

Исследование нестационарности атмосферы α Cyg II. Переменность профилей линий ионов и $H\beta$

А.Х.Рзаев^{1,2}, Л.Т.Гасанова¹, М.В.Юшкин¹, Х.М.Микаилов²

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

² Шамахинская астрофизическая обсерватория НАН Азербайджана, Ю. Мамедалиев, Шамахи

Поступила в редакцию 28 ноября 2005 г.; принята к печати 5 февраля 2006 г.

Представлен эффективный метод исследования переменности лучевых скоростей и профилей линий со временем. Показано, что для детального исследования изменения со временем профилей линий и поля скоростей в атмосфере звезды необходимо измерять лучевую скорость отдельно по синей и красной половинам профиля абсорбционной линии на разных уровнях ее остаточной интенсивности. По 120 ПЗС-спектрам, полученным на кудэ-эшелле-спектрографе 2-м телескопа ШАО НАН Азербайджана в 1998–99 гг., этим методом было исследовано изменение со временем лучевой скорости и профилей линий ионов и $H\beta$ в спектре α Cyg. В случае линий ионов изменение лучевой скорости по обеим половинам профиля абсорбции на всех уровнях ее интенсивности происходит синхронно. В случае линии $H\beta$, которая формируется в слоях, где зарождается звездный ветер, картины переменности лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции различаются. Для красной половины профиля эта картина одинакова для всех уровней, а для синей половины отличается на разных уровнях остаточной интенсивности линии. Выявление и исследование подобных переменностей позволяет изучать природу изменчивости звездного ветра в области его зарождения.

В течение 6 дней в спектре α Cyg не наблюдалась переменность со временем профилей линий и лучевой скорости по обеим половинам контура абсорбции и на всех уровнях ее интенсивности. Звезда находилась в фазе покоя.

Ключевые слова: звезды: сверхгиганты, звезда α Cyg, пульсация

NONSTATIONARITY OF THE ATMOSPHERE OF α CYG. II. VARIABILITY OF THE ION AND $H\beta$ LINE PROFILES, by A.Kh. Rzayev, L.T. Hasanova, M.V. Yushkin, Kh.M. Mikailov. We report an efficient method for analyzing the radial-velocity and line-profile variability. We show that a detailed analysis of the variations of line profiles and velocity field in the stellar atmosphere requires the radial velocities to be measured separately for the blue and red halves of the absorption lines at different levels of their residual intensity. We applied this method to 120 CCD spectra taken in 1998–99 with the coude echelle spectrograph attached to the 2-m telescope of Shemakha Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Azerbaijan and analyzed the variations of the radial velocities and profiles of ion and $H\beta$ lines in the spectrum of α Cyg. In the case of ion lines both halves of the absorption profile exhibit synchronous radial-velocity variations at all levels of line intensity. In the case of the $H\beta$ line, which forms in the layers where stellar wind originates, the pattern of radial-velocity variations differs for the blue and red halves of the absorption profile. The variability pattern is the same at all levels in the red half of the profile, the blue half of the profile exhibits different variability patterns at different levels of residual line intensity. Identification and analysis of such variations allows us to study the nature of stellar-wind variability in the region of wind formation.

The spectrum of α Cyg showed no line-profile or radial-velocity variations for six days in both halves of the absorption contour at all levels of line intensity. The star was in the quiescent phase.

Key words: stars: supergiants – stars: individual: α Cyg

1. Введение

В сравнении с классическими, эшелле-ПЗС-спектры более качественные и поэтому несут в себе больше информации о свойствах атмосферы и оболочки звезд. Эта информация позволяет более детально исследовать кинематику атмосферы и выявить интересные особенности изменения профилей линий и лучевых скоростей со временем. Выявление этих особенностей требует применения более эффективных методов обработки и редукции спектров, т. е. измерения фотометрических и позиционных характеристик линий. Метод “динамических спектров” (см., например, Кауфер и др., 1996) не очень эффективен для этих целей, т.к. не дает информацию о структуре линий и тем более об их изменениях со временем.

В предыдущей работе (Рзаев, 2002, далее статья I) было отмечено, что высокое качество эшелле-ПЗС-спектров и современные пакеты программ их обработки позволяют детально исследовать переменность фотометрических характеристик и лучевой скорости на разных уровнях остаточной интенсивности линий. Если разделить линию по бисектору на две части, то в ряде случаев исследование переменности лучевой скорости по коротковолновой (синей) и длинноволновой (красной) частям профиля линий может оказаться более информативным, чем исследование по классическому варианту, т.е. по бисектору линии на уровне половины ее интенсивности. Бисектор, по определению, является характеристикой, усредняющей сдвиги синей и красной половин контура линий. Подобное исследование изменения со временем лучевой скорости по линиям HeI в спектре горячей звезды HD 93521 O9.5 V (Рзаев и Панчук, 2006) также показало, что при наличии нерадиальной пульсации в атмосфере звезды классический вариант измерения не позволяет изучить стратификацию лучевой скорости в атмосфере звезды. Ясно, что в этом случае измерение лучевой скорости методом кросс-корреляции (Кауфер и др., 1997; Ховарт и Рейд, 1993) также неприемлемо.

В статье I была исследована переменность со временем лучевой скорости и профиля линии $H\alpha$ в спектре α Cyg. Было показано, что картина, амплитуда и характерное время переменности лучевой скорости, измеренной по синей и красной половинам контура абсорбции линии $H\alpha$, могут различаться. Эти параметры также различались для разных уровней остаточной интенсивности. Детальное изучение поля скоростей в атмосфере этой звезды требовало исследовать переменность со временем лучевой скорости отдельно по синей и красной половинам контура абсорбции и на разных уровнях ее остаточной интенсивности. В на-

стоящей статье на основе вышеуказанной методики исследована переменность профилей линий ионов и $H\beta$ в спектре α Cyg. В дополнение к 40 спектрам, полученным в 1998 г. (статья I), в исследование были включены еще 80 эшелле-спектров, полученных в 1999 г., что позволило более подробно исследовать переменность этих линий со временем.

2. Наблюдения и обработка

В 1999 году в течение 1.5 месяцев (с 02.09.99 по 16.10.99) на кудэ-эшелле-спектрографе 2-м телескопа ШАО было получено 80 ПЗС-спектров сверхгиганта α Cyg (A2 Ia), с разрешением $R = 36000$ и с отношением сигнал/шум $250 \leq S/N \leq 500$. О самом спектрометре, методике получения, обработки и редукции спектров было сказано в статье I. Для исследования быстрой переменности в течение трех ночей (02.09.99, 07.09.99 и 29.09.99 гг.) было получено 12, 8 и 8 спектров, соответственно. В остальные 13 ночей было получено по 4 спектра. Изменения лучевых скоростей и профилей линий в течение одной ночи нами обнаружены не были. Поэтому профили, полученные в течение одной ночи, суммировались и усреднялись. При высоком уровне накопленного сигнала и достаточно широких линиях (как в случае линии водорода) ошибки измерения их эквивалентных ширин и остаточных интенсивностей определяются в основном точностью проведения уровня непрерывного спектра. Важно, чтобы эта процедура была одинаковой для всех спектров. Для этой цели с помощью сопоставления всех спектров в порядках, где находятся исследуемые линии, были определены надежные участки непрерывного спектра, и в них выбирались опорные точки. Обработка отдельных порядков эшелле-спектров (векторов) выполнена пакетом программ DECH20 (Галазутдинов, 1992). Для уменьшения шумов и увеличения точности фотометрических и позиционных измерений мы применили процедуры сглаживания спектра. Пакет программ DECH20 предусматривает три варианта процесса сглаживания. Мы воспользовались наиболее эффективным в данном случае способом — методом гауссианы. Полная ширина на половине интенсивности гауссианы (FWHM), с которой сворачивался спектр, определялась шириной инструментального контура. Для наших спектров она составляла в среднем 0.15 \AA . Этот прием позволяет понизить влияние шума практически без потерь в спектральном разрешении. После выполнения вышеперечисленных процедур ошибки измерения эквивалентных ширин и остаточных интенсивностей, определенные по спектрам, полученным в одну ночь, не пре-

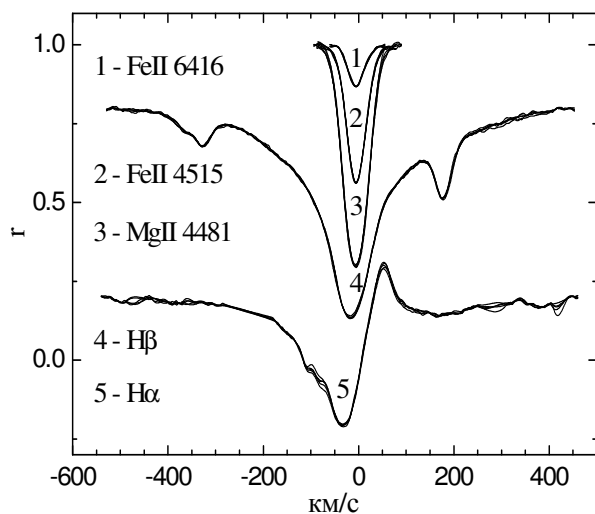


Рис. 1: Примеры профилей линий, полученных с 06.09.99 по 11.09.99. Для каждой линии приведено 5 профилей, различие между которыми практически не заметно. Профили линий $H\beta$ и $H\alpha$ сдвинуты вниз.

вышают значений 0.004 \AA и 0.003 , соответственно. Контроль систематических ошибок измерений лучевых скоростей осуществлялся по измерениям теллурических линий H_2O и O_2 . Среднеквадратическое отклонение от среднего, найденное по 60 теллурическим линиям, составляет $-0.2 \pm 0.5 \text{ км/с}$.

С 06.09.99 г. по 11.09.99 г. в течение 5-ти ночей было получено 20 спектров (по 4 спектра в каждую ночь). Профили сильной ($MgII-4481$), средней ($FeII-4515$) и слабой ($FeII-6416$) линий ионов, а также $H\beta$ и $H\alpha$, полученные в течение этих ночей (всего по 5 профилей для каждой линии, так как профили, полученные в течение одной ночи, усреднялись), представлены на рис. 1. Видно, что изменения лучевых скоростей и профилей линий практически не заметны. Для сильных линий ионов ошибки измерения эквивалентных ширин и остаточных интенсивностей, найденные по этим профилям, составляют 0.008 \AA и 0.005 , для слабых — 0.01 \AA и 0.008 , соответственно. Ошибки измерения лучевой скорости для сильных и слабых линий ионов составляют 0.8 и 1.5 км/с , соответственно. А для линий $H\beta$ и $H\alpha$ — 0.6 км/с .

3. Переменность линий

В 1999 г. наблюдения были проведены более последовательно, чем в 1998 г. А картины переменности профилей линий в 1998 и 1999 гг. одинаковы. Поэтому на рисунках переменность лучевой скорости и профилей линий в основном представлена по данным 1999 г.

3.1. Линии ионов

3.1.1. Переменность лучевой скорости

Всего было исследовано около 80 линий ионов, в том числе 6 сильных и 10 слабых. На рис. 2 переменность лучевой скорости со временем для ионов представлена на примере сильной ($MgII-4481$), средней ($FeII-4515$) и слабой ($FeII-6416$) линий. Измерение лучевой скорости проводилось по точкам профиля отдельно для синей и красной половин контура абсорбции на разных уровнях ее остаточной интенсивности γ (цифры справа на рисунках). Картины переменности лучевой скорости со временем для остальных исследуемых линий ионов аналогичные. На рис. 2 видно, что в течение 6 дней, с 06.09.99 по 11.09.99, для обеих половин контура линии на всех уровнях интенсивности γ в пределах ошибок измерений изменения лучевой скорости со временем не обнаружены. В последующие даты изменения со временем лучевой скорости для синей и красной половин профиля на всех уровнях γ происходят синхронно. При этом величины сдвигов синей и красной половин профиля абсорбции одинаковые. Таким образом, мы наблюдаем синхронное смещение синей и красной половин контура абсорбции в коротковолновую и длинноволновую части спектра, что отражает радиальную пульсацию слоев атмосферы. В этом случае переменность со временем лучевой скорости по бисектору абсорбции на всех уровнях интенсивности γ реально отражает переменность лучевой скорости по линии в целом. Для всех исследуемых линий ионов были измерены лучевые скорости по бисектору абсорбции на уровне половины ее интенсивности. Для оценки параметров переменности лучевой скорости (т.е. параметров пульсации: характерное время переменности, P ; амплитуда, A ; среднее значение лучевой скорости, т.е. γ -скорость) был использован гармонический анализ. Отметим, что в 1999 г. поиск возможных периодов осуществлялся по данным о лучевой скорости как с включением данных 06–11.09.99, так и без них. Были получены следующие параметры.

За 1998 г.: $P \approx 20.1 \pm 2.5^d$, $A \approx 6.0 \pm 0.5 \text{ км/с}$, γ -скорость $\approx -4.5 \pm 0.5 \text{ км/с}$.

За 1999 г.: $P \approx 12.5 \pm 2.0^d$, $A \approx 5.5 \pm 0.4 \text{ км/с}$, γ -скорость $\approx -5.4 \pm 0.6 \text{ км/с}$.

Характерное время переменности лучевой скорости в 1999 г. равно теоретическому значению периода пульсации в радиальной фундаментальной моде $P_{\text{fund}} \approx 12.4^d$ (Лови и др., 1984). Периоды $P > P_{\text{fund}}$ приписывают модам нерадиальных пульсаций (Люси, 1976). Таким образом, как и в работе Кауфер и др. (1997), в данном сезоне на-

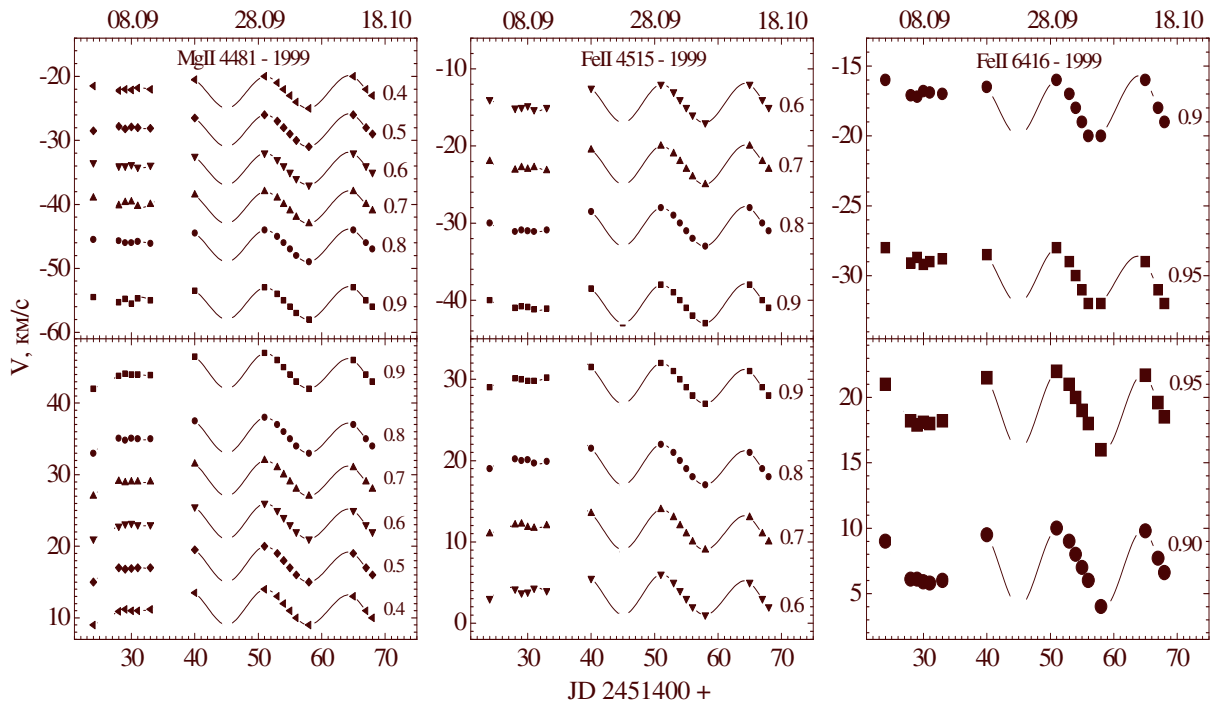


Рис. 2: Переменность лучевой скорости со временем для линий ионов большой ($MgII-4481$), средней ($FeII-4515$) и малой ($FeII-6416$) интенсивности. Измерение лучевой скорости проводилось отдельно для синей (верхние) и красной (нижние рисунки) половин профиля абсорбции на разных уровнях остаточной интенсивности r , значения которых приведены на рисунках. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений лучевой скорости. Кривая (синусоида) проведена на основе параметров переменности лучевой скорости, найденных методом гармонического анализа. По оси абсцисс указаны даты наблюдений: внизу юлианские, сверху — календарные (число и месяц).

блюдений для всех групп линий ионов параметры пульсаций одинаковые. Но характерные времена (P) различаются для разных сезонов наблюдений. По-видимому, это обусловлено тем, что в атмосфере звезды могут возбуждаться разные моды и виды пульсаций (Люси, 1976; Кауфер и др., 1997).

3.1.2. Переменность профилей линий

Картина переменности профилей линий ионов представлена на рис. 3а на примере сильной линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$. Для линий других ионов картина аналогичная. I_{av} — средний профиль по всем спектрам, полученным в 1999 г. Переменность отдельных профилей линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$ относительно их среднего I_{av} показана на рис. 3б. Из каждого индивидуального профиля рис. 3а вычитался средний профиль I_{av} . Для периода с 06.09.99 по 11.09.99, в котором не наблюдается переменность профилей линий, использован средний профиль (09.06–11, рис. 3а), из которого был вычтен I_{av} . Вертикальной линией отмечена лучевая скорость центра массы звезды (-5.0 км/с), т. е. среднее значение γ -скорости, найденное по линиям ионов

за 1998–1999 гг. Известно, что картины переменности профилей линий относительно их среднего показывают изменения в виде “возмущений” и “депрессий”, которые двигаются по профилям линий (см. например: Ховарт и Рейд, 1993; Фуллертон и др., 1996). При радиальных пульсациях картина переменности профилей относительно их среднего должна выглядеть как синусоида, которая постепенно смещается, например, в сторону отрицательных скоростей. Достигая своего максимального отрицательного положения, синусоида двигается обратно к положительным скоростям. Рис. 3б показывает, что для линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$ мы наблюдаем именно такую картину.

При максимальном отрицательном значении лучевой скорости, найденной по бисектору абсорбции (например, 06.10.99, когда $V_r = -8.1 \text{ км/с}$), мы наблюдаем “депрессию” (т. е. отрицательную часть синусоиды) с максимальной амплитудой $\Delta r \approx 0.05$ и максимальной отрицательной скоростью $V_r \approx -40 \text{ км/с}$. А на красной части этой кривой мы наблюдаем обратную картину, т. е. “возмущение” (положительную часть синусоиды) с максимальной амплитудой $\Delta r \approx 0.05$ и максимальной

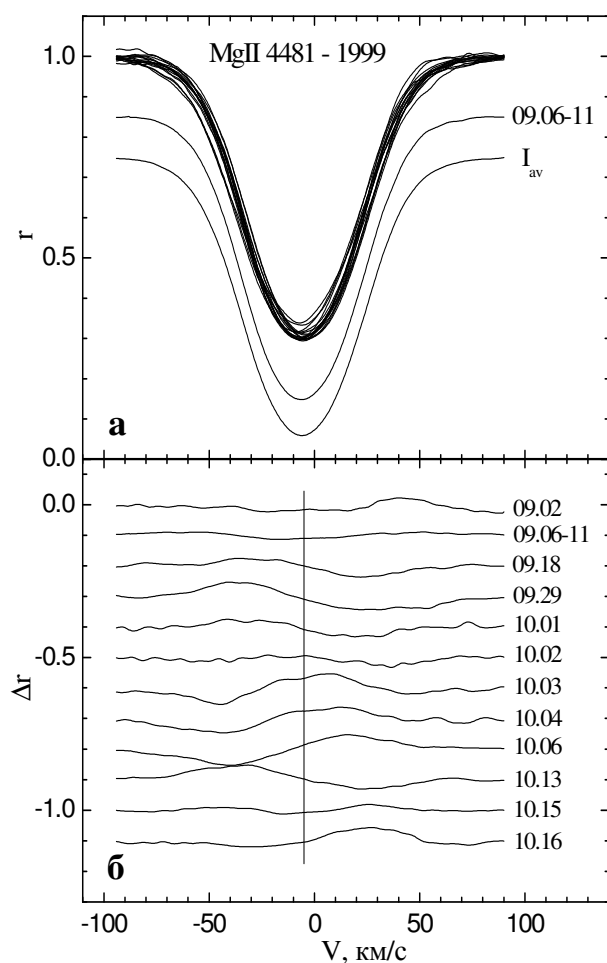


Рис. 3: (а) — профили линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$, полученные в 1999 г.: 09.06–11 — средний по профилям, полученным с 06.09 по 11.09.99; I_{av} — средний профиль по всем профилям линии, полученным за 1999 г. (б) — картины переменности отдельных профилей линии относительно среднего профиля I_{av} . Цифрами указана дата наблюдений отдельных профилей. Вертикальной линией отмечено значение лучевой скорости центра массы звезды, -5 км/с .

положительной скоростью $V_r \approx 25 \text{ км/с}$. При минимальной отрицательной лучевой скорости (когда $V_r = -2.0 \text{ км/с}$) мы наблюдаем противоположную картину (рис. 3б, кривая 09.29). А 06–11.09.99 и 02.10.99, когда значение лучевой скорости равно γ -скорости ($V_r = -5.0 \text{ км/с}$), почти никаких изменений не видно (рис. 3б, кривая 10.02). На кривой 09.06–11 в пределах ядра линии наблюдается небольшая “депрессия” (около 1%), связанная лишь с переменностью интенсивности линии.

3.2. Линия $H\beta$

3.2.1. Переменность профиля

Профили линии $H\beta$, полученные в 1999 г., представлены на рис. 4а, где I_{av} — средний по всем полученным в этом году профилям. Картина переменности отдельных профилей относительно среднего I_{av} представлена на рис. 4б. 09.06–11 — средний профиль, полученный в эти ночи. Вертикальной линией отмечена лучевая скорость центра массы звезды (-5.0 км/с). На линию $H\beta$ с обеих сторон накладываются линии $CrII$ (рис. 4а). Поэтому переменность профиля линии $H\beta$ исследовалась в интервале лучевых скоростей от -250 до $+150 \text{ км/с}$. Как видно на рис. 4б, картина переменности профиля линии $H\beta$ более сложная, чем аналогичная картина для линий ионов. Для наглядности на рис. 4в профиль 09.09–11 приводится в более растянутом масштабе лучевой скорости. В пределах этого интервала лучевых скоростей наблюдаются несколько “возмущений” и “депрессий”. Как видно на рис. 4в, в основном это связано с синей половиной профиля 06–11.09.99 г. Она имеет сложную волнообразную форму относительно синей половины среднего профиля I_{av} . Наши исследования показали, что такие сложные формы обусловлены переменностью лучевой скорости со временем.

Лучевые скорости линии $H\beta$ измерялись вышеописанным методом с шагом $\Delta r = 0.02\text{--}0.03$. Это дает возможность построить профиль линии на (V, r) -плоскости. На примере синих половин контуров профилей линии $H\beta$, полученных в 1999 г., эти картины представлены на рис. 5а. На этой (V, r) -плоскости можно применять прежнюю процедуру исследования переменности профилей относительно их среднего. Таким образом, на разных уровнях остаточной интенсивности можно исследовать переменность со временем лучевой скорости синих половин контура абсорбции относительно их общего среднего V_{av} , полученного по всем профилям 1999 г. Полученные таким образом картины переменности лучевой скорости для некоторых дат наблюдений в 1999 г. представлены на рис. 5б. Аналогичные картины переменности лучевой скорости для профилей линий, полученных в 1998 г., представлены на рис. 5в. Кривые на рис. 5б и 5в показывают, что переменность профилей (как и на рис. 4б) относительно их среднего имеет сложную волнообразную структуру. Эти переменности обусловлены переменностью лучевой скорости со временем и различаются для разных уровней r .

3.2.2. Переменность лучевой скорости

Для обоих сезонов (1998 и 1999 гг.) изменения со временем лучевой скорости для синей и красной

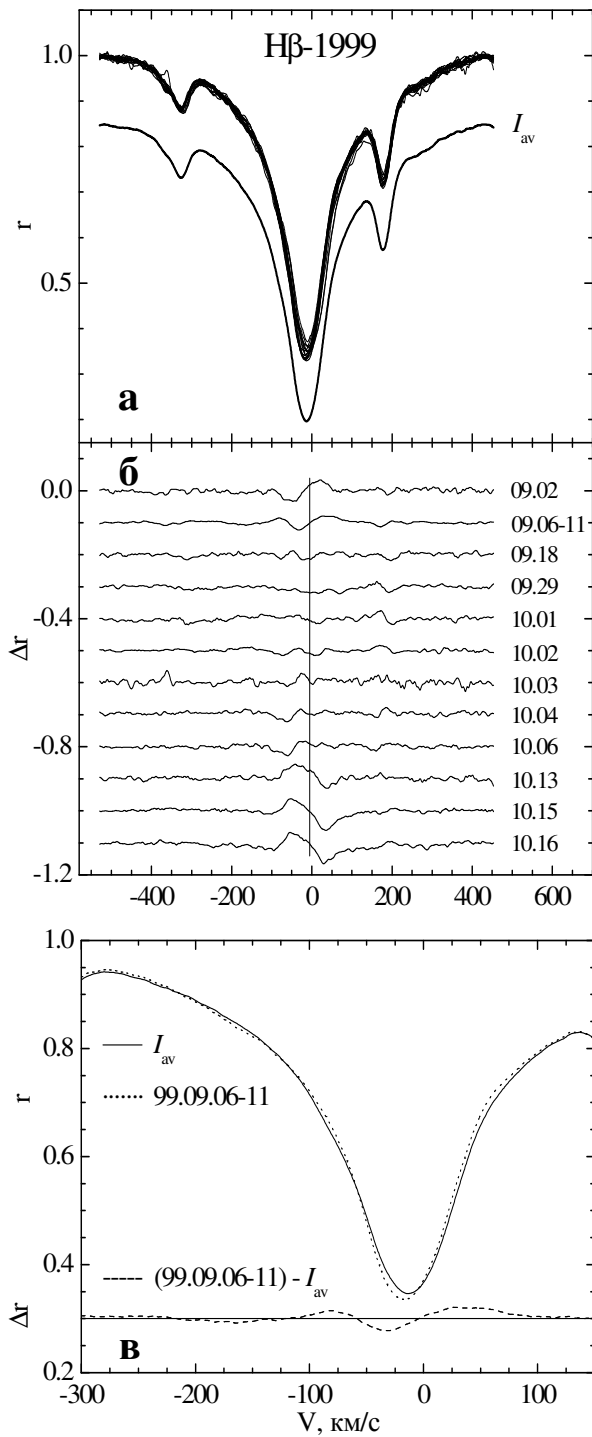


Рис. 4: Профили линии H β , полученные в 1999 г. (а) и (б) — обозначения те же, что на рис. 4а и 4б. (в): кривая 09.06-11 из рис. 4б в более растянутом масштабе лучевой скорости. Горизонтальной линией отмечено среднее значение кривой 99.09.06-11 — I_{av} .

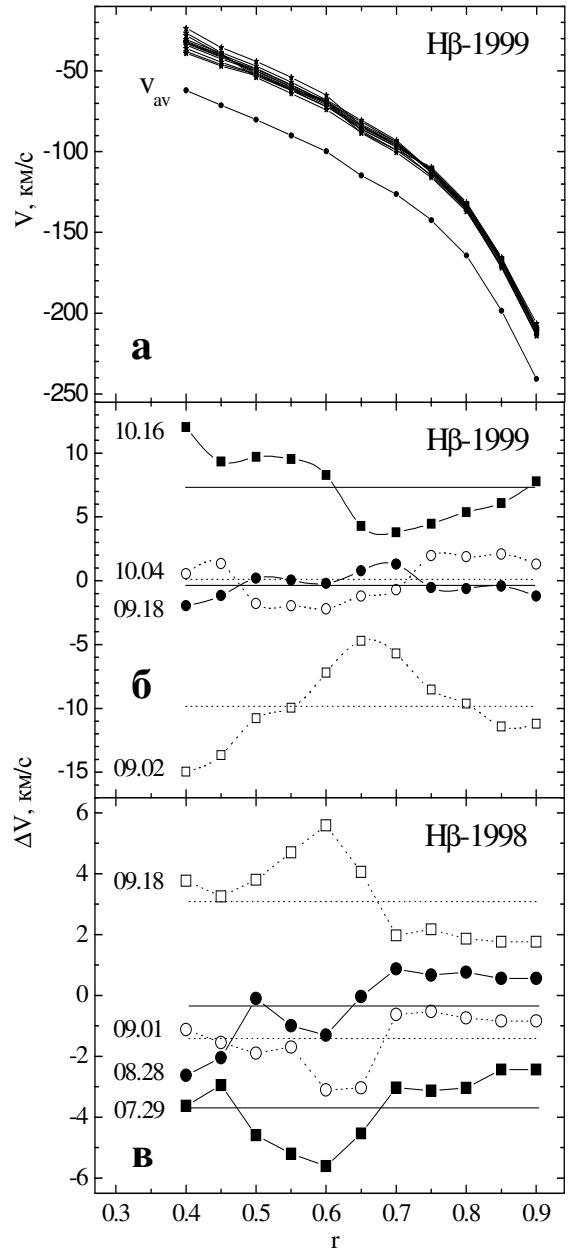


Рис. 5: (а) — профили синей половины абсорбции H β , построенные на (V, r) -плоскости. V_{av} — средний профиль синей половины абсорбции, полученный по всем профилям этой линии за 1999 г.; (б) — примеры переменности профилей синей половины абсорбции H β относительно среднего профиля V_{av} . Цифрами указана дата получения профиля, из которого был вычтен V_{av} . Кривые 10.16 и 09.02 сдвинуты по вертикальной оси соответственно на 8.0 и -8.0 км/с. Горизонтальными линиями указаны средние значения кривых; (в) — то же, что на рис. 5б, но для профилей и их среднего значения за 1998 г. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерения лучевой скорости.

половин профиля абсорбции, измеренной на разных уровнях остаточной интенсивности, представлены на рис. 6. Величины r указаны слева. Как и в случае ионов, в 1999 г. для обеих половин профиля на всех уровнях остаточной интенсивности в течение 6 дней (06–11.09.99) переменность лучевой скорости не видна. Но картина переменности для линии $H\beta$ сильно отличается от аналогичной картины для линии ионов. Во-первых, для $H\beta$ в обоих сезонах она различается для синей и красной половин абсорбции. Во-вторых, для красной половины она одинакова для всех значений r , а для синей половины контура абсорбции она различается для разных значений r (рис. 6а и 6в). Сопоставление картин переменности лучевой скорости со временем для разных значений r показывает, что синюю половину профиля $H\beta$ можно разделить на четыре подуровня: $0.7 < r \leq 0.9$ (I); $0.65 \leq r \leq 0.7$ (II); $0.4 < r < 0.65$ (III); и $r_0 < r \leq 0.4$ (IV) (рис. 6а и 6с). В пределах каждого подуровня картина переменности лучевой скорости со временем одинаковая.

3.2.3. Поиск периодов

Поиск возможных периодов переменности лучевой скорости со временем осуществлялся методом гармонического анализа. Для синей и красной половин профиля поиск проводился отдельно, как для данных каждого сезона, так и для всех данных вместе. Вначале поиск проводился для отдельных значений r . Далее полученные периоды и амплитуды переменности сопоставлялись для разных значений r . При незначительном отличии этих параметров лучевые скорости, относящиеся к соответствующим значениям r , усреднялись и снова подвергались гармоническому анализу. Также рассматривались варианты с данными 06–11.09.99 г. и без них. Для красной и синей половин профиля соответственно были рассмотрены и проанализированы около 40 и 70 различных вариантов.

Поиски показали, что для красной половины абсорбции значения периодов и амплитуд переменности не отличаются для разных значений r . Для каждого сезона были найдены два значимых периода со следующими параметрами переменности. В 1998 г.: $P_1 \approx 32.1 \pm 3.0^d$, $A \approx 7.5 \pm 1.0$ км/с, γ -скорость $\approx 50.0 \pm 0.5$ км/с; $P_2 \approx 16.2 \pm 1.8^d$, $A \approx 8.4 \pm 1.2$ км/с, γ -скорость $\approx 48.0 \pm 1.0$ км/с. В 1999 г.: $P_1 \approx 30.0 \pm 2.9^d$, $A \approx 8.5 \pm 1.0$ км/с, γ -скорость $\approx 49.2 \pm 0.6$ км/с; $P_2 \approx 15.5 \pm 1.6^d$, $A \approx 6.0 \pm 1.2$ км/с, γ -скорость $\approx 46.9 \pm 0.5$ км/с. Для 1999 г. кривые с полученными параметрами приведены на рис. 6б (на уровнях $r = 0.7$ и $r = 0.65$). Для всех данных (полученных в обоих сезонах) гармонический анализ также выявил два

значимых периода со следующими параметрами: $P_1 \approx 29.7 \pm 0.7^d$, $A \approx 8.0 \pm 0.7$ км/с, γ -скорость $\approx 49.2 \pm 0.6$ км/с; $P_2 \approx 15.9 \pm 0.3^d$, $A \approx 6.8 \pm 1.0$ км/с, γ -скорость $\approx 47.6 \pm 0.5$ км/с. Фазовые кривые $V(\varphi)$ для этих значений периода приведены на рис. 7.

В случае синей половины профиля абсорбции поиск возможных периодов осуществлялся также по вышеописанной схеме. Для двух вариантов поиска (с данными 99.09.06–11 и без них) найденные значения периодов не отличались друг от друга. Далее речь будет идти о результатах поиска по материалам обоих сезонов без данных 99.09.06–11. Гармонический анализ показал, что в пределах вышеуказанных подуровней значения периода мало отличаются друг от друга. Для каждого подуровня были найдены более 10 значимых периодов. Для отбора окончательного варианта строились графики фазовой зависимости лучевой скорости, $V(\varphi)$. Отобранные таким образом значения периодов для каждого подуровня представлены в табл. 1. Примеры фазовых кривых $V(\varphi)$ для некоторых значений периодов приведены на рис. 7.

Исследование показало, что для синей половины профиля $H\beta$ амплитуда переменности со временем лучевой скорости отличается для разных значений r . Как по максимальным и минимальным значениям лучевой скорости, так и по результатам поиска методом гармонического анализа при значениях $r = 0.7$ она имеет минимальное значение (рис. 8).

4. Обсуждение и заключение

Наши исследования показали (раздел 3.1.1), что классический метод исследования переменности со временем лучевой скорости (т.е. по лучевой скорости бисектора абсорбции) приемлем для линий ионов (1999 г.), когда проявляется радиальная пульсация. В этом случае изменение лучевой скорости со временем для обеих половин профиля линии и на всех уровнях ее интенсивности происходит синхронно. Для линий ионов значение периода в 1998 г. $P = 20.0 > P_{\text{fund}}$, а картина переменности лучевой скорости такая же, как в 1999 г. (рис. 2). Поэтому мы считаем, что переменность линий ионов в 1998 г. также обусловлена радиальными пульсациями.

На рис. 9 представлена переменность со временем лучевой скорости бисектора линии $H\beta$ для трех уровней остаточной интенсивности r : в ядре, на уровне FWHM и на крыле. Рис. 9 показывает, что картина переменности со временем лучевой скорости, определенная по бисектору абсорбции, очень сложная и различается для разных значений r . По этим картинам сложно судить о поле скоростей в атмосфере звезды. Сложные формы

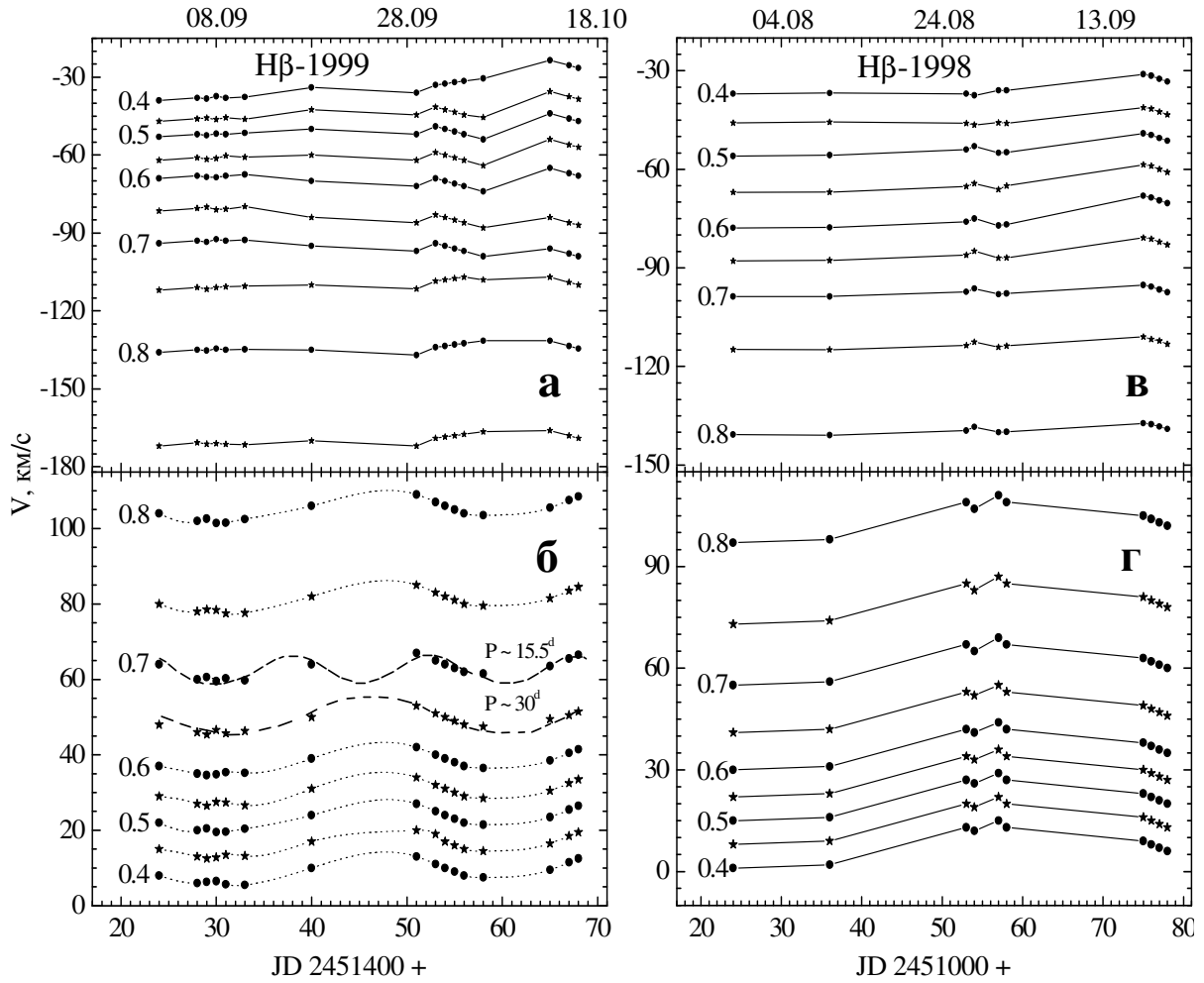


Рис. 6: Изменения со временем лучевой скорости по контурам линии $H\beta$ в 1998 и 1999 гг.: (а), (в) — для синей, (б), (г) — для красной половины контура. Значения r отмечены на левой стороне графиков с шагом $\Delta r = 0.05$. На рис. 6б на уровнях $r = 0.7$ и $r = 0.65$ кривые (синусоиды) проведены для двух значимых периодов, найденных методом гармонического анализа для красной половины контура абсорбции по данным 1999 г. Для других значений r и для красной, и для синей половины контура кривые проведены сплайнами или прямой линией.

Таблица 1: Значения периодов, полученные методом гармонического анализа для 4 уровней синей половины контура абсорбции линии $H\beta$. Для каждого подуровня приведены интервалы r

Подуровни	Интервалы r	Значения периодов и точность их определения, в днях							
		1	2	3	4	5	6	7	8
I	$0.75 \leq r \leq 0.90$	172.0 ± 10.1	27.9 ± 1.2	26.1 ± 1.1	—	—	11.2 ± 0.2	10.9 ± 0.2	
II	$0.65 \leq r \leq 0.70$	151.0 ± 8.2	30.0 ± 1.3	28.7 ± 1.2	—	—	11.8 ± 0.2	11.5 ± 0.2	
III	$0.45 \leq r \leq 0.60$	126.0 ± 6.5	30.0 ± 1.3	28.0 ± 1.2	15.5 ± 0.3	14.9 ± 0.23	11.8 ± 0.2	11.5 ± 0.2	
IV	$r_0 < r < 0.40$	126.0 ± 6.5	28.0 ± 1.1	26.0 ± 1.0	—	—	—	—	

кривых на рис. 9 связаны с тем, что переменность со временем лучевой скорости отличается для синей и красной половин профиля.

Наши исследования также показали, что для выявления реальной картины переменности профилей линий необходимо из каждого индивидуального профиля вычесть средний профиль данно-

го сезона наблюдений. Возможен вариант использования среднего профиля, полученного по всему материалу, если в каждом сезоне количество профилей соизмеримо.

На рис. 10 представлена картина переменности профилей линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$, полученных в 1998 г. (даты указаны на рисунке), относитель-

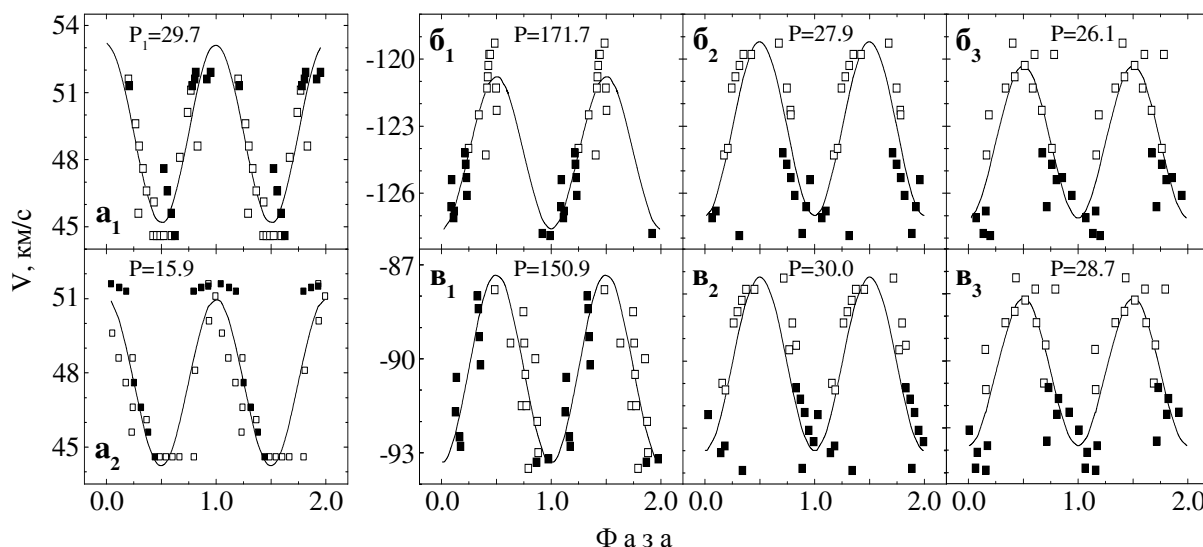


Рис. 7: Фазовые зависимости $V(\varphi)$ для красной и синей половин профиля линии $H\beta$. Значения периода (в днях) указаны сверху. (a_1), (a_2) — для красной; (b_1), (b_2), (b_3) (подуровень I из табл. 1) и (b_1), (b_2), (b_3) (подуровень II) — для синей половины профиля. Темные квадраты — данные за 1998 г., светлые — 1999 г. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений лучевой скорости. Для красной половины абсорбции кривые приведены с учетом, а для синей половины — без учета данных 06–11.09.99, когда в течение 6 дней не видна переменность лучевой скорости со временем.

но различных средних профилей, полученных в 1999 г. Рис. 10а: из каждого профиля был вычтен средний по 12-ти симметричным профилям, полученным с 13.10.99 по 16.10.99. Видно, что картина переменности отличается от аналогичной картины, полученной для линий $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$ в 1999 г. (рис. 3б). Рисунок 10б аналогичен рисунку 10а, но из каждого профиля линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$, использованного на рис. 10а, был вычтен средний по 20-ти симметричным профилям, полученным в течение 06–11.09.99 (рис. 3а). Как видно, картины на рис. 10а и 10б сильно различаются.

Такую же картину переменности для линий ионов и водорода ($H\delta$ и $H\delta$) получила Гриффин (2004). Профили, полученные в разные сезоны наблюдений, были разделены на их средний профиль, полученный в другом сезоне наблюдений. Эмиссионные компоненты на длинноволновой части профиля линий (как на рис. 10а) и их переменность автор связывал с переменностью оболочки звезды.

Качество нашего спектрального материала позволило получить картины на рис. 10(а, б) путем вычитания среднего профиля. При делении на средний профиль картины получаются аналогичными и более рельефными. В разделе 3.1.2 было показано, что переменность профиля линии $MgII$ (и других линий ионов) вызвана переменностью лучевой скорости. Но в разные сезоны наблюде-

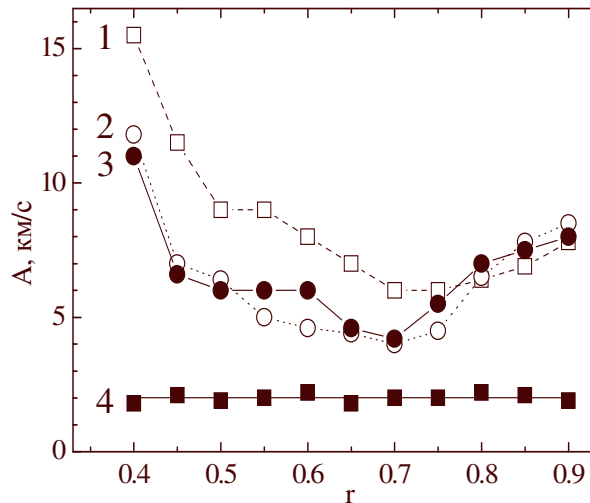


Рис. 8: Амплитуда лучевой скорости синей и красной половин профиля $H\beta$ на разных уровнях интенсивности линии. Для синей половины: 1 — по данным 1999 г., по максимальным и минимальным значениям лучевой скорости. С применением метода гармонического анализа: 2 — по данным 1999 г., 3 — по данным 1998–1999 гг., 4 — для красной половины профиля абсорбции, по данным 1998–1999 гг. Кривая 4 сдвинута вниз на 5 км/с по вертикальной оси. Вертикальные размеры символов — как на рис. 2.

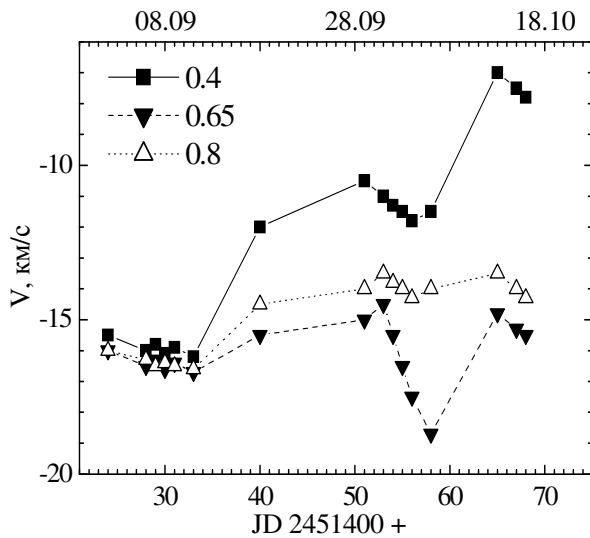


Рис. 9: Переменность со временем лучевой скорости по бисектору абсорбции линии $H\beta$ для 3-х значений остаточной интенсивности r , указанных на рисунке. Горизонтальная ось и размеры символов — как на рис. 2.

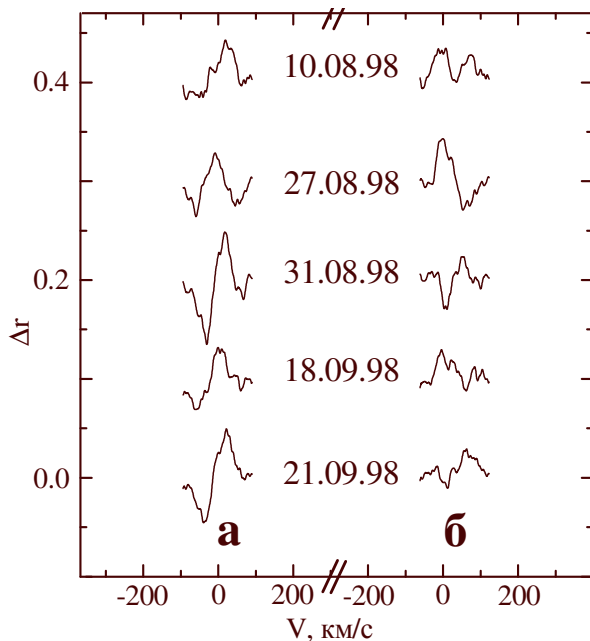


Рис. 10: Картина переменности профилей линии $MgII \lambda 4481 \text{ \AA}$, полученных в 1998 г. (даты указаны на рисунке) относительно среднего профиля: (а) — полученного по симметричным профилям с 13.10.99 по 16.10.99; (б) — полученных по симметричным профилям с 06.09.99 по 11.09.99. Все профили (кроме 21.09.98) сдвинуты вверх по вертикальной оси.

ний (1998 и 1999 гг.) переменность лучевой скорости имеет разные периоды (раздел 3.1.1). Следовательно, при вычитании или делении профилей, полученных в разные сезоны, происходит суперпозиция колебаний с разными параметрами переменности. В нашем случае (рис. 10 а и б) использованные средние профили относятся к разным фазам колебаний лучевой скорости в 1999 г. (см. рис. 2). Поэтому картины на рис. 10а и 10б сильно различаются. Этот пример показывает, что использование некорректных методов исследований может привести к неверным заключениям.

Наша методика выявила интересные особенности переменности линии $H\beta$, обусловленные движениями типа пульсаций. Картины переменности лучевой скорости со временем для синей и красной половин профиля абсорбции различаются. Для красной половины профиля эта картина одинакова на всех уровнях остаточной интенсивности линии. Для синей половины профиля она отличается на разных уровнях. По найденным параметрам переменности лучевой скорости синюю половину контура абсорбции можно разделить на четыре подуровня. Методом гармонического анализа для красной половины контура были найдены два значимых периода. А для синей половины контура абсорбции — несколько значимых периодов, представленных в табл. 1. Мы не отдаем предпочтение какому-то из этих периодов. Возможно, некоторые из них проявились в связи с малочисленностью данных. С другой стороны, возможно, в атмосфере этой звезды одновременно возбуждаются несколько мод пульсаций (Люси, 1976; Кауффер и др., 1996).

γ -скорость по линии $H\beta$ в среднем в три раза превышает лучевую скорость центра массы звезды (-5.0 км/с) и меняется в пределах от -12.0 до -18.0 км/с. По-видимому, эта линия формируется в верхних слоях атмосферы, где зарождается звездный ветер и скорость расширения меняется со временем. Разные картины переменности лучевой скорости для разных уровней синей половины профиля говорят о том, что линия $H\beta$ формируется в более протяженных слоях атмосферы. В этих слоях структура поля скоростей очень сложная и меняется по высоте в атмосфере. Возможно, это является основой (источником) переменности звездного ветра. Характер и параметры переменности лучевой скорости также различаются для синей и красной половины профиля. Наш метод позволяет по отдельности изучить различающуюся кинематику поднимающихся и опускающихся слоев. Возможно, именно в этих слоях находится источник переменности со временем звездного ветра. Все это говорит о том, что наш методический подход позволяет исследовать природу переменности

сти звездного ветра в области его возникновения.

Наши исследования также показали, что звезда α Cyg в течение 6 дней находилась в фазе покоя. С 06.09.99 по 11.09.99 не наблюдалась переменность профилей линий (рис. 1) и лучевой скорости (рис. 3 и 6) для обеих половин профиля абсорбции и на всех уровнях ее интенсивности. Этот факт свидетельствует о том, что степень нестационарности звездного ветра α Cyg различается для разных сезонов наблюдений.

Отметим, что в вышеупомянутой работе Рзаева и Панчука (2006) аналогичное исследование линий HeI показало, что для всех изучаемых линий параметры переменности со временем лучевой скорости различаются для синей и красной половин профиля абсорбции.

Предложенный нами метод — исследование переменности профиля линий на (V, r) -плоскости (раздел 3.2.1, рис. 5) позволяет детально исследовать переменность на разных уровнях интенсивности линии. Наши исследования показали, что если картины переменности таковы, как на рис. 5 (б, в), то переменность обусловлена нерадиальными пульсациями. В случае радиальных пульсаций, которые наблюдаются для обеих половин профилей ионов, картины выглядят как горизонтальные линии, параллельно смещенные относительно друг друга. Такая картина переменности наблюдается и для красной половины контура абсорбции $H\beta$. Возможно, ее переменность также обусловлена радиальными пульсациями.

Для синей половины абсорбции $H\beta$ амплитуда переменности лучевой скорости отличается на разных уровнях r . При $r = 0.7$ она минимальна (рис. 8), постепенно увеличивается в направлении крыла и резко увеличивается в направлении ядра. Следует отметить, что аналогичная картина наблюдается и в спектре нерадиального пульсатора HD 93521 O9.5 V для всех сильных линий (HeI, $H\beta$ и $H\alpha$) и для обеих половин профиля абсорбции (Рзаев и Панчук, 2007). Все это говорит о том, что наш методический подход позволяет выявить новые интересные особенности в картине переменности линий, подтверждение и объяснение которых требует дальнейших наблюдений.

В заключение отметим, что при нашем методе исследования на одном спектре только для линии $H\beta$ для обеих половин профиля абсорбции и на разных уровнях ее интенсивности было сделано около 30-ти измерений лучевой скорости. На всех спектрах для этой линии было сделано около 700 измерений. А для всех исследуемых линий было сделано свыше 4000 измерений.

Благодарности. Авторы благодарят Клочкову В.Г., Ченцова Е.Л. и Панчука Е.В. за обсуждение результатов, Бычкова В.Д. за предоставление программ гармонического анализа.

Работа поддержана программами фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Протяженные объекты во Вселенной” (проект “Спектроскопия протяженных оболочек звезд на поздних стадиях эволюции”); президиума РАН “Нестационарные процессы в астрономии” (проект “Изучение природы нестационарных ветров горячих сверхгигантов”); фондом Президента РФ по поддержке молодых кандидатов наук, грант №МК-874.2004.2.

Список литературы

- Галазутдинов Г.А. Препринт Специальной Астрофизической Обсерватории, 1992, №92.
- Гриффин (Griffin R.E.M.), 2004, in “The A-Star Puzzle”, Proceed. IAU Symp. No.224, eds: Zverko J., Ziznovsky S. J., Weiss W.W., Cambridge University, p. 900
- Кауфер и др. (Kaufer A., Sthal O., Wolf B., et al.), 1996, A&A, **305**, 887
- Кауфер и др. (Kaufer A., Sthal O., Wolf B., et al.), 1997, A&A, **320**, 273
- Лови и др. (Lovy D., Maeder A., Noels A., Gabriel M.), 1984, A&A, **133**, 307
- Люси (Lucy L.B.), 1976, ApJ, **206**, 499
- Рзаев А.Х. (Rzayev A.Kh.), 2002, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв. v. **54**, p. 66 (статья I)
- Рзаев А.Х., Панчук В.Е., 2006, Astron. Zh. v. **83**, p. 36
- Рзаев А.Х., Панчук В.Е., 2007, Astron. Zh. (в печати)
- Фуллerton и др. (Fullerton A.W., Gies D.R., Bolton C.T.), 1996, ApJS, **103**, 475
- Ховарт и Рейд (Howarth I.D. and Reid A.H.N.), 1993, A&A, **279**, 148