

УДК 524.31.01-56:520.843

ВАРИАЦИИ В ЛИНИИ $H\alpha$ В СПЕКТРЕ α Cyg© 2026 А. Х. Рзаев^{1*}, М. М. Габдеев^{2**}¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия²Университет Павла Йозефа Шафарика, Кошице, 04001 Словакия

Поступила в редакцию 28 ноября 2024 года; после доработки 27 августа 2025 года; принята к публикации 9 апреля 2026 года

На основе CCD-спектров, полученных в 1998–2007 годах, было исследовано изменение со временем профиля линии $H\alpha$ в спектре α Cyg. Переменность линии $H\alpha$ относительно ее среднего профиля показала, что на синюю половину профиля абсорбции накладываются дополнительные абсорбционные и эмиссионные компоненты. Интенсивность, положение и протяженность дополнительных эмиссионных компонент в шкале лучевых скоростей различаются для разных периодов наблюдений. Наблюдается корреляция между лучевой скоростью абсорбционной компоненты линии $H\alpha$ и интенсивностью ее эмиссии. Наблюдения показали, что высокоскоростная абсорбция, HVA, не является редким событием в спектре Денеба. На наших спектрах HVA-события наблюдались во всех сезонах наблюдений.

Ключевые слова: звезды: сверхгиганты — звезды: отдельные: α Cyg

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхгигант α Cyg A2Ia — один из самых ярких и хорошо исследованных в широком диапазоне (Aufdenberg et al., 2002) объектов Северного полушария. Он является прототипом переменных ВА-сверхгигантов, демонстрирующих переменность типа α Cyg. Поэтому детальное изучение изменений профилей и лучевых скоростей линий со временем в спектре α Cyg, а также выявление причин и источников этих вариаций имеют большое значение.

В спектре α Cyg, как и у других сверхгигантов А-типа, особый интерес представляет переменность профиля $H\alpha$. Эта линия имеет профиль типа P Cyg, что свидетельствует о потере массы звезды. Kaufer et al. (1996) по эшелле-спектрам ($\lambda/\Delta\lambda = 20\,000$) исследовали $H\alpha$ -профили у шести сверхгигантов В- и А-типа, в том числе и у α Cyg, для того чтобы объяснить причины его изменчивости. Для визуальной интерпретации вариаций профиля были построены динамические спектры. Эквивалентная ширина линии для каждой из этих звезд анализировалась по сезонам наблюдений с целью поиска периодичностей. Выяснилось, что периодичность носит транзиентный характер и меняется каждый год. У α Cyg переменность профиля $H\alpha$ обусловлена наложением переменных синие- и красно-смещенных эмиссий на почти

«постоянные» профили фотосферы и/или ветра. Наблюдаемые изменения проявляются симметрично относительно скорости центра массы звезды, при этом определить их характерное время весьма затруднительно. Анализ изменений эквивалентной ширины линии $H\alpha$ показал, что оно близко к периоду вращения звезды. На основании полученных данных авторы пришли к выводу: переменность профиля линии $H\alpha$ обусловлена вращательной модуляцией.

В отличие от Kaufer et al. (1996), Morrison and Mulliss (1998) на основе спектров с разрешающей способностью $\lambda/\Delta\lambda \sim 26\,000$ обнаружили гораздо более активную и, возможно, циклическую изменчивость профиля $H\alpha$ в спектре α Cyg. На синем крыле абсорбционной компоненты профиля $H\alpha$ появляются дополнительные детали. Установлено, что их можно отнести к DAC (дискретным абсорбционным компонентам). Временные масштабы (около 40 дней) и циклический характер переменности позволяли предположить, что источником изменчивости служит корототирующее околос звездное вещество или особенности ветра. Кроме того, выявлено, что интенсивность эмиссионной компоненты также является переменной. Сверхгигант α Cyg на основе пятилетних данных был исследован Richardson (2006) и Richardson et al. (2011). Авторы, проанализировав 339 эшелле-спектров ($\lambda/\Delta\lambda = 26\,000$, $S/N \sim 100$) и 370 фотометрических данных, полученных в течение 1997–2001 гг., изучили переменность лучевых скоростей линий Si II $\lambda 6347$, $6371 \text{ \AA}$, профиля линии $H\alpha$, а также

*E-mail: abid@sao.ru

**E-mail: maksim.gabdeev@upjs.sk

ubvy-величин в системе Стремгрена (Strömrgren, 1956). Анализ временного ряда данных фотометрии и лучевых скоростей не выявил очевидного циклического поведения, сохраняющегося в течение нескольких сезонов наблюдений.

Для визуального поиска циклической переменности ветра авторы построили динамические спектры профиля $H\alpha$; они были получены для каждого сезона наблюдений, чтобы исследовать временное изменение профиля $H\alpha$. Анализ временных рядов был осуществлен для «чистых» эквивалентных ширины линии $H\alpha$, лучевых скоростей ионов и фотометрических данных. В отдельные сезоны обнаружены корреляции между некоторыми периодами радиальных скоростей и фотометрией, что свидетельствует о наличии у звезды как радиальных, так и нерадиальных пульсаций. При этом четкой связи между эквивалентными ширинами линии $H\alpha$ и пульсационными периодами найти не удалось. Некоторые периоды кажутся постоянными, тогда как другие присутствуют только в одном сезоне наблюдений.

В спектре α Cyg, как и у других сверхгигантов ВА-типа, особый интерес представляет наличие сильно смещенной в голубую область ($V \leq -100 \text{ км с}^{-1}$) абсорбционной компоненты (далее — высокоскоростная абсорбция, *high velocity absorption* — HVA) на профиле линии $H\alpha$. В течение 1997 года несколько сильных абсорбционных деталей наблюдались на синем крыле абсорбционного профиля линии $H\alpha$ с интервалом примерно в 40 дней (Richardson et al., 2011). Эти детали демонстрировали синесмещенные скорости по абсолютной величине не более -100 км с^{-1} . Richardson et al. (2011) указали, что по результатам анализа данных за пять лет (1997–2001 гг.) и материалов из работы Kaufer et al. (1996) (за 1990–1991 гг.), в спектре Денеба высокоскоростная абсорбция зафиксирована только один раз. Таким образом, подобные события очень редки для этой звезды. Также отмечено, что на профиле $H\alpha$ не было обнаружено никаких признаков проявления DAC (Richardson et al., 2011).

Переменность линий ионов, He I и $H\beta$ в спектре α Cyg исследована нами в работах (Rzaev et al., 2007; Rzaev, 2010, 2023). Изучение переменности линии $H\alpha$ проводилось в публикациях Rzaev (2002, 2008). В статье Rzaev (2002) анализ переменности линии $H\alpha$ выполнен на основе спектров, полученных исключительно в 1998 году. Rzaev (2008), опираясь на 240 спектров, полученных в 1998, 1999 и 2000 гг., исследовал $H\alpha$ с целью выявления дискретных абсорбционных компонент. Основное внимание в работе было уделено изучению изменения лучевой скорости во времени, тогда как

переменность линии $H\alpha$ относительно ее среднего профиля не рассматривалась. Стоит отметить, что в исследованиях Kaufer et al. (1996), Morrison and Mulliss (1998), Richardson (2006) и Richardson et al. (2011) переменность линии $H\alpha$ в основном анализировалась визуально — на базе динамических спектров. Переменность линий относительно среднего профиля или относительно друг друга также не исследовалась.

В настоящей работе мы попытались найти возможные вариации со временем как профиля в целом, так и его отдельных частей, анализируя переменность линии $H\alpha$ относительно ее среднего профиля. Мы также определяли положение дополнительных абсорбционных и эмиссионных компонент и их возможное перемещение в шкале лучевых скоростей. Помимо ранее упомянутых 240 спектров (1998–2000 гг.), мы использовали 232 спектра, полученные в 1998–2000, 2001 и 2007 годах.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Указанные выше 240 эшелле-спектров были получены со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda \approx 36\,000$. Для наблюдений использовался эшелле-спектрограф CEGS (Musaev, 1993) с ПЗС-матрицей 580×530 пикселей, установленный в кудэ-фокусе 2-м телескопа ШАО АН Азербайджана. Размер матрицы ограничивал как число порядков, так и длину каждого порядка. Наклон решетки выбирался таким образом, чтобы в кадр попадал спектральный диапазон $\lambda 4340\text{--}7000 \text{ \AA}$. Это позволило фиксировать линии $H\beta$ и $H\alpha$ одновременно. Время экспозиции варьировалось в зависимости от качества изображения звезды и подбиралось так, чтобы достичь $S/N \geq 200$ в области спектра $\lambda \approx 4550 \text{ \AA}$.

Дополнительно были включены 42 спектра, также полученные с помощью упомянутого выше кудэ-эшелле-спектрографа. В 1998, 1999 и 2000 гг. в течение трех, пяти и шести ночей соответственно были получены 9, 15 и 18 кудэ-эшелле-спектров. Эти 42 спектра были сняты сквозь облака с экспозициями длительностью 10–20 минуты и в предыдущих исследованиях не использовались. В течение ночи (три спектра) в области спектра $\lambda \approx 4550 \text{ \AA}$ суммарное значение S/N попадало в интервал $250 < S/N < 350$.

В 2001 г. в течение девяти ночей были получены 45 кудэ-эшелле-спектров (по пять спектров за ночь). Суммарное отношение S/N за ночь варьировалось в диапазоне 300–400. В 2007 г. с помощью эшелле-спектрографа, установленного в Кассегренском фокусе 2-м телескопа ШАО, за 29 ночей было получено 145 спектров.

Спектральная область охватывала длины волн λ 4800–6600 Å, соседние порядки перекрывали друг друга, а спектральное разрешение достигало $\lambda/\Delta\lambda \sim 14000$ (Ismailov et al., 2013). В каждую ночь мы регистрировали по пять спектров, при этом суммарное S/N находилось в диапазоне $350 \leq S/N \leq 500$. Изменения лучевой скорости и профиля линий в течение одной ночи не были обнаружены, поэтому профили усреднялись.

Обработка эшелле-изображений выполнялась по стандартной методике — вычитание темнового кадра, учет рассеянного света, деление на плоское поле и так далее — с использованием пакета программ ESO MIDAS. Фотометрические (W_λ , r_0) и позиционные параметры линий измерялись с помощью пакета программ DECH20¹⁾. В отличие от других популярных программ, таких как IRAF и MIDAS, DECH20 ориентирован на операционную систему Microsoft Windows (Galazutdinov, 2022). Для уменьшения шумов мы применили процедуры сглаживания спектра (см. программу DECH20 на www.gazinur.com).

Крылья линии H α простираются до ± 600 км с⁻¹ (рис. 1b). Проведение непрерывного спектра осуществлялось путем наложения на спектральный диапазон, содержащий линию H α , непрерывного спектра из соседних порядков (предыдущего и следующего). Указанные порядки использовались, чтобы определить опорные точки, по которым проводился непрерывный спектр для линии H α . Опорные точки подбирались таким образом, чтобы в длинах волны для всех спектров они были одинаковыми. Для линии H α в кудэ-эшелле-спектрах ошибки измерения параметров W_λ и r_0 , определенных по спектрам, полученным в течение одной ночи, не превышали 0.021 Å и 0.006 соответственно. Последнее значение совпадает с точностью проведения непрерывного спектра. В случае кассегрен-эшелле-спектров ошибки измерения W_λ и r_0 не превышали 0.031 Å и 0.01 соответственно.

3. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЯ ЛИНИИ H α

При исследовании переменности профиля линии H α одной из ключевых процедур является устранение влияния теллурических линий, искажающих ее профиль. Использование спектра звезды «divisor» не всегда решает эту задачу. Проблема связана как с выбором такой звезды, так и с ее зенитным расстоянием в момент наблюдений. В нашем случае важно по возможности бесследно устранить теллурические линии λ 6563.51, λ 6564.05 и λ 6564.2 Å, которые искажают слабую

эмиссионную компоненту на красном крыле линии. Для этого мы применили следующий метод.

Контур, проведенный вдоль профиля линии H α , играет роль «квазинепрерывного спектра» для теллурических линий. На примере профиля линии, полученной 16.07.2000 года (JD = 2451742), процедура проведения такого контура показана на рис. 1. На крыльях опорные точки подбирались таким образом, что в длинах волны для всех спектров они были одинаковыми (рис. 1b). На участках профиля со сложными изгибами количество опорных точек увеличивалось до необходимого для точного описания профиля линии сплайном. Пример нанесения опорных точек и построения сплайна по эмиссионной компоненте показан на рис. 1a. В области λ 6560–6566 Å опорные точки не отмечены для наглядности профиля абсорбции (рис. 1b). Сплошная линия на этом рисунке представляет собой полученный «квазинепрерывный спектр».

Наблюдаемый спектр звезды (пунктирная линия на рис. 1b) делится на этот «квазинепрерывный спектр» (сплошная линия на рис. 1b), в результате чего получают шаблон теллурических линий (рис. 1c). На рис. 1c видно, что слабые теллурические линии λ 6560.5 и 6561.1 Å практически не заметны — это характерно для всех спектров. Далее исходный спектр звезды делится на шаблонный спектр теллурических линий. Профили H α , очищенные от теллурических линий для сезонов 2000, 1999, 1998, 2001 и 2007 гг. представлены на рис. 2a, 3a, 4a, 5a и 6a соответственно.

Сопоставление профилей показало, что заметные переменности профиля линии H α наблюдаются в диапазоне длин волн $6558.8 \leq \lambda \leq 6565.8$ Å, что соответствует диапазону лучевых скоростей $-185 \leq V \leq 140$ км с⁻¹. Поэтому на рисунках профили представлены в диапазоне лучевых скоростей $-200 \leq V \leq 150$ км с⁻¹. Как отмечалось в разделе 2, более продолжительные и непрерывные наблюдения были проведены в 2000 году, и именно на их основе исследовалась переменность линии H α . Аналогичные переменности, наблюдаемые в других сезонах, также представлены на рис. 3–6 для сезонов 1999, 1998, 2001 и 2007 годов соответственно.

Прежде всего обращает на себя внимание изменение со временем интенсивности эмиссионной компоненты линии H α . Это изменение хорошо коррелирует как с лучевой скоростью биссектора абсорбционной компоненты, так и с лучевой скоростью ее красной половины контура. Современные эшелле-спектры и пакеты программ их обработки позволяют исследовать переменность лучевой скорости отдельно для синей и красной половин, а также для биссектора линии на разных уровнях ее остаточной интенсивности. Для биссектора абсорбции лучевая скорость измерялась на

¹⁾<http://www.gazinur.com>

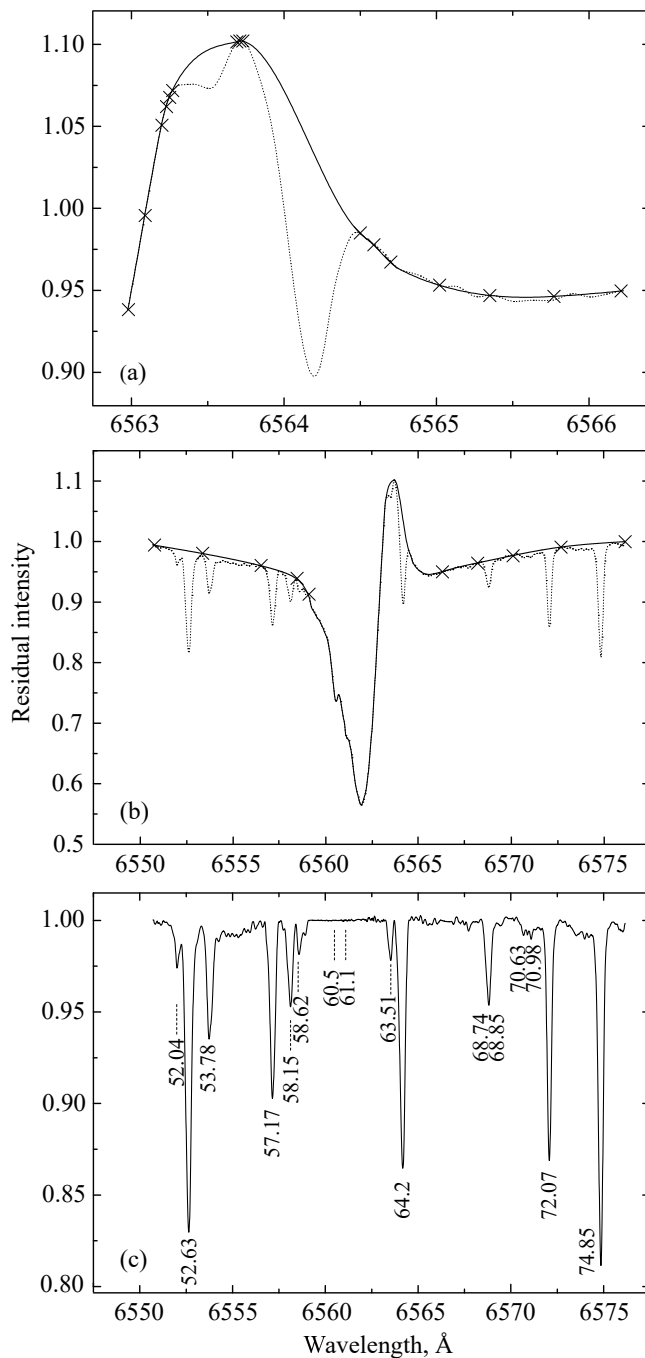


Рис. 1. Процедура очистки профиля линии $H\alpha$ от влияния теллурических линий в спектре α Cyg. Панель (a): пример проведения «квазинепрерывного спектра» для устранения линий $\lambda 6563.51$, $\lambda 6564.05$ и $\lambda 6564.2$, искажающих слабую эмиссионную компоненту на красном крыле линии $H\alpha$. Крестики — опорные точки для проведения сплайна. Панель (b): проведение «квазинепрерывного спектра» по всему контуру профиля линии $H\alpha$. Только на крыльях нанесены опорные крестики (см. текст). Пунктирная линия — спектр звезды, сплошная линия — полученный «квазинепрерывный спектр». Панель (c): шаблон теллурических линий, после деления спектра звезды на «квазинепрерывный спектр».

уровне ядра линии. Для красной половины контура абсорбции измерения проводились на уровне $r = 0.9$ (горизонтальная линия на рис. 2a). На рис. 2b представлена зависимость интенсивности эмиссионной компоненты от лучевой скорости ядра абсорбции линии $H\alpha$. Видно, что по мере сдвига абсорбционной компоненты в красную сторону спектра интенсивность эмиссионной компоненты уменьшается. Ошибки измерения лучевой скорости определялись по спектрам, полученным в течение одной ночи. Отметим, что ядро абсорбции асимметрично и искажено дополнительными абсорбционными и эмиссионными компонентами. Погрешность измерения его лучевой скорости по биссектрисе составляет $\pm 1.5 \leq \delta V \leq \pm 2.5 \text{ км с}^{-1}$ и $\pm 2.5 \leq \delta V \leq \pm 3.5 \text{ км с}^{-1}$ соответственно для кудэ- и кассегрен-спектров. В случае кудэ-спектров ошибка измерения лучевой скорости по красной половине контура абсорбции не превышает 0.6 км с^{-1} , а разброс точек минимален (рис. 2c). Для кассегрен-спектров соответствующая ошибка не превышает 1.2 км с^{-1} . Поэтому для других сезонов — 1999 (рис. 3c), 1998 (рис. 4d), 2001 (рис. 5c) и 2007 (рис. 6b) — эти зависимости построены только по лучевым скоростям красной половины контура абсорбции. Для кудэ-спектров (рис. 2b, 2c, 3c, 4b, 5c) вертикальный размер символов, а для кассегрен-спектров (рис. 6b) вертикальный бар в правом нижнем углу отражают ошибки измерения интенсивности эмиссионной компоненты. Горизонтальный бар в правом нижнем углу соответствует погрешностям измерения лучевой скорости. Для сравнения этих зависимостей в разные сезоны масштабы осей на рис. 2c, 3c, 4d, 5c и 6b были сделаны одинаковыми. Четко прослеживается основной тренд (сплошная кривая) — уменьшение интенсивности эмиссионной компоненты по мере роста лучевой скорости красной половины контура абсорбции.

Также заметно, что на синюю половину профиля абсорбции накладываются дополнительные абсорбционные компоненты. Ошибка определения их положения не превосходит $\pm 2 \text{ км с}^{-1}$. В 2000 году это событие было обнаружено в трех периодах наблюдений (рис. 2d). На рисунках указаны юлианские даты полученных спектров ($JD = 2451700$). На профиле линии за дату $JD + 40$ одновременно зафиксированы две дополнительные абсорбционные компоненты на позициях $V_1 \sim -66$ и $V_2 \sim -90 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 2d). В течение четырех дней (с $JD + 40$ по $JD + 44$) они сместились на позиции $V_1 \sim -70$ и $V_2 \sim -95 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. На дату $JD + 77$ вновь наблюдаются две дополнительные абсорбционные компоненты — на позициях $V_1 \sim -77$ и $V_2 \sim -102 \text{ км с}^{-1}$; за последующие два дня (с $JD + 77$ до $JD + 79$) они переместились на

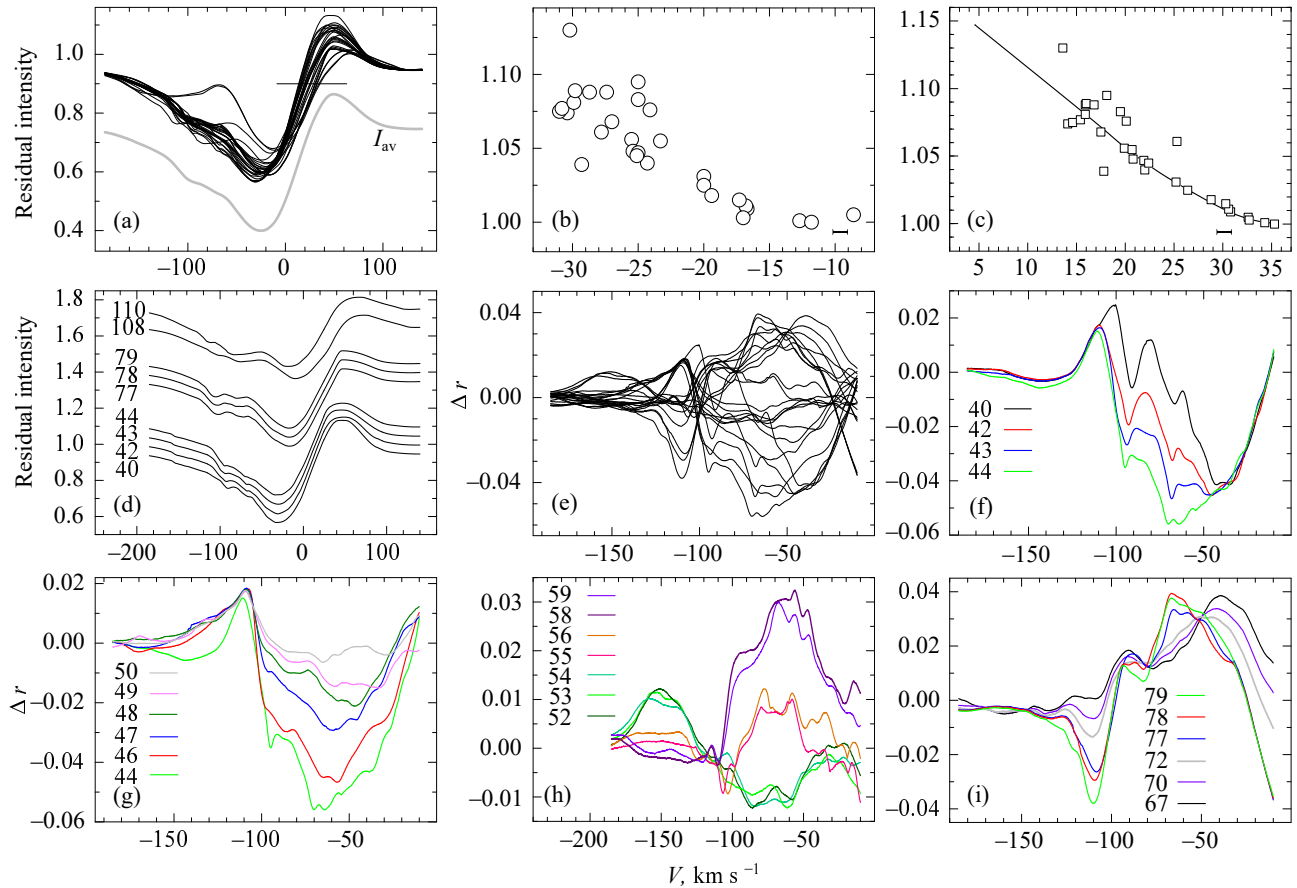


Рис. 2. Панель (а): профили $H\alpha$, очищенные от теллурических линий в 2000 году. Сдвинутый вниз профиль I_{av} — средний профиль для этого сезона. Панель (б): зависимость интенсивности эмиссионной компоненты линии $H\alpha$ от лучевой скорости красной половины контура абсорбции. Лучевая скорость измерялась на уровне $r = 0.9$ (см. горизонтальную линию на панели (а)). Вертикальный размер символов соответствует ошибкам измерения интенсивности эмиссионной компоненты. Горизонтальный бар в правом нижнем углу соответствует ошибкам измерения лучевой скорости. Панель (д): наблюдение дополнительных абсорбционных компонент на профиле линии $H\alpha$. Числами указаны юлианские даты полученных спектров ($JD = 2451700$). Кроме профиля с $JD + 40$, все профили сдвинуты вверх. Панель (е): общая картина переменности профилей на панели (а) относительно среднего профиля I_{av} . На панелях (f)–(i) — картины переменности профилей относительно среднего профиля. Числа соответствуют юлианским датам полученных спектров, из которых был вычтен средний профиль.

позиции $V_1 \sim -80$ и $V_2 \sim -106 \text{ км с}^{-1}$. На верхних профилях (с $JD + 108$ до $JD + 110$) также присутствуют две дополнительные абсорбционные компоненты на позициях $V_1 \sim -75$ и $V_2 \sim -108 \text{ км с}^{-1}$, которые за два дня переместились на позиции $V_1 \sim -80.0$ и $V_2 \sim -112 \text{ км с}^{-1}$.

В 1999 году это событие было зарегистрировано в двух периодах наблюдений (рис. 3е, 3д). Юлианские даты полученных спектров отмечены числами ($JD = 2451400 +$). В первый период (рис. 3е) наблюдались две дополнительные абсорбционные компоненты на позициях $V_1 \sim -75$ и $V_2 \sim -103 \text{ км с}^{-1}$. В течение одиннадцати дней (с $JD + 24$ до $JD + 35$) они сместились на позиции $V_1 \sim -84$ и $V_2 \sim -111 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. Во второй период (рис. 3д) замечена одна дополнительная абсорбционная компонента на по-

зиции $V_1 \sim -89 \text{ км с}^{-1}$, которая за три дня (от $JD + 65$ до $JD + 68$) переместилась на позицию. $V_1 \sim -93 \text{ км с}^{-1}$.

В 1998 году дополнительные абсорбционные компоненты обнаружили на профилях, полученных в даты $JD + 75$, 76, 77 и 78 (рис. 4с). Первая компонента наблюдается на всех четырех профилях; в течение трех дней ее лучевая скорость изменилась от $V_1 \sim -79$ до $V_1 \sim -83 \text{ км с}^{-1}$. Вторая дополнительная абсорбционная компонента присутствует только на профилях с датами $JD = 2451000 + 75$ и $JD = 2451000 + 78$; за тот же период ее лучевая скорость изменилась от $V_2 \sim -110$ до $V_2 \sim -114 \text{ км с}^{-1}$. В 2001 году зафиксирована одна дополнительная абсорбционная компонента на позиции $V_1 \sim -89 \text{ км с}^{-1}$, которая в

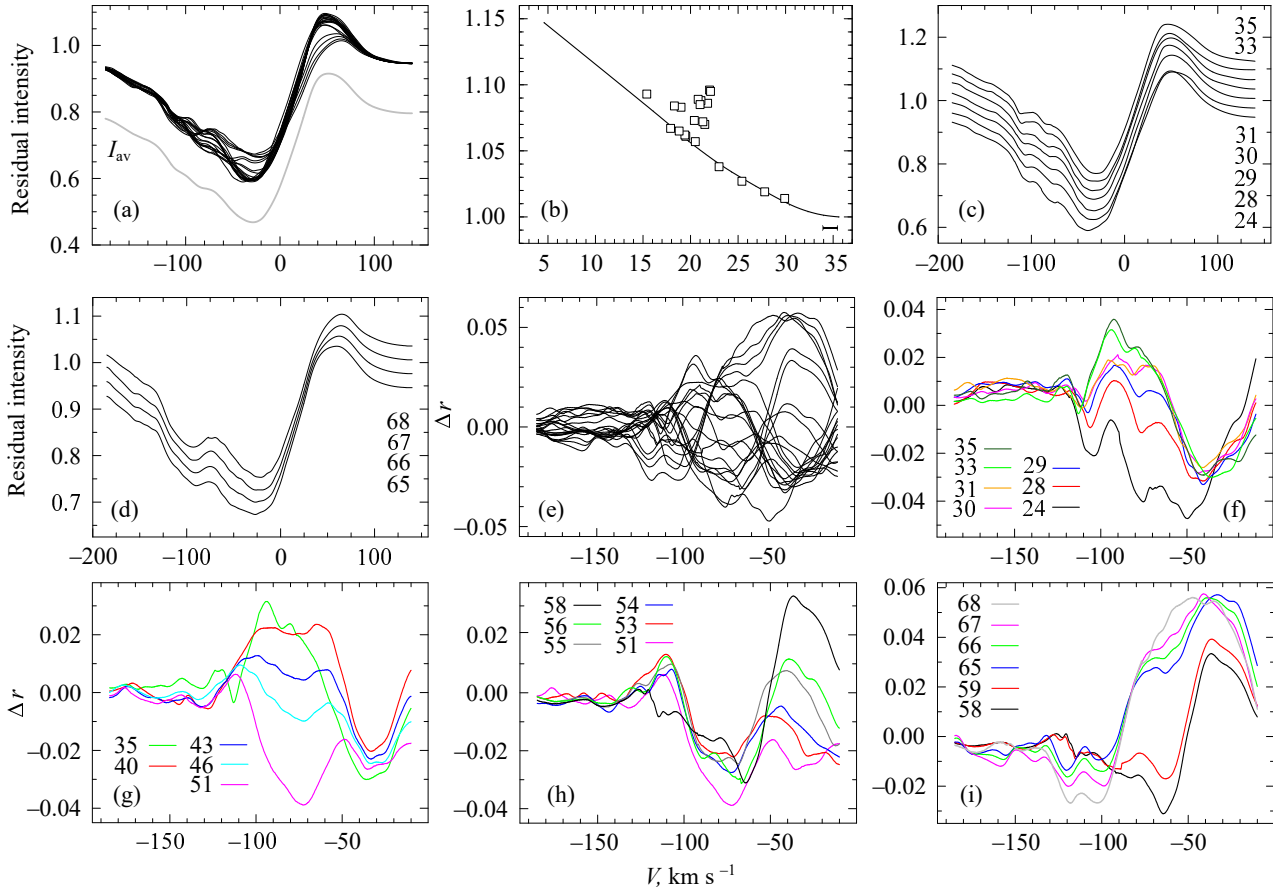


Рис. 3. На панелях (a)–(i) то же, что на рис. 2, но для линий, полученных в 1999 г. На панелях (c) и (d) отмечены юлианские даты полученных спектров ($JD = 2451400 +$), на панелях (f)–(i) — юлианские даты спектров, из которых был вычтен средний профиль этого года, I_{av} .

течение 12 дней ($JD = 2452000 + 84, 85, 86, 91, 94, 96$) сместилась до $V_1 \sim -103 \text{ km s}^{-1}$.

На спектрах, полученных 2007 году, дополнительные абсорбционные компоненты были обнаружены в двух периодах наблюдений (рис. 6с). Числами отмечены юлианские даты спектров ($JD = 2454300 +$). В первый период ($JD + 23, 25, 26$ и 29) зафиксирована одна дополнительная абсорбционная компонента на позиции $V \sim -94 \pm 2.5 \text{ km s}^{-1}$, которая за шесть дней сместилась до $V \sim -101 \text{ km s}^{-1}$. Во второй период ($JD + 52, 54, 56, 61, 65$) наблюдаются две дополнительные абсорбционные компоненты на позициях $V_1 \sim -76 \pm 2.5$ и $V_2 \sim -104 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$. Смещение первой компоненты не зафиксировано, а вторая компонента за четыре дня ($JD + 52, 54, 56$) сместилась до $V_2 \sim -109 \text{ km s}^{-1}$.

Переменность линий $H\alpha$ относительно их среднего профиля показала, что на синюю половину абсорбционного профиля накладываются дополнительные эмиссионные компоненты. В каждом сезоне из полученных линий вычитался средний профиль для этого сезона (I_{av}).

Основная переменность наблюдается в области $-185 \leq V \leq -10 \text{ km s}^{-1}$, поэтому профили представлены именно в этом диапазоне. Общая картина переменности линий в 1998 году относительно среднего профиля I_{av} представлена на рис. 4d. Для более детального анализа отдельные профили показаны на дополнительных рисунках. Числа на рис. 4е и 4f обозначают последние две цифры юлианской даты спектров, из которых был вычтен средний профиль.

В 1998 году величина Δr — разность профиля на дату $JD = 2451000 + 19$ и среднего профиля I_{av} — принимает положительное значение (рис. 4е). Следовательно, в диапазоне $-185 \lesssim V \lesssim -70 \text{ km s}^{-1}$ интенсивность линии $JD + 19$ больше, а глубина поглощения $R = 1 - r$ — меньше по сравнению с соответствующими значениями I_{av} . Анализ показал, что в указанном диапазоне, на позиции около $-105 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$, наблюдается наложение дополнительной эмиссионной компоненты на профиль линии $JD + 19$. Данная компонента охватывает диапазон лучевой скорости $-185 \lesssim V \lesssim -25 \text{ km s}^{-1}$. В течение 17 ± 1 дней (с

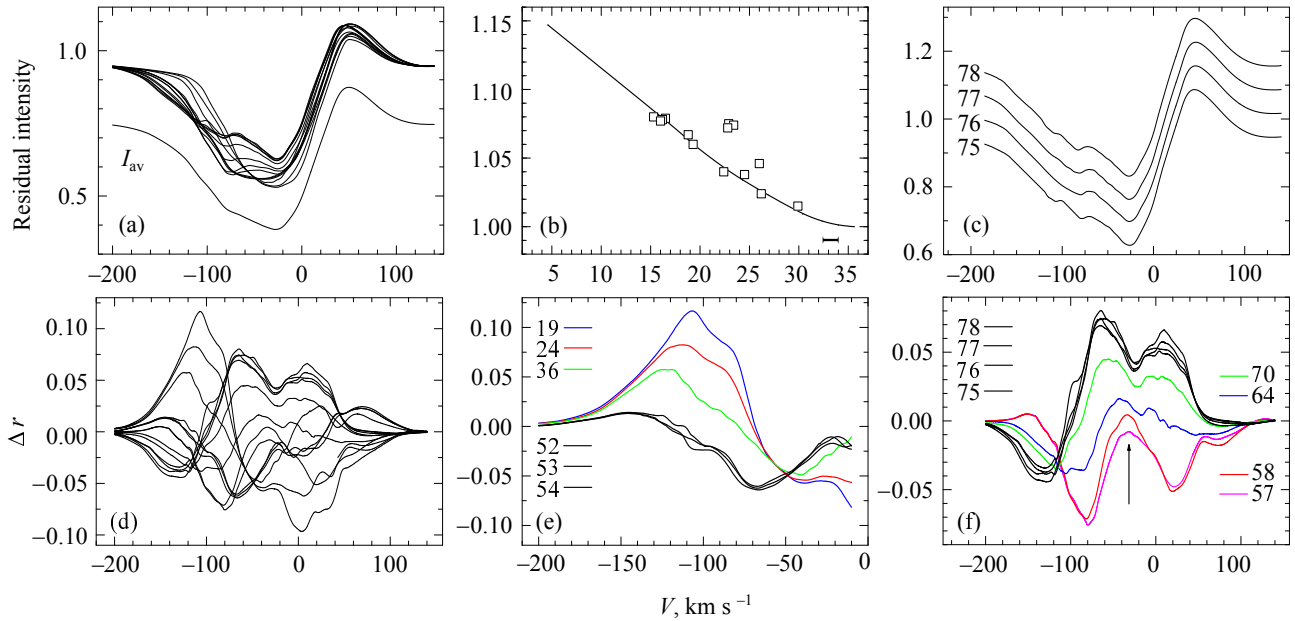


Рис. 4. Панели (a)–(f) аналогичны тем, что представлены на рис. 2, но для линий, полученных в 1998 г. Числа на панели (c) — юлианские даты полученных спектров ($JD = 2451000 +$); на панелях (e) и (f) отмечены юлианские даты спектров, из которых был вычтен средний профиль этого года, I_{av} .

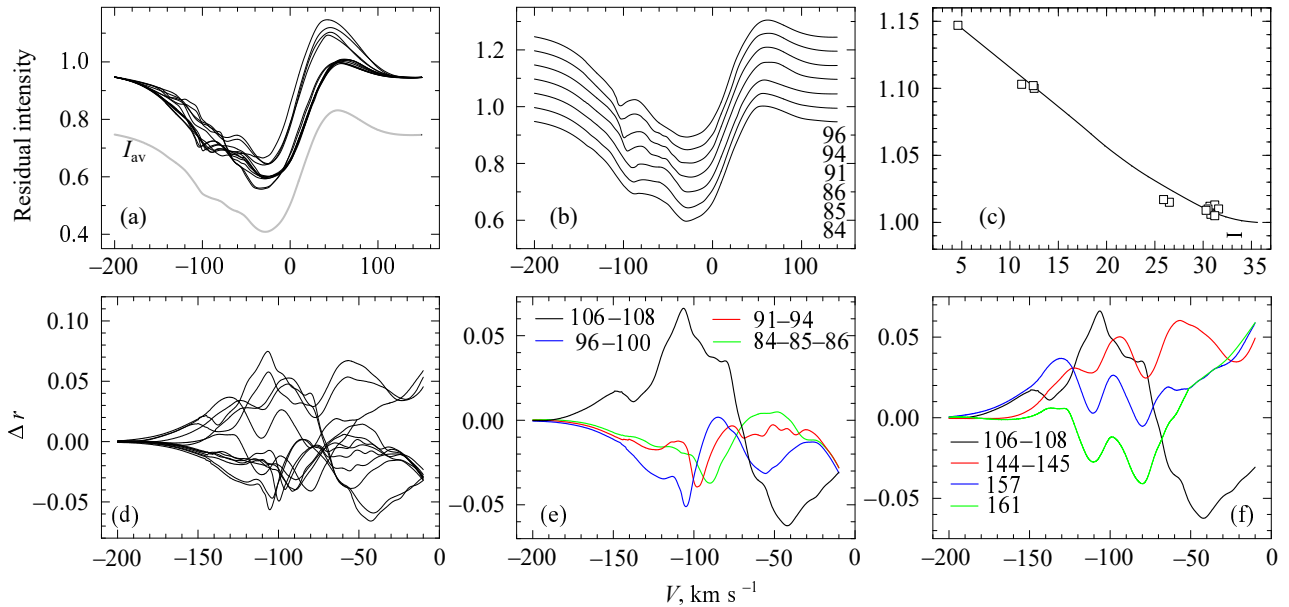


Рис. 5. Панели (a)–(f) те же, что на рис. 2, но для линий, полученных в 2001 г. На панели (b) обозначены юлианские даты полученных спектров, $JD = 2452000 +$. На панелях (e), (f) указаны юлианские даты усредненных спектров, из которых вычтен средний профиль этого года, I_{av} .

$JD + 19$ до $JD + 36$) ее интенсивность постепенно снижается, а сама компонента смещается в синюю сторону спектра — к значению $V \sim -20 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$ (рис. 4e). Следующая дополнительная эмиссионная компонента проявляется на дату $JD + 57$ (рис. 4f). На рисунке ее ядро отмечено вертикальным вектором. В последующие 18 дней (с $JD + 57$ до $JD + 75$) она усиливается и охватывает

широкий диапазон лучевых скоростей — от -100 до 60 km s^{-1} .

В других четырех сезонах наблюдений картина переменности остается такой же, как в 1998 году. Изменения линий относительно их среднего профиля обусловлены либо увеличением, либо уменьшением интенсивности наложенной дополнительной эмиссионной компоненты. При этом различаются центральные позиции и протяженности до-

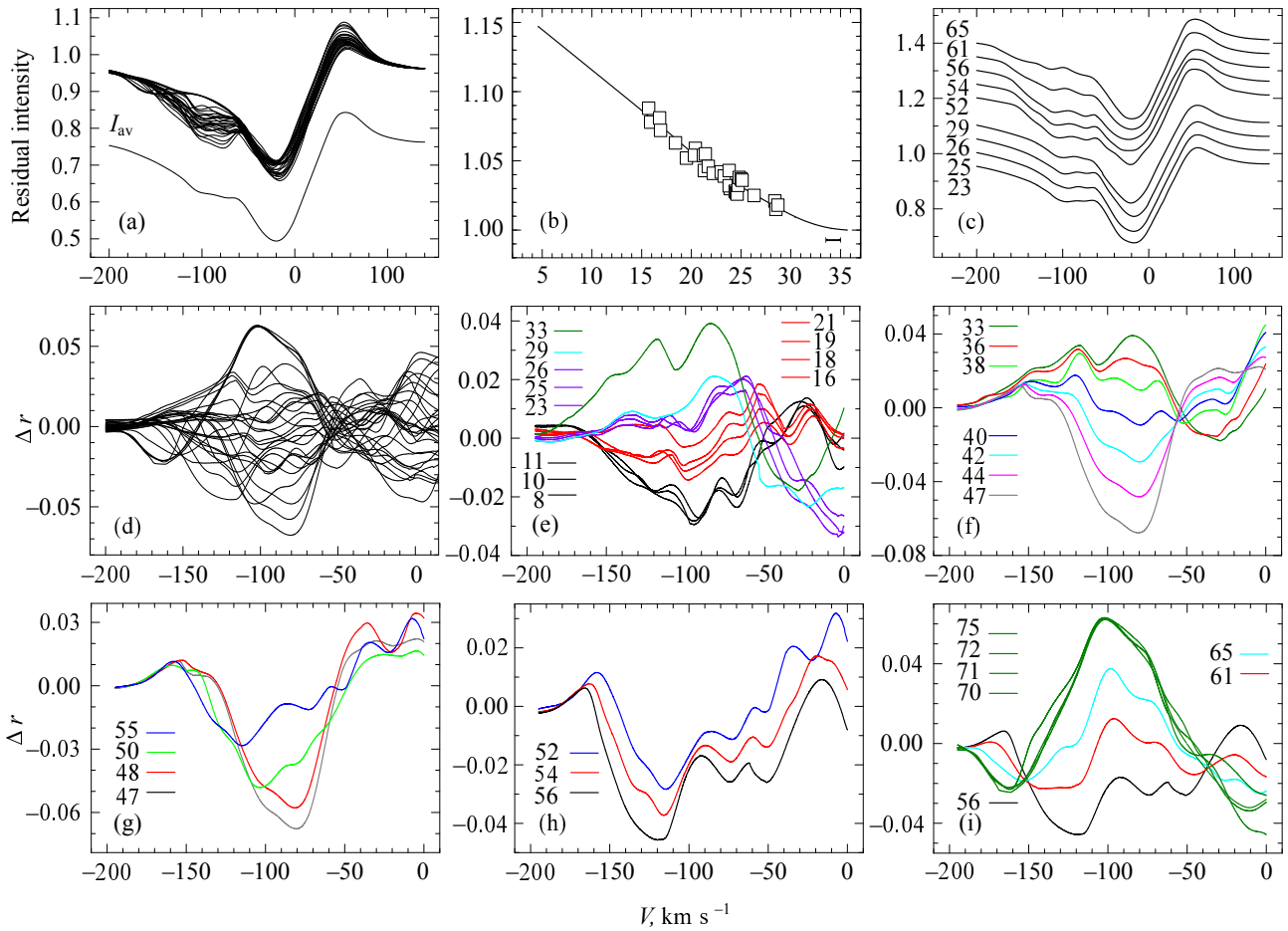


Рис. 6. Панели (а)–(і) те же, что на рис. 2, но для линий, полученных в 2007 г. Числа на панели (с) — юлианские даты полученных спектров, $JD = 2454300 +$. На панелях (е)–(і) числами указаны юлианские даты полученных спектров, из которых был вычтен средний профиль этого года, I_{av} .

полнительных эмиссионных компонент на шкале лучевых скоростей.

В 1999 году общая картина переменности линий относительно среднего профиля I_{av} представлена на рис. 3е. На рис. 3f видно, что на профиль линии в дату $JD = 2451400 + 28$ накладывается дополнительная эмиссионная компонента. В течение семи дней (от $JD + 28$ до $JD + 35$) ее интенсивность увеличивается и сама компонента охватывает диапазон $-110 \lesssim V \lesssim -60 \text{ км с}^{-1}$. На рис. 3g мы наблюдаем обратный процесс — уменьшение интенсивности этой компоненты. Следующая дополнительная эмиссионная компонента зафиксирована в дату $JD + 55$ на позиции $-40 \pm 5 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 3h). Далее, в течение 13 дней (от $JD + 55$ до $JD + 68$) она усиливается и охватывает диапазон $-90 \lesssim V \lesssim -10 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 3i). На позиции $-110 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ наблюдается появление и усиление высокоскоростной абсорбции, HVA (рис. 3i).

Для 2000 года общая картина переменности линий относительно среднего профиля I_{av}

представлена на рис. 2е. Дополнительная эмиссионная компонента появляется на профиле линии в дату $JD = 2451700 + 40$ в диапазоне $-125 \lesssim V \lesssim -65 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 2f). В течение четырех дней (от $JD + 40$ до $JD + 44$) ее интенсивность уменьшается. На рис. 2g наблюдается обратный процесс: на линию $JD + 46$ в диапазоне $-100 \lesssim V \lesssim -10 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ накладывается дополнительная эмиссионная компонента, и в течение четырех дней (с $JD + 46$ по $JD + 50$) ее интенсивность увеличивается (рис. 2g). На рис. 2h видно, что в интервале $-185 \lesssim V \lesssim -125 \text{ км с}^{-1}$ на линию ($JD + 52$) накладывается дополнительная эмиссия, наблюдаемая в течение трех дней ($JD + 52, 53, 54$). Через день на позиции $-55 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ зафиксировано появление эмиссии, сохраняющейся относительно постоянной в течение двух дней ($JD + 55, 56$). В последующие дни (рис. 2h, $JD + 58, 59$) наблюдается дальнейшее усиление эмиссии, которая охватывает широкий диапазон лучевых скоростей: $-105 \lesssim V \lesssim -15 \text{ км с}^{-1}$. На рис. 2i на профиле

JD + 67 заметно наложение дополнительной эмиссионной компоненты на позиции $-35 \pm 5 \text{ км с}^{-1}$, то есть на ядро абсорбции линии H α . В даты JD + 77, 78, 79 она смещается на позицию около $-60 \pm 5 \text{ км с}^{-1}$. В течение 11 дней (с JD + 67 по JD + 78) компонента перемещается в синюю сторону примерно до -20.0 км с^{-1} . Углубление на позиции около -110 км с^{-1} соответствует высокоскоростной абсорбции (HVA), наблюдавшейся в эти даты. В течение 12 дней (с JD + 67 по JD + 79) происходит появление и усиление HVA, а также ее смещение в синюю сторону спектра.

В 2001 году общая картина переменности линий относительно среднего профиля I_{av} представлена на рис. 5d. Линии с близкими фотометрическими параметрами (r_0 , $FWHM$ и W_λ) были усреднены. На рис. 5e и 5f показаны усредненные линии, из которых вычтен средний профиль за этот год; они отмечены числами через дефис — последними цифрами юлианской даты (JD = 2452000+). Дополнительная эмиссионная компонента наблюдается на профиле с JD + 106 по JD + 108 в диапазоне $-185 \lesssim V \lesssim -25 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 5e).

В 2007 году общая картина переменности линий относительно среднего профиля I_{av} представлена на рис. 6d. Дополнительная эмиссионная компонента присутствует на позиции $V \sim -30 \pm 5 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 6e). В течение 23 дней (с JD = 2454300 + 10 до 2454300 + 33) заметно ее перемещение в синюю сторону спектра и постепенное усиление интенсивности. К концу этого периода компонента охватывает диапазон лучевых скоростей $-185 \lesssim V \lesssim -25 \text{ км с}^{-1}$. На рис. 6f наблюдается обратный процесс — постепенное ослабление интенсивности компоненты до ее полного исчезновения. Следующая дополнительная эмиссионная компонента зафиксирована в дату JD + 61 (рис. 6i). В течение девяти дней (с JD + 61 до JD + 70) наблюдается усиление ее интенсивности, и она охватывает диапазон $-140 \lesssim V \lesssim -50 \text{ км с}^{-1}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работах Kaufer et. al., (1996), Morrison and Mulliss (1998), Richardson (2006) и Richardson et.al. (2011) переменность профиля линии H α в основном была исследована визуально по динамическим спектрам. Качество наших спектров позволило нам подробно исследовать переменность линий H α в широком диапазоне лучевой скорости $-185 \lesssim V \leq 50 \text{ км с}^{-1}$. Обнаружено, что на синюю половину профиля абсорбции накладываются дополнительные абсорбционные компоненты. В разные периоды наблюдений зафиксированы от одной до двух таких компонент. В большинстве случаев

явно выделяются две дополнительные абсорбционные компоненты. Наблюдается их небольшое смещение в синюю сторону спектра. Анализ всего полученного материала (см. раздел 3) показал, что за сутки среднее смещение дополнительных абсорбционных компонент составляет около $V \approx -1.5 \pm 0.7 \text{ км с}^{-1}$. В 2000 году (JD = 2451700) в ходе более непрерывных и продолжительных наблюдений эти компоненты были зафиксированы в трех временных интервалах — с JD + 40 по + 44, с JD + 77 по + 79 и с JD + 108 по + 110 — но отсутствовали в промежуточные даты. Аналогичная картина отмечается и в других сезонах. Поэтому мы считаем, что они представляют собой дополнительные абсорбционные компоненты и периодичность их появления не связана с дискретностью наблюдений.

Заключение Richardson et al. (2011) о том, что высокоскоростная абсорбция является очень редким событием в спектре Денеба нами не подтверждено. На наших спектрах HVA-событие наблюдалось во всех сезонах наблюдений.

В 1998 году HVA-событие наблюдалось в двух датах: JD + 75 и JD + 78 (JD = 2451000) на позициях $V \sim -110$ и $V \sim -114 \text{ км с}^{-1}$ соответственно (рис. 4c). В 1999 году оно наблюдалось в течение одиннадцати дней с JD + 24 до JD + 35 (JD = 2451400), на позициях $V \sim -103$ и -111 км с^{-1} (рис. 3c). В 2000 году событие регистрировалось в два трехдневных периода: с JD + 77 до JD + 79 (JD = 2451700) на позициях $V \sim -102$ и -106 км с^{-1} , а также с JD + 108 до JD + 110 (JD = 2451700) на позициях $V \sim -108$ и -112 км с^{-1} соответственно (рис. 2d). В 2001 году оно наблюдалось в течение пяти дней (JD + 91–JD + 94 и JD + 96; JD = 2452000) на позициях $V \sim -100$, -102 и -104 км с^{-1} (рис. 5b). В 2007 году событие наблюдалось в течение 13 дней (с JD + 52 до JD + 65; JD = 2454300) на позициях $V \sim -104$, -115 км с^{-1} (рис. 6c). На рис. 3i (1999 г.) и 2i (2000 г.) видно появление и усиление HVA соответственно в течение 9 и 12 дней.

Исследование переменности линии H α относительно ее среднего профиля показало, что на нее накладывается дополнительная эмиссионная компонента. В разных сезонах и периодах наблюдений она зафиксирована в отдельных диапазонах лучевой скорости. Ее интенсивность и протяженность по оси лучевой скорости различаются в разные периоды наблюдений:

- в 1998 году обнаружены две компоненты протяженностью около $160 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ каждая: одна на позиции $V \sim -105 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 4e), другая — на позиции $V \sim -20 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 4f);

- в 1999 году зарегистрированы компоненты на $V \sim -85 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (протяженностью примерно $50 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 3f) и на $V \sim -50 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (протяженностью $80 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 3i);
- в 2000 году выявлены три компоненты: на $V \sim -55 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (протяженностью $90 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 2g), на $V \sim -155 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (протяженностью $60 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 2h) и на $V \sim -60 \pm 10$ (протяженностью $90 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 2h);
- в 2001 году зафиксирована компонента на $V \sim -105 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ протяженностью, близкой к $160 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 5e);
- в 2007 году обнаружены две компоненты: на $V \sim -105 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (протяженностью около $160 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 6e) и на $V \sim -95 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ (протяженностью $90 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$, рис. 6i).

Анализ переменности линии $H\alpha$ у ярких горячих звезд указывает на связь изменчивости звездного ветра с локализованными и коротирующими поверхностными структурами (Chesneau et al., 2010). Мы показали, что размеры этих структур различаются в разные периоды наблюдений.

Интенсивность эмиссионной компоненты на красном крыле линии $H\alpha$ меняется со временем. Изменение интенсивности хорошо коррелирует как с лучевой скоростью биссектора абсорбционной компоненты, так и с красной половиной контура на уровне $r = 0.9$. Для сезонов 2000, 1999, 1998, 2001 и 2007 гг. эта данная корреляция представлена на рис. 2с, 3b, 4d, 5с и 6b соответственно. Четко прослеживается основной тренд (сплошная кривая): интенсивность эмиссионной компоненты уменьшается с ростом лучевой скорости красной половины контура абсорбции. Сильная абсорбционная компонента, по мере смещения в красную область спектра, приводит к ослаблению интенсивности эмиссионной компоненты. По нашим данным, когда лучевая скорость красной половины профиля абсорбции (на уровне $r = 0.9$) достигает величины $V = 35 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$ (ядро абсорбционной компоненты — $V = -10 \pm 2.0 \text{ км с}^{-1}$), интенсивность эмиссионной компоненты на красном крыле стремится к $r = 1.0$. Самую сине-смещенную линию мы наблюдали 8 сентября 2001 года: интенсивность эмиссии составляла $r = 1.147 \pm 0.006$, лучевая скорость на уровне $r = 0.9$ была $V = 4.6 \pm 0.5$, а ядро абсорбции — $V = -52.0 \pm 2.0 \text{ км с}^{-1}$.

Отметим, что на рис. 2с, 3b, 4d, 5с и 6b наблюдается отклонение от этого тренда, превышающее ошибки измерения в r_0 . В отдельные временные интервалы интенсивность эмиссионной компоненты линии $H\alpha$ существенно выше (рис. 2с, 3b и 4b) или ниже (рис. 2с, 5с) значений, соответствующих основному тренду. Как отмечалось в работах

Kaufer et al. (1996) и Richardson et al. (2011), это может свидетельствовать о наложении в эти периоды дополнительных эмиссионных или абсорбционных компонент на эмиссионную компоненту линии $H\alpha$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

А.Р. выполнил работу в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. М.Г. получил поддержку от Европейского Союза NextGenerationEU в рамках проекта №09I03-03-V04-00262.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. P. Aufdenberg, P. H. Hauschildt, E. Baron, et al., *Astrophys. J.* **570** (1), 344 (2002). DOI:10.1086/339740
2. O. Chesneau, L. Dessart, D. Mourard, et al., *Astron. and Astrophys.* **521**, id. A5 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201014509
3. G. A. Galazutdinov, *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 519 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040034
4. N. Z. Ismailov, G. G. Bakhaddinova, O. B. Khalilov, and K. M. Mikailov, *Astrophysical Bulletin* **68** (2), 196 (2013). DOI:10.1134/S1990341313020077
5. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astron. and Astrophys.* **305**, 887 (1996).
6. N. D. Morrison and C. L. Mulliss, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **191**, id. 125.04 (1998).
7. F. A. Musaev, *Astronomy Letters* **19** (8), 315 (1993).
8. N. D. Richardson, Master's Thesis, (University of Toledo, Ohio, 2006).
9. N. D. Richardson, N. D. Morrison, D. R. Gies, et al., *Astron. J.* **141** (4), article id. 120 (2011). DOI:10.1088/0004-6256/141/4/120
10. A. K. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **63** (3), 264 (2008). DOI:10.1134/S1990341308030061
11. A. K. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **65** (1), 26 (2010). DOI:10.1134/S1990341310010037
12. A. K. Rzaev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **524** (2), 1735 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1995
13. A. K. Rzaev, L. T. Hasanova, M. V. Yushkin, and K. M. Mikailov, *Astrophysical Bulletin* **62** (1), 52 (2007). DOI:10.1134/S1990341307010051
14. A. K. Rzaev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 66 (2002).
15. B. Strömgren, *Vistas in Astronomy* **2** (1), 1336 (1956). DOI:10.1016/0083-6656(56)90060-5

H α Line Variations in the Spectrum of α Cyg**A. K. Rzayev¹ and M. M. Gabdeev²**¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia²Pavol Jozef Šafárik University, Košice, 040 01 Slovakia

Based on the CCD spectra obtained between 1998 and 2007, the time variation of the H α line profile in the spectrum of α Cyg was investigated. The variability of the H α line relative to its average profile showed that additional absorption and emission components are superimposed on the blue half of the absorption profile. The intensity, position, and extent of the additional emission components on the radial velocity scale differ across different observing periods. A correlation is observed between the radial velocity of the H α absorption component and its emission intensity. Observations showed that high-velocity absorption (HVA) is not a rare event in the spectrum of Deneb. In our spectra, HVA events were observed during all observation seasons.

Keywords: *stars: supergiants, stars: individual: α Cyg*