

УДК 524.3-13+524.3-355

Я. М. Магеррамов, В. М. Халилов

Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н.Туси НАН Азербайджана
пос. Ю. Мамедалиева, Шамахинский район, Азербайджан
e-mail: y_meherremov@rambler.ru

**Исследование нестационарности атмосферы
сверхгиганта HD225094. О переменности профилей
линий H и H в спектрах звезды HD225094**

Представлены сведения о звезде-сверхгиганте HD225094 и о необычных особенностях, наблюдаемых в спектрах, полученных в 2013 г. в ШАО. Было выявлено, что профили линии H типа P Cуг имеют структуры, изменяющиеся за короткое время, а также уникальный наблюдательный факт исчезновения линии H в спектре HD 225094. Кроме того, выявлено, что со временем происходят изменения значений лучевых скоростей и спектральных параметров линий H и H в спектре этой звезды. Предполагается, что полученные наблюдательные факты нестационарности атмосферы звезды HD 225094 частично могут быть связаны с несферичностью звездного ветра.

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ АТМОСФЕРИ НАДГІГАНТА HD 225094. ПРО ЗМІННІСТЬ ПРОФІЛІВ ЛІНІЙ H І H У СПЕКТРАХ ЗІРКИ HD225094, Магеррамов Я. М., Халілов В. М. Подаються відомості про зорю-надгіганта HD 225094 та про незвичні особливості, спостережені у її спектрах, отриманих у 2013 р. в ШАО. Було виявлено, що профілі лінії H типу P Cуг мають структуру, що змінюється за короткий час, а також унікальний спостережений факт зникнення лінії H у спектрі HD 225094. Крім того, виявлено, що з часом відбуваються зміни значень променевих швидкостей і спектральних параметрів ліній H і H у спектрі цієї зорі. Вважається, що отримані факти нестационарності атмосфери зорі HD 225094 частково можуть бути пов'язані з несферичністю зоряного вітру.

INVESTIGATION OF ATMOSPHERE NONSTATIONARITY IN THE SUPERGIANT HD 225094. PROFILE VARIATIONS OF THE H AND H LINES IN SPECTRA OF THE STAR HD225094, by Maharramov Y. M., Khalilov V. M. — Some information on the star HD225094 and on unusual features of spectra obtained at the ShAO in 2013 is presented. It is revealed that profiles of the H line of the P Cyg type has some structure changing in a short time. Besides, we revealed the unique observational fact of the H profile disappearance in the spectra of the star HD 225094. Our investigation of the H and H lines in the spectra of the star shows that values of the radial velocity and spectral parameters in these lines change with time. We suppose that the obtained observational facts of the HD 225094 atmosphere nonstationarity can be partially connected with the stellar wind nonsphericity.

ВВЕДЕНИЕ

Звезда-сверхгигант HD225094 (V639 Cas) относится к звездам, обладающим P-Суг-профилем линии H . Согласно данным [9—10, 12—14, 16] ее спектральный класс — $Sp = B3Ia$, видимая звездная величина $m_v = 6.27^m$, масса $M/M_\odot = 27$, радиус $R/R_\odot = 54$, светимость $\lg L/L_\odot = 5.12$, эффективная температура $T_{\text{эф}} = 16500$ К, ускорение свободного падения на поверхности $\lg g = 2.3$, скорость вращения $v \sin i = 68$ км/с. Считается, что она принадлежит к ассоциации Cas OB5 и удалена на расстояние $r = 1075 \pm 660$ пк.

Согласно спектральным и фотометрическим исследованиям [11, 12, 14] звезда HD 225094 относится к спектральному типу и классу светимости B3Ia, ее $T_{\text{эф}} = 16200$ К, $E(B - V) = 0.44$, $M_v = 7.1$, $M_{\text{bol}} = 8.4$, $\lg g = 2.20$, $v \sin i = 60$ км/с, $V_{\text{turb}} = 9$ км/с, расстояние до звезды $r = 11.7$ кпк, значение $[c_1] = 0.063$.

В работе [9] исследованы наблюдаемые в спектрах звезды линии Na I ($\lambda = 589.0, 589.6$ нм), измерены их эквивалентные ширины, рассмотрены изменения и представлены контуры этих линий. Как интересный факт отмечается заметный разброс минимальных и максимальных значений эквивалентных ширин линий Na I $\lambda = 589.0$ нм (0.00757 и 0.06735 нм) и Na I $\lambda = 589.6$ нм (0.00441 и 0.05657 нм) соответственно.

В работе [13] приведены исследования спектральных линий, наблюдаемых в атмосферах 46 разных звезд гигантов и сверхгигантов, в том числе звезды HD 225094. Измерены эквивалентные ширины спектральных линий и подробно исследована зависимость усиления или уменьшения интенсивности рассматриваемых линий от температуры. Здесь же приводятся результаты, полученные по звезде HD 225094, и указано на ее принадлежность к ассоциации Cas OB5.

А. Пасок и И. Колка [15] по 10 качественным спектрограммам звезды HD225094, полученным в течение семи лет на 1.5-м телескопе

с дисперсией 2.7 нм/мм, провели исследования линии H γ . Оказалось, что профили линии H γ наблюдаются либо в виде P-Cyг-профиля, либо инверсного P-Cyг-профиля, либо находятся в полном поглощении. В работе также отмечаются структурные изменения в профилях линии H γ на некоторых спектрограммах, когда компоненты поглощения и излучения ослабевают, и их остаточные интенсивности равны 0.94 и 1.06 соответственно. Подобные наблюдательные факты можно объяснить относительным уменьшением интенсивности компонентов линии H γ . В этой же работе приводятся интересные изменения значений эквивалентных ширин и лучевых скоростей компонент поглощения и излучения линии H γ . Анализ измерений показывает, что лучевая скорость компонента поглощения линии H γ в течение одной ночи изменилась на 20 км/с. Все эти изменения привели авторов к мнению, что атмосфера исследуемой звезды очень активна и ввиду малочисленности полученного качественного спектрального материала и непоследовательного их получения многие особенности атмосферы звезды остались невыясненными.

Из-за того что атмосфера звезды-сверхгиганта HD 225094 исследована очень слабо, начиная с сентября 2013 г. звезда была включена в наблюдательную программу по исследованиям звезд-сверхгигантов, которая проводится на 2-м телескопе Шамахинской астрофизической обсерватории им. Н. Туси. Интерес к наблюдениям звезды HD 225094 также был связан с тем, что в спектрах звезды обнаруживаются быстрые изменения профилей и лучевых скоростей линии H γ .

Основная цель работы — исследование атмосферы звезды на основе высококачественного спектрального материала, полученного по возможности из непрерывного ряда наблюдений.

НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

С сентября 2013 г. по февраль 2014 г. в фокусе Кассегрена 2-м телескопа ШАО им. Н. Туси с помощью эшелле-спектрометра [6] были получены около 35 высококачественных спектрограмм звезды HD 225094. Использовался ПЗС-приемник 530–580 пкл, спектральный диапазон составлял $\lambda = 470...670$ нм, спектральное разрешение составляло $R = \lambda / \Delta\lambda = 15000$. Отношение сигнала к шуму равнялось $S/N = 150...200$. Полученные спектры обработаны с помощью пакета программ DECH-20 и DECH-20T, разработанных в CAO РАН [1]. Лучевые скорости измерялись с точностью ± 2 км/с, ошибки измерения эквивалентных ширин не превышали 5 %.

В некоторые ночи с целью прослеживания вариаций процессов в атмосфере звезды были получены по несколько пар спектрограмм.

Обработка водородных линий H γ и H δ в спектре HD 225094 сразу выявила резкие изменения, происходящие в профилях линии H γ со временем. Первые наблюдения (сентябрь — октябрь 2013 г.) указывали на то, что линия H γ показывает нормальный P-Cyг-профиль с неко-

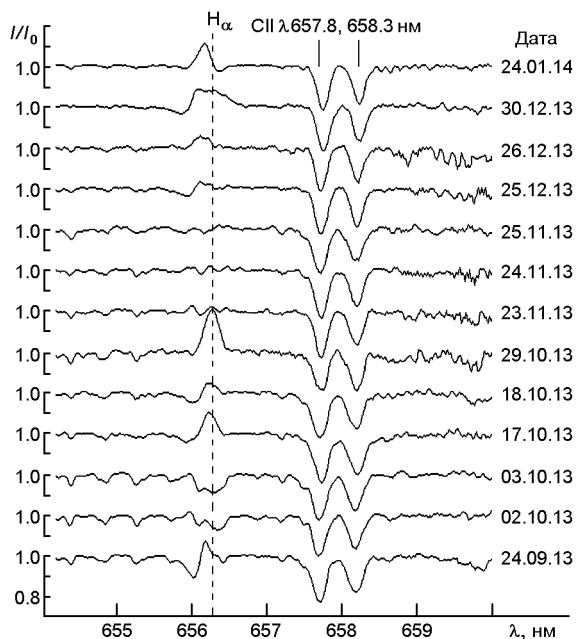
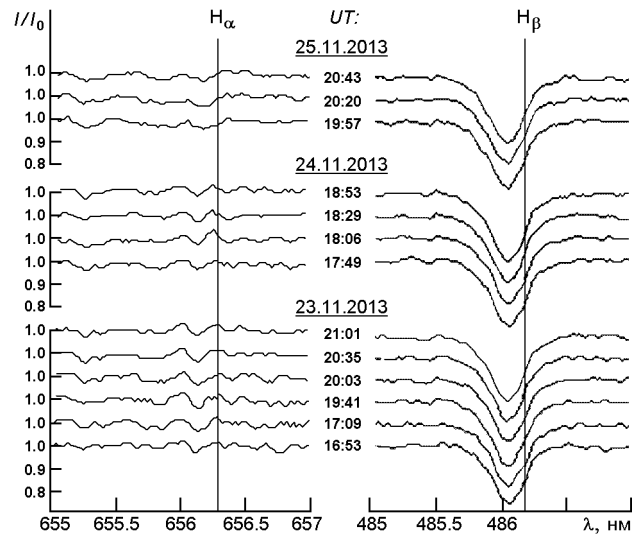


Рис. 1. Фрагменты участков спектра звезды HD 225094 с линией H и прилегающими участками спектра в наблюдаемом порядке. С 23 по 25 ноября приводятся усредненные за ночь спектрограммы звезды

торыми изменениями, которые являются обычными для большинства звезд-сверхгигантов этого класса. В течение этого периода времени происходили изменения спектральных параметров и лучевых скоростей компонентов поглощения и излучения линии H и лучевых скоростей линии H, которая всегда находится в поглощении (рис. 1 и 3). На рис. 1 приведен участок спектра, где в одном и том же порядке, кроме линии H, видны линии углерода C II (λ 657.8, 658.3 нм).

В отличие от полученных в сентябре — октябре 2013 г. спектрограмм звезды HD 225094, на спектрах звезды, полученных 23—25 ноября 2013 г., отмечается почти полное исчезновение профиля линии H. На месте линии λ 656.2816 нм можно выделить атмосферные линии поглощения и шум. В эти же ночи мы получили спектры других звезд-сверхгигантов HD 199478, HD 198478 (55 Cyg), HD 14143, у которых профили линии H показывали нормальный P-Cyg-профиль и нескольких звезд сравнения. Дополнительно можно отметить, что за исключением линии H, все остальные линии химических элементов, наблюдаемые в спектре звезды HD225094 (H, C II и др.) при этом не претерпели особых заметных изменений (рис. 1—3). Плотность спектрограмм в указанные ночи оставалась постоянной $S/N = 200$. Поэтому полное исчезновение профиля линии H в спектрах звезды HD225094, полученных 23—25 ноября 2013 г., вполне реальная картина, и это вполне может быть связано со сложными физическими процессами, происходящими на самой звезде. На рис. 2 отдельно показаны участки, где должна была бы находиться линия H на спектрограммах, полученных 23—25 ноября 2013 г., и профили линии H в эти же даты.

Рис. 2. Профили линий H_{α} и H_{β} звезды HD 225094, полученные 23—25 ноября 2013 г.



ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что профиль линии H_{α} в спектре звезды HD 225094 за время наблюдений на 2-м телескопе ШАО наблюдался в следующих четырех видах: P-Суг-профиль линии H_{α} ; профиль линии только в излучении; в виде двойной линии поглощения (или линии поглощения со слабой эмиссией); полное отсутствие профиля линии. Как видно из рис. 2, 23 ноября были получены шесть спектров, 24 ноября — четыре и 25 ноября — три спектра. Лишь на последней полученной спектрограмме 25 ноября на фиолетовом крыле будущего профиля линии H_{α} ($\lambda = 656.2816$ нм) начал формироваться очень слабый широкий компонент поглощения. К большому сожалению, погодные условия ни до 23 ноября, ни после 25 ноября 2013 г. не позволили получить спектры звезды HD 225094, которые могли бы пролить свет на переходные моменты этого интересного процесса. В работе [15] также приведены случаи относительно слабых интенсивностей линии H_{α} . Поэтому можно предположить, что исчезновение профиля линии H_{α} в спектре звезды HD 225094 — повторяющийся процесс. Для того чтобы выяснить, насколько этот процесс реален и происходит ли он периодически, нужны дополнительные наблюдения, которые планируется в дальнейшем провести в ШАО.

Для подробного исследования факта исчезновения профиля линии H_{α} в спектре звезды HD225094 были вычислены эквивалентные ширины, лучевые скорости и остаточные интенсивности линий H_{α} , H_{β} , He I ($\lambda = 587.6$ нм), C II ($\lambda = 657.8, 658.3$ нм) и межзвездного дублета Na I (D_1, D_2) в дни, предшествующие исчезновению профиля, и последующие дни. Приведем некоторые интервалы изменения лучевых скоростей и некоторых спектральных параметров линий H_{α} , H_{β} и др.

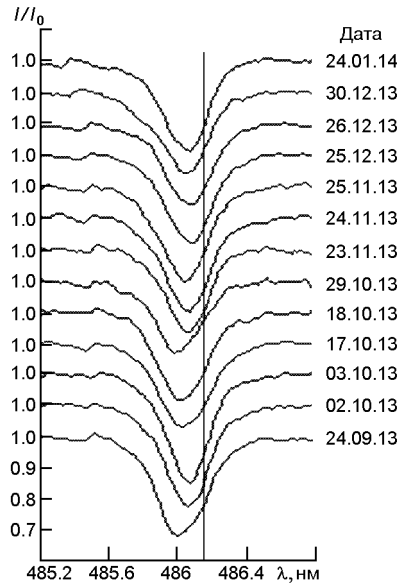


Рис. 3. Профили линии H в спектре звезды HD 225094, полученные за весь период наблюдений

Как видно из табл. 1, лучевая скорость «синего» компонента линии поглощения H изменяется в пределах 209... 107 км/с, и только в случае, когда линия поглощения наблюдается как двойная, скорости компонентов равны 73 и +41 км/с соответственно. Иногда наблюдается смещенный в красную сторону абсорбционный компонент линии H, который показывает скорость +16 км/с. Лучевая скорость компонента излучения линии H изменяется в интервале 99... 7 км/с, а лучевая скорость линии H — в пределах 84... 33 км/с (табл. 1).

Таблица 1. Результаты измерений спектральных параметров линии H и H

| Дата | H | | | | | | H | | |
|------------|--------------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------|----------|--------------------|----------------|-----------|
| | $V_r^{абс}$, км/с | $V_r^{эм}$, км/с | $W^{абс}$, нм | $W^{эм}$, км/с | $r^{абс}$ | $r^{эм}$ | $V_r^{абс}$, км/с | $W^{абс}$, нм | $r^{абс}$ |
| 24.09.2013 | -107 | -35 | 0.025 | 0.006 | 0.89 | 1.07 | -72 | 0.120 | 0.68 |
| 02.10.2013 | -73 | | 0.026 | | 0.94 | | -36 | 0.104 | 0.68 |
| | +41 | | | | 0.92 | | | | |
| 03.10.2013 | -73 | | 0.036 | | 0.91 | | -33 | 0.115 | 0.65 |
| | +12 | | | | 0.91 | | | | |
| 17.10.2013 | -158 | -20 | 0.012 | 0.017 | 0.95 | 1.10 | -60 | 0.106 | 0.73 |
| 18.10.2013 | -123 | -25 | 0.014 | 0.007 | 0.95 | 1.04 | -71 | 0.109 | 0.72 |
| 29.10.2013 | — | -7 | — | 0.046 | — | 1.20 | -84 | 0.085 | 0.77 |
| 23.11.2013 | — | — | — | — | 1.00 | 1.00 | -59 | 0.086 | 0.71 |
| 24.11.2013 | | | | | 1.00 | 1.00 | -56 | 0.107 | 0.70 |
| 25.11.2013 | — | — | — | — | 1.00 | 1.00 | -59 | 0.110 | 0.70 |
| 25.12.2013 | -173 | -91 | 0.011 | 0.004 | 0.96 | 1.03 | -43 | 0.096 | 0.72 |
| 26.12.2013 | -199 | -97 | 0.001 | 0.011 | 0.99 | 1.05 | -52 | 0.097 | 0.74 |
| 30.12.2013 | -209 | -99 | 0.013 | 0.035 | 0.96 | 1.08 | -70 | 0.098 | 0.74 |
| 24.01.2014 | -191 | -67 | 0.003 | 0.017 | 0.98 | 1.11 | -58 | 0.101 | 0.71 |
| | +16 | | 0.005 | | 0.97 | | | | |

Эквивалентная ширина и остаточные интенсивности компонента поглощения линии H γ изменяются в пределах 0.001...0.036 нм и 0.89...1.00, компонента излучения — в пределах 0.004...0.046 нм и 1.00...1.20, а линии H δ — в пределах 0.085...0.120 нм и 0.65...0.74 соответственно (табл. 1).

Таким образом, все измеренные параметры линий H γ и H δ и их лучевые скорости изменяются со временем. Переменность отмечается и у линии H β . Изменения ее эквивалентной ширины указывают на наличие у линии незаметной эмиссионной составляющей, которая влияет на профиль линии и ее лучевую скорость. Так, когда не наблюдается профиль линии H β , заподозрена пульсационная переменность в области образования линии H β .

Известно, что линии C II и He I образуются в более глубоких слоях атмосферы, чем линии H γ и H δ . С другой стороны, линии C II (657.8, 658.3 нм) располагаются в том же порядке, что и линия H γ , что позволяет лучше контролировать реальность изменений линии H γ . Поэтому изучение выбранных линий представляет большой интерес.

Из табл. 2 видно, что лучевые скорости, эквивалентные ширины и остаточные интенсивности линий C II изменяются в интервале 54... 32 км/с, 0.034...0.065 нм и 0.74...0.85 соответственно. Лучевые скорости линии He I и межзвездных линий дублета Na I изменяются в пределах 53... 31 км/с и 14... 8 км/с. Отметим, что линии C II и He I во многих случаях показывают одинаковые скорости.

Как видно из рис. 1 и 4, не наблюдаются заметные изменения и в профилях линий C II, He I и дублета Na I.

Таким образом, исчезновение профиля линии H γ не сопровождается заметными изменениями спектральных параметров других линий, так что оно, скорее всего, связано с физическими процессами, происходящими в верхних слоях атмосферы.

Таблица 2. Результаты измерений спектральных параметров линий C II, He I и Na I

| Дата | C II 657.8 нм | | | C II 658.3 нм | | | He I 587.6 нм | Na I D ₁ | Na I D ₂ |
|------------|---------------|----------|------|---------------|----------|------|---------------|---------------------|---------------------|
| | V_r , км/с | W , нм | r | V_r , км/с | W , нм | r | V_r , км/с | V_r , км/с | V_r , км/с |
| 24.09.2013 | -40 | 0.059 | 0.77 | -40 | 0.044 | 0.82 | -42 | -12 | -9 |
| 02.10.2013 | -40 | 0.049 | 0.80 | -43 | 0.038 | 0.83 | -31 | -13 | -12 |
| 03.10.2013 | -41 | 0.063 | 0.77 | -46 | 0.043 | 0.82 | -31 | -12 | -11 |
| 17.10.2013 | -32 | 0.065 | 0.75 | -34 | 0.057 | 0.79 | -34 | -10 | -8 |
| 18.10.2013 | -45 | 0.061 | 0.78 | -47 | 0.045 | 0.82 | -45 | -14 | -13 |
| 29.10.2013 | -42 | 0.050 | 0.81 | -43 | 0.040 | 0.81 | -51 | -13 | -12 |
| 23.11.2013 | -44 | 0.060 | 0.74 | -47 | 0.058 | 0.78 | -46 | -12 | -8 |
| 24.11.2013 | -44 | 0.050 | 0.78 | -45 | 0.036 | 0.83 | -45 | -12 | -10 |
| 25.11.2013 | -52 | 0.053 | 0.78 | -53 | 0.038 | 0.85 | -53 | -12 | -9 |
| 25.12.2013 | -53 | 0.048 | 0.77 | -54 | 0.038 | 0.81 | -51 | -13 | -12 |
| 26.12.2013 | -53 | 0.041 | 0.78 | -53 | 0.034 | 0.82 | -52 | -14 | -12 |
| 30.12.2013 | -33 | 0.045 | 0.78 | -35 | 0.034 | 0.83 | -38 | -12 | -10 |
| 24.01.2014 | -45 | 0.045 | 0.78 | -47 | 0.040 | 0.81 | -40 | -12 | -9 |

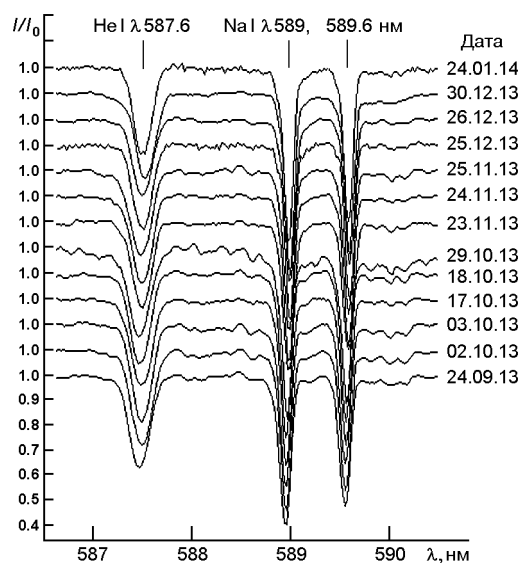


Рис. 4. Профили линий He I и дублета Na I в спектре звезды HD 225094, полученные за весь период наблюдений

Как известно, линия H образует в верхних слоях атмосферы звезды, т. е. в слоях, где формируется переменный звездный ветер. На основе наблюдений разного вида профилей линий в спектрах звезд-сверхгигантов, можно прийти к выводу о том, что в их оболочках происходят нестационарные процессы, отражающиеся в профилях линий. В результате переменного несферического ветра, направленного от наблюдателя, при определенных условиях могут возникнуть условия совпадения по длине волны компонентов поглощения и излучения линии H, что в итоге может привести к исчезновению линии H в спектре [4, 5].

Компоненты как бы компенсируют друг друга, а переменный звездный ветер еще более сглаживает наблюдаемую картину.

Известно, что в сверхгигантах наличие переменного ветра и его ускоренного движения вызвано сильным потоком излучения от звезды [2]. У этих звезд внешние слои атмосферы подвержены более интенсивным изменениям, чем внутренние.

Таким образом, поток излучения звезды и переменный звездный ветер приводят к соответствующим изменениям во внешних слоях атмосферы и оболочке звезды. В итоге мы наблюдаем переменные поглощающие и излучающие компоненты различных форм P-Cygni-профиля линии H звезды HD 225094. Особый интерес вызывает сохранение таких условий в течение трех суток, а возможно и более длительного времени. Почти у всех звезд-сверхгигантов наблюдается сферически-несимметричное истечение вещества с разными скоростями и разной плотностью [7, 8, 17].

Как известно, причиной возникновения переменного звездного ветра в сверхгигантах является пульсация [3]. Если исчезновения линии H у звезды HD 225094 связаны с пульсацией, то они должны появляться периодически. Количество полученного наблюдательного

материала и их непоследовательность по времени наблюдений не позволяет сделать таких далекоидущих выводов в данной работе.

ВЫВОДЫ

1. Впервые установлено, что в некоторые даты наблюдений профиль линии H в спектре звезды HD 225094 исчезает. Возможно, что исчезновение профиля линии H вызвано несферичным звездным ветром и нестационарностью атмосферы звезды. Этот факт может быть результатом взаимодействия переменного звездного ветра с потоком вещества, направленного в противоположную от наблюдателя сторону. Возможно, таким образом смещенной в красную сторону линией поглощения в профиле H компенсируется линия излучения.

2. Факт исчезновения профиля линии H, по-видимому, есть повторяющийся процесс как для звезды HD 225094, так и для других звезд-сверхгигантов, обладающих активными атмосферами (линия H показывает P-Cygni-профиль) [4, 5].

3. Наблюдаются изменения лучевых скоростей, спектральных параметров и структуры профиля линии H. Однако эта переменность незначительна. Исчезновение профиля линии H не сопровождается синхронными изменениями спектральных параметров линии H и других исследованных линий (C II, He I и др.).

1. *Галазутдинов Г. А.* Система обработки звездных эшеле-спектров. 1. Обработка изображений. 2. Обработка спектров. Нижний Архыз, 1992. 52 с. (Препринт / Спец. астрофиз. обсерватория РАН; № 92).
2. *Де Ягер К.* Звезды наибольшей светимости. М.: Мир, 1984. 493 с.
3. *Кокс Дж. П.* Теория звездных пульсаций. М.: Мир, 1983. 326 с.
4. *Магеррамов Я. М.* Спектральная переменность звезды 55 Cyg (B3Ia) // *Астрон. журн.* 2013. **90**, № 4. С. 339–346.
5. *Магеррамов Я. М.* О переменности профилей линий H и H в спектрах звезды 55 Cyg // *Кинематика и физика небес. тел.* 2013. **29**, № 2. С. 40–49.
6. *Микаилов Х. М., Халилов В. М., Алекберов И. А.* Эшеле-спектрометр фокуса кассегрена 2-метрового телескопа ШАО НАН Азербайджана // *Циркуляр Шемахин. астрофиз. обсерватории.* 2005. № 109. С. 21–29.
7. *Соболев В. В.* Движущиеся оболочки звезд. М.: Наука, 1947. 77 с.
8. *Соболев В. В.* Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 1985. 503 с.
9. *Genova R., Beckman J. E.* Kinematical structure of the local interstellar medium: The Galactic Anticenter Hemisphere // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2003. **145**. P. 355–412.
10. *Howarth I. D., Siebert K. W., Hussain Gaitee A. J., Prinja R. K.* Cross-correlation characteristics of OB stars from IUE spectroscopy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1997. **284**. P. 265–285.
11. *Kendall T. R., Conlon E. S., Dufton P. L., Keenan F. P.* Ultraviolet Fe III lines in the spectra of high galactic latitude early-type stars // *Astron. and Astrophys.* 1994. **290**. P. 563–572.

12. *Leitherer C., Wolf B.* Early-type stars in OB associations in the infrared, I. Extinction law and IR excesses // *Astron. and Astrophys.* 1984. **132**. P. 151–162.
13. *Lennon D. J., Dufton P. L., Fitzsimmons A.* Galactic B-supergiants. II. Line strengths in the visible – Evidence for evolutionary effects // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1993. **97**. P. 559–585.
14. *McErlean N. D., Lennon D. J., Dufton P. L.* Galactic B-supergiants: A non-LTE model atmosphere analysis to estimate atmospheric parameters and chemical compositions // *Astron. and Astrophys.* 1999. **349**. P. 553–572.
15. *Pasok A., Kolka I.* The H α profile variations in the spectrum of HD 225094, B3Ia // *Inform. Bull. Var. Star.*—1992.—**3804**, N 1.—P. 1–3. (Commissions 27 and 42 of the IAU).
16. *Prinja R. K., Massa D. L.* Signature of wide-spread clumping in B supergiant winds // *Astron. and Astrophys.* 2010. **521**. P. 1–4.
17. *Rosendhal J. D.* A Survey of H-alpha emission in early-type high-luminosity stars // *Astrophys. J.* 1973. **186**. P. 909–937.

Статья поступила в редакцию 14.08.14