

УДК 524.31.01-54

О ПРОТЯЖЕННОЙ АТМОСФЕРЕ ГИПЕРГИГАНТА V509 Cas В 1996–2018 ГГ.

© 2019 В. Г. Клочкова*, Е. Л. Ченцов, В. Е. Панчук

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 сентября 2018 года; после доработки 6 декабря 2018 года; принята к публикации 6 декабря 2018 года

На основе данных спектрального мониторинга желтого гипергиганта V509 Cas, выполненного в 1996–2018 гг. на 6-м телескопе со спектральным разрешением $R \geq 60\,000$, детально изучено кинематическое состояние на различных уровнях протяженной атмосферы. Признаки присутствия компаньона не обнаружены. Совпадение скоростей по разрешенным и запрещенным эмиссиям ионов металлов, а также их строгое постоянство во времени привели к выбору системной скорости звезды: $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$. Положение запрещенных эмиссий [N II], формирующихся в околосредной среде, строго стабильно и систематически смещено на -6 км с^{-1} относительно эмиссий ионов металлов. Сделан вывод об изменении после наблюдений в 1996 г. полуширин и интенсивностей эмиссий [N II] (линии стали уже и интенсивнее), а в последующие 22 года наблюдений эти параметры не изменялись. Скорости по коротковолновым компонентам абсорбций Fe II(42) находятся в узком интервале: $V_r = [-84; -87] \text{ км с}^{-1}$, что свидетельствует о стабильности расширения верхних слоев атмосферы. Стабильна в целом атмосфера гипергиганта, исключая близкие к фотосфере слои. Переменность скорости в диапазоне $V_r = [-52; -71] \text{ км с}^{-1}$, выявленная по положениям ядер сильных абсорбций ионов металлов, может быть проявлением пульсаций в глубоких атмосферных слоях, где идет формирование этого типа линий.

Ключевые слова: *звезды: массивные — звезды: эволюция — звезды: атмосферы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Желтый гипергигант V509 Cas (HR 8752) — яркий представитель группы редко встречающихся звезд вблизи предела светимости. Общие сведения об этих объектах с исходными массами 20–40 M_{\odot} представлены в [1, 2]. Помимо экстремальной светимости, желтые гипергиганты отличаются от обычных сверхгигантов очень высоким темпом потери вещества в виде звездного ветра и наличием газопылевых околосредных оболочек. Нестабильность гипергигантов проявляется в виде слабой переменности блеска (с амплитудой порядка 0.2–0.4^m), которую обычно относят к пульсационному типу. Наряду с этим проявлением неустойчивости желтые гипергиганты испытывают еще и спорадические пульсации, так называемые «shell episodes», в ходе которых звезда особенно интенсивно теряет вещество и на несколько сотен дней укутывается выброшенным холодным веществом, образующим псевдофотосферу.

На диаграмме Герцшпрунга–Рессела желтые гипергиганты занимают ограниченную область [3], однако наблюдаемые свойства хорошо изученных

представителей этого семейства (ρ Cas, V509 Cas, V1302 Aql) значительно различаются. Это относится прежде всего к различиям в оптических спектрах и особенностях структуры и кинематики оболочек. К примеру, в спектре желтого гипергиганта ρ Cas, который рассматривается в качестве прототипа группы желтых гипергигантов, еще более полувека назад была обнаружена [4] значительная переменность эмиссионно-абсорбционного профиля H α , а также расщепление линий Ba II, Sr II, Ti II и других сильнейших абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. Позже эти особенности спектра ρ Cas исследовались детально посредством спектрального мониторинга [5–9]. На Г–Р-диаграмме ρ Cas располагается на границе Желтого войда [2], разделяющего гипергиганты и LBV в спокойной фазе. На границе Желтого войда, по-видимому, резко возрастает амплитуда пульсаций желтых гипергигантов, что и приводит к повышенной неустойчивости атмосферы и сбросу оболочки [2]. В 2013 г. в системе ρ Cas произошел новый выброс вещества, при котором блеск звезды понизился на 0.5^m. Этот выброс произошел спустя лишь 12 лет после предыдущего в 2000–2001 гг.; таким

*E-mail: valenta@sao.ru

образом, наблюдается учащение выбросов ρ Cas, что, согласно предположению Арет и др. [10], может свидетельствовать о приближении пересечения звездой границы Желтого войда. Удивительно, но при столь мощной потере вещества, таком богатом особенностями и переменностью оптическом спектре, этот гипергигант не имеет околосредней пылевой оболочки.

Близкий родственник ρ Cas — желтый гипергигант V1302 Aql, — напротив, ассоциирован с одним из ярчайших источников ИК-излучения IRC+10420. В системе этого объекта обнаружен и источник мазерного излучения в ОН [11]. В оптическом спектре V1302 Aql преобладают эмиссионные и абсорбционные линии ионов металлов Fe II, Ti II, Sc II, Cr II, эмиссионные линии Fe I и абсорбционные линии Ni I, O I и Si II, а также запрещенные линии [Fe II], [Ca II] и [OI] [12–15]. Профили линий ионов металлов очень разнообразны: от практически симметричных эмиссий до обратных профилей типа P Cyg и абсорбционных профилей с двумя эмиссионными компонентами. Долговременный спектральный мониторинг V1302 Aql, выполненный в течение последних десятилетий [12, 14, 15], привел к выводу о том, что объект прошел на Γ -P-диаграмме путь от красного сверхгиганта до холодной границы Желтого войда.

Сложность исследований спектров желтых гипергигантов хорошо иллюстрирует история изучения холодного сверхгиганта HD 179821, отождествляемого с ИК-источником IRAS 19114+0002. Сочетание наблюдаемых параметров этой звезды долгое время не позволяло однозначно фиксировать ее эволюционный статус (см. статью [16] и ссылки в ней). Однако в последние годы получены достаточно убедительные доказательства принадлежности звезды к желтым гипергигантам [17, 18].

Сверхгигант V509 Cas, подобно V1302 Aql, описан на Γ -P-диаграмме сложную траекторию, «zigzag» по выражению [3]. В оптическом диапазоне длин волн спектр этого гипергиганта в различные моменты наблюдений менялся в интервале спектральных классов G–K, при этом сохранялся класс светимости Ia [19]. Оптический спектр V509 Cas богат эмиссионными деталями, которые искажают профили абсорбций не только водорода, но и металлов, что в той или иной мере присуще спектрам и других изученных желтых гипергигантов. При этом в спектре V509 Cas зафиксирована уникальная особенность — эмиссии высоковозбужденных запрещенных линий [N II] 6548 и 6584 Å, обнаруженные в спектре этой звезды еще в 1961 г. [20], когда эта звезда рассматривалась в качестве стандарта МК-классификации. Их присутствие в спектре столь холодной одиночной звезды трудно объяснить. Этот факт послужил

для нас стимулом для проведения долговременного мониторинга звезды с высоким спектральным разрешением.

В данной статье мы представляем результаты, полученные на основе мониторинга спектра звезды в течение нескольких сезонов 1996–2018 гг. В разделе 2 кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 мы приводим полученные результаты, сопоставляем их с опубликованными ранее и в разделе 4 приводим выводы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Все наблюдения V509 Cas мы провели с эшеллевыми спектрографами в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Даты наблюдений и зарегистрированные спектральные диапазоны приведены в таблице 1. В 1996 г. мы использовали эшелле-спектрограф Lypx [21], который в сочетании с матрицей ПЗС $1K \times 1K$ обеспечивал спектральное разрешение $R \approx 25\,000$. Последующие спектральные данные получены с эшеллевым спектрографом НЭС [22, 23], оснащенный крупноформатной ПЗС-матрицей размером 2048×4608 элементов. Для уменьшения световых потерь без ухудшения спектрального разрешения спектрограф НЭС снабжен резателем изображения на три среза. Каждый спектральный порядок на изображении повторяется трижды со смещением вдоль дисперсии эшелле-решетки [23]. Переход на крупноформатную ПЗС существенно раздвинул границы одновременно регистрируемого интервала длин волн: например, $\Delta\lambda = [5400; 8479]$ Å в спектре 1.10.2014 или $\Delta\lambda = [4697; 7782]$ Å в спектрах 2017 г. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$, отношение сигнала к уровню шумов $S/N > 100$ и мало отличается от спектра к спектру.

Экстракция одномерных данных из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью модифицированного с учетом особенностей эшелле-кадров используемых спектрографов контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS (см. детали в работе [24]). Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась по спектрам Th–Ag лампы с полым катодом. Отождествление деталей в спектре V509 Cas мы проводили, используя опубликованный ранее спектральный атлас [25].

Вся дальнейшая обработка, включающая фотометрические и позиционные измерения, выполнена с помощью последней версии программы

Таблица 1. Результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_r , округленные до целых км с^{-1} , в спектрах V509 Cas по набором линий различного типа

Дата	$\Delta\lambda$, нм	V_r , км с^{-1}											DIBs
		[Fe II]	линии ионов			FeII (42)	H α	[N II]	Na I				
			эм	эм	кр				ядро	абс	абс	CS	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
May 02, 1996	527–685	–62	–62	–62	–71		–104, –11	–69	–89	–62	–47	–15	–14
Jul 03, 1996	515–800	–63	–62	–63	–66		–103, –20	–68	–88	–62	–48	–14	–15
Oct 01, 2014	540–848	–63	–63	–60	–53		–96, –18	–69	–90	–62	–50	–14	–13
Sep 04, 2015	395–666	–62	–63	–62	–60	–87, –55	–96, –22	–69	–90	–62	–51	–14	–15
Oct 26, 2015	398–676	–63	–63	–63	–62	–87, –53	–95, –22	–68	–90	–62	–50	–14	–14
Feb 12, 2017	470–778	–62	–63	–62	–59	–84, –52	–93, –27	–69	–89	–62	–50	–13	–14
Jun 13, 2017	470–778	–63	–63	–63	–62	–86, –54	–92, –26	–69	–89	–62	–50	–14	–14
Aug 03, 2017	470–778	–63	–64	–63	–62	–85, –54	–92, –21	–69	–89	–62	–52	–14	–14
Apr 06, 2018	470–778	–63	–62	–61	–59	–84, –55	–93, –20	–68	–89	–61	–52	–14	–14

DESN20t [26]. Отметим, что эта традиционно используемая нами программа обработки спектров позволяет измерять лучевые скорости для отдельных деталей профилей линий, и что в статье используются только гелиоцентрические значения скоростей V_r . Систематические ошибки измерения V_r , оцененные по резким межзвездным компонентам Na I, не превышают 0.25 км с^{-1} (по одной линии), случайная ошибка для неглубоких абсорбций порядка 0.7 км с^{-1} — среднее значение на одну линию. Тем самым для наших усредненных величин в таблице 1 случайные ошибки составляют около 0.3 км с^{-1} .

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Особенности оптического спектра V509 Cas

Для детальной спектроскопии высокого разрешения V509 Cas — очень привлекательный объект: эта яркая звезда имеет координаты, позволяющие выполнять круглогодичные наблюдения в северном полушарии, а спектр ее изобилует разнообразными сложными деталями, что хорошо видно на рис. 1–3. Естественно, что столь интересный объект имеет долгую историю спектральных наблюдений, а основные особенности спектра были обнаружены в самых ранних публикациях [20]. Спектральный класс, начиная с 1974 г., становился более ранним: в 1977 г. оценен как F8 (тот же, что у ρ Cas [19]). Согласно нашим наблюдениям, с 1996 по 2018 гг. спектр V509 Cas изменялся мало,

и спектральный класс оставался еще более ранним, близким к F2. Эта оценка сделана нами визуально из сопоставления спектра V509 Cas с данными атласа спектров F- и G-звезд [25] и количественно по отношению интенсивностей линий Fe I и Fe II. Рисунок 4 показывает эволюцию спектра звезды со временем на его небольшом фрагменте с линиями Fe I и Fe II. Два верхних фрагмента заимствованы из вышеуказанной работы [19]. Этот рисунок свидетельствует об отсутствии значимых изменений спектрального класса V509 Cas за время наших наблюдений в 1996–2018 гг., что согласуется с постоянством эффективной температуры звезды в эти годы (см. рис. 2 в статье [3]).

Как было отмечено во Введении, по эффективной температуре и своему эволюционному статусу V509 Cas близок к родственному объекту V1302 Aql. В оптическом спектре гипергиганта V1302 Aql преобладают эмиссионные и абсорбционные линии ионов металлов Fe II, Ti II, Sc II, Cr II, эмиссионные линии Fe I и абсорбционные линии Ni I, O I и Si II [14, 27]. Некоторые эмиссионные детали отождествляются с запрещенными линиями [Fe II], [Ca II] и [O I]. Профили линий ионов металлов очень разнообразны: от практически симметричных эмиссий до обратных профилей типа P Cyg и абсорбционных профилей с двумя эмиссионными компонентами. Линии высокого возбуждения (Ni I, O I и Si II) имеют почти симметричные абсорбционные профили, смещенные в среднем на 5 км с^{-1} в красную сторону относительно положения минимумов их профилей. В спектрах

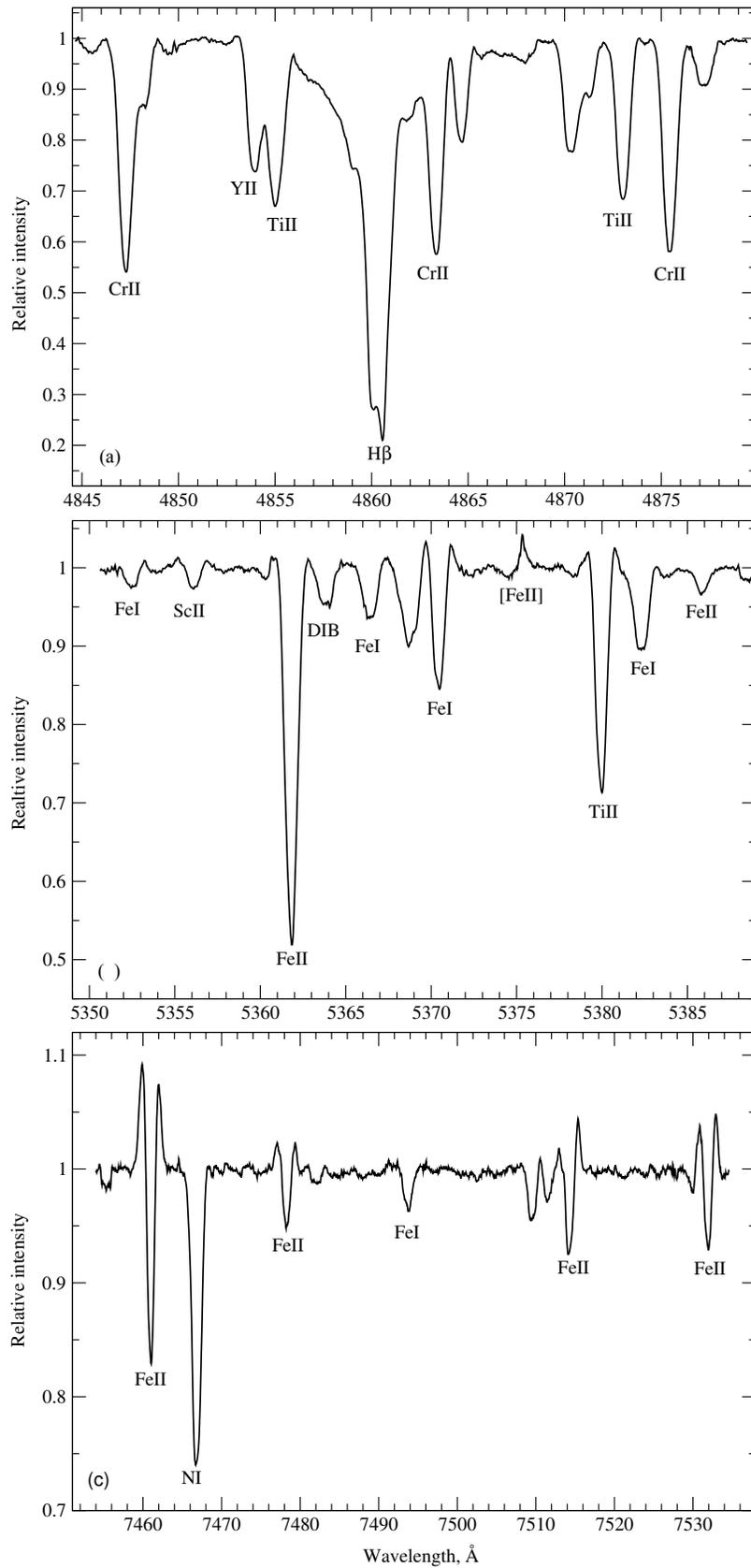


Рис. 1. Фрагменты спектра V509 Cas: (a) интервал 4845–4880 Å, содержащий линию H β ; (b) интервал 5350–5390 Å с запрещенной линией [Fe II] 5376 Å; (c) интервал 7455–7535 Å с линией Ni 7468 Å. Указано отождествление основных деталей.

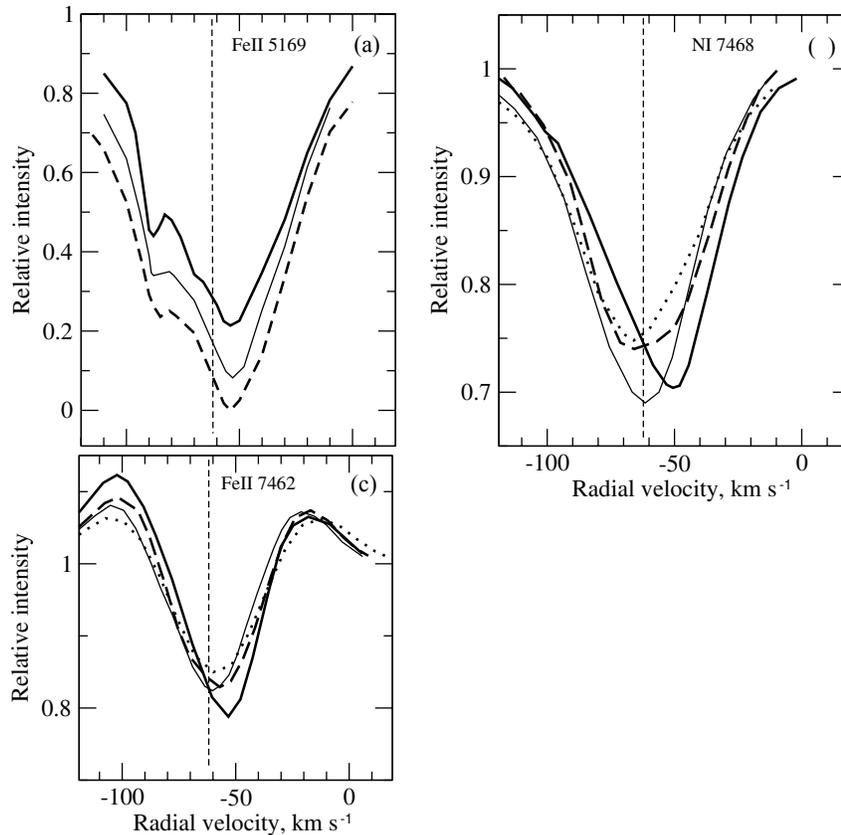


Рис. 2. Вариации профилей линий в спектрах V509 Cas, полученных в различные годы: пунктирная линия — 1996, сплошная жирная — 2014, сплошная тонкая — 2017, штриховая — 2018. Профили линии Fe II 5169 Å сдвинуты по оси ординат относительно предыдущего профиля на 0.1. Вертикальной штриховой линией указано принятое значение системной скорости $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$.

V509 Cas примерно тот же набор линий металлов, однако линии Fe I чаще чисто абсорбционные либо абсорбции с эмиссиями в крыльях.

Водородные линии $H\alpha$ и $H\beta$ в спектрах V1302 Aql имеют характерный двухпиковый профиль, подобный профилю $H\alpha$ в спектре V509 Cas. Но по сравнению со спектром V509 Cas соотношение эмиссионных пиков в спектре V1302 Aql обратное: коротковолновый пик значительно интенсивнее длинноволнового. Лишь в одну из дат (24.11.2007) многолетнего мониторинга V1302 Aql на 6-м телескопе зафиксирован необычный вид профиля $H\alpha$, в котором длинноволновый пик существенно превышает коротковолновый. Кроме того, в отличие от V509 Cas, в спектре V1302 Aql широкая фотосферная абсорбция полностью залита эмиссией. Для более подробного сопоставления спектров двух гипергигантов удобно воспользоваться атласом спектра V1302 Aql [28].

Все наши спектры V509 Cas содержат линию $H\alpha$, часть из ее профилей представлена на рис. 3, откуда следует незначительная переменность профиля в целом в течение 1996–2018 гг. Интен-

сивность коротковолнового эмиссионного пика постоянно ниже длинноволнового. Переменности под воздействием ветра подвержено в основном коротковолновое крыло абсорбции. Не заметно существенных изменений ни в форме профилей линий металлов, ни в положениях их основных компонентов. Это показывают рис. 2, где приведены профили абсорбций Ni I 7468 и Fe II 5169 Å (фрагменты с профилем Fe II 5169 Å сдвинуты по вертикали относительно верхнего), абсорбционно-эмиссионный профиль линии Fe II 7462 Å, а также таблица 1.

V509 Cas обычно считается спектральным двойником гипергиганта ρ Cas [29], и поэтому многие авторы сопоставляют их спектры [5, 29–31]. Однако детальное исследование спектров обоих гипергигантов с близкими фундаментальными параметрами (масса, светимость, стадия эволюции) выявило существенные различия и спектров, и кинематического состояния атмосфер, что свидетельствует о различии физических процессов, вызывающих нестабильность атмосфер и оболочек. Спектральные различия проявляются прежде всего в различии профиля $H\alpha$ и его переменности

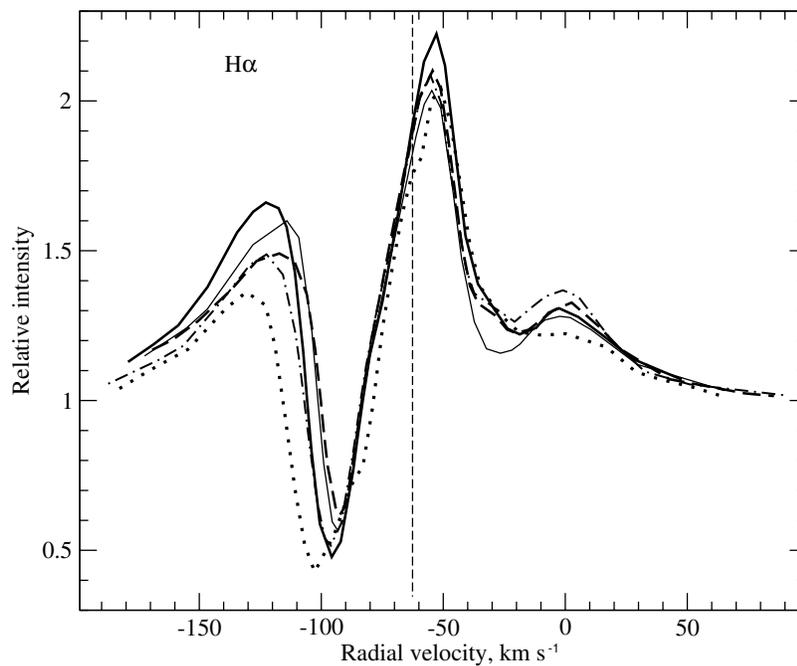


Рис. 3. Вариации профиля $H\alpha$ в спектрах V509 Cas, полученных в различные даты: 2.05.1996 — пунктирная линия, 1.10.2014 — жирная сплошная линия, 26.10.2015 — штрих-пунктир, 2017 — тонкая сплошная линия, 6.04.2018 — штриховая. Вертикальной штриховой линией указано принятое значение системной скорости $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$.

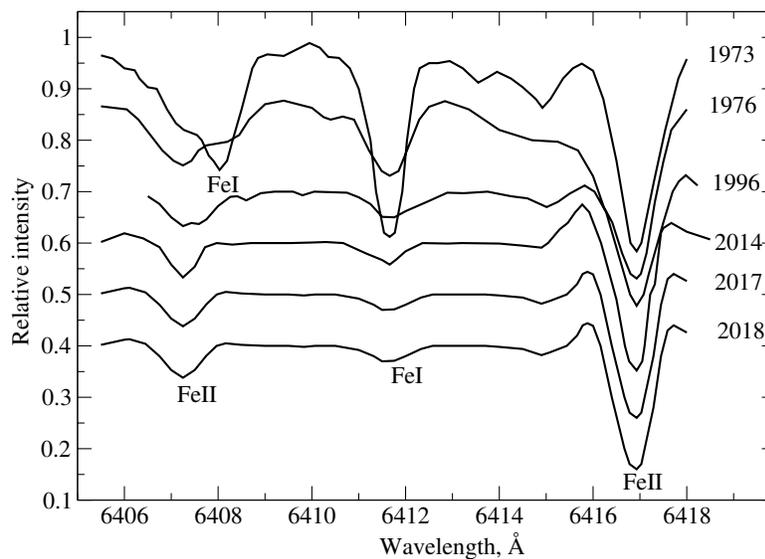


Рис. 4. Переменность спектра V509 Cas в интервале длин волн 6405–6418 Å. Две верхние кривые взяты из работы [19]. По горизонтали линии совмещены с их лабораторными длинами волн.

сти. Профиль $H\alpha$ в спектре ρ Cas значительно изменяется, что в основном связано с выбросами оболочек. Особенно показательны изменения профиля $H\alpha$ после выброса 2013 г. [9]. Смещения профиля $H\alpha$ указывают на изменение структуры и повышенную нестабильность верхних слоев протяженной атмосферы звезды. Значительное

смещение профиля в длинноволновую область в спектрах августа–сентября 2017 г. указывает на падение вещества тех слоев, где формируется линия. Как следует из рис. 3, поведение профиля $H\alpha$ в спектре V509 Cas по нашим наблюдениям более спокойно. Абсорбционные компоненты $H\alpha$ на этом рисунке и линии FeII(42) на рис. 2

располагаются по обе стороны от линии V_{sys} , что говорит о присутствии в атмосфере и оболочке V509 Cas как истекающего, так и аккрецирующего вещества. Изменения профиля наблюдаются в смещении и переменной ширине абсорбционного компонента (рис. 3), вызванных нестабильностью условий в оболочке, расширяющейся со скоростью 33–40 км с⁻¹. Авторы [30], сравнивая спектры V509 Cas и ρ Cas в ближнем УФ, также подчеркнули, что эти две звезды не являются спектральными двойниками.

Кроме того, в спектре ρ Cas наблюдаются переменное во времени расщепление сильнейших абсорбций и оболочечные эмиссии атомов группы железа (см. [9] и ссылки в этой статье). Оба этих эффекта, обусловленные наличием у ρ Cas мощной структурированной оболочки, отсутствуют в спектре V509 Cas. С другой стороны, в спектре V509 Cas есть детали, отсутствующие в спектре ρ Cas: высоковозбужденные запрещенные линии [N II] и эмиссионные компоненты у большинства разрешенных и запрещенных линий ионов металлов (см. статью [20] и рис. 1 и 4 в данной работе). В спектре V509 Cas отождествлено множество диффузных межзвездных деталей, в то время как они отсутствуют в спектре ρ Cas, имеющей близкие галактические координаты.

Спектр V509 Cas имеет сходство со спектром более горячей звезды высокой светимости 3 Pup (Sp = A4 Iab). В спектре этого массивного сверхгиганта, детально изученном в [32], зарегистрирована раздвоенная H α с более сильным красным компонентом (профиль типа P Cug III по Билсу [33]), эмиссии запрещенных линий [O I] 1F 6300, 6364 Å, дублет [Ca II] 1F 7291, 7324 Å и эмиссии в некоторых линиях Fe II. Авторы [32] подчеркнули, что в спектре 3 Pup фотосферной может считаться только линия Mg II 4481 Å, а в линиях Fe II очевиден вклад оболочки, которая придает профилям специфическую форму: крылья приподняты эмиссиями. Такого же типа особенности мы видим и в спектре V509 Cas, в котором крылья даже слабых линий искажены эмиссиями, что хорошо видно на рис. 2 для линии Fe II 7462 Å с глубиной не более 0.2 от уровня локального континуума. Звезда 3 Pup — наиболее холодный представитель семейства сверхгигантов с феноменом B[e], детально рассмотренного в статье Арет и др. [34].

3.2. Запрещенные линии [N II]

Наличие различных сочетаний эмиссий [O I], [O II], [N II], [S II], [Ca II] и др. не является признаком какого-то определенного класса звезд. Сильные запрещенные эмиссии, областью формирования которых является плотный вращающийся

диск [34], — обычные детали в спектрах звезд с феноменом B[e]. Примерами этого класса звезд являются вышеупомянутые CI Cam и 3 Pup, в спектре которой есть множество запрещенных эмиссий, но эмиссии [N II] отсутствуют. Наличие запрещенных эмиссий известно и для иных типов горячих далеко проэволюционировавших звезд, прошедших этапы с большой потерей вещества: гипергигант MWC 314 [28], LBV-звезда GR-290 [35], рентгеновский транзиент [36, 37], протопланетарные туманности, вступившие в фазу ионизации оболочки [38–42]. Зачастую объекты с запрещенными эмиссиями легких металлов и их ионов являются двойными системами с горячим компонентом [43].

Таблица 2. Результаты измерений параметров линий [N II] в спектрах V509 Cas. Полуширины профилей δV_r округлены до целых км с⁻¹, эквивалентные ширины W_λ приведены в Å. Двоеточием отмечено неуверенное значение

Дата	[N II] 5755		[N II] 6548		[N II] 6583	
	δV_r	W_λ	δV_r	W_λ	δV_r	W_λ
1961 ¹					50	
1967 ²				0.045	30	0.13
May 02, 1996	20	0.025	30	0.10	29	0.33
Jul 03, 1996	19	0.026	32	0.17:	28	0.33
Oct 01, 2014	13	0.045	21	0.13	23	0.43
Sep 04, 2015	14	0.047	21	0.12	24	0.42
Oct 26, 2015	15	0.048	23	0.13	24	0.45
Feb 12, 2017	13	0.041	24	0.14	24	0.46
Jun 13, 2017	15	0.047	20	0.14	23	0.44
Aug 03, 2017	14	0.041	19	0.14	22	0.41
Apr 06, 2018	14	0.041	22	0.14	23	0.46

¹ — данные [20], ² — данные [44].

Хорошо известно также, что оптические спектры классических симбиотических и симбиотических новых звезд, как правило, содержат запрещенные эмиссии. Примером может быть холодный пекулярный сверхгигант PU Vul [45, 46]. Симбиотические звезды являются двойными системами с горячим компаньоном, УФ-излучение которого обеспечивает ионизацию газовой оболочки системы и формирование эмиссионного спектра [47]. Однако для спектра одиночной холодной звезды V509 Cas присутствие эмиссий [N II] объяснить труднее. Вероятные источники возбуждения этих эмиссий в спектре V509 Cas обсуждаются во

многих публикациях с момента обнаружения этих деталей. Саргент [20] отмечает, что наличие запрещенных эмиссий [N II] и сложные эмиссионно-абсорбционные профили $H\alpha$ и $H\beta$ указывают на вероятное существование вокруг V509 Cas горячей оболочки. В работе [48], посвященной изучению химического состава атмосферы V509 Cas, Лак придерживается этой же позиции. Однако Ламберт и др. [5] не считают привлекательной эту версию с горячим компаньоном, называя его лишь пассивным зрителем катаклизмов первичной звезды. Уже в статье 1978 г. Ламберт и Лак [19] предложили несколько версий о механизме возбуждения запрещенных линии [N II] в спектре V509 Cas: диссипация механической энергии, ионизация за счет УФ-излучения горячих звезд N II-области в объеме ассоциации Сер OB1 и др. Очевидно, что принципиальным в решении этой проблемы является спектр V509 Cas в УФ-диапазоне. Как показали авторы [30], УФ-спектр этой звезды не содержит особенностей и полностью соответствует ожидаемому при основных параметрах данного объекта.

Своеобразное поведение эмиссий [N II] наблюдается в спектре холодного пекулярного сверхгиганта R CrB. В состоянии глубокого минимума блеска, когда звезда почти полностью закрыта, возникают оптимальные условия для регистрации небулярного спектра оболочки [49]. Важным моментом является большая длительность свечения оболочки в эмиссиях [N II]: как отмечают авторы [50], при низкой плотности туманность может оставаться ионизованной до 10^4 лет.

В спектре V509 Cas полуширина линий [N II] изменяется: $\delta V_r = 50 \text{ км с}^{-1}$ в сентябре 1961 г. [20], 30 км с^{-1} в 1967 г. [44]. Полуширины, измеренные для трех линий [N II] 5755, 6548 и 6583 \AA по нашим спектрам, представлены в таблице 2. Здесь необходимо подчеркнуть, что измеряемые в наших спектрах полуширины пятикратно превышают полуширину аппаратной функции спектрографа. Понижение полуширины эмиссий в спектрах V509 Cas произошло после наблюдений 1996 г. и сохранялось в последующие 22 года наших наблюдений. Интенсивности линий [N II] также изменяются со временем: в 1967 г. эквивалентные ширины W_λ линий 6583 и 6548 \AA составляли 0.13 \AA и 0.045 \AA соответственно [44], что согласуется с теоретическим отношением интенсивностей 3:1 по данным Остерброка [51]. По нашим наблюдениям поведение полуширин линий со временем сопровождалось синхронным изменением их интенсивностей: в 1996 г. эквивалентные ширины выросли примерно в 1.7 раза, затем интенсивность

стабилизировалась. Заметим, что на спектре звезды измерения интенсивности проведены относительно уровня непрерывного спектра, так что и при постоянной мере эмиссии в линиях возможна их переменность, обусловленная изменяющимся блеском звезды. Согласно базе данных AAVSO, в последние десятилетия наблюдается слабое снижение блеска V509 Cas. Поскольку изменяется и полуширина, это означает, что изменяется дисперсия скоростей в оптически тонкой оболочке, т.е. оболочка нестационарна.

3.3. Картина лучевых скоростей

Мы полностью отождествили детали в спектре V509 Cas, однако их изобилие не позволяет нам привести здесь полный список отождествленных линий. Таблица 3 содержит лишь те спектральные детали, положение которых измерено для изучения поля скоростей. Ожидая вероятную стратификацию поля скоростей в протяженной атмосфере гипергиганта, последующий анализ измерений лучевой скорости мы провели, сведя родственные спектральные детали в несколько групп. Усредненные для групп результаты представлены в таблице 1, где указаны даты получения спектров (в 1996 г. с помощью спектрографа Lynx, далее — с помощью спектрографа НЭС), рабочие спектральные интервалы и гелиоцентрические лучевые скорости V_r , усредненные для спектральных деталей разной природы и округленные до целых км с^{-1} .

В третьем столбце таблицы 1 приведены усредненные скорости для запрещенных эмиссий [Fe II] (10–13 деталей в спектрах с различающимся диапазоном длин волн), в четвертом — для разрешенных эмиссий ионов металлов. В последующих столбцах для деталей других типов:

- таких, как парные приподнятости над непрерывным спектром на крыльях абсорбций (см. профиль Fe II 7462 \AA на рис. 2) (свыше двухсот абсорбций Si II, Sc II, Ti II, Cr II, Fe II, Y II, Ba II). Приведенные значения относятся к эмиссиям в целом, центральные части которых перекрыты абсорбциями. Измерения выполнены по нижним частям их профилей;
- для верхних частей профилей (крыльев) (пятый столбец) и ядер слабых абсорбций Fe I (10–12 линий), Ca I (четыре линии) — шестой столбец;
- ядер компонентов трех сильных абсорбций Fe II 42-го мультиплета в столбце (7) (для примера на рис. 2 приведен профиль линии этого мультиплета Fe II 5169 \AA);
- для абсорбционных компонентов (в столбце (8)) профиля $H\alpha$, представленного на рис. 3;

- для трех запрещенных эмиссий [N II] 5755, 6548 и 6584 Å в столбце (9);
- для четырех компонентов профилей Na I (1) в столбцах (10)–(13). На рис. 5 представлен профиль Na I 5896 Å, усредненный по спектрам 2017 г.;
- для выборки диффузных межзвездных полос DIBs с длинами волн λ : 5705, 5780, 5797, 5849, 6196, 6203, 6284, 6379, 6613, 6660, 6672 Å — в последнем столбце.

За счет высокого качества спектров и продолжительного мониторинга в нашем исследовании получены надежные выводы относительно временного поведения поля скоростей в атмосфере V509 Cas, которые следуют из данных таблицы 1. Близость величин, представленных в первых трех столбцах, и их постоянство во времени указывают на то, что системная скорость V509 Cas близка к $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$. Именно это значение показано вертикальной прерывистой прямой на рис. 2 и 3. Отметим, что принятое значение системной скорости $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$ согласуется со средней скоростью для ассоциации Ser OB1 $V_r = -58.2 \text{ км с}^{-1}$ [52], членом которой является и гипергигант V509 Cas.

Изменения скоростей по запрещенным линиям (третий столбец таблицы 1) со временем минимальны: $V_r = [-62; -63] \text{ км с}^{-1}$. Минимальна переменность скорости и для ядер абсорбций Fe II (42): $V_r = [-84; -87] \text{ км с}^{-1}$, что свидетельствует о стабильности верхних слоев атмосферы. Отметим аналогичное поведение во времени положений запрещенных эмиссий и ядер абсорбций Fe II (42) в спектре вышеупомянутого сверхгиганта 3 Pup [32].

Как следует из таблицы 1 (столбец (6)), наиболее заметна переменность скорости по положению ядер сильных абсорбций ионов группы железа: диапазон скоростей по этим абсорбциям $V_r = [-52; -71] \text{ км с}^{-1}$. Эта переменность, которую хорошо иллюстрирует фрагмент с профилем N I 7468 на рис. 2, в случае одиночной звезды может быть проявлением пульсаций в глубоких атмосферных слоях, где идет формирование такого типа линий. Пульсационную переменность лучевой скорости по высоковозбужденным линиям нейтрального азота N I с полной амплитудой около 19 км с^{-1} , совпадающей с нашим результатом, ранее нашли авторы [29]. Они же обнаружили вероятные периоды переменности 421 и 315 дней, отмечая постоянную, непрекращающуюся нестабильность профилей. Напомним, что такого типа пульсационная переменность с амплитудой около 10 км с^{-1} по симметричным абсорбциям слабой и

умеренной интенсивности присуща и гипергиганту ρ Cas [9].

Как следует из данных таблицы 1, запрещенные эмиссии [N II] в спектре V509 Cas систематически смещены относительно эмиссий [Fe II], однако это смещение стабильно, поскольку для всех моментов наших наблюдений положение эмиссии [N II] остается в малом интервале скоростей: $V_r(\text{N II f}) = [-68; -69] \text{ км с}^{-1}$. Постоянство во времени этой скорости отмечают и Ламберт и др. [5], принимая среднее значение $V_r(\text{N II f}) = -72 \text{ км с}^{-1}$ за системную скорость. Дополнительное обоснование такого выбора системной скорости следует из совпадения $V_r(\text{N II f})$ со скоростью по эмиссиям молекулы CO, формирующимся в самых внешних слоях протяженной атмосферы гипергиганта: $V_r(\text{CO}) = [-72; -76] \text{ км с}^{-1}$ [5]. Позже вывод о постоянстве лучевой скорости по запрещенным эмиссиям [N II] в оптических спектрах, полученных в ходе долговременного мониторинга, был сделан также Шеффером и Ламбертом: $V_r(\text{N II f}) = -72 \text{ км с}^{-1}$ [29] и $V_r(\text{N II f}) = -69 \text{ км с}^{-1}$ [53].

В качестве возможного источника излучения запрещенных эмиссий [N II] можно рассматривать остаток удаленного от звезды выброса звездного вещества. Ранее де Ягер [54] предлагал подобное объяснение возникновения запрещенных эмиссий [N II] в спектре V509 Cas, указав на формирование этих эмиссий в оболочке, кинетическая температура в которой выше температуры звезды. Надо иметь в виду, что атмосфера звезды, а следовательно, и выброшенное в околосредные окрестности вещество, в значительной степени обогащено азотом, поскольку в атмосфере V509 Cas избыток азота превышает +3.5 dex [48]. По-видимому, столь измененный химический состав атмосферы объясняет отсутствие ожидаемых эмиссий ионов кислорода, относительное содержание которого в атмосфере звезды по крайней мере на два порядка ниже, чем азота [48].

3.4. Многокомпонентный профиль D-линий Na I

Многокомпонентные профили D-линий Na I (см. таблицу 1 и рис. 5а), помимо компонента вблизи системной скорости, содержат также узкую абсорбцию с $V_r \approx -50 \text{ км с}^{-1}$ и плохо разделяемые на наших спектрах насыщенные компоненты в интервале скоростей $V_r \approx [-20; -30] \text{ км с}^{-1}$. Узкая абсорбция $V_r \approx -50 \text{ км с}^{-1}$ формируется в межзвездной среде и соответствует положению V509 Cas далее рукава Персея [55, 56]. Положение околосредных компонентов на рис. 5, где сопоставлены профили D-линий Na I в спектрах

Таблица 3. Остаточные интенсивности r и гелиоцентрические лучевые скорости V_r (км с⁻¹) для отдельных линий в спектре высокого разрешения V509 Cas

Ident.	λ	r	V_r	Ident.	λ	r	V_r	Ident.	λ	r	V_r
Y II(6)	3950.35	0.74	-62	Fe II(32)	4278.15	0.78	-59	Fe II(38)	4522.63	0.32	-58
V II(10)	3951.96	0.66	-58	Ti II(20)	4287.88	0.56	-60	Ti II(82)	4529.49	0.67	-61
Ca II(1)	3968.47	0.03	-86	Ti II(41)	4290.21	0.27	-60	Cr II(39)	4539.62	0.91	-58
		0.01	-55	Ti II(20)	4294.10	0.25	-61	Fe II(38)	4541.52	0.56	-60
		0.02	-17	Fe II(28)	4296.57	0.50	-60	Ti II(60)	4544.02	0.86	-61
H ϵ	3970.07	0.11	-59	Ti II(41)	4300.04	0.19	-58	Ti II(30)	4545.14	0.83	-62
Ti II(11)	3981.99	0.61	-59	Ti II(41)	4307.89	0.30	-61	Cr II(44)	4558.64	0.41	-59
Ti II(11)	3987.61	0.78	-59	Y II(5)	4309.63	0.82	-63	Ti II(50)	4563.76	0.26	-58
Fe II(126)	4012.46	0.33	-65	Ti II(41)	4312.86	0.30	-58	Cr II(39)	4565.77	0.84	-61
Ti II(11)	4025.13	0.46	-62	Ti II(20)	4337.92	0.25	-59	Ti II(82)	4571.97	0.21	-59
Ti II(87)	4028.34	0.43	-61	H γ	4340.47	0.14	-55	Fe II(38)	4576.34	0.56	-60
Fe I(43)	4045.81	0.50	-60	Fe II(27)	4351.77	0.29	-58	Fe II(38)	4583.83	0.27	-58
Cr II(19)	4051.97	0.75	-60	Ti II(104)	4367.66	0.63	-59	Cr II(44)	4588.20	0.47	-60
Ti II(87)	5053.83	0.44	-58	Fe II(28)	4369.40	0.74	-59	Cr II(44)	4592.05	0.69	-59
Fe I(43)	4063.59	0.59	-59	Fe II(27)	4385.38	0.42	-59	V II(56)	4600.19	0.93	-59
Ni II(11)	4067.03	0.70	-60	Y II(5)	4398.02	0.82	-56	Cr II(44)	4616.62	0.72	-59
Fe I(43)	4071.74	0.66	-61	Fe I(41)	4404.75	0.69	-60	Cr II(44)	4618.82	0.55	-61
Sr II(1)	4077.72	0.33	-61	Ti II(51)	4407.68	0.87	-59	Fe II(38)	4620.51	0.68	-60
H δ	4101.74	0.13	-58	Sc II(14)	4420.67	0.96	-61	Fe II(37)	4629.33	0.38	-60
Cr II(18)	4110.99	0.75	-59	Ti II(19)	4443.80	0.24	-59	Cr II(44)	4634.07	0.61	-59
Fe II(22)	4124.78	0.81	-57	Ti II(19)	4450.48	0.41	-60	Fe II(37)	4666.75	0.67	-59
Zr II(41)	4149.20	0.69	-61	Fe II(26)	4461.43	0.81	-61	Ti II(49)	4708.67	0.80	-61
Ti II(21)	4161.52	0.60	-62	Ti II(40)	4464.45	0.56	-60	Fe II(43)	4731.47	0.61	-61
Ti II(105)	4163.64	0.38	-59	Ti II(31)	4468.49	0.23	-58	[Fe II]20F	4774.72	1.03	-64
Ti II(105)	4171.90	0.44	-59	Ti II(40)	4470.85	0.68	-58	Ti II(92)	4779.98	0.66	-60
Fe II(27)	4173.46	0.31	-58	Fe II(37)	4472.92	0.74	-58	Ti II(17)	4798.53	0.86	-59
Fe II(28)	4178.85	0.31	-59	Mg II(4)	4481.22	0.44	-60	Ti II(92)	4805.09	0.54	-60
Sr II(1)	4215.52	0.39	-60	Fe II(37)	4491.40	0.49	-60	Cr II(30)	4812.35	0.84	-60
Fe II(27)	4233.17	0.20	-57	Ti II(31)	4501.27	0.25	-59	[Fe II]20F	4814.53	1.05	-62
Cr II,(31)	4242.37	0.58	-58	Fe II(38)	4508.28	0.37	-59	Cr II(30)	4824.14	0.53	-60
Sc II(7)	4246.83	0.22	-59	Fe II(37)	4515.34	0.41	-59	Cr II(30)	4836.24	0.83	-60
Fe II(28)	4258.15	0.62	-61	Ti II(18)	4518.33	0.82	-58	Cr II(30)	4848.25	0.61	-61
Cr II(31)	4261.92	0.64	-59	Fe II(37)	4520.22	0.41	-58	H β	4861.33	0.21	-67

Таблица 3. (Продолжение)

Ident.	λ	r	V_r	Ident.	λ	r	V_r	Ident.	λ	r	V_r
Ti II(114)	4874.01	0.78	-62	Fe II(49)	5197.58	0.48	-60	Ti II(68)	5490.69	0.96	-62
Cr II(30)	4876.40	0.65	-58	Y II(20)	5200.41	0.92	-63	Fe II(55)	5534.86	0.66	-60
[Fe II]4F	4889.62	1.09	-58	Y II(20)	5205.73	0.86	-61	[Fe II]39F	5551.31	1.02	-61
Fe II(36)	4893.81	0.93	-59	Ti II(70)	5226.55	0.54	-60	Fe I(686)	5615.64	0.94	-64
[Fe II]20F	4905.34	1.03	-61	Fe II(49)	5234.62	0.45	-60	Fe II(57)	5627.49	0.96	-59
Ti II(114)	4911.19	0.71	-60	Cr II(43)	5237.32	0.67	-60	Sc II(29)	5640.98	0.90	-61
Fe II(42)	4923.92	0.21	-56	Sc II(26)	5239.82	0.84	-61	Y II(38)	5662.95	0.88	-64
Ba II(1)	4934.08	0.80	-60	Fe II	5254.93	0.79	-60	Sc II(29)	5667.15	0.93	-62
[Fe II]20F	4947.37	1.02	-63	Fe II(49)	5256.93	0.91	-59	Sc II(29)	5669.03	0.90	-62
[Fe II]20F	4950.74	1.02	-61	Fe II(48)	5264.80	0.74	-59	Sc II(29)	5684.19	0.89	-63
Fe II(36)	4993.35	0.81	-60	[Fe II]18F	5273.35	1.10	-62	Na I(6)	5688.21	0.95	-60
Ti II(71)	5013.69	0.84	-62	Fe II(49)	5276.00	0.42	-58	DIB	5705.20	0.96	-22
Fe II(42)	5018.44	0.49	-88	Fe II(41)	5284.10	0.66	-60	[N II]3F	5754.64	1.08	-67
		0.22	-55	Cr II(24)	5305.86	0.88	-59	DIB	5780.37	0.84	-20
Si II(5)	5041.03	0.86	-62	Cr II(43)	5308.42	0.90	-60	Fe II(164)	5823.15	0.99	-64
Si II(5)	5056.06	0.83	-65	Cr II(43)	5313.58	0.82	-59	Fe II(182)	5835.49	0.99	-62
Ti II(113)	5072.30	0.85	-60	Fe II(48)	5316.66	0.36	-59	DIB	5849.80	0.97	-16
Y II(20)	5087.42	0.88	-63	Fe II(49)	5325.56	0.77	-59	Ba II(2)	5853.68	0.97	-63
Zr II(95)	5112.27	0.94	-59	Fe I(15)	5328.04	0.88	-56	Ca I(47)	5857.46	0.99	-62
Fe II(35)	5120.34	0.94	-59	[Fe II]19F	5333.65	1.04	-61	Na I(1)	5889.95	0.21	-90
Fe II	5123.19	0.95	-61	Cr II(43)	5334.87	0.83	-58			0.09	-62
Ti II(86)	5129.16	0.67	-61	Zr II(115)	5350.09	0.97	-61			0.16	-50
Fe II(35)	5132.67	0.92	-60	Fe II(48)	5362.87	0.57	-61			0.02	-14
Fe II(35)	5146.12	0.89	-62	Fe I(15)	5371.50	0.95	-61	Na I(1)	5895.92	0.36	-90
Ti II(70)	5154.08	0.68	-61	[Fe II]19F	5376.45	1.04	-61			0.11	-62
[Fe II]	5158.78	1.06	-62	Ti II(69)	5381.03	0.80	-60			0.20	-51
Fe II(42)	5169.03	0.45	-88	Cr II(23)	5407.62	0.95	-60			0.03	-14
		0.35	-70	Ti II(69)	5418.78	0.85	-61	Si II(4)	5978.93	0.93	-65
		0.21	-54	Cr II(23)	5420.93	0.93	-64	Fe II(46)	5991.37	0.91	-60
Mg I(2)	5172.69	0.68	-59	Fe II	5425.25	0.80	-61	Fe II(46)	6084.10	0.94	-61
Mg I(2)	5183.61	0.63	-60	Fe I(15)	5429.70	0.96	-60	Fe II(46)	6113.32	0.96	-63
Ti II(86)	5185.91	0.70	-61	Fe I(15)	5455.61	0.96	-58	Ca I(3)	6122.22	0.97	-65
Ti II(70)	5188.69	0.49	-61	Cr II(50)	5478.37	0.88	-63	Ba II(2)	6141.72	0.87	-63

Таблица 3. (Продолжение)

Ident.	λ	r	V_r	Ident.	λ	r	V_r	Ident.	λ	r	V_r
Fe II (74)	6147.74	0.80	-62	Fe II	6442.95	0.97	-65	NI(3)	7468.31	0.70	-51
Ca I (3)	6162.18	0.97	-64	Fe II (74)	6456.38	0.60	-61	Fe II (72)	7479.69	0.94	-53
DIB	6195.96	0.93	-14	Ba II (2)	6496.91	0.64	-56	Fe II (73)	7515.79	0.91	-54
Fe II (162)	6199.19	0.99	-59	[N II] 1F	6548.03	1.12	-68	Fe II (72)	7533.36	0.91	-54
DIB	6203.08	0.94	-17	H α	6562.81	0.52	-96	KI(1)	7698.97	0.86	-61
Fe II (74)	6238.39	0.81	-60			1.27	-22			0.86	-56
Sc II (28)	6245.62	0.92	-61	[N II] 1F	6583.45	1.40	-70			0.75	-11
Fe II (74)	6247.55	0.70	-59	DIB	6613.56	0.89	-16	Fe II (73)	7711.71	0.76	-55
DIB	6283.85	0.81	-22	DIB	6660.64	0.96	-11	DIB	7721.85	0.96	-11
Si II (2)	6347.10	0.60	-59	DIB	6672.15	0.98	-10	O I (1)	7771.94	0.40	-55
Fe II (40)	6369.47	0.93	-60	Ti II (112)	6717.91	0.93	-57	O I (1)	7774.17	0.41	
Si II (2)	6371.36	0.67	-59	SI(8)	6748.79	0.97	-57	O I (1)	7775.39	0.48	-54
DIB	6379.29	0.94	-15	SI(8)	6757.16	0.96	-52	Mg II (8)	7896.37	0.81	-55
Fe I (168)	6393.61	0.99	-65	[Fe II] 14F	7155.14	1.08	-64	H (P20)	8392.40	0.63	-58
Fe I (816)	6400.01	0.99	-66	[Ca II] 1F	7291.46	1.24		H (P19)	8413.32	0.65	-57
Fe I (816)	6411.65	0.97	-57	[Fe II] 14F	7388.16	1.03	-63	H (P18)	8437.96	0.64	-55
Fe II (74)	6416.93	0.84	-59	Mn II (4)	7415.78	0.88	-52	O I (4)	8446.38	0.39	-52
Ca I (18)	6439.08	0.98	-65	Fe II (73)	7462.39	0.80	-54	H (P17)	8467.26	0.58	-53

V509 Cas и ρ Cas [9], имеющих близкие галактические координаты, хорошо согласуются. Межзвездная деталь $V_r = -13$ км с⁻¹ зарегистрирована и в спектре переменной V354 Lac [57], галактические координаты которой близки к таковым для V509 Cas и ρ Cas.

Структура межзвездных линий в спектре V509 Cas хорошо согласуется с ее большой удаленностью, а также с ее предельно высокой светимостью $M_V \approx -9^m$. Оценку светимости мы получили на основе эквивалентной ширины $W(\text{OI}7774) = 2.35$ Å триплета OI7774 Å в спектре звезды с применением калибровок [14, 58]. Для сравнения отметим, что в спектре гипергиганта V1302 Aql с его экстремальной светимостью вблизи предела Хэмфрис–Дэвидсона [59, 60], эквивалентная ширина триплета кислорода имеет максимальное значение $W_\lambda(\text{OI}7774) = 2.8$ Å [14].

Положение компонента NaI со скоростью $V_r = [-62; -63]$ км с⁻¹ на рис. 5 близко к эмиссиям и крыльям абсорбций, что указывает на формирование этого компонента в атмосфере звезды.

Положение самой коротковолновой депрессии на профилях линий Na I D совпадает с коротковолновой компонентой профилей Fe II (42): -89 км с⁻¹ на рис. 2. Это совпадение указывает на формирование самого коротковолнового компонента в наиболее удаленных слоях атмосферы, близких к околозвездной оболочке. Широкий длинноволновый компонент линий Na I D в интервале скоростей $V_r \approx [-20; -30]$ км с⁻¹ включает несколько неразрешаемых (при $R = 60\,000$) межзвездных деталей. Положение одной из них совпадает с надежно измеренным в спектре положением V509 Cas диффузных межзвездных полос (DIBs): порядка -14 км с⁻¹. Детали профиля KI 7699 Å, также представленного на рис. 5, в основном соответствуют таковым у D-линий Na I, однако на этом профиле лучше выделяются межзвездные линии $V_r \approx -14$ и -23 км с⁻¹, формирующиеся в Местном рукаве. Все эти детали межзвездного и околозвездного происхождения просматриваются и в ядре линии Ca II 3968 Å на рис. 5б.

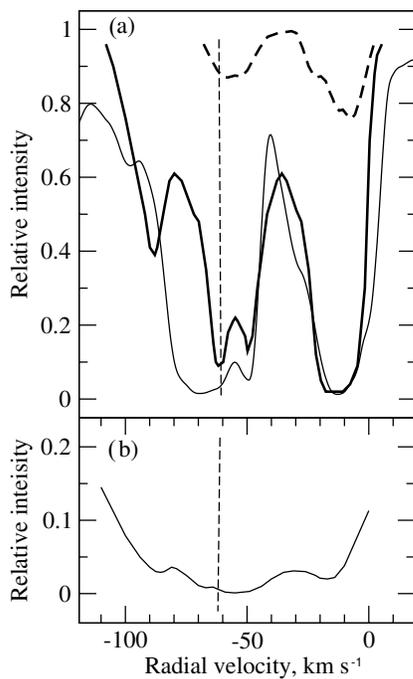


Рис. 5. Профили избранных деталей: (а) — D-линии Na I 5896 Å в спектре V509 Cas — жирная линия, в спектре ρ Cas — тонкая. Штриховой линией нанесен профиль KI 7699 Å в спектре V509 Cas; (б) — ядро линии Ca II 3968 Å в спектре V509 Cas. Вертикальной штриховой линией указано принятое значение системной скорости $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$ для V509 Cas.

4. ВЫВОДЫ

На основе данных спектрального мониторинга желтого гипергиганта V509 Cas, выполненного в 1996–2018 гг. на 6-м телескопе со спектральным разрешением $R \geq 60\,000$, детально изучено кинематическое состояние на различных уровнях протяженной атмосферы.

Признаки двойственности звезды не обнаружены. Близость скорости по разрешенным и запрещенным эмиссиям ионов металлов, а также их строгое постоянство во времени привели к выбору системной скорости гипергиганта: $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$.

Для всех моментов наших наблюдений положение запрещенных эмиссий [N II], формирующихся в околозвездной среде, соответствует скорости $V_r(\text{N II f}) = [-68; -69] \text{ км с}^{-1}$. Таким образом, эмиссии [N II] систематически смещены на -6 км с^{-1} относительно эмиссий ионов металлов. Сделан вывод об изменении после наблюдений в 1996 г. полуширин и интенсивностей эмиссий [N II] (линии стали уже и интенсивнее), а в последующие 22 года наблюдений эти параметры не изменялись.

Скорости по ядрам ветровых абсорбций Fe II (42) постоянны в интервале: $V_r = [-84; -87] \text{ км с}^{-1}$,

что свидетельствует о стабильности самых верхних слоев атмосферы.

В целом сделан вывод о стабильности атмосферы гипергиганта, исключая самые близкие к фотосфере слои. Переменность скорости в диапазоне $V_r = [-52; -71] \text{ км с}^{-1}$, выявленная по положениям ядер сильных абсорбций ионов группы железа, может быть проявлением пульсаций в глубоких атмосферных слоях, где идет формирование этого типа линий.

БЛАГОДАРНОСТИ

В.Г.К. благодарит за частичную финансовую поддержку Российский научный фонд (проект 14-50-00043). Е.Л.Ч. и В.Е.П. благодарят за частичную поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (проекты 16-02-00587а и 18-02-00029а). В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD, SAO/NASA ADS, AAVSO и VALD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. M. Humphreys, *Astrophys. J. Suppl.* **38**, 309 (1978).
2. C. de Jager, *Astron. Astrophys. Rev.* **8**, 145 (1998).
3. H. Nieuwenhuijzen, C. De Jager, I. Kolka, et al., *Astron. and Astrophys.* **546**, A105 (2012).
4. W. P. Bidelman and A. McKellar, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **69**, 31 (1957).
5. D. L. Lambert, K. H. Hinkle, and D. N. B. Hall, *Astrophys. J.* **248**, 638 (1981).
6. A. Lobel, G. Israelian, C. de Jager, et al., *Astron. and Astrophys.* **330**, 659 (1998).
7. N. Gorlova, A. Lobel, A. J. Burgasser, et al., *Astrophys. J.* **651**, 1130 (2006).
8. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavalzhanskaya, and I. A. Usenko, *Astronomy Reports* **58**, 101 (2014).
9. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavalzhanskaya, *Astronomy Reports* **62**, 623 (2018).
10. A. Aret, M. Kraus, I. Kolka, and G. Maravelias, *ASP Conf. Ser.* **508**, 357 (2017). 357.
11. P. T. Giguere, N. J. Woolf, and J. C. Webber, *Astrophys. J. Lett.* **207**, L195 (1976).
12. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292**, 19 (1997).
13. R. D. Oudmaijer, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 541 (1998).
14. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **46**, 139 (2002).
15. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroshnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 4183 (2016).
16. B. E. Reddy and B. J. Hrivnak, *Astron. J.* **117**, 1834 (1999).

17. R. D. Oudmaijer, B. Davies, W.-J. de Wit, and M. Patel, *ASP Conf. Ser.* **412**, 17 (2009).
18. T. Şahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 4071 (2016).
19. D. L. Lambert and R. E. Luck, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **184**, 405 (1978).
20. W. L. W. Sargent, *Observatory* **85**, 33 (1965).
21. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, G. A. Galazutdinov, et al., *Astronomy Letters* **19**, 431 (1993).
22. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, Preprint № 179, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 2003).
23. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61**, 820 (2017).
24. M. V. Yushkin and V. G. Klochkova, Preprint № 206, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 2005).
25. V. G. Klochkova, S. V. Ermakov, and V. E. Panchuk, Preprint № 157, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 2001).
26. G. A. Galazutdinov, Preprint № 92, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 1992).
27. R. M. Humphreys, K. Davidson, and N. Smith, *Astron. J.* **124**, 1026 (2002).
28. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and N. S. Tavolganskaya, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 25 (1999).
29. Y. Sheffer and D. L. Lambert, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 1277 (1987).
30. G. Israelian, A. Lobel, and M. R. Schmidt, *Astrophys. J. Lett.* **523**, L145 (1999).
31. R. B. Stothers, *Astrophys. J.* **751**, 151 (2012).
32. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and A. S. Miroshnichenko, *Astrophysical Bulletin* **65**, 150 (2010).
33. C. S. Beals, *Publ. Dominion Astrophys. Obs. Victoria* **9**, 1 (1953).
34. A. Aret, M. Kraus, and M. Šlechta, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 1424 (2016).
35. V. F. Polcaro, C. Rossi, R. F. Viotti, et al., *Astron. J.* **141**, 18 (2011).
36. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, K. S. Bjorkman, and V. E. Panchuk, *Astron. and Astrophys.* **390**, 627 (2002).
37. E. A. Barsukova, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, et al., *Astronomy Reports* **50**, 664 (2006).
38. M. Parthasarathy, G. Gauba, T. Fujii, and Y. Nakada, *Astrophys. Space Sci. Library* **265**, 29 (2001).
39. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, et al., *Astronomy Letters* **27**, 719 (2001).
40. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Astronomy Letters* **32**, 661 (2006).
41. G. Sarkar, D. A. García-Hernández, M. Parthasarathy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421**, 679 (2012).
42. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 439 (2014).
43. A. Lobel, C. Martayan, A. Mehner, and J. H. Groh, *ASP Conf. Ser.* **508**, 245 (2017).
44. G. H. Herbig, *Contr. Lick Obs.* **276** (1969).
45. T. S. Belyakina, N. I. Bondar, D. Chochol, et al., *Astron. and Astrophys.* **223**, 119 (1989).
46. M. Kato, J. Mikołajewska, and I. Hachisu, *Astrophys. J.* **750**, 5 (2012).
47. R. L. M. Corradi, J. Mikołajewska, and T. J. Mahoney, eds., *ASP Conf. Ser.* **303**, (2003).
48. R. E. Luck, *Astrophys. J.* **202**, 743 (1975).
49. N. Kameswara Rao, D. L. Lambert, M. T. Adams, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **310**, 717 (1999).
50. N. Kameswara Rao and D. L. Lambert, *ArXiv e-prints* (2011).
51. D. E. Osterbrock, *Sky Telesc.* **78**, 491 (1989).
52. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472**, 3887 (2017).
53. Y. Sheffer and D. L. Lambert, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **104**, 1054 (1992).
54. C. de Jager, *The Brightest Stars* (Mir, Moskva, 1984) [in Russian].
55. Y. P. Georgelin and Y. M. Georgelin, *Astron. and Astrophys.* **6**, 349 (1970).
56. J. P. Vallée, *Astron. J.* **135**, 1301 (2008).
57. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **35**, 457 (2009).
58. A. Arellano Ferro, S. Giridhar, and E. Rojo Arellano, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **39**, 3 (2003).
59. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.* **232**, 409 (1979).
60. T. J. Jones, R. M. Humphreys, R. D. Gehrz, et al., *Astrophys. J.* **411**, 323 (1993).

On Extended Atmosphere of V509 Cas Hypergiant in 1996–2018**V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk**

Based on the data of spectral monitoring of the yellow hypergiant V509 Cas performed in 1996–2018 at the 6-m telescope with the spectral resolution of $R \geq 60\,000$, we studied in detail its kinematic state at various levels of extended atmosphere. No signs of presence of a companion were found. An agreement of radial velocities measured on the permitted and forbidden emissions of metal ions, as well as their strict temporal stability led to the choice of the systemic velocity of the star $V_{\text{sys}} = -63 \text{ km s}^{-1}$. The position of forbidden [N II] emissions forming in the circumstellar medium is strictly stable and is systematically shifted by -6 km s^{-1} relative to the metal ion emissions. A conclusion on the variation of the [N II] emission halfwidths and intensities (the lines have become narrower and more intense) is made after the observations in 1996 and over the next 22 years of observations, these parameters did not vary. The velocities measured from the shortwave Fe II (42) absorption components are located in a narrow interval of $V_r = [-84; -87] \text{ km s}^{-1}$, which indicates the stability of expansion of the upper layers of the atmosphere. The overall atmosphere of the hypergiant is stable, excluding the layers close to the photosphere. The velocity variability in range of $V_r = [-52; -71] \text{ km s}^{-1}$, identified by the positions of strong metal ion absorption cores may be a manifestation of pulsations in deep atmospheric layers, where this type of lines are formed.

Keywords: *stars: massive—stars: evolution—stars: atmospheres*