

МНОГОЛЕТНЯЯ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ B[e]–ЗВЕЗДЫ CI SAM В СПОКОЙНОМ СОСТОЯНИИ

© 2024 г. В. Г. Ключкова^{1,*}, А. С. Мирошниченко^{2,3}, В. Е. Панчук¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, Россия

²Университет в Гринсборо, Северная Каролина, США

³Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

*E-mail: Valentina.R11@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2024 г.

После доработки 20.04.2024 г.

Принята в печать 23.04.2024 г.

Оптические спектры высокого разрешения B[e]-звезды CI Sam получены в разные даты 2002–2023 гг. на 6-метровом телескопе БТА с эшелле спектрографом НЭС. Найдена переменность во времени мощных эмиссионных профилей H α и He I. У двухпиковых эмиссий с «прямоугольными» профилями отношение интенсивности коротковолнового и длинноволнового пиков $V/R \geq 1$, за исключением одной даты. Выявлено снижение интенсивностей всех двухпиковых эмиссий с «прямоугольными» профилями по мере удаления во времени от вспышки 1998 г. Средняя лучевая скорость по эмиссиям этого типа для всех дат наблюдений изменяется в интервале $V_r(\text{emis} - d) = -(50.8 \div 55.7) + 0.2$ км/с. Полуамплитуда изменения скорости (среднеквадратичное отклонение) составляет $\Delta V_r = 2.5$ км/с. Скорость по однопиковым эмиссиям ионов (Si III, Al III, Fe III) мало отличается от значений $V_r(\text{emis} - d)$, но точность измерений по этим эмиссиям хуже: ошибка среднего для разных дат меняется от 0.4 до 1.3 км/с. В качестве системной скорости принято значение $V_{\text{sys}} = -55.4 \pm 0.6$ км/с по стабильному положению запрещенной эмиссии [N II] 5754 Å. Стабильно и положение однопиковых эмиссий [O III] 4959 и 5007 Å, $V_r(\text{emis} - d)$ $V_r(\text{[O III]}) = -54.2 \pm 0.4$ км/с. Запрещенные эмиссии [O I] 5577, 6300, 6363 Å, [Ca II] 7291 и 7324 Å в спектрах отсутствуют. Эмиссия вблизи 4686 Å — нечастое событие, ее интенсивность редко превышает уровень шумов. Лишь в спектре, полученном 03.09.2015, зарегистрирована широкая асимметричная эмиссия с интенсивностью около 16% выше континуума. Возникают вопросы об использовании этой эмиссии для оценки периода переменности звезды и о локализации этой детали в системе CI Sam. Отождествлены фотосферные абсорбции N II, S II, Fe III с переменным положением.

Ключевые слова: массивные звезды, двойные системы, CI Sam, оптические спектры, переменность

DOI: 10.31857/S0004629924060044 EDN: JMKSFQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Горячая звезда CI Sam издавна известна как звезда с насыщенными эмиссиями оптическим спектром, в каталоге [1] она обозначена как MWC 84. Особый интерес к этому объекту возник после регистрации в его системе мощной вспышки в апреле 1998 г., которая наблюдалась во всех диапазонах спектра от рентгеновского до радио диапазона [2]. После этого события звезда отнесена к ультраярким рентгеновским источникам (см. подробнее работу [3]) и изучается интенсивно во всех диапазонах длин волн, база данных SIMBAD содержит свыше 240 публикаций. Основные особенности оптического спектра CI Sam — интенсивные эмиссии H I, He I, а также эмиссии Fe II, [Fe II] со специфическими «прямоугольными» профилями, были выявлены уже в ранних

статьях [4, 5], авторы которых классифицировали звезду как сверхгигант с феноменом B[e]. Напомним, что впервые интерпретация эмиссионных «прямоугольных» профилей для звезд с постоянной потерей вещества дана Билсом [6], на примере зарегистрированных эмиссионных полос с плоскими вершинами в спектрах звезд Вольфа–Райе и новых. К настоящему времени распространено представление о том, что эмиссии в спектрах звезд с феноменом B[e] формируются в структурированной околозвездной среде в виде плотного диска и/или дуг. Зикграф [7] суммировал принципиальные особенности оптических спектров B[e]-звезд и провел теоретическое моделирование профилей характерных спектральных деталей. Наличие в оптических спектрах запрещенных эмиссий металлов, обусловленных их формирова-

нием в близкой к звезде разреженной околозвездной среде, считаются основным признаком звезд с феноменом В[е].

Уже спустя несколько дней после вспышки 1998 г. спектроскопия CI Sam в ИК диапазоне выявила мощные эмиссии H, He, Fe и последующие их изменения [8]. Результаты первых наблюдений в различных диапазонах длин стимулировали проведение ряда наблюдательных кампаний, результаты которых позже были суммированы в многочисленных оригинальных статьях и обзорах. Отметим наиболее важные для уяснения особенностей оптического спектра CI Sam (и родственных объектов) публикации: это [3, 7–9]. Важна для понимания особенностей звезд с феноменом В[е] работа [10]. Авторы этой работы, получив спектры высокого разрешения для выборки звезд, изучили переменность эмиссий и пришли к выводу о возникновении специфических эмиссий в совокупности оболочечных структур. Для изучения долговременного поведения оптического спектра CI Sam не имеют аналогов наблюдения с высоким спектральным разрешением, выполненные через две недели после вспышки 1998 г. на 2.7-м телескопе обсерватории McDonald, что позволило авторам [11] детально отождествить компоненты спектра, оценить их параметры и указать области формирования различных типов эмиссий.

Несколько групп астрономов исследовали временное поведение фотометрических и спектральных параметров CI Sam. Принципиальные результаты получены за счет спектрального мониторинга, проведенного авторами [12], которые отследили изменение профилей основных эмиссий в оптическом спектре в течение 2001–2005 гг., в частности, был зафиксирован переход профиля H_{α} от двухпикового типа к однопиковому. Эти авторы подчеркнули значимую ошибку определения эквивалентных ширин спектральных деталей вследствие неопределенности уровня континуума. Важный результат — обнаружение наклонного пылевого диска — получен путем интерферометрии в ближнем ИК диапазоне [13]. Горанский и др. [14], используя обширную коллекцию спектров, полученных на спектрографах 6-м телескопа БТА, обеспечивающих различное спектральное разрешение, сделали ряд значительных выводов. В частности, изучение картины лучевых скоростей по линиям различной природы (He II 4686 Å, [N II] 5754 Å, Fe II) выявило особый характер поведения запрещенной эмиссии [N II] 5754 Å, что позволило авторам сделать вывод о том, что эта линия формируется в области, более удаленной от звезды по сравнению с таковой для сообщества эмиссий Fe II.

К настоящему времени основные представления о строении и поведении CI Sam вкратце состоят в следующем: CI Sam — это объект с феноменом В[е], в состав которого входит массивная звезда раннего спектрального класса В и маломассивный компаньон неизвестной пока природы; спустя несколько лет после вспышки 1998 г. изменился тип эмиссий в оптическом спектре и их интенсивность значительно снизилась; комплексная структура околозвездной среды сформировалась за счет быстрого полярного ветра и медленного экваториального истечения; в оптическом спектре отсутствуют абсорбционные детали, исключением являются межзвездные абсорбции; нет надежных оценок расстояния, светимости и орбитальных параметров, к примеру, нет общепринятого значения орбитального периода.

Необходимость многочисленных высококачественных спектральных данных очевидна, поэтому нередко публикации завершаются призывом к проведению подобных наблюдений. Однако значительная удаленность CI Sam (параллакс $\pi = 0.21 \text{ mas}^1$ по данным Gaia EDR3 [15]) затрудняет регулярный спектральный мониторинг с высоким разрешением, необходимый для создания обширной коллекции спектров. Как справедливо отмечает в своем обзоре Краус [9], для выполнения такого мониторинга необходимо иметь много терпения и много времени на крупных телескопах. Пока опубликованы лишь несколько работ с результатами на основе анализа спектров высокого разрешения, полученных в отдельные моменты времени, к примеру, статьи [3, 5]. Стремясь увеличить временной интервал наблюдений, авторы вынуждены объединять данные измерений, полученных по наблюдениям с высоким и пониженным спектральным разрешением [14].

Отсутствие наблюдательных данных необходимого качества и объема послужило для нас аргументом к началу долговременной спектроскопии для обеспечения поиска переменности профилей спектральных деталей и картины лучевых скоростей со временем. Эта задача требует многократных наблюдений с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн. В данной статье мы представляем результаты первого этапа работы. В разделе 2 данной статьи кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 приведены полученные результаты, в разделах 4 и 5 обсуждаются полученные результаты в сопоставлении с опубликованными ранее, и суммируются основные выводы.

¹ mas — угловая миллисекунда дуги

2. ЭШЕЛЛЕ СПЕКТРОСКОПИЯ НА БТА

Первые наши наблюдения на БТА были выполнены с использованием спектрографа умеренного ($R \approx 12000$) разрешения PFES [16] в ночь 03.12.1998 г. Этот спектр, содержащий только однопиковые эмиссии из-за недостаточного разрешения, показал нам необходимость и возможность получения на БТА

спектров CI Cam с многократно более высоким разрешением. Все последующие спектры CI Cam были получены нами с высоким разрешением в 2002–2023 гг. с эшелле спектрографом НЭС [17], стационарно расположенном в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА. Даты наблюдений звезды в приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений гелиоцентрической скорости V_r в спектрах CI Cam по разным типам линий

Дата, JD	$\Delta\lambda$, нм	V_r , км/с			
		emis- d	emis- s	[O III]	DIBs
04.02.2002 245 2310.34	462–607	-47.4 ± 1.3 (43)		–51.2	-7.8 (2)
19.11.2002 245 2598.16	456–599	-49.6 ± 0.2 (46)	-47.4 ± 0.8 (25)	–48.0	-7.4 ± 0.7 (8)
21.12.2002 245 2630.44	452–599	-51.7 ± 0.2 (28)	-51.5 ± 0.5 (12)	–55.2	
18.11.2005 245 3693.40	528–670	-53.8 ± 0.2 (42)	-54.1 ± 0.5 (8)		-7.8 ± 0.7 (9)
20.11.2005 245 3694.51	528–670	-54.6 ± 0.4 (21)	-54.8 ± 1.0 (11)		-6.0 ± 0.5 (15)
15.01.2006 245 3751.20	456–601	-54.4 ± 0.2 (39)	-54.9 ± 0.2 (8)	–51.6	
06.12.2006 245 4076.36	447–593	-55.1 ± 0.2 (61)	-53.1 ± 1.3 (14)	–54.7	-7.2 ± 1.0 (6)
07.12.2006 245 4077.22	447–593	-55.7 ± 0.2 (61)	-53.3 ± 0.4 (26)	–55.8	-7.8 ± 0.9 (5)
08.12.2006 245 4078.35	447–593	-55.6 ± 0.2 (59)	-56.3 ± 0.5 (19)	–54.8	-6.8 ± 0.6 (7)
10.12.2006 245 4080.35	447–593	-55.6 ± 0.2 (59)	-56.2 ± 0.5 (22)	–56.7	-7.0 ± 1.0 (7)
18.11.2008 245 4788.29	447–593	-55.6 ± 0.2 (21)	-55.7 ± 0.6 (9)	–56.3	
13.01.2011 245 5575.26	520–668	-54.0 ± 0.2 (35)	-52.4 ± 0.4 (12)		-6.6 ± 0.7 (7)
03.09.2015 245 7269.47	395–698	-54.4 ± 0.2 (88)	-54.0 ± 0.4 (35)	–55.1	-7.3 ± 0.6 (17)
08.12.2019 245 8826.45	470–778	-51.6 ± 0.2 (46)	-51.9 ± 0.7 (32)	–43.4	-7.6 ± 0.3 (19)
21.10.2021 245 9509.33	470–778	-51.5 ± 0.3 (49)	-51.3 ± 0.5 (23)	–43.0	-6.2 ± 0.8 (17)
05.07.2022 245 9890.37	470–778	-50.8 ± 0.2 (56)	-50.0 ± 0.2 (32)	–48.9 (5)	-6.2 ± 0.5 (18)
09.02.2023 245 9985.28	470–778	-51.1 ± 0.3 (60)	-53.6 ± 0.5 (12)	–48.4	-7.1 ± 0.5 (10)

Примечание. В скобках указано число спектральных деталей, использованных при усреднении скорости для каждой даты.

Последние годы спектрограф оснащен матрицей ПЗС с числом элементов 4608×2048 , размер элемента 0.0135×0.0135 мм; шум считывания $1.8e^-$. Регистрируемый за одну экспозицию диапазон длин волн $\Delta\lambda = 470 - 778$ нм. В 2001–2011 гг. мы использовали ПЗС с числом элементов 2048×2048 . Для уменьшения потерь потока на входной щели спектрограф НЭС снабжен резателем изображения звезды. С использованием резателя каждый спектральный порядок повторяется трижды. Спектральное разрешение НЭС $R = \lambda / \Delta\lambda \geq 60000$. В спектрах CI Sam отношение уровня сигнала к шуму (С/Ш) изменяется на несколько порядков от континуума до вершин сильных эмиссий.

Экстракция одномерных данных из двумерных эшелле изображений выполнена с использованием модифицированного с учетом геометрии эшелле кадра контекста ECHELLE пакета MIDAS. Все детали процедуры описаны Юшкиным и Ключковой [18]. Следы космических частиц удалены стандартным приемом — за счет медианного усреднения пары спектров, полученных последовательно. Для калибровки длин волн использовалась Th–Ag лампа. Все последующие шаги в обработке одномерных спектров выполнены с использованием современной версии пакета DECH20t [19]. Систематическая ошибка измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_r по набору теллурических деталей и межзвездных линий дублета Na I не превышает 0.25 км/с по одной линии; ошибка измерения V_r по широким абсорбциям не превышает 0.5 км/с. Для усредненных значений скорости в табл. 1 ошибки составляют 0.6–2.4 км/с в зависимости от типа измеренных линий. Отождествление деталей в спектрах CI Sam мы выполнили, используя списки линий из статей, основанных на спектроскопии на БТА+НЭС родственных звезд с феноменом В[e] [20–22]. Кроме того, для нескольких спектральных деталей мы использовали данные базы VALD (см. [23] и ссылки в этой публикации).

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Особенности спектра CI Sam и их переменность

Оптический спектр CI Sam населен эмиссиями разного типа: эмиссии ионов металлов с двухпиковыми «прямоугольными» профилями, усложненные не вполне симметричные эмиссии H I, He I, слабые эмиссии многократно ионизованных металлов (Al III, Fe III, Si III), эмиссионные компоненты триплета кислорода OI 7773 Å. Все они формируются в различных физических условиях оболочечной среды

и имеют различающиеся ширины. По этой причине мы исследовали отдельно временное поведение профилей этих типов эмиссий и лучевой скорости по измерениям их положений.

Рисунки 1 и 2 хорошо иллюстрируют эти основные особенности спектра звезды. Согласно классификации Билса, профиль H_α в спектре CI Sam относится к типу II — однопиковая эмиссия, не содержащая абсорбционных компонентов. На рис. 1 представлены профили H_α для нескольких дат наблюдений. Положение штриховой вертикали на этом и последующих рисунках соответствует принятому значению $V_{\text{sys}} = -55.4 \pm 0.6$ км/с по линии [N II] 5754 Å. Отметим найденные особенности профиля H_α : систематическое снижение интенсивности вершины профиля; отсутствие ветровых компонентов; наличие, помимо широкого пьедестала ($\Delta V_r \approx \pm 400$ км/с), слабого повышения интенсивности длинноволнового крыла, его переменность может быть вызвана неоднородностью оболочки.

Профили двухпиковых эмиссий (Fe II, [Fe II] и др.) имеют почти вертикальные склоны и вогнутые вершины. В случае сферически симметричного и радиально расширяющегося ветра в оптически тонкой среде формируются профили с плоской вершиной. Наблюдаемая форма вершин в спектре CI Sam указывает на структурированность излучающего слоя. Согласно авторам [3], вогнутость профиля, т. е. понижение эмиссии, обусловлено меньшим излучением при меньших скоростях. Даже в случае симметрии околосредной среды вершины профи-

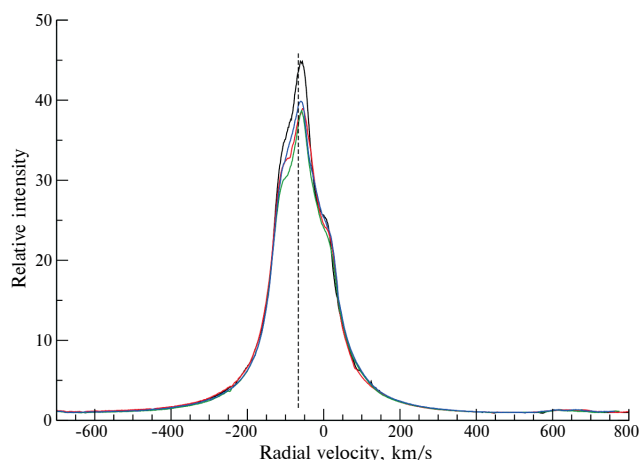


Рис. 1. Профили H_α в спектрах CI Sam, полученных в разные даты: 18.11.2005 (оранжевая линия), 03.09.2015 (черная), 21.10.2021 (красная), 05.07.2022 (зеленая), 09.02.2023 (голубая). Здесь и на последующих рисунках положение штриховой вертикали соответствует принятому значению $V_{\text{sys}} = -55.4 \pm 0.6$ км/с по линии [N II] 5754 Å, а уровень континуума принят за 1.

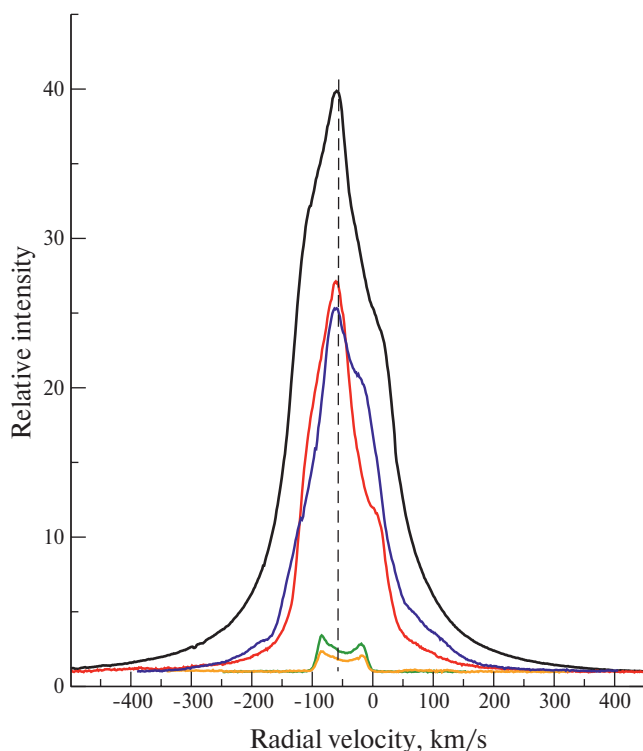


Рис. 2. Профили характерных эмиссий в спектре 09.02.2023: H_α (черная линия), H_β (красная), He I 5876 Å (синяя), Fe II 5534 Å (зеленая), Fe II 5425 Å (оранжевая).

лей будут неплоскими, если есть дополнительное поглощение в диске.

Переменность эмиссий Fe II и [Fe II] с «прямоугольными» профилями и вогнутыми вершинами иллюстрирует рис. 3. Эта специфическая форма эмиссий Fe II и [Fe II] сохраняется в течение мониторинга, однако, интенсивность вершин эмиссий в спектрах, полученных в разные даты, систематически меняется. Обращает на себя внимание правый рисунок на верхней панели, на котором зафиксировано редко наблюдаемое соотношение интенсивностей пиков: интенсивность длинноволнового пика для всех эмиссий (за исключением запрещенной эмиссии [N II] 5754 Å) выше коротковолнового.

На левой панели рис. 4 сопоставлены профили линии [N II] 5754 Å в двух ранних спектрах CI Cam (04.02.2002 и 19.11.2002) с профилями, полученными с 2008 по 2022 г. Здесь видим значительное отличие ранних профилей 2002 г. относительно всех последующих, у которых совпадает положение коротковолновых крыльев и несущественно меняется интенсивность. При этом у самого раннего профиля 04.02.2002 видим почти двукратное увеличение интенсивности, и смещение положения, сдвиг корот-

коволнового крыла примерно на 10 км/с в красную область. Уже спустя 8.5 месяцев, в ноябре 2002 г., интенсивность этого профиля существенно снизилась, и его коротковолновое крыло приблизилось к стационарному положению поздних профилей. Отношение V/R превышает 1 для всех моментов наблюдений. На правой панели этого рисунка для тех же дат приведен для сравнения профиль линии Fe II 5534 Å. Для этой линии низкого возбуждения в спектрах 2002 г. также видим сдвиг коротковолнового крыла примерно на 10 км/с в красную область, но иное поведение величины V/R : интенсивность меняется несущественно, в спектрах 2002 г. отношение $V/R \geq 1$, позже $V/R < 1$.

Публикации результатов оптической спектроскопии CI Cam, как правило, содержат указание на присутствие в спектрах эмиссий высокого возбуждения: He II 4686 Å, запрещенных эмиссий [O I] 6300 и 6363 Å, [O III] 4959 и 5007 Å (см., напр., работы [11, 12]). В наших спектрах эмиссии [O I] 6300 и 6363 Å отсутствуют, но линии [O III] 4959 и 5007 Å наблюдаются постоянно. Отождествление этих слабых линий высокого возбуждения [O III] 4959 и 5007 Å не вызывает проблем, а положения обеих линий в спектрах, $V_r(4959) = -52.4 \pm 1.6$ км/с и $V_r(5007) = -50.6 \pm 1.4$ км/с (по 13 спектрам), хорошо согласуются и мало меняются со временем.

Ситуация с поведением эмиссии He II 4686 Å в спектрах высокого разрешения остается менее определенной. Восемь из наших спектров, перечисленных в табл. 1, содержат диапазон длин волн, в котором можно ожидать присутствие линии 4686 Å. На рис. 5 представлены фрагменты для 6 дат наблюдений. В спектрах «1», «3», «4» и «5» эта линия отсутствует, в спектре «2» интенсивность эмиссии низка ($< 5\%$ от локального континуума). В нашем самом раннем спектре, полученном 03.12.1998 с умеренным разрешением и отношением $C/\Phi \geq 100$ со спектрографом PFES, эмиссия на 4686 Å отсутствует. И лишь в одном из спектров, полученном 03.09.2015, появилась широкая эмиссия с эквивалентной шириной $W_\lambda = 0.4$ Å. Если предположить, что это эмиссия He II 4686 Å, получаем ширину ее профиля в интервале лучевых скоростей от -100 до $+160$ км/с, что не согласуется с общей картиной лучевых скоростей в системе (см. профили линий на рис. 2) и ставит вопрос о локализации этой эмиссии в системе CI Cam.

Эмиссионная линия He II 4686 Å может появляться не во всех орбитальных фазах из-за, напри-

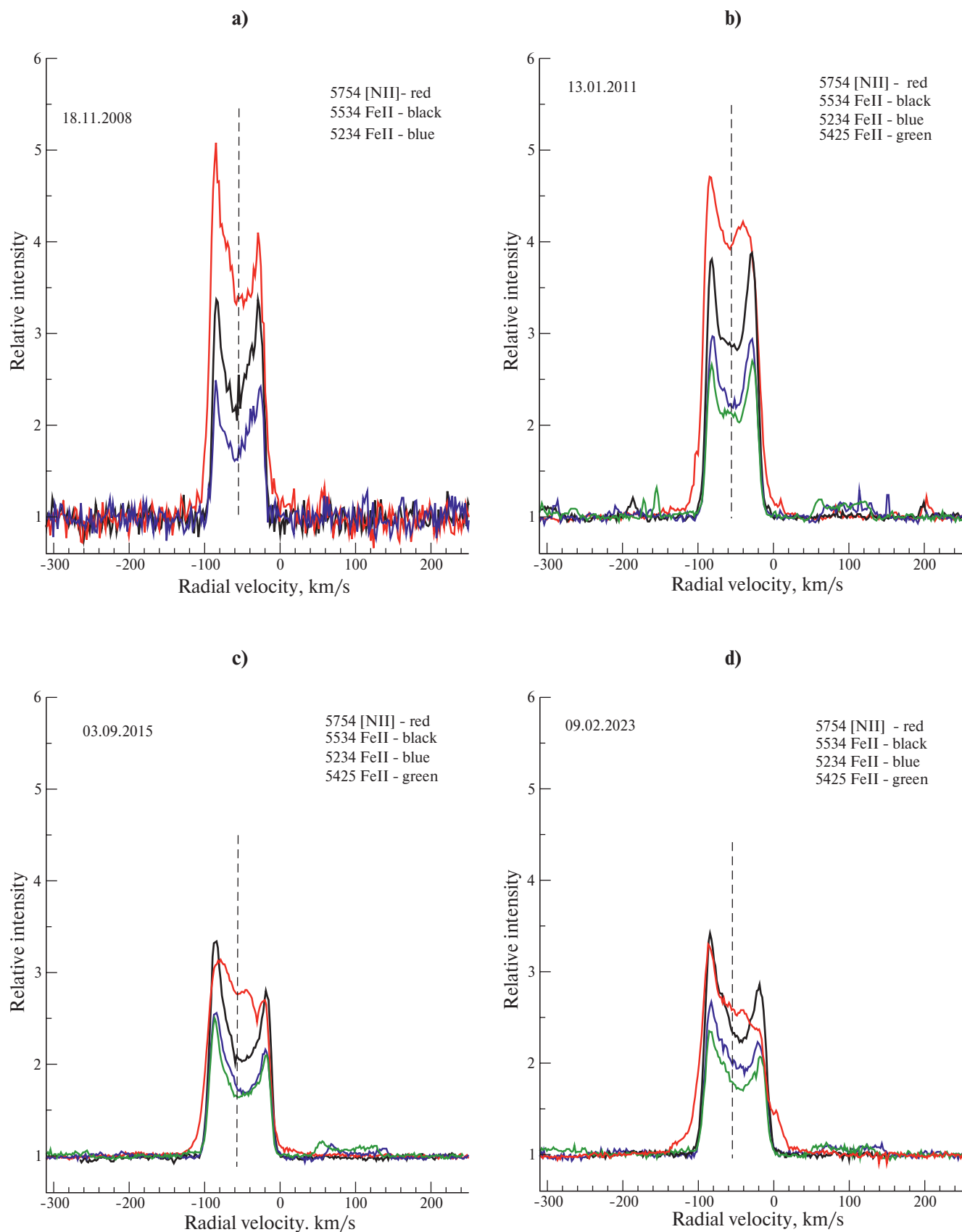


Рис. 3. Профили избранных линий в спектрах, полученных 18.11.2008, 13.01.2011, 03.09.2015 и 09.02.2023: [N II] 5754 Å (красная линия), Fe II 5534 Å (черная), Fe II 5234 Å (синяя), Fe II 5425 Å (зеленая).

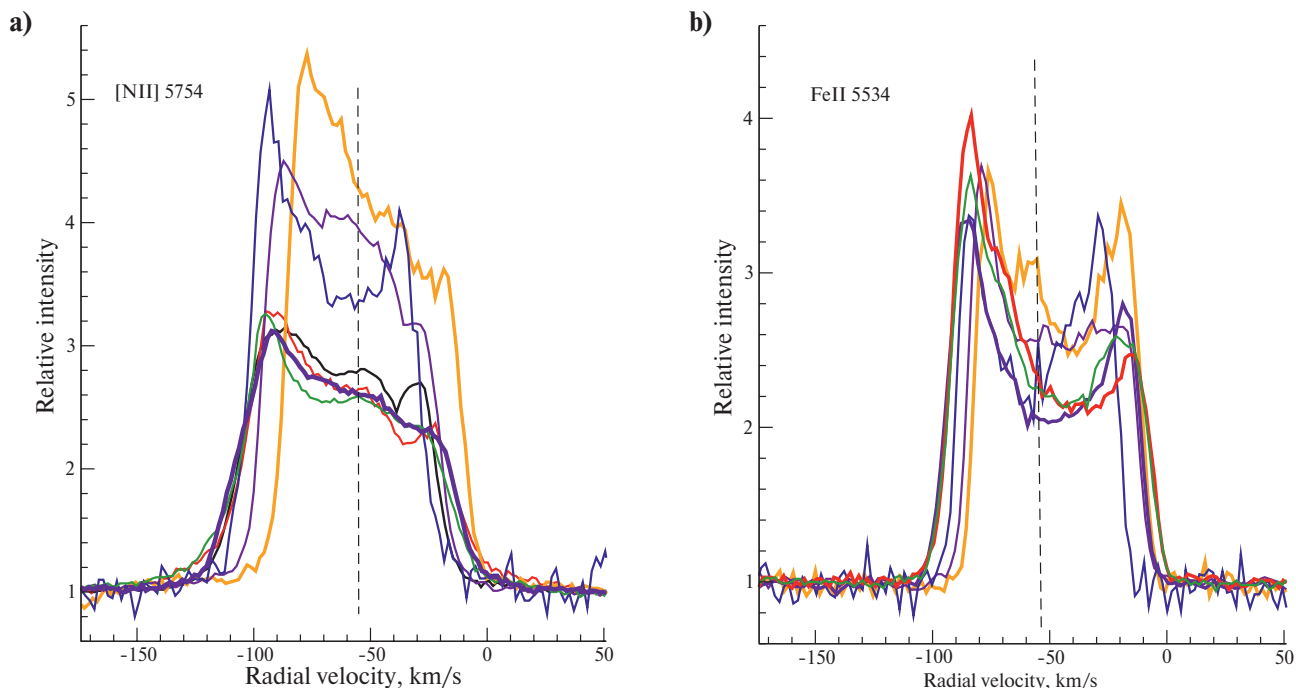


Рис. 4. Профили эмиссий [N II] 5754 Å (слева) и Fe II 5534 Å (справа) в спектрах разных дат: 04.02.2002 (оранжевая линия), 19.11.2002 (фиолетовая), 18.11.2008 (голубая), 03.09.2015 (черная), 08.12.2019 (жирная черная линия), 21.10.2021 (красная), 05.07.2022 (зеленая).

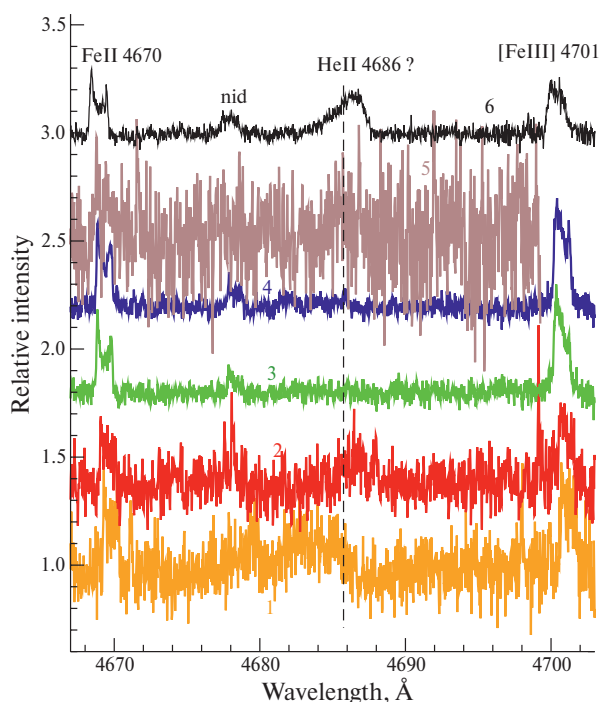


Рис. 5. Фрагменты спектров CI Cam в интервале длин волн 4665–4703 Å, полученные в различные даты: 04.02.2002 (оранжевая линия), 15.01.2006 (красная), 06.12.2006 (зеленая), 07.12.2006 (синяя), 18.11.2008 (коричневая), 03.09.2015 (черная линия). Положение вертикали соответствует длине волны 4686 Å. Не отождествлена слабая эмиссия на длине волны около 4678 Å.

мер, экранировки плотными областями оболочки главной звезды системы. Кроме того, она слаба и может быть не видна на фоне шума в не очень хорошо накопленных спектрах. На основании наших наблюдений можно признать появление эмиссии He II 4686 Å в спектрах CI Cam редким событием, что указывает на сложность использования этой эмиссии для оценки периода спектральной переменности звезды и ставит задачу о локализации эмиссии в системе CI Cam. Для решения этой задачи очевидна необходимость получения значительно большего объема высококачественных спектральных данных. В настоящее время нет достаточного объема спектральных данных высокого разрешения для подтверждения возможности использования этой линии для этой цели.

Отметим также, что в спектре, полученном 03.09.2015, в котором зарегистрирована эмиссия вблизи $\lambda \approx 4686$ Å, наблюдается и дополнительная особенность — пониженная интенсивность эмиссий с «прямоугольными» профилями, что хорошо иллюстрирует совокупность панелей на рис. 4.

3.2. Поиск абсорбций в спектрах CI Cam

Близким родственником CI Cam является сверхгигант MWC 17 с феноменом B[e] в спектре, особенности которого были детально изучены по несколь-

ким спектрам БТА+НЭС авторами [21]. Звезда MWC 17, отождествляемая с ИК источником IRAS 01441+6026, одна из самых горячих звезд с феноменом B[e]. В ее спектрах 2005–2006 гг. отождествлены многочисленные разрешенные и запрещенные эмиссии, а также межзвездные линии Na I и диффузные межзвездные полосы (DIBs). Сопоставление полученных новых данных с более ранними измерениями позволило сделать вывод об отсутствии значительной переменности спектральных деталей. По линиям различной природы изучена картина лучевых скоростей, что позволило авторам принять скорость по стабильным запрещенным эмиссиям в качестве системной скорости, $V_{\text{sys}} = -47$ км/с. Высокое качество используемого спектрального материала позволило авторам [21] выполнить детальное отождествление спектральных структур. Тщательно проведенный поиск не привел к обнаружению в спектре MWC 17 абсорбций, формирующихся в атмосфере звезды.

Имея выборку качественных спектров CI Sam, мы также предприняли поиск аналогичных абсорбций, включая и сравнение спектров CI Sam, полученных в разные даты. В спектрах двух дат наблюдений в 2022 и 2023 гг. мы отождествили абсорбции Fe III, N II и S II, и получили средние значения скорости с хорошей точностью, $V_r(2022) = -32.4 \pm 0.5$ км/с (5 линий) и $V_r(2023) = -54.64 \pm 1.0$ км/с (9 линий), что дает основание для вывода о присутствии абсорбций и о переменности их положений. В спектре, полученном 08.12.2019, мы нашли лишь 5 абсорбций, средняя скорость для этой даты определена с пониженной точностью $V_r(2019) = -55.6 \pm 2.0$ км/с. Положение

трех из найденных абсорбций на двух фрагментах спектров за три даты наблюдений показано на рис. 6. Из сравнения фрагментов спектров 2021, 2022 и 2023 гг. следует отсутствие указанных абсорбций в спектре 2021 г. В целом можно говорить о присутствии абсорбций в отдельные моменты наблюдений и о переменности их среднего положения. Будущие спектральные наблюдения послужат для уточнения сведений о спектре атмосферы CI Sam.

3.3. Системная скорость CI Sam

Лучевая скорость, соответствующая положению запрещенной линии [N II] 5754 Å, стабильна на протяжении всех ночей наблюдений. Средняя скорость по этой эмиссии в 13 спектрах составила $V_r(5754) = -55.4 \pm 0.6$ км/с и, как было сказано выше, принята нами за системную, т. е. $V_{\text{sys}} = -55.4 \pm 0.6$ км/с. Две другие запрещенные линии [N II] с длинами волн 6548 и 6584 Å в спектре CI Sam находятся на протяженных (до 600 км/с) крыльях мощной эмиссии H $_{\alpha}$, а вторая из них к тому же блендирована близко расположенными эмиссиями CII, что несколько снижает точность измерений.

3.4. Сравнение спектров CI Sam и иных звезд с феноменом B[e]

Из сопоставления спектров двух B[e] сверхгигантов, MWC 17 и CI Sam, следует не только их принципиальное сходство, но и различия в деталях. Подчеркнем различие типов профилей эмиссий: в спектрах CI Sam вне вспышек профили H $_{\beta}$, H $_{\alpha}$, Fe II, [Fe II], [O III] 5007 Å — однопиковые, в спектрах же MWC 17 все они двухпиковые, что

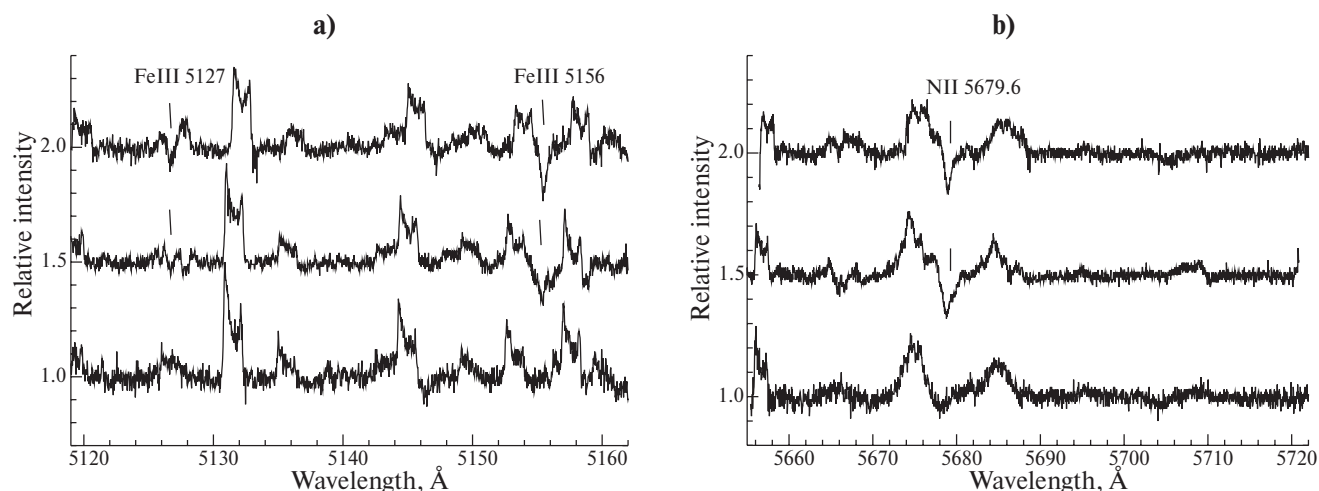


Рис. 6. Фрагменты с абсорбциями в спектрах CI Sam, сверху вниз: 09.02.2023, 05.07.2022, 21.10.2021. Два верхних фрагмента сдвинуты по оси ординат на 0.5 и 1.0 соответственно.

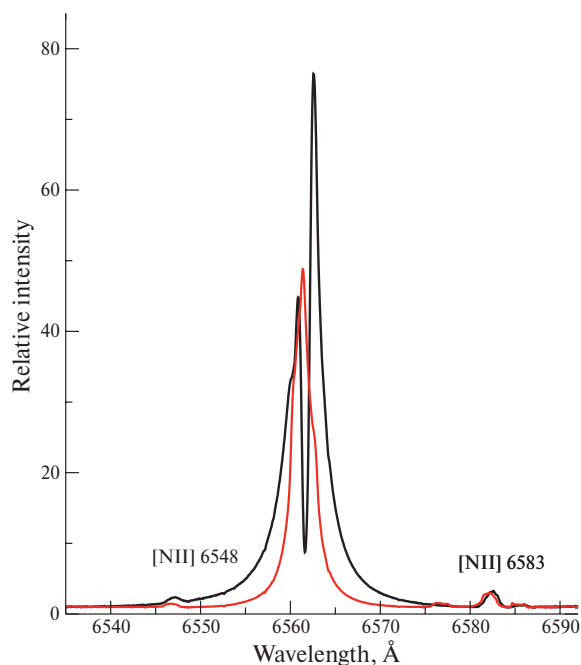


Рис. 7. Сравнение фрагментов, содержащих H_α и запрещенные линии [N II], в спектрах MWC 17 (черная линия) и CI Cam (красная), полученных на БТА со спектрографом НЭС в декабре 2005 г.

указывает на различие геометрии и кинематики околозвездной среды. Линии H_α и [N II] в спектрах обеих звезд показаны на рис. 7.

Кроме того, в спектрах MWC 17 содержится ряд эмиссий, [OI] 6300, 6363 Å, отсутствующие в спектрах CI Cam. На верхней панели рис. 8 сопоставлены фрагменты спектров MWC 17 и CI Cam, полученные со спектрографом НЭС в декабре 2005 г. Оба фрагмента содержат основные линии, но их интенсивности значительно различаются. Самая

мощная для данного фрагмента эмиссия [OI] 6363 Å превалирует в спектре MWC 17 и абсолютно отсутствует в спектральном фрагменте CI Cam. Из запрещенных эмиссий кислорода во всех наших спектрах CI Cam постоянно присутствует лишь эмиссия [O I] 5577 Å, ширина профиля и положение которой указывают на теллурическое происхождение этой детали. Краус [9] отмечает, что запрещенные эмиссии [O I] формируются в плотных областях околозвездной среды с пониженной электронной плотностью.

В спектрах CI Cam зарегистрирована еще одна особенность — эмиссионный характер компонентов триплета O I 7773 Å, что представлено на рис. 9. Дополнительно нанесенный профиль двухпиковой эмиссии Fe II 5432 Å в этом же спектре подчеркивает совпадение положения коротковолнового крыла левого компонента триплета и эмиссии Fe II 5432 Å. Два других компонента триплета на рисунке взаимно блендируют друг друга. Эмиссия ИК триплета кислорода — пекулярность спектров горячих сверхгигантов. В наших исследованиях сверхгигантов с газопылевыми оболочками ранее была зафиксирована эмиссия триплета в спектрах B[e] звезды в системе источника IRAS 004770+6429 [24] и в спектрах B-сверхгиганта LS III+52°24 (см. [25, рис. 6]). Эта нестабильная post-AGB звезда, ассоциированная с ИК источником IRAS 22023+5249, имеет пекулярный оптический спектр с рекордной интенсивностью эмиссий H_α и H_β и с признаками ветра со скоростью до 290 км/с.

3.5. Межзвездные детали

Сложные абсорбционно-эмиссионные профили дублета Na I практически не изменяются: измере-

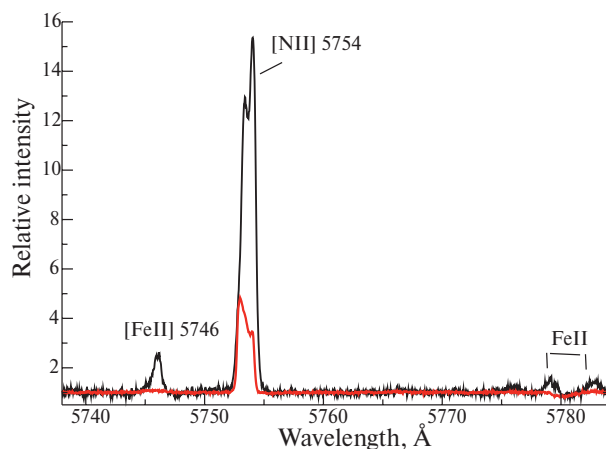
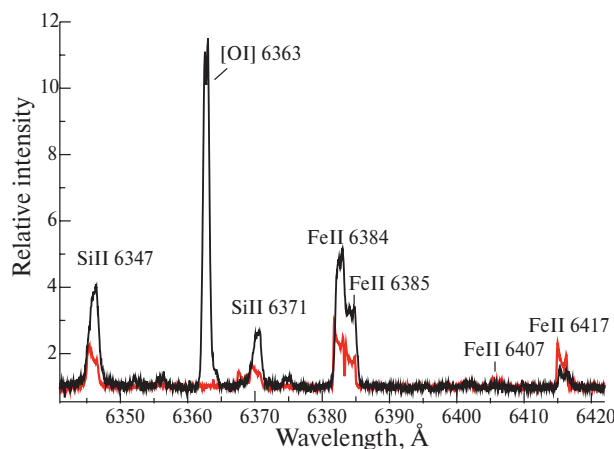


Рис. 8. Сравнение фрагментов спектра MWC 17 (черная линия) и CI Cam (красная), полученных на БТА со спектрографом НЭС в декабре 2005 г.

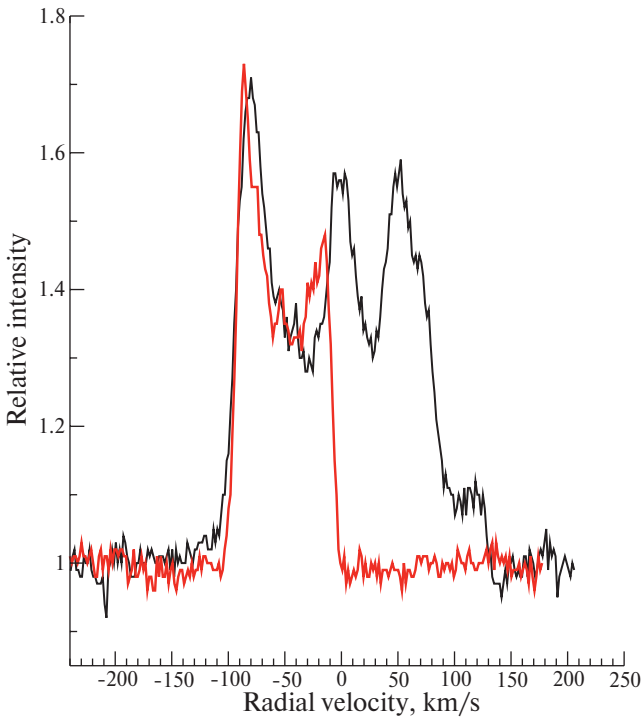


Рис. 9. Триплет кислорода O I 7773 Å (черная линия) в спектре CI Sam, полученном 05.07.2022. Красная линия — профиль двухпиковой эмиссии Fe II 5432 Å в этом же спектре.

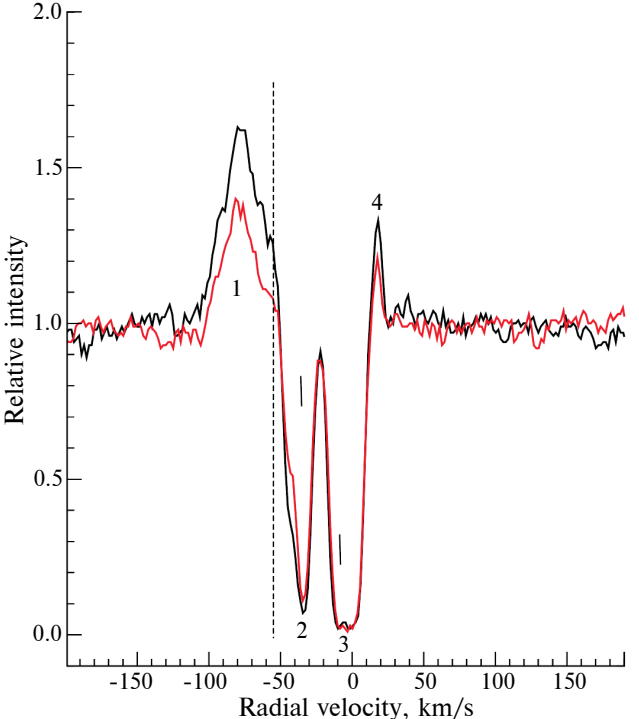


Рис. 10. Профили линий Na I 5889 Å (черная линия) и Na I 5895 Å (красная) в спектре CI Sam, полученном 21.10.2021. Короткими вертикалями указано среднее положение двух межзвездных компонентов $V_r = -7.0$ км/с и -36.7 км/с линии K I 7696 Å.

ния положений их компонентов в имеющихся спектрах позволяет использовать средние значения.

Среднее значение лучевой скорости V_r для постоянно присутствующих компонентов линий дублета Na I: -7.1 ± 0.5 , -35.8 ± 0.3 , -77.7 ± 0.8 км/с, полученные усреднением измерений по 12 спектрам. На рис. 10 показаны обе многокомпонентные D-линии Na I в спектре, полученном 21.10.2021. Помимо основных компонентов (околозвездная эмиссия «1» и межзвездные абсорбции «2», 3»), эти профили содержат и теллурическую эмиссию «4». Штриховой вертикальной линией на рисунке указано среднее положение двух межзвездных компонентов ($V_r = -7.0$ км/с и -36.7 км/с) линии K I 7696 Å. Среднее значение скорости V_r (DIBs) по 11 спектрам, $V_r(\text{DIBs}) = -7.04 \pm 0.21$, совпадает со скоростью по длинноволновому компоненту профиля D-линий Na I и K I. Системная скорость CI Sam LSR ≈ 50 км/с и наличие в спектре коротковолновой межзвездной абсорбции указывают на значительную удаленность CI Sam в рукаве Персея, согласно картине скоростей в Галактике [26], что согласуется с удаленностью звезды по параллаксу $\pi = 0.2101$ mas из каталога Gaia DR3.

Измерив в спектрах звезды эквивалентные ширины DIBs и используя калибровки [27], мы оценили избыток цвета $E(B - V)$ (см. табл. 2). Его усредненное значение по 9 DIBs полосам

Таблица 2. Эквивалентные ширины W_λ (DIBs), усредненные по спектрам CI Sam

λ , Å	W_λ (DIBs), mÅ	$E(B - V)$, mag
5705.20	54 ± 4	0.5
5780.48	376 ± 14	0.7
5797.06	126 ± 12	0.8
5849.81	38 ± 6	0.5
6195.98	51 ± 4	0.85
6203.05	121 ± 20	1.0
6379.32	76 ± 5	0.65
6613.62	188 ± 3	0.75
6660.71	51 ± 4	0.9

Примечание. В 3-м столбце указаны соответствующие значения избытка цвета $E(B - V)$ с использованием калибровок [27].

$E(B - V) = 0.74 \pm 0.06^m$. Используя стандартное значение отношения $A_v / E(B - V) = 3.2$, получаем оценку межзвездного поглощения $A_v = 2.4^m$. Авторы [8], анализируя оценки поглощения, полученные путем моделирования SED, указывают значения полного поглощения $A_v \approx 3.71^m$ и выше, до 4^m , что приводит к большей удаленности CI Cam, $d > 4$ кпк.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выборка B[e] звезд неоднородна, это хорошо иллюстрируют особенности наблюдаемых профилей эмиссий в работе [28], а также примеры моделирования профилей специфических линий [7]. Оптические спектры CI Cam содержат двухпиковые и однопиковые эмиссии металлов, а также однопиковые эмиссии линий H I и He I. Из перечня основных категорий линий [7], типичных для спектров звезд с феноменом B[e], отсутствуют нормальные профили типа P Cug. В настоящее время необходимо подтвердить присутствие абсорбций, возникающих в атмосфере звезды, найденных нами в спектрах 2022 г. Среди запрещенных линий доминируют низковозбужденные линии ионов, формирующиеся во внешней зоне пониженной плотности. Линии высокого возбуждения, подобные [S III], наблюдаются редко. В частности, эта эмиссия отсутствует в наших спектрах CI Cam. Однако пара однопиковых эмиссий высокого возбуждения [OIII] 4959 и 5007 Å присутствует постоянно. Их интенсивность невысока, всего 2–3% над уровнем локального континуума, однако, их положение стабильно и средняя лучевая скорость по этим запрещенным эмиссиям для каждой даты, указанная в 5-м столбце табл. 1, не выделяется из общей картины скоростей.

Необходимо остановиться и на особенностях эмиссии He II 4686 Å, поведение которой было использовано в работах [29, 30] для изучения переменности лучевой скорости в системе и определения орбитального периода. Используя данные, полученные на различных спектрографах умеренного и высокого разрешения, эти авторы выявили высокую амплитуду (до 500 км/с) переменности скорости и определили орбитальный период около 19 дней. Однако мы, имея однородную выборку спектров, не можем подтвердить этот результат и можем говорить лишь о редком появлении эмиссии вблизи длины волны 4686 Å. Данные наблюдений других авторов также не позволяют отождествить эту деталь с линией высокого возбуждения He II 4686 Å. Бартлетт и др. [3], получив в октябре

2016 г. два спектра высокого разрешения, также не нашли присутствия детали He II 4686 Å и подчеркнули ненадежность использования этой линии для определения периода. Напомним также результаты статьи [28], авторы которой, приводя характерные эмиссии для выборки B[e] звезд, подчеркивают отсутствие в спектре CI Cam самых типичных эмиссий для объектов этого типа: [Ca II] 7291 и 7324 Å, а также и [O I] 6300 и 6363 Å. В более поздней публикации [31] также отмечено отсутствие эмиссии He II 4686 Å.

Выше мы уже упоминали объект MWC 17, имеющий близкие особенности оптического спектра. Как показали на основании прямых H_α -изображений авторы [32], обе звезды, MWC 17 и CI Cam, выделяются в сообществе звезд с B[e] феноменом отсутствием протяженной H_α -оболочки. С другой стороны, совокупность ряда наблюдаемых особенностей спектра CI Cam роднит этот объект с другим сверхгигантом MWC 137. Долговременное изучение позволяет окончательно отнести MWC 137 к сверхгигантам с феноменом B[e] (см. детали и ссылки в статье [33]). Помимо пекулярного оптического спектра, этот объект интересен и тем, что является членом звездной группировки и окружен протяженной H_α -туманностью SH 2–266. В контексте нашей статьи B[e] сверхгигант MWC 137 полезен для сравнения его свойств со свойствами CI Cam. В оптическом спектре MWC 137 профиль H_α имеет близкие к CI Cam особенности, исключая его экстремальную ширину; эмиссии Fe II двухпиковые; как и в спектре CI Cam, в спектрах MWC 137 отсутствуют типичные дисковые эмиссии [O I] 5577 Å, [Ca II] 7291 и 7324 Å, а также фотосферные абсорбции. Это сходство деталей оптического спектра позволяет отнести CI Cam к B[e] сверхгигантам.

Анализ совокупности измерений лучевой скорости позволяет говорить о стабильности кинематического состояния в системе CI Cam. По измерениям лучевой скорости из положений многочисленных «прямоугольных» эмиссий в спектрах звезды найдена слабая переменность лучевой скорости в интервале $V_r(\text{emis} - d) = -(50.8 \div 55.7) + 0.2$ км/с. Лучевая скорость, соответствующая положению запрещенной линии [N II] 5754 Å, стабильна на протяжении всех ночей наблюдений, $V_r = -55.4 \pm 0.6$ км/с, и принята нами за системную. При этом сравнение профилей многочисленных «прямоугольных» эмиссий, включая и [N II] 5754 Å в спектрах различных ночей после вспышки 1998 г., указывает на систематическое изменение интенсивности пиков профилей.

5. ВЫВОДЫ

Перечислим наши основные результаты и выводы:

- для всех дат наблюдений CI Sam зарегистрированы «прямоугольные» профили двухпиковых запрещенных и разрешенных эмиссий ионов металлов. Интенсивности их коротковолновых пиков выше длинноволновых для всех дат наблюдений, за исключением спектра 13.01.2011 с обратным отношением V/R и спектра 18.11.2008 с равной интенсивностью пиков;
- выявлено существенное снижение интенсивностей всех эмиссий с «прямоугольными» профилями по мере удаления во времени от вспышки 1998 г.;
- профиль H_{α} не вполне симметричный и содержит дополнительные переменные детали. При постоянном положении профиля линии в целом наблюдаются изменения интенсивности вершины профиля и дополнительных деталей;
- кинематическое состояние в системе CI Sam стабильно, средняя скорость по эмиссиям для всех дат наблюдений $V_r(\text{aver}) = -53.1 \pm 0.5$ км/с. Полуамплитуда изменения (среднеквадратичное отклонение) составляет $\Delta V_r = 2.5$ км/с;
- поведение запрещенной линии [N II] 5754 Å не отличается от других эмиссий: лучевая скорость, соответствующая ее положению, стабильна в наших наблюдениях после 2002 г. и принята нами за системную, $V_r = -55.4 \pm 0.6$ км/с.;
- в спектрах CI Sam обнаружена редко наблюдаемая особенность — эмиссионный характер компонентов триплета OI 7773 Å;
- подтвержден вывод об отсутствии эмиссий [O I] 6300 и 6363 Å, [Ca II] 7291 и 7324 Å. Интенсивность и положение эмиссии вблизи 4686 Å изменяются существенно. Значительная интенсивность этой линии, около 16% от локального континуума, зарегистрирована лишь в спектре, полученном в сентябре 2015 г. Имеющиеся в настоящее время спектры высокого разрешения не дают возможности решить вопрос о надежности такой детали для оценки периода переменности звезды и о локализации этой эмиссии в системе CI Sam. Очевидна необходимость многократного увеличения объема высококачественных спектров;
- измерив эквивалентные ширины DIBs и используя опубликованные калибровки, мы оценили избыток цвета $E(B - V)$ за счет межзвездного поглощения. Его усредненное значение по 9 DIBs

полосам составляет $E(B - V) = 0.74 \pm 0.06^m$. Используя стандартное значение отношения $A_v / E(B - V) = 3.2$, получаем оценку межзвездного поглощения $A_v = 2.4^m$;

- в спектрах 2022 и 2023 гг. отождествлены фотосферные абсорбции Fe III, N II, Ti II и S II, что позволило получить средние значения скорости с хорошей точностью, $V_r(2022) = -32.4 \pm 0.5$ км/с (5 линий) и $V_r(2023) = -54.64 \pm 1.0$ км/с (9 линий), и дает основание для вывода о присутствии абсорбций и о переменности их положений. В спектре 08.12.2019 мы нашли также 5 абсорбций, средняя скорость для этой даты определена с пониженной точностью, $V_r(2019) = -55.6 \pm 2.0$ км/с. В спектре 2021 г. присутствуют лишь две абсорбции N II.

В целом можно говорить о стабильности кинематической картины в системе CI Sam в спящем состоянии, никаких драматических изменений на протяжении 20 лет мы не зафиксировали. При этом в спектрах CI Sam зарегистрирована переменность интенсивности эмиссий всех типов, что может быть проявлением неоднородности физических условий в оболочке звезды. Важным результатом работы мы считаем обнаружение для ряда моментов наблюдений абсорбций фотосферного типа с переменностью их среднего положения. Этот результат также требует накопления спектральных данных высокого разрешения. Очевидно, что система CI Sam нуждается в продолжении наблюдений и более глубоком изучении.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения на 6-метровом телескопе САО РАН поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ.

Мы благодарим за финансовую поддержку Российский Научный Фонд (грант № 22-12-00069)².

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы сведения из астрономических баз данных SIMBAD, VALD, SAO/NASA ADS, и Gaia DR3.

²<https://rscf.ru/project/22-12-00069/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *P. W. Merrill and C. G. Burwell*, 78, 87 (1933).
2. *J. S. Clark, A. S. Miroshnichenko, V. M. Larionov, V. M. Lyuty, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 356, 50 (2000).
3. *E. S. Bartlett, J. S. Clark, and I. Negueruela*, *Astron. and Astrophys.* 622, id. A93 (2019).
4. *H. J. G. L. M. Lamers, F.-J. Zickgraf, D. de Winter, L. Houziaux, and J. Zorec*, *Astron. and Astrophys.* 340, 117 (1998).
5. *A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, K. S. Bjorkman, and V. E. Panchuk*, *Astron. and Astrophys.* 390, 627 (2002).
6. *C. S. Beals*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 91, 966 (1931).
7. *F.-J. Zickgraf*, *Astron. and Astrophys.* 408, 257 (2003).
8. *R. I. Hynes, J. S. Clark, E. A. Barsukova, P. J. Callanan, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 392, 991 (2002).
9. *M. Kraus*, *Galaxies* 7(4), id 83 (2019).
10. *G. Maravelias, M. Kraus, L. S. Cidale, M. Borges Fernandes, M. L. Arias, M. Curé, and G. Vasilopoulos*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 480(1), 320 (2018).
11. *E. L. Robinson, I. I. Ivans, and W. F. Welsh*, 565(2), 1169 (2002).
12. *J. Yan, Q. Liu, and H. Hang*, *Astron. J.* 133(4), 1478 (2007).
13. *N. D. Thureau, J. D. Monnier, W. A. Traub, R. Millan-Gabet, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 398(3), 1309 (2009).
14. *V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, K. S. Bjorkman, A. N. Burenkov, et al.*, in *The B[e] Phenomenon: Forty Years of Studies*, Proc. of a Conf. held at Charles University, Prague, Czech Republic 27 June–1 July 2016; edited by A. Miroshnichenko, S. Zharikov, D. Korčáková, and M. Wolf; ASP Conf. Ser. 508 (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017), p. 307.
15. *C. S. Kochanek, B. J. Shappee, K. Z. Stanek, T. W.-S. Holzien, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 129(980), 104502 (2017).
16. *V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, A. B. Ivanchik, S. V. Yermakov, and V. A. Murzin*, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* 44, 127 (1997).
17. *B. E. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин*, *Астрон. журн.* 94(9), 808 (2017).
18. *М. В. Юшкин, В. Г. Клочкова*, *Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв.* No. 206 (2005).
19. *G. A. Galazutdinov*, *Astrophys. Bull.* 77(4), 519 (2022).
20. *E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and A. S. Miroshnichenko*, *Astrophys. Bull.* 65(2), 150 (2010).
21. *V. G. Klochkova, E. L. Chentsov*, *Astrophys. Bull.* 71(1), 33 (2016).
22. *A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and N. Manset*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 507(1), 879 (2021).
23. *F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Raybchikova, H. C. Stempels, and W. W. Weiss*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 138, 119 (1999).
24. *A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, S. V. Zharikov, et al.*, 700(1), 209 (2009).
25. *V. G. Klochkova, A. S. Miroshnichenko, V. E. Panchuk, N. S. Tavalzhanskaya, and M. V. Yushkin*, *Astron. Rep.* 66(5), 429 (2022).
26. *J. P. Vallée*, *Astron. J.* 135(4), 1301 (2008).
27. *J. Kos and T. Zwitter*, 774(1), id. 72 (2013).
28. *A. Aret, M. Kraus, and M. Šlechta*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 456(2), 1424 (2016).
29. *E. A. Barsukova, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, V. P. Goranskij, V. G. Klochkova, and N. V. Metlova*, *Astron. Rep.* 50(8), 664 (2006).
30. *E. A. Barsukova, A. N. Burenkov, V. P. Goranskij, S. V. Zharikov, et al.*, *Astrophys. Bull.* 78(1), 1 (2023).
31. *A. Aret, M. L. Arias, A. Torres, L. S. Cidale, and T. Eenmäe*, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía* 61B, 99 (2020).
32. *A. P. Marston and B. McCollum*, *Astron. and Astrophys.* 477(1), 193 (2008).
33. *M. Kraus, T. Liimets, C. E. Cappa, L. S. Cidale, et al.*, *Astron. J.* 154(5), id. 186 (2017).

LONG-TERM OPTICAL SPECTROSCOPY OF B[e] STAR CI CAM IN A QUIET STATE

V. G. Klochkova¹, A. S. Miroshnichenko^{2,3}, V. E. Panchuk¹

¹*Special Astrophysical Observatory RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia*

²*University of North Carolina at Greensboro, Greensboro, USA*

³*Fesenkov Astrophysical Institute, Observatory, Almaty, Kazakhstan*

High-resolution optical spectra of the B[e] star CI Cam were obtained on arbitrary dates 2002–2023 using the 6-meter BTA telescope with the echelle spectrograph NES. The variability over time of the powerful emissions of H α and He I profiles is found. For two-peaked emissions with «rectangular» profiles, the intensity ratio of blue-shifted and red-shifted peaks is $V/R \geq 1$, except one date. A decrease in the intensity of all two-peak emissions with «rectangular» profiles was revealed as they moved away in time from the 1998 outburst. The average radial velocity for emissions of this type for all observation dates varies in the range $V_r(\text{emis} - d) = -(50.8 - 55.7) + 0.2$ km/s. The half-amplitude of the change (standard deviation) is equal to $\Delta V_r = 2.5$ km/s. The velocity for single-peaked ion emissions (Si III, Al III, Fe III) differs little from the values of $V_r(\text{emis} - d)$, but the measurement accuracy for these emissions is worse: the average error for different dates ranges from 0.4 to 1.3 km/s. The systemic velocity is assumed to be $V_{\text{sys}} = -55.4 + 0.6$ km/s according to the stable position of the forbidden emission [N II] 5754 Å. The position of single-peak emissions [O III] 4959 and 5007 Å is also stable: $V_r([\text{O III}]) = -54.2 + 0.4$ km/s. Emissions [O I] 5577, 6300, 6363 Å, [Ca II] 7291 and 7324 Å are absent from the spectra. Appearance of the emission near 4686 Å is an infrequent event, its intensity rarely exceeds the noise level. Only a wide asymmetric emission with an intensity of about 16% above the continuum was registered in the spectrum for 03.09.2015. Questions arise about the use of this emission to estimate the period of variability of the star and about localization of this feature in the CI Cam system. The photospheric absorptions of N II, S II, and Fe III with a variable position are identified.

Keywords: massive stars, binary systems, CI Cam, optical spectra, variability