

УДК 524.338-33/54; 524.337.7-33/54

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ GSC 02197–00886

© 2014 А. А. Митрофанова¹, Н. В. Борисов², В. В. Шиманский¹¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 июля 2013 года; принята в печать 18 ноября 2013 года

В работе выполнен спектральный анализ физического состояния и эволюции в течение вспышки переменной типа WZ Sge GSC 02197–00886. Спектры системы, покрывающие полный орбитальный период в момент вспышки 8 мая 2010 г., в фазе поздней релаксации и в спокойном состоянии, получены на БТА САО РАН в 2010–2012 гг. По абсорбционным и эмиссионным линиям H I, He I и Fe II определены лучевые скорости для всех ночей наблюдений и построены карты доплеровской томографии в низком состоянии. Найдено, что во вспышке спектры объекта формировались в оптически толстом аккреционном диске с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 45\,000$ К и более горячем пограничном слое. В процессе релаксации системы диск последовательно становился оптически тонким в континууме и в эмиссионных линиях. В спокойном состоянии (июль 2012 г.) в непрерывном спектре доминировало излучение остывающего белого карлика с $T_{\text{eff}} = 18\,000$ К. Эмиссионные линии формируются механизмом флуоресценции рентгеновского излучения источника 1RXS J213807.1+261958 на поверхности холодной звезды. В работе предложен и реализован метод определения параметров белого карлика путем численного моделирования спектров системы в спокойном состоянии и их сравнения с наблюдаемыми. Показано, что в процессе релаксации системы с августа 2010 г. до июля 2012 г. эффективная температура белого карлика понизилась на $\Delta T_{\text{eff}} = 6000$ К. Получен набор параметров GSC 02197–00886 и показано их хорошее соответствие средним параметрам систем типа WZ Sge, представленным в литературе.

Ключевые слова: *новые, катаклизмические переменные—звёзды: карликовые новые—звёзды: индивидуальные: GSC 02197–00886*

1. ВВЕДЕНИЕ

6 мая 2010 г. была зарегистрирована вспышка Новой 2010 г. в Пегасе [1]. Предварительно объект был классифицирован как звезда типа WZ Sge. Звезды типа WZ Sge принадлежат к широкому классу катаклизмических переменных с дисковой аккрецией вещества вторичной компоненты (донора) на главную (аккретор). Подобные системы состоят из белого карлика в паре со звездой позднего спектрального класса (от G до M), близкой по характеристикам к звездам Главной последовательности. Вспышки систем типа WZ Sge характеризуются ростом блеска на $\Delta m_V = 6^m-9^m$ в течение 14–22 часов и последующим его падением до начального уровня за время от 60 до 200 суток. В стадии понижения блеска можно выделить фазы равномерного ослабления блеска и его скачкообразного уменьшения на $\Delta m_V = 2^m-3^m$ за 2–3 дня. Перед и в момент максимума вспышки на кривой блеска этих систем появляются колебания с амплитудой $\Delta m_V = 0^m.2-0^m.4$ [2, 3], называемые

сверхгорбами. Периоды, определяемые по сверхгорбам, оказываются близкими к орбитальным периодам, но меняются в процессе затухания вспышки. По мере ослабления блеска формы сверхгорбов изменяются с общей тенденцией к уменьшению их амплитуды до незначительных величин.

Считается [4, 5], что физическая природа вспышек звезд типа WZ Sge связана с нестабильностью аккреционного диска, обусловленной резким ростом скорости переноса вещества от донора [6]. В рамках альтернативной модели [7] предполагается накопление вещества в диске с его последующей быстрой аккрецией на белый карлик при потере вязкости.

Спектроскопические исследования типа WZ Sge весьма ограничены и не позволяют сделать однозначные выводы о их физической природе. Крамптон и др. [8] впервые получили спектры низкого разрешения WZ Sge через неделю после вспышки 1978 г. Они содержали переменные с фазой орбитального периода двухпиковые линии H I и He I, характерные для излучения аккреционных дисков.

В статье Войханской [9] приведены результаты наблюдений 6 и 8 июля 1978 г. (за пять месяцев до вспышки 1978 г.) и 27 июня 1981 г. (через полтора года после вспышки). Автором отмечены различия между состояниями системы до и после вспышки. Более полное исследование WZ Sge в спокойном состоянии выполнено Скидмор и др. [10]. Проведенная ими доплеровская томография объекта в линиях H I ($H\alpha$, $H\beta$, $B\gamma$, $B\delta$ и $P\alpha\beta$) и He I λ 20589 показала наличие оптически тонкого, однородного аккреционного диска с температурой до $T_{\text{eff}} \approx 10\,000$ К и оптически толстой, яркой области, совпадающей по положению и форме со струей вещества от вторичной компоненты. Изменение температуры белого карлика WZ Sge в ходе вспышки 2001 г. прослежено по наблюдениям на HST ультрафиолетовых спектров [11, 12]. В результате авторами было показано, что в момент вспышки температура белого карлика возросла до $T_{\text{eff}} \approx 35\,000$ К и в дальнейшем снизилась до $T_{\text{eff}} \approx 15\,000$ К за 1100 дней по закону охлаждения белых карликов с массой $M \approx 0.9 M_{\odot}$.

Все фазы вспышки 2007 г. системы GW Lib, которая также принадлежит к группе звезд типа WZ Sge, исследованы спектроскопически Ногами и др. [13], показавшими доминирование в фазах роста и максимума блеска излучения оптически толстого аккреционного диска с абсорбционными линиями H I и He I и слабой, узкой эмиссионной компонентой линии $H\alpha$. В аналогичном анализе, проведенном в [13] для вспышки 2007 г. системы V 455 And, были найдены мощные одиночные эмиссионные линии H I и He I в момент максимума блеска с их превращением в двухпиковые линии оптически тонкого аккреционного диска в стадии поздней релаксации.

Таким образом, накопленный наблюдательный материал для систем типа WZ Sge свидетельствует о том, что ослабление их блеска после вспышки обусловлено уменьшением оптической толщины аккреционного диска. Однако остаются неустановленными степень уменьшения темпа аккреции в спокойном состоянии и возможность постепенного накопления массы в аккреционном диске между вспышками. Картирование по данным фотометрических наблюдений аккреционных дисков WZ Sge [14] и V 455 And [15] выявило в их структуре неоднородности, по форме и размерам схожие с волнами плотности.

Вспышка Новой 2010 г. в Пегасе была зарегистрирована Ай и Ямаока [1] по снимкам, сделанным 6 мая 2010 г. в UT = 18^h30^m, когда звезда достигла блеска $m \approx 10^{\text{m}}.8$. Через сутки после обнаружения ее блеск возрос до $m \approx 9^{\text{m}}.0$ [16]. Ямаока и Итагаки [17] в наблюдениях 1 мая оценили блеск звезды $m > 15^{\text{m}}.0$. Объект являлся слабым компонентом оптической пары [18] с разделением около 3". На

удалении в 7" находится рентгеновский источник 1RXS J213807.1+261958 [19], возможно связанный с открытой переменной. Максимум блеска $m \approx 8^{\text{m}}.8$ звезда достигла 8 мая в UT $\approx 21^{\text{h}}$ [20]. Выполненные в эту и последующие ночи спектроскопические наблюдения низкого разрешения [21, 22] выявили в спектре мощный голубой континуум, широкие абсорбционные линии H I и He I с центральными эмиссиями и эмиссионные линии He II и C III + N III. Вспышка отождествлена со звездой GSC 02197–00886. Позднее Хадек [23] обнаружил более раннюю вспышку до $m \approx 9^{\text{m}}.8$ в ноябре 1942 г., что подтвердило ее принадлежность к звездам типа WZ Sge. Предварительная оценка ее фотометрического периода $P = 0^{\text{d}}.05455$ сделана в работе Като и др. [24]. Долговременный и обширный фотометрический мониторинг системы был проведен в работе Хохоло и др. [25]. Ослабление светимости GSC 02197–00886 до уровня $m_V \approx 16^{\text{m}}.2$ продолжалось около 140 дней и содержало фазу резкого падения блеска на $\Delta m_V \approx 2^{\text{m}} - 2^{\text{m}}.2$ через 24 дня после максимума вспышки. В максимуме вспышки амплитуда сверхгорбов составляла до $\Delta m_V = 0^{\text{m}}.2$, через 8–9 суток уменьшилась до $\Delta m_V \approx 0^{\text{m}}.12$ и возросла до $\Delta m_V \approx 0^{\text{m}}.25$ через 25 суток. Одновременно форма сверхгорбов претерпевала большие изменения от периода к периоду, что указывало на уменьшение оптической толщины диска и появление в нем нестабильных флуктуаций плотности. После возвращения системы в спокойное состояние ее блеск стал испытывать обычные нерегулярные колебания амплитудой до $\Delta m_V \approx 0^{\text{m}}.2$. С понижением блеска период сверхгорбов GSC 02197–00886 уменьшился до $P = 0^{\text{d}}.05435$ [25]. Поггиани [26] в результате краткого анализа спектров системы в 2010–2011 гг. показал, что после ее перехода в спокойное состояние в июне 2010 г. аккреционный диск стал оптически тонким в континууме и линиях H I и He I. Эти линии в спектрах, полученных в августе 2010 и 2011 гг., наблюдались эмиссионными, с двухпиковой формой профилей и сохраняли постоянную интенсивность. Излучение в эмиссионных линиях H I и He I, согласно выводу [26], связано с ударным возбуждением соответствующих уровней атомов. Отдельно Поггиани [26] отметил несимметричность и слабую переменность профиля линии $H\alpha$, что указывало на наличие неоднородностей в аккреционном диске GSC 02197–00886.

В настоящей работе мы выполнили длительные спектроскопические наблюдения GSC 02197–00886 в максимуме вспышки, фазах поздней релаксации и спокойного состояния. Полученные данные позволяют восстановить процесс эволюции аккреционной структуры и

Таблица 1. Журнал наблюдений GSC 02197–00886 в ночь 8/9 мая 2010 г. HJD — юлианская дата, φ — фаза орбитального периода, V_r — значения лучевых скоростей (в км с⁻¹), измеренных по абсорбционным (*) или эмиссионным (**) компонентам линий методом кросс-корреляции

HJD 2455000+	φ	V_r , км с ⁻¹					HJD 2455000+	φ	V_r , км с ⁻¹				
		H β *	H γ *	H δ *	He I 4471 Å*	He II 4686 Å**			H β *	H γ *	H δ *	He I 4471 Å*	He II 4686 Å**
325.416	0.941	-66	-83	-50	-48	-77	325.466	0.849	50	55	7	-9	0
325.421	0.023	-111	-55	-109	-73	-5	325.469	0.897	-110	-1	7	3	-38
325.424	0.077	-173	-179	-199	-168	0	325.472	0.945	-37	-41	-8	-127	-26
325.427	0.134	-136	-194	-152	-247	2	325.474	0.992	-122	-69	-80	-47	1
325.429	0.182	-223	-263	-168	-167	51	325.477	0.040	51	-96	-8	7	26
325.432	0.229	-124	-111	-226	-316	64	325.482	0.137	-21	1	-171	-127	13
325.435	0.277	-173	-192	-196	-167	77	325.502	0.484	-62	-101	-51	-11	115
325.437	0.324	-235	-193	-182	-140	51	325.504	0.534	-173	-152	-139	-87	-4
325.440	0.372	-136	-235	-95	-60	141	325.507	0.582	24	-28	7	-9	77
325.443	0.419	-383	-249	-66	-47	128	325.510	0.629	25	-1	22	61	64
325.445	0.467	-135	-69	-66	21	141	325.512	0.677	62	27	22	27	26
325.448	0.514	0	-1	-36	-9	153	325.515	0.724	98	28	66	87	3
325.451	0.562	1	-55	-8	7	115	325.517	0.772	0	27	23	34	13
325.453	0.612	62	125	-11	74	128	325.520	0.820	-19	-1	10	3	0
325.456	0.659	98	82	7	83	115	325.523	0.867	0	-43	-8	-6	-26
325.459	0.707	86	55	8	47	89	325.525	0.915	-111	-55	-37	-34	0
325.461	0.754	111	96	65	101	51	325.528	0.959	-283	-263	-227	-235	-102
325.464	0.802	37	69	42	35	51	325.531	0.012	-408	-332	-242	-260	-64

Notes: * По абсорбционным компонентам.

** По эмиссионным компонентам.

главной компоненты от начала вспышки до полной релаксации системы в спокойное состояние, а также определить набор фундаментальных параметров системы. Процесс релаксации привел к переходу аккреционного диска в оптически тонкое состояние, что сделало возможным прямые наблюдения и анализ спектра белого карлика. В Разделе 2 описаны проведенные наблюдения и их обработка. Разделы 3 и 4 содержат результаты исследования спектров и лучевых скоростей объекта, а доплеровская томография выполнена в Разделе 5. Раздел 6 посвящен моделированию спектров системы и определению ее параметров.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектроскопические наблюдения GSC 02197–00886 проводились на БТА САО РАН с применением редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO [27] в режиме спектроскопии с длинной щелью, гризмы VPHG 1200g (1200 штрихов/мм) и ПЗС-приемника EEV 42-40-CCD (2048 × 2048 пикселей размером 13.5 × 13.5 мкм). Спектральное разрешение составило $\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$ на пиксел для рабочего диапазона $\lambda = 4050\text{--}5750 \text{ \AA}$. В момент максимума вспышки $m \approx 9^m 5$ в ночь 8/9 мая 2010 г. (далее по тексту 08.05) получено

Таблица 2. Журнал наблюдений GSC 02197–00886 в ночи 4/5 августа 2010 г. и 21/22 июля 2012 г. HJD — юлианская дата, φ — фаза орбитального периода, V_r — значения относительных лучевых скоростей, измеренных по эмиссионным линиям методом Шафтера

HJD 2455000+	φ	V_r , км с ⁻¹					
		H β	H γ	H δ	He I 4471 Å	He I 5015 Å	Fe II 5169 Å
413.403	0.029	-41	87	-63	-146	303	164
413.459	0.041	-26	19	-149	-147	263	140
413.407	0.101	189	189	24	115	281	190
413.463	0.113	183	194	53	137	350	165
413.411	0.173	237	227	88	327	402	180
413.415	0.245	192	204	79	394	352	95
413.419	0.317	190	183	58	195	405	89
413.423	0.389	183	185	53	378	294	163
413.427	0.461	-97	25	-379	30	164	60
413.431	0.533	-360	-402	-543	-541	-336	-42
413.435	0.609	-331	-390	-484	-492	-236	43
413.439	0.681	-330	-384	-510	-498	-187	-76
413.387	0.737	-203	-247	-416	-478	-264	8
413.443	0.753	-296	-319	-482	-527	-291	23
413.391	0.809	-287	-338	-500	-532	-343	6
413.447	0.825	-307	-337	-510	-529	-374	26
413.395	0.885	-272	-336	-483	-513	-308	43
413.451	0.897	-328	-357	-513	-466	-216	50
413.399	0.957	-237	-249	-386	-399	-329	123
413.455	0.969	-201	-175	-326	-245	-59	142
1129.403	0.058	-177	-223	-395	-508	-477	-100
1129.407	0.135	-202	-237	-346	-522	-421	-96
1129.411	0.208	-153	-180	-231	-535	-461	-95
1129.415	0.281	-167	-211	-523	-545	-482	-160
1129.419	0.355	-105	-172	-414	-483	-423	-53
1129.423	0.428	-81	-81	-368	-366	-262	-84
1129.427	0.504	-76	-88	-215	-240	-128	23
1129.431	0.577	-80	-84	-85	-46	205	17
1129.435	0.651	-32	-48	64	267	389	49
1129.439	0.724	-12	-20	113	248	479	106
1129.443	0.797	-91	-82	87	271	457	114
1129.449	0.911	41	50	164	392	575	150
1129.453	0.984	-170	-197	-209	-50	184	-12
1129.457	0.058	-190	-234	-513	-460	-291	-18
1129.461	0.131	-200	-239	-496	-490	-362	-25

36 спектрограмм, в поздних фазах релаксации $m \simeq 16^{\text{m}}0$ в ночь 4/5 августа 2010 г. (далее 04.08) — 20 спектрограмм, и в спокойном состоянии в ночь 21/22 июля 2012 г. (далее 21.07) — 15 спектрограмм. Экспозиции составляли 180 с в ночь 08.05 и 300 с в ночи 04.08 и 21.07. В результате, в каждую ночь наблюдений получены непрерывные ряды спектров, охватывающие более одного орбитального периода системы. Наблюдения 8/9 мая проведены в условиях переменной облачности при зенитных расстояниях объекта $z = 45^\circ\text{--}69^\circ$ и размере его изображений более $d = 2''5$. Необходимость исключения из спектров GSC 02197–00886 в спокойном состоянии излучения близкого и сравнимого по яркости оптического спутника определила проведение его дальнейших наблюдений в ночи 04.08 и 21.07 только в идеальных условиях с размером звездных изображений около $d = 1''0$. В результате отношение сигнал/шум в континууме для большинства спектрограмм ночи 08.05 превышает $S/N = 150$, а для спектрограмм ночей 04.08 и 21.07 составляет $S/N \approx 60$. Каждую ночь получались спектры фотометрических стандартов BD +25°2465 и NZ 44 [28]. Для проведения калибровок по длинам волн использовался спектр Ar-Ne-He-лампы. В Таблицах 1 и 2 представлены данные о времени наблюдений HJD, фазах φ орбитального периода, согласно эфемериде [25],

$$\text{HJD} = 2455322.4152 + 0.05435 E,$$

и значениях относительных лучевых скоростей, измеренных по абсорбционным и эмиссионным компонентам разных линий.

Первичная обработка спектрограмм выполнена в ручном режиме средствами пакета редукиции и анализа астрономических данных MAXIM DL. При ее проведении особое внимание уделено полному исключению излучения оптического спутника, попадавшего в процессе наблюдений в щель спектрографа одновременно с GSC 02197–00886. Последующая нормировка спектров на континуум и их анализ реализованы в рамках пакета Origin. При проведении нормировки в исследуемом интервале длин волн на неискаженных линиях частях спектра выбирались 15–25 точек, принимаемых в качестве континуума. Уровень континуума для всего интервала определялся их аппроксимацией многочленами 5–7 степени с промежуточной отбраковкой отклоняющихся на 3σ значений.

3. ОПИСАНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ СПЕКТРОВ

Наборы нормированных спектров в различных фазах орбитального периода для всех ночей

наблюдений представлены на Рис. 1 и 2. Отметим, что фазовая привязка спектров остается условной, т.к. строгая фотометрическая эфемериде GSC 02197–00886 отсутствует вследствие переменной ее периода.

Спектры системы в момент максимума вспышки 08.05 (см. Рис. 1) имели мощный голубой континуум с широкими ($\Delta\lambda \approx 70 \text{ \AA}$) абсорбционными линиями водорода (H β –H δ), нейтрального гелия (He I $\lambda\lambda$ 4471, 4921) и ионизованного железа (Fe II λ 5169), а также с неотожествленной депрессией $\lambda\lambda$ 5015–5085. Данная деталь испытывает доплеровские смещения, синхронные со смещениями других абсорбционных линий, и, возможно, является блендой линий He I $\lambda\lambda$ 5015, 5047. Эмиссионный спектр GSC 02197–00886 во вспышке представлен узкими ($\Delta\lambda \approx 25 \text{ \AA}$) компонентами линий H I и He I внутри абсорбций, широкими ($\Delta\lambda \approx 30 \text{ \AA}$) линиями He II $\lambda\lambda$ 4686, 5411 и боуэновской блендой C III + N III λ 4640. Как показано ниже, наблюдаемое отсутствие в спектрах абсорбционных линий He II и C III + N III объясняется их блендированием более сильными эмиссионными компонентами. Как видно на Рис. 1, эмиссионные и абсорбционные компоненты испытывают асинхронные доплеровские смещения со сдвигом по фазе примерно на четверть периода. Детальный анализ смещений эмиссионных компонент линий H I показал отличие их фазовой зависимости от зависимости для эмиссий He II. Абсорбционные компоненты всех линий H I и He I смещаются синхронно. Поэтому мы пришли к выводу, что спектр GSC 02197–00886 во вспышке формировался в трех пространственно различных областях: относительно холодной и оптически толстой, излучающей в континууме с абсорбционными линиями; оптически тонкой, излучающей в эмиссионных линиях H I и He I; и более горячей и оптически тонкой, излучающей в линиях He II и C III + N III.

Спектры GSC 02197–00886 в стадии поздней релаксации системы (04.08.2010) и спокойном состоянии (21.07.2012) качественно совпадают (см. Рис. 2): содержат слабый, плоский континуум с широкими ($\Delta\lambda > 200 \text{ \AA}$) и мелкими абсорбционными линиями водорода, содержащими эмиссии. Данные линии не меняются в наблюдениях каждой ночи, но существенно усилены в спектрах 2012 г. Поэтому мы пришли к выводу, что в наблюдаемом непрерывном спектре GSC 02197–00886 в стадии поздней релаксации и спокойном состоянии доминирует излучение остывающего белого карлика. Одновременно в спектрах системы наблюдаются умеренно широкие ($\Delta\lambda = 20\text{--}25 \text{ \AA}$) эмиссионные компоненты водородных линий (H β –H δ) и эмиссионные линии He I $\lambda\lambda$ 4471, 4713, 4921, 5015 и Fe II $\lambda\lambda$ 4551, 4581, 5169, 5268, 5323. Слабая

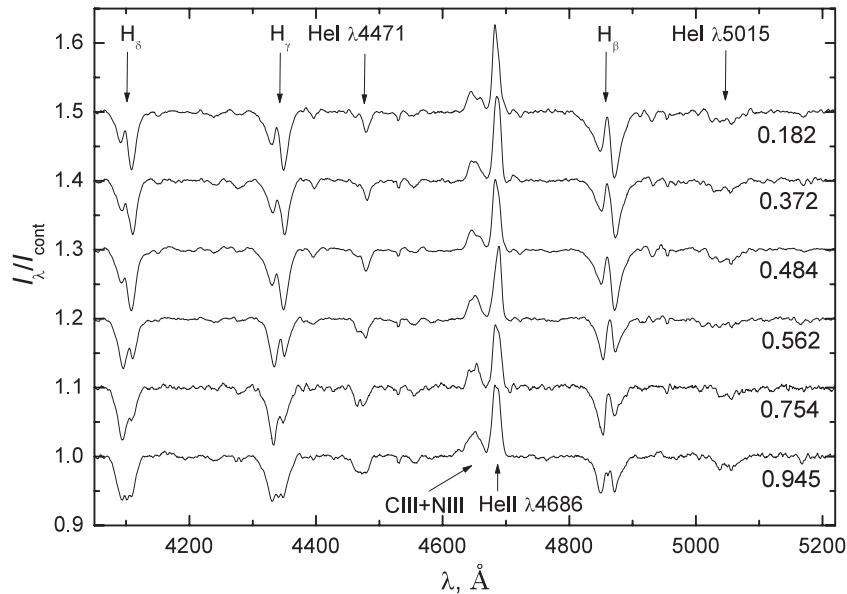


Рис. 1. Нормированные спектры GSC 02197–00886 для разных фаз в ночь 8/9 мая 2010 г. Спектры сдвинуты вдоль вертикальной оси на 0.1. Отмечены наиболее сильные линии и бленды.

эмиссионная линия He II $\lambda 4686$ найдена только в спектрах ночи 04.08 и блендирована линией He I $\lambda 4713$. Двухпиковая форма профилей всех линий обусловлена их частичным формированием в аккреционном диске. Усредненная по орбитальному периоду интенсивность линий H I снизилась в 2012 г. на 25–30%, а линий He I — на 45–55%, свидетельствуя об уменьшении оптической толщины диска. Замедленное ослабление эмиссионных компонент линий водорода (прежде всего H β) показывает, что аккреционный диск в стадии поздней релаксации в 2010 г. имел в них оптическую толщину, большую единицы. Переменность профилей всех эмиссионных линий с чередующимся усилением красного и синего пиков отражает существование не менее двух излучающих областей: протяженной и практически однородной дисковой структуры и яркого, компактного региона со скоростью движения не менее $V_T = 300 \text{ км с}^{-1}$. В наблюдениях 2012 г. амплитуда переменности профилей увеличилась, что вызвано уменьшением оптической толщины аккреционного диска и его вклада в полное излучение в линиях. В целом качественный анализ спектров GSC 02197–00886 в ночи 04.08 и 21.07 позволяет сделать вывод о переходе аккреционного диска в оптически тонкое состояние с очень незначительным темпом аккреции в системе.

4. ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Для определения лучевых скоростей мы применяли методы Шафтера [29, 30] и выборочной кросс-корреляции спектров [31]. Лучевые скорости V_T в ночь 08.05 измерялись методом кросс-корреляции по абсорбционным компонентам линий H β –H δ и He I $\lambda 4471$ и отдельно по эмиссионной линии He II $\lambda 4686$. При определении смещений абсорбционных компонент учитывались интервалы спектра шириной $\Delta\lambda = 80 \text{ \AA}$, центрированные на лабораторные длины волн линий, с исключением участков шириной $\Delta\lambda = 30 \text{ \AA}$, содержащих эмиссионные компоненты. Смещение линии He II $\lambda 4686$ измерялось в пределах интервала шириной $\Delta\lambda = 40 \text{ \AA}$. В качестве спектров сравнения применялись усредненные 3–5 последовательных спектрограмм с высоким отношением S/N и слабой интенсивностью эмиссионных компонент. Далее эти спектрограммы измерялись наряду с остальными полученными спектрограммами. При анализе наблюдений ночей 04.08 и 21.07 метод Шафтера применялся для нахождения величин V_T по эмиссионным линиям H β –H δ , He I $\lambda\lambda 4471, 5015$ и Fe II $\lambda 5169$. Предварительно спектры для этих ночей были перенормированы с проведением локального континуума по крыльям абсорбционных профилей линий H I. Расстояние между гауссианами, описывающими в методе Шафтера синее и красное крылья исследуемой линии, задавалось

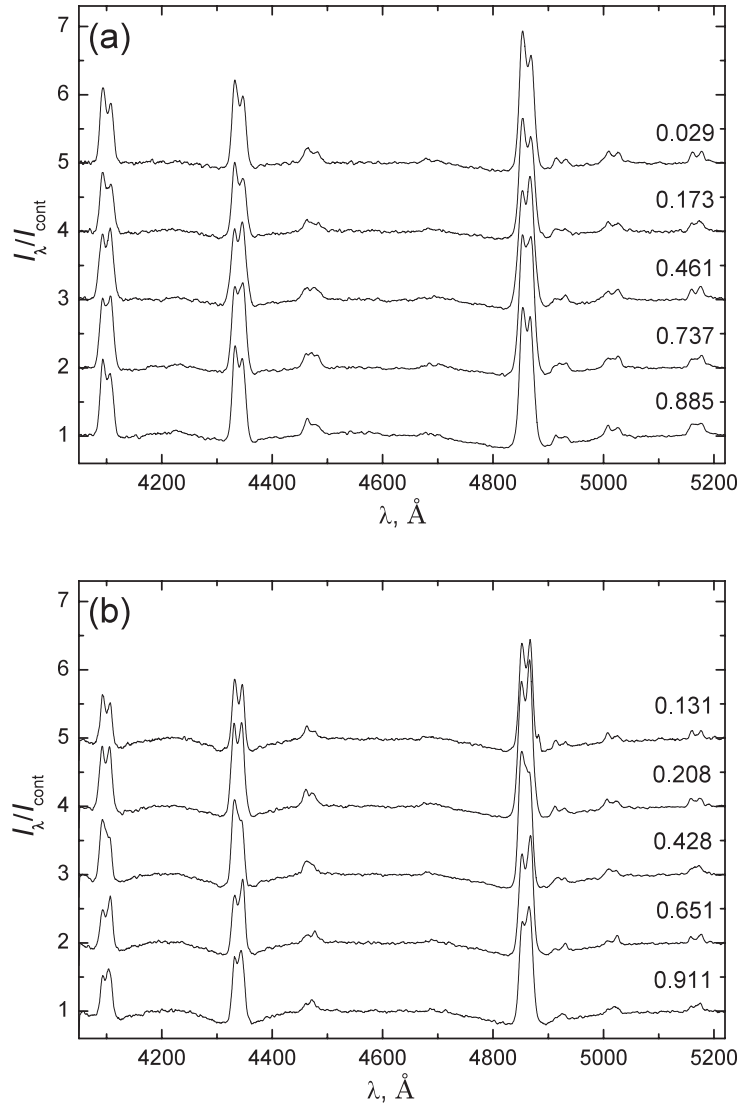


Рис. 2. Нормированные спектры GSC 02197–00886 для разных фаз в ночи 4/5 августа 2010 г. (а) и 21 июля 2012 г. (б). Спектры имеют последовательный сдвиг вдоль вертикальной оси на 1.

Таблица 3. Амплитуды лучевых скоростей K (в км с^{-1}), определенных методами кросс-корреляции (K^1), Шафтера (K^2) и по картам доплеровской томографии (K^3) в разные ночи наблюдений

	Дата	H β	H γ	H δ	He I 4471 Å	He I 5015 Å	Fe II 5169 Å	He II 4686 Å
K^1	08.05	124.7 ± 24.8	123.2 ± 20	111.1 ± 12.5	126.8 ± 15.3			81.0 ± 6.5
K^2	04.08	290.6 ± 28.6	328.6 ± 29.7	329.2 ± 30.7	464.1 ± 37.7	400.2 ± 39.5	95.5 ± 12.3	
K^3	04.08	300	440		480	490	530	
K^2	21.07	81.4 ± 15.9	103.2 ± 17.8	275.7 ± 41.2	439.5 ± 32.5	511.0 ± 26.5	107.2 ± 0.0	
K^3	21.07	460	400	450	500	520	390	

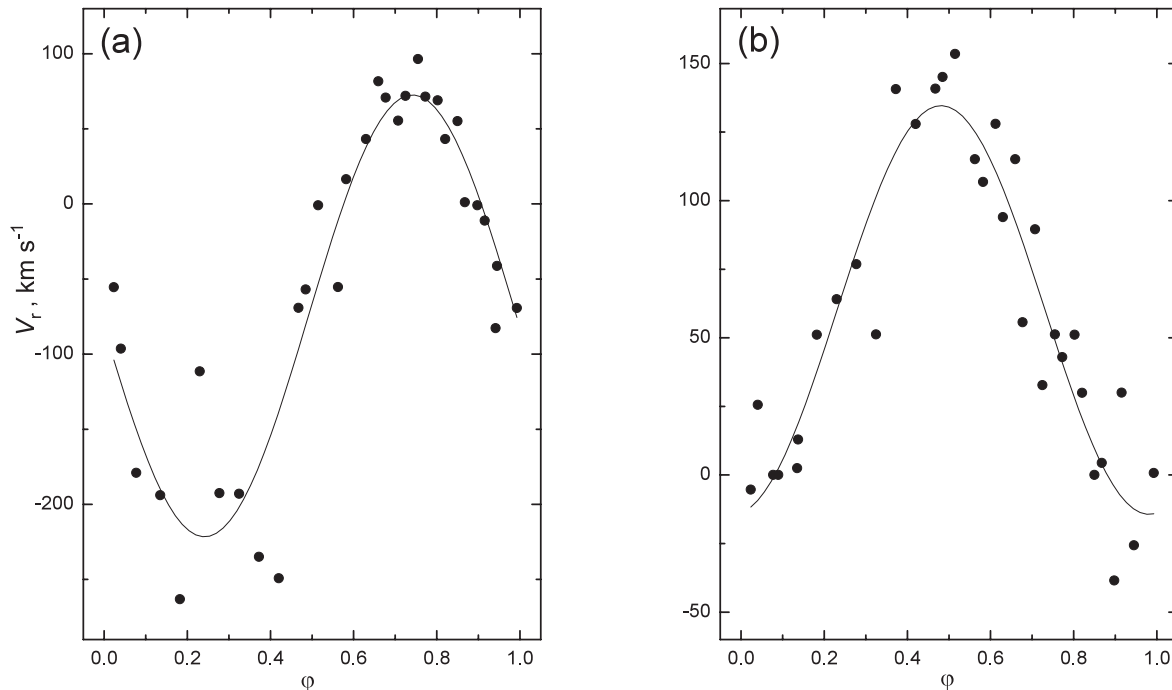


Рис. 3. Кривые лучевых скоростей GSC 02197–00886, полученных по абсорбционной линии $H\gamma$ (а) и эмиссионной линии $He\ II\ \lambda\ 4686$ (б) в ночь максимума вспышки 8/9 мая 2010 г.

условием минимизации ошибок определения амплитуды лучевых скоростей кругового движения.

Результаты измерений приведены в Таблицах 1 и 2 и для избранных линий на Рис. 3 и 4. Найденные амплитуды лучевых скоростей содержатся в Таблице 3. Наборы полученных лучевых скоростей аппроксимированы в рамках модели круговой орбиты.

Скорости, измеренные по всем абсорбционным линиям в спектрах вспышки, изменяются по синусоидальному закону (см. Рис. 3) с совпадающей в пределах ошибок определения амплитудой $K \approx 121\text{ км с}^{-1}$. Изменения лучевых скоростей V_r , измеренных по линии $He\ II\ \lambda\ 4686$, также соответствуют круговому движению, но с амплитудой $K \approx 81\text{ км с}^{-1}$ и опережением по фазе на $\Delta\varphi \approx 0.25$. С учетом формирования абсорбционных линий в оптически толстом диске, найденную по ним амплитуду скоростей K можно связать с орбитальным движением белого карлика. Однако заметим, что наблюдаемые профили линий $H\ I$ и $He\ I$ являются суперпозицией эмиссионных и абсорбционных компонент с разными амплитудами и фазами смещений. Линия $He\ II\ \lambda\ 4686$ и другие эмиссии $He\ II$ и $C\ III + N\ III$ образуются в наиболее горячей области диска. В случае симметричности

формы этой области в плоскости диска ее лучевая скорость будет аналогична скорости главной компоненты. В результате измерения скорости во вспышке получено две оценки амплитуды лучевой скорости, возможно связанной с орбитальным движением белого карлика.

Лучевые скорости, измеренные по эмиссионным линиям в стадии поздней релаксации и спокойном состоянии, имеют отклонения от модели кругового движения, особенно заметные в ночь 04.08 (см. Рис. 4). Они отличаются резким переходом от больших положительных значений к отрицательным с последующим ростом по закону, близкому к синусоидальному. Аналогичное изменение скоростей наблюдается в системах с большим эксцентриситетом (невозможным для GSC 02197–00886) или при попадании области формирования линий в частичное или полное затмение. Как видно из представленных в литературе [24, 25] кривых блеска, в системе отсутствует затмение главной компоненты и аккреционного диска. Таким образом, затмеваемая область образования эмиссионных линий может быть облучаемая часть поверхности вторичной компоненты или горячая струя, оттекающая от нее в районе первой точки Лагранжа. Справедливость этого предположения будет рассмотрена ниже. Как видно из Таблицы 3, получен-

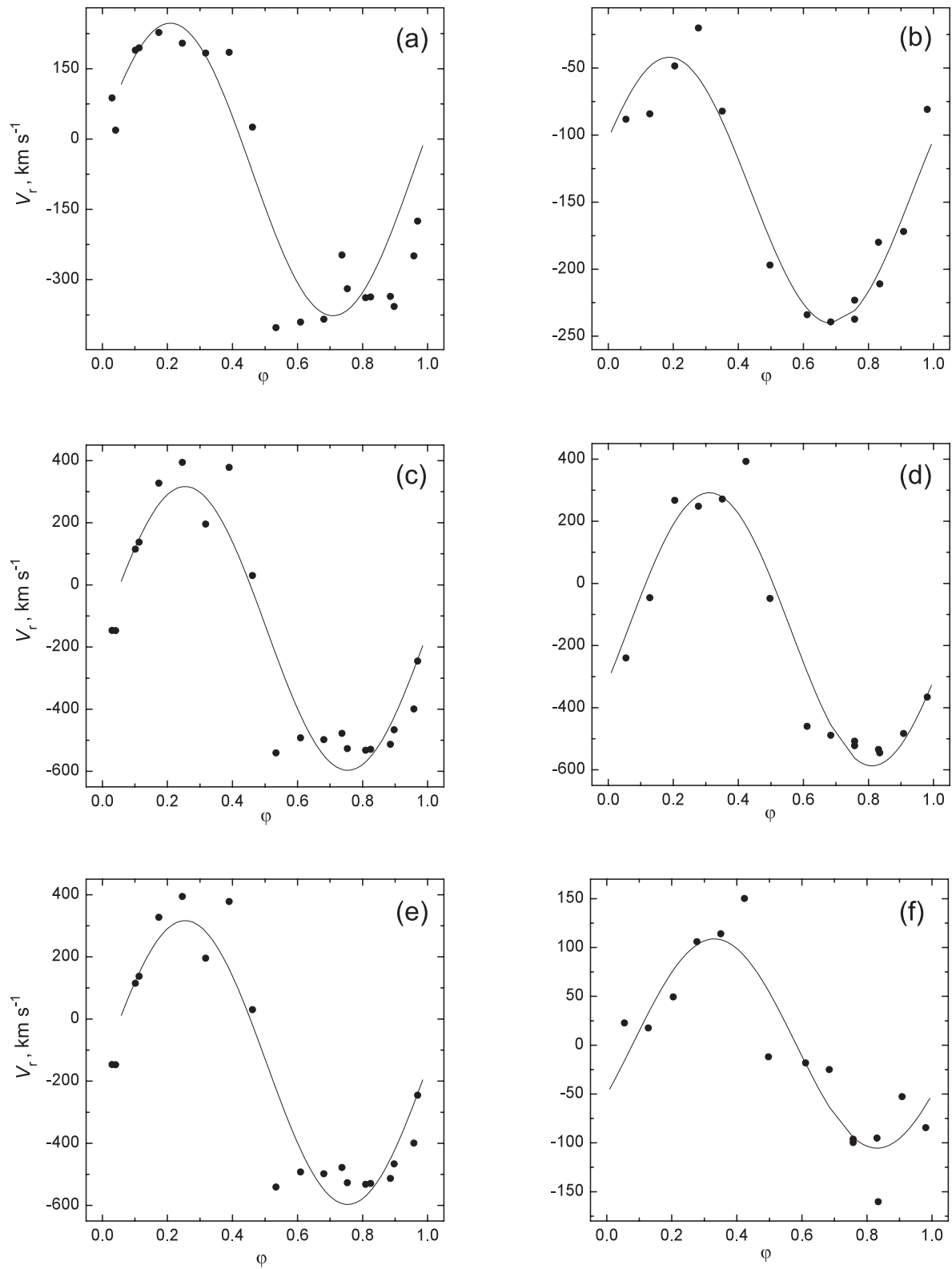


Рис. 4. Кривые лучевых скоростей GSC 02197–00886, измеренные по эмиссионным линиям $\text{H}\gamma$ (a, b), $\text{He I } \lambda 4471$ (c, d), $\text{He I } \lambda 5015$ (e) и $\text{Fe II } \lambda 5169$ (f) в ночи 4/5 августа 2010 г. (левая колонка) и 21/22 июля 2012 г. (правая колонка).

ные лучевые скорости по разным линиям имеют большой разброс амплитуд. Линии He I в целом показывают близкие амплитуды $K \approx 450 \pm 40 \text{ км с}^{-1}$ в обе ночи наблюдений. Смещения линий H I в ночь 04.08 соответствовали амплитуде кругового движения $K \approx 310 \text{ км с}^{-1}$, но в спокойном состоянии она уменьшилась для линий H β и H γ примерно на 200 км с^{-1} . Найденная по этим линиям в ночь 21.07 амплитуда $K \approx 100 \text{ км с}^{-1}$ хорошо соответствует результатам, полученным для обеих ночей по линии Fe II $\lambda 5169$. Приведенные значения амплитуд и их изменения, а также изменения в спектрах, позволяют предположить, что наблюдаемые эмиссионные линии формировались, как минимум, в двух областях (аккреционном диске и на поверхности вторичной компоненты) с изменяющимся вкладом в образование линий разных элементов. Подробный анализ конфигурации этих областей будет сделан при описании результатов доплеровской томографии системы, а возможность использования полученных амплитуд лучевых скоростей для описания движения компонент GSC 02197–00886 исследована при определении ее параметров (см. ниже).

5. ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

Доплеровское картирование GSC 02197–00886 выполнено нами для ночей 04.08 и 21.07 с использованием программного комплекса Шпруита [32], реализующего метод минимизации энтропии, с анализом всех наблюдаемых эмиссионных линий H I, He I и Fe II. Карты, полученные по линиям H I, представлены на Рис. 5, а по линиям He I и Fe II — на Рис. 6.

В спектрах 04.08 излучение в линиях водорода формируется в однородной, аморфной дисковой структуре с внутренним радиусом около $V_{\text{circ}} = 900 \text{ км с}^{-1}$ и с размытой внешней границей. Высокая яркостная однородность диска в линиях H I (прежде всего в H β) подтверждает вывод о его большой оптической толщине в них. Одновременно, как видно на Рис. 5с и 5е, в системе находилось значительное количество вещества (с $V < 250 \text{ км с}^{-1}$), излучающего в линиях H γ и H δ . В результате мы пришли к выводу, что в стадии поздней релаксации GSC 02197–00886 была погружена в расширяющуюся оболочку с температурой газа $9000 \text{ К} \leq T_{\text{eff}} \leq 11000 \text{ К}$, оцененной из факта ее невидимости в линиях He I (см. Рис. 6). Яркое пятно с блеском менее 25% от интегральной светимости диска, расположенное в области $V_x = 350\text{--}450 \text{ км с}^{-1}$, наблюдается на картах, полученных по линиям H β и H γ . В картах для линий He I $\lambda\lambda 4471, 5015$ (см. Рис. 6) это пятно занимает аналогичное положение $V_x \approx 500 \text{ км с}^{-1}$, но доминирует в излучении

системы вследствие низкой яркости ее дисковой структуры. Аккреционный диск в линиях He I имеет четкие внутреннюю ($V_{\text{circ}} = 1300 \text{ км с}^{-1}$) и внешнюю ($V_{\text{circ}} = 600 \text{ км с}^{-1}$) границы, практически однороден в более сильной линии He I $\lambda 4471$ и имеет флуктуации яркости в более слабой He I $\lambda 5015$. Отмеченные флуктуации сосредоточены в основном на внешней границе диска, по своей форме не соответствуют волне плотности в диске и, вероятно, являются результатом его гидродинамических возмущений после взаимодействия с перетекающим веществом холодной звезды. В линии Fe II $\lambda 5169$ границы яркого диска четко выражены и имеют скорости кругового движения $V_{\text{circ}} = 900 \text{ км с}^{-1}$ и $V_{\text{circ}} = 300 \text{ км с}^{-1}$. Отличием томограмм в этой линии является существование второго яркого пятна с координатами $V_x = -380 \text{ км с}^{-1}$, $V_y = -330 \text{ км с}^{-1}$, т.е. отстоящего от основного пятна на $\Delta\phi \approx 145^\circ$ и имеющего близкую скорость кругового движения. Как показано в расчетах Бискало и др. [33], природа подобного пятна, возможно, связана с повторным ударом в диск струи от аккретора, если в результате их первого взаимодействия часть ее вещества была отражена диском.

Томограммы, полученные по наблюдениям в ночь 21.07, однозначно указывают на дальнейшее понижение оптической толщины аккреционного диска во всех линиях. Карты, построенные по линиям H I (см. Рис. 5b, 5d, 5f), указывают, что аккреционный диск становится умеренно ярким с границами на $V_{\text{circ}} = 800 \text{ км с}^{-1}$ и $V_{\text{circ}} = 500 \text{ км с}^{-1}$. Он однородный в наиболее сильной линии H β и имеет нарастающие неоднородности с ослаблением линии. Яркое пятно с координатами $V_x = -400 \text{ км с}^{-1}$, $V_y = 200 \text{ км с}^{-1}$, очевидно, соответствует основному пятну в томограммах ночи 08.04. Отметим, что вклад данного пятна в полное излучение в линиях H I оказался сравним с интегральным вкладом диска, а вклад стационарной общей оболочки стал незначительным. Одновременно в линиях H I в ночь 21.07 наблюдается второе пятно яркости, аналогичное пятну в линии Fe II для ночи 08.04. Появление этого пятна в линиях H I с его одновременным ослаблением в линии Fe II (см. Рис. 6f) говорит о понижении температуры газа в зоне вторичного взаимодействия диска и аккрецирующей струи. Объяснение этого явления требует специализированных расчетов, но, вероятно, оно вызвано уменьшением доли вещества, отраженного от диска при первом ударе струи. В линиях He I и Fe II дисковая структура оказывается слабо выраженной, сильно неоднородной и имеет границы на $V_{\text{circ}} = 900 \text{ км с}^{-1}$ и $V_{\text{circ}} = 500 \text{ км с}^{-1}$, т.е. близкие к границам для линий H I. Флуктуации яркости в

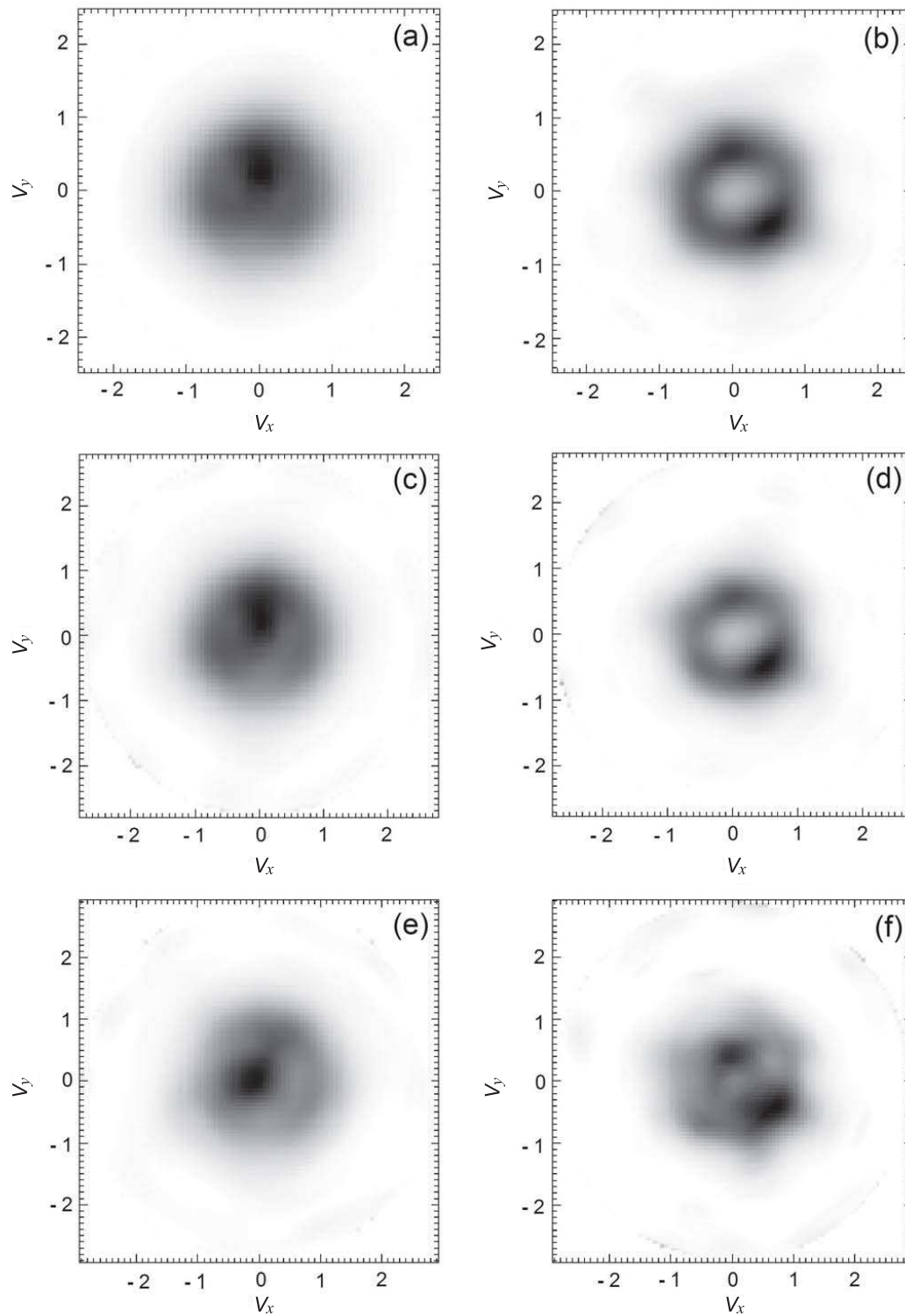


Рис. 5. Доплеровские карты GSC 02197–00886, построенные по линиям $H\beta$ (a, b), $H\gamma$ (c, d) и $H\delta$ (e, f) в ночи 4/5 августа 2010 г. (левая колонка) и 21/22 июля 2012 г. (правая колонка). Масштаб — 100 км с^{-1} .

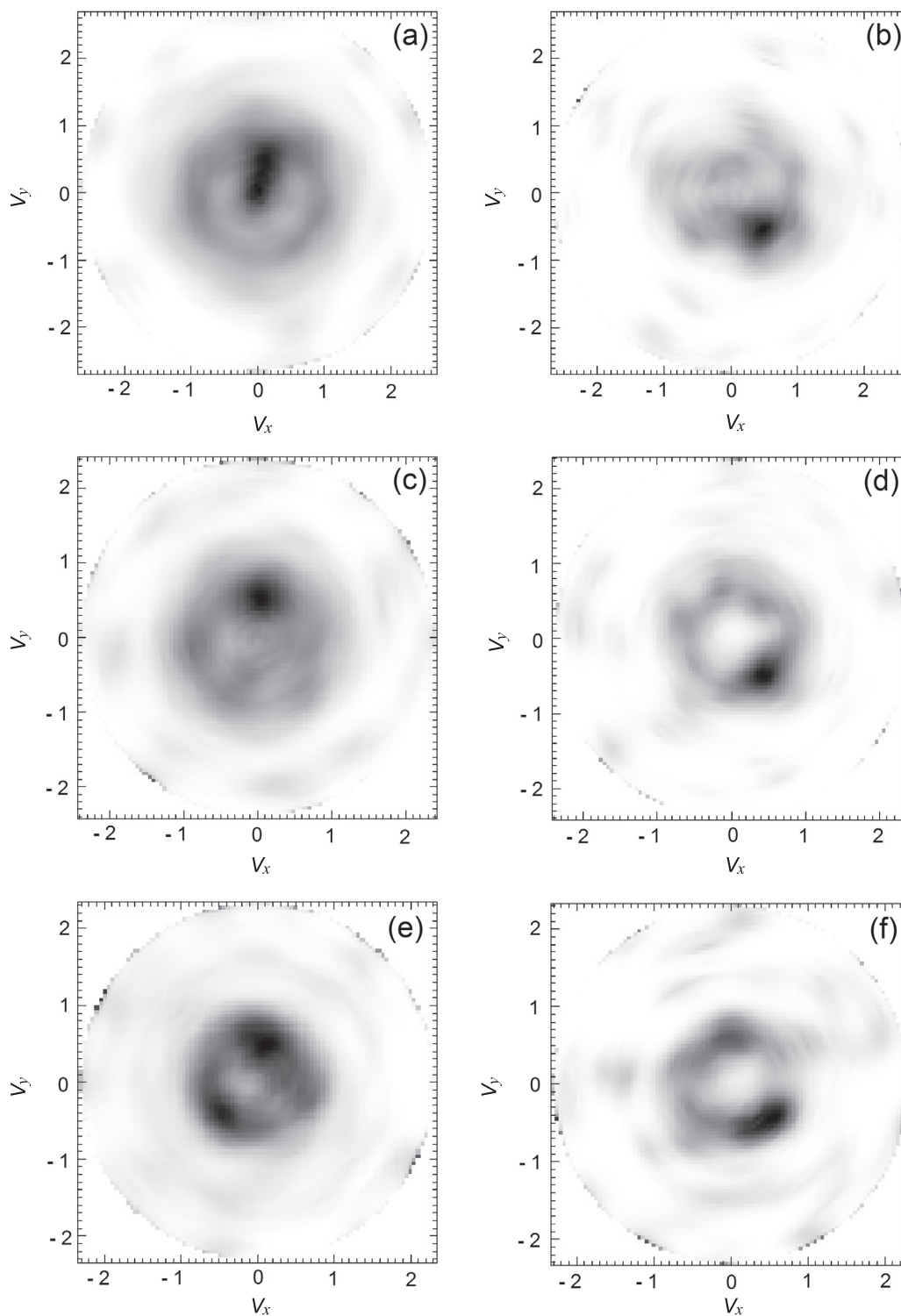


Рис. 6. Доплеровские карты GSC 02197–00886, построенные по линиям He I $\lambda 4471$ (a, b), He I $\lambda 5015$ (c, d) и Fe II $\lambda 5169$ (e, f) в ночи 4/5 августа 2010 г. (левая колонка) и 21/22 июля 2012 г. (правая колонка). Масштаб — 100 км с^{-1} .

диске не совпадают в томограммах, построенных по разным линиям, и не подтверждают наличие в нем волн плотности. Яркое пятно, наблюдаемое в линиях He I, по координатам полностью соответствует пятну в линиях H I.

Резюмируя результаты доплеровской томографии GSC 02197–00886, можно сделать вывод о наличии в ней следующих источников излучения в эмиссионных линиях.

(1) Аккреционный диск, оптически толстый только в линиях H I в стадии поздней релаксации. При переходе системы в спокойное состояние поверхностная яркость диска падала с сохранением радиуса его внешней границы и увеличением радиуса внутренней границы, существенным в линиях He I. Возникающие при этом флуктуации яркости не имели систематического характера, т.е. в диске отсутствовали волны плотности.

(2) В томограммах видна умеренно холодная, оттекающая общая оболочка системы, регистрируемая только в линиях H I в стадии поздней релаксации.

(3) Основное яркое пятно, видимое во всех линиях, вероятно, связано с облучением рентгеновским источником 1RXS J213807.1+261958 поверхности вторичной компоненты. Как показано в работе Ивановой и др. [34], такие эффекты наиболее сильны для атомов и ионов с высокими потенциалами ионизации, что хорошо согласуется с максимальной яркостью пятна в линиях He I.

(4) Второе пятно яркости, излучающее в линиях H I и Fe II с невысокими потенциалами возбуждения энергетических уровней, вероятно, образовано ударным взаимодействием диска и аккрецирующей струи.

Формирование основного яркого пятна на поверхности вторичной компоненты позволяет оценить амплитуду скорости ее орбитального движения по измерениям доплеровских карт. Значения амплитуды найдены нами по разным линиям для центра пятна, описываемого двумерной гауссианой, и представлены в Таблице 3. Для линий He I эти значения в пределах $\Delta K = 100 \text{ км с}^{-1}$ совпадают с данными, найденными методом Шафтера. Близкие значения (с различиями менее $\Delta K = 70 \text{ км с}^{-1}$) получены по картам для всех линий H I (кроме $H\beta$ в ночь 04.08) и Fe II. Таким образом, область главного яркого пятна является компактной и оптически толстой для линий элементов с существенно разными потенциалами ионизации, т.е. внутри пятна имеются большие градиенты электронной температуры и плотности газа, что подтверждает предположение о его нахождении на поверхности вторичной компоненты.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Представленные в Таблице 3 амплитуды лучевых скоростей GSC 02197–00886 характеризуются большой вариацией значений и в ряде случаев не связаны с орбитальным движением компонент системы. В частности, амплитуда $K^1 = 121.4 \pm 6.4 \text{ км с}^{-1}$, полученная по абсорбционным линиям во вспышке, задает функцию масс вторичной компоненты на уровне $F(M_2) = 0.0096 \pm 0.0020 M_{\odot}$. В результате при любой оценке амплитуды K^2 не выполняется условие $\sin i \leq 1$. Часть амплитуд, полученных по эмиссионным линиям, отражает движение аккреционного диска или перетекающей на него горячей струи и не может использоваться для описания движения вторичной компоненты.

В итоге определение физических параметров GSC 02197–00886 выполнено нами численным моделированием ее спектров. Как отмечено выше, в спектрах системы в фазах релаксации и спокойного состояния доминирует излучение остывающего белого карлика с плоским континуумом и широкими абсорбционными линиями H I. Поэтому мы провели согласование теоретических и наблюдаемых профилей этих линий, что дало параметры атмосферы белого карлика. Дополнительно мы определили параметры атмосферы для области аккреционного диска, доминирующей в оптическом излучении вспышки GSC 02197–00886, путем согласования ее теоретических и наблюдаемых спектров в ночь 08.05.

Предварительно с применением программного комплекса ATLAS 12 [35] в версии, адаптированной для персональных компьютеров и свободно предоставленной нам В. В. Цимбалом, мы рассчитали сетки гидростатических, плоскопараллельных моделей атмосфер белых карликов с параметрами: $T_{\text{eff}} = 10\,000\text{--}90\,000 \text{ К}$ с шагом $\Delta T_{\text{eff}} = 2000 \text{ К}$, $\log g = 6.5\text{--}9.5$ с шагом $\Delta \log g = 0.25$, при $[\text{He}/\text{H}] = -3 \text{ dex}$ и $[\text{M}/\text{H}] = -5 \text{ dex}$. Одновременно была получена сетка моделей атмосфер голубых субкарликов солнечного химического состава с параметрами: $T_{\text{eff}} = 30\,000\text{--}60\,000 \text{ К}$ с шагом $\Delta T_{\text{eff}} = 5000 \text{ К}$, $\log g = 5.0\text{--}6.5$ с шагом $\Delta \log g = 0.5$. Расчет синтетических спектров этих атмосфер проведен с использованием программного комплекса SYNTH [36], частично модернизированного в [37]. При моделировании спектров учитывались все источники непрерывного поглощения, линии H I, He I, He II с уширением согласно теориям Вайдл–Куппер–Смитта [38] и Грима [39], а также линии тяжелых элементов из списков [40]. Шкала солнечных содержаний химических элементов бралась из работы Андерса и Гревесса [41].

При согласовании наблюдаемых и теоретических спектров исключались участки, содержащие все эмиссионные линии и эмиссионные компоненты сложных линий. Ширина таких участков составляла $\Delta\lambda = 80 \text{ \AA}$ для наблюдений 04.08, 21.07 и $\Delta\lambda = 30 \text{ \AA}$ для наблюдений 08.05, а их центрами считались лабораторные длины волн соответствующих линий. Оптимальное согласие спектров определялось минимальностью среднеквадратичных уклонений теоретических и наблюдаемых потоков в диапазоне длин волн $\lambda = 4060\text{--}5100 \text{ \AA}$. Данные ночей 04.08 и 21.07 анализировались совместно с учетом требования постоянства силы тяжести на поверхности белого карлика. Результаты согласования спектров представлены на Рис. 7. Очевидно, что для спокойного состояния нами достигнуто удовлетворительное описание широких абсорбционных профилей линий H I, особенно хорошее для ночи 21.07 с меньшей интенсивностью эмиссионных компонент. Сила тяжести на поверхности белого карлика составила $\log g = 8.25 \pm 0.10$, а его эффективная температура понижалась от $T_{\text{eff}} = 24000 \pm 1500 \text{ K}$ для ночи 04.08 до $T_{\text{eff}} = 18000 \pm 1000 \text{ K}$ для ночи 21.07. При исследовании эволюции ультрафиолетовых спектров WZ Sge Годон и Сион [12] показали уменьшение температуры белого карлика от $T_{\text{eff}} \approx 25\,000 \text{ K}$ через 100 дней после вспышки до $T_{\text{eff}} \approx 17\,500 \text{ K}$ через 400 дней, что хорошо соответствует нашим оценкам для GSC 02197–00886. Этот факт подтверждает сделанный ранее вывод о доминировании излучения белого карлика в оптических спектрах системы на поздних стадиях релаксации.

С использованием найденных параметров атмосферы белого карлика и теоретических моделей Паней и др. [42] мы определили его массу $M_1 = 0.74 \pm 0.03 M_{\odot}$ и радиус $R_1 = 0.0105 \pm 0.0010 R_{\odot}$ в предположении доминирования кислорода в ядре звезды. Отметим, что применение моделей с доминированием углерода изменяет наши оценки массы не более чем на $\Delta M = 0.02 M_{\odot}$.

Моделирование спектров GSC 02197–00886 в ночь 08.05 определяет параметры атмосферы основной излучающей области как $\log g = 6.0 \pm 0.2$, $T_{\text{eff}} = 45000 \pm 3000 \text{ K}$ и позволяет аккуратно описать практически все наблюдаемые абсорбционные детали. Значение $\log g = 6.0$ в комбинации с массой белого карлика дает оценку верхнего предела радиуса излучающей области аккреционного диска на уровне $R_{\text{AD}} = 0.14 R_{\odot}$. Таким образом, в фазе вспышки GSC 02197–00886 ее наблюдаемый абсорбционный спектр формировался в области аккреционного диска, максимально приближенной к поверхности белого карлика, т.е. внешние зоны

диска оставались оптически тонкими. При вычитании теоретических потоков из наблюдаемых в ночь 08.05 (см. Рис. 7а) был получен эмиссионный спектр системы не искаженный абсорбционными деталями и содержащий линии H I, He I, He II, C II, C III, N III, O II и Si IV. Высокие потенциалы возбуждения уровней, соответствующих линиям He II и N III, при доминировании последних над линиями H I и He I, свидетельствуют об электронной температуре излучающей плазмы $T_{\text{eff}} \approx 100\,000 \text{ K}$, которая характерна для области пограничного слоя между аккреционным диском и белым карликом. Поэтому мы пришли к выводу, что наиболее корректная оценка скорости движения белого карлика, вероятно, может быть сделана по эмиссионной линии He II $\lambda 4686$.

Для определения параметров вторичной компоненты использовалась связь радиуса ее полости Роша R_{RL2} , ее массы M_2 и орбитального периода системы [43]:

$$\frac{(R_{\text{RL2}}/R_{\odot})^3}{(M_2/M_{\odot})} = 7.5807 P_{\text{orb}}^2. \quad (1)$$

Считая для полуконтактных систем $R_{\text{RL2}} = R_2$ и используя значение $P_{\text{orb}} = 0^{\text{d}}05435$ [25] совместно с эволюционными треками маломассивных звезд Главной последовательности солнечного химического состава [44], мы вычислили значения $M_2 = 0.13 M_{\odot}$ и $R_2 = 0.14 R_{\odot}$. В результате отношение масс компонент GSC 02197–00886 оценивается нами как $q = M_2/M_1 = 0.17$, а большая полуось ее орбиты $A = 0.575 \pm 0.006 R_{\odot}$. Итоговый набор параметров GSC 02197–00886 представлен в Таблице 4.

Используя все известные параметры системы, можно найти возможные (с точностью до неизвестного $\sin i$) величины функций масс компонент ($f(M_1) = 0.535 (\sin i)^3$, $f(M_2) = 0.0029 (\sin i)^3$) и амплитуд лучевых скоростей их орбитального движения ($K_1/\sin i = 80 \pm 2 \text{ км с}^{-1}$, $K_2/\sin i = 455 \pm 8 \text{ км с}^{-1}$). Полученные теоретические оценки амплитуд (с дополнительным предположением $i > 70^\circ$ [25]) имеют близкие аналоги среди представленных наблюдаемых значений. Например, амплитуда движения белого карлика хорошо совпадает с найденной по эмиссионной линии He II $\lambda 4686$ в данных ночи 08.05, что подтверждает сделанное нами ранее предположение о ее формировании в области пограничного слоя. Амплитуда движения вторичной компоненты в пределах ошибок определения согласуется с величинами, измеренными методом Шафтера по линиям He I $\lambda\lambda 4471, 4921$ в спектрах ночей 04.08 и 21.07. Таким образом, использование линий He I в спектрах релаксации и спокойного состояния

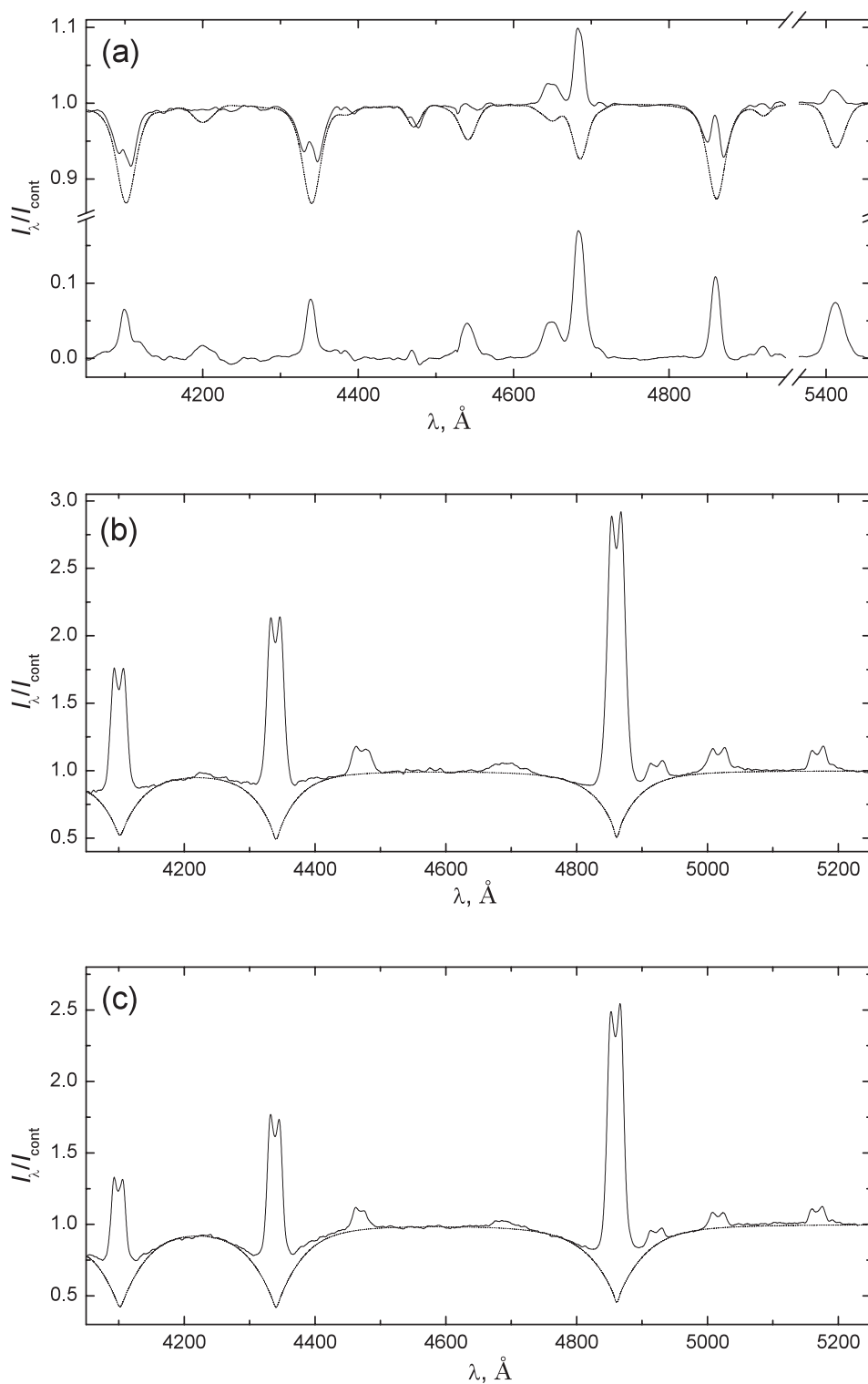


Рис. 7. Сравнение наблюдаемых (сплошные линии) и теоретических (пунктирные линии) спектров GSC 02197–00886 в ночи 8/9 мая 2010 г. (а), 4/5 августа 2010 г. (б) и 21/22 июля 2012 г. (с). На панели (а) внизу показан результат вычитания теоретических спектров из наблюдаемых.

системы позволяет корректно определить лучевые скорости движения вторичной компоненты.

В целом, полученные нами параметры GSC 02197–00886 совпадают со средними для карликовых новых. В новейшем каталоге Риттера и Колба [45] представлены параметры только двух систем типа WZ Sge, по ним средние значения $M_1 = 0.85 \pm 0.04 M_\odot$ и $M_2 = 0.078 \pm 0.006 M_\odot$. Для близкого класса переменных типа SU UMa по 34 системам средние оценки масс компонент $M_1 = 0.76 \pm 0.19 M_\odot$, $M_2 = 0.12 \pm 0.04 M_\odot$. Ограничение данного списка 17 системами с орбитальными периодами, близкими к GSC 02197–00886, уменьшает эти значения до $M_1 = 0.69 \pm 0.19 M_\odot$, $M_2 = 0.10 \pm 0.04 M_\odot$. Таким образом, набор параметров GSC 02197–00886 не противоречит ее принадлежности к звездам типа WZ Sge.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ спектров GSC 02197–00886 за 2010–2012 гг. показал, что ее эволюция соответствует современным представлениям о физике звезд типа WZ Sge. В максимуме вспышки система имела оптически толстый аккреционный диск с температурой основного излучающего слоя $T_{\text{eff}} \approx 45\,000$ К и радиусом менее $R_{\text{AD}} = 0.14 R_\odot$. Наличие в спектрах вспышки эмиссионных линий ионов гелия и элементов группы CNO говорит о том, что часть наблюдаемого излучения формировалась в более горячей области, максимально приближенной к поверхности белого карлика, т.е. в пограничном слое. Последующая эволюция системы протекала с непрерывным уменьшением оптической толщины диска, сопровождаемой на первых этапах увеличением радиуса его внутренней границы и исчезновением горячего пограничного слоя. В результате в течение 24 суток после вспышки равномерно понижались блеск системы и амплитуда сверхгорбов. Резкое падение блеска в начале июня 2010 г. на $\Delta m_V \approx 2^m - 2.2^m$, очевидно, вызвано переходом диска в оптически тонкое состояние и началом доминирования излучения белого карлика. Мы полагаем, что одновременный рост амплитуды орбитальной переменности блеска связан с изменением природы ее формирования. Согласно наблюдениям [25], орбитальная кривая блеска GSC 02197–00886 через 25–33 дня после резкого падения яркости приобрела синусоидальную форму, что соответствует действию эффектов отражения в тесных двойных системах. Эффективная температура белого карлика в этот момент заметно превышала значение $T_{\text{eff}} = 24\,000$ К, полученное нами для ночи 04.08. Поэтому основным механизмом генерации орбитальной переменности

Таблица 4. Параметры GSC 02197–00886

	Компонента	
	Главная	Вторичная
P_{orb} , d	0.05435 ± 0.000002 *	
HJD _{max}	2455332.4152 *	
K , км с ⁻¹	85 ± 10	480 ± 30
q	0.17 ± 0.02	
T_{eff} , К	24000 ± 1000 ** 18000 ± 1000 ***	≈3200
log g	8.25 ± 0.10	5.26 ± 0.06
M/M_\odot	0.74 ± 0.03	0.13 ± 0.02
R/R_\odot	0.0105 ± 0.0010	0.14 ± 0.02
A/R_\odot	0.575 ± 0.006	
i	70°–80°	

Notes: * Данные Хохола и др. [25].
** Значение 04.08.2010.
*** Значение 21.07.2012.

блеска являлась переработка мягкого ультрафиолетового излучения главной компоненты на поверхности спутника. Последующее остывание белого карлика приводило к медленному понижению светимости системы и более быстрому (пропорционально T_{eff}^4) уменьшению эффектов отражения и амплитуды орбитальной переменности блеска. При прохождении стадии поздней релаксации аккреционный диск последовательно становился оптически тонким во все более сильных линиях, и в спокойном состоянии доминировало только излучение в линиях H β и H γ . Основная часть излучения остальных линий формировалась на поверхности вторичной компоненты вследствие флуоресценции из-за облучения рентгеновским потоком от источника 1RXS J213807.1+261958. Резюмируя наш анализ эволюции GSC 02197–00886 после вспышки, следует сделать вывод о практически полной потере диском аккрецируемого вещества, обусловленной прекращением его переноса с поверхности вторичной компоненты. Таким образом, наши результаты соответствуют модели вспышки карликовых новых, предложенной в работе Хамеури и др. [6]

Особую важность для будущих исследований карликовых новых типа WZ Sge имеет вывод о доминировании в оптическом спектре спокойного состояния GSC 02197–00886 излучения белого карлика. В результате становится возможным прямое

определение параметров белых карликов в таких системах путем применения предложенного нами метода моделирования непрерывных спектров и абсорбционных профилей линий H I и их сравнения с наблюдаемыми. Косвенным подтверждением сделанного нами вывода является совпадение оценок скорости охлаждения белых карликов в GSC 02197–00886 (в данной работе) и WZ Sge в [12]. Отметим, что авторы [12] исследовали спектры в ультрафиолетовом диапазоне, где коэффициент поглощения излучения белого карлика веществом диска должен быть на несколько порядков выше, чем в оптической области, и может серьезно исказить результаты. Поэтому анализ оптических спектров является более перспективным при определении параметров главных компонент и систем в целом. Для проверки корректности этого вывода и эффективности метода определения параметров необходимо получение и анализ серии высококачественных спектров систем типа WZ Sge и родственных им карликовых Новых типа SU UMa в спокойном состоянии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою признательность Комитету по тематике больших телескопов РАН за поддержку наших исследований. Особо благодарим М. М. Габдеева за полезное обсуждение результатов и В. В. Цымбала за предоставление программного комплекса по расчету моделей атмосфер одиночных звезд. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Академии наук Республики Татарстан (проект 12–02–97006–а). А. А. Митрофанова благодарит РФФИ за финансирование работ по программе мобильности молодых ученых (проект 13–02–90726–мол-рф-нр). Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. Yi and H. Yamaoka, Central Bureau Electronic Telegram No. 2273, 1 (2010).
2. J. Patterson and H. Richman, Publ. Astronom. Soc. Pacific **103**, 735 (1991).
3. T. Kato, Publ. Astronom. Soc. Japan **48**, 777 (1996).
4. J. Patterson, G. Masi, M. W. Richmond, et al., Publ. Astronom. Soc. Pacific **114**, 721 (2002).
5. R. Matsui, M. Uemura, A. Arai, et al., Publ. Astronom. Soc. Japan **61**, 1081 (2009).
6. J.-M. Hameury, J.-P. Lasota, and B. Warner, Astronom. and Astrophys. **353**, 244 (2000).
7. Y. Osaki, ASP Conf. Ser. **245**, 57 (2001).

8. D. Crampton, J. B. Hutchings, and A. P. Cowley, Astrophys. J. **234**, 182 (1979).
9. N. F. Voikhanskaya, Sov. Astron. **27**, 541 (1983).
10. W. Skidmore, E. Mason, S. B. Howell, et al., Monthly Notices Royal Astronom. Soc. **318**, 429 (2000).
11. K. S. Long, E. M. Sion, B. T. Gansicke, and P. Szkody, Astrophys. J. **602**, 948 (2004).
12. P. Godon, E. M. Sion, F. Cheng, et al., Astrophys. J. **642**, 1018 (2006).
13. D. Nogami, K. Hiroi, Y. Suzuki, et al., ASP Conf. Ser. **404**, 52 (2009).
14. S. Kitsionas, O. Giannakis, E. T. Harlaftis, et al., Rev. Mex. Astron. Astrophys. **20**, 234 (2004).
15. M. Uemura, T. Kato, T. Ohshima, and H. Maehara, Publ. Astronom. Soc. Japan **64**, 92 (2012).
16. S. Nakano and K. Kaneko, Central Bureau Electronic Telegram No. 2274, 1 (2010).
17. H. Yamaoka and K. Itagaki, Central Bureau Electronic Telegram No. 2274, 2 (2010).
18. A. Henden, Central Bureau Electronic Telegram No. 2274, 3 (2010).
19. C. B. Haakonsen and R. E. Rutledge, Astrophys. J. Suppl. **184**, 138 (2009).
20. K. Itagaki, S. Kaneko, D. A. Yi, and P. Camilleri, Central Bureau Electronic Telegram No. 2274, 5 (2010).
21. M. L. Graham, H. Broekhoven-Fiene, A. H. Parker, et al., IAU Circular No. 2274, 6 (2010).
22. G. Tovmassian, D. Clark, and S. Zharikov, IAU Circular No. 2283, 1 (2010).
23. R. Hudec, Astron. Tel. No. 2619, 1 (2010).
24. T. Kato, H. Maehara, M. Uemura, et al., Publ. Astronom. Soc. Japan **62**, 1525 (2010).
25. D. Chochol, N. A. Katysheva, S. Yu. Shugarov, et al., Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso **42**, 39 (2012).
26. R. Poggiani, New Astronomy **19**, 62 (2013).
27. V. L. Afanas'ev and A. V. Moiseev, Astronomy Letters **31**, 194 (2005).
28. R. C. Bohlin, Astronom. J. **111**, 1743 (1996).
29. A. W. Shafter, Astrophys. J. **267**, 222 (1993).
30. D. G. Yakin, V. F. Suleimanov, N. V. Borisov, et al., Astronomy Letters **37**, 845 (2011).
31. V. V. Shimanskii, N. V. Borisov, N. A. Sakhbullin, and A. E. Surkov, Astronomy Reports **48**, 563 (2004).
32. H. C. Spruit, arXiv:astro-ph/9806141 (1998).
33. D. V. Bisikalo, A. A. Boyarchuk, A. A. Kilpio, and O. A. Kuznetsov, Astronomy Reports **45**, 676 (2001).
34. D. V. Ivanova, N. A. Sakhbullin, and V. V. Shimanskii, Astronomy Reports **48**, 476 (2004).
35. R. L. Kurucz, Mem. della Soc. Astron. Italiana Suppl. **8**, 14 (2005).
36. N. E. Piskunov, in *Proc. Int. Conf. on Stellar Magnetism*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Nauka, St. Petersburg, 1992), p. 92.
37. N. N. Shimanskaya, I. F. Bikmaev, and V. V. Shimansky, Astrophysical Bulletin **66**, 332 (2011).
38. C. R. Vidal, J. Cooper, and E. W. Smith, Astronom. and Astrophys. Suppl. **25**, 37 (1973).

39. H. R. Griem, *Astrophys. J.* **132**, 883 (1960).
40. R. L. Kurucz, CD-ROMs (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA, 1994).
41. E. Anders and N. Grevesse, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 197 (1989).
42. J. A. Panei, L. G. Althaus, and O. G. Benvenuto, *Astronom. and Astrophys.* **353**, 970 (2000).
43. C. Knigge, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **373**, 484 (2006).
44. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
45. H. Ritter and U. Kolb, *VizieR On-line Data Catalog* (2011).

Analysis of Cataclysmic Variable GSC 02197–00886 Evolution

A. A. Mitrofanova, N. V. Borisov, V. V. Shimansky

We present the spectral analysis of the physical state and evolution of the WZ Sge-type cataclysmic variable GSC 02197–00886. The spectra of the system, covering the total orbital period at the time of the outburst on May 8, 2010, at the late relaxation stage, and in the quiescent state, were obtained at the SAO RAS 6-m BTA telescope in 2010–2012. From the absorption and emission H I, He I, and Fe II lines, we have determined the radial velocities for all the nights of observations and constructed the maps of Doppler tomography for the quiescent state. It was found that during the outburst the spectra of the object were formed in an optically thick accretion disk with an effective temperature of $T_{\text{eff}} \approx 45\,000$ K and in a hotter boundary layer. During the relaxation of the system, the accretion disk gradually became optically thinner in the continuum and in the emission lines. In the quiescent state (July 2012), the continuous spectrum was dominated by the radiation of the cooling white dwarf with $T_{\text{eff}} = 18\,000$ K. The emission lines are formed on the surface of the cool star by the X-ray irradiation of the 1RXS J213807.1+261958 source. We propose a method for determining the parameters of the white dwarf, based on the numerical modeling of the system spectra in the quiescent state and their comparison with the observed spectra. It is shown that the effective temperature of white dwarf has decreased by $\Delta T_{\text{eff}} = 6000$ K during the relaxation from August 2010 to July 2012. We have obtained a set of parameters for GSC 02197–00886 and shown their good agreement with the average parameters of the WZ Sge-type systems, presented in the literature.

Keywords: *novae, cataclysmic variables—stars: dwarf novae—stars: individual: GSC 02197–00886*