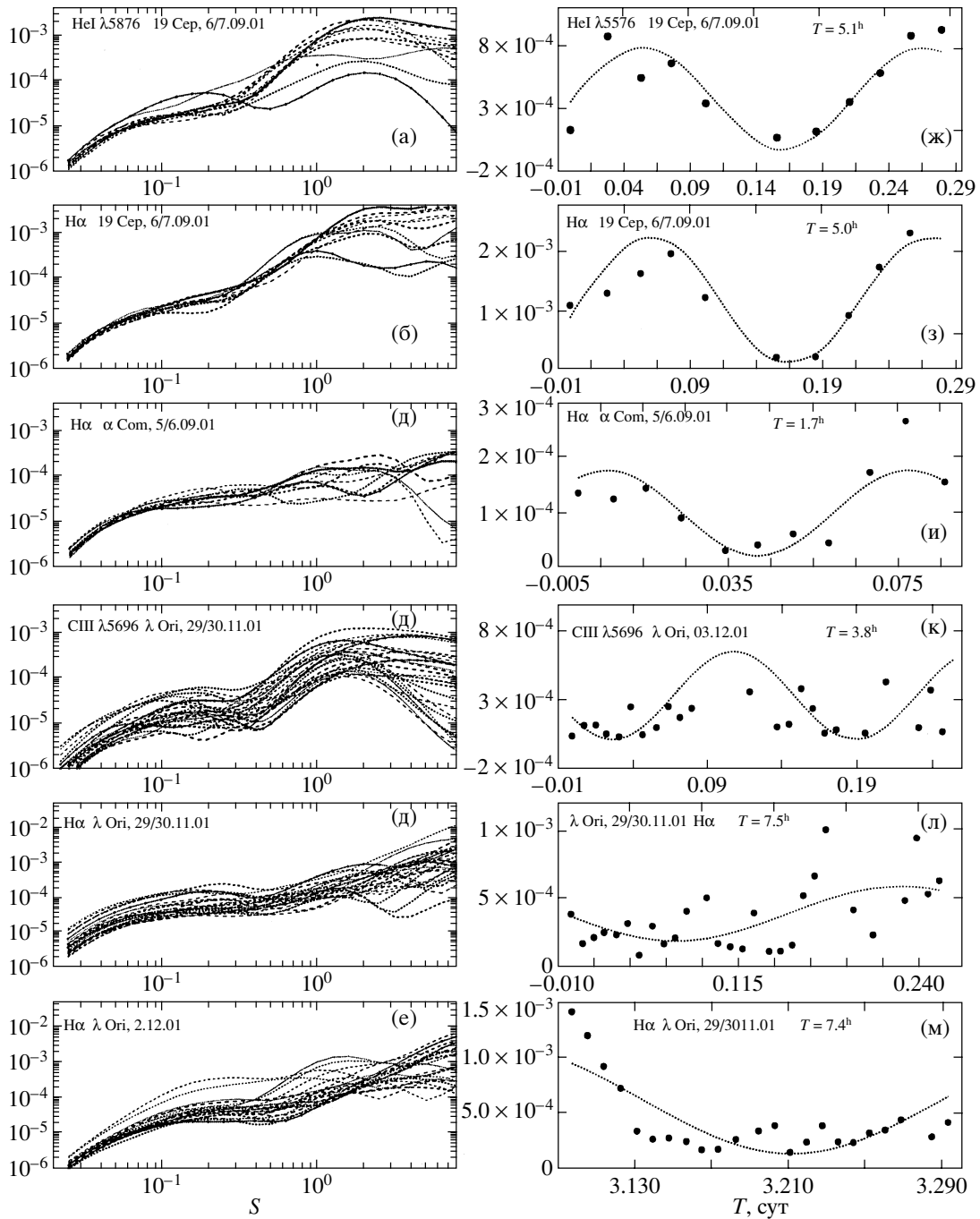


Рис. 4. (а)–(е) – Вейвлет-спектры мощности разностных профилей линий HeI λ 5876 Å CIII λ 5696 Å и H α в спектрах звезд 19 Cep, α Com и λ Ori в зависимости от масштаба вейвлет-преобразования S в Å. (ж)–(м) – Зависимости суммарных амплитуд спектра мощности в области масштабов 1.5–2.5 Å (точки) от момента наблюдения. Сплошные кривые – их синусоидальная аппроксимация.

показывает присутствие двух компонентов в исследуемом сигнале: мелкомасштабного (0.1–0.4 Å) и крупномасштабного (0.5–8 Å).

Первый компонент у звезд 19 Cep (рис. 4а, 4б) и α Com (рис. 4в) слабо меняется за время наблюдений и имеет максимум на масштабах,

близких к значению 0.1 Å – размеру пикселя ПЗС-матрицы. Отсутствие заметной переменности мелкомасштабного компонента вейвлет-спектра мощности у данных звезд свидетельствует в пользу предположения о том, что он определяется главным образом вкладом шумов и остаточными эффектами попиксельной неоднородности матрицы.

В то же время мелкомасштабный компонент вейвлет-спектра мощности разностных профилей линий звезды λ Ori (рис. 4г–4е) показывает заметную нерегулярную переменность с максимальной амплитудой на масштабах $0.2\text{--}0.3 \text{ \AA}$ ($10\text{--}15 \text{ км/с}$). Наличие переменного компонента в вейвлет-спектре мощности на указанных масштабах может быть связано с присутствием в атмосфере λ Ori неоднородностей малого масштаба ($10^{-3}\text{--}10^{-2}R_{\odot}$) (Кудряшова, Холтыгин, 2001).

Крупномасштабный компонент вейвлет-спектра мощности сильно переменен для всех изучаемых звезд. Максимум амплитуды переменности соответствует доминирующим масштабам $1.5\text{--}6 \text{ \AA}$ — характерному размеру переменных деталей профиля линии (см. рис. 2). Исследованию временной зависимости спектра мощности посвящен следующий раздел работы.

Периодические и стохастические изменения профилей линий

Как было отмечено выше, исследования профилей линий в спектрах большинства звезд спектрального класса O показывают присутствие их периодических изменений. Естественно предположить, что такие изменения проявляются и в вейвлет-спектре мощности разностных профилей линий. Для проверки данной гипотезы мы исследовали временную зависимость интегральных вейвлет-спектров мощности:

$$E[S_1, S_2](t) = \int_{s_1}^{s_2} E_W(s, t) ds. \quad (4)$$

Здесь t — время получения исследуемого профиля, который мы считаем равным моменту середины экспозиции соответствующего спектра. В качестве промежутка масштабов S_1, S_2 выбран интервал $1.5\text{--}2.5 \text{ \AA}$, в котором амплитуда изменений вейвлет-спектра максимальна. Полученные зависимости $E[S_1, S_2](t)$ в зависимости от времени наблюдения t приведены на рис. 4ж–4м. Для удобства время наблюдения выражен в долях дня, а в качестве нулевого момента времени принимался момент середины экспозиции первого спектра в исследуемой серии наблюдений.

Как видно из рис. 4, зависимости $E[S_1, S_2](t)$ в достаточной степени регулярны. Для поиска гармонического компонента функция $E[S_1, S_2](t)$ аппроксимировалась синусоидой с амплитудой, периодом, фазой и смещением, определяемыми методом наименьших квадратов. Полученные аппроксимации показаны на рис. 4ж–4м сплошными линиями. На этих же рисунках приведены найденные

периоды T изменений вейвлет-спектра мощности. Определенные периоды лежат в промежутке $1.7\text{--}9.2^h$ и соответствуют характерным частотам нерадиальных фотосферных пульсаций звезд соответствующих спектральных классов (де Йонг и др., 2001).

Во время получения спектра звезды λ Ori A в течение примерно часа из шести часов наблюдений (21–22 UT) в щель спектрографа попадал спутник звезды — λ Ori B (5^m61). По этой причине важен вопрос о влиянии вклада спутника в переменность профилей линий. Видимая звездная величина спутника существенно меньше чем у основной звезды (на 2^m5). Кроме того в зависимости амплитуды вейвлет-преобразования от времени (рис. 4к–4м) не заметны какие-либо особенности в моменты нахождения спутника в щели спектрографа. При детальном анализе оказалось, что разрезы спектров поперек дисперсии симметричны, что говорит о пренебрежимо малом искажении профилей линий из-за влияния спутника.

Для выяснения вопроса о реальности найденных периодов нами был выполнен численный эксперимент по определению периодов изменения функции $E[S_1, S_2](t)$ по модельному спектру: синусоидальный компонент плюс нормально распределенный шумовой компонент (N). В качестве моментов времени и числа наблюдаемых спектров (N_{sp}) использованы соответствующие значения для звезд 19 Ser, α Cam и λ Ori. Результаты эксперимента показали, что при отношении $A/N = 3\text{--}6$, где A — амплитуда переменного компонента, N — величина шума в рассматриваемой области спектра, при числе спектров $k = 11\text{--}30$ и периодах $1\text{--}10^h$ определяемые периоды на уровне значимости 0.95 находятся в промежутке $\pm 50\%$ исходного периода гармонического компонента.

Эффективное значение A/N для вейвлет-спектров мощности определяется отношением S/N для исходных (не нормированных) профилей исследуемых звезд и составляет $A/N \approx 6$ для 19 Ser и α Cam и $A/N \approx 3$ для λ Ori. Тем не менее авторы полагают, что вывод об обнаружении циклических изменений в интегральных вейвлет-спектрах мощности был бы преждевременным. Представленные на рис. 4ж–4м временные ряды показывают, что найденные нами периоды сравнимы с полным интервалом наблюдений исследуемых звезд или даже больше их, поэтому для подтверждения их достоверности требуется проведение более длинных серий наблюдений.

Отметим, что полученный в результате вышеописанного анализа период изменений в эмиссионной линии CIII $\lambda 5696 \text{ \AA}$ оказался примерно в два раза меньше, чем для изменений в линии H α ,

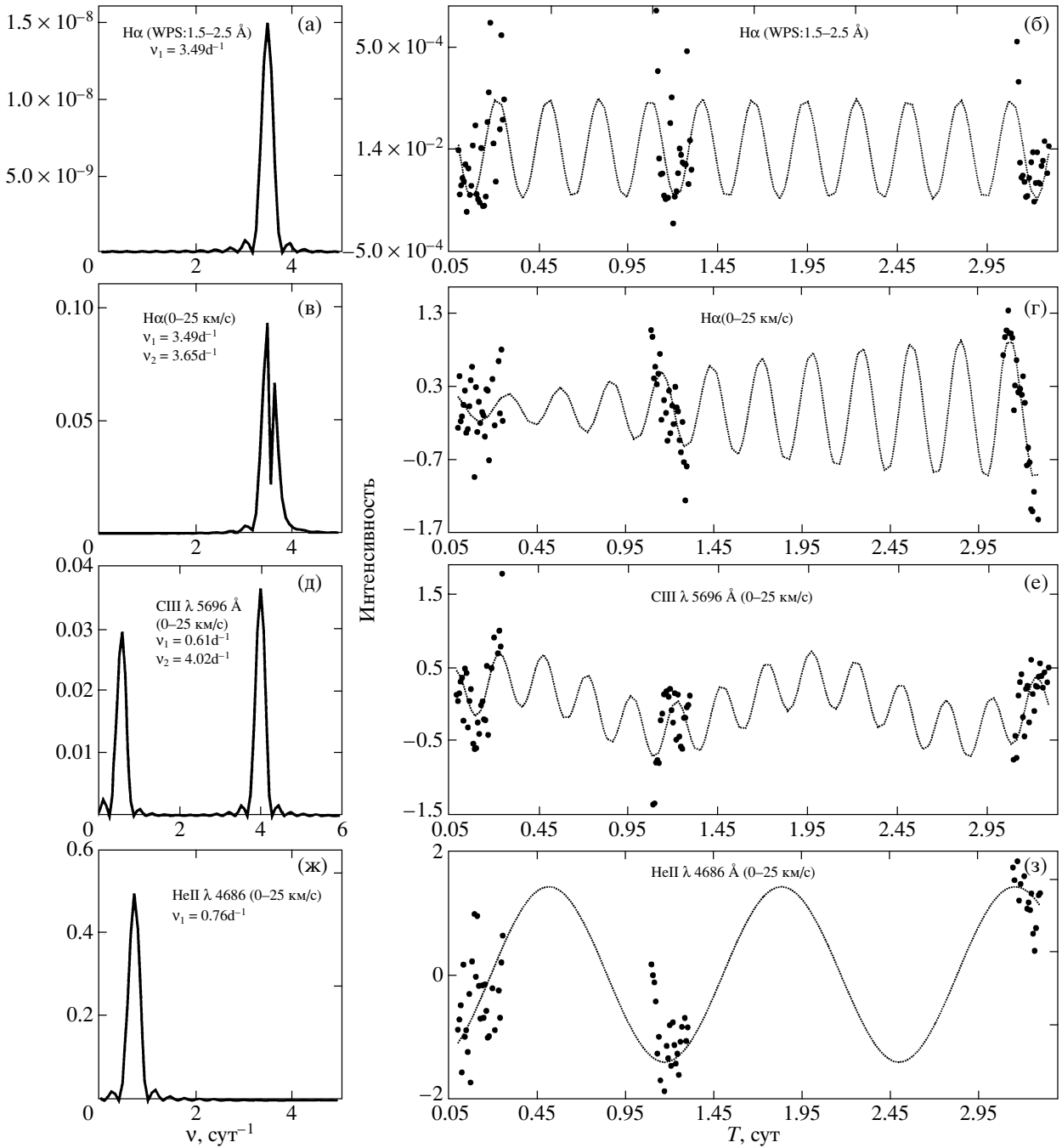


Рис. 5. (а) — Периодограмма временных изменений вейвлет-спектра мощности линии $H\alpha$ в спектре звезды λ Ori A в области 1.5–2.5 Å, определенная по всем спектрам, полученным с 30.11 по 3.12.2001; (б) — аппроксимация временной зависимости $E[S_1, S_2](t)$ для линии $H\alpha$; (в) — то же, что (а), но для временной зависимости отклонений профилей линии $H\alpha$ в области 25–50 км/с. Поток в континууме полагался равным 100. (г) — То же, что на рис. (б), но для вариаций профиля линии $H\alpha$; (д, е) — то же, что (в, г), но для линии $Si\ III\ \lambda\ 5696\ \text{Å}$; (ж, з) — то же, что (в, г), но для линии $He\ II\ \lambda\ 4686\ \text{Å}$.

что также может свидетельствовать о недостаточной достоверности определенных периодов. Следует заметить, что излучение в указанных линиях образуется в разных областях атмосферы звезды (Капер и др., 1997), поэтому различие характерных

времен изменений профилей может быть вполне реальным, хотя вопрос о периодичности изменений профиля остается пока открытым.

Проведенный нами анализ изменений вейвлет-спектра мощности опирается на предположе-

ние, что основной вклад в изменение функции $E[S_1, S_2](t)$ вносит один синусоидальный компонент. В случае сравнимых вкладов гармонических компонентов требуется использование более точных методов. По этой причине нами был выполнен фурье-анализ переменности профилей линий в спектре звезды λ Ori A, для которой получено наибольшее число (75) профилей. Использование для анализа всех наблюдаемых профилей за три дня наблюдений затрудняется наличием больших пропусков (18 и 42 часа) между сериями наблюдений, что приводит к сложной форме спектрального окна и требует очистки фурье-спектра от ложных пиков. Для выполнения данной процедуры использовался алгоритм CLEAN (Робертс и др., 1987) в модифицированном варианте, описанном Витязевым (2001). Для устранения ложных компонентов фурье-спектра, отбрасывались все пики с уровнем значимости меньше 0.99.

Квадрат модуля амплитуды фурье-преобразования (периодограмма) временного ряда $E[S_1, S_2](t)$ для линии $H\alpha$ представлен на рис. 5а. На периодограмме виден только один пик с частотой 3.49 d^{-1} , соответствующий периоду 6.9^{h} , близкому к обнаружимым с помощью элементарного анализа (см. рис. 4л, 4м). На рис. 5б иллюстрируется точность аппроксимации временного ряда найденным гармоническим компонентом.

Естественно предположить, что частоты периодических изменений крупномасштабных компонентов профилей линий должны быть получены и при анализе изменений непосредственно в самих профилях. Для проверки этого предположения был выполнен фурье-анализ вариаций профилей линий $H\alpha$, CIII $\lambda 5696 \text{ \AA}$ и HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$. Вариации профилей для каждой линии усреднялись в интервалах скоростей 25 км/с относительно лабораторных длины волн рассматриваемых линий.

Для иллюстрации полученных результатов на рис. 5в дан фурье-спектр временных изменений профилей линии $H\alpha$ в области скоростей $25\text{--}50 \text{ км/с}$. На рисунке мы видим два близких фурье компонента со сравнимыми амплитудами. На рис. 5г представлены временная зависимость отклонений профилей линии $H\alpha$ в указанном интервале скоростей и их аппроксимация на основании фурье-анализа профилей. Из рисунка видно, что наличие в фурье-спектре двух компонентов с близкими частотами может привести к значительным изменениям в амплитуде отклонения профиля линии от его среднего положения на промежутках $1\text{--}3 \text{ сут}$.

Похожие результаты получаются и из анализа профиля линии $H\alpha$ в других интервалах скоростей.

Отметим близость результатов фурье-анализа разностных спектров и вейвлет-спектра мощности в линии $H\alpha$.

В то же время фурье-анализ профилей линий HeI $\lambda 4714 \text{ \AA}$, HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ и CIII $\lambda 5696 \text{ \AA}$ показывает присутствие в фурье-спектрах большого набора частот, как уже обнаруженных при анализе линии $H\alpha$, так и других, что иллюстрируется на рис. 5д, 5ж.

Анализ изменений профилей линий

Описанный в предыдущем пункте фурье-анализ изменений профилей показывает возможное присутствие в фурье-спектре как высокочастотных, так и низкочастотных компонентов. Низкочастотные компоненты обнаружены в вариациях профилей линий HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ и CIII $\lambda 5696 \text{ \AA}$ (см. рис. 5ж, 5г), частоты этих компонентов соответствуют периодам $1^{\text{d}}3$ и $1^{\text{d}}6$ соответственно. Близкие к найденным для λ Ori периоды изменений профилей ($1\text{--}3^{\text{d}}$) регистрировались в фурье-спектрах вариаций профиля линии $H\alpha$ в спектрах звезд спектрального класса O ξ Per, 68 Cyg и λ Ser Капером и др. (1997).

По современным представлениям регулярные изменения профилей O-звезд с периодами несколько дней связываются с существованием в их атмосферах плотных струй вещества, соосно вращающихся со звездой на расстоянии нескольких десятков фотосферных радиусов (Капер и др., 1999; см., например, рис. 21 в указанной статье). Изменения профилей вызываются дополнительным поглощением излучения в частотах линий веществом струй при их попадании на луч зрения. Таким образом, период изменений профилей $P_n = P_{\text{rot}}/n$, где P_{rot} — период вращения звезды, а n — число струй в атмосфере.

Имеющиеся в литературе данные о переменности профилей в спектре самой звезды λ Ori весьма скудны. Наблюдения ее в УФ-области спектра с помощью спутника IUE (Капер и др., 1999) указывают на наличие периода повторяемости ДАК в резонансной линии SiIV $\lambda 1394, 1403 \text{ \AA}$ $P_{\text{rec}} = 5^{\text{d}}7$. Анализ изменений разностных профилей резонансных линий SiIV и NV $\lambda 1239, 11243 \text{ \AA}$ в области скоростей $1500\text{--}2000 \text{ км/с}$ указывает на их регулярные изменения с периодами $3^{\text{d}}4 \pm 0^{\text{d}}8$ и $4^{\text{d}}7 \pm 1^{\text{d}}4$ соответственно. В цитируемой работе отмечается, что найденные периоды не очень надежны в силу малой длительности периода наблюдений и обнаружения всего одного события появления ДАК за все время наблюдений.

В связи с этим можно сказать, что наличие в профилях линий в спектре λ Ogi регулярных изменений с периодами 1^d3-1^d6 не противоречит имеющейся информации об этой звезде. Тем не менее делать вывод об обнаружении таких периодов на основании проведенного нами анализа профилей было бы преждевременно. Согласно, например, Марченко и Моффату (1998) при наличии больших промежутков между сериями наблюдений даже выбор высокого уровня значимости не дает полной уверенности в реальности обнаруженных компонентов в фурье-спектре. В свете этих соображений обнаружение нами низкочастотных компонентов фурье-спектра с периодами 1^d3-1^d6 нуждается в дополнительном подтверждении и вопрос об их связи с вращательной модуляцией профилей пока остается открытым.

Наряду с низкочастотными компонентами в фурье-спектрах изменений профилей всех исследуемых линий видны и высокочастотные компоненты. Высокочастотные компоненты ($\nu = 2-8 \text{ d}^{-1}$) обычно связываются с нерадиальными фотосферными пульсациями (NRP). Наиболее удобной для обнаружения таких компонентов считается чисто фотосферная линия HeI $\lambda 4713 \text{ \AA}$. Проведенный нами анализ показал возможное присутствие в фурье-спектре вариаций профилей этой линии в спектре звезды λ Ogi компонента на частоте $\nu = 6.58 \text{ d}^{-1}$ ($P = 3.65^h$) в центре линии в области скоростей ($-25-100 \text{ км/с}$). В фиолетовой части профиля в области скоростей $-50- -25 \text{ км/с}$ обнаружен компонент $\nu = 4.39 \text{ d}^{-1}$ ($P = 5.47^h$). Такие же периоды обнаружены в фиолетовой части профиля линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$.

В свете сделанных нами выше замечаний мы не можем утверждать, что наличие нерадиальных фотосферных пульсаций доказано. Для подтверждения этого утверждения и отождествления в случае его справедливости найденных периодических компонентов с конкретными (l, m) модами NRP требуется детальное исследование изменений фаз этих компонентов вдоль профилей линий (см., например, Шридхверс и др., 1996).

В изменениях профилей линий в спектре звезды λ Ogi обнаружены и другие, кроме обсужденных выше, компоненты. В частности, неожиданным оказалось обнаружение короткопериодических изменений профилей вблизи центра эмиссионной линии CIII с частотой $\nu = 2.96 \text{ d}^{-1}$ ($P = 8.10^h$) при $V = -25-0 \text{ км/с}$ и $\nu = 4.02 \text{ d}^{-1}$ ($P = 5.96^h$) при $V = 0-25 \text{ км/с}$ (см. рис. 5д).

Детальный анализ таких изменений предполагается выполнить в отдельной публикации. Отметим, что для более надежного определения характера

периодичности профилей линий исследуемых звезд требуется получение их спектров с большим временным разрешением и существенно большим отношением сигнал/шум, что планируется выполнить на 6-м телескопе САО в 2002 г.

1. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена программа поиска и анализа переменностей профилей в спектрах ярких сверхгигантов спектрального класса O с высоким и временным и спектральным разрешениями. На основании проведенных наблюдений и их анализа можно сделать следующие выводы.

1. Все исследуемые звезды имеют переменные профили линий водорода, HeI и HeII, CIII и других ионов.

2. Впервые обнаружена переменность профилей линий $\text{H}\alpha$ и CIII $\lambda 5696 \text{ \AA}$ в спектре звезды λ Ogi A на уровне 2% от уровня континуума на масштабах $2-4 \text{ \AA}$ ($100-200 \text{ км/с}$).

3. Найдена переменность вейвлет-спектров мощности разностных профилей линий в спектрах звезды λ Ogi A на малых масштабах: $0.2-0.3 \text{ \AA}$ ($10-15 \text{ км/с}$), что может свидетельствовать о присутствии мелкомасштабных возмущений в атмосфере звезды.

4. Надежных свидетельств периодичности изменений профилей линий пока не найдено, хотя проведенный в статье анализ таких изменений не противоречит гипотезе о возможности существования регулярных компонентов вариаций профилей.

Авторы выражают признательность В.В. Витязеву за замечания, способствовавшие улучшению текста статьи, и предоставление программы, реализующей алгоритм CLEAN, а также А.Б. Шнейвайсу за помощь в расчетах. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 01-02-16858) и федеральной программой "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" (проект "Исследования механизмов генерации энергии в астрофизических объектах и поведения вещества в экстремальных условиях").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антохин И.И., Холтыгин А.Ф., Черепашук А.М., Астрон. журн. **65**, 558 (1988).
2. Антохин И.И., Нугис Т., Черепашук А.М., Астрон. журн. **69**, 516 (1992).
3. Брандт З., *Статистические методы анализа наблюдений* (М.: Мир, 1975), с. 87.
4. Вилсон (R. F. Wilson), III/21 General Catalogue of Stellar Radial Velocity, Carnegie Institution of Washington Publ. 601 (Washington D. C., 1953).

5. Витязев В.В., *Анализ неравномерных временных рядов* (СПб.: Изд. СПбГУ, 2001).
6. Де Йонг и др. (J. A. de Jong, H. F. Henrichs, S. Schrijvers, *et al.*), *Astron. Astroph.* **345**, 172 (1999).
7. Де Йонг и др. (J. A. de Jong, H. F. Henrichs, L. Kaper, *et al.*), *Astron. Astroph.* **368**, 601 (2001).
8. Де Йонг и др. (J. A. de Jong, H. F. Henrichs, L. Kaper, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **368**, 601 (2001).
9. Добеши И., *Десять лекций по вейвлетам* (М.: 2001).
10. Донати и др. (J.-F. Donati, G. A. Wade, J. Babel, *et al.*), *MNRAS* **326**, 1265 (2001).
11. Кан и др. (S. M. Kahn *et al.*), *Astron. Astrophys.* **365**, 365 (2001).
12. Капер и др. (L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **327**, 281 (1997).
13. Капер и др. (L. Kaper, H. F. Henrichs, J. S. Nichols, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **344**, 231 (1999).
14. Конти и др. (P. S. Conti, E. S. Leep, J. J. Lorre), *Astroph. J.* **214**, 759 (1977).
15. Кудряшова Н.А., Холтыгин А.Ф., *Астрон. журн.* **78**, 333 (2001).
16. Лепин, Моффат (S. Lépine and A. F. J. Moffat), *Astrophys. J.* **514**, 909 (1999).
17. Лепин и др. (S. Lépine, A. F. J. Moffat, and R. N. Henriksen), *Astrophys. J.* **466**, 392 (1996).
18. Марченко, Моффат, *Astrophys. J.* **499**, L195 (1998).
19. Мусаев Ф.А., *Письма в Астрон. журн.* **22**, 715 (1996).
20. Овоки (S. P. Owocki), *Interstellar Turbulence, Proc. 2nd Guillermo Haro Conf.* (Ed. J. Franco and A. Carriaminana), Cambridge: Cambridge Univ. Press., 1998), p. 350.
21. Робертс и др. (D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher), *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
22. Фуллертон и др. (A. W. Fullerton, D. R. Gies, and C. T. Bolton), *Astroph. J. Suppl. Ser.* **103**, 475 (1996).
23. Ховарт и др. (I. D. Howarth, K. W. Siebert, G. A. J. Hussain, and R. K. Prinja), *MNRAS* **284**, 265 (1997).
24. Холтыгин (A. F. Kholtygin), *Wolf-Rayet stars: binaries, colliding winds, evolution, IAU Symp. 163* (Ed. K. A. van DerHucht and P. M. Williams, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1995), p. 160.
25. Холтыгин А.Ф., *Всероссийская астрономическая конференция (6–12 августа 2001 г.), Тезисы докладов*, СПб, 2001, с. 186.
26. Холтыгин и др. (A. F. Kholtygin, F. V. Kostenko, N. A. Kudryashova, and L. M. Oskinova), *ASP Conf. Ser.* **204**, 227 (2000).
27. Холтыгин и др. (A. F. Kholtygin, J. C. Brown, J. P. Cassinelli, *et al.*), *Astron. Astrophys. Trans.* 2002 (in press).
28. Шергин и др. (V. S. Shergin, A. Yu. Kniazev, and V. A. Lipovetsky), *Astron. Nachr.* **317**, 95 (1996).
29. Шриджверс и др. (C. Schrijvers, J. H. Telting, C. Aerts, *et al.*) *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **121**, 343 (1997).
30. Эверсберг и др. (T. Eversberg, S. Lépine, A. F. J. Moffat), *Astrophys. J.* **494**, 799 (1998).