

УДК 524.316.7.022

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ АТМОСФЕРЫ κ CAS. I. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ФОТОСФЕРНЫХ И ВЕТРОВЫХ ЛИНИЙ HE I

© 2017 А. Х. Рзаев^{1,2*}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Шамахинская астрофизическая обсерватория, п. Ю. Мамедалиева, 373243 Азербайджан

Поступила в редакцию 28 ноября 2016 года; принята в печать 17 января 2017 года

По эшелле CCD-спектрам исследованы изменения со временем лучевых скоростей и профилей линий в спектре сверхгиганта κ Cas. Переменность лучевых скоростей и профилей фотосферных линий Si III, O II, He I, H₁₀–H δ и ветровых линий He I λ 5875, 6678 Å в основном обусловлена нерадиальными пульсациями. При сопоставлении профилей наблюдаются квазисинусоидальные волны. Найлены квазипериодические изменения лучевой скорости фотосферных линий. Ветровые линии He I λ 5875, 6678 Å по картине переменности лучевой скорости со временем отличаются друг от друга и от фотосферных линий. Определены гамма-скорости и амплитуды переменности лучевой скорости. Амплитуда переменности и скорость расширения увеличиваются от нижних слоев к верхним слоям атмосферы. На профили линий накладываются эмиссионные компоненты соответственно на позициях около -135 ± 10.0 , -20 ± 20 и 135 ± 10.0 км с⁻¹. Они наиболее заметны на профилях ветровых линий, но следы эмиссий есть и на фотосферных линиях. Такой характер переменности всех линий в спектре κ Cas свидетельствует о том, что она является Ве-звездой.

Ключевые слова: сверхгиганты — звезды: индивидуальные: κ Cas

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования нестационарности атмосфер сверхгигантов α Cyg A2.5Ia [1, 2] и 55 Cyg B2.5Ia [3] показали, что традиционный метод изучения изменений со временем лучевой скорости (измеряемой по бисектору абсорбции) приемлем в случае фотосферных линий, когда наблюдается радиальная пульсация. При этом параметры и картина изменения лучевой скорости одинаковы для обеих половин профиля абсорбции, и бисектор отражает переменность линии в целом. В случае ветровых линий, когда переменность вызвана нерадиальными пульсациями, картины и параметры изменения лучевой скорости для синей и красной половин профиля различаются и каждая должна рассматриваться отдельно [2]. Было показано, что эти различия связаны с вращением звезды и ее запятанной структурой, где проявляют себя слабые локальные магнитные поля [4]. Необходимо исследовать аналогичным образом как сверхгиганты, так и звезды с магнитными полями. Возможно, таким способом удастся обнаружить признаки существования на поверхности сверхгигантов слабых локальных магнитных полей.

κ Cas (BC0.7 Ia) \equiv HD 2905 — яркий ($V = 4^m 16$) бело-голубой сверхгигант, входящий в ассоциацию Cas OB14 [5]. Несмотря на большую яркость, κ Cas спектроскопически изучена очень мало. Исследования [6–8] были выполнены фотографическим методом и носят информативный характер. В работах [9, 10] были определены $v \sin i$, а в работах [5, 11] — эволюционные параметры звезды. Фотометрическая переменность исследовалась по данным HIPPARCOS [12, 13]. Переменность лучевых скоростей и профилей линий со временем ранее не изучалась.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

Спектральные наблюдения κ Cas проводились на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол с 31 августа по 7 октября 1999 г. (JD 2451422–2451458, далее JD₀ + 22...58, где JD₀ = 2451400). Было получено 29 кудэ-эшелле спектров с разрешением $R = 45\,000$ и отношением сигнал/шум $80 \leq S/N \leq 600$, охватывающих спектральный диапазон λ 3600–11 000 Å; из них 25 — за одиннадцать последовательных юлианских дат (JD₀ + 48...58). В даты JD₀ + 22, 23, 48, 49 и 50

*E-mail: abid@sao.ru

Данные о спектрах и гелиоцентрические лучевые скорости для отдельных линий и групп

JD 2451400+	t_{exp} , min	S/N min...max	Лучевые скорости линий и групп линий, км с ⁻¹						
			O II	Si III	H ₁₀ -H δ	He I (strong)	He I (weak)	He I 6678	He I 5875
22.47	30	250...500	1.6 ± 0.6	0.3 ± 1.1	-6.4 ± 1.0	-7.0 ± 0.2	-0.9 ± 0.8	-9.6 ± 0.5	-20.9 ± 0.6
23.27	15	200...400	-2.7 ± 0.3	-3.8 ± 1.3	-2.5 ± 0.9	-6.1 ± 0.7	-2.5 ± 1.0	-5.0 ± 0.7	-22.0 ± 0.8
48.46	60	150...400	-3.3 ± 0.6	-3.0 ± 0.7	-3.1 ± 0.8	-5.3 ± 0.8	-5.3 ± 0.9	-6.1 ± 0.8	-12.9 ± 0.9
49.35	45	200...400	1.3 ± 0.5	1.3 ± 0.9	-3.5 ± 0.7	-4.8 ± 0.8	-1.5 ± 0.7	-5.0 ± 0.7	-11.9 ± 0.8
50.40	30	300...600	-3.2 ± 0.7	-4.0 ± 0.7	-10.6 ± 0.6	-11.2 ± 0.7	-7.8 ± 1.1	-8.2 ± 0.5	-19.0 ± 0.5
52.38	20	250...500	2.0 ± 0.6	2.6 ± 0.9	-4.8 ± 0.6	-4.6 ± 0.2	0.9 ± 1.2	-2.8 ± 0.6	-11.8 ± 1.2
52.50	10	120...250	2.0 ± 0.5	1.5 ± 1.0	-4.6 ± 0.8	-4.5 ± 0.2	-0.5 ± 1.0	-1.6 ± 1.2	-10.1 ± 1.1
52.55	10	120...250	2.8 ± 0.8	3.5 ± 0.8	-3.7 ± 0.8	-3.2 ± 0.3	1.2 ± 0.9	-1.5 ± 1.1	-8.0 ± 1.1
52.59	10	120...250	3.5 ± 0.9	3.2 ± 1.2	-2.6 ± 0.9	-2.5 ± 0.4	0.9 ± 1.1	-1.2 ± 1.0	-6.9 ± 1.2
53.42	5	100...200	5.1 ± 1.2	5.8 ± 0.9	2.3 ± 1.0	0.9 ± 0.9	0.6 ± 0.7	3.6 ± 1.1	-1.5 ± 1.5
53.48	10	120...250	4.8 ± 0.7	6.0 ± 0.6	2.6 ± 0.9	1.4 ± 0.7	1.8 ± 1.0	3.1 ± 1.2	-1.8 ± 1.4
54.32	5	100...200	2.2 ± 0.8	4.1 ± 0.7	2.8 ± 1.1	1.8 ± 0.1	3.3 ± 0.9	5.7 ± 1.4	-1.9 ± 1.6
54.38	5	100...200	2.9 ± 0.9	4.7 ± 1.3	3.0 ± 0.9	0.3 ± 0.3	2.7 ± 0.5	4.9 ± 1.5	-0.8 ± 1.8
54.54	5	100...200	2.0 ± 1.4	3.3 ± 1.5	1.5 ± 1.3	-0.8 ± 1.0	2.7 ± 0.5	3.5 ± 1.7	-1.8 ± 1.7
54.57	5	80...200	1.1 ± 1.1	2.6 ± 0.2	1.3 ± 0.9	-1.1 ± 1.1	2.6 ± 0.9	4.4 ± 1.9	-1.5 ± 1.9
55.35	5	80...200	-3.0 ± 0.8	-2.1 ± 1.0	-4.0 ± 1.0	-6.1 ± 0.8	-3.0 ± 1.0	-2.2 ± 2.0	-11.1 ± 2.0
55.52	5	100...200	-3.5 ± 0.9	-4.0 ± 0.8	-5.5 ± 0.9	-8.0 ± 0.9	-5.9 ± 0.8	-6.0 ± 1.5	-15.0 ± 1.8
57.33	5	100...200	4.2 ± 0.7	4.8 ± 1.1	2.3 ± 1.1	1.4 ± 0.9	4.6 ± 1.1	6.0 ± 1.2	-2.1 ± 1.5
57.40	5	100...200	4.2 ± 0.8	4.3 ± 1.1	3.2 ± 0.8	1.7 ± 1.1	4.2 ± 1.1	4.5 ± 1.4	-3.0 ± 1.2
58.29	10	80...150	4.6 ± 1.0	6.1 ± 1.4	3.9 ± 0.8	0.9 ± 1.1	3.5 ± 1.3	2.7 ± 1.4	-1.5 ± 1.4
58.37	10	80...150	5.5 ± 1.2	6.0 ± 0.6	2.3 ± 0.7	1.2 ± 0.7	4.9 ± 1.2	3.9 ± 1.6	-3.0 ± 1.5
58.40	5	80...150	5.0 ± 1.4	7.0 ± 1.0	3.4 ± 0.7	1.4 ± 0.8	6.2 ± 0.9	4.5 ± 1.4	-2.2 ± 1.6
58.50	7.5	120...200	5.0 ± 0.9	6.2 ± 0.9	3.5 ± 1.3	1.6 ± 0.6	8.0 ± 1.4	5.9 ± 1.6	0.4 ± 1.5
58.59	5	80...150	4.7 ± 1.5	5.2 ± 1.5	3.0 ± 1.1	1.3 ± 1.1	8.7 ± 1.2	6.5 ± 1.6	1.8 ± 1.8

длительность экспозиций соответственно составляла 30, 15, 60, 45 и 30 минут. Было накоплено по два спектра, которые были усреднены для каждой ночи. Для исследования быстрой переменности профилей и лучевых скоростей линий со временем в течение трех ночей JD₀ + 52, 54 и 58 было снято по 4, 4 и 5 спектров соответственно. Время экспозиции t_{exp} для них составляло 5–10 минут с интервалом между экспозициями $0^{\text{h}}5 \leq \Delta T \leq 20^{\text{h}}$. В течение ночей JD₀ + 53, 55 и 57 было получено по два спектра с $t_{\text{exp}} = 5$ мин и $1^{\text{h}}0 \leq \Delta T \leq 4^{\text{h}}$. Данные об анализируемых спектрах — юлианская дата, длительность экспозиций, минимальное и максимальное значения отношения сигнал/шум — приведены в таблице.

Обработка эшелле изображений выполнена стандартным методом с использованием системы ESO MIDAS. Измерение позиционных и спектрофотометрических параметров линий осуществлено с пакетом программ DECH20¹. Ошибки измерений спектрофотометрических параметров контролировались по межзвездным (IS) линиям и диффузным межзвездным полосам (DIBs). Среднее значение и среднеквадратическое отклонение от среднего для межзвездной линии NaI $\lambda 5895$ Å составили $W_{\lambda} = 0.501 \pm 0.005$ Å, $r_0 = 0.028 \pm 0.002$, а для DIB $\lambda 5780$ Å — $W_{\lambda} = 0.287 \pm 0.01$ Å, $r_0 = 0.867 \pm 0.003$. Для калибровки шкалы длин

¹<http://www.gazinur.com>

волн мы получали спектр Луны. Нуль-пункт шкалы лучевой скорости устанавливался по теллурическим линиям H_2O и O_2 . По 60 теллурическим линиям ошибки измерений не превышали $|0.1| \pm 0.1 \text{ км с}^{-1}$. Систематические ошибки измерения лучевой скорости звездных линий контролировались также по IS-линиям и DIB. Среднеквадратическое отклонение от среднего для Na I $\lambda 5895 \text{ \AA}$ и DIB $\lambda 5780 \text{ \AA}$ составляло -16.1 ± 0.4 и $-7.2 \pm 0.6 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. Ошибки измерений для групп и одиночных звездных линий He I $\lambda 5875$, 6678 \AA приведены в таблице.

3. ПЕРЕМЕННОСТЬ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ И ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

На наших спектрах $\kappa \text{ Cas}$ в вышеуказанном спектральном диапазоне наблюдается около 300 линий. У большинства из них, не считая линий He I и водорода, интенсивности слабые, а отношение S/N сильно различается для разных областей спектров (см. таблицу). Поэтому для достоверности результатов рассматривались линии в той области спектра, где $S/N \geq 150$, с центральной глубиной $R_0 = 1 - r_0 \geq 0.15$. Таким образом, для исследования переменности были выбраны линии водорода от H_{10} до $\text{H}\delta$, двенадцать линий He I, из них две ветровые линии He I $\lambda 5875$, 6678 \AA , четыре, обозначенные как «сильные» ($R_0 = 1 - r_0 \geq 0.27$), линии He I $\lambda 3819$, 4026 , 4471 , 4921 \AA , остальные, обозначенные как «слабые» ($0.15 \leq R_0 \leq 0.25$), линии He I $\lambda 3964$, 4143 , 4387 , 4713 , 5015 и 7065 \AA , по четыре линии O II ($\lambda 4319$, 4349 , 4360 , 4661 \AA) и Si III ($\lambda 4552$, 4567 , 4574 , 5739 \AA). Отобранные группы линий представлены в таблице.

3.1. Переменность профилей линий

Мы не обнаружили быструю переменность спектрофотометрических характеристик линий со временем ($P < 1^{\text{д}}$), поэтому усредняли профили, полученные в течение одной ночи. Примеры профилей для линий Si III $\lambda 4552 \text{ \AA}$, He I $\lambda 4471$, 6678 и 5875 \AA приведены на рис. 1. Видно, что в течение 36 суток меняются и позиционные, и спектрофотометрические параметры. Сопоставление профилей показало, что наблюдаемое изменение спектральных особенностей — максимально синие и красносмещенные профили, максимальные и минимальные величины центральной остаточной интенсивности абсорбции, усиление и уменьшение интенсивности (или следа) эмиссии на красном крыле линий и т.д. — для всех линий, указанных в таблице, происходит одинаково.

Для исследования стратификации лучевой скорости в атмосфере нами были рассчитаны росселандовские глубины формирования линий в атмосфере $\kappa \text{ Cas}$. На уровне фотосферы было принято $\lg \tau_\lambda = 0$. Для слоев атмосферы этот параметр принимает отрицательные значения, и к верхним слоям его абсолютная величина увеличивается. Для всех исследуемых линий этот параметр определялся на уровне половины их интенсивности. По полученным величинам $\lg \tau_\lambda$ мы условно разделили линии на три категории: фотосферные линии (слабые линии He I, линии O II и Si III), сильные фотосферные линии (сильные линии He I и линии от H_{10} до $\text{H}\delta$) и ветровые линии (He I $\lambda 6678$ и 5875 \AA), соответственно формирующиеся в «нижних», «промежуточных» и «верхних» слоях атмосферы. Для этих трех категорий среднее значение $\lg \tau_\lambda$ составляло около -0.03 , -0.06 и -0.15 соответственно. На рис. 1 видно, что при переходе от фотосферных к ветровым амплитуда переменности интенсивности линий увеличивается.

Как показала наша практика, для выявления особенностей переменности необходимо сопоставление профилей линий, полученных в последовательные ночи. На рис. 2 (a, b, c) для примера приведены линии Si III $\lambda 4552$, He I $\lambda 4471$ и 5875 \AA . Для наглядности профили объединены в четыре группы, и в каждую следующую группу включен последний по дате профиль из предыдущей группы. Числа справа от профилей — даты получения спектров (две последние целые цифры JD в таблице). Для выявления полноты картины переменности из каждого профиля вычтен предыдущий (по дате) полученный профиль. Разности Δr профилей представлены на рис. 2 (d, e, f). Как и на верхней панели, числами указаны даты сопоставленных профилей. Картина и тренд переменности одинаковы для всех трех представленных на рисунке линий, поэтому для анализа выбрана линия He I $\lambda 5875 \text{ \AA}$, где эти изменения наиболее очевидны.

Согласно нашим исследованиям, переменность профилей вызвана появлением и «исчезновением» эмиссий, накладывающихся на линии в трех позициях: около -135 ± 10.0 , -20 ± 20 и $135 \pm 10.0 \text{ км с}^{-1}$ — соответственно синесмещенная, центральная и красносмещенная эмиссии (рис. 2c, 2f).

Из сопоставления максимально синесмещенных профилей, полученных на $\text{JD}_0 + 22$ и 23 (представленных в таблице, но не включенных в рис. 2), следует, что на центральную часть абсорбции накладывается эмиссия на позиции -20 км с^{-1} протяженностью $-80 \dots 40 \text{ км с}^{-1}$. На синем крыле изменений нет, а на красном крыле наблюдается уменьшение интенсивности красносмещенной эмиссии на позиции около $135 \pm 10.0 \text{ км с}^{-1}$. Из

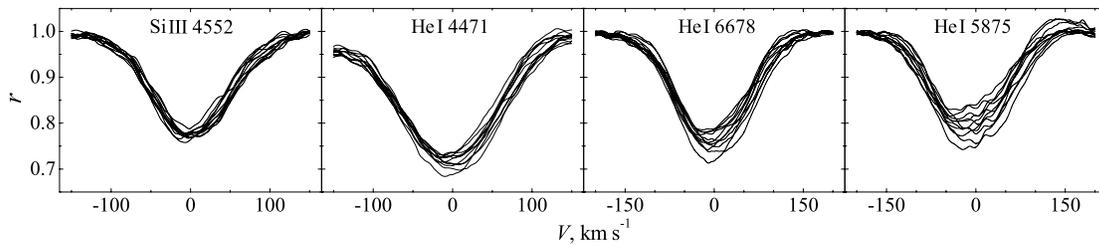


Рис. 1. Вариации профилей линий в спектре κ Cas за время наших наблюдений. Профили, полученные в течение одной ночи, усреднены

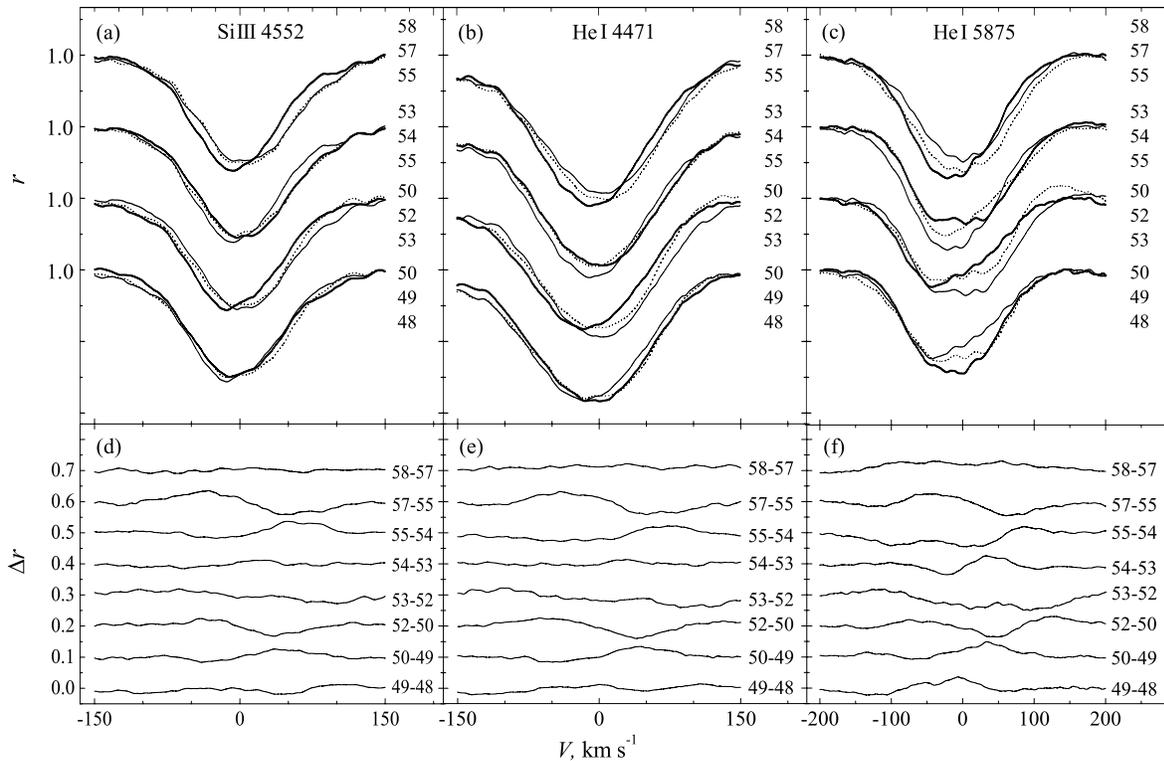


Рис. 2. Вверху: сопоставление профилей указанных линий. Двухзначные числа соответствуют двум последним целым цифрам времени получения спектров $JD_0 + XX$ (см. таблицу). Внизу: разницы профилей, полученных в соседние ночи. Пары чисел указывают даты профилей в принятых обозначениях. Подробности см. в тексте.

сравнения профилей линии $JD_0 + 48$ и $JD_0 + 49$ на рис. 2с также видно, что на центральную часть линии накладывается эмиссия на позиции -20 km s^{-1} , с протяженностью от -80 до 40 km s^{-1} (рис. 2f). На красном крыле линии переменность не наблюдается. Синее же крыло становится более пологим за счет уменьшения интенсивности синесмещенной эмиссии на позиции $-135 \pm 10.0 \text{ km s}^{-1}$. Далее до $JD_0 + 52$ интенсивность центральной эмиссии увеличивается, наблюдается ее незначительное распространение в сторону красного крыла, а на крыльях изменений нет. В ночь $JD_0 + 52$ наблюдается уменьшение интенсивности центральной эмиссии, на синем крыле существенных изменений нет, а на красном крыле появляется красносмещенная

эмиссия на позиции около $135 \pm 10.0 \text{ km s}^{-1}$. В следующую ночь, $JD_0 + 53$, эмиссия на красном крыле почти не заметна, интенсивность центральной эмиссии продолжает уменьшаться, а на синем крыле появляется синесмещенная эмиссия на позиции $-135 \pm 10.0 \text{ km s}^{-1}$. Далее уменьшение интенсивности центральной эмиссии и увеличение интенсивности абсорбции продолжается до $JD_0 + 55$. В крыльях существенные изменения не наблюдаются. В ночь $JD_0 + 55$ зафиксирована самая интенсивная абсорбция. Далее до $JD_0 + 58$ опять наблюдается усиление интенсивности центральной эмиссии. На дату $JD_0 + 57$ зафиксирована самая широкая линия, т.е. на крыльях следы эмиссии почти «исчезли», однако интенсивность абсорбции

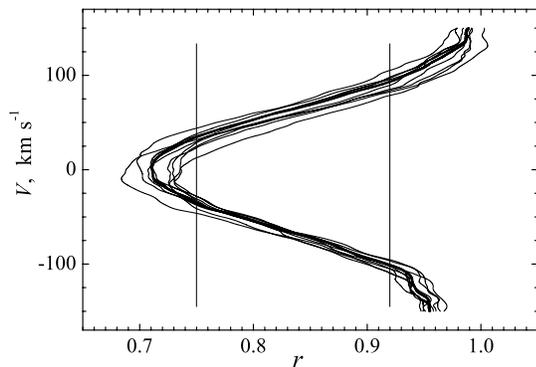


Рис. 3. Профили линии He I $\lambda 4471 \text{ \AA}$ на (V, r) -плоскости. Жирной линией выделен средний профиль. Вертикальными линиями отмечен диапазон интенсивности r , где исследовалась переменность синей и красной половин профиля абсорбции относительно их среднего (см. рис. 4).

меньше, чем на $\text{JD}_0 + 55$. В ночь $\text{JD}_0 + 58$ видно, что наблюдается суперпозиция широкой эмиссии на профиль, полученный $\text{JD}_0 + 57$ (рис. 2f).

В работах [1, 3] было отмечено, что для выявления картины переменности профилей линий относительно их среднего более эффективным и информативным мы считаем метод, когда эти переменности исследуются не на (r, V) -плоскости (как на рис. 2), а на (V, r) -плоскости (рис. 3). В первом случае величина переменности Δr составляет несколько процентов (от 1 до 5%) от уровня непрерывного спектра (100%). Во втором случае величина переменности лучевой скорости ΔV проявляется более заметно. Кроме этого, можно изучать переменность лучевой скорости на разных уровнях остаточной интенсивности линии. Когда мы разделяем профиль по бисектору на две части, переменность синей и красной половин профиля абсорбции относительно их среднего исследуется отдельно. На рис. 3 средний профиль отмечен жирной линией, а вертикальными линиями выделен диапазон остаточной интенсивности линии r , где исследовались данные переменности. С этой целью на указанном промежутке r для отдельных профилей и для среднего профиля определялись значения лучевой скорости с шагом $\Delta r = 0.01$. На рис. 4 на примере линий Si III $\lambda 4552 \text{ \AA}$, He I $\lambda 4471$ и 5875 \AA эти виды переменности представлены для выбранных дат наблюдений, когда получены профили, которые без дополнительных смещений друг на друга не накладываются. Для других линий картины переменности такие же. На левой панели рис. 4 (а, с, е) они показаны для синей, а на правой панели (рис. 4b, 4d, 4f) — для красной половин профиля абсорбции. Символами одного вида отображены вариации профилей, полученных

в течение одной даты. Для наглядности масштабы вертикальных осей для синей и красной половин абсорбции взяты одинаковыми. Горизонтальные оси на левых панелях рис. 4 специально размечены в обратном порядке, чтобы синяя половина выглядела в привычном нам виде, т.е. как в случае профиля, записанного в (r, V) -плоскости.

На рис. 4 видно, что в изменениях разности профилей линий ΔV относительно нуля-пункта (т.е. среднего профиля) есть в том числе и переменность квазисинусоидального характера. И для синей, и для красной половин профиля абсорбции величина сдвига относительно нуля-пункта различается для областей крыла и ядра линии, среднее значение этих сдвигов также разное для синей и красной половин. Как было отмечено в работах [1, 3], такие переменности обусловлены нерадиальными пульсациями.

3.2. Переменность лучевой скорости

Рисунок 4 демонстрирует, что для обеих половин профиля абсорбции амплитуда переменности лучевой скорости различается для разных уровней остаточной интенсивности линии. Отметим, что подобную картину мы получали для ветровых линий в спектре α Cyg и для всех линий в спектре горячей звезды HD 93521 O9.5V, где переменность обусловлена нерадиальными пульсациями [1, 14]. Возникает вопрос, на каком уровне интенсивности r (например, на рис. 4) необходимо исследовать изменения лучевой скорости со временем, чтобы получить картину переменности с наименьшими искажениями в тех случаях, когда также меняется и интенсивность линии? Наши измерения показали, что необходимо исследовать изменения лучевой скорости линий на уровнях r , где амплитуда переменности лучевой скорости на (V, r) -плоскости минимальна. Для этого на рис. 5 на примере линий Si III $\lambda 4552 \text{ \AA}$, He I $\lambda 4471$ и 5875 \AA построены картины переменности синей половины профиля абсорбции относительно среднего для всех дат наблюдений. Профили, полученные в течение одной ночи, усреднены. Для красной половины профиля абсорбции картина аналогичная. Для линий Si III $\lambda 4552 \text{ \AA}$, He I $\lambda 4471$ и 5875 \AA минимальные значения амплитуды соответственно наблюдаются на уровнях интенсивности 0.89–0.9, 0.83–0.84 и 0.89–0.9 (рис. 5). Для других линий Si III, сильных He I и ветровой линии He I $\lambda 6678 \text{ \AA}$ эти уровни оказались такими же. Подобным образом было определено, что для фотосферных линий O II, слабых линий He I и водородных линий H₁₀–H_δ эти уровни соответствуют величинам интенсивности 0.92–0.93, 0.89–0.90 и 0.79–0.8. Определение лучевой скорости для разных линий на вышеперечисленных уровнях выполнялось простым способом.

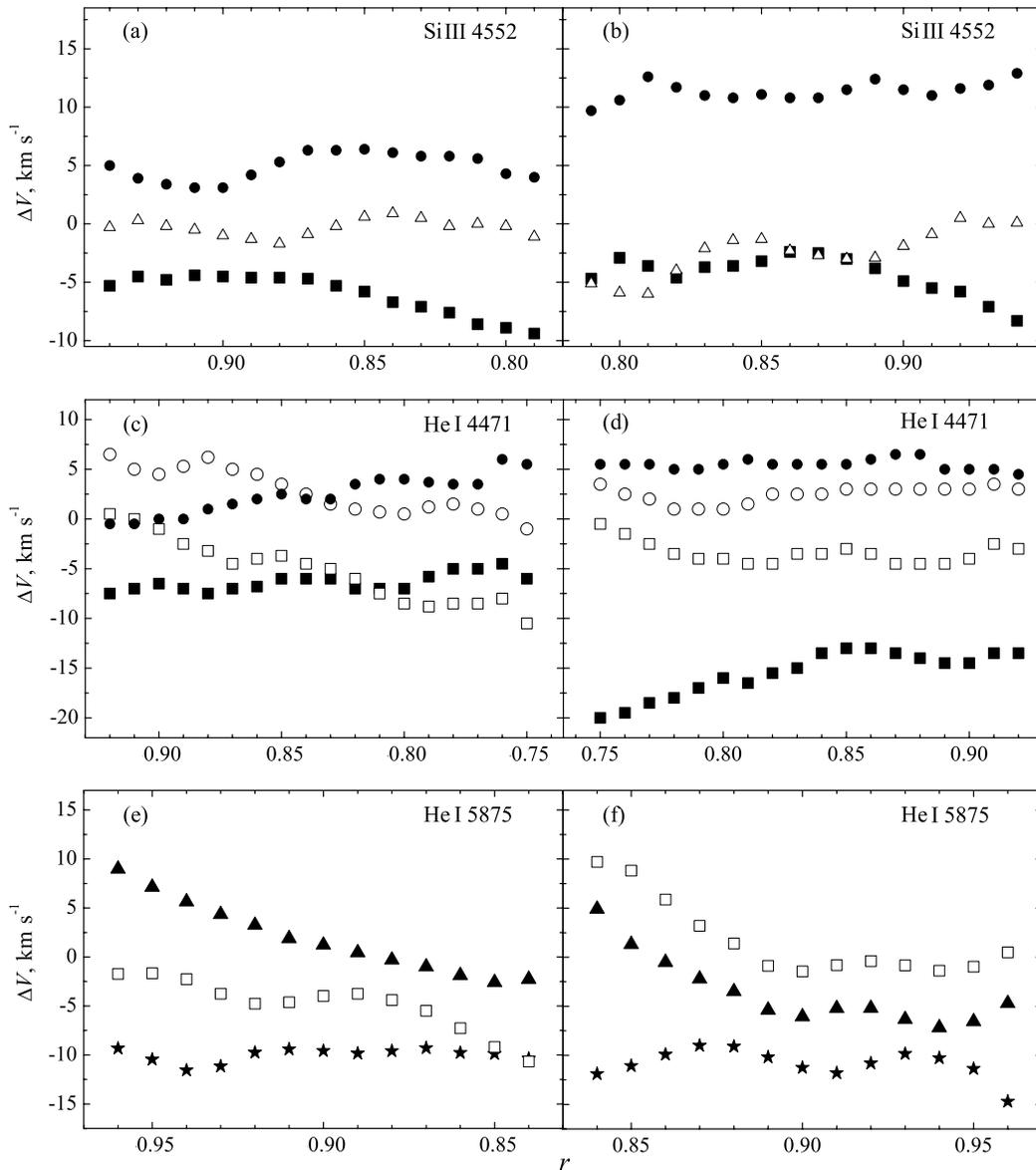


Рис. 4. Переменность синей (а, с, е) и красной (b, d, f) половин профилей линий относительно среднего профиля для линий Si III λ 4552 Å, He I λ 4471 и 5875 Å по данным наблюдений $\text{JD}_0 + 50, 54, 58; 50, 53, 55, 58$ и $22, 48, 55$ соответственно. Вариации профилей, полученных в течение одной даты, отображены одинаковыми символами. Вертикальные размеры символов соответствуют максимальным значениям ошибок измерения лучевой скорости.

После записи профилей линий в гелиоцентрических координатах (как на рис. 1) значения лучевой скорости табулировались с шагом $\Delta r = 0.01$. Далее для каждой группы линий величины лучевой скорости усреднялись для соответствующих значений интенсивности r .

Картинки переменности лучевой скорости со временем для групп линий Si III и H_{10} –Nd приведены на рис. 6. Кривая (синусоида) проведена по параметрам переменности лучевой скорости, найденным методом гармонического анализа. Видно, что все данные хорошо ложатся на кривую, за исключением двух значений. Для групп линий

Si III и H_{10} –Nd это лучевые скорости, полученные в течение ночей $\text{JD}_0 + 48, 49$ и $\text{JD}_0 + 49, 50$ соответственно. Такая картина наблюдается и для других групп линий. Мы считаем, что в этот период наблюдений кроме колебательных движений зафиксировано расширение в слоях, где эти линии формируются. Такого типа расширения также нами были зарегистрированы в спектрах сверхгигантов HD 21291 B9Ia и HD 21389 A0Ia [15]. Более того, такие расширения вначале заметны у линий, формирующихся в нижних слоях атмосферы, а далее проявляют себя в тех линиях, что формируются в верхних слоях атмосферы звезды. На рис. 6b

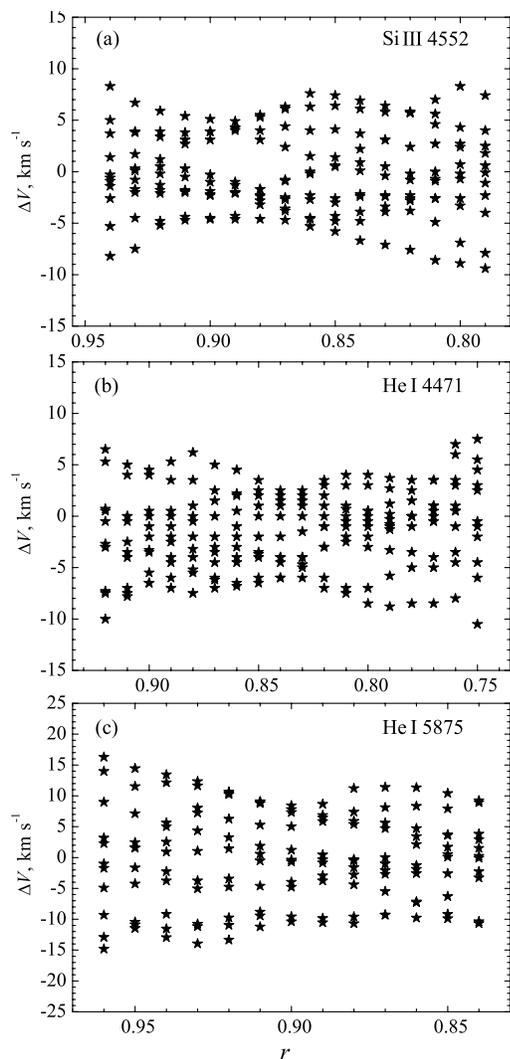


Рис. 5. Картины переменности синей половины профилей линий относительно среднего профиля для линий Si III λ 4552 Å, He I λ 4471 и 5875 Å, построенные для всех дат наблюдений. Профили, полученные в течение одной юлианской даты, усреднялись. Вертикальные размеры символов — как на рис. 4.

видно, что в нижних слоях, где формируются линии Si III (а также O II и слабые линии He I) в ночь JD₀ + 48 уже наблюдается сильное расширение, а в области формирования сильных фотосферных линий H₁₀–Hδ (а также сильных линий He I и ветровых линий He I λ 5875 и 6678 Å), расширение не регистрируется. Оно наблюдается с опозданием примерно на одни сутки, в ночь JD₀ + 49 (рис. 6а). Спустя два дня, JD₀ + 50, когда в нижних слоях расширение почти не заметно, в верхних слоях оно максимально.

Картины переменности со временем лучевых скоростей отдельно для фотосферных и сильных фотосферных линий оказались одинаковыми. Эти линии соответственно объединены в группах

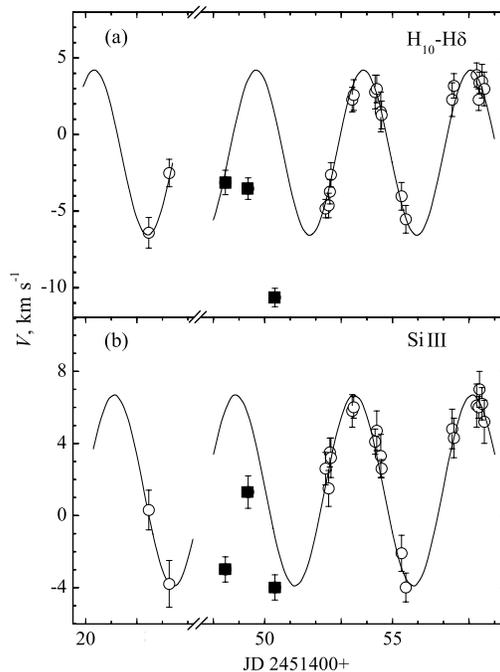


Рис. 6. Переменность лучевой скорости со временем для групп линий Si III и H₁₀–Hδ. Квадратными символами представлены данные, относящиеся к фазе расширения слоев. Подробности в тексте.

Si III+O II+He I (слабые) и H₁₀–Hδ+He I (сильные). Как видно на рис. 6, переменность лучевых скоростей в течение 36 суток носит явный периодический характер. Поиск возможных периодов (или квазипериодов) переменности лучевой скорости со временем для этих групп линий проводился методом гармонического анализа [1]. Наши исследования показали, что быстрая переменность лучевых скоростей линий со временем ($P < 1^d$) не регистрируется. Наблюдаемые изменения профилей и лучевых скоростей линий в течение одной ночи отражают переменность на больших временных масштабах. Однако в процессе поиска для всех групп линий лучевые скорости, полученные на одну JD, не усреднялись. Два значения лучевой скорости, относящиеся к фазе расширения слоев, не рассматривались. В течение 36 дней в пределах точности определения амплитуда переменности лучевых скоростей со временем была одинаковой для всех фотосферных линий: $A = 10.0 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$. Значение квазипериода, определенное с хорошим уровнем значимости, $P = 4^d.16 \pm 0.05$ и $P = 4^d.60 \pm 0.08$ соответственно для групп линий H₁₀–Hδ (и сильных линий He I) и Si III+O II (а также для слабых линий He I). Однако гамма-скорости для этих групп линий различаются и составляют -1.5 ± 0.5 и $1.5 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. Фазовые кривые лучевых скоростей для этих групп линий представ-

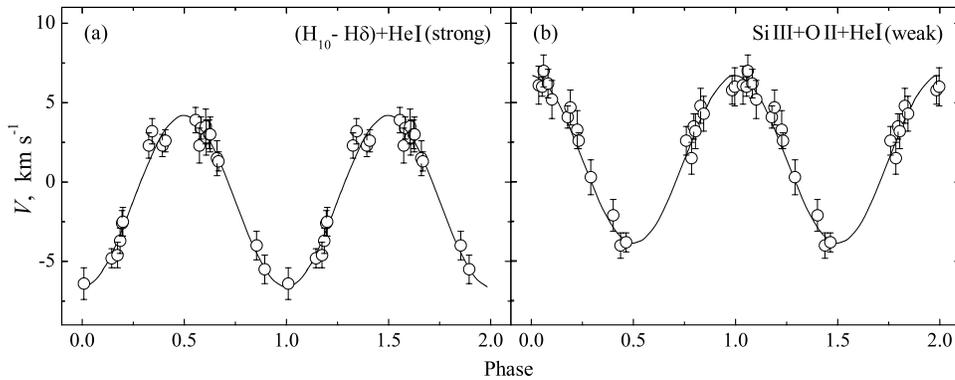


Рис. 7. Фазовые кривые лучевых скоростей для групп линий $H_{10}-H\delta+HeI$ (сильные) и $Si\ III+O\ II+HeI$ (слабые). Для построения кривых использованы параметры: (a) $P = 4^d16 \pm 0.05$, гамма-скорость — -1.5 ± 0.5 км с $^{-1}$; (b) $P = 4^d60 \pm 0.08$, гамма-скорость — 1.5 ± 0.5 км с $^{-1}$. Начальная фаза — JD 2451452.38, амплитуды $A = 10.0 \pm 0.5$ км с $^{-1}$.

лены на рис. 7. Для ветровых линий $He\ I\ \lambda 5875, 6678\ \text{\AA}$ картина и характер переменности лучевой скорости со временем отличаются друг от друга и от фотосферных линий. Для них в течение времени наших наблюдений (36 юлианских дат) были получены несколько величин квазипериодов с малыми уровнями значимости. Были определены гамма-скорости и амплитуда переменности лучевой скорости со временем: соответственно -2.0 ± 0.7 и -8.0 ± 1.0 км с $^{-1}$, 13.0 ± 1.2 и 18 ± 1.5 км с $^{-1}$ для линий $He\ I\ \lambda 6678$ и $5875\ \text{\AA}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования показали, что если переменность лучевых скоростей и профилей линий обусловлена нерадиальными пульсациями, то амплитуда переменности лучевой скорости со временем различается для разных уровней остаточной интенсивности линий r . Наблюдаются уровни r , где она минимальна. Анализ разных вариантов показал, что переменность лучевой скорости со временем желательно изучать на этих уровнях. В этом случае разброс лучевых скоростей для линий и групп линий, формирующихся в близких слоях атмосферы, получаются минимальными, а точность определения параметров переменности лучевой скорости со временем — высокой. При измерении лучевой скорости на уровне половины интенсивности линии (по профилям линий, когда наблюдалась самая глубокая абсорбция у всех линий, $JD_0 + 55$) разброс лучевых скоростей между группами линий $Si\ III, O\ II$ и слабыми линиями $He\ I$ весьма значителен.

Как и в случае сверхгигантов HD 21389 (A0Ia) и HD 21291 (B9Ia), в спектре κ Cas мы зафиксировали резкое расширение слоев атмосферы, которое нарушает гармонический закон их колебания.

Это затрудняет определение параметров гармонических колебаний, но, по-видимому, является общим свойством ранних сверхгигантов. Такие явления могут оказаться одним из механизмов накачки и/или поддержки пульсаций в атмосферах этих звезд. Обнаружение периодичности этих явлений может сыграть ключевую роль в этом вопросе.

Таким образом, в спектре сверхгиганта κ Cas переменности лучевых скоростей и профилей фотосферных линий $Si\ III, O\ II, He\ I, H_{10}-H\delta$ и ветровых линий $He\ I\ \lambda 5875, 6678\ \text{\AA}$ в основном обусловлены нерадиальными пульсациями. Быстрая, на шкале менее одного дня, переменность лучевых скоростей и профилей линий не обнаружена. В случае фотосферных линий найдены периодические изменения лучевой скорости со временем. Амплитуда ее переменности для всех случаев получилась одинаковой: $A = 10.0 \pm 0.5$ км с $^{-1}$. Значение квазипериода $P = 4^d16 \pm 0.05$ для групп линий $H_{10}-H\delta+He\ I$ (сильные) и $P = 4^d60 \pm 0.08$ для $Si\ III+O\ II+He\ I$ (слабые). Однако гамма-скорости для этих групп линий различаются и составляют соответственно -1.5 ± 0.5 и 1.5 ± 0.5 км с $^{-1}$. Полученные значения периода соответствует нерадиальным пульсациям в g -модах [16]. По найденной величине гамма-скорости для групп фотосферных линий $Si\ III+O\ II+He\ I$ (слабые) можно сказать, что проекция лучевой скорости центра массы звезды равна 1.5 ± 0.5 км с $^{-1}$. Для ветровых линий $He\ I\ \lambda 6678$ и $5875\ \text{\AA}$ были определены гамма-скорости и амплитуды переменности лучевой скорости со временем: соответственно -2.0 ± 0.7 и -8.0 ± 1.0 км с $^{-1}$, 13.0 ± 1.2 и 18 ± 1.5 км с $^{-1}$. Следовательно, амплитуда переменности лучевой скорости и скорость расширения увеличиваются от нижних слоев к верхним слоям атмосферы.

Кроме нерадиальных пульсаций, переменность профиля линий также вызвана появлениями и «исчезновениями» эмиссий, накладывающихся на профили линий на трех позициях: около -135 ± 10.0 , -20 ± 20 и 135 ± 10.0 км с⁻¹ для синесмещенной, центральной и красносмещенной эмиссий соответственно. Эти эмиссии в более явном виде наблюдаются на ветровых и сильных, но следы их заметны на всех фотосферных линиях. Такая картина и характер переменности всех профилей в спектре κ Cas свидетельствуют о том, что она является Be-звездой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Российский научный фонд за финансовую поддержку работы грантом № 14-50-00043. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. K. Rzaev, L. T. Hasanova, M. V. Yushkin, and K. M. Mikailov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 52 (2007).

2. A. K. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **65**, 26 (2010).
3. A. K. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **67**, 282 (2012).
4. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astron. and Astrophys.* **314**, 599 (1996).
5. P. A. Crowther, D. J. Lennon, and N. R. Walborn, *Astron. and Astrophys.* **446**, 279 (2006).
6. J. B. Hutchings, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **147**, 161 (1970).
7. J. D. Rosendhal and G. Wegner, *Astrophys. J.* **162**, 547 (1970).
8. N. R. Walborn, *Astron. J.* **77**, 312 (1972).
9. R. S. I. Ryans, P. L. Dufton, W. R. J. Rolleston, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **336**, 577 (2002).
10. S. Simón-Díaz and A. Herrero, *Astron. and Astrophys.* **468**, 1063 (2007).
11. S. C. Searle, R. K. Prinja, D. Massa, and R. Ryans, *Astron. and Astrophys.* **481**, 777 (2008).
12. C. Koen and L. Eyer, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **331**, 45 (2002).
13. L. Lefèvre, S. V. Marchenko, A. F. J. Moffat, and A. Acker, *Astron. and Astrophys.* **507**, 1141 (2009).
14. A. K. Rzaev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 264 (2008).
15. A. K. Rzaev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **35**, 130 (1993).
16. D. Lovy, A. Maeder, A. Noels, and M. Gabriel, *Astron. and Astrophys.* **133**, 307 (1984).

Study of Nonstationarity of the Atmosphere of κ Cas. I. Variability of Profiles of Photospheric and He I Wind Lines

A. Kh. Rzaev

Temporal variations of radial velocities and line profiles in the spectrum of the supergiant κ Cas were investigated. Variability of radial velocities and profiles of photospheric lines Si III, O II, He I, H₁₀–H δ and wind lines He I λ 5875, 6678 Å is mainly caused by non-radial pulsations. For photospheric lines quasi-sinusoidal variabilities of the radial velocity were found. Temporal variability of radial velocity of the wind lines He I λ 5875, 6678 Å differ from each other and from the photospheric lines. Gamma velocities and amplitudes of radial velocity variability were determined. The amplitude of variability and the velocity of expansion increase from lower to upper layers of the atmosphere. Emission components are superimposed on the line profiles at positions about -135 ± 10.0 , -20 ± 20 and 135 ± 10.0 км с⁻¹ respectively. They are more obvious in the wind line profiles, although, there are signs of emissions also in the photospheric lines. Such a character of variability of all the lines in the κ Cas spectrum confirms its Be nature.

Keywords: *supergiants—stars: individual: κ Cas*