

УДК 524.31.01-852/56

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ АТМОСФЕРЫ СВЕРХГИГАНТА 55 Cyg. I. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ СО ВРЕМЕНЕМ

© 2012 А. Х. Рзаев*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 11 марта 2012 г.; принята в печать 19 апреля 2012 г.

По ПЗС-спектрам, полученным на эшелле-спектрографах 2-м телескопа ШАО НАН Азербайджана и 1-м телескопа САО РАН, исследованы изменения профилей линий в спектре горячего сверхгиганта 55 Cyg. Показано, что переменность лучевой скорости и профилей линий тяжелых элементов вызвана движениями типа радиальной пульсации. Для линий He I эти переменности обусловлены нерадиальными пульсациями. В случае линий H β и H α картина и характер переменности различаются для разных периодов наблюдений. В основном переменность этих линий вызвана фотометрической и позиционной переменностью абсорбционного и эмиссионного компонентов профилей. На профилях этих линий наблюдаются дополнительные эмиссионные компоненты, которые двигаются от их синего к красному крылу, что свидетельствует о клочковатой структуре оболочки звезды.

Ключевые слова: *звезды: сверхгиганты—звезды: индивидуальные: 55 Cyg—звезды: осциллирующие*

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большую яркость ($V = 4^m 81$ [1]) сверхгигант 55 Cyg (HD 198478, B2.5, Ia) спектроскопически исследован очень мало. Более того, эти исследования были выполнены фотографическим методом и почти все они носят информативный характер. Underhill [2] отмечала, что средняя скорость по сильным линиям составляет около -8.2 км/с, а амплитуда переменности доходит до 30.0 км/с. P Cyg-профиль линии H α очень переменный, лучевая скорость абсорбционного компонента около -200 км/с. Hatchings [3] отмечал, что лучевые скорости по линиям He I $\lambda 6678, 5876 +$ соответственно составляли около -5.0 и -12 км/с. По другим линиям He I, а также линиям O II и N II была получена средняя скорость около -20 км/с, а по высоким членам бальмеровской серии водорода около -29 км/с. Линия H α показывала прямой P Cyg-профиль, лучевые скорости эмиссионного и абсорбционного компонентов соответственно были около 36.0 и -88.0 км/с.

В работах Granès и Herman [4] и Granès [5] были исследованы переменность лучевой скорости и профилей линий со временем в синей области ($\lambda 3600-5000 +$) и переменность профиля линии

H α . Картины переменности лучевой скорости линий H β , H γ , H δ были одинаковыми, а амплитуды переменности различались для двух (1970 и 1971 гг.) сезонов и составляли $55, 32, 17$ км/с [4] и $85, 46, 36$ км/с [5] соответственно для линий H β , H γ , H δ . Была также исследована переменность лучевых скоростей со временем по линиям He I $\lambda 3964, 4026, 4471, 4922 +$, Mg II $\lambda 4481 +$ и Si III $\lambda 4552 +$. Картина переменности лучевой скорости напоминала движение типа пульсаций, существующее в атмосфере этой звезды. Характерное время переменности составляло около 5.0 дней. Линия H α показывала почти все сложные формы P Cyg-профиля [6]. В течение наблюдательного периода изменялись интенсивность абсорбционного и эмиссионного компонентов, а также их положение. Корреляция между изменениями лучевой скорости исследованных линий и переменностью профиля H α не была обнаружена.

Отличия от спектроскопических, фотометрические исследования звезды 55 Cyg проводились более систематически. В [7] по наблюдениям, проведенным в 1970 и 1971 гг. в полосах *UBV*, отмечена переменность $0^m 05$ величины.

В работе [8] по результатам женеvской фотометрии этот сверхгигант был включен в список микропеременных звезд. В [9] по наблюдениям в 1979 г. в *V* фильтре была получена переменность $\Delta V \sim 0^m 05$ величины. А по наблюдениям в 1980 г.

*E-mail: abid@sao.ru

в стандартных Strömgen *wavy* фильтрах амплитуда переменности была значительно меньше. Характерное время переменности, полученное автокорреляционным анализом было около 8 дней. На периодограмме также были заметны интенсивные пики около 5 и 10 дней.

По наблюдениям в течение 85 дней в 1986 г. и 28 дней в 1987 г. была исследована переменность в полосах *B* и *V* [10]. Получено характерное время переменности около месяца, на которую, возможно, налагается переменность продолжительностью около недели. Кратковременные изменения блеска не были обнаружены. Авторы связывали эту переменность с процессами, происходящими в околозвездном пространстве или в оболочке звезды. А по наблюдениям, проведенным в 1988 и 1989 гг. в *BV* фильтрах только по данным за 1989 г. была обнаружена переменность в *V* фильтре величиной около 0^m05 [11].

В работе [12] отмечается, что по данным *UBV* фотометрии в 1986, 1988 и 1989 гг. наблюдается изменение около $0^m1 \pm 0^m02$ с возможным псевдопериодом около 45^d0 . По данным Hipparcos была найдена переменность с периодом около $P = 4^d885$ с амплитудой 0^m053 [13].

Звезда 55 Cyg также является объектом для изучения межзвездной среды. В спектре этой звезды в диапазоне $4500 \leq \lambda \leq 7000 \text{ \AA}$ наблюдается более 20 диффузных межзвездных полос (далее DIB) [14]. Были измерены центральные интенсивности r_0 и лучевые скорости по 20 DIB. Для DIB $\lambda 5780, 5797 \text{ \AA}$ эти величины, соответственно, составляют около 0.87, -14.0 км/с и 0.9, -13.0 км/с . В работе [15] в спектре 55 Cyg только для области $6400 \leq \lambda \leq 6470 \text{ \AA}$ отмечено 18 DIB. В работе [16] для 117 OB-звезд были исследованы атомарные межзвездные линии KI ($\lambda 7665, 7699 \text{ \AA}$), Na I (D_1, D_2), Ca II (H, K), Ca I ($\lambda 4227 \text{ \AA}$), молекулярные структуры CH, CH^+ , CN и две DIB ($\lambda 5780, 5797 \text{ \AA}$). В [17] была исследована межзвездная линия Li I $\lambda 6708 \text{ \AA}$. В спектре 55 Cyg для лучевых скоростей межзвездных линий, DIB и атомарных полос, соответственно, были получены величины около $-12.1 \pm 0.6, -13.0 \pm 0.6$ и $-14.5 \pm 0.5 \text{ км/с}$.

Hsu и Breger [18] показали, что у 55 Cyg наблюдаются переменная поляризация. Далее в 1986 г. Viraghalmi [19] подтвердил эти результаты. Все это свидетельствовало о том, что 55 Cyg имеет околозвездную оболочку. В [20] отмечено, что возможно 55 Cyg имеет диск.

Впервые для этой звезды попытка подогнать расчетные профили линий под наблюдаемые с помощью простой модели атмосферы была сделана

в 1956 г. Аллером [21]. Определения фундаментальных параметров, а также распространенности химических элементов с помощью не-ЛТР модели атмосферы были сделаны в работах [1, 22–25]. В последних двух работах были использованы ПЗС-эшелле-спектры.

В настоящей статье по куде-эшелле-спектрам, полученным в 1999, 2000 и 2010 гг. на 2-м телескопе ШАО НАН Азербайджана и 1-м телескопе САО РАН, исследована переменность лучевой скорости и профилей линий в спектре 55 Cyg.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились на 2-м телескопе ШАО на эшелле-спектрографе SEG5. Спектрограф оснащен матрицей 580×530 элементов, разрешение $R \sim 36\,000$ [26]. Наклон решетки выбирался таким образом, что в кадр попадал спектральный диапазон $\lambda 4340\text{--}7000 \text{ \AA}$ и одной экспозицией можно было фиксировать линии $H\alpha$ и $H\beta$ [27]. В 1999 г. с 07.09 по 16.10 были получены 16, а в 2000 г. с 18.07 по 27.08 — 18 спектров (по два спектра в каждую ночь). Отношение сигнал/шум отличалось для разных участков спектра и, соответственно, составляло $120 \leq S/N \leq 170$, $100 \leq S/N \leq 120$, $50 \leq S/N \leq 70$ для областей $H\alpha$, $H\beta$ и $Mg II \lambda 4481 \text{ \AA}$. Общее количество наблюдательных ночей в течение двух лет составило 17 — 8 и 9 ночей (точек) в 1999 и 2000 гг. соответственно.

С помощью куде-эшелле-спектрографа 1-м телескопа САО РАН 26.08, 16.09, 17.09, 21.09 и 24.09.2010 г. были получены 15 спектров (по три спектра в каждую ночь) с матрицей CRYOCAM 2032×2032 элемента, размер пикселя 13 мкм. Регистрируемый спектральный диапазон $\lambda 3700\text{--}11\,000 \text{ \AA}$ с небольшими пропусками между порядками. Для выигрыша в экспозиции мы выбрали ширину щели до $\delta s = 4$ пикселя, что давало разрешение $R \sim 30\,000$. Отношение сигнал/шум для разных участков спектра составляло $350 \leq S/N \leq 500$, $250 \leq S/N \leq 350$, $200 \leq S/N \leq 250$ для областей $H\alpha$, $H\beta$ и $Mg II \lambda 4481 \text{ \AA}$. В течение одной ночи в пределах ошибок измерений переменность фотометрических и позиционных характеристик линий не обнаружена. Поэтому спектры, полученные в течение одной ночи, усреднены.

Обработка эшелле-спектров (вычитание темного кадра, учет рассеянного света, учет попиксельной неоднородности и т.д.) выполнена с использованием системы ESO MIDAS и пакета программ DECH95 [28]. Особенности обработки куде-эшелле-спектров 2-м телескопа ШАО, а также результаты исследования точности фотометрических

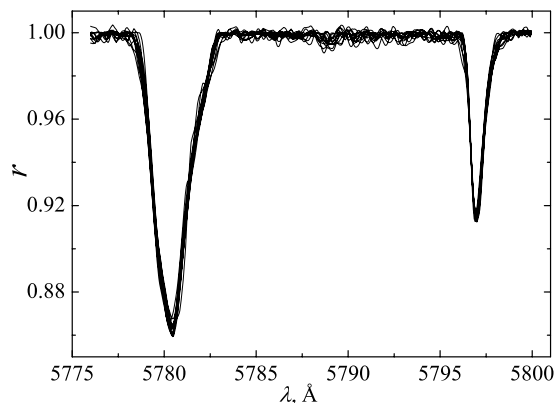


Рис. 1. Профили DIB λ 5780, 5797 Å в спектре 55 Cyg, полученные за период 07.09–16.10.1999 и 18.07–27.08.2000 гг.

и позиционных измерений линий, можно найти в работах [27, 29].

Для уменьшения шумов и увеличения точности фотометрических и позиционных измерений мы применили процедуру сглаживания спектра. Пакет программ DECH20 предусматривает три варианта сглаживания. Мы воспользовались наиболее эффективным в данном случае способом — методом гауссианы. Полуширина гауссианы (FWHM), с которой сворачивался спектр, определялась по ширине инструментального контура. Для наших спектров она составляет в среднем 0.2 \AA . Этот прием позволяет понизить влияние шума практически без потери спектрального разрешения. После выполнения вышеперечисленных процедур для эквивалентных ширин и остаточных интенсивностей DIB λ 5780, 5797 Å и ошибок их измерения были получены соответственно $W = 0.298 \pm 0.005 \text{ \AA}$, $r_0 = 0.862 \pm 0.003$ и $0.08 \pm 0.003 \text{ \AA}$, 0.914 ± 0.002 , что хорошо согласуется с результатами из [14]. Максимальные отклонения от среднего для эквивалентной ширины и остаточной интенсивности не превышают $\pm 0.015 \text{ \AA}$ и ± 0.005 соответственно. Профили этих DIB, полученные в куде-спектрографе ШАО НАН, приведены на Рис. 1.

Контроль систематических ошибок измерений лучевых скоростей осуществлялся по измерениям положения теллурических линий H_2O . Среднеквадратичное отклонение от среднего, найденное по 40 теллурическим линиям, составляет $-0.3 \pm 0.5 \text{ км/с}$. А по трем DIB λ 5780, 5797, 6660 Å среднеквадратичное отклонение от среднего, найденное по всем полученным спектрам, составляет $-12.5 \pm 1.5 \text{ км/с}$.

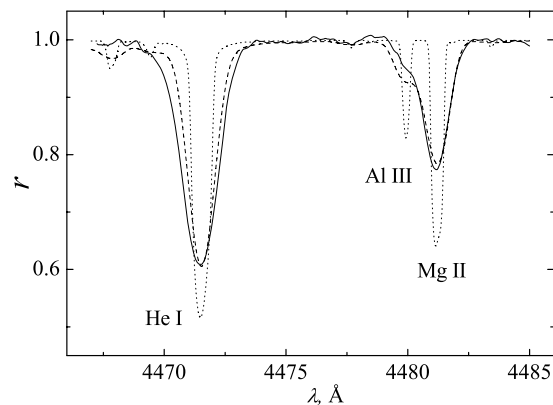


Рис. 2. Спектры 55 Cyg. Пунктирная линия — неуширенный расчетный спектр. Штриховая линия — расчетный спектр, уширенный за счет вращения звезды. Сплошная линия — наблюдаемый спектр.

3. ПЕРЕМЕННОСТЬ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ И ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

На наших спектрах в диапазоне λ 4340–6700 Å наблюдается около 80 звездных линий. У большинства линий, не считая He I и водорода, центральные интенсивности слабые: $r_0 \geq 0.9$, т. е. центральные глубины линий $R_0 = 1 - r_0 \leq 0.1$ (см. также работы [14, 30]). Измерение лучевых скоростей показало, что их разброс для разных групп линий существенный. Это связано как с эффективной длиной волны линии (для блендированных линий), так и малой величиной их интенсивности. У наиболее сильных линий Mg II λ 4481 Å и C II λ 6578, 6582 Å центральные интенсивности r_0 доходят до 0.73 и 0.78, соответственно. Для линий средней интенсивности эта величина находится в интервале $0.88 \leq r_0 \leq 0.83$. С целью отбора линий для исследования (неблендированные с $R_0 > 0.1$) был рассчитан синтетический спектр. Расчеты были сделаны с применением программного комплекса СПЕКТР [31] в ЛТР приближении. Эволюционные параметры и химический состав атмосферы были взяты из работы [25]: $T_{\text{eff}} = 17500$, $\log g = 2.25$, $v \sin i = 61 \text{ км/с}$, $v_{\text{mic}} = 8 \text{ км/с}$. Расчеты показали, что наблюдаемые интенсивности линий имеют хорошее согласие с расчетными при увеличении содержания соответствующих тяжелых элементов на 0.3 dex. Поэтому для расчета была использована модель атмосферы Castelli и Kurucz (2004) [32] с $\Delta[X/H] = 0.3 \text{ dex}$. Сопоставление расчетных и наблюдаемых профилей линий для некоторых областей спектра показано на Рис. 2 и 3. В случае линии He I (см. Рис. 2, He I λ 4471 Å) расчетные профили плохо согласуются с наблюдаемыми. Возможно это свидетельствует о том, что не-ЛТР эффекты для этих линий существенны.

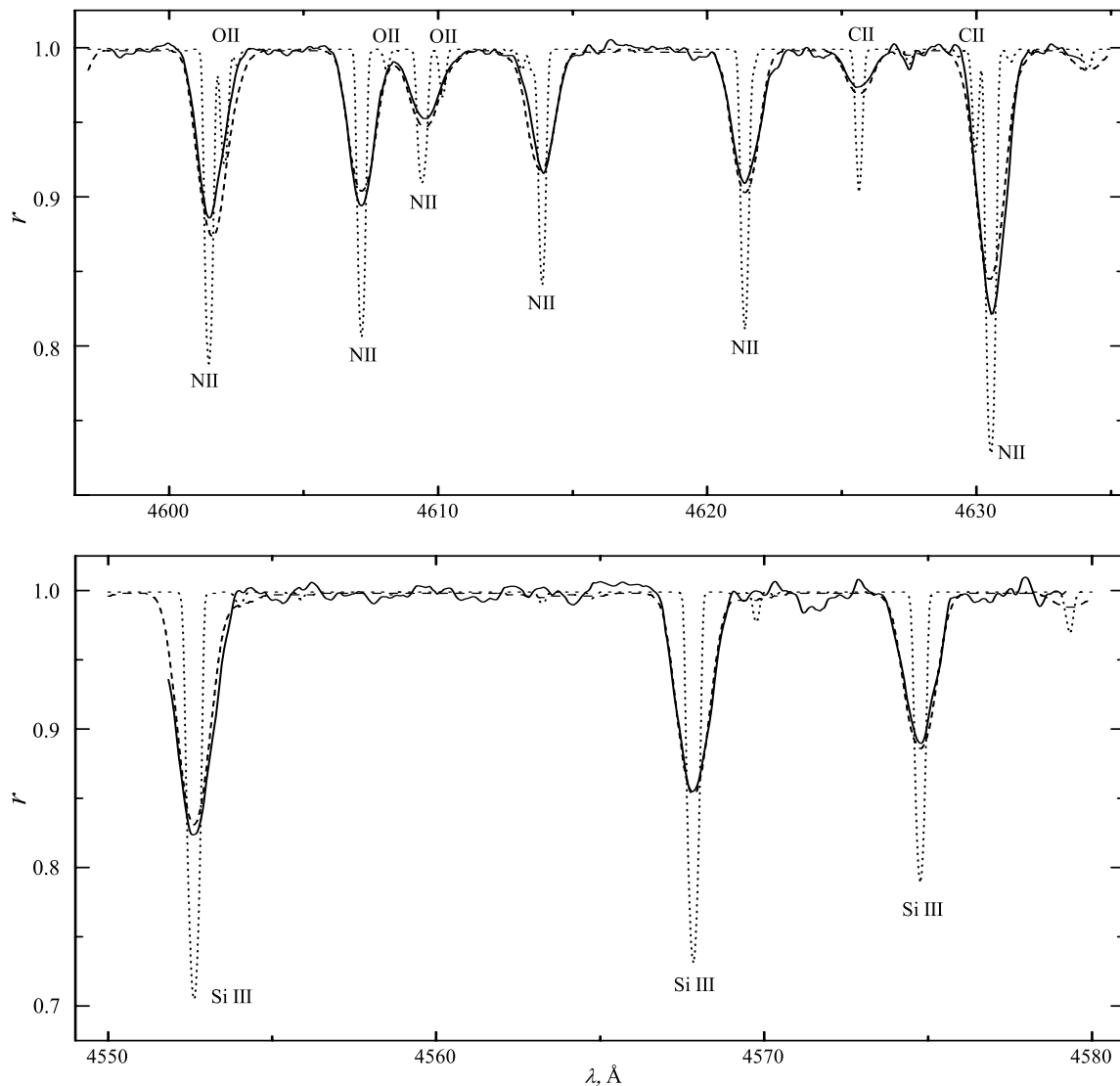


Рис. 3. То же самое, что и на Рис. 2, для других диапазонов длин волн.

Для исследования переменности лучевой скорости по вышеотмеченным критериям были отобраны линии тяжелых элементов C II λ 6582, 6578 Å, N II λ 5710, 5666, 5045, 5005, 4630, 4607, 4601 Å, Si III λ 4674, 4567, 4552 Å, Al III λ 5696 Å, Mg II λ 4481 Å, He I λ 6678, 5876, 5015, 4713, 4471 Å и линии H α и H β . Расчетные спектры показали, что эффективные длины волн линий хорошо согласуются с таковыми из работы [14]. Для улучшения точности измерений, лучевые скорости линий были измерены по методике, описанной в работе [33], т.е. отдельно для синей и красной половин контура абсорбции и на нескольких уровнях остаточной интенсивности линии. Далее полученные величины лучевой скорости усреднялись. Наши измерения показали, что иногда величины лучевой скорости по линиям C II λ 6578, 6582 Å

отличаются от величин по другим линиям тяжелых элементов, а лучевая скорость по He I λ 5876 Å отличается от лучевых скоростей по другим линиям He I. Примеры переменности лучевой скорости для упомянутых линий приведены на Рис. 4.

В работе [5] в разные моменты наблюдений для всех исследованных линий: водорода H β , H γ , H δ , He I и тяжелых элементов были получены положительные величины лучевой скорости. Аналогичный результат получен в [1] по линиям кремния: примерно +8.0 км/с. По нашим спектрам положительные величины скоростей не были зафиксированы. Поэтому для лучевой скорости центра массы звезды была принята величина -7.0 км/с, приведенная в базе данных SIMBAD. На Рис. 4 она отмечена пунктирной горизонтальной линией. Как видно из Рис. 4, переменность лучевой

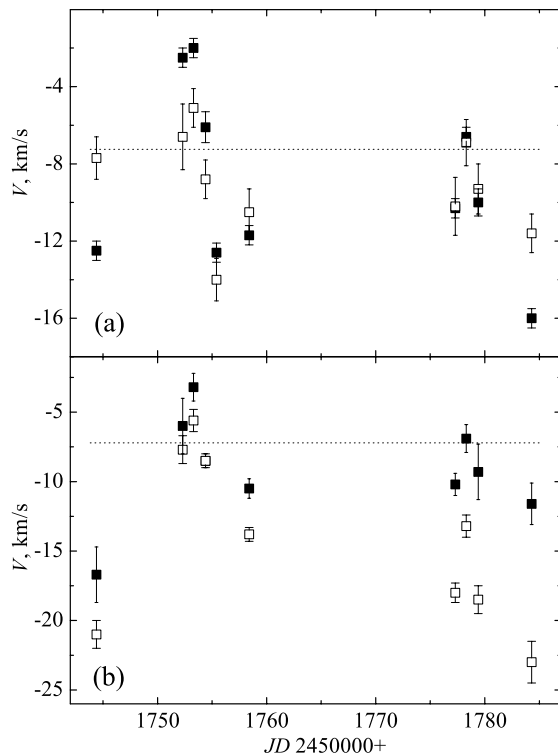


Рис. 4. Переменность лучевой скорости со временем: (а) для линий С II λ 6578, 6582 Å (темные квадратики) и для остальных линий тяжелых элементов, отмеченных в разделе 3 (светлые квадратики); (б) для линии He I λ 5876 Å (темные квадратики) и для остальных линий He I (светлые квадратики). Горизонтальной пунктирной линией отмечена лучевая скорость центра массы звезды.

скорости со временем напоминает колебательное движение относительно лучевой скорости центра массы звезды.

В работе Рзаева и др. [34] было показано, что для определения типа переменности (радиальный или нерадиальный) необходимо исследовать переменность профилей относительно их среднего на плоскости (V, r). Такие картины на примере линий С II λ 6578 Å и He I λ 6678 Å для некоторых дат представлены на Рис. 5 и 6. На верхних панелях для линии С II λ 6578 Å приведены четыре, а для He I λ 6678 Å — семь профилей, которые наглядно демонстрируют характерные изменения (смещений) со временем для синей и красной половин контура абсорбции. Также для наглядности на нижних панелях Рис. 6 приведен пример для двух профилей. Переменность остальных профилей относительно их среднего аналогична. На левых частях Рис. 5 и 6 оси специально размечены в обратном порядке, чтобы синяя половина профиля абсорбции выглядела в привычном нам виде, т.е.

как в случае профиля, записанного в (r, V) плоскости.

Наблюдаемые и расчетный профиль линии H β представлены на Рис. 7а. Расчетный профиль был получен при не-ЛТР приближениях. Отметим, что профили не-ЛТР и ЛТР приближений существенно не отличались друг от друга. Для сопоставления наблюдаемых профилей с расчетным, последний был сдвинут на -20.0 км/с, т.е. на среднюю величину лучевой скорости, полученную по всему материалу. Далее профили, мало отличающиеся по фотометрическим и позиционным параметрам, были усреднены. Полученные образцы профилей представлены на Рис. 7б, их переменность относительно расчетного представлена на Рис. 7с. На нем цифрами указаны даты полученных и усредненных профилей. Картины переменности профиля линии во временном интервале от одного до нескольких дней представлены на Рис. 8, для периода наблюдений 07.09–18.09.1999 г.

Сопоставление полученных профилей, их фотометрических и позиционных параметров показало, что у линии H β со временем в значительной степени меняется и лучевая скорость, и центральная интенсивность абсорбционного компонента. Картины возможных взаимосвязей между этими переменностями представлены на Рис. 9.

В случае линии H α устранение влияния теллурических линий, искажающих ее профиль, было осуществлено по методике описанной в [35]. Полученные таким образом профили линии H α представлены на Рис. 10а. Профили линии H α , полученные в течение ночи (с интервалом от 30 минут до 2 часов) не показывают значительной переменности и были усреднены. А профили, полученные через сутки, показывают существенные изменения, и в разные периоды наблюдений картина и характер этих изменений различаются. Как и в случае линии H β , переменность полученных профилей линии H α была исследована относительно теоретического профиля, который был рассчитан при не-ЛТР приближении. Расчетный абсорбционный профиль “фотосферного происхождения” представлен пунктирной линией, которая сдвинута на -30.0 км/с (Рис. 10а). Переменность профилей линии H α для разных периодов наблюдений представлена на Рис. 10–14.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

1. *Линии тяжелых элементов* исследованы и представлены на примере С II λ 6582 Å. Рис. 5 показывает, что переменность синей и красной половин контура абсорбции относительно их среднего в пределах ошибок измерений одинакова на

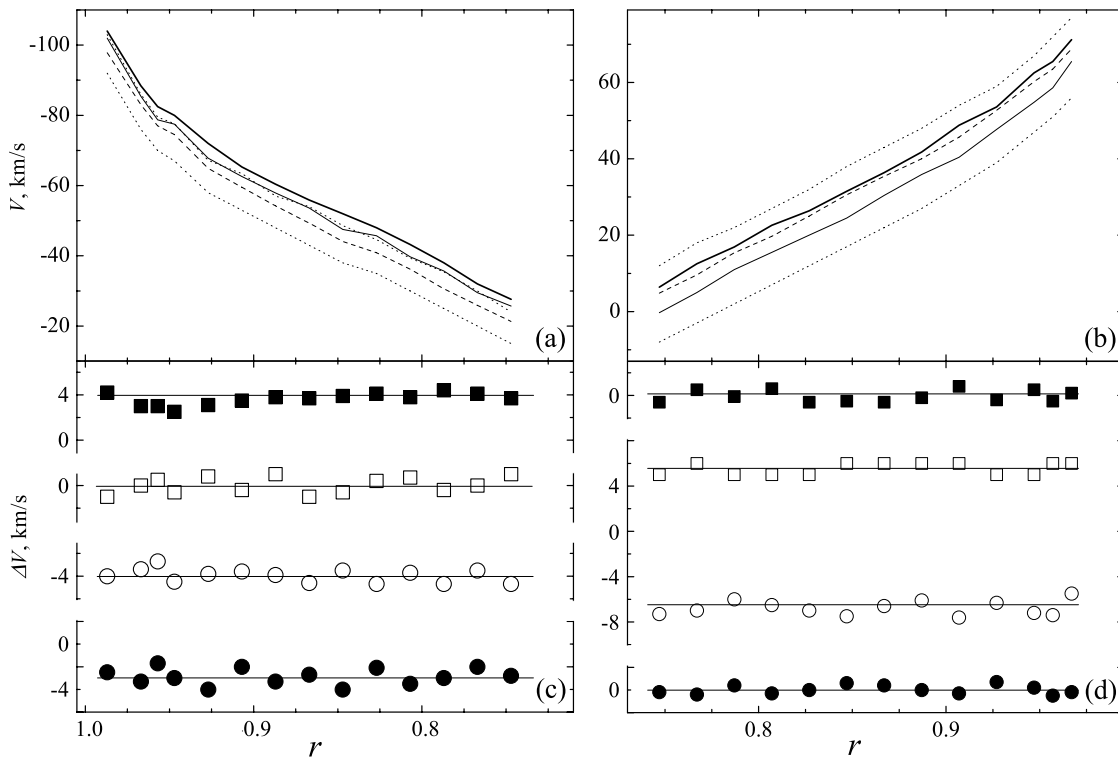


Рис. 5. (а) и (b) профили соответственно синей и красной половины абсорбции линии С II λ 6578, построенные на (V, r) -плоскости. Пунктирные, сдвинутые вниз, линии — средний профиль синих и красных половин абсорбции, полученный по всем наблюдаемым профилям этой линии. (с) и (d) примеры переменности профилей соответственно синей и красной половины абсорбции С II λ 6578 относительно их среднего профиля. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений лучевой скорости.

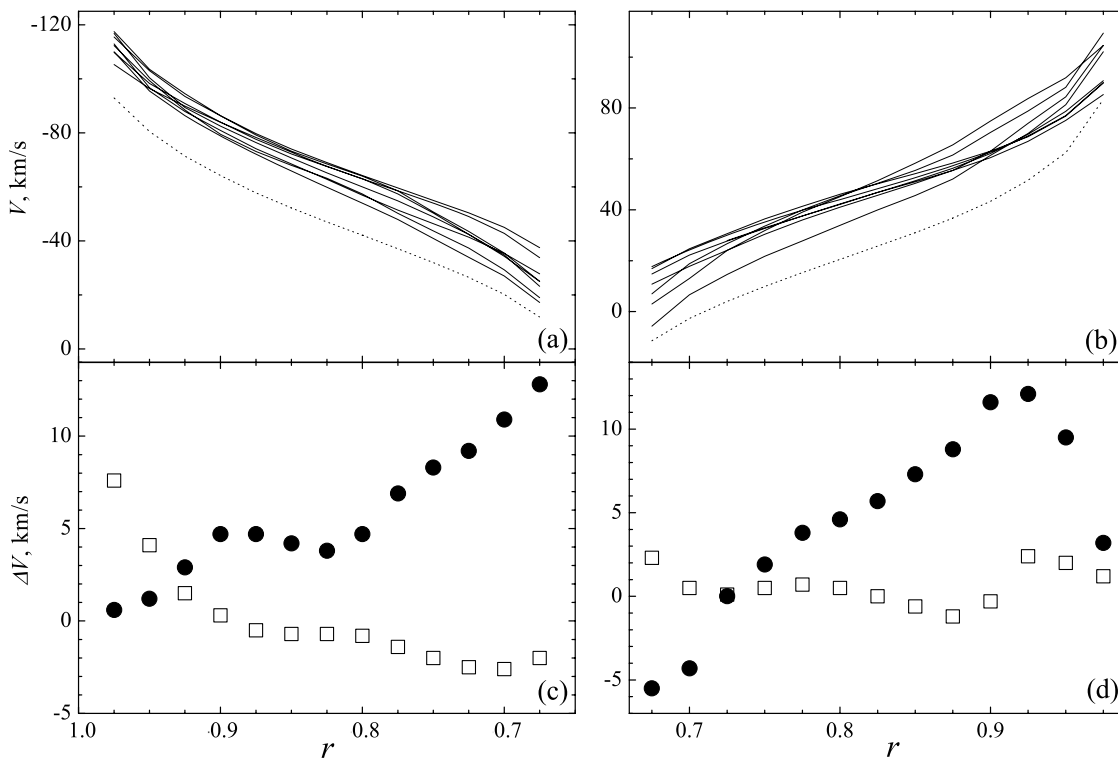


Рис. 6. То же самое, что и на Рис. 5, для линии He I λ 6678 для двух дат наблюдений: 09.09.99 (квадратики) и 11.09.99 (кружки).

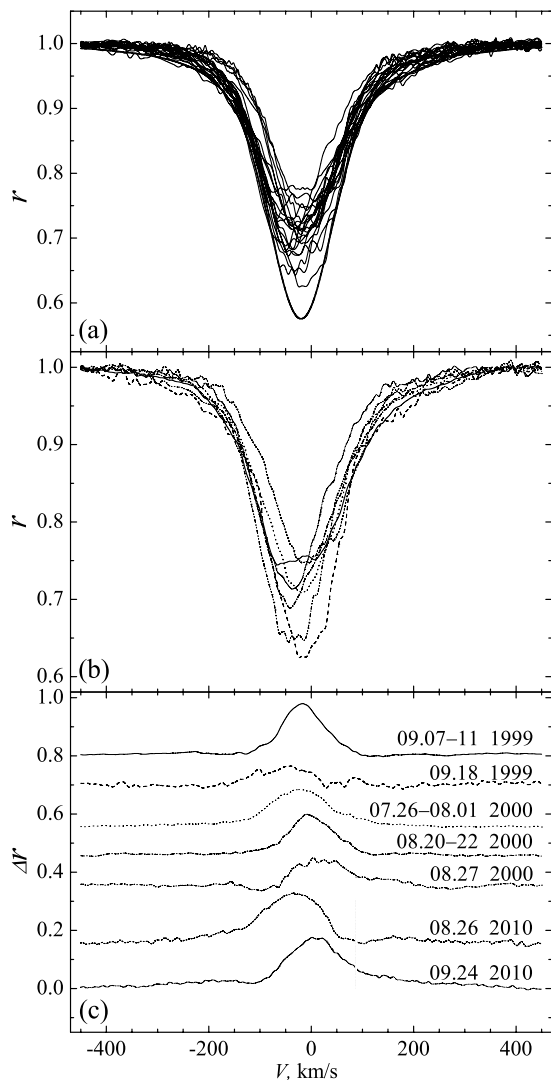


Рис. 7. (а) Расчетный (жирная) и наблюдаемые профили линии $H\beta$. (б) Характерные образцы профилей, полученные усреднением похожих профилей из Рис. 7а. (с) Переменность профилей линий из Рис. 7б относительно расчетного. Цифрами указаны даты полученных и усредненных профилей.

всех уровнях интенсивности. Мы наблюдаем параллельные смещения этих контуров относительно их среднего, а также друг относительно друга. Это свидетельствует о том, что эти переменности обусловлены радиальными движениями слоев атмосферы, где формируется линия. Переменности профилей линий других тяжелых элементов аналогичны.

2. *Линии He I* представлены на примере линии $He I \lambda 6678 \text{ \AA}$. Рис. 6 показывает, что в случае линий He I переменность синей и красной половин контура абсорбции относительно их среднего различается. Во-первых, эта переменность различается для разных уровней интенсивности линии.

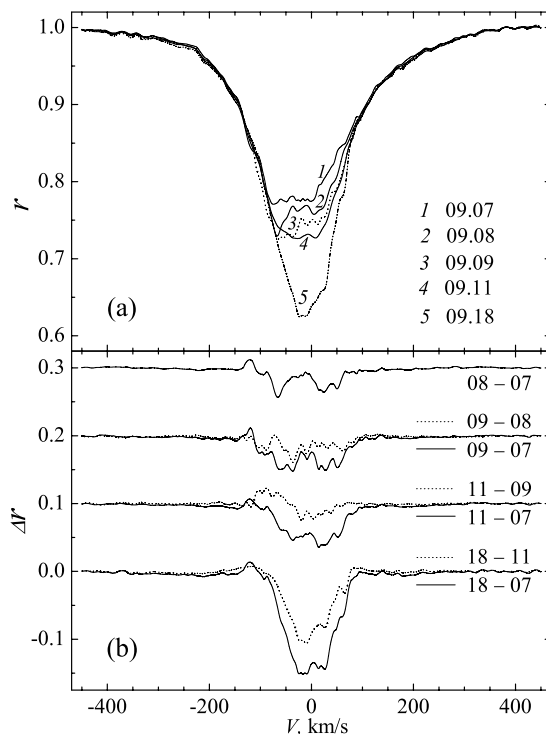


Рис. 8. (а) Наблюдаемые профили линии $H\beta$, полученные в период 07–18.09.99. Номера профилей и дата их получения (месяц и ночь) указаны цифрами. (б) Переменность профилей на Рис. 8а относительно профиля 1 (сплошные) и относительно предыдущего по дате (пунктирная линия). Числа справа обозначают даты наблюдений (вторые числа в строчке соответствуют вычитаемому профилю).

Во-вторых, она различается для синей и красной половин контура абсорбции. Как было сказано в работе [34], такая переменность обусловлена нерадиальными пульсациями.

3. *Линия H β* всегда наблюдалась в абсорбции. Как видно из Рис. 7а, расчетный профиль линии $H\beta$ интенсивнее, чем наблюдаемый. Это указывает на то, что профиль состоит из абсорбционного компонента, на который накладывается эмиссия. Рис. 7с показывает, что со временем наблюдается перемещение эмиссионного компонента по профилю линии.

По нашим наблюдениям лучевая скорость абсорбционного компонента этой линии меняется в пределах от -0.3 (26.08.2010 г.) до -43.0 км/с (24.09.2010 г.). Со временем также значительно меняется и центральная интенсивность от $r_0 = 0.78$ (07.09.1999 г.) до 0.63 (18.09.1999 г.). Наши исследования показали, что изменение положения эмиссионного компонента (Рис. 7с) в основном связано с дифференциальным сдвигом абсорбционного компонента линии $H\beta$ относительно расчетного профиля. Но корреляция между изменением интенсивности абсорбционного компонента и

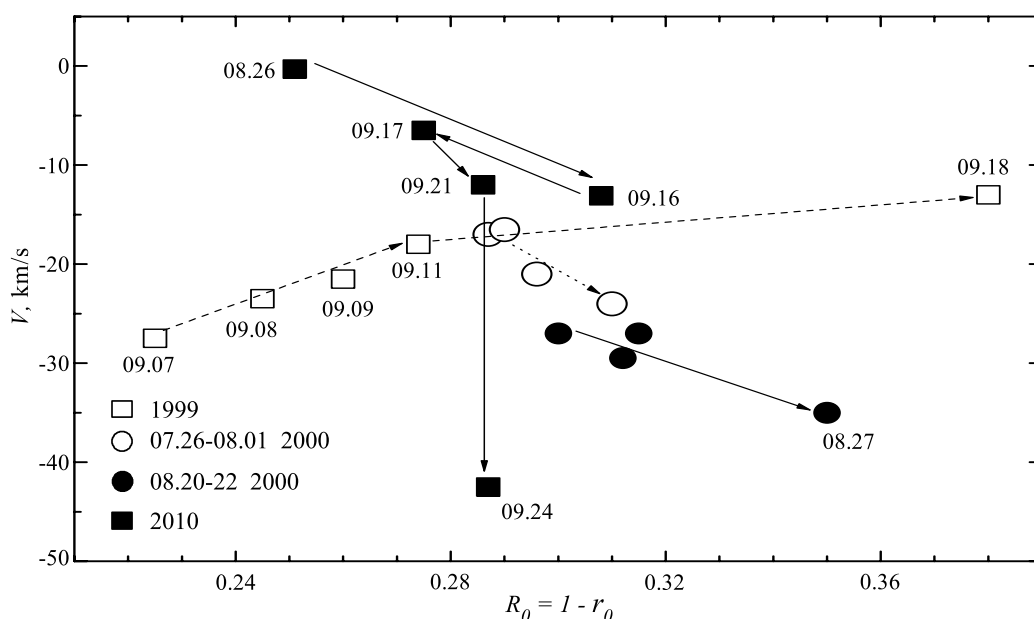


Рис. 9. Картины переменности лучевой скорости линии $H\beta$ для разных периодов наблюдений, как зависимость центральной глубины ($R_0 = 1 - r_0$) линии от ее лучевой скорости. Непрерывные ряды наблюдения выделены отдельными символами, даты получения отмечены в нижнем левом углу. Для двух рядов наблюдений, где отмечен только год наблюдений, даты (месяц и ночь) отмечены цифрами. Вертикальные и горизонтальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений.

этим дифференциальными сдвигами различается для разных периодов наблюдений. Это хорошо видно на Рис. 9, где представлены переменности лучевой скорости линии $H\beta$ для разных периодов наблюдений, в зависимости от центральной глубины ($R_0 = 1 - r_0$) линии. Непрерывные ряды наблюдений выделены отдельными символами, даты наблюдений отмечены в нижнем левом углу Рис. 9. Рис. 9 показывает, что градиенты лучевой скорости и центральной глубины (т.е. интенсивности) абсорбционного компонента линии $H\beta$ различаются для разных периодов наблюдений. В периоды наблюдений 26–28.07.2000 г., 20–22.08.2000 г. и 21–24.09.2010 г. в течении трех ночей существенного изменения центральной интенсивности абсорбции не наблюдается. Это указывает на то, что в это время переменность профиля в основном была обусловлена пульсационными движениями слоев атмосферы, где формируется линия $H\beta$ [36].

В периоды 07–18.09 1999 г. и 16–21.09 2010 г. явно наблюдается переменность центральной интенсивности линии, и она различна для этих двух периодов наблюдений (Рис. 9). Наши исследования показали, что в течение суток изменение интенсивности абсорбционного компонента линии $H\beta$ небольшое. Поэтому для этих периодов наблюдений переменность профилей относительно расчетного профиля мала и недостаточна для выявления особенностей и причин этой переменности. Для прослеживания развития переменности в течении

нескольких дней мы из каждого профиля вычли первый профиль, полученный в начале данного сета наблюдений. На Рис. 8b эти различия показаны сплошными линиями. Для выявления особенностей переменности в течение суток мы из каждого профиля вычитали предыдущий полученный профиль (пунктирные линии на Рис. 8b). Для наглядного сопоставления эти два типа переменностей представлены на одном рисунке Рис. 8b, где числа справа обозначают даты наблюдений (вторые числа в строчке соответствуют вычитаемому профилю).

На Рис. 8 видно, что переменность интенсивности абсорбционного компонента линии $H\beta$ происходит в интервале лучевой скорости $-100 \lesssim V \lesssim 100$ и не связана с позиционными сдвигами абсорбционного компонента в целом, крылья в интервале лучевой скорости $|100| < V$ не меняются.

Сопоставление профилей на Рис. 8a и их разница (на Рис. 8b) выявляют характер и причину переменности профилей в течение четырех последовательных ночей с 07.09 по 11.09.1999 г. На Рис. 8b видно, что переменность профиля 2, 3, 4 относительно 1 (сплошные кривые) происходит следующим образом. На профиле линии наблюдается слабый эмиссионный компонент, который двигается по профилю линии от ее синего крыла к красному, и по мере движения его интенсивность уменьшается. На профиле 2 (Рис. 8a) заметно, что

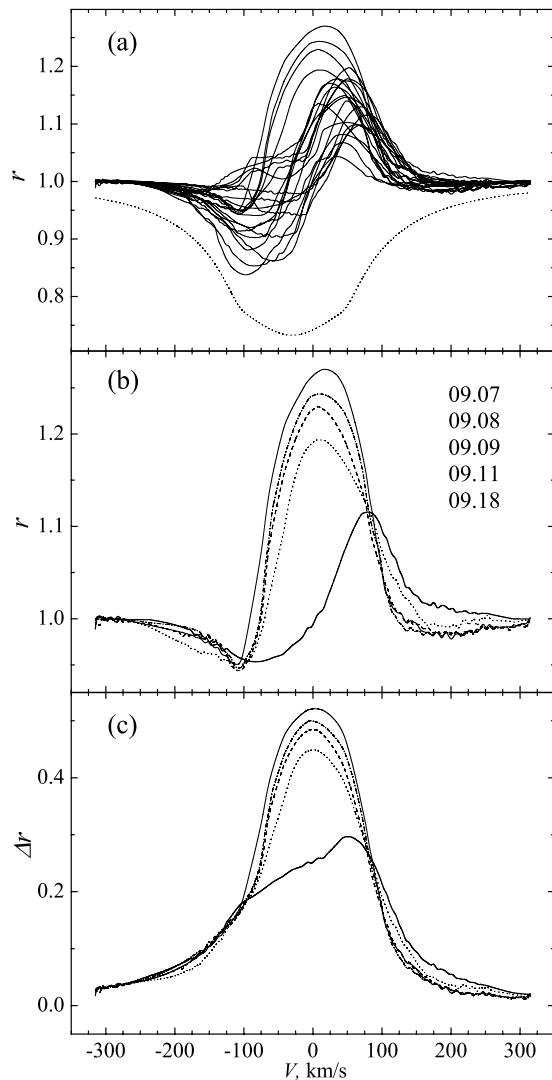


Рис. 10. (а) Расчетный (пунктирная) и наблюдаемые профили линии $H\alpha$. (б) Профили линии $H\alpha$, полученные в период 07–18.09.99. Цифрами указаны даты получения профилей соответственно сверху вниз. (с) Переменность профилей Рис. 10б относительно расчетного профиля. Даты и стиль линий такие же, как на Рис. 10б.

с перемещением эмиссионного компонента в красную сторону на синей половине профиля интенсивность абсорбции увеличивается. На профиле 3 по мере движения эмиссионной детали этот процесс выглядит более наглядно. Разница профилей 3 и 1 (сплошная линия “11 – 07”) показывает, что на синем крыле появляется новая эмиссионная деталь. Это явление особенно рельефно выглядит на разнице профилей, отмеченных пунктирными линиями на Рис. 8б. Уже на разнице профилей 3 и 2 (пунктирная кривая “09 – 08”) эта эмиссионная деталь заметна, а на разнице профилей 4 и 3 (пунктирная кривая “11 – 09”) она заметно усиливается.

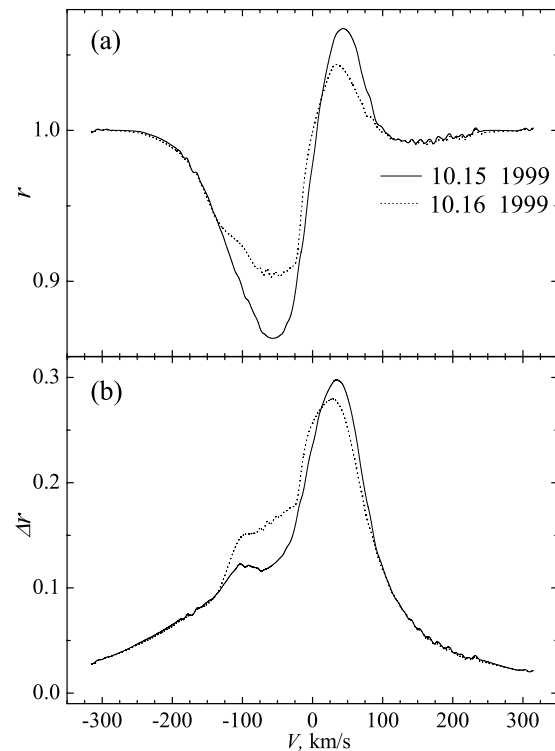


Рис. 11. (а) Наблюдаемые профили линии $H\alpha$, даты указаны на рисунке. (б) Переменность профилей Рис. 11а относительно расчетного профиля. Даты и стиль линий такие же, как на Рис. 11а.

Все это свидетельствует о клочковатой структуре оболочки звезды.

Как было отмечено выше, самая интенсивная абсорбция линии $H\beta$ была получена в ночь 18.09.1999 г. Но как видно из Рис. 8б, разницы профилей “18 – 07” и “18 – 11” показывают, что этот профиль также “засорен” эмиссионным компонентом. Возможно наш расчетный профиль реально отражает абсорбционный компонент фотосферного происхождения.

4. Линия $H\alpha$ в основном выглядит как прямой Р Суг-профиль, но формы профилей сильно различаются. Наблюдается переменность со временем фотометрических и позиционных характеристик и абсорбционного, и эмиссионного компонента. Картина и характер переменности различаются для разных периодов наблюдений.

В период первого непрерывного ряда наблюдений (с 07.09 по 18.09 1999 г.) зафиксирован интенсивный эмиссионный компонент, постепенно ослабевающий (Рис. 10б). На Рис. 10с приведена переменность этих профилей относительно расчетного профиля. Из Рис. 10б и 10с видно, что в ночи 11.09.99 и 18.09.99 по сравнению с предыдущими ночами синяя половина контура эмиссии существенно сдвинулась в красную сторону спектра.

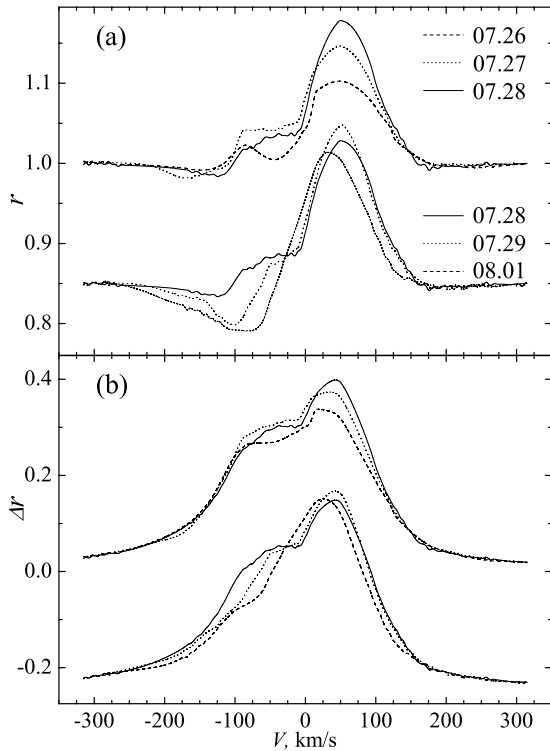


Рис. 12. (а) и (b) То же, что и на Рис. 11а и 11б, но для профилей, полученных в 2000 г., даты (месяц и число) указаны на рисунке. Подробности в тексте.

При этом интенсивность абсорбционного компонента не увеличилась. Наоборот, абсорбционное крыло стало менее интенсивным и пологим. А эмиссионные крылья красной половины контура стали более интенсивными и широкими. Это, возможно, свидетельствует о том, что переменность эмиссионного и абсорбционного компонентов различается.

На спектрах, полученных 15 и 16 октября 1999 г. (Рис. 11а), профили линии $H\alpha$ и ее переменность (Рис. 11б) сильно различаются от приведенных на Рис. 10б и 10с. Видно, что на профиле, полученном в ночь 15.10.1999 г., в диапазоне $V \sim -100 \pm 25$ км/с наблюдается эмиссионный компонент. Через сутки его интенсивность и ширина значительно увеличились и он сдвинулся в красную часть спектра.

Аналогичная картина переменности профиля $H\alpha$ наблюдается в период с 26.07 по 01.08.2000 г. (Рис. 12), когда было проведено очередное непрерывное наблюдение. Эти переменности очевидным образом наблюдаются как на самих профилях (Рис. 12а), так и на картинках отображающих их изменения относительно расчетного профиля (Рис. 12б). Для наглядности эти профили мы объединили в две группы, и во вторую группу включен последний по дате профиль из первой

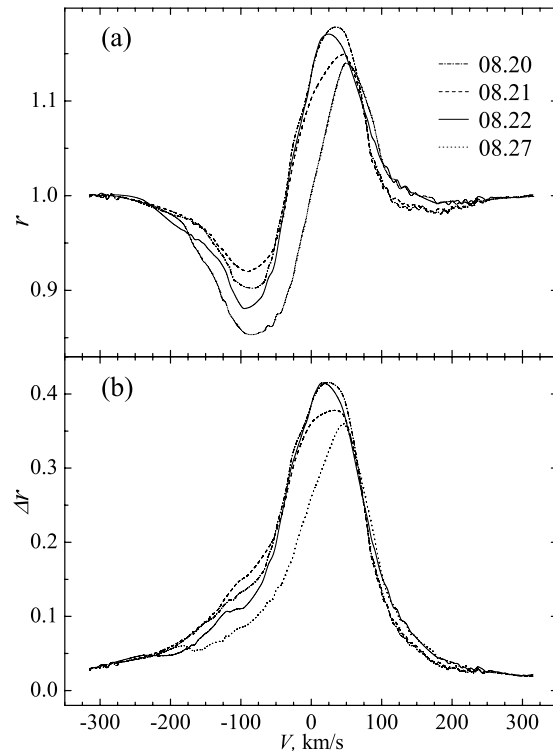


Рис. 13. То же, что и на Рис. 12а, б, но для другого периода наблюдений.

группы. Даты (месяц и число) профилей указаны на Рис. 12а. Из Рис. 12 видно, что на первом профиле (26.07.2000 г.), полученном в начале данного сета, наблюдается дополнительный эмиссионный компонент ($V \sim -90 \pm 15$ км/с), а на профиле 27.07.2000 г. его интенсивность заметно усиливается. В последующие дни наблюдения он сдвигается в длинноволновую часть спектра, и, как следствие, интенсивности абсорбционного компонента в синем крыле и эмиссионного компонента в красном крыле линии увеличиваются. По мере движения интенсивность уменьшается.

Другой тип переменности профиля $H\alpha$ наблюдался в период 20.08–27.08.2000 г. (Рис. 13а и 13б). Во вторую ночь этого сета (21.08.2000 г.) наблюдается уменьшение интенсивности и абсорбционного, и эмиссионного компонента по сравнению с первой ночью (20.08.2000 г.). В следующую ночь (22.08.2000 г.) интенсивности и абсорбции, и эмиссии снова увеличиваются. Следующий профиль был получен через 5 суток, и Рис. 13а и 13б не позволяют выявить характер переменности. Но изменения профилей относительно первого и предыдущего по дате (как в случае линии $H\beta$) показывают, что они обусловлены переменностями абсорбционного и эмиссионного компонентов, которые различаются.

Картина переменности профилей линии $H\alpha$,

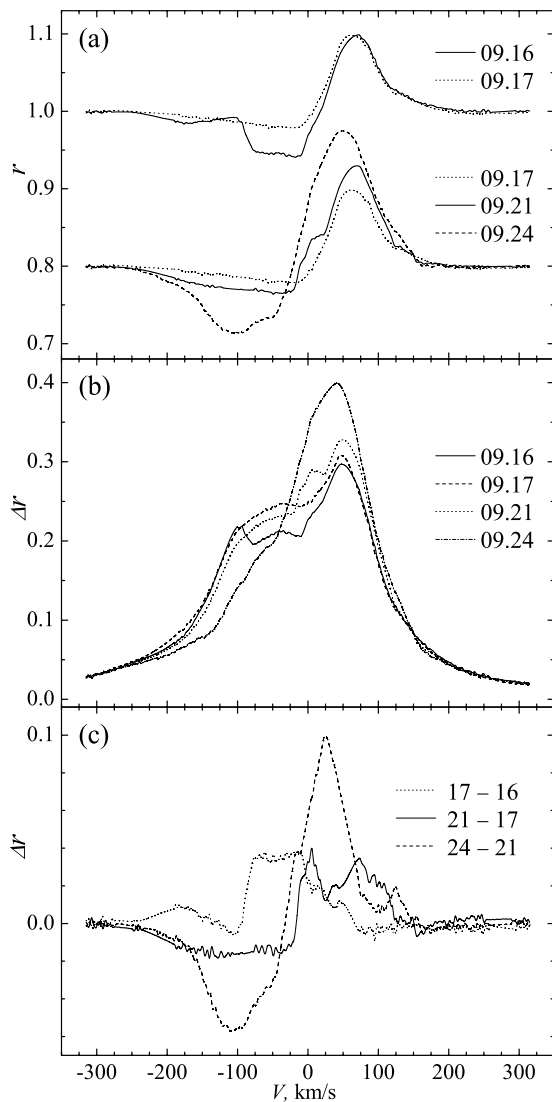


Рис. 14. (а) и (b) То же, что и на Рис. 12а, б, но для профилей, полученных в 2010 г. (с) Переменность профилей на Рис. 14а относительно предыдущего (по дате) профиля. Числа справа обозначают даты наблюдений (вторые числа в строчке соответствуют вычитаемому профилю).

полученная в период 16–24.09.2010 г. (Рис. 14а и 14б), аналогична таковой, полученной 26.07–01.08.2000 г. (Рис. 12). Так же, как на Рис. 12а, для наглядности эти профили мы разделили на две группы. На Рис. 14б видно, что как и на Рис. 12б, на профиле 16.09.2010 г. наблюдается дополнительный эмиссионный компонент ($V \sim -100.0 \pm 10.0$ км/с). В следующую ночь (17.09.2010 г.) его интенсивность заметно усиливается и он сдвигается в красную сторону спектра. По мере его движения интенсивности абсорбционного и эмиссионного компонентов увеличиваются (Рис. 14б). На двух последних профилях (21.09 и 24.09.2010 г.) в красном крыле эмиссионного

компонента линии $H\alpha$ наблюдается дополнительный эмиссионный компонент соответственно в позиции $V \sim 135.0 \pm 15.0$ и $V \sim 125.0 \pm 10.0$ км/с. Он более рельефно выглядит на Рис. 14с, где представлены изменения профилей относительно предыдущих (по дате) профилей. На Рис. 14с видно, что переменность профиля за одни сутки (16–17.09.2010 г.) обусловлена появлением на профиле линии двух эмиссионных компонентов шириной около 100 км/с на позициях $V \sim -180.0 \pm 50.0$ и $V \sim -40.0 \pm 50.0$ км/с. Рис. 14 также показывает, что на профиле 24.09.2010 г. одновременно усиливается и абсорбционный и эмиссионный компонент. Это еще раз свидетельствует о том, что переменности этих компонентов различаются.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наши исследования показали, что в спектре сверхгиганта 55 Суг переменность лучевой скорости и профилей линий тяжелых элементов обусловлена движениями типа радиальной пульсации, существующей в атмосфере этой звезды. А переменность лучевой скорости и профилей линий $He I$ вызвана нерадиальными пульсациями.

Сопоставление наблюдаемых профилей линии $H\beta$ с расчетным показало, что она состоит из абсорбционного компонента, на который накладывается эмиссионный компонент. Характер и темп переменности лучевой скорости и профиля линии $H\beta$ различаются для разных сезонов наблюдений. В некоторые периоды наблюдений, когда не наблюдается изменение интенсивности линии, переменность обусловлена движениями типа пульсаций. В другие периоды, когда зафиксированы переменности интенсивности абсорбции, наблюдаются дополнительные эмиссионные компоненты, которые двигаются по профилю линии от синего к красному крылу. Это свидетельствует о клочковатой структуре оболочки звезды.

В наших наблюдениях линия $H\alpha$ выглядит как прямой Р Суг-профиль. Переменность профиля также различается для разных периодов наблюдений. В основном она вызвана фотометрическими и позиционными изменениями абсорбционного и эмиссионного компонентов. В отдельные периоды наблюдений зафиксированы эмиссионные компоненты, которые, как и в случае линии $H\beta$, двигаются по профилю линии от синего крыла к красному. Дополнительные эмиссионные компоненты заметны как на синем, так и на красном крыльях эмиссионного компонента. Мы наблюдаем вклад отдельных отдаляющихся и приближающихся частей оболочки, что свидетельствует о ее клочковатой структуре.

Наше исследование показало, что для выявления картины переменности профилей линий в спектре сверхгиганта 55 Cyg необходимы длительные непрерывные (желательно через день) наблюдения с высоким разрешением и отношением $S/N \geq 250$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В. В. Шиманского за расчет и предоставление синтетического спектра звезды 55 Cyg. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073) и частично поддержана грантом РФФИ (проект 11-02-00319а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Markova and J. Puls, *Astronom. and Astrophys.* **478**, 823 (2008).
2. A. Underhill, *Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria* **11**, 353 (1960).
3. J. B. Hatchings, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **147** 161 (1970).
4. P. Granès and R. Herman, in *Proc. Third Colloquium on Astrophysics "Colloquium on Supergiant Stars"*, Ed. by M. Hack (1971), p. 58.
5. P. Granès, *Astronom. and Astrophys.* **45**, 343 (1975).
6. C. C. Beals, *Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria* **9**, 1 (1955).
7. G. Hill, R. W. Hilditch, and E. L. Pfannenschmidt, *Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria* **15**, 35 (1976).
8. F. Rufner and P. Bartholdi, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **48**, 503 (1982).
9. J. R. Percy and D. L. Welch, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **95**, 491 (1983).
10. J. R. Percy, L. C. Bruce, A. D. Drukier, et. al., *Publ. Astron. Soc. Pac.* **100**, 1555 (1988).
11. J. R. Percy, J. Harlow, A. S. Kazarine, et. al., *Publ. Astron. Soc. Pac.* **109**, 1215 (1997).
12. K. Pavlovski, P. Harmanec, H. Božić, et. al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **125**, 75 (1997).
13. C. Koen and L. Eyer, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **331**, 45 (2002).
14. E. L. Chentsov and A. N. Sarkisyan, *Astrophysical Bulletin* **62**, 257 (2007).
15. G. A. Galazutdinov, I. Han, and J. Krelowski, *Astrophys. J.* **629**, 299 (2005).
16. G. A. Galazutdinov (private communication).
17. R. L. Snell and P. A. Vanden Bout, *Astrophys. J.* **250**, 160 (1981).
18. J.-C. Hsu and M. Breger, *Astrophys. J.* **262**, 732 (1982).
19. G. Viraghalmy, *Inform. Bull. Var. Stars* **2938**, 1 (1986).
20. C. Leitherer and F. J. Zickgraf, *Astronom. and Astrophys.* **174**, 103 (1987).
21. L. H. Aller, *Astrophys. J.* **123**, 133 (1956).
22. D. R. Gies and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **387**, 673 (1992).
23. N. D. McErlean, D. J. Lennon, and P. L. Dufton, *Astronom. and Astrophys.* **349**, 553 (1999).
24. P. A. Crowther, D. J. Lennon, and N. R. Walborn, *Astronom. and Astrophys.* **446**, 279 (2006).
25. S. C. Searle, R. K. Prinja, D. Massa, and R. Ryans, *Astronom. and Astrophys.* **481**, 777 (2008).
26. F. A. Musaev, *Astron. Lett.* **19**, 315 (1993).
27. A. X. Rzaev, H. O. Gasanov, X. M. Микаилов и др., *Циркуляр ШАО* **95**, 3 (1999).
28. Г. А. Галазутдинов, *Препринт САО РАН* **92**, (1992).
29. А. X. Рзаев, X. M. Микаилов, М. Э. Шюкюров и др., *Циркуляр ШАО* **97**, 3 (1999).
30. D. J. Lennon, P. L. Dufton, and A. Fitzsimmons, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **94**, 569 (1992).
31. N. A. Sakhbullin and V. V. Shimanskii, *Astron. Rep.* **41**, 378 (1997).
32. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAUS* **210**, A20 (2004).
33. A. Kh. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 54 (2011).
34. A. Kh. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **62**, 52 (2007).
35. A. Kh. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 23 (2008).
36. W. Unno, Y. Osaki, H. Ando, and H. Shibahashi, *Nonradial Oscillations of stars* (University of Tokyo Press, Tokyo, 1979).

Investigation of Atmosphere Nonstationarity in the Supergiant 55 Cyg. I. Temporal Line Profile Variability

A.Kh. Rzaev

The CCD spectra taken with echelle spectrographs of the 2-m telescope of the Shemakha Astrophysical Observatory of the National Academy of Sciences of Azerbaijan and the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences are used to study the line profile variations in the spectrum of the hot supergiant 55 Cyg. The variability of the radial velocity and profiles of the lines of heavy elements is shown to be due to radial pulsation type motions. The corresponding variations for He I lines are due to nonradial pulsations. In the case of the $H\beta$ and $H\alpha$ lines the pattern and behavior of variations differ for different observing periods. The variability of these lines is mostly due to the photometric and positional variability of the absorption and emission components of their profiles. The profiles of these lines show additional emission components, which move from the blue toward the red line wing. Such a behavior is indicative of the clumpy structure of the stellar envelope.

Keywords: *stars: supergiants—stars: individual: 55 Cyg—stars: oscillations*