

УДК 524.312.3-56

# НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕННОСТИ ПОЗИЦИОННЫХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ HD 93521. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ ЗВЕЗДЫ

© 2008 А. Х. Рзаев<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Шамахинская астрофизическая обсерватория, п. Ю. Мамедалиева, 373243 Азербайджан

Поступила в редакцию 16 января 2008 г.; принята в печать 4 февраля 2008 г.

По ПЗС-спектрам, полученным на эшелле-спектрографе PFES 6-м телескопа САО РАН, исследована переменность фотометрических и позиционных характеристик линий в спектре звезды HD 93521. Для исследования поля скоростей в атмосфере звезды переменность лучевой скорости измерялась отдельно для синей и красной половин профиля абсорбции на разных уровнях остаточной интенсивности линий. Амплитуда и фаза переменности лучевой скорости со временем различаются для двух половин профиля абсорбции. У сильных линий HeI, H $\beta$  и H $\alpha$  для обеих половин профиля абсорбции наблюдается зависимость амплитуды от интенсивности  $r$ . Характерные времена переменности лучевой скорости ( $P$ ) и средние величины полуширин  $\overline{FWHM}$  различаются для разных линий и хорошо коррелируют с их центральными глубинами. Увеличение  $P$  и уменьшение  $\overline{FWHM}$  от слабых к сильным линиям вызваны дифференциальным вращением звезды. Исследование показало, что HD 93521 — убегающая звезда и ее нахождение над плоскостью Галактики на расстоянии порядка 2.0 кпк связано с этим.

Key words: звезды — переменные и пекулярные

## 1. ВВЕДЕНИЕ

HD 93521 — яркая ( $V = 7.04$ ) быстровращающаяся ( $v \sin i \approx 430$  км/с) звезда, спектрального класса O9.5 V, принадлежащая к населению I типа. Она находится на расстоянии около 2 кпк над плоскостью Галактики [1, 2]. Исследования динамических спектров выявили причину переменности профилей линий в спектре этой звезды: она вызвана систематическими перемещениями темных и светлых полос по профилям линий с коротковолнового на длинноволновое крыло. Количественный анализ динамических спектров и модельные расчеты показали, что эта переменность обусловлена нерадиальными пульсациями [2–4].

До сих пор некоторые вопросы остаются невыясненными.

Переменность линий HeI  $\lambda$  5876 Å, H $\beta$  и H $\alpha$  отличается от переменности других линий HeI. Авторы [2, 4] связывали это с процессами в околозвездной оболочке.

В отличие от HeI линии HeII не показывают заметной переменности. Это связывали с высокой скоростью вращения звезды ( $v \sin i \approx 400$  км/с),

которая приводит к градиенту эффективной температуры и гравитации от экватора к полюсу, т.е. звезда более холодная на экваторе. Линии HeII формируются на горячих полюсах, а переменности, которые возникают на экваторе отражаются на линиях HeI [2].

Используя модель двухкомпонентного ветра, в работе [5] были рассчитаны теоретические профили линий в УФ-диапазоне спектра HD 93521. Было показано, что если звезда имеет наклон оси вращения к лучу зрения около 90° и окружена диском, полуширина которого составляет 3° по широте звезды, то с помощью модели двухкомпонентного ветра со скоростями –1500, и от –250 до –400 км/с для полюсов и экватора соответственно можно получить все наблюдаемые особенности (аномалии) профилей резонансных линий на больших отрицательных скоростях ( $V \leq -400$  км/с). Но авторы затруднились объяснить изменение красного края абсорбции и структуры ядра абсорбции (гладкое и раздвоенное ядро) на малых скоростях ( $-150 \leq V \leq 200$  км/с). Они пришли к выводу, что раздвоение ядра абсорбции и появление “эмиссии” между этими двумя ядрами, по-видимому, связано с межзвездной абсорбцией, наблюдаемой в направлении HD 93521.

\*E-mail: abid@sao.ru

В наших недавних работах [6–8] была исследована переменность линий HeII, HeI, H $\beta$  и H $\alpha$  в спектре HD 93521. В общем были подтверждены результаты, полученные в предыдущих работах [2–4]. Картина переменности линий относительно их среднего отображается в виде синусоидальной волны, систематически перемещающейся по профилям линий от синего крыла к красному. Эта переменность обусловлена нерадиальными пульсациями и для всех исследованных линий (от слабых HeII до H $\alpha$ ) характер переменности одинаковый.

Наши исследования также показали, что в атмосфере HD 93521, где доминирует нерадиальная пульсация, классический метод исследования переменности лучевой скорости со временем (т.е. по лучевой скорости бисектора абсорбции) не подходит. Для изучения стратификации лучевой скорости в атмосфере необходимо исследовать переменность лучевой скорости отдельно для синей и красной половин профилей линий на разных уровнях интенсивности  $r$ . Такой методический подход показал, что для конкретной линии амплитуда и/или фаза переменности лучевой скорости различаются для двух половин профиля абсорбции. А характерные времена и амплитуды переменности различаются для разных линий и хорошо коррелируют с их центральными глубинами. При переходе от слабых линий к сильным (т.е. от нижних слоев атмосферы к верхним) период изменения лучевой скорости, измеренный по обеим половинам профиля абсорбции, увеличивается, а амплитуда уменьшается [6, 7].

Еще два момента в исследовании этой звезды требуют уточнения. Первый — соотношение полуширин разных линий. Ирвин [1] обнаружил, что линии HeI существенно шире, чем линия H $\alpha$ . Ховарт и Рейд [2] отметили, что полуширина линии H $\alpha$  намного меньше, чем у HeI  $\lambda$  5876 Å, а последняя значительно уже, чем другие линии HeI. Второй момент связан с нахождением звезды над плоскостью Галактики (около 2 кпк). Ховарт и Рейд [2], основываясь на своих собственных измерениях и привлекая предыдущие данные, нашли, что лучевая скорость фотосферных линий составляет  $-15.1 \pm 1.9$  км/с. Используя данные о расстоянии, лучевой скорости центра массы звезды и оценив ее пространственное движение, они пришли к заключению, что, возможно, звезда образовалась над плоскостью Галактики.

В настоящей статье на основе детального исследования переменности линий даются возможные ответы на вышеперечисленные вопросы.

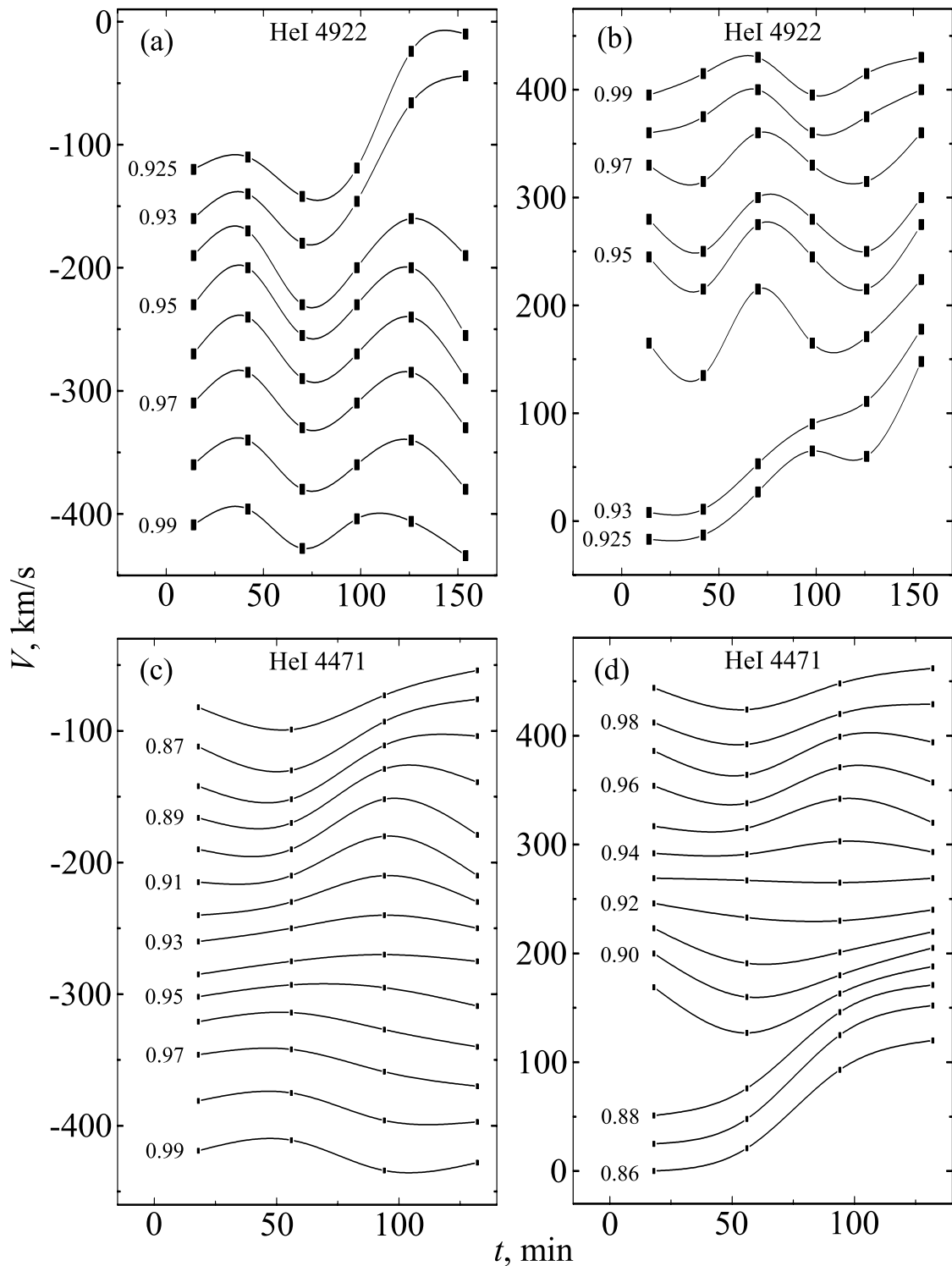
## 2. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПОЗИЦИОННЫХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНИЙ

Процедура измерения лучевой скорости отдельно для синей и красной половин профиля абсорбции описана в работе [6]. Как было отмечено, такая необходимость связана с тем, что для большинства исследуемых линий амплитуда и/или фаза переменности лучевой скорости различались для этих половин. Параметры, найденные методом гармонического анализа, приведены в таблице. Изученные линии перечислены в первом столбце таблицы, во втором — их центральные глубины ( $R_0 = 1 - r_0$ ). В трех следующих столбцах приведены параметры колебаний, найденные по лучевой скорости, измеренной по бисектору, синей и красной половинам профиля абсорбции на уровне 0.5  $R_0$  линий. Разность фаз колебаний лучевой скорости ( $\Delta\varphi$ ) для синей и красной половин профиля линий приведена в последнем столбце.

В работе [8] было показано, что в случаях линий H $\beta$  и H $\alpha$  для обеих половин профиля абсорбции картины переменности лучевой скорости различались также для разных уровней остаточной интенсивности линий  $r$ . На примере слабой линии HeI  $\lambda$  4922 Å и сильной линии HeI  $\lambda$  4471 Å для разных уровней  $r$  (с шагом  $\Delta r = 0.010-0.005$ ) эти картины приведены на Рис. 1, где величины  $r$  отмечены цифрами слева.

Нами также было обнаружено [6, 7], что существенные изменения профилей слабых линий HeI  $\lambda$  4713, 4922, 5015, 7065 Å и HeII  $\lambda$  4686, 5411 Å, происходят каждые 28 минут, а сильных линий HeI  $\lambda$  4471, 5876, 6678 Å и линии H $\beta$  — каждые 38 минут. В течение указанных промежутков времени изменение позиционных и фотометрических характеристик линий в пределах ошибок измерений не наблюдается. Поэтому профили, полученные в течение этих промежутков времени, были усреднены и объединены в группы. В течение наблюдательного времени для слабых и сильных линий были соответственно получены 6 и 4 группы профилей. Поэтому, как и в предыдущих работах [6, 7], на Рис. 1 представлены изменения лучевых скоростей, средних для групп. Моменты середин суммарных экспозиций для каждой группы, отсчитываемые от начала наблюдений, отложены соответственно через каждые 28 и 38 минут.

На Рис. 1 видно, что на одинаковых уровнях  $r$  картина переменности лучевой скорости различается для разных половин профиля абсорбции. Для обеих половин профиля как картина, так и амплитуда переменности различаются для разных уровней  $r$ . Это особенно заметно у сильных линий HeI, H $\beta$  и H $\alpha$ . Для этих линий зависимость амплитуды от  $r$  для обеих половин профиля абсорбции



**Рис. 1.** Переменность лучевой скорости со временем для слабой ( $\lambda 4922 \text{ \AA}$ ) и сильной HeI ( $\lambda 4471 \text{ \AA}$ ) линий. Измерение лучевой скорости проводилось отдельно для синей (а, с) и красной (b, d) половин профиля абсорбции на разных уровнях остаточной интенсивности  $r$ , значения которых указаны слева. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений. На горизонтальных осях точки нанесены через каждые 28 и 38 минут для HeI  $\lambda 4922$  и  $4471 \text{ \AA}$  соответственно (см. текст).

**Таблица.** Параметры изменения со временем лучевой скорости для бисектора, синей и красной половин профиля абсорбции на уровне 0.5 глубины линий, и средняя полуширина ( $\overline{FWHM}$ ) линий, найденные методом гармонического анализа. Период (P) — в минутах, остальные параметры (кроме  $\Delta\varphi$ ) — в км/с. Ошибки нахождения параметров приведены в тексте.

Линия	$R_0$	Бисектор			Синяя половина			Красная половина			$\overline{FWHM}$	$A_{(FWHM)}$	$\Delta\varphi$
		P	A	$\gamma$	P	A	$\gamma$	P	A	$\gamma$			
HeII 5411	0.04	—	—	40.0	84.0	20.0	-240.0	84.0	20.0	320.0	560.0	40.0	0.5
HeII 4686	0.05	—	—	40.0	84.0	20.0	-245.0	84.0	20.0	325.0	570.0	40.0	0.5
HeI 5015	0.06	84.0	40.0	40.0	84.0	40.0	-200.0	84.0	40.0	280.0	480.0	0	0
HeI 4922	0.08	84.0	10.0	40.0	84.0	40.0	-240.0	84.0	40.0	320.0	560.0	80.0	0.5
HeI 7065	0.10	112.0	25.0	30.0	112.0	40.0	-255.0	112.0	40.0	315.0	570.0	50.0	0.75
HeI 6678	0.12	152.0	25.0	-5.0	152.0	45.0	-265.0	152.0	55.0	255.0	520.0	80.0	0.2
HeI 4471	0.15	152.0	9.0	20.0	152.0	30.0	-225.0	152.0	11.0	265.0	490.0	35.0	0.5
HeI 5876	0.23	152.0	9.0	-5.0	152.0	35.0	-225.0	152.0	25.0	215.0	440.0	55.0	0.5
H $\beta$	0.25	152.0	9.0	10.0	152.0	30.0	-220.0	152.0	13.0	240.0	460.0	40.0	0.5
H $\alpha$	0.30	224.0	9.0	-5.0	224.0	14.0	-165.0	224.0	11.0	155.0	320.0	4.0	0

приведена на Рис. 2. Видно, что для обеих половин профиля абсорбции при некоторых значениях  $r$  амплитуда переменности лучевой скорости имеет минимальное значение.

Наши исследования показали, что полуширина ( $FWHM$ ) линий также меняется со временем. Параметры переменности  $FWHM$  (период, амплитуда и среднее значение, найденные методом гармонического анализа) различаются для разных линий и коррелируют с их центральными глубинами. Для всех линий период переменности  $FWHM$  совпадает с периодом переменности лучевой скорости (см. табл.). Средние величины  $\overline{FWHM}$  и амплитуды переменности  $A_{(FWHM)}$  для исследуемых линий приведены в таблице. На Рис. 3 по данным таблицы представлена зависимость  $\overline{FWHM}$  линий от их центральных глубин. Для наглядности разные группы линий представлены разными символами. Рис. 3 показывает, что в спектре HD 93521 по мере увеличения интенсивности линий их  $FWHM$  уменьшается.

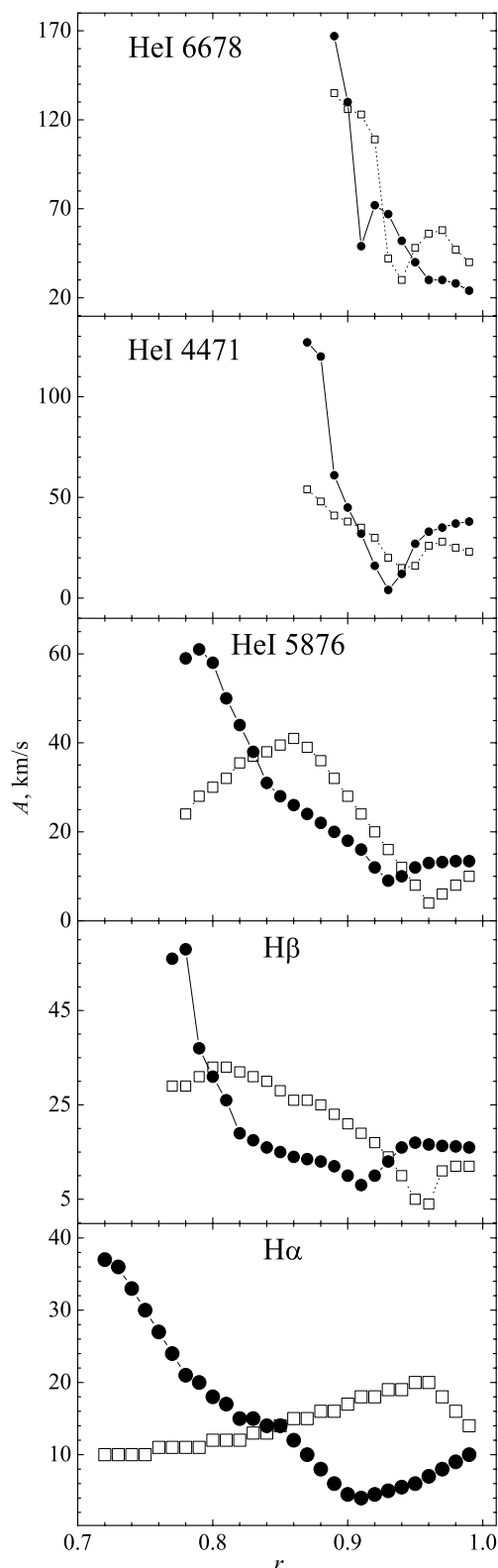
### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Наш методический подход выявил интересные особенности в картине переменности линий. Для большинства исследованных линий на одинаковых уровнях  $r$  амплитуда и фаза переменности лучевой скорости различаются для синей и красной половин профилей линий. Как видно из таблицы, в случае линий HeII для обеих половин профиля

характерное время и амплитуда переменности лучевой скорости одинаковы, но колебания происходят в противофазе. Следовательно, по лучевым скоростям, измеренным по бисектору абсорбции, мы не должны обнаружить никакой переменности. В случае линии HeI  $\lambda$  5015 Å средняя полуширина  $\overline{FWHM} = 480$  км/с, что значительно меньше чем у других слабых линий HeI  $\lambda$  4922 и 7065 Å (см. Рис. 3 и табл.). Это связано с тем, что у этой линии колебания лучевой скорости, определенные по синей и красной половинам профиля абсорбции, происходят в одной фазе и с одинаковой амплитудой. В пределах ошибок наших измерений  $FWHM$  этой линии не меняется со временем.

Различие амплитуды и фазы переменности лучевой скорости для двух половин профиля линий приводит к тому, что в случае бисектора линий мы не получаем корреляцию между величиной амплитуды (а также для  $A_{(FWHM)}$ ) и интенсивностью линий. Но для обеих половин профиля линий при переходе от слабых к сильным линиям амплитуда лучевой скорости уменьшается (см. табл.). Большие амплитуды у слабых фотосферных линий HeI могут свидетельствовать о том, что процессы, которые возбуждают нерадиальные пульсации, происходят в подфотосферных слоях. К верхним слоям атмосферы амплитуда уменьшается.

У всех исследуемых линий для обеих половин профиля абсорбции картина и амплитуда переменности лучевой скорости различаются для разных уровней интенсивности  $r$  (Рис. 1). Для сильных



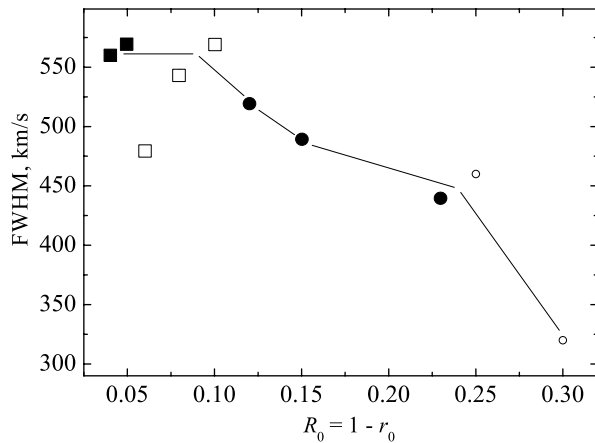
**Рис. 2.** Изменение амплитуды переменности лучевой скорости для синей (светлые квадратики) и красной (темные кружки) половин профиля абсорбции на разных уровнях остаточной интенсивности линий.

линий в области ядра амплитуда максимальна. Затем она уменьшается до минимального значения и далее увеличивается в направлении крыла линии (Рис. 2). Это говорит о том, что эти линии формируются в протяженных слоях атмосферы. И наш методический подход позволяет выявлять стратификацию лучевой скорости на протяжении этих слоев. Отметим, что аналогичная зависимость наблюдается в спектре сверхгиганта  $\alpha$  Cyg для линий  $H\beta$  и  $H\alpha$  [9, 10]. Как было показано, в атмосфере  $\alpha$  Cyg эти линии формируются в слоях, где истекает звездный ветер, и их переменность также обусловлена нерадиальными пульсациями. Возможно, такая  $A(r)$  зависимость (Рис. 2) характерна для верхних слоев атмосферы, где доминируют нерадиальные пульсации и начинает истекать звездный ветер.

На Рис. 2 видно, что зависимости различаются для двух половин профилей линий. Для красной половины профиля линий минимальная амплитуда наблюдается при меньших величинах  $r$  (в среднем около 0.92), чем для синей половины (около 0.95). Таким образом, наш методический подход позволяет изучать различающуюся кинематику поднимающихся и опускающихся слоев атмосферы, выявить новые интересные особенности в картине переменности линий, подтверждение и объяснение которых требует дальнейших наблюдений.

Таким образом, в случае звезды HD 93521 при исследовании переменности лучевой скорости важно, на каком уровне интенсивности линий были проведены измерения (Рис. 2). В этом случае реальные ошибки измерения могут быть больше ошибок измерений теллурических и межзвездных линий. Последние не превышали  $\pm 1.0$  км/с [6]. Для определения точности измерения лучевой скорости на уровне  $0.5R_0$  линий нами была измерена лучевая скорость на соседних уровнях с шагом  $\Delta r = \pm 0.005$ . Полученные лучевые скорости для этих уровней усреднялись и определялись ошибки измерения. Для слабых (HeI и HeII) и сильных линий (HeI,  $H\beta$  и  $H\alpha$ ) они не превышают  $\pm 4.0$  и  $\pm 2.0$  км/с соответственно. Также были уточнены ошибки нахождения параметров переменности лучевой скорости. Для найденных значений периодов 84.0, 112.0, 152.0, 224.0 ошибки составляют 3.5, 8.0, 11.0 и 18.0 минут. Ошибки как амплитуды, так и  $\gamma$ -скорости для сильных и слабых линий не превышают  $\pm 5.0$  и  $\pm 2.5$  км/с соответственно.

Наши измерения показали, что средняя  $\gamma$ -скорость по слабым фотосферным линиям (включая и HeII) составляет  $40.0 \pm 5.0$  км/с (см.табл.). К верхним слоям эта скорость уменьшается и для линий HeI  $\lambda$  7065, 4471 Å и  $H\beta$  она соответственно равна 30, 20 и 10 км/с. Положительная скорость около 80 км/с была отмечена и



**Рис. 3.** Зависимость  $\overline{FWHM}$  линий от их центральных глубин по данным таблицы. Линии HeII — темные квадратики, слабые линии HeI — светлые квадратики; сильные линии HeI — темные кружки, H $\beta$  и H $\alpha$  — светлые кружки. Размеры символов отражают ошибки измерений  $\overline{FWHM}$ .

в работе [1]. Но, как было сказано, эта скорость недостаточна для того, чтобы звезда в течение своего существования преодолела расстояние около 2.0 кпк.

Отметим, что асимметрия профиля линий сильно меняется. Для всех исследованных фотосферных линий на уровнях  $r = 0.98$  и  $r = 0.99$  величина лучевой скорости, определенная по бисектору абсорбции, составляла около 80 и 100 км/с соответственно. На уровне  $r = 1.0$ , где проведение точных измерений очень сложно, эта скорость возрастает до 180–250 км/с. Это только составляющая часть скорости, а реальная скорость “убегания” звезды может быть в несколько раз больше. Для преодоления расстояния около 2.0 кпк даже со скоростью  $V \approx 250$  км/с ей понадобилось бы примерно  $7.5 \times 10^6$  лет, что вполне реально при продолжительности ее жизни на главной последовательности около  $(8-10) \times 10^6$  лет [11, 12].

### 3.1. Дифференциальное вращение

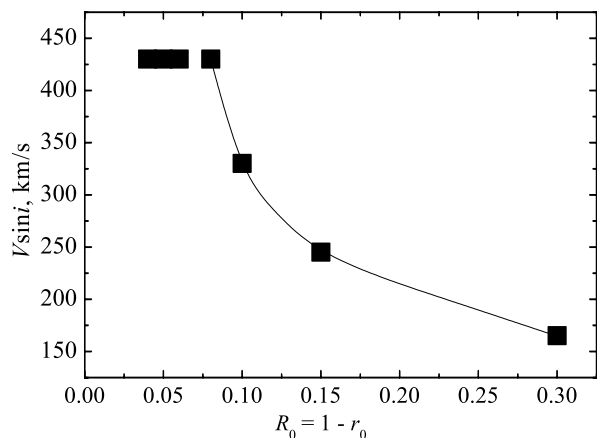
Как было сказано выше, переменность линий обусловлена нерадиальными пульсациями и проявляется в виде синусоидальной волны, систематически перемещающейся по профилям линий от их синего крыла к красному. Наши исследования показали, что разность фаз ( $\Delta\varphi$ ), приведенная в последнем столбце таблицы, связана как с отношением  $\overline{FWHM}$  к длине синусоидальной волны, так и с дифференциальным вращением звезды. В случае линий HeI  $\lambda 5015 \text{ \AA}$  и H $\alpha$  разность фаз равна нулю. По  $\overline{FWHM}$  этих линий (см. табл.) мы нашли длину

синусоидальной волны, она составляет примерно 160 км/с.

Ховарт и Рейд [2] по динамическим спектрам нашли, что “суперпериод” этой звезды равен  $mP = 16.2 \pm 2$  ч, где  $m = 9 \pm 1$  — число темных и светлых полос (по всей окружности звезды), а  $P = 1.8$  ч — их периодичность. На наших спектрах крылья слабых линий HeI и HeII в среднем простираются примерно на  $\pm 450$  км/с [6, 7]. Поэтому в нашем случае число синусоид по всему профилю линии должно быть  $900 : 160 \approx 5.6$ , а по всей окружности звезды  $(11-12) \pm 1$ . Величина периода для слабых линий составляет  $84.0 \pm 3.5$  мин. Следовательно, “суперпериод” должен быть в пределах  $15.3-16.8 \pm 1.0$  ч, что хорошо согласуется с найденным в [2]. Это свидетельствует о том, что найденная нами длина синусоидальной волны ( $L$ ) и, следовательно, характерное время переменности для линии H $\alpha$  соответствуют действительности.

Отметим, что общая продолжительность наших наблюдений (около 148 мин) для слабых линий HeII  $\lambda 5411$ ,  $4686 \text{ \AA}$  и HeI  $\lambda 4922$ ,  $5015$  и  $7065 \text{ \AA}$  охватывала 1.5–2.0 периода. В случае сильных линий HeI  $\lambda 4471$ ,  $5876$ ,  $6678 \text{ \AA}$  и H $\beta$  характерное время переменности лучевой скорости соизмеримо с продолжительностью наблюдений, а в случае линии H $\alpha$  превосходит ее (см. табл.). Поэтому величины периодов для слабых линий, найденные методом гармонического анализа, более достоверны, чем для сильных линий, и составляют  $84.0 \pm 3.5$  мин. Следовательно, эти линии формируются в слоях (в дальнейшем будем называться их “нижние слои атмосферы”), которые вращаются с одинаковой скоростью. Это означает, что  $\Delta\varphi$  определяется только отношением  $\overline{FWHM}/L$  и составляет  $\sim 0.5$  для линий HeII  $\lambda 5411$ ,  $4686 \text{ \AA}$  и HeI  $\lambda 4922 \text{ \AA}$ . Эти оценки  $\Delta\varphi$  совпадают с величинами, найденными по наблюдениям (см. табл.). Для линии HeI  $\lambda 7065 \text{ \AA}$  величина периода составляет порядка 112 мин. Следовательно, по нашим предположениям, эта линия формируется в слоях, где скорость вращения в  $112 : 84 \approx 1.3$  раз меньше, чем скорость вращения нижних слоев атмосферы. Иначе говоря, для этих слоев длина синусоидальной волны составляет  $160 : (112 : 84) \approx 120$  км/с и разность фаз должна быть  $570 : 120 = 4.75$ , т.е.  $\Delta\varphi \approx 0.75$ , что хорошо совпадает с данными таблицы.

Для сильных линий HeI и H $\beta$  предполагаемые периоды были определены по переменности профилей относительно их среднего [6, 7] и составляли примерно  $152 \pm 11$  мин. Как было отмечено, величины периодов для этих линий могут различаться. Наши исследования показали, что только в случае линии HeI  $\lambda 4471 \text{ \AA}$  это значение

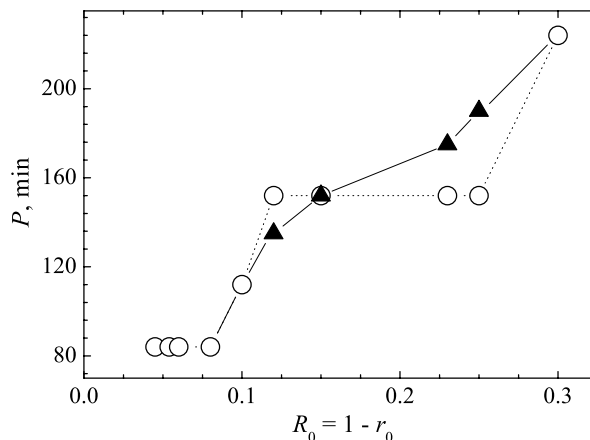


**Рис. 4.** Скорость вращения для разных слоев атмосферы, где формируются линии разной интенсивности. По горизонтальной оси отложены центральные глубины линий по данным таблицы. Для слабых линий (т.е. для нижних слоев атмосферы) принято  $V \sin i \approx 430$  км/с из работы [13].

соответствует действительности. По нашим предположениям, скорость вращения слоев, где формируется эта линия, должна быть в  $152 : 84 = 1.8$  раз меньше, чем скорость вращения нижних слоев атмосферы. Следовательно разность фаз должна составлять  $(490 : (160 : 1.8)) \approx 5.5$ , что соответствует найденному по наблюдениям  $\Delta\varphi \approx 0.5$  (см. табл.). В случае линии  $H\alpha$  для значения периода  $P = 224 \pm 18$  мин. и разности фаз  $\Delta\varphi \sim 0.0$  скорость вращения соответствующих слоев должна быть в  $224 : 84 \approx 2.7$  раз меньше, чем для нижних слоев атмосферы.

Таким образом, увеличение периода от слабых к сильным линиям обусловлено дифференциальным вращением звезды. Скорость вращения слоев, где формируются линии  $HeI \lambda 7065, 4471 \text{ \AA}$  и  $H\alpha$  соответственно в 1.3, 1.8 и 2.7 раза меньше, чем для нижних слоев атмосферы, где формируются слабые линии  $HeII$  и  $HeI \lambda 5015$  и  $4922 \text{ \AA}$ . Эта зависимость показана на Рис. 4, где по горизонтальной оси отложены центральные глубины линий по данным таблицы, а по вертикали — найденные скорости вращения слоев, в которых формируются эти линии. Для нижних слоев атмосферы принято значение  $V \sin i \approx 430$  км/с [13]. Так как для этой звезды  $\sin i \approx 1$  [5, 14, 15], то можно сказать, что в атмосфере HD 93521 скорость вращения слоев уменьшается от величины  $V \sin i \approx 430$  (для нижних слоев) до  $V \sin i \approx 160$  км/с (для верхних слоев, где формируется линия  $H\alpha$ ).

По Рис. 4 скорости вращения слоев, где формируются линии  $HeI \lambda 6678, 5876 \text{ \AA}$  и  $H\beta$ , равны соответственно 270, 205 и 190 км/с. Зная это, можно решить обратную задачу и уточнить величины



**Рис. 5.** Периоды переменности лучевой скорости линий в зависимости от их центральных глубин по данным таблицы (светлые кружки и пунктирная линия). Уточненные по графику Рис. 4 периоды для линий  $HeI \lambda 6678, 5876 \text{ \AA}$  и  $H\beta$  отмечены темными треугольниками и сплошной линией. Ошибки нахождения периодов приведены в тексте.

периодов для этих линий. Таким образом (учитывая ошибки нахождения периодов, приведенные выше), для линий  $HeI \lambda 6678, 5876 \text{ \AA}$  и  $H\beta$  (например,  $P_{H\beta} \approx 84 \times 430 : 190$ ) периоды соответственно будут  $135 \pm 6, 175 \pm 13$  и  $190 \pm 15$  км/с. Если для этих периодов вычислить разности фаз, то получим, что (например,  $\Delta\varphi_{H\beta} \sim (460 : (160 : (190 : 84))) \approx 0.5$ ) они равны найденным по наблюдениям (см. табл.). Это свидетельствует о том, что уточненные периоды, а значит и сам график Рис. 4, соответствуют действительности. На Рис. 5 представлена зависимость периодов переменности лучевой скорости линий от их центральных глубин, построенная по данным таблицы. Уточненные по графику Рис. 4 периоды для линий  $HeI \lambda 6678, 5876 \text{ \AA}$  и  $H\beta$  отмечены темными треугольниками.

Таким образом, увеличение периода (Рис. 5) и уменьшение  $\overline{FWHM}$  (Рис. 3) от слабых к сильным линиям связано с уменьшением скорости вращения от нижних к верхним слоям атмосферы, где соответственно формируются эти линии. Для этого звезда должна иметь протяженную оболочку. Как было сказано в работе [5], звезда окружена диском. Возможно, сильные линии формируются в диске звезды.

В работе [7] было показано, что картина переменности профилей линий  $HeII$  аналогична таковой для слабых линий  $HeI$ . По значениям  $\overline{FWHM}$  и периодам (см. табл.) эти линии должны формироваться в нижних слоях атмосферы, где формируются слабые линии  $HeI$ . Но амплитуды переменности лучевой скорости для линий  $HeII$  значительно меньше, чем для слабых линий  $HeI$ . По-видимому,

как было сказано в работах [2, 4], линии HeII формируются в областях, близких к полюсам звезды, где амплитуда переменности лучевой скорости значительно меньше.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая полученные результаты настоящей статьи и предыдущих работ [2, 4, 6–8], можно сделать следующие заключения.

В спектре звезды HD 93521 переменность лучевой скорости, профилей и FWHM всех наблюдаемых линий, обусловлена нерадиальными пульсациями. Параметры переменности лучевой скорости различаются для синей и красной половин профиля абсорбции. Поэтому для выявления картины переменности и изучения стратификации лучевой скорости в атмосфере звезды необходимо исследовать переменность отдельно для синей и красной половин профиля абсорбции на разных уровнях остаточной интенсивности  $r$ . Для одинаковых уровней  $r$  амплитуда и фаза переменности со временем лучевой скорости отличаются для разных половин профиля. Для обеих половин профиля абсорбции и картина, и амплитуда переменности различаются для разных уровней  $r$ .

Периоды и амплитуды переменности лучевой скорости, определенные для этих половин на уровне 0.5 глубины линий, различаются для разных линий и хорошо коррелируют с центральными глубинами последних. При переходе от слабых линий к сильным (т.е. от нижних к верхним слоям атмосферы) период изменения лучевой скорости, измеренной по обеим половинам профиля абсорбции, увеличивается, а амплитуда уменьшается.

Картина и параметры переменности FWHM линий также различаются для разных линий. При переходе от слабых линий к сильным  $\overline{FWHM}$  линий уменьшается. Увеличение периода переменности лучевой скорости со временем и уменьшение  $\overline{FWHM}$  от слабых линий к сильным вызваны дифференциальным вращением звезды. Скорость вращения верхних слоев, где формируются сильные линии HeI  $\lambda$  7065, 4471 Å, H $\beta$  и H $\alpha$  соответственно в 1.3, 1.8, 2.3 и 2.7 раз меньше, чем скорость нижних слоев, где формируются слабые линии HeII и HeI  $\lambda$  5015 и 4922 Å.

Для сильных линий HeI, H $\beta$  и H $\alpha$  наблюдается изменение амплитуды с  $r$ . Эта зависимость различается для синей и красной половин профиля абсорбции, что дает информацию о кинематике поднимающихся и опускающихся слоев атмосферы. Переменность и стратификация лучевой скорости для этих двух слоев различаются. Выявление и исследование подобных переменностей позволяет

изучать природу звездного ветра в областях его зарождения.

Сопоставление морфологии и особенностей переменности фотосферных и ветровых линий УФ-диапазона показывает, что переменность абсорбционных компонент этих линий вызвана одними и теми же процессами, т.е. нерадиальными пульсациями. Картины переменности лучевой скорости для синих и красных половин профилей эмиссионных компонент H $\alpha$  аналогичны таковым для абсорбционного компонента этой линии и обусловлены нерадиальными пульсациями. Таким образом, нерадиальная пульсация нижележащих слоев атмосферы частично генерирует переменность звездного ветра.

HD 93521 — убегающая звезда, что и объясняет ее расположение над плоскостью Галактики.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Е. В. Панчука, Д. В. Шуляка и В. В. Шиманского за обсуждение результатов, В. Д. Бычкова за предоставление программ гармонического анализа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. J. Irvine, *Astrophys. J.* **337**, L33 (1989).
2. I. D. Howarth and A. H. N. Reid, *Astronom. and Astrophys.* **279**, 148 (1993).
3. A. W. Fullerton, D. R. Gies, and C. T. Bolton, *Bull. Amer. Astronom. Soc.* **23**, 1379 (1991).
4. A. W. Fullerton, D. R. Gies, and C. T. Bolton, in *Pulsation, Rotation and Mass Loss in Early-type Stars*, IAU Simp. No. 162, Ed. by L. A. Balona, H. F. Henrichs, and J. M. Le Contel (Kluwer Acad. Publ., 1994), p. 114.
5. J. E. Bjorkman, R. Ignace, T. M. Tripp, and J. P. Casinelli, *Astrophys. J.* **435**, 416 (1994).
6. А. Х. Рзаев, В. Е. Панчук, *Astronom. J.* **83**, 36 (2006).
7. А. Х. Рзаев, В. Е. Панчук, *Astronom. J.* **85**, 268 (2008).
8. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **62**, 350 (2007).
9. А. Х. Рзаев, Л. Т. Гасанова, М. В. Юшкин, Х. М. Микаилов, *Астрофизический бюллетень* **62**, 61 (2007).
10. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **63**, 25 (2008).
11. A. Underhill and V. Doazan, in *B Stars With and Without Emission Lines* Ed. by A. Underhill and V. Doazan (Washington: NASA, 1982), p. 199.
12. G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet, and A. Maeder, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 669 (1992).
13. I. D. Howarth, K. W. Siebert, G. A. J. Hussain, and R. K. Prinja, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **284**, 265 (1997).



14. I. D. Howarth, R. H. D. Townsend, M. J. Clayton, et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **296**, 949 (1998).  
15. I. D. Howarth and K. C. Smith, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **327**, 353 (2001).

## **SOME PECULIARITIES OF THE VARIABILITY OF THE POSITIONAL AND PHOTOMETRIC LINE PARAMETERS IN THE SPECTRUM OF HD 93521**

**A. Kh. Rzaev**

The variability of positional and photometric parameters of the lines in the spectrum of HD 93521 is analyzed using CCD spectra taken with the PFES echelle spectrograph of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS). To study the velocity field of the star's atmosphere, the radial velocity variations are measured separately for the blue and red halves of the absorption profile at different levels of residual line intensity. The amplitude and phase of temporal variations of radial velocity differ for the two halves of the absorption profile. In case of strong HeI, H $\beta$ , and H $\alpha$  lines the amplitude depends on intensity  $r$ . The time scales ( $P$ ) of radial velocity variations and the mean halfwidths  $\overline{FWHM}$  differ for different lines and correlate fairly well with their central depths. The increase of  $P$  and decrease of  $\overline{FWHM}$  from weak to strong lines are due to the differential nature of the rotation of the star. Our analysis proves that HD 93521 is a run-away star and this fact explains its location at a distance of about 2.0 kpc above the Galactic plane.