

УДК 524.312-355/56

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ ЛИНИЙ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В СПЕКТРЕ HD 93521. ПЕРЕМЕННОСТЬ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА

© 2007 А. Х. Рзаев^{1,2*}

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Шамахинская астрофизическая обсерватория, п. Ю. Мамедалиева, Азербайджан

Поступила в редакцию 11 апреля 2007 г.; принята в печать 4 августа 2007 г.

По ПЗС-спектрам, полученным на эшелле-спектрографе PFES 6-м телескопа САО РАН, детально исследована переменность профилей линий HeII, H β и H α в спектре звезды HD 93521. Картина и характер переменности линий HeII аналогичны таковым для слабых линий HeI и обусловлены нерадиальными пульсациями. Период и амплитуда переменности лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции одинаковые, а фаза колебания противоположна. Картина переменности водородных линий H β и H α относительно их средних профилей такая же, как и для сильных линий HeI, и обусловлена нерадиальными пульсациями. Величина периода и фаза колебания лучевой скорости одинаковы, а амплитуда различается для синей и красной половины профиля абсорбции. Характер переменности лучевой скорости абсорбционного и эмиссионного компонентов линии H α свидетельствует о том, что переменность последних также обусловлена нерадиальными пульсациями. Все это свидетельствует о сложной переменной структуре ветра в областях его зарождения. Картины переменности и кинематика ветра в разных направлениях и для разных областей атмосферы и/или оболочки различаются.

1. ВВЕДЕНИЕ

Горячая звезда HD 93521 O9.5 V является нерадиальным пульсатором [1–3]. Ее быстрое вращение ($v \sin i \approx 430$ км/с) и “удачная” ориентация относительно наблюдателя ($\sin i \approx 1$) [3] оптимальны для детального исследования пульсационных движений в атмосфере. Отметим, что в вышеуказанных работах исследования переменности профилей линий в основном проводились с помощью “динамических спектров” [2], а лучевые скорости были измерены кросс-корреляционными методами. Детальное исследование изменения со временем фотометрических и позиционных характеристик линий не проводилось.

В работе Рзаева и Панчука [4] по высококачественным ПЗС-спектрам с высоким отношением сигнал/шум была детально исследована переменность профилей 8 линий HeI в спектре HD 93521. Были подтверждены результаты предыдущих работ [1, 2], что переменность профилей и лучевой скорости линий HeI обусловлены нерадиальными пульсациями. Также было отмечено, что классический метод исследования изменения лучевой скорости со временем (т. е. по бисектору линии, на уровне 0.5

R_0 ее глубины) не позволяет выявить подробную картину переменности лучевой скорости этих линий. Необходимо применить новый методический подход: исследовать переменность лучевой скорости отдельно для синей и красной половин профиля абсорбции, потому что параметры переменности (амплитуда и фаза) лучевой скорости различаются для синей и красной половин профиля абсорбции линий HeI. Для обеих половин профиля абсорбции найденные величины периода и амплитуды хорошо коррелируют с центральными глубинами линий. При переходе от слабых к сильным линиям HeI период лучевой скорости, измеренной по обеим половинам профиля абсорбции, увеличивается, а амплитуда уменьшается.

В работах [1, 2] отмечено, что, в отличие от HeI, линии HeII не показывают заметной переменности. Это различие авторы связывали с высокой скоростью вращения звезды, приводящей к градиенту эффективной температуры и гравитации от экватора к полюсу, т. е. экватор звезды более холодный. Линии HeII формируются преимущественно в области горячих полюсов, а переменности, которые возникают на экваторе, проявляются на линиях HeI. Также было отмечено, что переменность линий H β и H α отличается от переменности линий HeI и,

*E-mail: abid@sao.ru

возможно, связана с процессами, происходящими в околозвездной среде.

В настоящей работе по вышеуказанной методике проводится детальное исследование переменности лучевой скорости и профилей двух линий HeII λ 4686 и 5411 Å и водородных линий H β и H α .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Сведения о наблюдениях, полученных спектрах, а также процедуре регистрации, обработки и редукиции спектров приведены в работе [4]. Отметим, что спектры были получены с разрешением $R = 15000$, отношением сигнал/шум $350 \leq S/N \leq 500$ и временным разрешением 3–5 минут. Для максимального уменьшения шумов и увеличения точности измерений была применена процедура сглаживания спектра методом гауссианы [4]. Сглаженные профили, записанные в остаточных интенсивностях линий H α , H β и HeII λ 4686 Å, представлены на рис. 1(a), 2(a) и 3(a) соответственно. Картина переменности линии HeII λ 5411 Å такая же, как у линии HeII λ 4686 Å.

Исследование показало, что изменения формы профиля и лучевой скорости ощутимы лишь через определенный промежуток времени и различаются для линий HeII, H β и H α . Для H α величина этого промежутка времени (с учетом времени, затрачиваемого на считывание сигнала между соседними экспозициями) составляет 56 минут. Для линий HeII и H β он равен 28 и 38 минут соответственно. В [4] было показано, что такие же интервалы времени характеризуют переменность слабых (28 мин) и сильных (38 мин) линий HeI. Поэтому профили линий, имеющие похожую общую форму и показывающие одинаковые фотометрические и позиционные характеристики, мы объединили в общие группы. Для линий H α и H β этих групп оказалось 4, а для HeII — 6 (рис.1(b), 2(b) и 3(b)). Усредненные по группам профили линий H α , H β и HeII λ 4686 Å показаны на рис. 1(c), 2(c) и 3(c) и обозначены как I_n , где n — номер группы. В каждой группе максимальное отклонение интенсивности от среднего профиля не превышает $\sim 0.2\%$ (принимая уровень континуума за 100%). Среднеквадратическое отклонение величины лучевой скорости от среднего не превышает 1.0, 1.2 и 2.5 км/с соответственно для H α , H β и линий HeII. А максимальное отклонение отдельных измерений от среднего не превышает 2.0, 2.2 и 3.5 км/с.

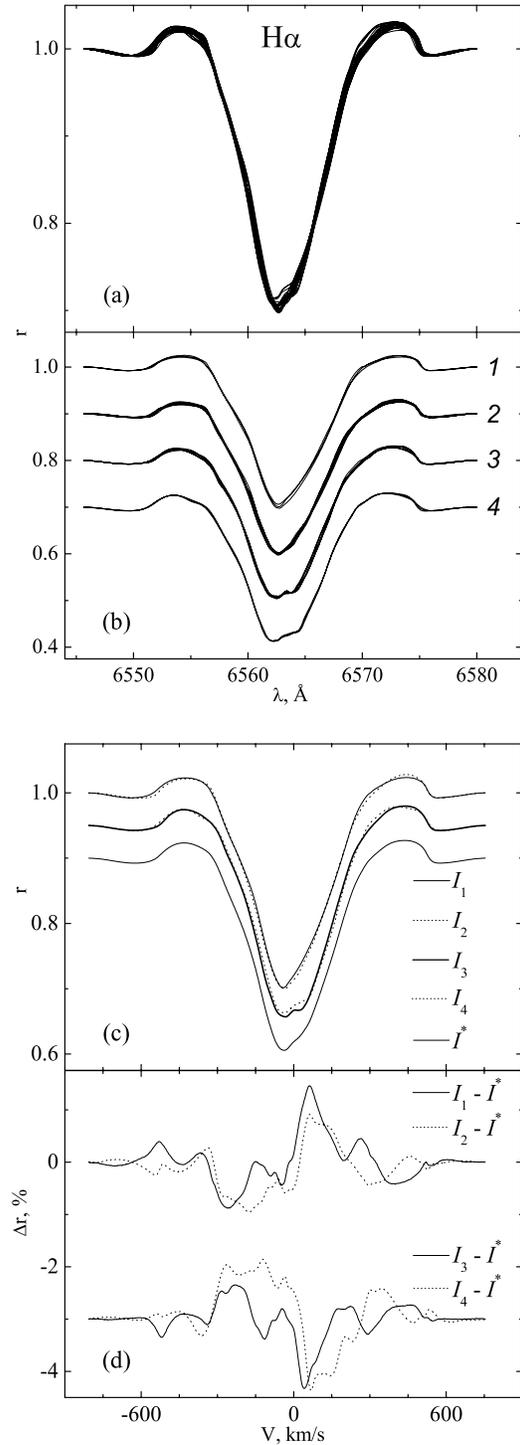


Рис. 1. Переменность профиля линии H α со временем. (a) — наблюдаемые профили в остаточной интенсивности. (b) — группы, сформированные из профилей графика 1(a) по признаку сходства их фотометрических и позиционных характеристик; цифрами указаны номера групп. (c) — средние профили по группам графика (b) I_n и общий средний профиль для данной линии I^* ; индексы указывают номера групп. (d) — разность $I_n - I^*$ в процентах от континуума.

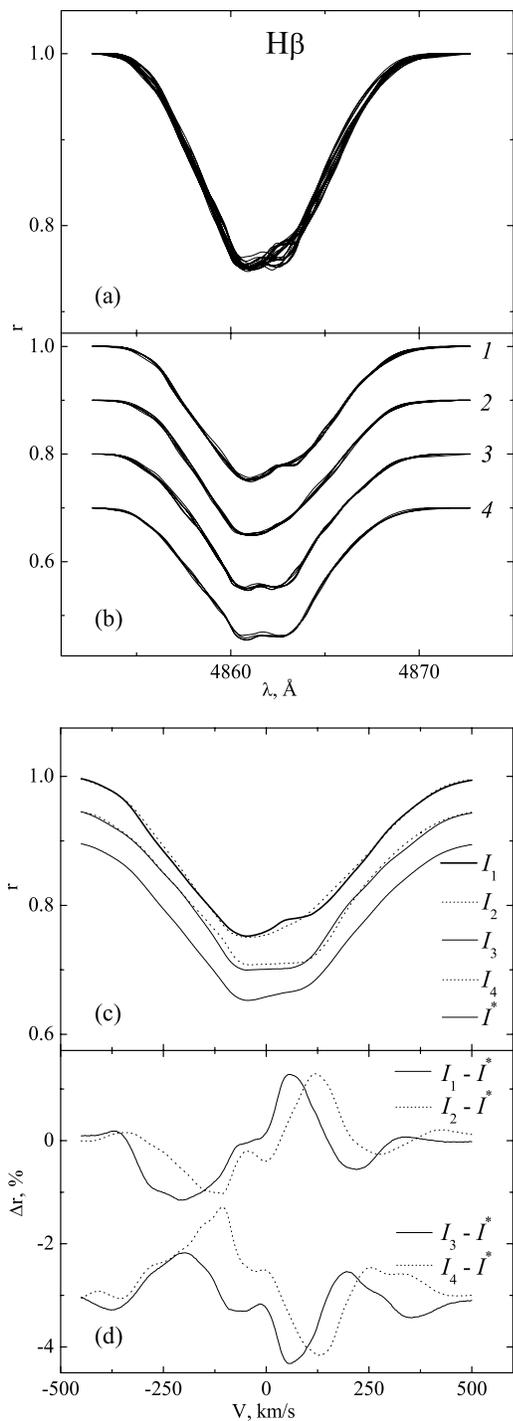


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для линии $H\beta$.

2.1. Переменность профилей

Для выявления картины переменности, из каждого среднего профиля по группе (I_n) вычитался средний профиль I^* по всем профилям линии. Полученные разницы, в процентах от уровня непрерывного спектра, показаны на рис. 1(d), 2(d) и 3(d). Видно, что для всех исследуемых линий

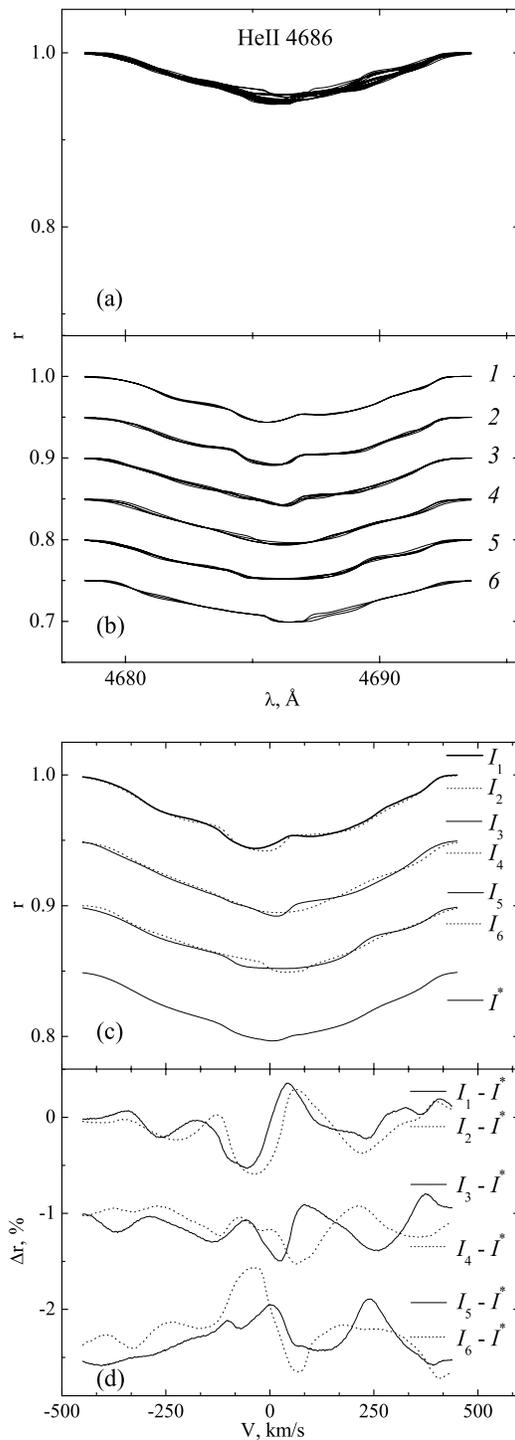


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для линии $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$.

переменность профилей относительно их среднего вызвана квазисинусоидальной волной, которая перемещается по профилям от синего к красному крылу. На крыльях линий эта волна выглядит менее рельефно, а ближе к ядру линии амплитуда колебания становится максимальной. Для линий $H\alpha$, $H\beta$ и $HeII$ амплитуда колебания соответственно состав-

ляет около 2, 3 и 1%. Отметим, что колебания, которые видны на рис. 3(d), с амплитудой около 0.3%, также являются реальными, так как они получены для сглаженных и усредненных профилей линий, которые были зарегистрированы с хорошим разрешением и высоким отношением сигнал/шум.

Влияние колебательного движения на фотометрические параметры линий в целом незначительно. Эквивалентная ширина и центральная остаточная интенсивность исследуемых линий с точностью $\pm 0.02 \text{ \AA}$ и ± 0.005 не изменяются со временем.

2.2. Переменность лучевой скорости

Процедура измерения лучевой скорости отдельно для синей и красной половины профиля абсорбции на разных уровнях описана в [4]. Так как для линий HeII, H β и H α соответственно в течение 28, 38 и 56 минут в пределах ошибок измерений позиционной переменности не наблюдалось, то профили усреднялись в течение этого времени и временная переменность лучевой скорости исследовалась по средним профилям групп (рис. 1(c), 2(c) и 3(c)).

В результате объединения (см. раздел 2) в разные группы вошло разное количество профилей (рис. 1(b), 2(b), 3(b)). Например, для линии H α в первую и последнюю группу вошли по 3 профиля, полученные за первые 14 и последние 22 минуты наблюдений. В зависимости от длительности одной экспозиции и промежутка между экспозициями (см. [4]) во вторую и третью группы вошли соответственно 10 и 8 профилей, полученные за каждые 56 минут наблюдения. Исследования групп показали, что в каждой из них средний по трем профилям, полученным в начале или в конце промежутка времени, вполне идентичен среднему профилю, полученному по всем профилям за 56 минут наблюдений. Такая же картина наблюдается для линий HeII и H β . Поэтому на рис. 4, 5 и 6 на горизонтальной оси, где отмечены моменты середин суммарных экспозиций для каждой группы, отсчитываемые от начала наблюдений для линий HeII, H β и H α , данные отложены соответственно через каждые 28, 38 и 56 минут.

Наши исследования показали, что для всех исследуемых линий на всех уровнях интенсивности изменения лучевой скорости со временем различаются для синей и красной половин профиля. На рис. 4 это показано на примере уровня $0.5R_0$ для линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$. Картины переменности лучевой скорости для линии H β на разных уровнях остаточной интенсивности r с шагом $\Delta r = 0.01$ представлены на рис. 5. Величины r указаны с левой стороны. Вертикальные размеры символов (прямоугольников) отражают ошибки измерений

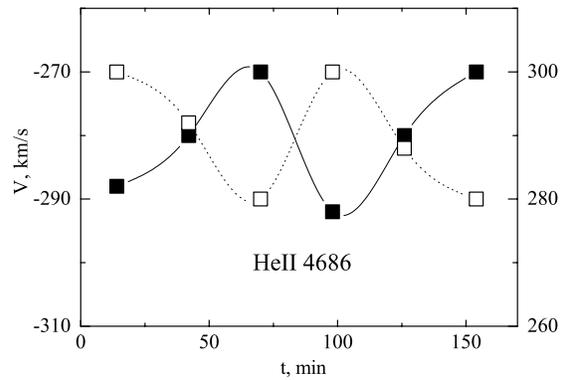


Рис. 4. Переменность лучевой скорости со временем для линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ на уровне $0.5R_0$ отдельно для синей (светлые квадратики) и красной (темные квадратики) половин профиля абсорбции. На горизонтальной оси указаны моменты середин суммарных экспозиций для каждой группы, отсчитываемые от начала наблюдений, т. е. первая точка после 14 минут от начала наблюдения, а остальные через каждые 28 минут. Шкала скорости для синей и красной половин профиля абсорбции отложена соответственно на левой и на правой вертикальных осях. Вертикальные размеры символов отражают ошибки измерений лучевой скорости.

лучевой скорости. Количество уровней для абсорбции линии H α с шагом $\Delta r = 0.01$ получается более 30. Поэтому на рис. 6 (e), (f), (g), (h), (i), (j) для нее приведены картины для области ядра, центральной части и крыла абсорбции, в каждой области для 4–5 уровней r . Из рис. 4, 5 и 6 видно, что на одном и том же уровне r абсолютное значение скорости и его изменение со временем различается для двух половин профиля абсорбции.

На обоих крыльях абсорбции H α наблюдается слабая эмиссия с интенсивностью ≈ 0.03 . Для обеих половин эмиссионных компонентов также были измерены лучевые скорости на разных уровнях r с шагом $\Delta r = 0.005$. Результаты приведены на рис. 6 (a), (b), (c), (d).

На рис. 5 и 6 видно, что для обеих половин профиля абсорбции линий H β и H α картина и амплитуда переменности различаются для разных значений r . Поэтому для определения реальной точности измерения лучевой скорости на уровне $0.5R_0$ была измерена лучевая скорость на соседних уровнях с шагом $\Delta r = \pm 0.005$. Полученные значения лучевой скорости для этих уровней усреднялись и определялись ошибки измерения лучевой скорости. Для слабых (HeII) и сильных линий (H β и H α) они не превышают ± 4.0 и $\pm 2.0 \text{ км/с}$ соответственно.

В случае слабой линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ в течение наблюдательного времени (~ 162 мин) периодичность изменения лучевой скорости очевидна (рис.

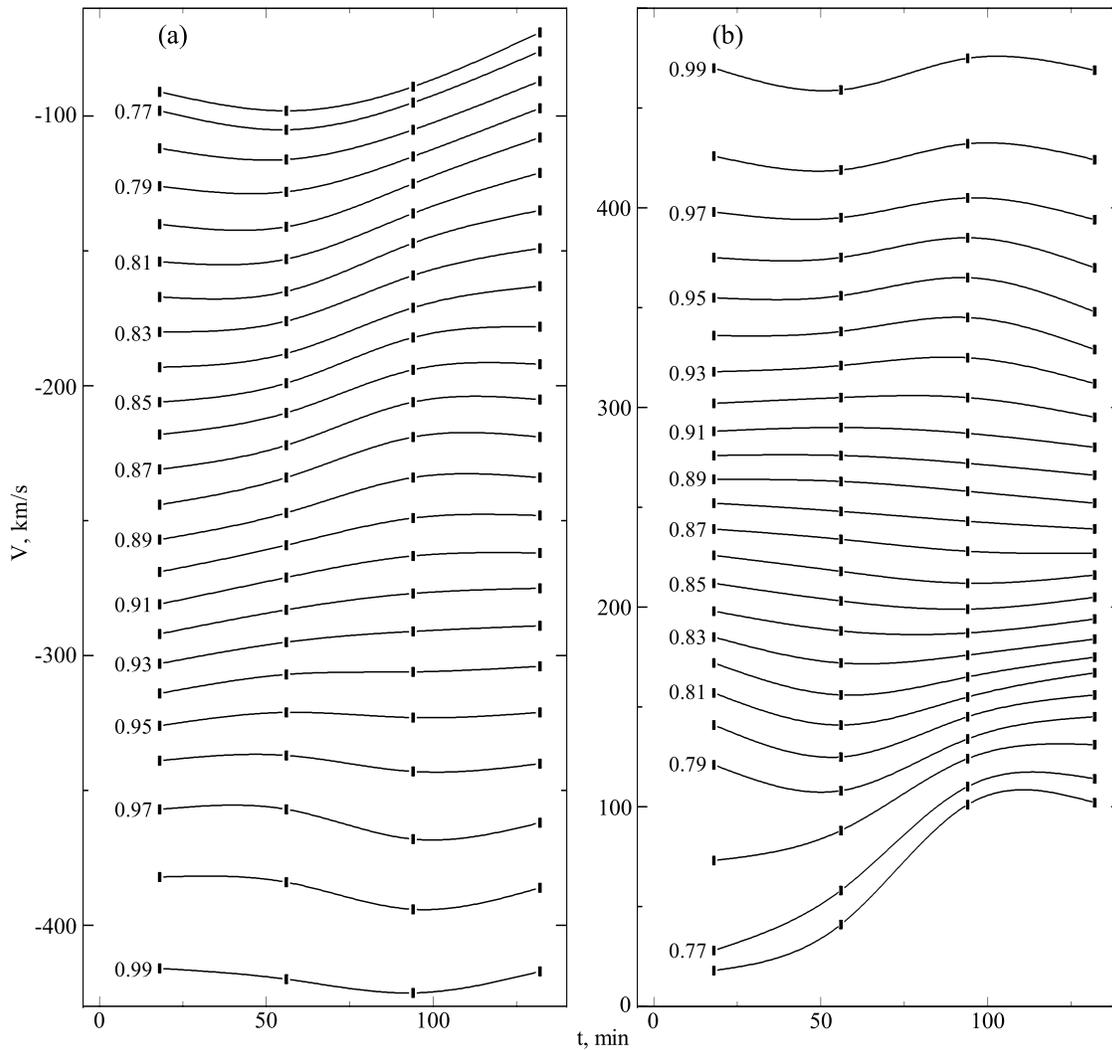


Рис. 5. Переменность лучевой скорости со временем для линии $H\beta$ для синей (а) и красной (б) половин профиля абсорбции на разных уровнях остаточной интенсивности g . Вертикальные размеры символов и горизонтальные оси как на рис. 4, точки нанесены через каждые 38 минут.

4). В случае линии $H\beta$ характерное время переменности лучевой скорости соизмеримо с продолжительностью наблюдений (рис. 5). А в случае линии $H\alpha$, по-видимому, превосходит ее (рис. 6). Но, как видно на рис. 1(с) и 2(с), для линии $H\alpha$ и $H\beta$ кривые $I_3 - I^*$ и $I_4 - I^*$ (если пренебречь некоторыми искажениями) находятся в противофазе с кривыми $I_1 - I^*$ и $I_2 - I^*$. Таким образом, для линий $H\alpha$ и $H\beta$ соответственно в течение $2 \times 56 = 112$ и $2 \times 38 = 76$ минут мы наблюдаем сдвиг колебания на половину цикла. Это указывает на то, что предполагаемый минимальный период переменности для линий $H\alpha$ и $H\beta$ может равняться $4 \times 56 = 224$ и $4 \times 38 = 152$ минутам соответственно. Для оценки параметров колебания лучевой скорости мы предположили, что изменения являются циклическими, т. е. в течение каждых 162 минут ход изменения лучевой скорости повторяет предыдущий цикл.

Наши исследования показали, что параметры переменности лучевой скорости (характерное время и амплитуда) различается для разных уровней g . Поэтому методом гармонического анализа сделан поиск возможных периодов для лучевой скорости, измеренной по синей и красной половинам профиля абсорбции на уровне 0.5 интенсивности линий. Отметим, что для каждой линии поиск возможных периодов осуществлялся как на основе данных о лучевых скоростях, полученных по средним профилям каждой группы, так и по всем профилям этих линий. Результаты поиска, т. е. параметры переменности лучевой скорости, оказались одинаковыми. Поэтому фазовые зависимости лучевой скорости $V_r(\varphi)$ для наглядности на рис. 7 представлены соответственно по 6-ти и 4-ем значениям лучевой скорости для линий $HeII$, $H\beta$ и $H\alpha$. Для линий $HeII$,

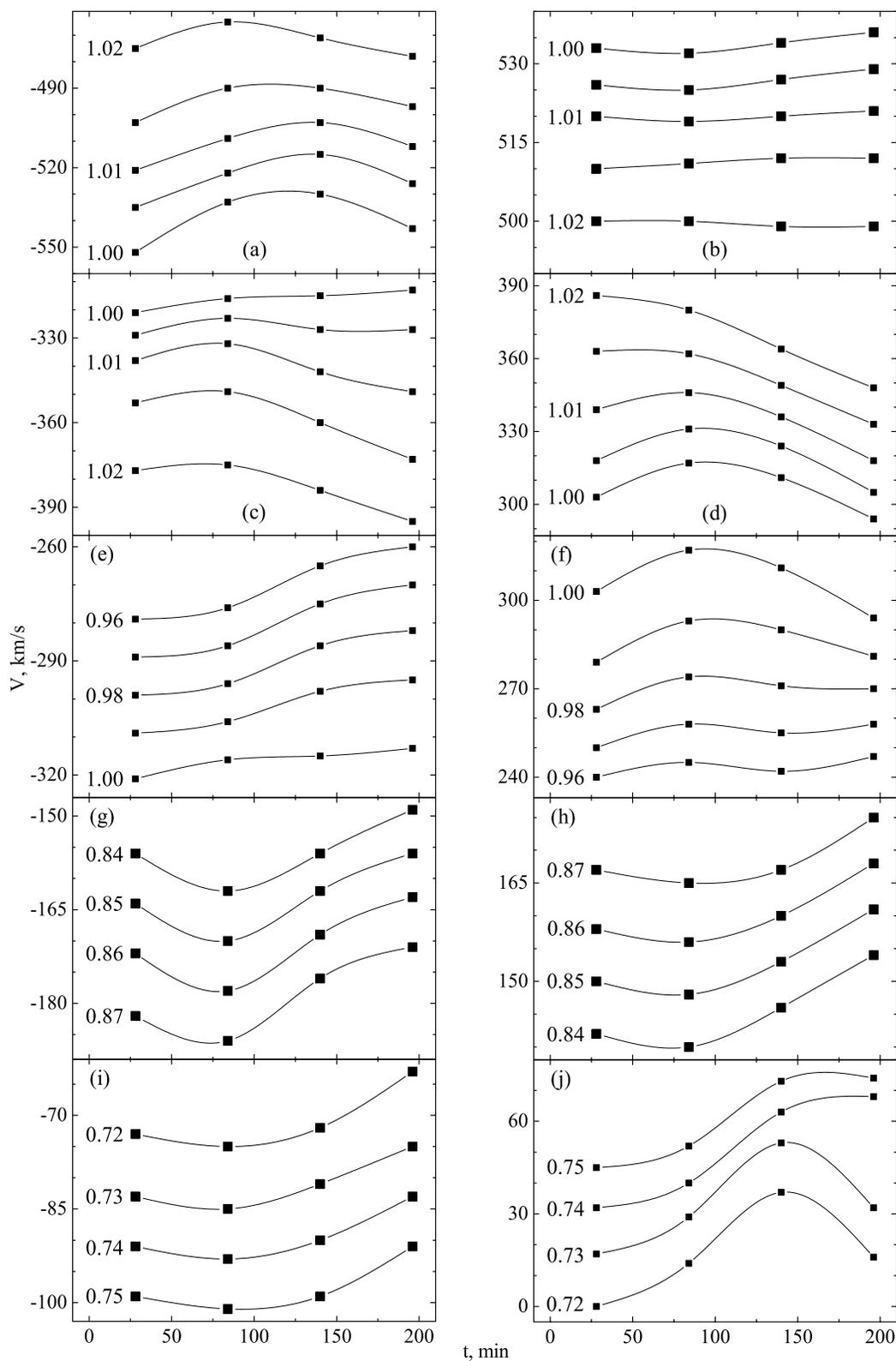


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для линии $H\alpha$. Величины γ указаны рядом с кривыми. (a), (d) — для синих, (c), (b) — для красных половин эмиссионных компонентов. Вертикальные размеры символов и горизонтальные оси как на рис. 4 и 5, точки нанесены через каждые 56 минут.

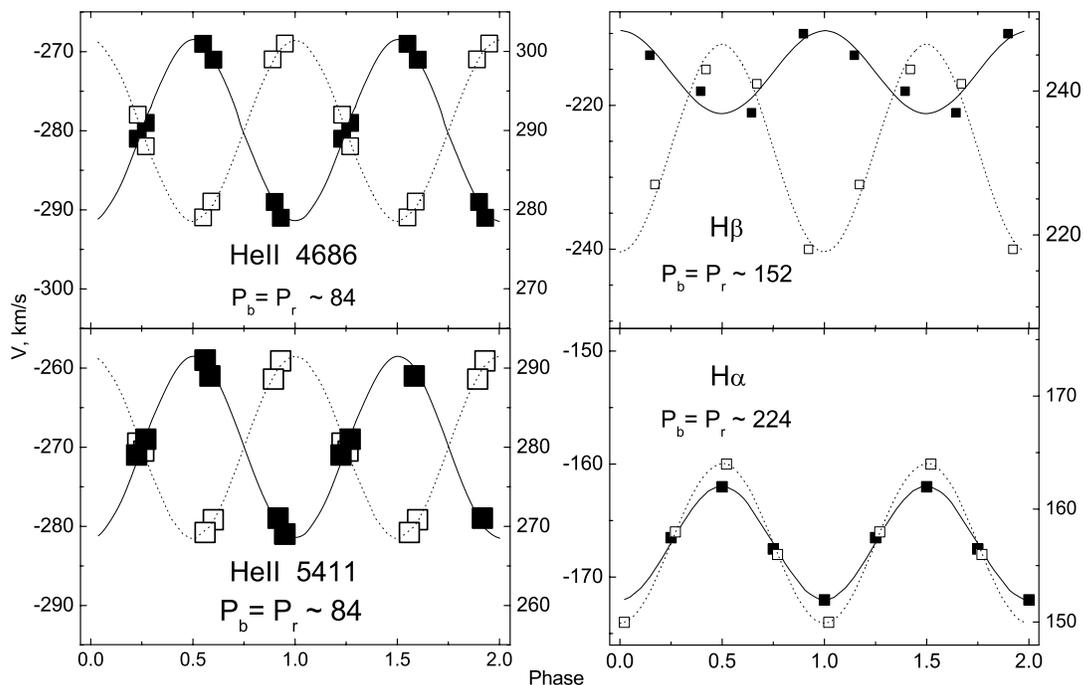


Рис. 7. Фазовые зависимости $V_r(\varphi)$ для синей (светлые квадратики и пунктирная линия) и красной (темные квадратики и сплошная линия) половин профиля исследуемых линий свернутые с периодами, указанными на графиках (в минутах). Шкала лучевой скорости и размеры символов такие же, как на рис. 4.

$H\beta$ и $H\alpha$ ошибки нахождения периодов соответственно составляют ± 3.5 , ± 11.0 и ± 18.0 минут, а амплитуды не превышают ± 5.0 и ± 3.0 и ± 2.0 км/с соответственно. Ошибки определения γ -скорости не превышают ± 5.0 и ± 2.5 км/с для линий HeII и водорода.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество наших спектральных материалов и наш методический подход, в отличие от работ [1, 2], позволили обнаружить наряду с переменностью сильных линий переменность слабых линий HeII в спектре HD 93521. Достигнутое временное разрешение позволило установить, что изменения лучевой скорости и профилей линий HeII, $H\beta$ и $H\alpha$ соответственно происходят через каждые 28, 38 и 56 минут. Переменность всех исследуемых линий относительно их среднего профиля (рис. 1(d), 2(d), 3(d)) имеет одинаковый характер и проявляется в виде синусоидальной волны, систематически перемежающейся по профилям линий от синего крыла к красному. Как в случае линий HeI [4], эти переменности обусловлены нерадиальными пульсациями, что подтверждает результаты предыдущих работ [1, 2].

Гармонический анализ показал, что параметры переменности лучевой скорости различаются для

синей и красной половин профиля линий. В случае линий HeII для обеих половин профиля характерное время и амплитуда переменности лучевой скорости одинаковы, но колебания происходят в противофазе (рис. 7). Следовательно, по лучевым скоростям, измеренным по бисектору абсорбции, мы не должны обнаружить никакой переменности.

Для линий $H\beta$ и $H\alpha$ величины периодов одинаковы, а амплитуды различаются для синей и красной половин профиля абсорбции. Притом в случае линии $H\beta$ для синей половины профиля амплитуда в 2 раза больше, чем для красной. Для $H\alpha$ фаза колебания лучевой скорости для обеих половин профиля одинаковая, а для $H\beta$ противоположная (рис. 7). В случае линий $H\beta$ и $H\alpha$ для обеих половин профиля абсорбции характерное время и амплитуда переменности лучевой скорости также различаются для разных уровней остаточной интенсивности γ .

На обоих крыльях линии $H\alpha$ наблюдается слабая эмиссия. По рис. 6(a), (b), (c), (d) о переменности эмиссионных компонентов можно сказать следующее. Амплитуда переменности максимальна для синей половины профиля синей (т. е. эмиссии на синем крыле абсорбции, рис. 6(a)) и минимальна для красной половины красной (рис. 6b) эмиссии. Характер переменности лучевой скорости обеих половин эмиссий такой же, как и для обеих половин абсорбционного компонента. Это говорит о том, что переменность абсорбционного и эмиссионных

компонентов линии $H\alpha$, по-видимому, обусловлена одними и теми же процессами, т. е. нерадиальными пульсациями. Следовательно, переменность звездного ветра частично обусловлена нерадиальными пульсациями нижележащих слоев атмосферы.

Следует отметить, что аналогичные результаты были получены при исследовании переменности лучевой скорости линий $H\beta$ и $H\alpha$ в спектре сверхгиганта α Cyg [5, 6]. Было показано, что переменность лучевой скорости и, следовательно, переменность указанных линий обусловлены нерадиальными пульсациями. Параметры переменности лучевой скорости различаются для синей и красной половин профиля абсорбции, а также различаются для разных уровней остаточной интенсивности τ .

Все это требует, чтобы исследования переменности со временем лучевой скорости осуществлялись на конкретно фиксированном уровне τ и отдельно для синей и красной половины профиля линий. В таких случаях измерение лучевой скорости кросс-корреляционным методом не всегда может быть целесообразным. Все это говорит о том, что наш методический подход позволяет выявлять новые интересные особенности в картине переменности линий и по отдельности изучать кинематику поднимающихся и опускающихся слоев атмосферы.

В общем, наши исследования подтверждают результаты работ [1, 2], что переменность линий в спектре HD 93521 обусловлена нерадиальными пульсациями. А наш методический подход позволяет изучать переменность звездного ветра в раз-

ных областях его зарождения и выявляет некоторые интересные особенности этих переменностей. В частности, что картины переменности и кинематика ветра для разных областей атмосферы и/или оболочки различаются.

Таким образом, нами показано, что при наличии нерадиальных пульсаций для выявления реальной картины переменности лучевой скорости линий и поля скоростей в атмосфере звезды необходимо исследовать переменность лучевой скорости отдельно для синей и красной половин профиля линий и на разных уровнях их остаточной интенсивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. W. Fullerton, D. R. Gies, C. T. Bolton *Pulsation, Rotation and Mass Loss in Early-type Stars*, IAU Simp. No. 162, eds. L. A. Balona, H. F. Henrichs, J. M. Le Contel (Kluwer Acad. Publ., 1994), p. 114.
2. I. D. Howarth, A. H. N. Reid, *Astron. Astrophys.* **279**, 148 (1993).
3. I. D. Howarth, R. H. D. Townsend, M. J. Clayton, et. al., *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **296**, 949 (1998).
4. А. Х. Рзаев, В. Е. Панчук, *Астрон. журн.*, **83**, 36 (2006).
5. А. Х. Рзаев, *Астрофиз. Бюлл.* **62**, No. 1, 52 (2007).
6. А. Х. Рзаев, *Астрофиз. Бюлл.* **63**, No. 1 (2008) (в печати).

SOME FEATURES OF THE RADIAL-VELOCITY VARIATIONS OF LINES OF DIFFERENT INTENSITY IN THE SPECTRUM OF HD 93521. VARIABILITY OF THE STELLAR WIND

A. Kh. Rzaev

CCD spectra taken with the PFES echelle spectrograph of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences are used to perform a detailed study of the variability of the profiles of HeII, $H\beta$, and $H\alpha$ lines in the spectrum of HD 93521. The pattern and nature of the variability of the HeII lines are similar to those of weak HeI lines and are due to nonradial pulsations. The period and amplitude of the radial-velocity variations are the same for the blue and red halves of the absorption profile but their phases are opposite. The behavior of the variations of $H\beta$ and $H\alpha$ hydrogen lines relative to their mean profiles is the same as that of strong HeI line and is due to nonradial pulsations. The period and phase of the radial-velocity oscillations are the same for the blue and red halves of the absorption profile but their amplitude are different. The behavior of the radial-velocity variations of the absorption and emission components of the $H\alpha$ line indicates that the latter also are caused by nonradial pulsations. All this is indicative of the complex structure of the stellar wind in the region of its origin. The behavior of variability and wind kinematics differ in different directions and for different regions of the atmosphere and/or envelope.