

УДК 524.31.01-355

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ АТМОСФЕРЫ α Cyg. IV: НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕННОСТИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ СО ВРЕМЕНЕМ

© 2010 А. Х. Рзаев*

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 6 мая 2009 г.; принята в печать 25 июня 2009 г.

По 240 ПЗС–спектрам, полученным на кудэ–эшелле–спектрографе 2-м телескопа ШАО НАН Азербайджана в 1998–2000 гг., было исследовано изменение со временем профилей и лучевых скоростей линий ионов, HeI и H β в спектре сверхгиганта α Cyg. Показано, что эти изменения обусловлены движениями типа пульсаций, существующих в атмосфере этой звезды. Для линий ионов и HeI колебания происходят в основной фундаментальной моде с периодом около 12.0 ± 0.5^d и амплитудой 5.0 ± 0.5 км/с. Их продолжительность для линий ионов составляет около 35 дней. Далее, вследствие появления разницы между лучевыми скоростями сильных и слабых линий ионов постепенно происходит затухание этих колебаний в течение примерно 5.0 ± 1.0^d , после чего процесс повторяется. Для линии H β были найдены два значимых периода и две амплитуды, а также три характерных поведения переменности лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции: параметры переменности (период P, амплитуда A) одинаковые; P и A одинаковые, но наблюдается сдвиг фазы между колебаниями лучевой скорости синей и красной половин профиля абсорбции; P и A различается для двух половин профиля абсорбции. Лучевая скорость центра массы звезды, определенная по γ -скорости составляет -4.5 ± 0.5 км/с. Средняя скорость расширения слоев атмосферы, где формируется линия H β , около -16.5 ± 0.5 км/с, она меняется со временем с амплитудой около 3.0 км/с.

Ключевые слова: *звезды — переменные и пекулярные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхгигант α Cyg — одна из ярких звезд на северном небе. Она была исследована в широком интервале спектра от далекого УФ до радиодиапазона [1]. Абт [2] был первым, кто по длительным спектральным наблюдениям исследовал нестационарность сверхгигантов, в том числе и α Cyg. Он обнаружил, что у сверхгигантов наблюдаются изменения лучевой скорости, напоминающие пульсации. В случае α Cyg характерное время переменности лучевой скорости, найденное по линиям FeII λ 4508, 4515, 4520 и 4522 Å, оказалось около 13.8^d . Ссылаясь на работу Паддока [3] он принял эту величину равной 11.7^d . Люси [4] по 447 измерениям лучевой скорости линий ионов Паддока [3] пришел к заключению, что переменность обусловлена одновременным возбуждением нескольких дискретных пульсаций. Люси нашел 16 значимых периодов в интервале от 6.9 до 100.8^d .

Большие значения периода ($P > P_0 \approx 14.3^d$) приписывались нерадиальным пульсациям. Иноу [5] обнаружил стратификацию лучевой скорости в атмосфере α Cyg. Линии ионов, предположительно фотосферного происхождения, показывали амплитуду изменения лучевой скорости около 6 км/с. В более высоких слоях, где формируются бальмеровские линии с малыми номерами и линия MgII λ 4481 Å, амплитуда достигала 15 км/с. А в самых высоких слоях атмосферы, где формируются линии H α , H и K MgII, амплитуда возрастала от 50 до 150 км/с.

По эшелле–ПЗС спектрам (R=20000) сверхгигант α Cyg исследован Гейдельбергской группой [6, 7]. Было показано, что переменность лучевой скорости и профилей линий ионов обусловлена движениями типа пульсаций. Одновременно возбуждается несколько мод пульсаций. Характерное время переменности лучевой скорости со временем различается для разных сезонов. Для линий ионов не обнаружено стратификации лучевой скорости. По линиям H $_{27}$ –H $_{8}$ обнаружен

*E-mail: abid@sao.ru

небольшой Бальмеровский прогресс. Переменность профиля $H\alpha$ происходит из-за наложения переменных синие- и красносмещенных эмиссий на стабильный “фотосферный” профиль. Переменность проявляется одновременно и симметрично относительно скорости центра массы звезды. Отмечено, что определить характерное время этих изменений весьма трудно. По изменениям эквивалентной ширины линии $H\alpha$ было найдено, что оно близко к величине периода вращения звезды. Авторы сделали заключение, что переменность профиля линии $H\alpha$ обусловлена модуляцией вращения.

Наши недавние исследования показали, что традиционный метод изучения изменений со временем лучевой скорости (измеряемой по бисектору абсорбции) приемлем для линий ионов, когда наблюдается радиальная пульсация. Если разделить линии по бисектору на две части и исследовать переменность лучевой скорости отдельно по синей и красной половин профиля линии, то в случае линий $H\beta$ и $H\alpha$ картины и параметры переменности лучевой скорости для синей и красной половин профиля могут различаться. Для изучения стратификации лучевой скорости в атмосфере звезды необходимо исследовать переменность лучевой скорости отдельно для синей и красной половин профилей линий на разных уровнях их остаточной интенсивности [8, 9] (далее, соответственно, статья II и III). Параметры переменности (амплитуда и характерное время) также могут различаться для разных уровней остаточной интенсивности r (статья III).

Нами было получено, что для линий ионов изменения лучевой скорости обеих половин профиля абсорбции на всех уровнях ее интенсивности происходят одинаково. Как и в работе Кауфер и др. [7], в наших наблюдениях для конкретного сезона наблюдений для всех линий ионов параметры пульсаций (период, амплитуда) одинаковые. Но для разных сезонов наблюдений периоды различаются.

В случае линии $H\beta$ картины и параметры переменности лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции различаются. Для красной половины профиля параметры переменности одинаковы для всех уровней остаточной интенсивности линии, а для синей половины отличаются для разных уровней (статья II).

Наши исследования показали, что в случае линии $H\alpha$ картина переменности лучевой скорости также обусловлена нерадиальными пульсациями (статья III). Параметры пульсации различаются для синей и красной половин профиля абсорбции. Для красной половины профиля амплитуда и период увеличиваются от ядра в сторону крыла линии. На синей половине профиля дополнительно наблюдаются абсорбционные детали. Их появление

и исчезновение, а также незначительные миграции свидетельствуют о клочковатой структуре оболочки звезды. Прослеживается движение отдельных ступков в верхних слоях атмосферы звезды, которые проявляются в виде абсорбционных деталей.

Наши исследования также показали, что в спектре α Cyg в течение 5–6 ночей (с 06.09.99 г. по 11.09.99 г.) заметных изменений фотометрических и позиционных параметров линий не обнаруживается, т. е. звезда находилась в состоянии “покоя” (статья II).

В настоящей статье по вышеуказанной методике исследована переменность профилей линий ионов, HeI и $H\beta$ в спектре α Cyg. В дополнение к 120 спектрам, полученным в 1998–99 гг. (статья II), в исследование были включены еще 120 эшелле-спектров, полученных в 2000 г., что позволило более подробно исследовать переменность этих линий со временем.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектры были получены в кудэ спектрографе 2-м телескопа ШАО НАН Азербайджана на эшелле-спектрографе SEG5 с матрицей 580×530 элементов [10]. Размер матрицы ставил ограничение как на число порядков, так и на длину одного порядка. Наклон решетки выбирался таким образом, что в кадр попадал спектральный диапазон $\lambda\lambda$ 4340–7000Å и одной экспозицией можно было фиксировать линии $H\alpha$ и $H\beta$ [11].

В 1998 г. в течение двух, в 1999 г. в течение полтора и в 2000 г. в течение четырех месяцев были получены по 40, 80 и 120 ПЗС-эшелле-спектров с $R = 36000$ и $250 \leq S/N \leq 500$. Во всех трех сезонах каждую ночь получались как минимум по 4 спектра (статья III). Изменения лучевой скорости и профиля линий в течение одной ночи не были обнаружены, поэтому профили усреднялись. Общее количество наблюдательных ночей в течение 3-х лет составило 52, соответственно, по 11, 16 и 25 ночей (точек) в 1998, 1999 и 2000 гг.

Обработка эшелле изображений выполнена стандартной методикой с помощью пакета программ MIDAS. Измерение фотометрических и позиционных параметров линий осуществлено пакетом программ DECH20 [12]. Как и в предыдущих работах, для уменьшения шумов и увеличения точности фотометрических и позиционных измерений мы применили процедуру сглаживания спектра методом гауссианы (статья II). Измерение лучевой скорости производилось следующим образом. Профили исследуемых линий записывались в $r - V$ координатах. Далее отдельно для синей и красной половин профиля на разных уровнях остаточной интенсивности r с шагом ± 0.05 (например,

для $r = 0.45, 0.5$ и т.д.) брались отчеты лучевой скорости. Для каждого уровня r (например, для $r = 0.55$) данные о лучевой скорости усреднялись по 5 соседним уровням с шагом ± 0.01 . Такой подход значительно уменьшил ошибки измерений, дал возможность детально исследовать картину переменности лучевой скорости со временем. Для сильных линий ионов, линий H β и для слабых линий ионов и HeI среднеквадратические отклонения лучевой скорости от среднего, соответственно, не превышали $\pm 0.3, \pm 0.5$ и ± 1.1 км/с.

3. ПЕРЕМЕННОСТЬ ЛИНИЙ

3.1. Переменность лучевой скорости

3.1.1. Линии ионов

Как было отмечено выше, в случае линий ионов переменность лучевой скорости со временем, исследованная по бисектору абсорбции на всех уровнях интенсивности r , реально отражает переменность лучевой скорости по линии в целом (статья II). Данные по лучевым скоростям линий ионов, полученные за 2000 г. также подтвердили это. Поиск возможных периодов изменения лучевой скорости со временем проводился методом гармонического анализа, который был подробно описан в статье III.

Как было отмечено в статье II, картины переменности отдельных профилей относительно среднего профиля для сезонов 1998 и 1999 гг. были одинаковые. Но периоды переменности лучевой скорости различались и равнялись 20 и 12.5^d, соответственно, для 1998 и 1999 гг. Для профилей линий ионов, полученных в 2000 г., картины переменности профилей относительно среднего профиля оказались такими же, что для предыдущих годов. А по измерениям лучевой скорости, полученным в 2000 г., мы никаких значимых периодов не нашли. Были получены периоды около 14 и 30 дней с низкой значимостью. Отметим, что в 2000 г. (как и в 1999 г.) в течение 5 ночей (JD—1740–1745) в пределах ошибок измерений также не обнаружено заметных изменений фотометрических и позиционных параметров линий. Наши исследования показали, что обнаружение разных периодов для разных сезонов наблюдений связано с этим фактом. При поиске периодов необходимо исключать постоянные значения лучевой скорости.

Переменность лучевой скорости со временем для разных сезонов наблюдений представлена на Рис. 1. На Рис. 1с, чтобы не менять масштаб по оси абсцисс, данные за JD 1808, 1810, 1866 и 1868 не нанесены. Поиск возможных периодов по данным Рис. 1 выполнялся по следующей схеме. Мы исключили постоянные значения лучевой скорости, т.е. данные JD: 1428–31 и 1740–45 за 1999

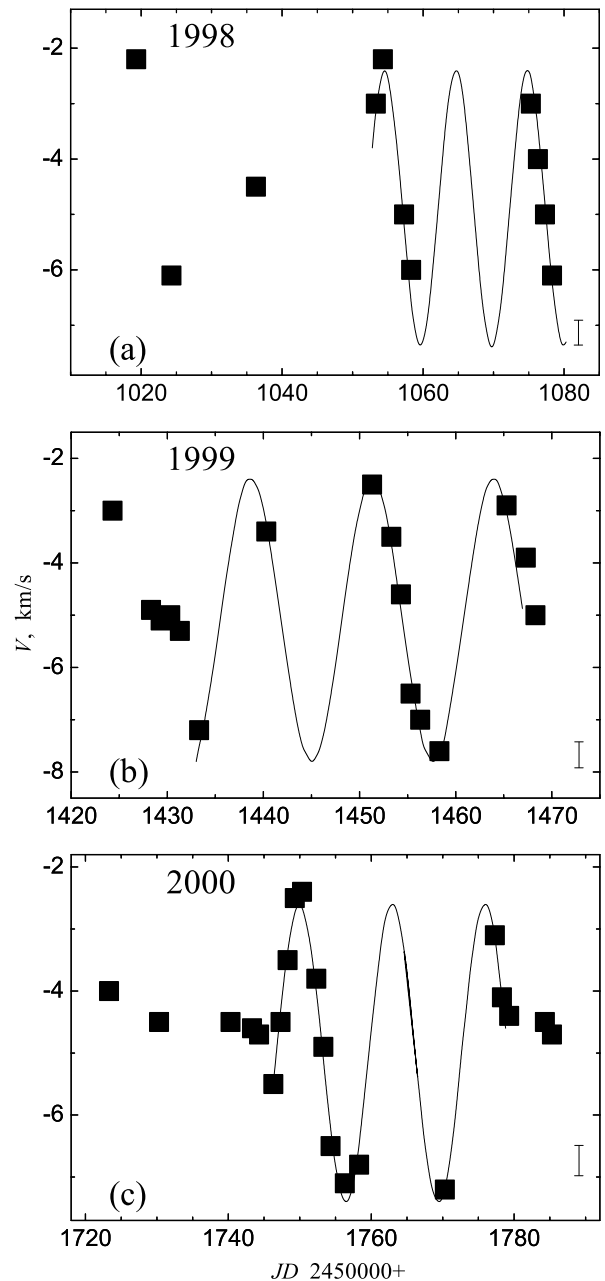


Рис. 1. Переменность лучевой скорости со временем для линий ионов в разные годы наблюдений. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерений лучевой скорости. Кривая (синусоида) проведена методом гармонического анализа. По оси абсцисс указаны юлианские даты наблюдений.

и 2000 гг. Далее поиск проводился как по данным отдельных сезонов, так и по всем данным за 3 года с 1998 по 2000 гг. Во всех случаях параметры переменности лучевой скорости (период, амплитуда и γ -скорость) были одинаковыми. Но данные плохо ложились на общую фазовую кривую. Сопоставление фазовых кривых (построенных как для отдельных сезонов, так и для всех данных за 3 года)

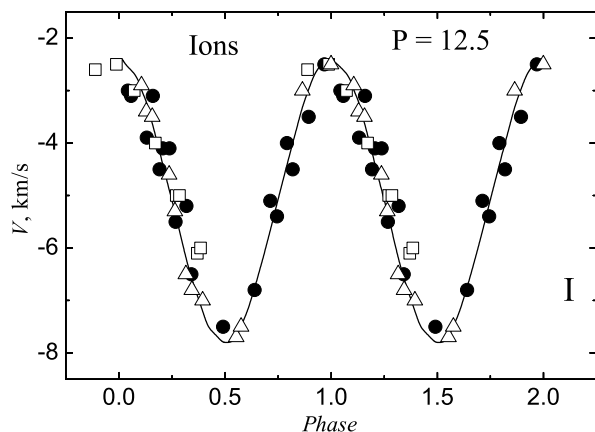


Рис. 2. Фазовая кривая переменности лучевой скорости для линий ионов. Квадратики, треугольники и темные кружки, соответственно, данные за 1998, 1999 и 2000 гг. Начальная фаза — JD 2451746. Кривые на Рис. 1 за 1998 и 1999 гг. сдвинуты по фазе. В правом нижнем углу вертикальный отрезок указывает ошибку измерений лучевой скорости.

показало, что необходимо учитывать сдвиг фазы (возникающий за счет того, что в отдельные периоды наблюдения наблюдаются постоянные значения лучевой скорости) как для отдельных сезонов, так и для отдельных сетов наблюдений. На Рис. 1 для каждого сезона наблюдений приведены кривые переменности лучевой скорости со временем. Кривые построены для параметров переменности лучевой скорости: $P = 12.5 \pm 1.5^d$; $A = 5.0 \pm 0.5$ км/с; $\gamma = -4.5 \pm 0.5$ км/с, найденных методом гармонического анализа. Фазовая кривая для данных, полученных за 3 года, с учетом сдвига фаз для разных сезонов, приведена на Рис. 2.

3.1.2. Линии HeI

В спектре α Суг линии HeI очень слабые, поэтому они до сих пор не были исследованы. В среднем центральные интенсивности r_0 линий HeI λ 4471, 5876 и 6678 Å составляют, соответственно, 0.89, 0.88 и 0.95. На спектрах, полученных в 1999 и 2000 гг., отношение S/N было более высоким, чем в 1998 г. и переменность лучевой скорости линий HeI со временем исследовалась для этих двух сезонов по вышеуказанным трем линиям. Как и в случае линий ионов, лучевые скорости измерялись по бисектору абсорбции на уровне половины интенсивности линий. Картины переменности лучевой скорости со временем для линий HeI оказались такими же, как для линий ионов того же сезона. Параметры переменности лучевой скорости для линий HeI, с учетом ошибок измерений, оказались одинаковыми с параметрами для линий ионов: $P = 12.5 \pm 2.0^d$; $A = 6.0 \pm 1.5$ км/с; $\gamma = -5.5 \pm 1.5$ км/с. Фазовая

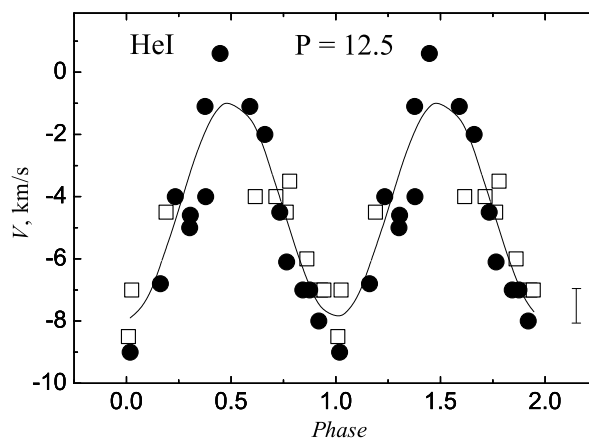


Рис. 3. То же, что на Рис. 2, но для линий HeI. Квадратики и темные кружки, соответственно, данные за 1999 и 2000 гг.

кривая по данным двух сезонов с учетом сдвига фаз между этими сезонами приведена на Рис. 3.

3.1.3. Линия H β

Как и в предыдущей работе (статья II), измерение лучевой скорости выполнялось отдельно для синей и красной половин профиля абсорбции H β на разных уровнях остаточной интенсивности. Центральная остаточная интенсивность линии H β в среднем составляет $r_0 = 0.35 \pm 0.015$. Наши исследования показали, что в области ядра (где $r < 0.4$) и в крыльях линии ($r > 0.7$) точность измерений ухудшается, поэтому измерения проводились в интервале $0.4 \leq r \leq 0.7$ с шагом $\Delta r = 0.05$ (т.е. для семи уровней $r = 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7$). Для каждого уровня измерения лучевой скорости выполнялись вышеописанным методом (см. раздел 2). Такой подход показал, что для обеих половин профиля абсорбции на всех вышеуказанных уровнях r параметры переменности лучевой скорости со временем одинаковые. Поэтому кривые на рисунках приведены для среднего уровня $r = 0.55$ (т.е. средняя лучевая скорость по семи уровням). Ошибки нахождения амплитуды и γ -скорости также были определены как отклонение от среднего значения этих величин, найденных по семи уровням. На Рис. 4–7 вертикальным отрезком отмечены ошибки нахождения амплитуды, а ошибки измерения лучевой скорости приведены в разделе 2.

Поиск возможных периодов переменности лучевой скорости со временем также проводился вышеописанным способом. По измерениям лучевой скорости, полученным в 1998 г., для обеих половин профиля абсорбции в пределах ошибок были найдены одинаковые значения периода и амплитуды: $P_b = 13.5 \pm 2.5^d$, $A_b = 7.0 \pm 1.0$ км/с

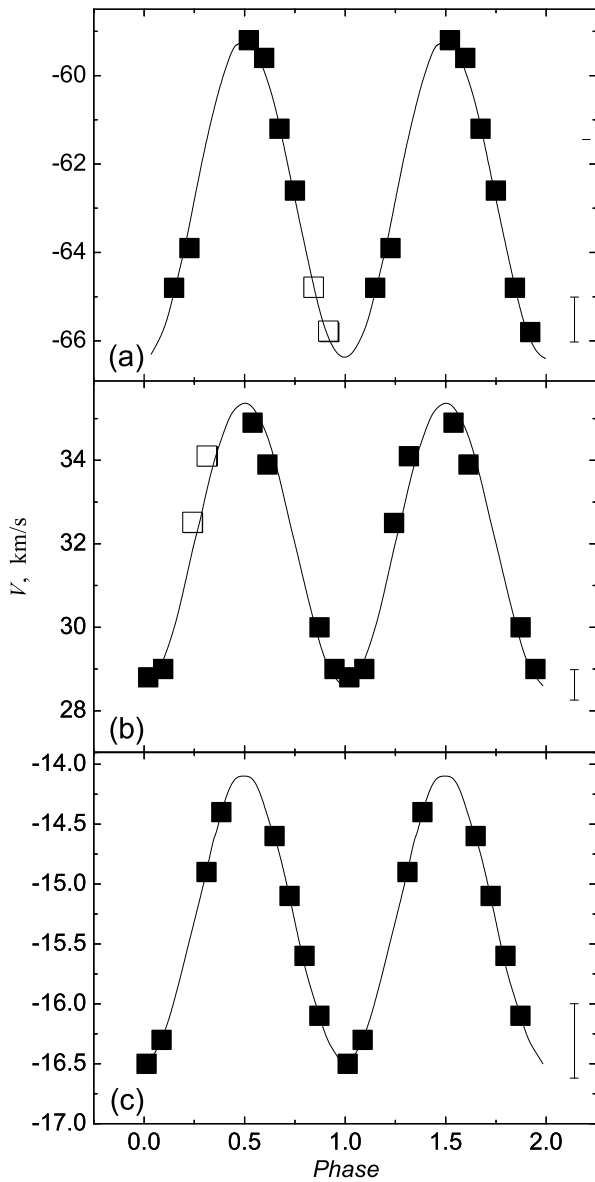


Рис. 4. Фазовая кривая переменности лучевой скорости для линии $H\beta$ в 1998 г. (a) для синей; (b) для красной половины профиля с параметрами $P = 13.5 \pm 2.5^d$, $A = 7.0 \pm 1.0$ км/с; (c) для бисектора абсорбции с параметрами $P = 13.5 \pm 2.5^d$, $A = 2.3 \pm 0.6$ км/с. Начальная фаза JD 2451053. Для наглядного представления сдвига фаз на величину порядка 0.6 между переменностью лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции лучевые скорости за JD 2451053–1054 обозначены светлыми квадратиками. В правом нижнем углу вертикальный отрезок указывает ошибку определения амплитуды, а ошибки измерения лучевой скорости приведены в разделе 2.

и $P_r = 13.5 \pm 2.5^d$, $A_r = 7.5 \pm 0.8$ км/с, соответственно, для синей и красной половин профиля абсорбции. Фазовые кривые представлены на Рис. 4а, б. Но наблюдается сдвиг фазы (на при-

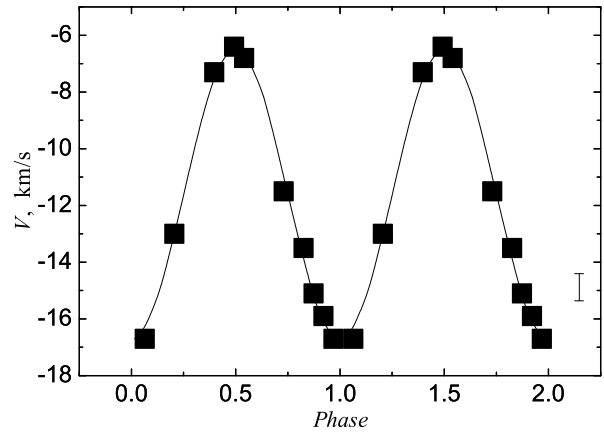


Рис. 5. Фазовая кривая переменности лучевой скорости для бисектора абсорбции линии $H\beta$ в 1999 г. с параметрами $P = 20.5 \pm 2.5^d$, $A = 10.0 \pm 1.0$ км/с. В правом нижнем углу вертикальный отрезок указывает ошибку определения амплитуды.

мерно $0.6P$) между колебаниями лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции. Это приводит к тому, что амплитуда колебания лучевой скорости, измеренной по бисектору абсорбции, значительно уменьшается. Таким образом, для параметров колебания, найденным по лучевой скорости бисектора абсорбции были получены следующие значения: $P_{bis} = 13.5 \pm 2.5^d$, $A_{bis} = 2.3 \pm 0.6$ км/с и $\gamma = -15.5 \pm 0.5$ км/с. Фазовая кривая представлена на Рис. 4с.

По данным, полученным в 1999 г., для обеих половин профиля абсорбции на всех уровнях r значения периода, амплитуды и фаза колебания переменности лучевой скорости в пределах ошибок измерения оказались одинаковыми. Следовательно, переменность лучевой скорости бисектора абсорбции на всех уровнях r реально отражает переменность лучевой скорости линии в целом. Поэтому на Рис. 5 приведена фазовая кривая переменности лучевой скорости для бисектора абсорбции на уровне $r = 0.55$. Параметры колебания следующие: $P_{bis} = 20.5 \pm 2.5^d$, $A_{bis} = 10.0 \pm 1.0$ км/с и $\gamma = -12.0 \pm 0.5$ км/с.

В 2000 г. картина переменности лучевой скорости со временем различается для синей и красной половин профиля абсорбции. Для уровня $r = 0.55$ эти кривые приведены на Рис. 6. Как видно из Рис. 6, для обеих половин профиля абсорбции в течение 5 ночей (JD 1743–1747) в пределах ошибок измерений переменность лучевой скорости не наблюдалась. Поэтому, как и в случае линии ионов, при поиске возможных периодов эти значения лучевой скорости не были использованы. На Рис. 6 синусоиды были приведены на основе параметров переменности лучевой

скорости со временем, найденных гармоническим анализом. Для синей и красной половин профиля абсорбции, соответственно, были найдены следующие параметры переменности лучевой скорости: $P_b = 14.0 \pm 1.5^d$, $A_b = 7.5 \pm 0.5$ км/с, $\gamma = -57.0 \pm 0.5$ км/с и $P_r = 22.0 \pm 2.0^d$, $A_r = 11.5 \pm 0.5$ км/с, $\gamma = 28.0 \pm 0.5$ км/с. Фазовые кривые представлены на Рис. 7.

3.2. Переменность фотометрических параметров линий

В работе [7] линии ионов по их эквивалентной ширине были разделены на 3 группы: слабые $50 < W_\lambda \leq 200$, средние $200 < W_\lambda \leq 500$ и сильные $W_\lambda > 500$ mÅ. Расчет модели атмосферы [7] показал, что интенсивные линии формируются в верхних слоях атмосферы, в отличие от слабых линий ионов. Между указанными группами линий ионов разницы в лучевой скорости не обнаружено. Исследование переменности интенсивности линий ионов со временем показало, что в спектре α Cyg среднее квадратическое и максимальное отклонение от среднего не превышает 3 и 16 % соответственно.

Для повышения точности измерения эквивалентных ширин и интенсивностей линий мы поступили следующим образом. Участки спектра, где были проведены измерения, были сопоставлены друг с другом и путем (медианного) усреднения были выбраны опорные точки (по координате длины волны) для проведения непрерывного спектра. При необходимости для линий с широкими крыльями (например, для H β) был использован непрерывный спектр соседних порядков. Для линий ионов слабой и средней интенсивности были отобраны более “чистые” (неблендированные) линии. В итоге было отобрано для изучения 10, 10 и 5 линий слабой, средней и сильной интенсивности соответственно.

Наши исследования показали, что переменность со временем эквивалентных ширин и центральной интенсивности линий ионов для сильной группы составляет около 3.0%, средней $< 3.0\%$ и $\leq 1.5\%$, а для слабой $\leq 5.0\%$ и $< 1\%$. Для линии H β средние значения эквивалентной ширины и интенсивности, найденные по всему материалу, составляют $W_\lambda = 2.500 \pm 0.046$ Å (переменность $< 2\%$), $r_0 = 0.35 \pm 0.01$ (переменность $\leq 3\%$), максимальные отклонения от среднего не превышают 8%.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы показали, что в спектре α Cyg в пределах ошибок измерений переменность со временем эквивалентных ширин и интенсивности линий ионов и H β не наблюдается. Как было сказано

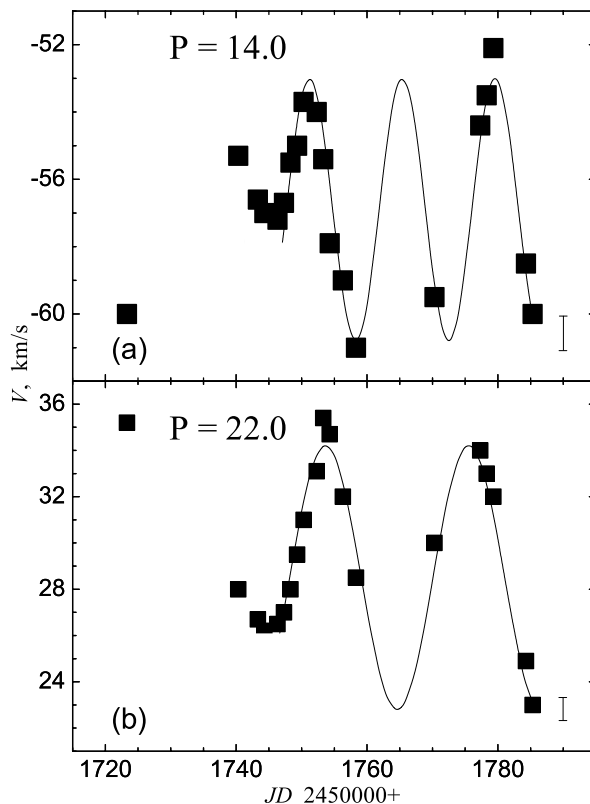


Рис. 6. Переменность лучевой скорости со временем для синей (а) и красной (б) половин профиля абсорбции линии H β за 2000 г. Кривые (синусоиды) проведены на основе параметров переменности лучевой скорости, найденных методом гармонического анализа. По оси абсцисс указаны юлианские даты наблюдений. В правом нижнем углу вертикальный отрезок указывает ошибку определения амплитуды.

в работах [7, 13], это свидетельствует о том, что наблюдаемая переменность лучевой скорости обусловлена движениями типа пульсаций с малыми амплитудами.

Наш методический подход, описанный в разделе 2, позволил выявить картину переменности лучевой скорости со временем. По этим картинам (Рис. 1 и 6) было обнаружено, что иногда в атмосфере α Cyg переменность лучевой скорости не наблюдается в пределах ошибок измерений. Эти постоянные значения лучевой скорости наблюдаются в период затухания предыдущего и возникновения следующего колебания. Наши исследования показали, что обнаружение разных периодов для разных сезонов наблюдений связано с этим фактом. При поиске периодов необходимо исключить постоянные значения лучевой скорости.

Было обнаружено, что для всех исследованных линий эти постоянные значения в пределах ошибок измерений равны γ -скорости изменений лучевой скорости со временем. Для линий ионов γ -скорость, по данным трех сезонов

(1998–2000 гг.) равна -4.5 ± 0.5 км/с, что соответствует лучевой скорости центра массы звезды в пространстве. Наши исследования показали, что асимметрия профиля линии $H\beta$, которая в основном вызвана изменением синего крыла и скорость расширения соответствующих слоев различается в разные сезоны наблюдений. Для уровня $r \approx 0.55$, представленного на Рис. 4–7 γ -скорость меняется в пределах от -12.0 до -15.0 км/с. На уровне FWHM ($r \sim 0.675$) она составляет $-16.0 \dots -19.0$ км/с. Например, на Рис. 6 для синей и красной половин профиля абсорбции постоянное значение лучевой скорости, соответственно, около -57 и 27 км/с, следовательно, для бисектора абсорбции оно около -15 км/с.

Таким образом, постоянная лучевая скорость приводит к сдвигу фазы как между колебаниями разных сезонов, так и между колебаниями отдельных сетов наблюдений данного сезона. Для всех исследованных линий продолжительность времени, когда наблюдаются постоянные значения лучевой скорости, по нашим данным, составляет 5.0 ± 1.0^d .

На Рис. 1с видно, что с JD 1740 по 1745 и, по видимому, с JD 1779 по 1784 наблюдаются постоянные значения лучевой скорости около -4.5 км/с. Следовательно, по данным 2000 г., продолжительность колебания (JD ~ 1745 –1779) около 34 дней. По данным 1999 г. продолжительность колебания (JD ~ 1432 –1467) около 35 дней (Рис. 1b). Если предположить, что в 1998 г., как и в других двух сезонах (1999–2000 гг.), колебание начинается и затухает при постоянных значениях лучевой скорости около -4.5 км/с, то продолжительность колебания будет (JD ~ 1050 –1083) около 33 дней (Рис. 1a). Таким образом, продолжительность колебания, найденная по линиям ионов, составляет около 34.0 ± 1.0 дней.

Для периодов пульсаций в радиальной фундаментальной моде в работах [4] и [7] для α Cyg были получены величины $P_0 \approx 14.0$ и $P_0 \approx 12.0^d$. В работах [1, 14] с учетом структуры расширяющейся атмосферы и звездного ветра была детально проанализирована атмосфера сверхгиганта α Cyg. Путем сопоставления расчетного спектра с наблюдаемым были уточнены основные атмосферные и фундаментальные звездные параметры, в том числе M_{bol} и T_{eff} . Но, если по последним двум параметрам (например, из работы [14], где совпадение расчетного и наблюдаемого спектра для фотосферных и ветровых линий очень хорошие, и $M_{bol} = -8.49$, а $T_{eff} = 8525$ К) по формуле из работы Лови и др. [15] определять величину P_0 , она получится около 30 дней. Возможно это свидетельствует о том, что для уточненных параметров,

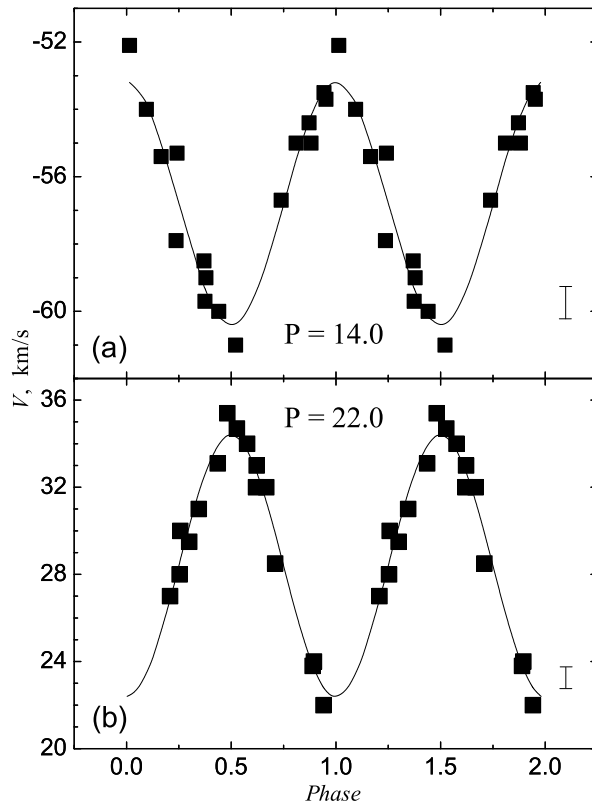


Рис. 7. Фазовая кривая переменности лучевой скорости для (a) синей и (b) красной половин профиля абсорбции линии $H\beta$ в 2000 г. с параметрами указанными в тексте. В правом нижнем углу вертикальный отрезок указывает ошибку определения амплитуды.

определенных современными методами, уравнение из [15] должно корректироваться.

Если выбирать величины M_{bol} и T_{eff} из литературы (ссылки в работах [1, 6, 14]), то по Лови и др. [15] значение P_0 будет в пределах от 11 до 15 дней. Поэтому будем считать, что найденные нами периоды 12.5 и 14.0 дней, в пределах ошибок, — это периоды радиальной пульсации в основной фундаментальной моде.

Наши исследования показали, что колебание слоев, где формируются линии ионов, начинается с расширения этих слоев (Рис. 1b, c). В начальной фазе расширения (JD 1433 на Рис. 1b и JD 1746 на Рис. 1c) наблюдается незначительная разница между лучевыми скоростями слабых и сильных линий ионов. Например, в датах JD 1433 и 1476 лучевая скорость по слабым и сильным линиям ионов, соответственно, составляла -8.0 ± 1.0 , -6.2 ± 0.5 км/с и -6.5 ± 1.0 , -4.8 ± 0.3 км/с. Это свидетельствует о том, что процессы (движения), которые приводят к возникновению пульсаций, происходят в нижележащих слоях фотосферы. Далее, например, начиная с JD 1747 (Рис. 1c), лучевые скорости для всех групп линий ионов ста-

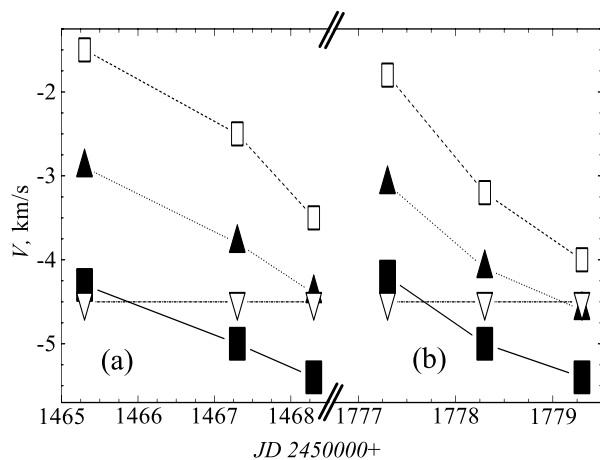


Рис. 8. Переменность лучевой скорости для слабой (темные квадратики), сильной (светлые квадратики) линий ионов в 1999 (а), и 2000 гг. (б), когда происходит затухание колебания. Темные треугольники — средняя скорость, найденная по всем линиям, светлые треугольники — лучевая скорость центра массы звезды. Вертикальные размеры символов соответствуют ошибкам измерения.

новились одинаковыми и показывали одинаковый ход и темп движения. Следующая разница в лучевых скоростях между слабыми и сильными группами линий была нами зафиксирована примерно через 31–32 дня, JD 1465–1468 на Рис. 1b и JD 1777–1779 на Рис. 1c. Переменность лучевой скорости в этих датах отдельно для сильных и слабых групп, а также для среднего значения по всем трем группам линий представлена на Рис. 8. Видно, что в течение указанных ночей разница лучевых скоростей между сильной и слабой группами линий уменьшается, а средняя лучевая скорость постепенно становится равной γ -скорости линий ионов. Таким образом, постепенно происходит затухание колебания слоев, где формируются линии ионов.

Для линий HeI параметры переменности лучевой скорости со временем с меньшей точностью измерения совпадают с таковым для линий ионов: $P = 12.5 \pm 2.0^d$; $A = 6.0 \pm 1.5$ км/с; γ -скорость: -5.5 ± 1.5 км/с. С учетом сдвига фазы данные за 1999 и 2000 гг. хорошо ложатся на фазовую кривую на Рис. 3. В атмосфере сверхгиганта линии HeI преимущественно фотосферного происхождения, что еще раз свидетельствует о достоверности полученных результатов для линии ионов.

В отличие от линий HeI и ионов, для линии H β характер и параметры переменности лучевой скорости различаются для разных сезонов наблюдений. В общей сложности мы получили два периода и амплитуды: $P \approx 14^d$ с $A \approx 7$ км/с и $P \approx 21^d$ с $A \approx 11$ км/с, а также три характерных поведения переменности лучевой скорости для синей и

красной половин профиля абсорбции. В 1998 г. параметры переменности, т.е. период и амплитуда для обеих половин профиля абсорбции, одинаковые, но фазы колебаний различаются. В 1999 г. как параметры переменности, так и фаза колебания одинаковы для обеих половин профиля абсорбции. В 2000 г. параметры переменности различаются для синей и красной половин профиля абсорбции. Минимальная продолжительность этих колебаний по нашим данным около 40–45 дней.

Отметим, что наши исследования как для линий ионов, так и для линии H β подтвердили результат, полученный в работе [7]. Возбуждение новых колебаний происходит после исчезновения (затухания) предыдущих. Полученные три характерные переменности лучевой скорости для синей и красной половин профиля абсорбции линии H β позволяют нам судить об особенностях колебания этих слоев атмосферы. Вначале возбуждается колебание (с определенными параметрами колебания) в поднимающихся слоях атмосферы, которое передается (отражается) в опускающиеся слои атмосферы. Через некоторое время (по нашим данным через 40–45 дней) происходит сдвиг фазы между колебаниями поднимающихся и опускающихся слоев атмосферы, который постепенно может привести к затуханию колебания. При этом диссипация энергии может являться источником возбуждения очередного колебания как в нижних (где формируется линия H β), так и для вышележащих слоев атмосферы.

По нашим исследованиям, средняя скорость расширения слоев атмосферы, где формируется линия H β , около -13.0 км/с и она меняется со временем с амплитудой около 3.0 км/с. Суперпозиция этого колебания на колебание с $P = 14.0^d$ и $A = 7.0$ км/с вполне может привести к колебанию с большей амплитудой и с большим периодом ($P = 22.0^d$, $A = 11.0$ км/с).

В спектре α Cyg различие параметров переменности для синей и красной половин профиля абсорбции наблюдается и для линии H α (статья III). Наши исследования также показали, что в спектре звезды HD 93521 (O9.5 V) для всех исследованных линий — H α , H β и HeI, которые формируются в слоях атмосферы, где истекает звездный ветер, параметры переменности различаются для двух половин профиля абсорбции [16]. Все это свидетельствует о том, что, во-первых, у ветровых линий синяя и красная половины профиля абсорбции формируются в разных областях атмосферы. Во-вторых, влияние переменности звездного ветра различается для этих двух половин.

Отметим, что в 2000 г. по лучевым скоростям, измеренным для бисектора абсорбции линии H β

были найдены два значимых периода со значениями около 14.0 и 22.0 дня. Обычно в таких случаях принято говорить, что одновременно возбуждаются две моды колебания. Но в нашем случае это означает, что параметры переменности лучевой скорости различаются для двух половин профиля абсорбции.

Наш методический подход позволил выявить новые интересные особенности в картине переменности линий, подтверждение и объяснение которых требует дальнейших исследований, а также модельных расчетов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В. Г. Клочкову, Е. Л. Ченцова и В. Е. Панчука за обсуждение результатов, В. Д. Бычкова за предоставление программ гармонического анализа. Работа частично поддержана грантом РФФИ (проекты № 08-02-00072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. P. Aufdenberg, P. H. Hauschildt, E. Baron, et al., *Astrophys. J.* **570**, 344 (2002).
2. H. A. Abt, *Astrophys. J.* **126**, 138 (1957).
3. G. F. Paddock, *Lick. Obs. Bull.* **17**, 39 (1935).
4. L. B. Lucy, *Astrophys. J.* **206**, 499 (1976).
5. M. O. Inoue, *Publ. Astronom. Soc. Japan* **31**, 11 (1979).
6. A. Kaufer, O. Sthal, B. Wolf, et al., *Astronom. and Astrophys.* **305**, 887 (1996).
7. A. Kaufer, O. Sthal, B. Wolf, et al., *Astronom. and Astrophys.* **320**, 273 (1997).
8. А. Х. Рзаев и др., *Астрофизический бюллетень* **62**, 61 (2007).
9. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **63**, 25 (2008).
10. Ф. А. Мусаев, *Письма в АЖ* **19**, 776 (1993).
11. А. Х. Рзаев, Н. О. Гасанов, Х. М. Микаилов и др., *Циркуляр ШАО* **95**, 3 (1999).
12. Г. А. Галазутдинов, *Препринт САО РАН №92*, (Н. Архыз, 1992).
13. W. Unno, Y. Osaki, H. Ando, and H. Shibahashi, *Nonradial Oscillations of stars*, (University of Tokyo Press, 1979), p.30ff.
14. F. Schiller and N. Przybilla, *Astronom. and Astrophys.* **479**, 849 (2008).
15. D. Lovy, A. Maeder, A. Noels and Gabriel M., *Astronom. and Astrophys.* **133**, 307 (1984).
16. А. Х. Рзаев, *Астрофизический бюллетень* **63**, 282 (2008).

NONSTATIONARITY OF α CYG ATMOSPHERE. IV: SOME PECULIARITIES OF LINE PROFILES TIME VARIATION

A. Kh. Rzaev

We use 240 CCD spectra taken in 1998–2000 with the coude echelle spectrograph of the 2-m telescope of the National Academy of Sciences of Azerbaijan to study temporal radial velocity and line profile variations of the ion, HeI, and H β lines in the spectrum of the α Cyg supergiant. We demonstrate that these variations are caused by pulsation-type motions in the star's atmosphere. Ion and HeI lines oscillate in the main fundamental mode with a period of about 12.0 ± 0.5^d and an amplitude of 5.0 ± 0.5 km/s. These ion-line oscillations continue for about 35 days. Then the difference between the radial velocities of strong and weak ion lines results in a gradual decay of oscillations over a time interval of about 5.0 ± 1.0^d . Thereafter the process repeats itself. For the H β line we found two significant periods, two amplitudes, and three characteristic radial velocity variability behaviors for the blue and red halves of the absorption profile: with equal variability parameters (period P and amplitude A); with equal P and A , but with a phase shift between the radial velocity variations of the blue and red halves of the absorption profile; with different P and A for the two halves of the absorption profile. The star's center of mass radial velocity as inferred from the γ -velocity is -4.5 ± 0.5 km/s. The average expansion velocity of the atmospheric layers, where the H β line forms, amounts to about -16.5 ± 0.5 km/s and varies temporally with an amplitude of about 3.0 km/s.

Key words: *stars: variable and peculiar*