

УДК 524.387-6:520.84; 524.31.087

О ФОРМИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ TW CVV

© 2016 В. В. Шиманский¹, А. А. Митрофанова¹,
Н. В. Борисов², С. Н. Фабрика², А. И. Галеев^{1,3}¹Казанский федеральный университет, Казань, 420008 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия³Академия наук Республики Татарстан, Казань, 420111 Россия

Поступила в редакцию 11 февраля 2016 года; принята в печать 13 августа 2016 года

В работе выполнен анализ оптического излучения молодой предкатаклизмической переменной (ПП) TW CVV. Спектроскопические и фотометрические наблюдения объекта проведены на 6-м телескопе БТА САО РАН и Российско-Турецком телескопе РТТ-150. Формы кривых блеска системы с амплитудами $\Delta m > 0^m7$ близки к синусоидальным, что характерно для молодых ПП с sdO-субкарликами и углом наклона орбиты меньше 45° . Оптический спектр содержит доминирующее излучение горячего субкарлика с линиями поглощения H I и He II и сильные эмиссионные линии, формирующиеся в атмосфере вторичного компонента под действием эффектов отражения. По анализу Боуэновской бленды $\lambda\lambda 4630-4650 \text{ \AA}$ измерены лучевые скорости холодной звезды, впервые позволившие определить массы компонентов. Проведено численное моделирование кривых блеска и спектров TW CVV с определением полного набора ее фундаментальных параметров. Параметры горячей звезды указывают на ее принадлежность к классу sdO-субкарликов в стадии перехода на последовательность остывающих белых карликов. Отсутствие у нее наблюдаемой планетарной туманности обусловлено продолжительной эволюцией системы после стадии общей оболочки. Вторичный компонент обладает избытком светимости, характерным для других молодых ПП с sdO-субкарликами. Его положение на диаграмме «возраст–избыток светимости» указывает на корректность полученного набора фундаментальных параметров TW CVV и схожесть ее эволюционного и физического состояния с другими объектами типа VE UMa.

Ключевые слова: двойные: тесные — субкарлики — звезды: атмосферы — методы: спектроскопические

1. ВВЕДЕНИЕ

В теории эволюции маломассивных двойных систем первоначально предполагалось, что прохождение ими стадии общей оболочки приводит к формированию полуразделенных катаклизмических переменных (КП) с наличием аккреции. Однако проведенный Риттером [1] анализ данных о ряде объектов, ранее причисленных к классу КП, показал их полную разделенность. Риттер [1] выделил новый класс тесных двойных систем (ТДС), названный предкатаклизмическими переменными (ПП) и являющийся промежуточной стадией между системами с общими оболочками и КП. Основным признаком данных систем является наличие горячего субкарлика или остывающего белого карлика в паре с холодной звездой, близкой по своим характеристикам к Главной последовательности (ГП). В настоящее время отсутствует ограничение на размеры больших полуосей или продолжительность орбитальных периодов таких объектов, но в классическом каталоге Риттера

и Колба [2] в класс ПП включены системы с $P_{orb} < 25^d$. Отметим, что данное ограничение делается названием класса условным, так как только ПП с периодами $P_{orb} < 1^d$ способны эволюционировать к стадии КП [1]. Предкатаклизмические переменные образуются из широких звездных пар с периодами порядка нескольких лет в процессе их первого прохождения фазы общей оболочки. В этой фазе происходит быстрая потеря звездами своего углового момента, сближение компонентов, уменьшение орбитального периода и последующий срыв общей оболочки, уносящий избыточный угловой момент.

ПП принято разделять на группы [3] в зависимости от времени их эволюции t после сброса общей оболочки и физического состояния горячей звезды: молодые с sdO-субкарликами ($t < 10^6$ лет) и с sdB-субкарликами ($t < 10^7$ лет) и старые с белыми карликами разных масс ($t > 10^7$ лет). Объекты первой группы сформировались из звездных

пар с начальными массами $M \geq 4M_{\odot}$, т. е. принадлежат к молодому населению галактического диска. На момент выделения группа содержала семь надежно классифицированных членов и до десяти возможных кандидатов. Предварительный анализ параметров для части систем [4] показал, что их вторичные компоненты обладают существенным избытком светимости. Природа избытка, возможно, связана с сильными эффектами отражения в молодых ПП [5] или с остаточным возбуждением холодных звезд после прохождения фазы общей оболочки [6]. Для решения этой проблемы с 2003 года нами проводится программа изучения известных и новых открываемых систем для максимального точного определения их фундаментальных параметров. В рамках данной статьи мы представляем результаты исследования последней системы из списка надежно классифицированных в 2004 году молодых ПП.

Объект TW Crv = EC 11575-1845 ($m_B = 12^m59$, $m_V = 12^m68$ [7], $m_R = 12^m60$ [8]) классифицирован как предкатаклизмическая переменная, не имеющая наблюдаемой планетарной туманности [9]. Система состоит из sdO-субкарлика и вторичного компонента класса M5. Она является незатменной двойной системой с орбитальным периодом $P_{\text{orb}} = 0^d3276074$ [10] и сильными фотометрическими эффектами отражения ($\Delta m \approx 0^m8$) [11]. Ее спектр в максимуме блеска представлен эмиссионными линиями He I $\lambda\lambda$ 4026, 4121, 4437, 4472, 4922 Å, широкими линиями Бальмеровской серии водорода и блендой C III+N III λ 4650 Å. В минимуме блеска системы спектр абсорбционный и содержит слабые линии Бальмеровской серии водорода и He II λ 4686 Å. Наблюдаемый профиль линии He II λ 4686 Å является суперпозицией абсорбции с центральным эмиссионным пиком (характерным для горячих вырожденных звезд) в спектре sdO-субкарлика и сильной эмиссии в спектре вторичного компонента [9]. По данным высокоскоростной фотометрии [10] кривая блеска в полосе V имеет синусоидальную форму, а по результатам многополосной *UBVRI*-фотометрии [11] амплитуда колебаний блеска составила $\Delta m_U = 0^m646 \pm 0^m003$, $\Delta m_B = 0^m736 \pm 0^m002$, $\Delta m_V = 0^m846 \pm 0^m002$, $\Delta m_R = 0^m932 \pm 0^m004$ и $\Delta m_I = 1^m02 \pm 0^m01$, что характерно для систем с сильными эффектами отражения.

Для определения параметров TW Crv Экстер и др. [9] выполнили анализ кривых лучевых скоростей совместно с теоретическим моделированием ее спектров. Найденные параметры горячей звезды предполагают ее расположение на диаграмме « $\lg T_{\text{eff}} - \lg \frac{L}{L_{\odot}}$ » в области перехода

с постасимптотической ветви sdO-субкарликов на ветвь остывающих белых карликов. Высокая эффективная температура главного компонента ($T_{\text{eff}} = 105\,000$ K [9]) допускает наличие у него планетарной туманности при времени эволюции после сброса оболочки менее $t = 2 \times 10^5$ лет. Однако оценки массы звезды $M_1 = 0.47-0.64M_{\odot}$ сильно зависят от принимаемых значений лучевой скорости вторичного компонента и угла наклона системы. Численное моделирование кривых блеска в работах [11] и [10] не позволило найти последнюю величину с необходимой точностью, что было связано как с неполнотой наблюдательных данных, так и с применением грубого чернотельного приближения. В результате фундаментальные параметры компонентов системы и их физическое состояние остаются до конца неизвестными, а вопрос о возможном наличии у нее слабой планетарной туманности — открытым. Отметим, что молодые ПП V664 Cas и Abell 65, подобные TW Crv по наблюдаемым характеристикам, имеют яркие планетарные туманности, а разреженная оболочка вокруг аналогичной системы VE UMa обнаружена при наблюдениях с узкополосными фильтрами [12]. Однако выполненная к настоящему времени фотометрия TW Crv не показывает наличия эмиссионной оболочки. Для объяснения этого требуется определение ее параметров. В рамках данной работы был получен однородный набор спектров, охватывающих большую часть орбитального периода, и кривых блеска объекта в нескольких полосах оптического диапазона. Их анализ с применением метода численного моделирования излучения систем с эффектами отражения позволил найти характеристики компонентов системы и сделать ряд выводов об их физическом состоянии.

Раздел 2 включает описание фотометрических и спектроскопических наблюдений и их первичный анализ, а раздел 3 — методику измерения и исследования лучевых скоростей компонентов. Раздел 4 посвящен моделированию оптического излучения и определению параметров системы на основе изучения наблюдаемых кривых блеска. В разделе проанализированы условия формирования оптических спектров и рассмотрены физические и эволюционные особенности TW Crv по сравнению с молодыми ПП с sdO-субкарликами.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Фотометрия

Фотометрические наблюдения системы были выполнены на Российско-Турецком Телескопе РТТ-150 с применением прибора TFOSC (Turkish

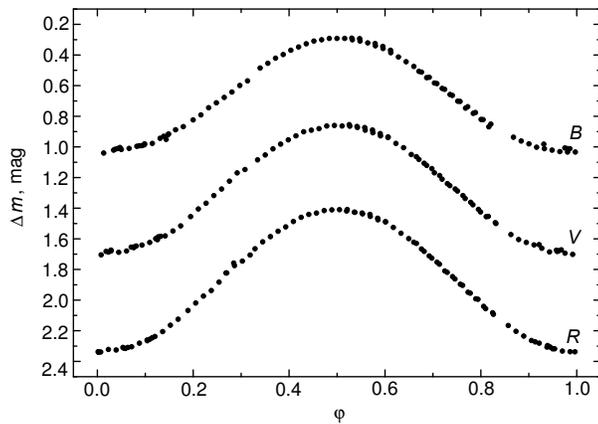


Рис. 1. Наблюдаемые кривые блеска TW Crv в полосах B , V и R

Faint Object Spectrometer and Camera), включающего в себя ПЗС-матрицу Fairchild 447 азотного охлаждения (2048×2048 пикселей размером 30.72×30.72 мкм) и узкополосные фильтры, реализующие фотометрическую систему Бесселя ($UBVRI$). Поле зрения ПЗС-матрицы составляет $13'3 \times 13'3$ в режиме прямых изображений. Данные получены 15 апреля, 11, 22, 23 мая 2012 года и 20 февраля 2013 года одновременно в полосах B , V и R . Наблюдения проводились в удовлетворительных погодных условиях с размерами звездных изображений $2'3-3'9$. Фотометрические данные в ночь 15 апреля 2012 года получены в сложных погодных условиях с размерами изображений до $7'2$. Однако высокая яркость исследуемого объекта ($m_V \approx 12^m7$ [7]) и наличие в поле зрения постоянной звезды сравнимого блеска позволили использовать данные всех наблюдений. В результате нами исследовано 275 изображений (87, 90 и 98 в фильтрах B , V и R , соответственно) с равной длительностью экспозиций 60 секунд. Итоговая продолжительность фотометрического ряда превысила 12 часов и позволила охватить полный орбитальный период со значительным перекрытием фаз наблюдений.

Фотометрические данные обработаны с применением пакета MAXIMDL. В качестве объекта сравнения выбрана звезда аналогичного блеска и цвета, попадающая в поле ПЗС-матрицы. Исследование вариаций блеска двух звезд меньшей яркости показало, что ошибки дифференциальной фотометрии объекта не превышают в среднем $\sigma = 0^m008$ для всех фильтров (B , V и R). Отметим, что среднее качество изображений позволило избежать перенакопления сигнала во все даты наблюдений.

При построении кривых блеска и определении фаз спектральных наблюдений мы использовали

уточненную эфемериду TW Crv из работы [10]:

$$\begin{aligned} \text{HJD}_{\min} &= 2448661.6049(\pm 0.0003) \\ &+ 0.3276074(\pm 0.0000002) \times E. \end{aligned}$$

Полученные в результате орбитальные кривые блеска в трех полосах показаны на рис. 1. Они имеют форму, близкую к синусоидальной, с превышением продолжительности фаз минимума над фазами максимума около $\Delta\varphi \approx 0.05$. Данная форма характерна для систем с углом наклона орбиты не более $i = 45^\circ$ [6, 13] и действием эффектов отражения без заметной несферичности компонентов. Амплитуды колебаний блеска составили 0^m707 в полосе B , 0^m841 в полосе V и 0^m942 в полосе R . Для V и R приведенные значения в пределах ошибок определения согласуются с амплитудами, опубликованными Ченом и др. [11]. В отличие от амплитуд вариаций блеска V664 Cas и Abell 65 с углами наклона орбит $i = 28^\circ$ [6] и $i = 68^\circ$ [5], соответствующая амплитуда в TW Crv возрастает с длиной волны, что обусловлено доминированием излучения горячей звезды в голубом диапазоне и характерно для большинства молодых ПП с sdO-субкарликами. Таким образом, радиус холодной звезды должен быть существенно (в 6–8 раз) меньше большой полуоси системы, которая при орбитальном периоде $P_{\text{orb}} = 0^d3276074$ [10] и допустимых оценках масс (см. раздел 5) компонентов равна $A = 1.74-2.06R_\odot$. В результате можно сделать вывод, что вторичный компонент TW Crv является красным карликом с радиусом не более $0.35R_\odot$, т. е. заметно меньшим, чем в системах V664 Cas и Abell 65.

2.2. Спектроскопия

Спектроскопические наблюдения проведены в ночи 5–7 мая 2010 года, 27 января, 26, 27, 29 апреля 2012 года и 14 апреля 2015 года с помощью редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO [14], установленного на 6-м телескопе CAO РАН. Нами использованы данные, полученные при наблюдениях с гризмой VPHG1200g (1200 штр.мм $^{-1}$) и ПЗС-приемником EEV 42-40 (2048×2048 пиксела размером 13.5×13.5 мкм), обеспечивающими спектральное разрешение $\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$ в интервале длин волн $3950-5700 \text{ \AA}$. Всего для TW Crv накоплены 33 изображения в 10 наблюдательных блоках из 3–6 последовательных экспозиций (по 2 блока в ночи 07.05.2010, 14.04.2015). Наблюдения проведены в хороших и отличных астроклиматических условиях при размере изображений $1'2-2'3$ с одинаковой продолжительностью экспозиций в 300 секунд, что обеспечило среднее отношение

сигнал/шум $S/N = 140-240$. Для последующего получения калибровок длин волн и потоков излучения одновременно с исследуемым объектом наблюдались спектры Ag-Ne-He-лампы и стандартов HZ 44 [15], Feige 56 [16] и G 191B2B [17].

Первичная обработка спектроскопических наблюдений выполнена средствами системы редукции астрономических данных MAXIMDL с применением всех стандартных процедур. Последующий анализ спектров проводился в пакете графической обработки информации Origin. Поскольку из-за особенностей наблюдений в режиме спектроскопии с длинной щелью не удастся точно восстановить распределение потоков в наблюдаемых спектрах, они были нормированы по единой методике с выбором в качестве точек континуума участков шириной не менее 10 \AA , свободных от эмиссионных и абсорбционных линий. Журнал спектроскопических наблюдений системы, включающий юлианские даты середины экспозиций HJD, фазы орбитального периода φ и лучевые скорости вторичного компонента $V_r^{(2)}$, представлен в таблице 1, а нормированные спектры для ряда фаз показаны на рис. 2.

В минимуме блеска спектры TW Sgr содержат абсорбционные линии H I ($H\beta-H\delta$), He II $\lambda\lambda 4541, 4686, 5411 \text{ \AA}$. Умеренная ширина линий $\Delta\lambda \approx 12 \text{ \AA}$ указывает на их формирование в атмосфере субкарлика с $\lg g = 6.5-7.0$, а доминирование линий He II — на то, что его эффективная температура выше $T_{\text{eff}} = 90\,000 \text{ K}$. Заметим однако, что даже в фазах $\varphi \approx 0.0$ абсорбционные профили He II и H I значительно ослаблены эмиссионными компонентами. Данный факт подтверждается наблюдением во всех фазах орбитального периода эмиссионных линий He I $\lambda\lambda 4472, 4922 \text{ \AA}$ и тяжелых элементов. В целом можно сделать вывод, что абсорбционный спектр TW Sgr формируется только в атмосфере горячей звезды, заметного вклада излучения вторичного компонента не наблюдается.

Интенсивность эмиссионных компонент линий He II и H I, а также эмиссионных линий других элементов к фазам $\varphi \approx 0.5$ возрастает синхронно с повышением интегрального блеска системы. Наблюдаемые вариации интенсивностей хорошо соответствуют ожидаемым при действии эффектов отражения в молодых ПП с sdO-субкарликами. Для идентификации максимального числа эмиссионных линий мы использовали спектр TW Sgr, усредненный по 10 наблюдениям в максимуме блеска и представленный на рис. 3. В нем обнаружены линии H I, He I и He II, а также элементов группы CNO, неона и кремния во второй и третьей стадиях ионизации. По их интенсивностям температура плазмы в облученной хромосфере горячего пятна оказывается в пределах $T_e = 20\,000-27\,000 \text{ K}$, что

Таблица 1. Журнал спектроскопических наблюдений TW Sgr. HJD — гелиоцентрические юлианские даты середины экспозиций, φ — фаза орбитального периода, $V_r^{(2)}$ — лучевые скорости вторичного компонента, определенные по эмиссионной бленде C III+N III $\lambda 4640 \text{ \AA}$

HJD	φ	$V_r^{(2)}$, км с ⁻¹	HJD	φ	$V_r^{(2)}$, км с ⁻¹
2450000+			2450000+		
5322.3398	0.4544	-50	6044.3408	0.3151	127
5322.3441	0.4674	-14	6044.3450	0.3276	140
5322.3481	0.4798	11	6044.3489	0.3398	140
5323.3420	0.5136	-2	6045.3410	0.3681	102
5323.3461	0.5260	-14	6045.3452	0.3806	115
5323.3501	0.5384	-27	6045.3491	0.3928	89
5323.3542	0.5508	-27	6045.3532	0.4052	63
5324.2689	0.3430	153	6047.3480	0.4941	50
5324.3850	0.6973	-104	6047.3521	0.5066	37
5324.3891	0.7098	-90	6047.3560	0.5188	24
5324.3931	0.7221	-78	7127.2569	0.8449	-104
5954.5510	0.2376	140	7127.2609	0.8570	-104
5954.5554	0.2508	140	7127.2648	0.8692	-108
5954.5615	0.2697	127	7127.3007	0.9786	-80
5954.5659	0.2829	115	7127.3047	0.9908	-75
5954.5781	0.3202	140	7127.3087	0.0029	-53
5954.5822	0.3326	140			

в целом согласуется с аналогичными значениями у молодых ПП V664 Cas [6] и Abell 65 [5]. Сравнение спектров трех объектов говорит о более низких интенсивностях эмиссионных линий у TW Sgr, а также о странном отсутствии у нее линии Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$, найденной в излучении всех молодых ПП. В целом эмиссионный спектр этой системы аналогичен спектру V664 Cas, что, вероятно, указывает на близкий химический состав атмосфер вторичных компонентов. Кроме того, в излучении этих двух объектов наблюдаются двухпиковые линии бальмеровской серии водорода, что было ранее отмечено в [9]. Шиманский и др. [6] объяснили формирование таких линий H I в спектрах V664 Cas учетом поглощения излучения в планетарной туманности. Экстер и др. [9], напротив, предположили, что центральные абсорбции в бальмеровских линиях обусловлены сильными не-ЛТР эффектами в атоме H I в облучаемой атмосфере

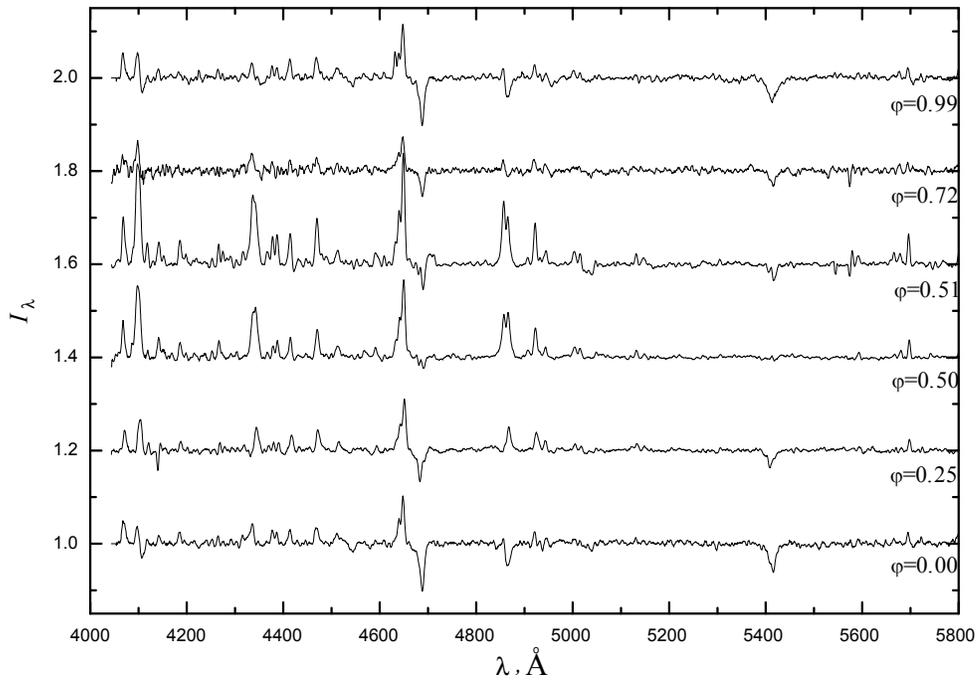


Рис. 2. Нормированные спектры TW CrV для разных фаз орбитального периода системы. Спектры имеют последовательный сдвиг вдоль вертикальной оси на 0.2.

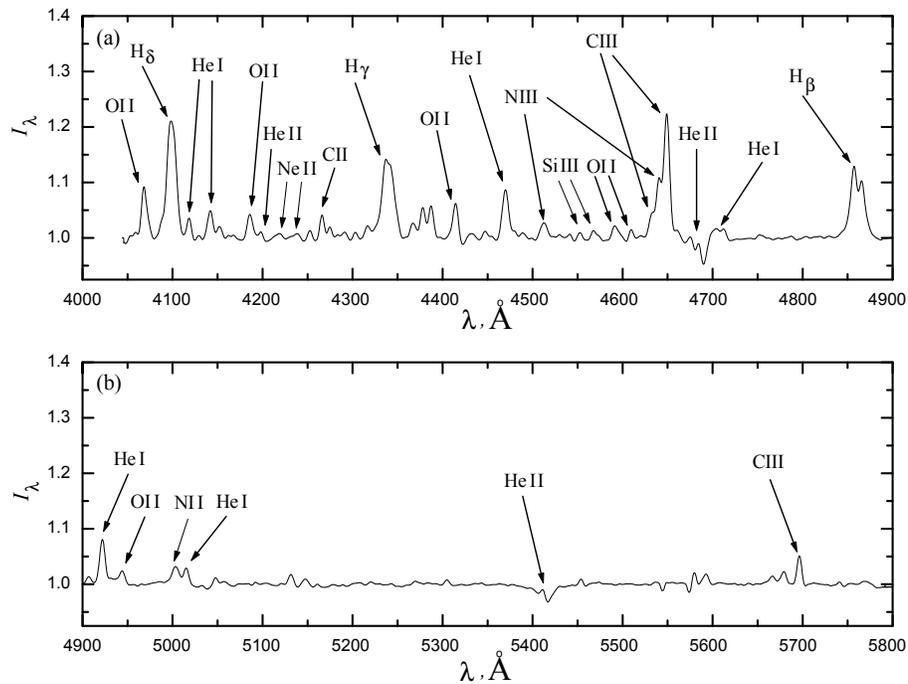


Рис. 3. Усредненный по десяти наблюдениям в максимуме блеска системы спектр TW CrV с отождествлением наблюдаемых линий.

горячего пятна. С учетом отсутствия у TW Crv как планетарной туманности, так и сдвигов абсорбционных компонент, синхронных со сдвигами эмиссионных линий, данное предположение является оправданным. Однако наши расчеты спектров системы (см. раздел 4) с тестовым учетом отклонений от ЛТР не показывают появления центральной абсорбции. Поэтому мы высказываем гипотезу, что абсорбция, вероятно, формируется не в атмосфере горячего пятна, а в звездном ветре, истекающем с его поверхности. Использование этой гипотезы для объяснения найденной в [6] зависимости доплеровской полуширины абсорбции от силы осцилляторов линии может позволить определить температуру газа в истекающем звездном ветре.

В заключение отметим, что в минимуме блеска интенсивность эмиссионных линий в спектре TW Crv оказывается существенно выше, чем у Abell 65 ($i = 68^\circ$ [5]), но ниже чем у V664 Cas ($i = 28^\circ$ [6]). В результате можно сделать вывод, что угол наклона ее орбиты i имеет промежуточное значение около 45° .

3. АНАЛИЗ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Искажение абсорбционных линий в спектре горячей звезды эмиссионными компонентами, формирующимися в облучаемой атмосфере спутника, создает серьезные трудности при измерении ее лучевых скоростей $V_r^{(1)}$. Как показано в [18], профиль линии в этом случае испытывает смещения, завышающие амплитуду орбитальных вариаций $V_r^{(1)}$. Исправление значения амплитуды может быть сделано лишь на основе теоретических расчетов спектра с точным воспроизведением профиля изучаемой линии. Выполненное нами моделирование спектров TW Crv (см. раздел 4) показало, что абсорбционные профили линий H I сильно искажены эмиссиями во всех фазах орбитального периода, а точное вычисление профилей линий He II невозможно вследствие неучета для него отклонений от ЛТР в атмосфере вторичного компонента.

Лучевые скорости холодной звезды $V_r^{(2)}$ могут измеряться по эмиссионным линиям, формирующимся в атмосфере горячего пятна под действием эффектов отражения. Как видно из рис. 3, только эмиссионная бленда линий легких элементов C III+N III $\lambda 4630\text{--}4650 \text{ \AA}$ пригодна для определения значений $V_r^{(2)}$ во всех фазах орбитального периода. При их измерении мы применяли полуавтоматический метод кросс-корреляции спектров, реализованный в программном модуле VELOS [19]. Диапазон длин волн, учитываемых при измерении доплеровских смещений бленды

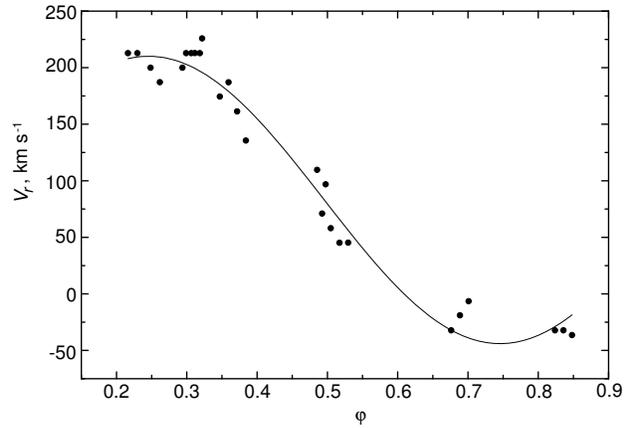


Рис. 4. Значения лучевых скоростей вторичного компонента TW Crv (точки), полученные по измерениям бленды C III+N III $\lambda 4640 \text{ \AA}$, и кривая их аппроксимации для модели круговой орбиты.

C III+N III $\lambda 4630\text{--}4650 \text{ \AA}$, ограничивался шириной 50 \AA с центром на длине волны 4640 \AA . При использовании программы VELOS находились значения лучевых скоростей относительно формально «нулевой» скорости, задаваемой для спектра сравнения, в качестве которого было выбрано усреднение спектрограмм ночей 5–6 мая 2010 года ($\varphi = 0.45\text{--}0.55$). Итоговые оценки скоростей вычислялись с учетом поправки за приведение к лабораторной шкале длин волн, получаемой кросс-корреляцией наблюдаемого спектра сравнения с теоретическим, рассчитанным комплексом SPECTR для фазы $\varphi = 0.50$ (см. раздел 4). Точность измерения значений $V_r^{(2)}$ варьировалась от $\Delta V_r \approx 15 \text{ км с}^{-1}$ в фазах $\Delta\varphi = 0.3\text{--}0.7$ до $\Delta V_r \approx 40 \text{ км с}^{-1}$ в фазах минимума $\Delta\varphi = 0.85\text{--}1.2$.

Для построения кривой лучевых скоростей из анализа исключены все значения, соответствующие фазам минимума блеска $\Delta\varphi = 0.85\text{--}1.2$, когда интенсивность бленды C III+N III $\lambda 4630\text{--}4650 \text{ \AA}$ недостаточна для измерений $V_r^{(2)}$. Аппроксимация полученных данных проводилась методом градиентного спуска с применением пакета Origin только в рамках модели круговой орбиты. Итоговая кривая, показанная на рис. 4, в пределах точности измерений согласуется с наблюдаемыми значениями и имеет полуамплитуду $K_2 = 127 \pm 4 \text{ км с}^{-1}$. Отметим, что лучевые скорости $V_r^{(2)}$ в TW Crv изменяются с орбитальной фазой по синусоидальному закону и не показывают искажений, характерных для других молодых ПП с сильными эффектами отражения.

Полученное значение K_2 является полуамплитудой лучевой скорости горячего пятна на поверхности вторичного компонента TW Crv, а не

его центра масс. Определение поправки ΔK_2 за различие двух амплитуд выполнено нами на основе анализа теоретических спектров. С использованием программного комплекса SPECTR [3, 20] мы рассчитали спектры системы с учетом эффектов отражения для набора фаз орбитального периода (см. раздел 4). Расчеты проводились в предположении синхронности вращения вторичного компонента с его орбитальным движением для параметров TW CrV, найденных из совместного исследования кривых блеска и лучевых скоростей (см. ниже). При измерении дополнительных доплеровских сдвигов бленды C III+N III $\lambda 4630\text{--}4650 \text{ \AA}$, обусловленных действием эффектов отражения, применялся метод кросс-корреляции для теоретических спектров вблизи фаз $\varphi = 0.25$ и $\varphi = 0.75$. Анализ сдвигов показал, что поправка к найденному значению K_2 составляет $\Delta K_2 = 12 \text{ км с}^{-1}$. Таким образом, для вторичного компонента TW CrV получено значение $K_2 = 139 \pm 4 \text{ км с}^{-1}$, а соответствующая функция масс главного компонента составила $f(M_1) = 0.0913 \pm 0.0081 M_\odot$.

Определение масс обоих компонентов возможно при знании амплитуд их лучевых скоростей и угла наклона орбиты i . Его значение $i = 42^\circ \pm 0.9^\circ$ было найдено нами независимо при согласовании наблюдаемых и теоретических кривых блеска (см. раздел 4). Оценка амплитуды лучевой скорости горячей звезды ($K_1 = 53 \pm 2 \text{ км с}^{-1}$) получена с хорошей точностью в работе [9] на основе анализа смещений слабых линий He II. Комбинация всех известных величин позволяет вычислить полную массу системы:

$$M_1 + M_2 = (K_1 + K_2)^3 \times 10385 \times 10^{-11} \\ \times P_{\text{orb}} \sin^{-3} i = 0.812 \pm 0.054 M_\odot,$$

и индивидуальные массы компонентов:

$M_1 = 0.586 \pm 0.038 M_\odot$ и $M_2 = 0.226 \pm 0.016 M_\odot$. Соответствующая им длина большой полуоси системы равна $A = 1.86 \pm 0.04 R_\odot$. Отметим, что наибольшие ошибки в найденных значениях параметров обусловлены неточностью амплитуды лучевых скоростей вторичного компонента. Однако нами впервые получены надежные оценки масс TW CrV, точность которых существенно выше, чем для большинства других незатменных молодых ПП.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Определение параметров TW CrV выполнено нами с применением результатов теоретического моделирования ее оптических спектров и кривых блеска. Расчеты проводились с учетом эффектов

отражения и несферичности компонентов на основе метода моделирования атмосфер и спектров звезд с облучением, реализованного в программном комплексе SPECTR [3, 20]. В рамках метода для заданных параметров системы (A , i , T_{eff} , R , M , где A — большая полуось орбиты, i — угол наклона орбиты, T_{eff} , R , M — эффективная температура, радиус и масса соответствующего компонента) поверхности обеих звезд разбиваются на площадки с фиксированным положением относительно большой полуоси системы, для каждой из которых вычисляются локальные параметры атмосферы (T_{eff} , $\lg g$) и потока внешнего излучения, приходящего со стороны соседнего компонента. Частотное распределение внешнего облучения холодной звезды задавалось равным спектру главного компонента с заданными параметрами и химическим составом атмосферы, а для горячей звезды облучение не учитывалось.

Структура облучаемой атмосферы рассчитывалась с использованием метода баланса функций нагрева и охлаждения звездного газа, разработанного Сахибуллиным и Шиманским [21] и модифицированного в [22]. В качестве стартовых использовались сеточные модели атмосфер Каstellли и Куруца [23], интерполируемые на требуемые значения T_{eff} и $\lg g$ по методике, изложенной в [24]. Корректность моделирования облучаемых атмосфер проверялась с применением программы BINARY3 [21], вычисляющей структуру бланкетированной, облученной атмосферы методами температурной коррекции. Расчеты набора моделей атмосфер sdO-субкарликов и белых карликов высоких температур выполнены комплексом программ ATLAS12 [25], адаптированных для персональных компьютеров В. В. Цимбалом.

Для полученного набора моделей атмосфер вычислялись удельные интенсивности излучения, выходящего под фиксированными углами $\theta' = 7^\circ, 30^\circ, 63^\circ$ в диапазоне длин волн $3600\text{--}9000 \text{ \AA}$ с шагом 0.05 \AA . В расчетах применялся набор источников непрерывной непрозрачности, табулированных в комплексах STARDISK [26] и SPECTR [3], более 2 000 000 атомарных и молекулярных линий из списков Куруца [27] с дополнительным учетом поглощения в 28 протяженных молекулярных полосах оптического диапазона, определяемых согласно теории Нерсисян и др. [28]. При расчете профилей бальмеровских линий использовалась теория уширения Вайдл–Куппер–Смитта [29] и Грима [30]. Для остальных линий моделировался стандартный фойгтовский профиль с уширением за счет теплового движения атомов и микротурбулентции со скоростью ξ_{turb} , естественного затухания, штарковского уширения на основе аппроксимации

Куруца и Фюренлида [31] и ван-дер-ваальсовского уширения с константами, заданными согласно классической формуле Грея [32] с масштабирующим фактором в диапазоне $\Delta \lg C_6 = 0.7-1.2$ [33]. Отклонения от ЛТР, найденные с применением комплекса NONLTE3 [34] и оригинальных моделей атомов [35], в атмосфере главного компонента учитывались для атомов и ионов H I, He I, He II, C III, Si IV, а в атмосфере вторичного компонента для H I, He I, C II, Mg II, согласно методике, представленной в [22]. Солнечный химический состав задан в соответствии с данными [36], а возможные отклонения от него в атмосферах компонентов будут рассмотрены ниже.

Интенсивности излучения площадок интерполировались на угол видимости наблюдателей, интегрировались по поверхности звезды с учетом их размеров, лучевых скоростей и возможности затмения. Полученные в 72 фазах орбитального периода спектры обеих звезд складывались с учетом их индивидуальных лучевых скоростей и сворачивались с аппаратной функцией спектрографа, в качестве которой использовалась гауссиана с полушириной, соответствующей разрешению. Для вычисления теоретических кривых блеска спектры дополнительно сворачивались с кривыми пропускания в системах Джонсона и Коузинса согласно данным [37].

Предварительное моделирование спектров в фазах минимума блеска и их сравнение с наблюдаемыми доказало корректность значений параметров атмосферы главного компонента ($T_{\text{eff}}^{(1)} = 105\,000 \pm 20\,000$ К, $\lg g_1 = 6.7 \pm 0.3$, $[\text{He}/\text{H}] = 0.2 \pm 0.1$), найденных Экстер и др. [9]. Остальные параметры системы принимались нами из работ [9] и [10] в качестве начальных приближений и уточнялись в рамках итерационного процесса согласования теоретических и наблюдаемых кривых блеска. Согласование проводилось с варьированием эффективной температуры $T_{\text{eff}}^{(2)}$ и радиуса R_2 вторичного компонента, радиуса R_1 главного компонента и угла наклона i орбиты к картинной плоскости. При относительной малости в TW Crv значения i его вариации приводят только к изменению амплитуды кривой блеска при сохранении ее формы. Увеличение радиуса R_1 сильнее уменьшает амплитуду в синем диапазоне спектра, а радиуса R_2 — одновременно изменяет форму и амплитуду вариаций блеска. Значение эффективной температуры $T_{\text{eff}}^{(2)}$ имеет ограниченное влияние на теоретическую кривую блеска в красном диапазоне и этот параметр сохранен нами согласно данным [10]. Вариация названных параметров позволила согласовать наблюдаемые и теоретические кривые блеска

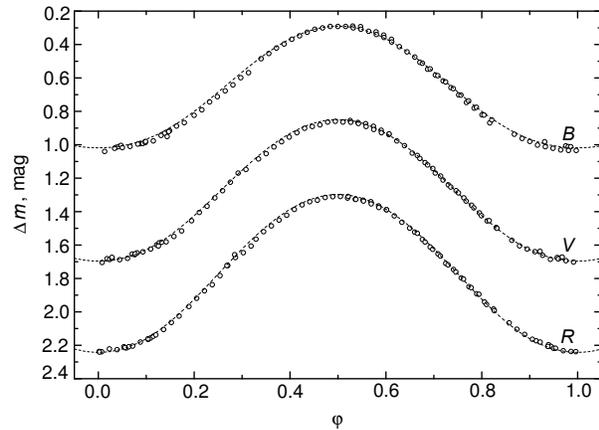


Рис. 5. Сравнение теоретических (штриховые линии) и наблюдаемых (точки) кривых блеска TW Crv в полосах B, V и R.

Таблица 2. Параметры TW Crv

Параметр	Главный компонент	Вторичный компонент
T_{eff} , К	$105\,000 \pm 20\,000^1$	4500 ± 220^2
M/M_{\odot}	0.586 ± 0.038	0.226 ± 0.016
R/R_{\odot}	0.055 ± 0.004	0.305 ± 0.006
$\lg g$	6.72 ± 0.05	4.82 ± 0.01
K , км с ⁻¹	53 ± 2^1	139 ± 4
γ , км с ⁻¹	18 ± 2^1	11 ± 4
A/R_{\odot}	1.86 ± 0.04	
i , °	42 ± 1	

¹ — данные из статьи [9];

² — данные из статьи [10].

TW Crv в полосах B, V и R на уровне точности наблюдений. На рис. 5 представлено итоговое сравнение наблюдаемых и теоретических кривых блеска, а в таблице 2 — полученные параметры системы.

Представленный набор параметров TW Crv значительно дополнил данные предыдущих исследований. В частности значение угла наклона $i = 42^{\circ} \pm 1^{\circ}$ улучшает оценку Рибейро и Баптиста [10] $i = 41^{\circ} \pm 9^{\circ}$, непригодную для нахождения других характеристик. Совместно с высокоточным определением амплитуды K_2 оно позволило выбрать оптимальный набор параметров системы из сетки вариантов, предложенных Экстер и др. [9] по

измерениям амплитуды K_1 . Впервые полученная нами величина $R_2 = 0.305 \pm 0.006 R_\odot$ существенно меньше размеров полости Роша вторичного компонента $R_2^{\text{rl}} = 0.49 \pm 0.01 R_\odot$, что подтверждает вывод о полной разделенности TW Crv и характерно для всех молодых ПП с sdO-субкарликами.

На рис. 6 показано сравнение теоретических и наблюдаемых спектров системы в фазах первой четверти $\varphi \approx 0.25$ и максимума блеска $\varphi \approx 0.50$. Качественное описание наблюдаемых абсорбционных профилей линии He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ в обеих фазах и более слабой линии He II $\lambda 5411 \text{ \AA}$ в фазе $\varphi \approx 0.25$ подтверждает вывод о корректности набора параметров sdO-субкарлика, найденного в работе [9]. Однако расчет линий He II в спектре холодной звезды только в ЛТР-приближении обусловил завышенные интенсивности их эмиссионных компонент, что привело к худшему согласно теоретических и наблюдаемых профилей в фазе $\varphi \approx 0.50$. Теоретические абсорбционные крылья линий H β и H γ имеют избыточную интенсивность в фазе $\varphi \approx 0.25$, а их эмиссионные компоненты — в обеих фазах. Кроме того теоретические профили не показывают двухпиковой структуры, отмеченной в наблюдениях. В целом следует сделать вывод о неудовлетворительном описании линий H I, несмотря на полный учет для них отклонений от ЛТР. Поэтому мы предполагаем значительное влияние на их формирование звездного ветра, истекающего с поверхности горячего пятна. Очевидно, что под действием давления ультрафиолетового излучения горячей звезды такое истечение будет направлено от центральных частей пятна к его периферии. В результате в фазе $\varphi \approx 0.50$ лучевая скорость ветра оказывается близкой к нулю и он поглощает излучение находящегося за ним горячего пятна, обуславливая двухпиковую структуру профилей. В фазе $\varphi \approx 0.25$ ветер, наблюдаемый частично за лимбом горячего пятна и направленный к наблюдателю со скоростью истечения V_w , будет формировать дополнительное излучение в коротковолновой части профилей линий H I и приводить к ослаблению их голубых абсорбционных крыльев. Добавим, что предложенный механизм может оставаться эффективным в фазе $\varphi \approx 0.00$ при условии видимости части горячего пятна (т.е. небольшого угла наклона системы). В итоге профили линий H I окажутся несимметричными с эмиссионной компонентой в синем крыле и абсорбционной в красном. Подобные искажения профилей, наблюдаемые у TW Crv в фазах $\varphi = 0.00$ и $\varphi = 0.99$ (см. рис. 2), делают невозможным использование линий H I для измерения лучевых скоростей главного компонента даже в минимуме блеска.

Интенсивность большинства эмиссионных линий He I и C II удовлетворительно описывается

в обоих анализируемых спектрах. Для данных ионов учтены отклонения от ЛТР, что указывает на солнечное содержание этих элементов в атмосфере вторичного компонента. Аналогичный предварительный вывод о солнечном содержании, сделанный из анализа линий Si III требует подтверждения на основе не-ЛТР расчетов для данного иона. Наблюдаемые интенсивности бленды C III+N III $\lambda 4630\text{--}4650 \text{ \AA}$, всех линий O II и линии N II $\lambda 5007 \text{ \AA}$ оказываются выше теоретических, что в ряде случаев может быть обусловлено отклонениями от ЛТР. Однако моделирование спектров молодых ПП VE UMa [12] и PN G068 [38] не показывало аномального усиления линий O II и N II при действии не-ЛТР эффектов. Поэтому мы высказываем предположение о вероятных избытках азота и кислорода в атмосфере холодной звезды. Отметим, что подобные избытки азота ранее обнаружены при изучении ряда молодых ПП [39–41]. Однако в целом анализ спектров TW Crv говорит об относительно слабых аномалиях ее химического состава по сравнению с аналогичными системами.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Температура $T_{\text{eff}}^{(1)} = 105\,000 \pm 20\,000 \text{ K}$ и светимость $\lg \frac{L_1}{L_\odot} = 2.50 \pm 0.35$ главного компонента

TW Crv на эволюционных треках одиночных ядер планетарных туманностей [42] (см. рис. 7а) соответствует массе $M = 0.54 \pm 0.05 M_\odot$. Данное значение в пределах ошибок измерений согласуется с полученной нами динамической оценкой массы горячей звезды $M_1 = 0.586 \pm 0.038 M_\odot$. Кроме того, комбинация оценок ее радиуса и массы определяет величину поверхностной силы тяжести ($\lg g = 6.72 \pm 0.05$), близкую к независимо найденной Экстер и др. [9] ($\lg g = 6.70 \pm 0.30$) из анализа спектров. Таким образом, имеющийся набор параметров главного компонента не имеет внутренних противоречий и указывает на его принадлежность к классу sdO-субкарликов в фазе перехода на последовательность остывающих белых карликов. Отметим, что при использовании значения эффективной температуры звезды меньше $T_{\text{eff}}^{(1)} = 105\,000 \text{ K}$ ухудшается соответствие динамической и эволюционной оценок ее масс, и значительно увеличивается допустимый радиус вторичного компонента с его приближением к размерам полости Роша. Поэтому мы считаем, что истинная масса sdO-субкарлика в TW Crv заключена в диапазоне $M_1 = 0.54\text{--}0.57 M_\odot$ и близка к массам главных компонентов молодых ПП Abell 65 ($M_1 = 0.56 M_\odot$ [5]), V664 Cas ($M_1 = 0.57 M_\odot$ [6]) и V477 Lyr ($M_1 = 0.55 M_\odot$ [41]). Однако, как видно

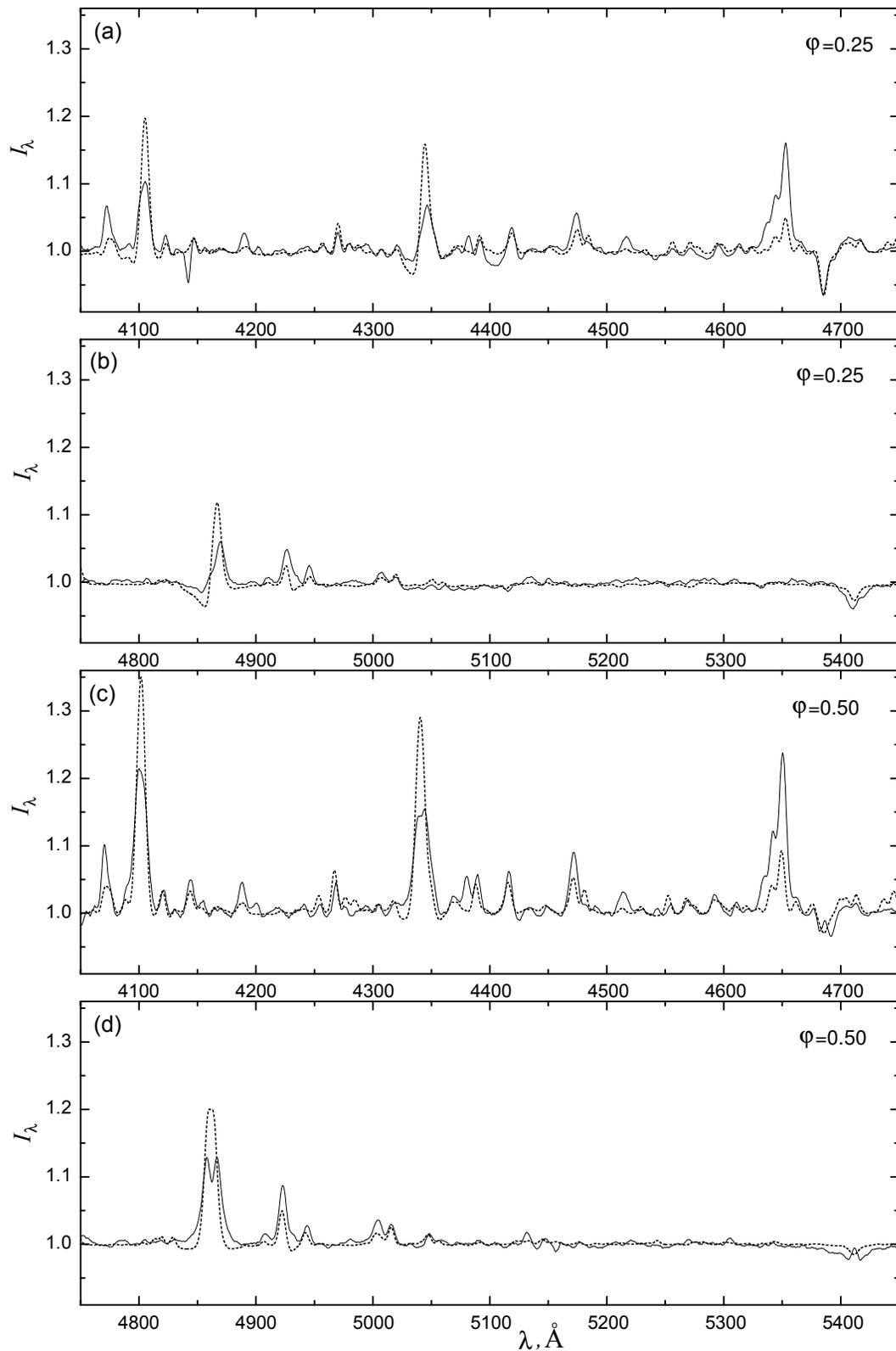


Рис. 6. Сравнение наблюдаемых (сплошные линии) и теоретических (штриховые линии) спектров TW Crv для фаз $\varphi = 0.25$ (a,b) и $\varphi = 0.50$ (c,d).

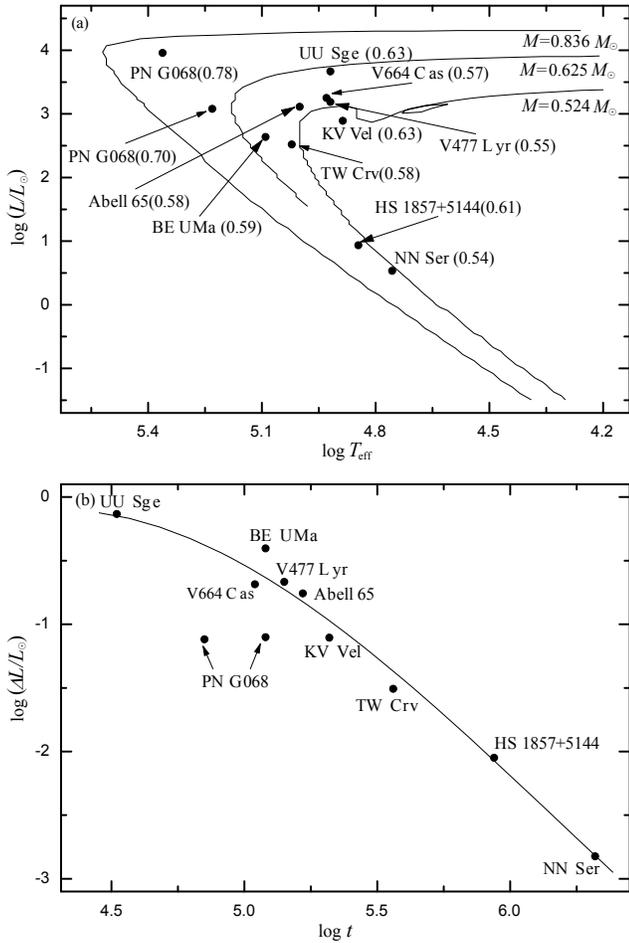


Рис. 7. Панель (а): положения главных компонентов изученных молодых ПП на эволюционных треках ядер планетарных туманностей [36]. Панель (б): эмпирическая зависимость избытка светимости вторичных компонентов ΔL от времени эволюции систем после стадии общей оболочки из работы [5] и положения вторичных компонентов изученных молодых ПП.

на рис. 7б, время эволюции TW Crv после сброса общей оболочки много больше, чем у перечисленных систем и составляет согласно данным [42] более 3.5×10^5 лет. В работе Экстер и др. [9] на основе оценок скорости расширения планетарных туманностей показано, что время их свечения для объектов типа V664 Cas не превышает $t = 2 \times 10^5$ лет. Таким образом, отсутствие у TW Crv планетарной туманности обусловлено ее продолжительной эволюцией после стадии общей оболочки.

Светимость холодной звезды составляет $\lg \frac{L_2}{L_\odot} = -1.46 \pm 0.09$ при $T_{\text{eff}}^{(2)} = 4500 \pm 220$ К и $R_2 = 0.305 \pm 0.006 R_\odot$, что в 10 раз превышает оценку светимости $\lg \frac{L_{\text{tr}}}{L_\odot} = -2.49 \pm 0.06$ из

эволюционных треков Жирарди и др. [43] для звезд ГП с массой $M = 0.22 \pm 0.02 M_\odot$. Подобные избытки светимости, найденные ранее у вторичных компонентов всех молодых ПП типа BE UMa, объясняются их продолжительной релаксацией к состоянию ГП после выхода системы из стадии общей оболочки. Ранее было показано [5], что амплитуда избытков $\Delta L = L_2 - L_{\text{tr}}$ определяется временем последующей эволюции систем t и не зависит от действия в них эффектов отражения или параметров вторичных компонентов. Как видно на рис. 7б, найденное нами для TW Crv значение ΔL полностью соответствует зависимости $\langle \lg t - \lg \frac{\Delta L}{L_\odot} \rangle$, построенной в [38] для 10 хорошо изученных молодых ПП. В результате можно утверждать о корректности полученного набора фундаментальных параметров системы и общности ее эволюционного и физического состояния с другими объектами типа BE UMa.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на 6-м телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение No 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004). Мы искренне благодарим TÜBITAK за частичную поддержку в использовании телескопа РТТ-150. В. В. Шиманский благодарен финансированию за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. С. Н. Фабрика и Н. В. Борисов благодарят Российский научный фонд (проект № 14-50-00043) за финансовую помощь в интерпретации данных и наблюдениях. Работа выполнена при совместном финансировании правительства Республики Татарстан и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (коды проектов 15-42-02573-а и 16-02-01145-а, 16-32-00212-мол-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Ritter, *Astron. and Astrophys.* **169**, 139 (1986).
2. H. Ritter and U. Kolb, *Astron. and Astrophys.* **404**, 301 (2010).
3. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and N. N. Shimanskaya, *Astronomy Reports* **47**, 763 (2003).
4. M. R. Schreiber and B. T. Gänsicke, *Astron. and Astrophys.* **406**, 305 (2003).
5. V. V. Shimansky, S. A. Pozdnyakova, N. V. Borisov, et al., *Astrophysical Bulletin* **64**, 349 (2009).

6. V. V. Shimanskii, N. V. Borisov, N. A. Sakhbullin, and A. E. Surkov, *Astronomy Reports* **48**, 563 (2004).
7. N. N. Samus', V. P. Goranskii, O. V. Durlевич, et al., *Astronomy Letters* **29**, 468 (2003).
8. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog*: **2246** (2003).
9. K. M. Exter, D. L. Pollacco, P. F. L. Maxted, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **359**, 315 (2005).
10. T. Ribeiro and R. Baptista, *Astron. and Astrophys.* **526**, A150 (2011).
11. A. Chen, D. O'Donoghue, R. S. Stobie, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **275**, 100 (1995).
12. V. V. Shimanskii, N. V. Borisov, S. A. Pozdnyakova, et al., *Astronomy Reports* **52**, 558 (2008).
13. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, D. N. Nurtdinova, et al., *Astronomy Reports* **59**, 199 (2015).
14. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
15. R. C. Bohlin, *Astron. J.* **111**, 1743 (1996).
16. J. L. Greenstein, *Astrophys. J.* **144**, 496 (1966).
17. R. C. Bohlin, *ASP Conf. Ser.* **364**, 315 (2007).
18. M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **50**, 544 (2006).
19. V. V. Shimanskii, N. V. Borisov, N. A. Sakhbullin, and D. V. Sheveleva, *Astronomy Reports* **52**, 479 (2008).
20. N. A. Sakhbullin and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **41**, 378 (1997).
21. N. A. Sakhbullin and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **40**, 723 (1996).
22. D. V. Ivanova, N. A. Sakhbullin, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **46**, 390 (2002).
23. F. Castelli and R. L. Kurucz, arXiv:astro-ph/0405087 (2004).
24. V. F. Suleimanov, *Astronomy Letters* **22**, 92 (1996).
25. R. L. Kurucz, *Mem. Soc. Astron. Ital. Suppl.* **8**, 14 (2005).
26. V. F. Suleymanov, *Astron. Astrophys. Trans.* **2**, 197 (1992).
27. R. Kurucz, CD-ROM No. 20 (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, 1994).
28. S. E. Naersisian, A. V. Shavrina, and A. A. Yaremchuk, *Astrofizika* **30**, 147 (1989).
29. C. R. Vidal, J. Cooper, and E. W. Smith, *Astrophys. J. Suppl.* **25**, 37 (1973).
30. H. R. Griem, *Astrophys. J.* **132**, 883 (1960).
31. R. L. Kurucz and I. Furenlid, Special Report, No. 387 (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, 1979).
32. A. Unsold, *Physik der Sternatmosphären* (Springer, Berlin—Göttingen—Heidelberg, 1955).
33. N. N. Shimanskaya, I. F. Bikmaev, and V. V. Shimansky, *Astrophysical Bulletin* **66**, 332 (2011).
34. N. A. Sakhbullin, *Trudy Kazansk. Gor. Astron. Obs.* **48**, 9 (1983).
35. V. V. Shimanskii, E. A. Karitskaya, N. G. Bochkarev, et al., *Astronomy Reports* **56**, 741 (2012).
36. E. Anders and N. Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 197 (1989).
37. V. Straižys, *Multicolor stellar photometry. Photometric systems and methods* (Mokslas Publisher, Vilnius, 1977).
38. A. A. Mitrofanova, V. V. Shimansky, N. V. Borisov, et al., *Astronomy Reports* **60**, 252 (2016).
39. A. C. Wawrzyn, T. S. Barman, H. M. Günther, et al., *Astron. and Astrophys.* **505**, 227 (2009).
40. D. H. Ferguson and T. A. James, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 723 (1994).
41. V. V. Shimansky, S. A. Pozdnyakova, N. V. Borisov, et al., *Astronomy Letters* **34**, 423 (2008).
42. T. Bloeker, *Astron. and Astrophys.* **299**, 755 (1995).
43. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).

V. V. Shimansky, A. A. Mitrofanova, N. V. Borisov, S. N. Fabrika, and A. I. Galeev

On the Formation of TW CRV Optical Radiation

We present the analysis of the optical radiation of the young pre-cataclysmic variable TW Crv. Spectroscopic and photometric observations were obtained at the SAO RAS 6-m BTA telescope and at the Russian-Turkish RTT-150 telescope. The light curves of the system possess nearly sinusoidal shapes with the amplitudes of $\Delta m > 0^m.7$, what is typical for young pre-cataclysmic variables with sdO-subdwarfs and orbit inclinations of less than 45° . The optical spectrum contains dominant radiation of the hot subdwarf with the H I and He II absorption lines and strong emission lines, which are formed in the atmosphere of the secondary owing to the reflection effects. Radial velocities of the cool star were measured by analyzing the $\lambda\lambda$ 4630–4650 Å Bowen blend, which for the first time allowed to determine the component masses. A numerical simulation of the light curves and spectra of TW Crv, obtaining a complete set of systems fundamental parameters was carried out. The hot star parameters prompt its belonging to the sdO-subdwarf class at the stage of transition to the cooling white dwarf sequence. The absence in it of an observable planetary nebula is caused by a long-lasting evolution of the system after the common envelope state. The secondary component has a luminosity excess, which is typical for other young sdO-subdwarf pre-cataclysmic variables. Its position on the “age–luminosity excess” diagram points at the accuracy of the obtained set of TW Crv fundamental parameters and at the similarity of its evolutionary and physical conditions with that of other BE UMa-type objects.

Keywords: *binaries: close—subdwarfs—stars: atmospheres—methods: spectroscopic*