

УДК 524.312-852

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЙ ТИПА ПУЛЬСАЦИЙ В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД

© 2011 А. Х. Рзаев*

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 27 июля 2010 г.; принята в печать 20 августа 2010 г.

Представлен эффективный методический подход к исследованию движений типа пульсаций в атмосферах горячих звезд. На примере хорошо изученных звезд обосновывается целесообразность этого метода, позволяющего детально изучить кинематику атмосферы и дать астросейсмологический прогноз. Этот подход позволяет по отдельности изучить различающуюся кинематику поднимающихся и опускающихся слоев атмосферы звезды, а также спектроскопическим методом выявить дифференциальное вращение звезды, если это имеет место. В случае звезды HD 93521 дифференциальное вращение слоев атмосферы подтверждено модельными расчетами.

Ключевые слова: *звезды — переменные и пекулярные, горячие; атмосфера*

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопические мониторинги, проводимые ПЗС—светоприемниками в сочетании с эшелле—спектрографами с начала 90-х г. двадцатого века по сей день, обнаруживают много интересных особенностей нестационарности атмосферы и ветра горячих звезд. Переменность позиционных и фотометрических параметров фотосферных и ветровых линий, наблюдение разных морфологий P Cyg—профилей линии H α и их радикальные изменения, дискретных абсорбционных компонентов (DACs) и их миграция по профилю линий, сильно синемещенного абсорбционного компонента (HVA) у линии H α , который также может сопровождаться красномещенным абсорбционным компонентом, одновременное появление, усиление и исчезновение абсорбционного и эмиссионного компонентов и т. д. обнаружены у многих горячих O, B и A звезд.

Предложено несколько механизмов, которые могут вызвать эти переменности: нерадиальные пульсации [1, 2], модуляция вращением [3, 4], клочковатая структура звездного ветра [5], слабое магнитное поле на поверхности звезды [6, 7], бистабильный механизм звездного ветра [8, 9] и др. Признаки этих процессов сложно улавливать и различать, но их диагностика весьма полезна. Это особенно касается нерадиальной пульсации, которая является эмпирической основой астросейсмологии.

Могут ли нерадиальные пульсации, вызывающие переменность фотосферных линий, порождать наблюдаемые переменности ветровых линий или же являться источником других вышеперечисленных механизмов? Какова роль нерадиальных пульсаций при совместном действии с другими процессами (механизмами) для проявления разных наблюдаемых переменностей ветровых линий? Эти вопросы требуют тщательного изучения движений типа пульсаций с изменением глубины в атмосферах звезд разных спектральных классов.

Во-первых, работы, посвященные этой проблеме, показывают, что современные знания о пульсационных свойствах звезд являются лишь эпизодическими. Это не дает нам возможность наилучшим образом сопоставлять наблюдения с теоретическими моделями [6]. Поэтому любой астросейсмологический прогноз пока является неполноценным и преждевременным.

Во-вторых, одновременно наблюдение изменения со временем профилей линий фотосферного происхождения и ветровых линий УФ-диапазона, а также соизмеримость характерных времен этих переменностей говорит о том, что эти два явления могут или должны быть каким-то образом связаны между собой. Процессы, которые вызывают переменность профилей фотосферных линий, могут также генерировать переменность звездного ветра. Подобную взаимосвязь называют “Фотосферная связь” (т.е. “Photospheric connection” [1, 10–12]). Но до сих пор ни для одной звезды не была установлена такая взаимосвязь между переменностями фотосферных и ветровых линий.

*E-mail: abid@sao.ru

Отмеченные выше два обстоятельства связаны с тем, что в большинстве случаев накопленный наблюдательный материал носит эпизодический характер и не охватывает необходимый период времени. Даже в случае хорошо изученных звезд по хорошему (как по качеству, так и во временном масштабе) спектральному материалу эти два обстоятельства отсутствуют (например: [2, 3, 6, 13]). Наши исследования показали, что для детального изучения нерадиальных пульсаций в атмосфере горячих звезд необходимо применить новый методический подход. Во-первых, необходимо измерять переменность лучевой скорости со временем на разных уровнях остаточной интенсивности τ . Во-вторых, эти измерения должны выполняться отдельно для синей и красной половин профилей линий.

В данной статье приводится обоснование применения этой методики. На основе хорошо изученных нами звезд сверхгиганта α Cyg A2 Ia и горячей звезды HD 93521 O9.5 V демонстрируются положительные стороны этого метода и приводятся полученные нами результаты для этих звезд. Также обсуждается вопрос — почему в отличие от исследований других авторов нами были получены иные результаты?

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ

Для измерения лучевой скорости по профилям абсорбционных линий обычно пользуются двумя методами. Кросскорреляционный метод, где лучевая скорость измеряется с помощью подгонки гауссианы (например, [3]) или же с сравнением со спектром звезды близкой по спектральному классу с известной лучевой скоростью (например, [13]). Во втором методе, которым пользуемся мы, измерение лучевой скорости осуществляется пакетом программ DECH20, путем совмещения прямого и зеркального профиля линии [14]. В обоих методах обычно измеряется лучевая скорость бисектора абсорбции, примерно на уровне FWHM, т.е. на уровне половины интенсивности линии. А для асимметричных линий измеряется ядро линий. Далее эти методы мы назовем классическими. Точность определения лучевой скорости при классическом методе (по спектрам $20000 \leq R \leq 40000$, $100 \leq S/N$) для одной линии составляет около $\pm 2.5 \div \pm 1.5$ км/с, а для групп линий около $\pm 1.0 \div \pm 0.6$ км/с.

Отметим, что пакет программ DECH20 позволяет измерять лучевую скорость на разных уровнях остаточной интенсивности τ , а также отдельно для синей и красной половин профиля линий. Напрашивается вопрос, какова доля вклада синей и красной половин профиля линии в лучевую скорость

бисектора абсорбции? Как меняются величины этих вкладов со временем?

В [15] было отмечено, что в спектре звезды α Cyg для линий HeI и ионов фотосферного происхождения переменность лучевой скорости синей и красной половин профиля линий одинакова и переменность бисектора на всех уровнях τ отражает переменность линий в целом.

Для ветровых линий картина переменности другая. На Рис. 1a в координатах “ $r - V$ ” (где V — гелиоцентрические скорости) представлены профили линии H β , полученные в период 07.14–07.28 2000 г. На Рис. 1b показаны четыре характерных случая переменности этих профилей в течение 3–5 суток. Как видно из Рис. 1b, в случае I переменность лучевой скорости бисектора абсорбции обусловлена только изменением лучевой скорости синей, а в случае II — красной половины профиля абсорбции. В случае III эта переменность обусловлена изменениями и синей и красной половин профиля абсорбции. Изменение лучевой скорости обеих половин происходит в одном направлении (т.е. обе половины сдвинуты в длинноволновую часть спектра), но вклад этих половин различается. В случае IV, несмотря на то, что наблюдается переменность обеих половин профиля абсорбции, лучевая скорость бисектора абсорбции в пределах ошибок измерения не меняется. Это происходит в результате того, что величина переменности лучевой скорости синей и красной половин профиля одинаковая, хотя происходит в противоположном направлении.

Каким образом надо выполнить измерения лучевой скорости, чтобы все вышеперечисленные особенности отражались в наших измерениях и исследованиях? Рисунок 1b показывает, что переменность лучевой скорости синей и красной половин профиля абсорбции различается. Поэтому необходимо эти переменности исследовать отдельно. Вторая цель нашего методического подхода заключается в решении следующего вопроса: можно ли для одной линии увеличить точность измерений, приведенную нами выше, и уменьшить разброс значений лучевой скорости? Наши исследования показали, что для этого (особенно для широких линий) необходимо выполнить следующие процедуры, приводящие к уменьшению ошибок измерений. Первая процедура связана с учетом влияния проведения непрерывного спектра на точность измерения лучевой скорости. Исследования показали, что в случае линии H β в спектре α Cyg при намеренном искажении непрерывного спектра на величину $r = 0.04$ на уровнях этой линии, заключающихся в интервале $(r_0 + 0.1) \leq r \leq (0.5r_0 - 0.05)$ ошибки измерения лучевой скорости не превышают ± 1.0 км/с.

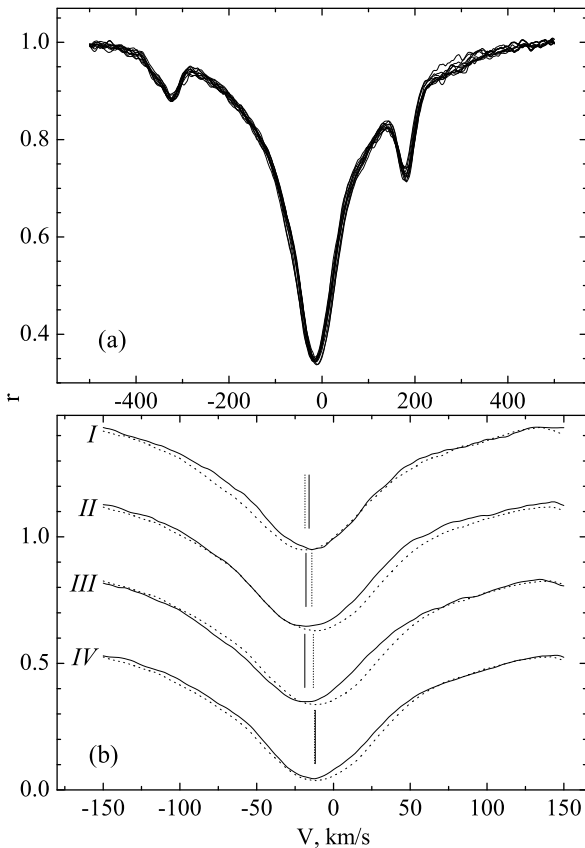


Рис. 1. (а) Профили линии $H\beta$ в спектре α Cyg, полученные за период 14.07–28.07 2000 г. (б) Характерные случаи переменности профиля линии $H\beta$ в течение 3–5 суток на примере профилей приведенных на Рис. 1а. По горизонтальной оси отложена гелиоцентрическая лучевая скорость. Для наглядности профили приведены в интервале ± 150 км/с. Вертикальными отрезками линий указаны бисекторы профилей в интервале $0.45 \leq r \leq 0.65$, где были проведены измерения лучевой скорости.

А на спектрах, полученных с отношением сигнал на шум $S/N = 100$, ошибка проведения непрерывного спектра, даже в худшем случае, не превышает $r = 0.015$. Вторая процедура — сглаживание шумов. Программа DECH20 [14] предусматривает три варианта процесса сглаживания. Для исследования влияния этой процедуры на точность измерений лучевой скорости нами были получены спектры стандартных звезд, а также α Cyg с отношениями сигнал/шум $50 < S/N < 80$ и $250 \leq S/N$. Исследования показали, что даже в случае спектров с малыми отношениями S/N сглаживание шумов по трем точкам повышает точность определения лучевой скорости. Третья процедура, которая приводит к уменьшению ошибок измерений — процесс измерения лучевой скорости на разных уровнях остаточной интенсивности r с дальнейшим усреднением этих измерений. Выполнение этих процедур

мы показываем на примере спектров сверхгиганта α Cyg, полученных в течение 6 суток с 06.09 по 11.09.99 г. (JD 2451428–33) с разрешением $R = 36000$ и отношением сигнал/шум $250 \leq S/N$. Как было отмечено в [15], в течение этого времени изменения фотометрических и позиционных характеристик линий не обнаруживаются. Поэтому эти спектры хорошо подходят для оценки ошибок измерения лучевой скорости линий.

На Рис. 2 приведены результаты измерения лучевой скорости по этим спектрам на 5 уровнях r с шагом $r = 0.05$ для синей и красной половин профиля абсорбции линии $H\beta$. Различия в картинах переменности и разброс лучевой скорости для разных уровней связаны с ошибками измерений. А для каждой даты усреднение значений лучевой скорости по этим 5 уровням значительно снижает ошибки измерений.

На Рис. 3 по этим же спектрам для линии $H\beta$ приведены величины лучевой скорости, ее среднее значение и среднеквадратическое отклонение от среднего для синей (верхние рисунки), красной половин профиля (средние рисунки по горизонтали) и бисектора абсорбции (нижние рисунки) на уровне $r = 0.55$ для трех случаев. Первый случай — левые по вертикали рисунки, когда лучевые скорости были определены по несглаженным профилям линии $H\beta$. Второй случай — средние по вертикали рисунки, когда лучевые скорости определены по сглаженным профилям линии $H\beta$. Третий случай — правые по вертикали рисунки, где лучевые скорости определены как средние лучевые скорости, усредненные по 5 уровням r на Рис. 2. При этом средний уровень по r также совпадает с $r = 0.55$. На Рис. 3 видно, что ошибки измерения лучевой скорости, среднеквадратическое и максимальное отклонение от среднего во втором случае меньше, чем в первом. А в третьем случае значения этих параметров значительно уменьшаются.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Итак, на первом этапе для увеличения точности фотометрических и позиционных измерений необходимо сглаживание шумов. Для исследования переменности профилей со временем лучше использовать наиболее эффективный в данном случае способ — метод гауссианы, который позволяет понизить влияние шума практически без потери спектрального разрешения [14]. Для измерения лучевой скорости с таким же успехом можно воспользоваться более простым способом — “скользящим средним” по трем точкам. Исследование стандартных звезд показало, что для спектров с $50 < S/N < 80$ эту процедуру можно повторять 3–4 раза в результате чего разброс лу-

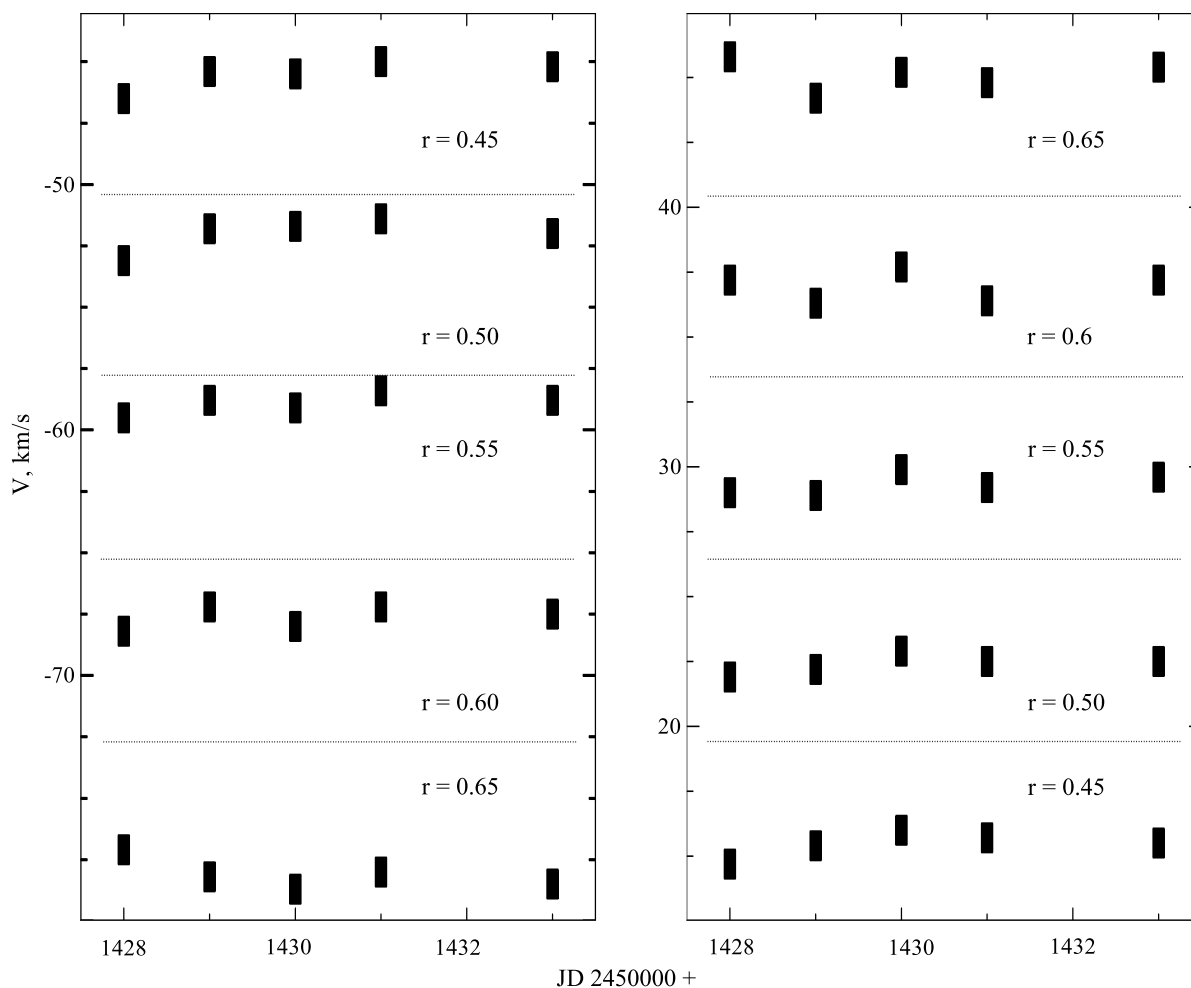


Рис. 2. Лучевые скорости синей (левые) и красной (правые рисунки) половин профилей линии $H\beta$, α Cyg полученные в период 06.09-11.09.99 г., когда переменность лучевой скорости и фотометрических параметров линии не менялись. На рисунках указаны уровни остаточной интенсивности r , где были измерены лучевые скорости. По горизонтальной оси указаны средние даты наблюдений. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений лучевой скорости.

чевой скорости от среднего значения уменьшается. Но следует помнить, что при сглаживании спектров больше двух раз интенсивность особенно узких линий значительно уменьшается. Поэтому такой подход не годится для исследования переменности со временем фотометрических параметров линий. На втором этапе для увеличения точности, особенно в случаях асимметричных широких ветровых линий, измерения лучевой скорости предпочтительно выполнить в интервале $(r_0 + 0.1) \leq r \leq (0.5r_0 - 0.05)$, где влияние ошибки проведения непрерывного спектра на точность измерения минимально. На третьем этапе для уменьшения ошибок необходимо измерять лучевую скорость на нескольких уровнях остаточной интенсивности r с определенным шагом по r . Рисунок 2 показывает, что на разных уровнях r картины переменности лучевой скорости разные и ее разброс от

среднего значения отличается. Эти различия отражают ошибки измерений связанные с нестабильностью работы системы “спектрограф + CCD”, с самой процедурой обработки и редукации, с косметической чисткой спектра от разных дефектов и космических частиц. Сопоставляя эти кривые, можно провести медианное или арифметическое усреднение. Рисунок 3 показывает, что такое усреднение почти в 2 раза уменьшает ошибки измерения и разброс точек (правые рисунки) по сравнению с одиночными измерениями (левые и средние рисунки по вертикали). Рисунок 1б показывает, что в случае ветровых линий доля вклада синей и красной половин профиля линии в лучевую скорость бисектора абсорбции различается и меняется со временем. Это означает, что у ветровых линий переменность лучевой скорости со временем различается для синей и красной половин профиля и должна исследо-

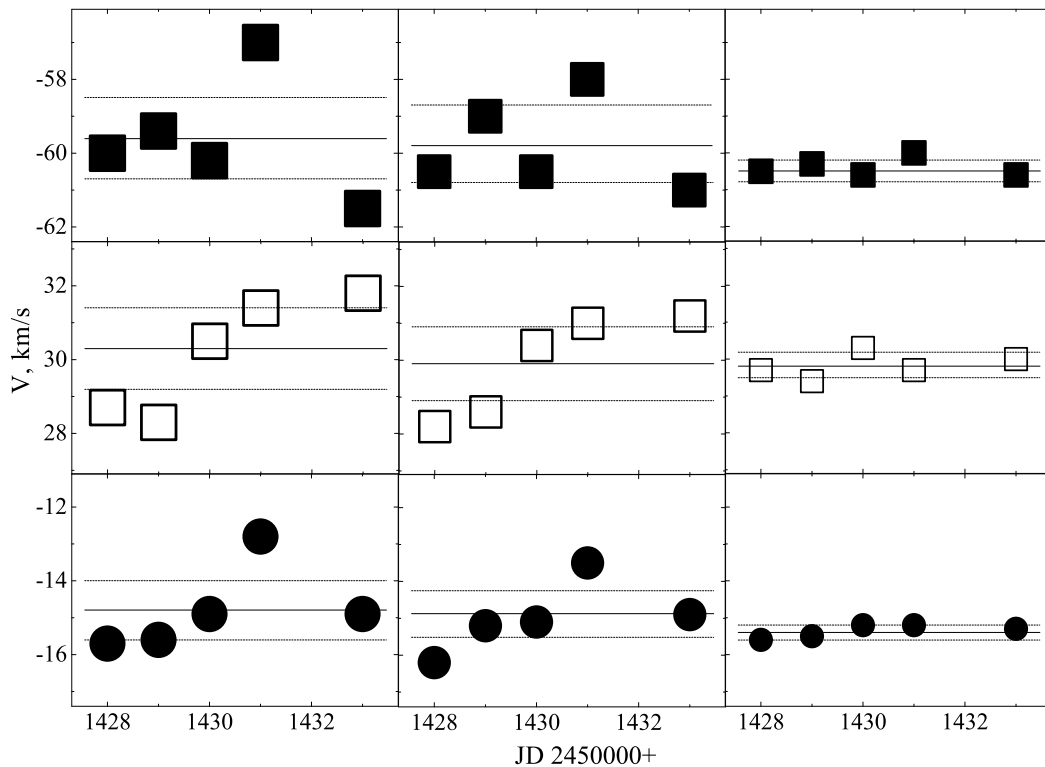


Рис. 3. Лучевые скорости, их средние значения, среднеквадратические отклонения от среднего (пунктирные горизонтальные линии) для синей (темные квадратики), красной (светлые квадратики) половин профиля и бисектора (темные кружки) абсорбции линии $H\beta$ по спектрам, полученным в период 06.09–11.09.99 г. для α Cyg. Левые рисунки — данные получены по несглаженным, средние рисунки по вертикали — по сглаженным один раз профилям линии $H\beta$. Правые рисунки — данные, полученные по средним значениям лучевой скорости, усредненной по 5 уровням, указанным на Рис. 2. Горизонтальная ось и вертикальные размеры символов, как на Рис. 2.

ваться отдельно. Наш методический подход выявил интересные особенности в картине переменности лучевой скорости в спектре сверхгиганта α Cyg и горячей звезды HD 93521.

3.1. Сверхгигант α Cyg

Уменьшение ошибок измерения выявило, что в спектре α Cyg A2 Ia в некоторые моменты наблюдений переменность лучевой скорости линий не прослеживается. Для фотосферных линий HeI и ионов в эти моменты средняя величина лучевой скорости составляет -4.5 ± 0.5 км/с. Для всех исследованных линий продолжительность времени, когда наблюдаются постоянные значения лучевой скорости, по нашим данным, составляет 5.0 ± 1.0^d , и она равна промежутку времени затухания предыдущего и возникновения нового колебания [16]. Наши исследования показали, что обнаружение разных периодов в разные сезоны наблюдений связаны с включением этих постоянных значений лучевой скорости в поиски возможных периодов [15]. Они приводят к сдвигу фазы, как между колебаниями разных сезонов, так и между колебаниями

отдельных сетов наблюдений данного сезона. При поиске периодов необходимо исключать постоянные значения лучевой скорости. Таким образом было обнаружено, что для линий ионов и HeI во всех трех сезонах наблюдений (1998, 1999, 2000 гг.) параметры переменности лучевой скорости со временем одинаковы и с учетом сдвига фазы они хорошо ложатся на единую фазовую кривую [16]. Наш методический подход выявил, что затухание предыдущего и возникновение нового колебания происходит в результате появления разницы в лучевых скоростях слабых и сильных линий ионов.

Для линии $H\beta$ было обнаружено, что параметры переменности лучевой скорости со временем (характерное время переменности P , амплитуда A и фаза) различаются для синей и красной половин профиля абсорбции, а также для разных сезонов наблюдений [16]. Только по данным 1999 г. параметры переменности одинаковы для синей и красной половин контура абсорбции и переменность бисектора отражает переменность линии в целом. По данным 1998 г. P и A одинаковые, но наблюдается сдвиг фазы между колебаниями лучевой скорости синей и красной половин профиля

абсорбции. А по данным 2000 г. Р и А различается для двух половин профиля абсорбции. В конечном итоге для линии $H\beta$ в среднем были получены два значимых периода и соответствующие им две амплитуды [16].

Для линии $H\alpha$, как в случае линии $H\beta$, также наблюдаются четыре характерных случая переменности профиля. Качество наших спектральных материалов и методический подход позволили выявить, что переменность абсорбционного компонента профиля линии $H\alpha$ в основном обусловлена нерадиальными пульсациями [17]. “Засорение” синей половины профиля абсорбции $H\alpha$ абсорбционными компонентами, которые свидетельствовали о клочковатой структуре оболочки звезды, не давали возможность отдельно исследовать переменность со временем лучевой скорости для этой половины профиля. Для красной половины профиля абсорбции были получены два значимых периода, около 300 и 50 дней. Отметим, что данные (временные интервалы) не давали возможность как в случаях линии ионов и $H\beta$ исследовать для линии $H\alpha$ переменность лучевой скорости отдельно для каждого сезона и без учета ее “постоянных” значений. Возможно, в [17] долговременное значение периода, а также изменение Р и А в зависимости от остаточной интенсивности линии γ были связаны с этими обстоятельствами.

Таким образом, полученные нами изменения со временем параметров переменности лучевой скорости (период Р, амплитуда А и γ скорость) для исследованных линий показали, что наблюдается стратификация лучевой скорости в атмосфере сверхгиганта α Cyg. На Рис. 4 представлено изменение этих параметров с глубиной в атмосфере. Отметим, что величину скорости -4.5 ± 0.5 км/с, найденную нами для линий ионов по данным за три года (1998–2000), мы приняли за лучевую скорость центра массы звезды в пространстве. Средняя скорость расширения и амплитуда ее переменности со временем существенно растут при переходе из слоев, где формируется линия $H\beta$ к слоям $H\alpha$ (Рис. 4а). Период (Рис. 4б) и амплитуда (Рис. 4с) переменности лучевой скорости также растут к верхним слоям, где формируется линия $H\alpha$.

Наша методика также позволила исследовать переменность лучевой скорости со временем для синей и красной половин эмиссионного компонента линии $H\alpha$. Картины переменности лучевой скорости для синей и красной половин профилей эмиссионного компонента $H\alpha$ аналогичны таковым для абсорбционного компонента этой линии и обусловлены нерадиальными пульсациями. Таким образом, нерадиальная пульсация нижележащих слоев атмосферы частично генерирует переменность звездного ветра (статья II).

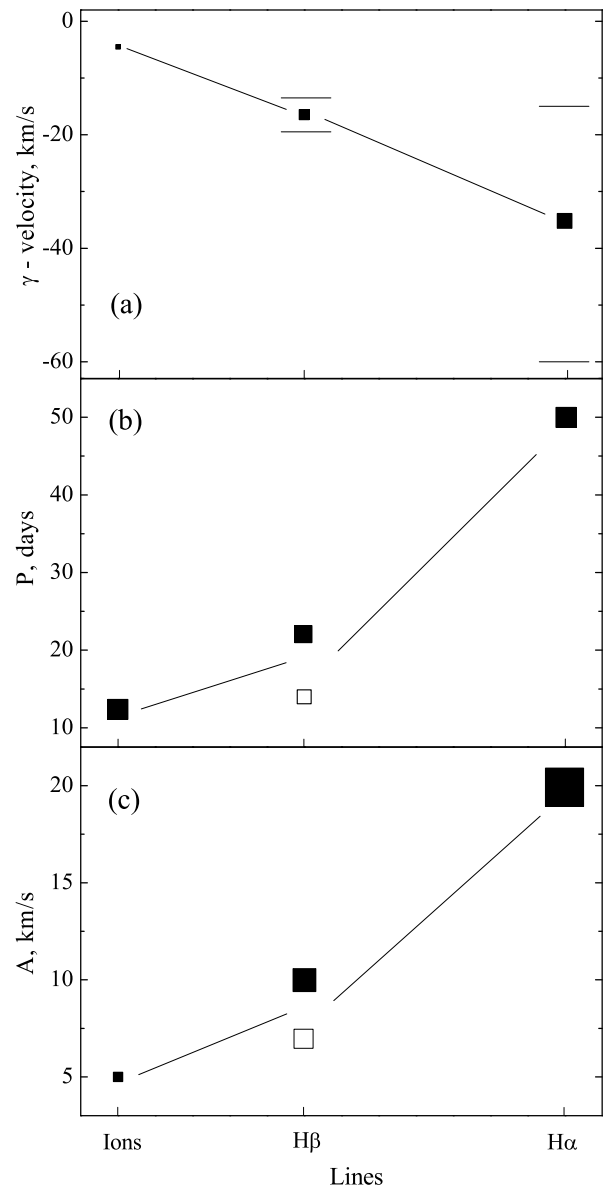


Рис. 4. Параметры переменности лучевой скорости для разных линий в спектре α Cyg. (а) среднее значение лучевой скорости. Горизонтальными отрезками линий отмечены амплитуды переменности. (б) периоды, (с) амплитуды переменности лучевой скорости. Для линии $H\beta$ отмечены два значения периода и соответствующие им амплитуды. Для линии $H\alpha$ приведено среднее значение периода и амплитуды усредненные по семи уровням интенсивности γ . Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам определения параметров.

3.2. HD 93521

Отмеченные выше четыре характерных случая переменности (Рис. 1б) также наблюдаются у всех исследованных линий в спектре звезды HD 93521 O9.5 V. Мы показали, что картина переменности линий относительно их среднего профиля отображается в виде синусоидальной волны, система-

тически перемещающейся по профилям линий от синего крыла к красному [18, 19]. Качество наших спектральных материалов ($350 < S/N < 500$, $R = 15000$) позволило выявить, что характер переменности одинаков для всех исследованных линий (от слабых HeII до H α) [19]. Эта переменность, как было отмечено и другими авторами ([13, 20], обусловлена нерадиальными пульсациями. Мы показали, что для слабых линий HeII λ 4686, 5411 Å и HeI λ 5015, 4922, 7065 Å только фаза φ , а для сильных линий HeI λ 5876, 6678 Å, H β , H α и амплитуда переменности лучевой скорости различаются для синей и красной половин профилей линий [21]. Поэтому, для исследования стратификации лучевой скорости в атмосфере необходимо исследовать переменность лучевой скорости со временем отдельно для этих половин. Значения периодов и амплитуд переменности лучевой скорости, определенных для этих половин, различаются для разных линий и хорошо коррелируют с их глубинами. При переходе от слабых линий к сильным значение периода изменения лучевой скорости, измеренной по обеим половинам контура абсорбции, увеличивается, а значение амплитуды уменьшается [21].

Отметим, что наш спектральный материал также был получен с хорошим временным разрешением, т.е. экспозиции были в пределах 3–5 минут [18]. Сопоставление профилей линий показало, что слабые линии HeII и HeI, полученные в течение каждого 28 мин времени в пределах ошибок измерений не показывают переменности лучевой скорости и профилей. Для сильных линий HeI и H β этот промежуток времени составляет 38 мин, а для линии H α — 56 мин. Поэтому спектры, полученные в течение 28, 38 и 56 мин, соответственно, для слабых и сильных линий HeI, H β и H α , были объединены в одной группе и усреднены. На Рис. 5 на примере линий HeII λ 4686 Å, HeI λ 4922, 7065, 4471, 5876, 6678 Å, H β и H α представлена переменность лучевой скорости со временем, измеренная по синей половине профиля абсорбции. Отметим, что в течение 2.7 ч было получено 24 спектра. После получения 14-го спектра по счету с начало наблюдения по техническим причинам была задержка времени около 7 мин. Поэтому, в IV группу слабых, III группу сильных линий и III группу линии H α , соответственно, вошли меньше спектров, чем в предыдущую группу. В конце наблюдения после 21 спектра была такая же задержка времени и экспозиция увеличилась от 3 до 5–7 мин. Поэтому в последнюю группу слабых линий в течение 28 мин вошли 3 спектра.

Рисунок 5 показывает картину переменности со временем лучевой скорости линий в спектре звезды HD 93521. Видно, что только в случае линий H α ,

у которой амплитуда переменности лучевой скорости не превышает 15 км/с, наблюдается более-менее “равномерное” изменение лучевой скорости со временем. Для остальных линий переменность лучевой скорости от одной группы к другой происходит дискретно. Следовательно, мы наблюдаем следующую картину: черно-белая полоса (по определению работы [13] или же синусоидальная волна по нашему определению [21]), которая проходит по профилям линий, состоит из более узких полос. Ширина этих полос одинаковая и плотность в пределах одной полосы равномерная, но плотность различается для разных полос. При прохождении одной полосы через профиль линии, например, через синюю половину профиля абсорбции HeI λ 4922 Å, где мы измеряем лучевую скорость, в течение 28 мин в пределах ошибок измерений наблюдается одно значение лучевой скорости. При прохождении следующей полосы, так как плотность изменяется, меняется и значение лучевой скорости. Далее процесс повторяется.

В [18, 19] по средним значениям лучевой скорости для групп было найдено, что период переменности лучевой скорости различается для линий разных интенсивностей: для слабых линий HeII λ 4686, 5411 Å, и HeI λ 5015, 4922 Å — 84 мин, для HeI λ 7065 Å — 112 мин, для сильных линий HeI λ 4471, 5876, 6678 Å и H β — 152 мин, а для линии H α — 224 мин. Далее в [21] по величинам $\Delta\varphi$, \overline{FWHM} для сильных линий была решена обратная задача и в конечном итоге были уточнены значения периодов для сильных линий HeI λ 6678, 4471, 5876 Å и H β , которые получились 135, 152, 175 и 190 мин соответственно.

В [22] авторы, ссылаясь на нашу работу [18], отмечали, что, так как продолжительность наших наблюдений около $T_{obs} = 162$ мин, говорить об увеличении периода от слабых линий к сильным нет серьезного основания. Отметим, что в [22] и предыдущих работах других авторов [13, 20] были исследованы переменность со временем профилей линий, которая в лучшем случае доходила до 2%. Переменность лучевой скорости со временем (амплитуда которой доходит до 10 и 40 км/с, соответственно, для сильных и слабых линий) не исследовалась.

В наших предыдущих работах [18, 19] измерения лучевой скорости были осуществлены по классическому методу. Максимальное и среднеквадратическое отклонение от среднего, соответственно, для слабых линий составляли ± 5.0 и ± 3.2 , а для сильных — ± 3.5 и ± 2.2 км/с. Измерение по вышеописанной методике уменьшило ошибки измерений и разброс лучевой скорости, соответственно, до

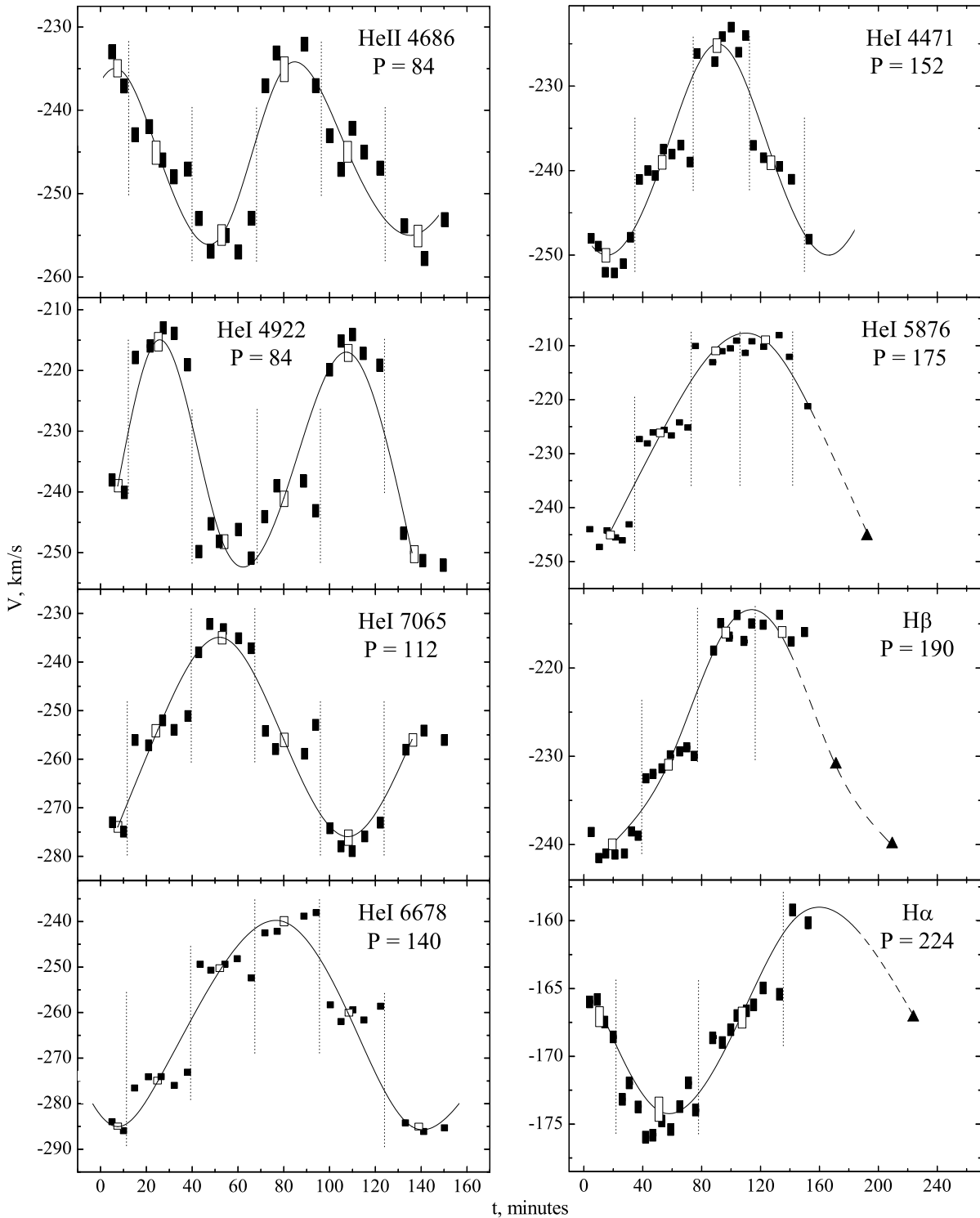


Рис. 5. Переменность со временем лучевой скорости, определенной по синей половине профиля абсорбции линий в спектре HD 93521. По горизонтальной оси отмечены средние моменты каждой экспозиции от начала наблюдения в минутах. Группы, в которых в пределах ошибок измерений не наблюдается изменение лучевой скорости, разделены вертикальными линиями. Белые прямоугольники и их вертикальные размеры — среднее значение лучевой скорости и среднеквадратическое отклонение от среднего для каждой группы. Для линий HeI 5876, H β и H α пунктирные кривые и темные треугольники отражают предполагаемый цикл периодичности. Найденные периоды P в минутах указаны на рисунках. Кривые проведены сплайном. Вертикальные размеры символов, как на Рис. 2.

значений ± 3.5 и ± 2.6 , ± 2.0 и ± 1.6 км/с. Это позволило нам сразу определить разницу в периодах для сильных линий HeI λ 6678, 4471, 5876 Å и H β . Было обнаружено, что для линии λ 6678 Å, как в случае слабых линий, профили и лучевые скорости меняются через каждые 28 мин, а для линии λ 5876 Å — через каждые 35 мин.

На Рис. 5 видно, что в случае слабых линий HeII λ 4686 Å и HeI λ 4922, 7065 Å продолжительность наших наблюдений T_{obs} в 2 и 1.5 раза превосходит периоды (84, 84 и 112 мин соответственно) и определение их методом гармонического анализа не вызывает особых трудностей (см. также [18]). Для линий HeI λ 6678, 4471 Å переменность лучевой скорости хорошо видна и T_{obs} охватывает один период. В случаях линий HeI λ 5876 Å, H β и H α , если предположить, что изменения являются циклическими, т.е. в дальнейшем ход изменения лучевой скорости повторяет предыдущий цикл, то для значения периода, соответственно, получим около 140, 190 и 224 мин. На Рис. 5 для линий HeI λ 5876 Å, H β и H α предполагаемые изменения лучевой скорости в течение периода дорисованы пунктирными линиями.

В [21] нами также была исследована переменность FWHM линий со временем. Было установлено, что увеличение P и уменьшение \overline{FWHM} от слабых к сильным линиям вызваны разной скоростью вращения слоев, в которых формируются эти линии: в атмосфере звезды скорость вращения уменьшается от нижних к верхним слоям. В работе [23] было сказано, что звезда имеет протяженную оболочку в виде диска, где все это может происходить.

В [13] было сказано, что в отличие от HeI линии HeII не показывают заметной переменности. Это связывали с высокой скоростью вращения звезды, которая приводит к заметному изменению эффективной температуры и гравитации от экватора к полюсу. Линии HeII формируются на горячих полюсах, а переменности, которые возникают на экваторе отражаются на линиях HeI. Но наши исследования показали, что линии HeII также меняются со временем. Картина, характер и период переменности у линий HeII такие же, как у слабых линий HeI, но амплитуда переменности значительно меньше [21]. Если предположить, что линии HeII также эффективно формируются на экваторе (в верхних слоях атмосферы нагретые, например, ударными волнами), где скорость вращения такая же, как на поверхности звезды, а амплитуда переменности значительно меньше, тогда возможно сильные линии HeI, H β и H α , соответственно, эффективно формируются ближе к полюсам звезды. Таким образом, мы наблюдаем дифференциальное

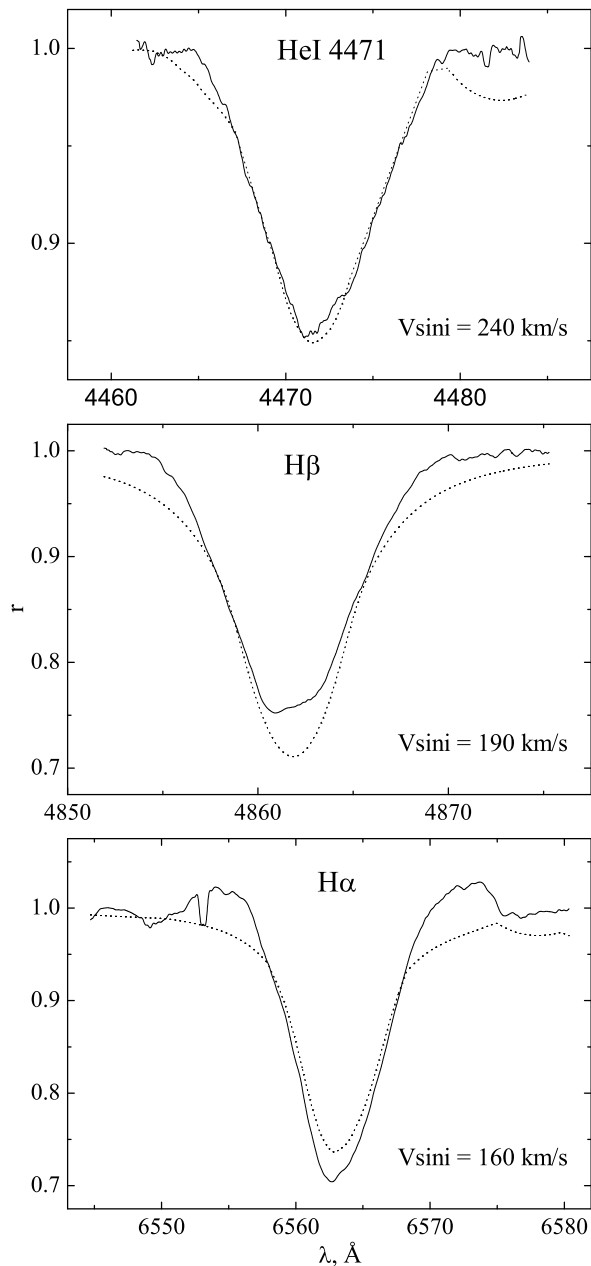


Рис. 6. Сопоставление расчетных (точки) и средних наблюдаемых профилей (сплошная линия) линий в спектре HD 93521. Параметры расчетов брались из [24], где $V \sin i = 435$ км/с. При расчете разные значения $V \sin i$, которые указаны на рисунках, брались из [21].

вращение слоев в атмосфере HD 93521, как это наблюдается на Солнце.

Не давая предпочтения вышесказанным предположениям, с целью проверки наших допущений о дифференциальном вращении для линий HeI λ 4471 Å, H β и H α были рассчитаны теоретические профили. Параметры расчета: $V \sin i = 435$ км/с, $T_{eff} = 29.9$ кК, $\log g = 3.5$, $\xi = 10.0$ км/с, и другие параметры были взяты из [24], где для сла-

бых линий HeII λ 4686, 5411 Å и HeI λ 4026, 4922 Å совпадения расчетных линий с наблюдаемыми были весьма хорошими. Если для слоев, где формируются слабые линии HeII и HeI, брать $V \sin i = 435$ км/с, то по нашим данным из [21] для слоев, где эффективно формируются линии HeI λ 4471 Å, H β и H α для $V \sin i$, соответственно, получим около 240, 190 и 160 км/с. Расчеты были выполнены Д. В. Шуляком с помощью программы “synthV” [25].

Как видно на Рис. 6, совпадение расчетных профилей с наблюдаемыми хорошее. Это означает, что найденные нами периоды переменности лучевой скорости со временем для этих линий, а также скорости вращения для соответствующих слоев атмосферы соответствуют действительности.

В заключение следует отметить, что для звезды HD 93521 нами была установлена “фотосферная связь”. Подробно об этом было сказано в [19]. Здесь отметим, что сопоставление морфологии и особенностей переменности фотосферных и ветровых линий УФ-диапазона показывает, что переменность абсорбционных компонентов этих линий вызвана одним и тем же процессом — нерадиальными пульсациями. Нерадиальные пульсации частично влияют на переменность звездного ветра.

Таким образом, наш методический подход выявляет новые интересные особенности в картине переменности лучевой скорости линий, много дополнительных сведений о кинематике атмосферы, позволяет по отдельности изучить различающуюся кинематику поднимающихся и опускающихся слоев атмосферы звезды, а также спектроскопическим методом обнаружить дифференциальное вращение слоев звезды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Шуляка Д. В. за расчет профилей линий и обсуждение полученных результатов. Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект № 08-02-00072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. W. Fullerton, D. R. Gies, and C. T. Bolton, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 475 (1996).
2. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astronom. and Astrophys.* **320**, 273 (1997).
3. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astronom. and Astrophys.* **305**, 887 (1996).
4. L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, et al., *Astronom. and Astrophys.* **327**, 281 (1997).
5. M. Kraus, J. Kubát, J. Krůčka, in *Clumping in Hot Stars Winds*, Ed. by W. R. Hamann, A. Feldmeier, L. Oskinova (Potsdam: Univ.-Verl., 2008), p.43.
6. H. F. Henrichs, *Lecture Notes in Physics* **523**, 305 (1999).
7. N. Markova, R. K. Prinja, H. Markov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **487**, 273 (1997).
8. A. W. A. Pauldrach and J. Puls, *Astronom. and Astrophys.* **237**, 409 (1990).
9. G. Israelian, E. Chentsov, and F. Musaev, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **290**, 521 (1997).
10. D. C. Abbott, C. D. Garmany, C. J. Hansen, et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.* **98**, 29 (1986).
11. I. D. Howarth, *ASP Conf. Ser.* **22**, 155 (1992).
12. A. H. N. Reid and I. D. Howarth, *Astronom. and Astrophys.* **311**, 616 (1996).
13. I. D. Howarth and A. H. N. Reid, *Astronom. and Astrophys.* **279**, 148 (1993).
14. Г. А. Галазутдинов, Препринт №92, САО РАН (Н. Архыз, 1992).
15. А. Х. Рзаев и др., *Астрофизический бюллетень* **62**, 61 (2007).
16. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **65**, 27 (2010).
17. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **63**, 25 (2008).
18. А. Х. Рзаев и В. Е. Панчук, *Астрон. ж.* **83**, 36 (2006).
19. А. Х. Рзаев и В. Е. Панчук, *Астрон. ж.* **85**, 268 (2008).
20. 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, J.M. Le Contel (Kluwer Acad. Publ., 1994), p. 114.
21. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **63**, 282 (2008).
22. G. Rauw, M. De Becker, H. van Winckel, et al., *Astron. Astrophys.* **487**, 659 (2008).
23. J. E. Bjorkman, R. Ignace, T. M. Tripp, and J. P. Casinelli, *Astrophys. J.* **435**, 416 (1994).
24. I. D. Howarth and K. C. Smith, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **327**, 353 (2001).
25. V. V. Tsymbal, *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).

METHODOLOGICAL PECULIARITIES OF STUDY OF PULSATION-TYPE MOTIONS IN STELLAR ATMOSPHERES

A. Kh. Rzaev

An efficient methodological approach is proposed to the study of pulsation-type motions in the atmospheres of hot stars. Several well-studied stars are used as examples to demonstrate the appropriateness of the method, which can be used to analyze the kinematics of the atmosphere and compute an astroseismological forecast. This approach makes it possible to separately analyze different kinematics of the ascending and descending layers of the stellar atmosphere, and to spectroscopically reveal different rotation of the star if such is the case. The differential rotation of atmospheric layers of HD 93521 is confirmed by the model computations.

Key words: *stars: atmospheres — stars: individual: HD 93521 — stars: individual: α Cyg*