

УДК 524.338-357

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАТМЕННОГО ПОЛЯРА CRTS CSS 081231 J071126+440405

© 2016 Н. В. Борисов¹, М. М. Габдеев^{1*}, В. В. Шиманский²,
Н. А. Катыхева³, А. И. Колбин², С. Ю. Шугаров^{3,4}, В. П. Горанский³

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³Государственный астрономический институт им. Штенберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

⁴Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранска Ломница, 05960 Словакия

Поступила в редакцию 2 декабря 2015; принята в печать 10 декабря 2015

Представлены результаты исследований затменного поляра CRTS CSS 081231 J071126+440405. Фотометрические наблюдения позволили уточнить орбитальный период системы $P_o = 0^d.08137673$. С 20 на 21 сентября 2011 г. произошли значительные изменения вида спектров объекта: наклон континуума поменялся с «красного» на «синий», изменилась переменность профилей линий в течение орбитального периода. Доплеровские карты показали смещение области формирования эмиссионных линий вдоль струи аккрецирующего вещества ближе к белому карлику. Была измерена длительность затмения системы, и наложены ограничения на угол наклона системы $78^\circ.7 < i < 79^\circ.3$. Полученная амплитуда лучевой скорости применялась для нахождения базовых параметров системы: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_\odot$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_\odot$, $q = 0.21 \pm 0.01$, $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_\odot$, $A = 0.80 \pm 0.03 R_\odot$. В спектрах объекта были обнаружены циклотронные гармоники. Сравнение их с модельными спектрами позволило определить параметры аккреционной колонны: $B = 31\text{--}34$ МГс, $T_e = 10\text{--}12$ КэВ, $\theta = 80\text{--}90^\circ$ и $\Lambda = 10^5$.

Ключевые слова: новые, катаклизмические переменные — звезды: индивидуальные: CRTS CSS 081231 J071126+440405 — метод: поляризация

1. ВВЕДЕНИЕ

Катаклизмические переменные — это взаимодействующие тесные двойные системы (ТДС) с короткими орбитальными периодами, состоящие из белого карлика (первичный компонент) и красного карлика позднего спектрального класса K–M (вторичный компонент). В таких системах, как правило, вторичный компонент заполняет свою полость Роша и теряет массу, перенос которой осуществляется через внутреннюю точку Лагранжа L1, формируя при этом аккреционную структуру вблизи поверхности белого карлика. Характер аккреции определяется величиной его магнитного поля. При наличии в системе сильно замагниченного белого карлика, обладающего магнитным полем $B \sim 10^7$ Гс, аккрецирующий поток полностью контролируется магнитным полем, что, в свою очередь, приводит к его движению вдоль силовых линий и выпадению на один или два полюса белого

карлика. При этом формируется аккреционная колонна. Группу катаклизмических переменных, содержащих сильно замагниченные белые карлики, принято называть магнитными катаклизмическими переменными, к которым и относятся поляры.

Физические процессы, имеющие место в таких объектах, проявляются во всем спектральном диапазоне электромагнитного излучения. Отметим, что, несмотря на общую совокупность критериев их классификации, таких, как, например, сильнейшая степень поляризации излучения, короткий орбитальный период, высокое и низкое состояния блеска, каждый представитель этой группы индивидуален в своих наблюдательных проявлениях [1].

Важная роль при исследовании полярных отводится детальному изучению свойств аккреции вещества. Понятно, что при переходе из высокого в низкое состояние темп аккреции значительно уменьшается, что приводит к падению блеска системы. Предполагается, что это происходит из-за временной остановки переполнения полости Роша [2]. Это дает нам возможность определить ба-

*E-mail: crucifer.troll@gmail.com

зовые физические параметры исследуемых систем. Происходят и незначительные изменения темпа аккреции, влияющие не на общий блеск системы, а на интенсивность и профили эмиссионных линий. К сожалению, время и длительность изменений темпа аккреции непредсказуемы, и мы можем надеяться только на быстрое оповещение о результатах фотометрических мониторингов, проводимых профессиональными астрономами или астрономами-любителями.

Первые данные об исследуемом объекте появились 31 декабря 2008 г. в сервисе vsnet-alert¹ [3] после его вспышки на три звездные величины. В каталоге обзора неба Catalina [4] ему было присвоено имя CRTS CSS 081231 J071126+440405 (далее CSS 081231). В последующие две недели были опубликованы сообщения о глубоких затмениях и коротком периоде системы порядка 117 мин. [5–7]. Долговременные фотометрические наблюдения показали, что объект обладает сильной орбитальной и долговременной переменностью блеска, имеет глубокое затмение до 4^m и резкое кратковременное уменьшение яркости — «дип» (от англ. dip) глубиной до 1^m2 в зависимости от состояния блеска системы [8, 9]. Фотополариметрические наблюдения CSS 081231 в промежуточном состоянии блеска в полосе V, представленные в работе [10], показали, что излучение в этом диапазоне обладает сильной круговой поляризацией, ее знак изменяется на протяжении орбитального периода. Максимальная степень поляризации достигается в момент минимума блеска и равна –14%. Объект CSS 081231 классифицирован как поляр [10].

Данная работа является продолжением программы по изучению таких систем [10, 11] и посвящена анализу фотометрических и спектральных наблюдений CSS 081231.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

2.1. Фотометрия

Фотометрический мониторинг объекта выполнялся с момента его обнаружения на пяти оптических инструментах: на 50-см и 60-см (Цейсс-600) телескопах института астрономии Словацкой АН (ИА САН), на телескопах Цейсс-600 и 125-см ЗТЭ Крымской обсерватории МГУ (КО МГУ) и на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Характеристики используемых при наблюдениях ПЗС-детекторов представлены в таблице 1. Мы начали наблюдения поляра 31 декабря 2008 г. на 50-см телескопе ИА САН сразу после получения сообщений от

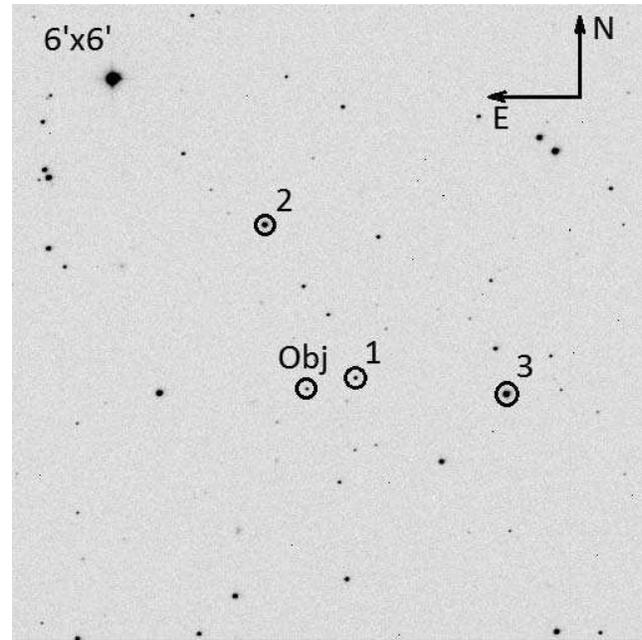


Рис. 1. Изображение поля объекта с отмеченными вторичными стандартами.

сервиса vsnet-alert. Мониторинг объекта продолжался до мая 2009 г. и с декабря 2009 г. по январь 2011 г. В 2012–2013 гг. наблюдения проводились также в КО МГУ и САО РАН. Журнал фотометрических наблюдений выложен в общий доступ в сети Интернет². В поле объекта (рис. 1) были определены вторичные стандарты, информацию о которых можно найти в таблице 2.

Наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН проводились в хороших погодных условиях с размером изображений порядка 2". Объект наблюдался с редуктором светосилы SCORPIO [12] и ПЗС-камерой EEV 42-40 (2048 × 2048) с азотным охлаждением в качестве светоприемника. На участке матрицы размером 270 × 250 пикселей в режиме прямых изображений в полосе V было получено 40 кадров с временным разрешением 16 секунд.

Для первичной редукации фотометрических данных были получены изображения электронного смещения (bias) и закатного неба (sunsy). Кадры темнового тока (dark) снимались для матриц без азотного охлаждения. Обработка всех фотометрических наблюдений проводилась стандартными методами дифференциальной апертурной фотометрии в программе Maxim DL.

¹<http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailman/listinfo/vsnet-alert>

²<http://www.ta3.sk/~astrskop/j0711/PhotometryLog.pdf>

Таблица 1. Информация об использованных инструментах

Telescope	50-cm, SAS	Z-600, SAS	Z-600, CrO	Z-1000, SAO	ZTE, CrO	BTA, SAO
CCD	FLI ML 3041	SBIG ST10 MXE	Ap-47p	EEV 42-40	VersArray	EEV 42-40
Size, pixels	2048×2048	2174×1536	1024×1024	2048×2048	1340×1340	2048×2048
Pixel size, μ	15×15	10.9×14.8	13×13	13.5×13.5	20×20	13.5×13.5
Cooling type	Peltier	Peltier	Peltier	LN ₂	LN ₂	LN ₂

Таблица 2. Информация о вторичных стандартах

Star	Coordinates $\alpha; \delta$ (2000)	V	R_c
1	07:11:22.8; +44:04:14	16.57 ± 0.05	16.24 ± 0.03
2	07:11:28.5; +44:06:02	14.88 ± 0.01	14.45 ± 0.01
3	07:11:13.2; +44:04:03	14.01 ± 0.01	13.69 ± 0.01

2.2. Спектроскопия

Спектральные наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН проводились 20 и 21 сентября 2011 г. в отличных погодных условиях при размере изображений порядка $1''$. Применялся редуктор светосилы SCORPIO-2 [13] в режиме «длинной щели» с объемной голографической решеткой с 1200 штр/мм, центрированной на длину волны 540 нм (VRHG1200@540), и матрица EEV 42-90 (4600 × 2048) с азотным охлаждением в качестве светоприемника. В каждую ночь было получено по 14 спектров в диапазоне $\lambda\lambda = 3800\text{--}7300 \text{ \AA}$ с разрешением 5.5 \AA и экспозицией 300 с, которые покрыли фазы орбитального периода $\varphi = 0.13\text{--}0.81$ (20 сентября 2011 г.) и $\varphi = 0.60\text{--}1.29$ (21 сентября 2011 г.). Для дальнейшей калибровки в течение ночи были получены изображения электронного смещения (bias), He-Ne-Ar-лампы (неон), кварцевой лампы (flat) и спектры спектрофотометрического стандарта BD +33^d2642 [14]. Обработка наблюдений происходила по стандартным методикам в среде IDL³.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Долговременные фотометрические наблюдения показали сильную переменность блеска объекта. Наблюдалось три состояния объекта: низкое, $R_c \sim 17^m5$, промежуточное, $R_c \sim 16^m0$ и высокое,

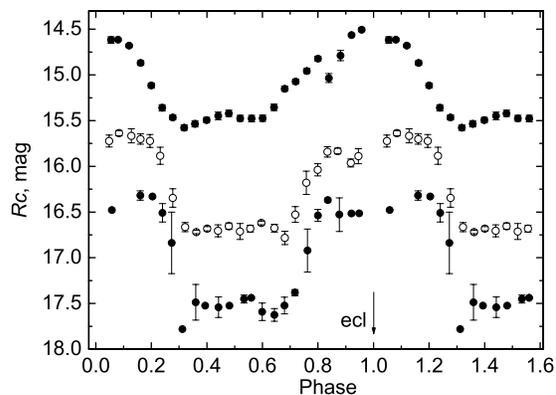


Рис. 2. Кривые блеска CSS 081231 в полосе R_c в трех состояниях блеска в видимых звездных величинах. Затмение удалено для большей наглядности.

$R_c \sim 15^m0$. На рис. 2 представлены средние орбитальные кривые блеска в высоком, среднем и низком состояниях активности. Для большей наглядности моменты затмения удалены. Видны возрастание и ослабление яркости в течение периода, связанные с видимостью активных излучающих областей. Амплитуда переменности $\Delta m \sim 1^m0$. Она не меняется от состояния блеска. Имеется асимметричный максимум, в центре которого происходит кратковременное затмение глубиной до 4^m5 . В середине орбитального периода, $\varphi = 0.3\text{--}0.7$, блеск системы практически постоянен. Из этого следует, что аккреционная колонка — основная область излучения в континууме — прячется за лимбом белого карлика. На кривой блеска перед максимумом на фазах $\varphi = 0.83\text{--}0.92$ имеется дип, глубина которого зависит от количества вещества в струе, перетекающей от красного карлика. Она максимальна в высоком состоянии, а в низком дип исчезает вовсе. Оптическая глубина струи аккрецирующего вещества при этом может достигать больших значений [9]. Небольшое увеличение блеска в фазе $\varphi = 0.48$, по-видимому, тоже связано с количеством аккрецирующего вещества. Аккреционная структура увеличивается в размерах

³<http://www.itervis.com/idl>

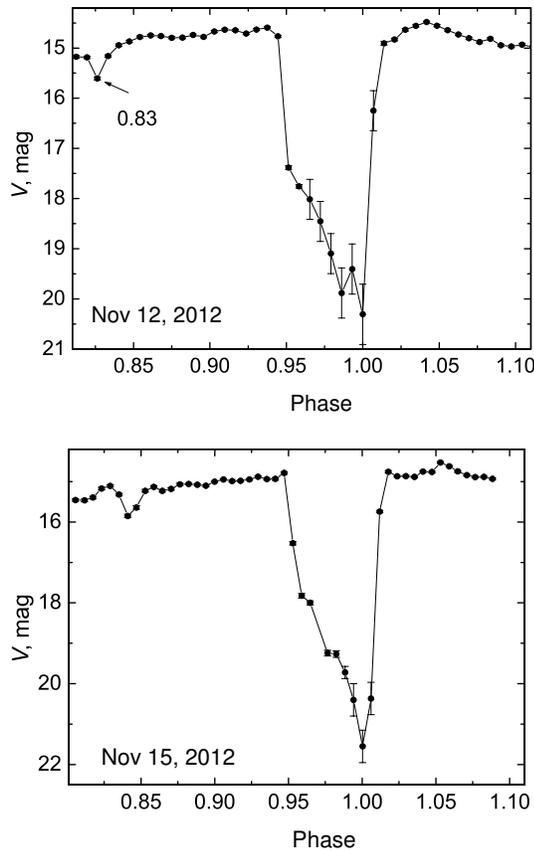


Рис. 3. Кривые блеска на фазах $\varphi = 0.8-1.1$ в полосе V от 12 и 15 ноября 2012 г., полученные на телескопе ЗТЭ КО МГУ.

при высоком темпе аккреции и не скрывается за лимбом белого карлика полностью.

Следует отметить, что, в отличие от части карликовых новых, у которых вспышки происходят через некоторое рекуррентное время, у новоподобных, к которым относятся и поляры, переход из низкого в высокое состояние блеска происходит спонтанно, и трудно предсказать, в каком состоянии будет находиться система в тот или иной промежуток времени. Вопрос о механизме перехода поляров в разные состояния блеска и сегодня остается открытым. Единственное, в чем сходятся все гипотезы — это изменение темпа аккреции вещества.

Первоначально в нашей работе была использована эфемерида, рассчитанная в работе Торна и др. [8]. Заметив систематическое смещение по фазе положения затмения, мы уточнили орбитальный период системы и получили $P_o = 0^d08137673(2)$, что и использовали в дальнейшем. Близкий к определенному нами период $P_o = 0^d0813768094(6)$ найден в работе Швоупа и др. [15].

Хорошие погодные условия в КО МГУ в ноябре 2012 г. позволили провести плотный наблюдатель-

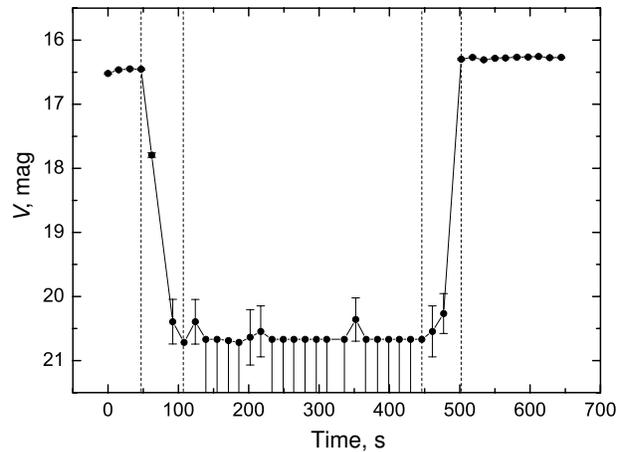


Рис. 4. Затмение объекта CSS 081231 в полосе V, полученное на телескопе БТА. Вертикальными линиями отмечены слева направо: начало затмения, начало фазы полного затмения, конец фазы полного затмения, конец затмения. Для измерений с отношением $S/N \approx 3$ показан верхний предел звездной величины.

ный сет. На рис. 3 представлены фрагменты кривой блеска от фазы 0.8 до фазы 1.10 в высоком состоянии блеска, на которых хорошо виден дип и само затмение. Следует отметить интересную форму затмения — ступенчатый спуск и быстрый подъем. По-видимому, это связано с постепенным затмением вещества, скопившегося над поверхностью белого карлика и излучающего в континууме.

Результаты фотометрических наблюдений затмения объекта в низком состоянии блеска 5 декабря 2012 г., проведенные на телескопе БТА, показаны на рис. 4. Форма затмения другая, падение и подъем блеска одинаковы по продолжительности, около 50 с, глубина затмения составляет примерно 4^m5 . Затмение продолжалось в течение 450 с, полная фаза затмения длилась около 350 с, или 0.05 в долях орбитального периода. В низком состоянии блеска, когда темп аккреции мал, аккрецирующее вещество не накапливается над поверхностью белого карлика. Следовательно, падение блеска до минимального уровня во время затмения происходит быстро. Полученная величина продолжительности затмения использовалась для нахождения параметров системы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Спектры объекта, полученные 20 и 21 сентября 2011 г., имеют типичный для катаклизмических переменных вид. На континуум наложены эмиссионные линии водорода серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия (рис. 5). Видно, что наклон континуума в фазах максимума блеска $\varphi = 0.1-0.3$

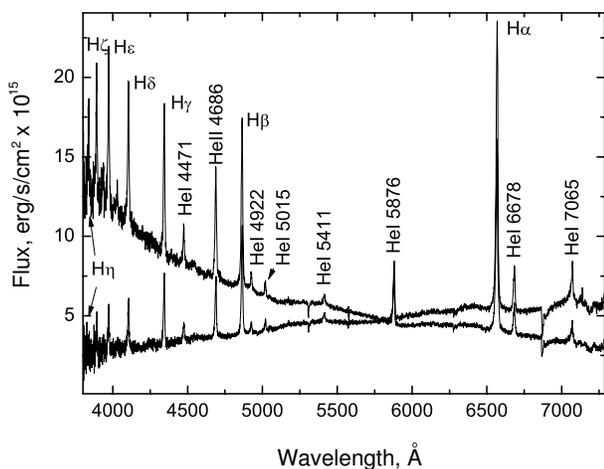


Рис. 5. Усредненные по фазам $\varphi = 0.1-0.3$ спектры объекта за 20 сентября («красный») и 21 сентября 2011 г. («синий») континуумы, полученные на телескопе БТА САО РАН.

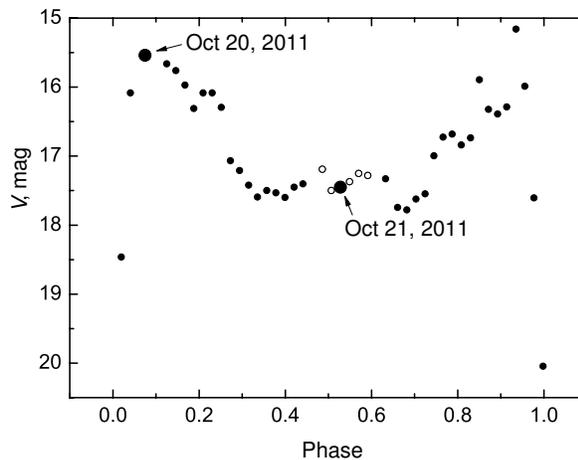


Рис. 6. Кривая блеска объекта в полосе V , полученная на телескопе Цейсс-1000 22 сентября 2011 г. (маленькие кружки). Оценка блеска 21 сентября 2011 г. на телескопе Цейсс-1000 — незаполненные кружки. Большие кружки — оценка блеска по изображениям, снятым на телескопе БТА непосредственно перед спектральными наблюдениями.

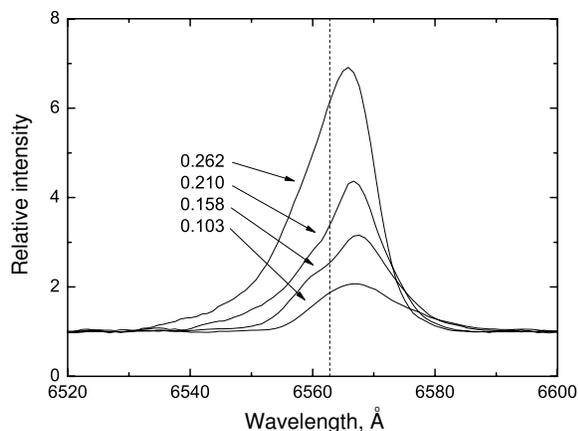
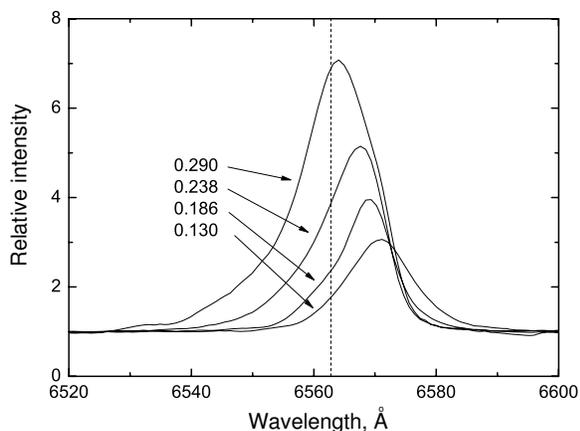


Рис. 7. Изменение профилей линии $H\alpha$ на фазах $\varphi = 0.1-0.3$ 20 сентября 2011 г. (слева) и 21 сентября 2011 г. (справа). Вертикальной линией отмечена лабораторная длина волны линии $H\alpha$. Числа обозначают фазу орбитального периода, в которой был получен спектр.

меняется от «красного» (20 сентября 2011 г.) к «синему» (21 сентября 2011 г.). Оценка блеска по изображениям, снятым во время спектроскопических наблюдений и на телескопе Цейсс-1000, показала, что в полосе V он не менялся с 20 по 22 сентября 2011 г. (рис. 6). Сравнивая профили линии $H\alpha$ на перекрывающихся фазах $\varphi = 0.1-0.3$ (рис. 7), можно заметить, что в спектрах от 20 сентября 2011 г. линии смещены в красную сторону, и смещение пиков линий происходит быстрее. Анализ трейлер-спектров, отражающих изменение интенсивности, профиля и доплеровского смещения линии в зависимости от фазы орбитального периода, показывает, что в наблюдениях 20 сентября 2011 г. на фазах $\varphi = 0.34-0.49$ линии начинают

раздваиваться, появляется отдельный пик, чего мы не видим в профилях линий в спектрах от 21 сентября 2011 г. (рис. 8), т.е. за две последовательные ночи изменилась область формирования эмиссионных линий. Этот вывод подтвердило и доплеровское картирование (см. ниже). Особенностью профилей всех эмиссионных линий в данных 21 сентября 2011 г. становится появление абсорбционных деталей на фазах, близких к затмению $\varphi = 0.84-0.95$ (рис. 9). Они появляются в красном крыле линий и смещаются в синюю часть, при этом линии нейтрального гелия становятся абсорбционными. Исключением является линия $He\ II\ 4686\ \text{\AA}$, где поглощается только красная часть линии. Такое происходит при особой геометрии системы, когда

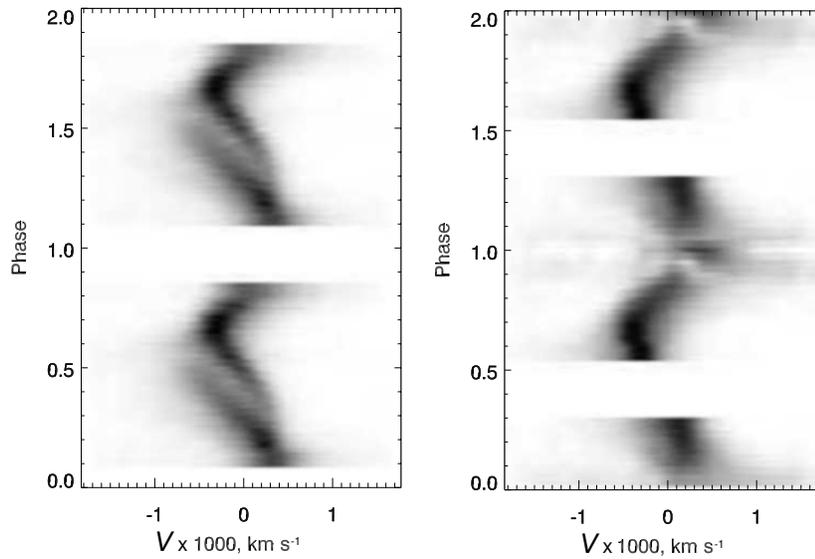


Рис. 8. Трейлер-спектры — изменение интенсивности, профиля и доплеровского смещения линии в зависимости от фазы орбитального периода, линии H α 20 сентября 2011 г. (слева) и 21 сентября 2011 г. (справа).

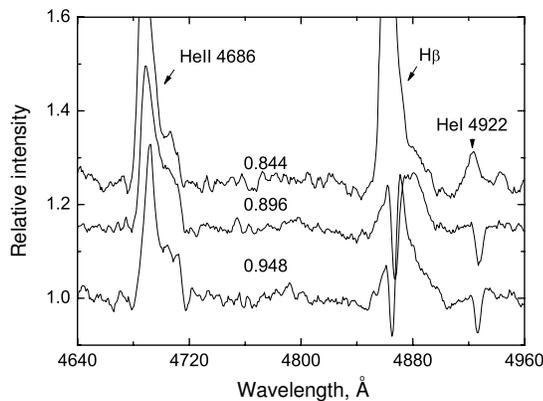


Рис. 9. Изменение профилей линий на фазах $\varphi = 0.84-0.95$ в спектрах 21 сентября 2011 г.

струя аккрецирующего вещества движется впереди красного карлика по ходу его движения по орбите (как показано на рис. 12 в [16]), а угол наклона орбиты к лучу зрения наблюдателя приближается к 90°. Подобная наблюдательная особенность обнаружена ещё в трех полярах: EF Eri [17], MN Hydra [18] и FL Cet [16], проявляясь в разной степени и в разных линиях. Изучение подобных систем важно для исследования структуры струи аккрецирующего вещества.

Измерение лучевых скоростей основных эмиссионных линий H α , H β , He I $\lambda 5876$ Å, He II $\lambda 4686$ Å проводилось методом их кросс-корреляции с линиями в спектре с максимальной интенсивностью. Результаты с поправкой на лабораторную длину волны показаны на рис. 10. Про-

исходит квазисинусоидальное изменение лучевых скоростей с плавным падением и более крутым нарастанием. Выделяются лучевые скорости линии He II $\lambda 4686$ Å, для которых детектируется отклонение от среднего значения остальных линий. Заметно, что амплитуда скоростей линии He II $\lambda 4686$ Å выше. Сравнивая имеющиеся данные двух ночей, мы делаем вывод, что амплитуда изменения лучевых скоростей линий H α , H β , He I $\lambda 5876$ Å уменьшилась 21 сентября 2011 г. Амплитуда изменения скоростей He II $\lambda 4686$ Å остается неизменной, аппроксимация синусоидой двух наборов данных по указанной линии за 20 и 21 сентября 2011 г. показывает, что изменилась только гамма-скорость с 230 до 80 км с $^{-1}$ при неизменных в пределах ошибок амплитуде и нулевой фазе. Значение периода приравнялось к 1.

Измерение лучевой скорости красной компоненты линии H α на фазах $\varphi = 0.34-0.49$ в спектрах 20 сентября 2011 г. производилось с помощью Гаусс-анализа. В полученные профили линий вписывались две гауссианы, длина волны красного пика использовалась для определения скорости излучающего вещества по известной формуле:

$$V = C \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0},$$

где C — скорость света, λ_0 — лабораторная длина волны, λ — измеренная длина волны. Далее проводилась аппроксимация значений лучевых скоростей красного пика моделью кругового движения с фиксированным значением периода, равным единице, остальные параметры были

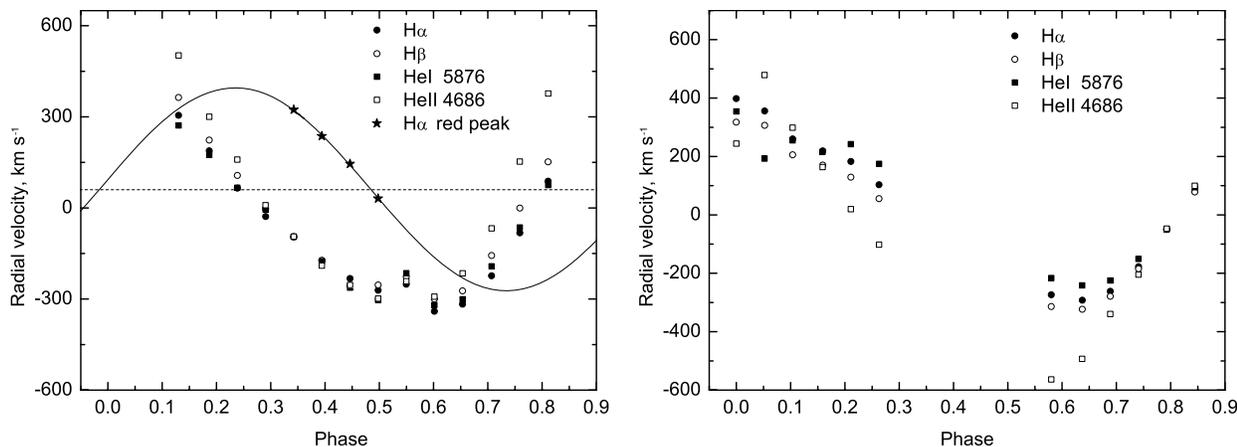


Рис. 10. Лучевые скорости, измеренные по основным эмиссионным линиям 20 сентября 2011 г. (слева) и 21 сентября 2011 г. (справа). Звездами показаны значения лучевых скоростей красной компоненты линии $H\alpha$, их аппроксимация синусоидой — сплошная линия, значение гамма-скорости — штриховая линия.

свободными. В результате были получены ее параметры: $K_h = 334 \pm 11 \text{ км с}^{-1}$, $\varphi = -0.04 \pm 0.01$, $\gamma = 61 \pm 26 \text{ км с}^{-1}$. Красная компонента линии формируется на поверхности вторичного компонента под действием эффектов переизлучения, поэтому мы использовали значение амплитуды лучевых скоростей для определения параметров системы (см. ниже).

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Имеющийся набор наблюдательных данных недостаточен для однозначного определения параметров CSS 081231. Поэтому мы использовали дополнительное предположение о принадлежности вторичного компонента к звездам Главной последовательности (ГП) с химическим составом, близким к солнечному. Это предположение является вполне обоснованным, поскольку, как показано ниже, белый карлик в системе имеет массу $M_1 > 0.75 M_\odot$, т.е. является конечной стадией эволюции звезды с начальной массой не менее $4.00 M_\odot$ за время $t < 2 \times 10^9$ лет. Таким образом, система CSS 081231 принадлежит к молодому населению Галактики с солнечным химическим составом. Ее вторичный компонент не мог закончить эволюцию на стадии ГП. При определении его параметров можно использовать эволюционные треки звезд ГП разных масс для $z = 0.019$ [19], позволяющие для фиксированной массы получать радиус R_2 . Определенный таким образом радиус красного карлика сравнивался с эффективным радиусом его полости Роша R_{L2} , определяемым для заданного отношения масс звезд $q = M_2/M_1$ и большой

полуоси A по формуле [20]:

$$R_L = A \times \frac{0.49 q^{2/3}}{0.6 q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}.$$

Отметим, что вследствие гравитационного возмущения, создаваемого белым карликом, истинный радиус вторичного компонента немного превышает значение R_2 для одиночных звезд ГП. Поэтому считалось, что должно выполняться условие $R_{L2} = k \times R_2$, где k может изменяться в пределах от 1.03 до 1.09, т.е. радиус полости Роша превышал эволюционный радиус красного карлика на 3–9%.

Для нахождения функции масс белого карлика использовалась установленная ранее амплитуда лучевых скоростей горячего пятна на поверхности вторичного компонента $K_h = 334 \pm 11 \text{ км с}^{-1}$. Данная величина должна быть исправлена за разность лучевых скоростей центра масс звезды и горячего пятна ΔK_2 . Определение поправок лучевых скоростей мы выполнили на основе анализа возможных смещений линий в модельных спектрах CSS 081231. Теоретические спектры вычислялись с учетом эффектов отражения и несферичности компонентов ТДС по методике, разработанной в [21] с применением моделей атмосфер звезд с внешним облучением. Для проведения расчетов задавались фундаментальные параметры вторичного компонента (температура, масса, радиус), отношение масс компонентов и мощность излучения рентгеновского источника. Поверхность холодной звезды разбивалась на малые площадки, для каждой из которых находились локальные параметры звездной атмосферы (T_{eff} , $\lg g$) и внешнего потока (угол наклона θ , отношение интенсивностей падающего и собственного излучения K_x). Модели

облучаемых атмосфер для данных параметров рассчитывались методом баланса функций нагрева и охлаждения плазмы, разработанным в [22, 23]. Начальные модели необлучаемых атмосфер получены интерполяцией сеток [24] по методике, описанной в [25]. На основе моделей атмосфер вычислялись синтетические спектры каждой площадки, попадающей на луч зрения наблюдателя в 72 фазах орбитального периода. Они складывались с учетом влияния вращения звезды на их лучевые скорости и условия видимости. Интегральный спектр звезды сдвигался в соответствии с лучевой скоростью ее центра масс и сворачивался с аппаратной функцией спектрографа. Добавим, что при моделировании спектров учитывались все источники непрозрачности в континууме, табулированные в комплексе SPECTR [21], около 2 000 000 линий атомов, ионов и шестнадцати основных молекул, а также отклонения от ЛТР для атомов H I, He I и He II, рассчитанные с применением программного комплекса NONLTE3 [26]. Химический состав атмосферы холодной звезды считался равным солнечному в соответствии с данными [27].

Смещение линий в теоретических спектрах, обусловленное действием вращения и орбитального движения звезды, измерялось методом их кросс-корреляции аналогично анализу наблюдательных данных. Скорость вращения на экваторе предполагалась синхронной орбитальному движению и вычислялась по формуле:

$$V = \frac{R \times (1 + q)}{A} \times (K_h + \Delta K_2),$$

где R и V — радиус звезды и скорость движения для заданной локальной площадки. Взаимная зависимость величины V от поправки лучевой скорости ΔK_2 делала процесс их нахождения итерационным при фиксированных значениях остальных параметров. В итоге было показано, что для широкого диапазона параметров CSS 081231 полученная величина $K_h = 334 \pm 11 \text{ км с}^{-1}$ определяет среднюю экваториальную скорость вращения на уровне $V = 127 \pm 3 \text{ км с}^{-1}$, а поправку амплитуды лучевой скорости холодной звезды — в диапазоне $\Delta K_2 = 70\text{--}71 \text{ км с}^{-1}$. Тестовые расчеты показали, что данная оценка имеет высокую устойчивость к изменению остальных параметров (q , K_h , A), и мы зафиксировали ее как $\Delta K_2 = 70 \text{ км с}^{-1}$. Итоговая амплитуда лучевых скоростей вторичного компонента составила $K_2 = 404 \pm 11 \text{ км с}^{-1}$, а функция масс главного компонента — $f(M_1) = 0.56 \pm 0.04 M_\odot$.

Дальнейшее определение масс компонентов включало вариацию величины q до достижения равенства $R_{L2} = k \times R_{L1}$. Угол наклона системы

при заданном q находился из фазовой наблюдаемой длительности полного затмения $\Delta\varphi = 0.050$ и результатов его теоретических расчетов [28]. Оказалось, что для допустимых в CSS 081231 значений $q = 0.20\text{--}0.22$ угол меняется в диапазоне $i = 78.7\text{--}79.3$ и его возможные ошибки не оказывают никакого влияния на результат. В итоге с применением полученной оценки функции масс и эволюционных треков звезд ГП [19] нами определены массы обоих компонентов: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_\odot$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_\odot$ и величина большой полуоси $A = 0.80 \pm 0.03 R_\odot$. Соответствующий эволюционный радиус холодной звезды $R_2 = 0.19 \pm 0.02 R_\odot$, а ее полости Роша — $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_\odot$. Отметим, что основным источником ошибок в представленных значениях параметров являются неточности измерения амплитуды лучевых скоростей K_h .

Полученные характеристики CSS 081231 в целом соответствуют наиболее вероятным значениям для объектов данного типа. В частности, по данным каталога ТДС [29] в изученных семнадцати полярах с орбитальными периодами $P_o \leq 0.15$ средняя масса главных компонентов $M_1 = 0.75 \pm 0.22 M_\odot$, а масса вторичных компонентов — $M_2 = 0.21 \pm 0.07 M_\odot$ при среднем значении отношения масс $q = 0.22$. В результате можно сделать вывод, что с точки зрения фундаментальных параметров CSS 081231 является нормальным поляром.

Для проверки найденного набора параметров мы рассчитали интегральный спектр CSS 081231 в фазе полного затмения и сравнили его с наблюдаемым. При моделировании варьировались эффективная температура красного карлика в диапазоне $T_{\text{eff}} = 3330\text{--}3470 \text{ К}$ (соответствующем для звезд ГП интервалу масс $M = 0.16\text{--}0.20 M_\odot$) и содержание ряда тяжелых элементов в его атмосфере. Сила тяжести на поверхности звезды фиксировалась на уровне $\lg g = 5.00$. Критерием наилучшего соответствия теоретического и наблюдаемого спектров являлось равенство в них интенсивностей бленды линий резонансного дублета Na I и молекулярных полос TiO, MgH в области с $\lambda > 5370 \text{ \AA}$.

На рис. 11 представлено итоговое согласование спектров и их остаточная разность, полученные при $T_{\text{eff}} = 3460 \pm 20 \text{ К}$, $[\text{Ti}/\text{H}] = 0.2$, $[\text{O}/\text{H}] = [\text{Mg}/\text{H}] = [\text{Na}/\text{H}] = 0.0$. Вторичный компонент доминирует в спектре затмения на длинах волн $\lambda > 5200 \text{ \AA}$, а его параметры соответствуют звезде ГП солнечной металличности с $M = 0.20 M_\odot$, что полностью подтверждает корректность полученных нами параметров CSS 081231. Излучение горячей плазмы наблюдается в спектрах затмения в виде эмиссионных линий водорода и гелия, а также «синего»

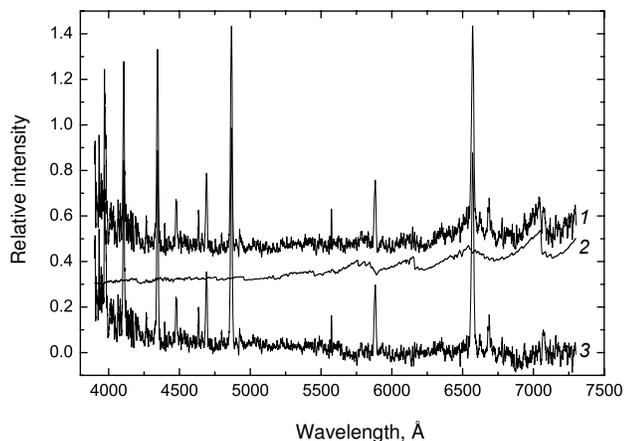


Рис. 11. Наблюдаемый спектр в момент затмения (1), теоретическая модель излучения красного карлика, полученная при $T_{\text{eff}} = 3460 \pm 20$ К, $[\text{Ti}/\text{H}] = 0.2$, $[\text{O}/\text{H}] = [\text{Mg}/\text{H}][\text{Na}/\text{H}] = 0.0$ (2), остаточная разность (3). Теоретический и наблюдаемый спектр разнесены по оси Y для большей наглядности.

континуума в диапазоне $\lambda < 5700$ Å. Анализ остаточного спектра показал, что он не может быть описан планковским распределением при любой температуре плазмы, т.к. имеет слишком высокий градиент $\frac{dF_{\lambda}}{d\lambda}$. Наблюдаемое отношение продолжительности затмения к орбитальному периоду говорит о формировании континуума в остаточном спектре на расстоянии $l > 0.05 R_{\odot}$ от поверхности белого карлика, т.е. вне внутренней области аккреционной колонны. Заметим, что в момент затмения не наблюдается точка L_1 со струей плазмы, истекающей к аккретору. Поэтому можно сделать вывод о формировании «синего» континуума в спектре затмения главным образом во внешних слоях аккреционной колонны, излучающих вследствие действия эффектов флуоресценции. Эти слои доминируют также в излучении эмиссионных линий, что подтверждается их большой полушириной ($\Delta\lambda > 10$ Å) и значительным доплеровским смещением ($\delta\lambda > 4$ Å).

Отдельный интерес представляет оценка протяженности области формирования оптического континуума в аккреционной структуре объекта. Малая скважность и высокое качество фотометрических данных для фаз затмения позволяют оценить продолжительность его частных фаз на уровне $t = 51\text{--}55$ секунд (см. рис. 4) или $t = 0.0075 P_{\text{orb}}$. Соответствующий размер области излучения континуума $l \approx 0.037 R_{\odot}$. Согласно моделям белых карликов с углеродными и кислородными ядрами [30], радиус звезды с массой $M = 0.86 M_{\odot}$ составляет $R = 0.010\text{--}0.012 R_{\odot}$, показывая некоторую зависимость от темпера-

туры. Для наименьшего из возможных значения $M = 0.78 M_{\odot}$ максимальная величина радиуса достигнет $R = 0.014 R_{\odot}$ при $T_{\text{eff}} = 100\,000$ К. Таким образом, наблюдаемая область формирования оптического излучения превышает диаметр белого карлика в 1.4–2.0 раза, т.е. аккреционная структура оказывается оптически толстой в континууме на расстояниях 8000–10 000 км от его физической поверхности.

6. ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

Для выявления причин наблюдаемых различий в спектрах CSS 081231, полученных 20 и 21 сентября 2011 г., мы использовали расчеты карт областей излучения в линиях H I, He I и He II методом доплеровской томографии [31]. Доплеровское картирование выполнено для данных обеих ночей с использованием программного комплекса Шпруита [32], реализующего метод минимизации энтропии, с анализом наблюдаемых эмиссионных линий. Карты строятся в плоскости скоростей, где ось x направлена от белого карлика к красному, а ось y — вдоль движения красного карлика по орбите. Результаты доплеровской томографии показаны на рис. 12–15. Помимо областей излучения на картах отмечены: точка нулевых скоростей, центры масс обоих компонентов, полость Роша красного карлика и траектория струи при движении вещества по кеплеровской орбите.

В спектрах 20 сентября 2011 г. излучение в линиях водорода формируется в области переизлучения на поверхности вторичного компонента двойной системы и струе перетекающего вещества, простирающейся до области, соответствующей скорости $V_x = -900$ км с⁻¹, внешние границы которой размыты. Данная структура областей излучения проявляется как в линии H α , так и в линии H β и является характерной для многих полярных, находящихся в относительно спокойном состоянии блеска (см., например, [33]). Такая же структура излучающих областей наблюдается и в линии He I. Совсем другая структура у областей излучения на доплеровской карте, полученной по линии He II $\lambda 4686$ Å. Здесь максимальная интенсивность излучения приходится на струю перетекающего вещества, и практически отсутствует область, связанная с переизлучением на поверхности красного карлика. Пик максимальной интенсивности локализован в области, соответствующей скорости $V_x = -350$ км с⁻¹, а структура не столь сложна по сравнению с линией He I.

Доплеровские карты, полученные по спектрам 21 сентября 2011 г., существенно отличаются от результатов предыдущей ночи. Пик максимальной интенсивности излучающих областей в линиях H I

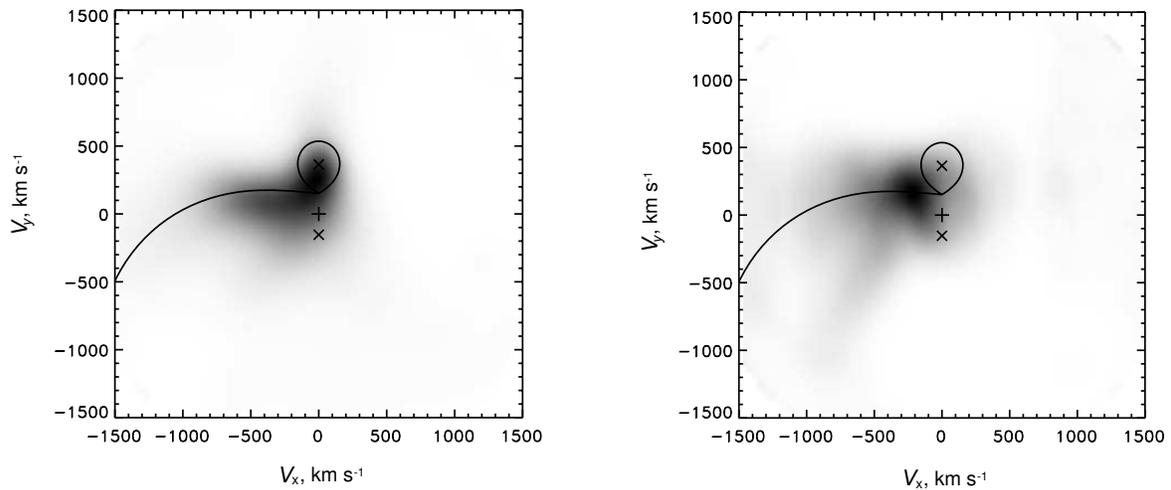


Рис. 12. Доплеровские карты, построенные по линии $H\alpha$ за 20 сентября 2011 г. (слева) и 21 сентября 2011 г. (справа). Элементы, присутствующие на картах, описаны в тексте.

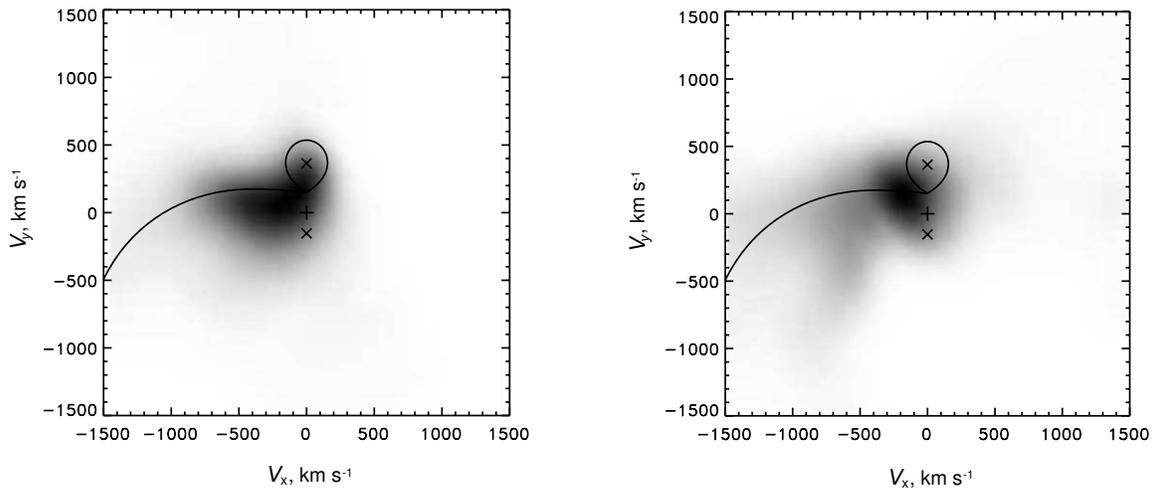


Рис. 13. Тоже, что на рис. 12, для линии $H\beta$.

и HeI смещен в область больших скоростей, и переизлучение на поверхности вторичного компонента практически отсутствует. В области, соответствующей $V_x = -500 \text{ км с}^{-1}$, сформировалась структура низкой контрастности, которая наилучшим образом проявляется в линии HeI. Область максимальной интенсивности излучения в линии He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ увеличила линейные размеры вдоль струи перетекающего вещества в два раза, при этом положение ее центра в поле скоростей сохранилась и соответствует $V_x = 350 \text{ км с}^{-1}$.

Резюмируя результаты доплеровской томографии, можно сделать вывод о наличии в системе CSS 081231 на даты наблюдения следующих особенностей:

1. Области формирования эмиссионных линий H I и He I существенно отличаются 20 сентября 2011 г. и 21 сентября 2011 г. Если в первую из ночей основной вклад в излучение данных линий определяется переизлучением на поверхности красного карлика, плавно переходящим в область более высоких скоростей вдоль перетекающей струи, то 21 сентября 2011 г. переизлучение перестает доминировать, а в области, соответствующей $V_x = -500 \text{ км с}^{-1}$, формируется структура низкой контрастности.

2. Основное яркое пятно, видимое по данным 20 сентября 2011 г. в линиях H I и He I, связано с переизлучением на поверхности вторичного компонента, что подтверждает и появление узкого пика в красном крыле профилей эмиссионных линий

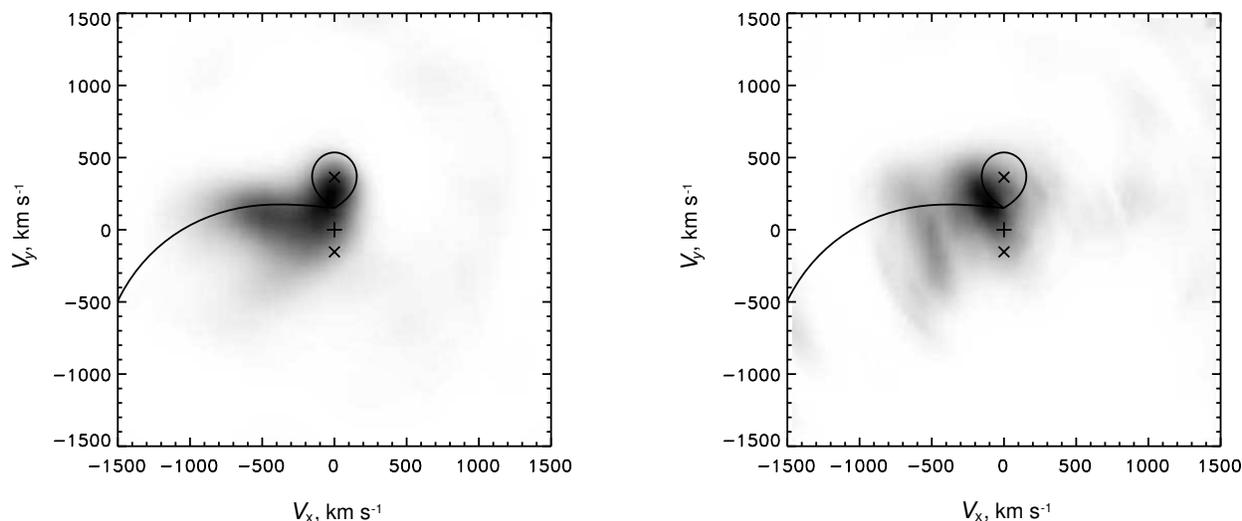


Рис. 14. Тоже, что на рис. 12, для линии He I $\lambda 5876 \text{ \AA}$.

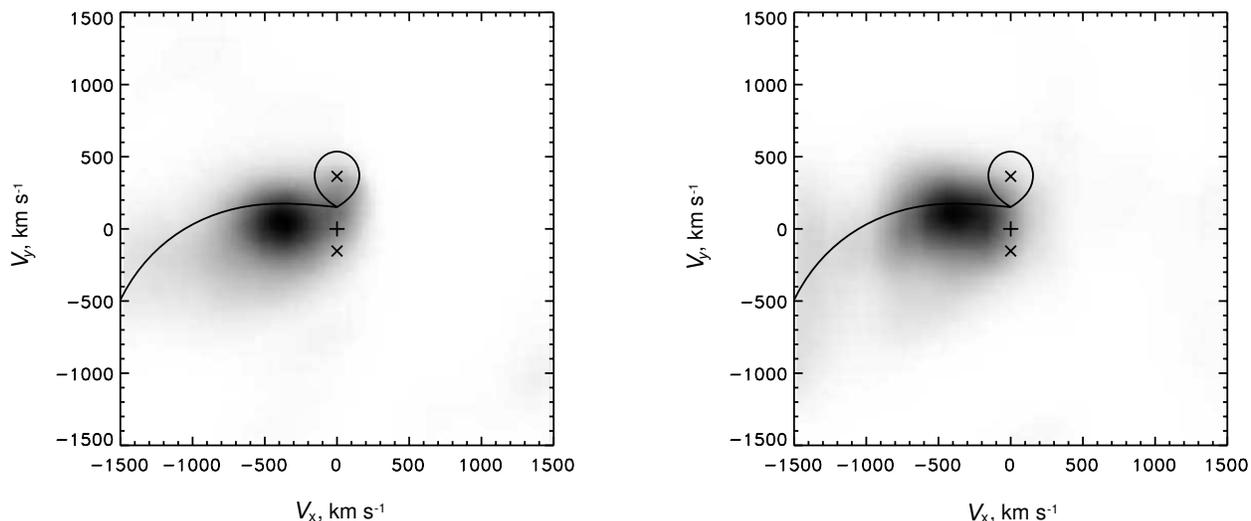


Рис. 15. Тоже, что на рис. 12, для линии He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$.

на фазах орбитального периода $\varphi = 0.34\text{--}0.49$. Это обосновывает выбор значений лучевых скоростей, определенных по красному пику, для нахождения скорости движения красного карлика по орбите.

3. В томограммах по данным 21 сентября 2011 г. на $V_x = -500 \text{ км с}^{-1}$ видна умеренно холодная, оттекающая область, которая лучше всего проявляется в линиях He I. Очень вероятно, что появление этой дополнительной области разреженного газа ответственно за абсорбции в профилях эмиссионных линий He I, He I и He II в фазах орбитального периода $\varphi = 0.84\text{--}0.95$. Отметим,

что именно линии нейтрального гелия переходят в поглощение полностью.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Моделирование циклотронного излучения для определения параметров аккреционной колонки проводилось в предположении термодинамического равновесия излучающей среды с использованием программного кода HARMONY [34], при помощи которого вычислялись коэффициенты циклотронной непрозрачности обыкновенных и необыкновенных волн α_{\pm} . Коэффициенты непрозрачности являются функциями частоты ω/ω_c

($\omega_c = eB/m_e c$ — циклотронная частота), температуры плазмы T_e и угла между вектором магнитного поля и лучем зрения θ . Вычисление интенсивности излучения проводилось в предположении небольшого размера зоны циклотронной эмиссии и в том, что изменение направления и напряженности магнитного поля в ее пределах мало, а также в предположении ее температурной однородности. В таком случае решение уравнение переноса для двух мод поляризации представляется в виде

$$I_{\pm} = I_{RJ}(1 - \exp(-\alpha_{\pm}\Lambda)), \quad (1)$$

где I_{\pm} — интенсивность обыкновенных и необыкновенных волн, I_{RJ} — интенсивность Рэлея–Джинса, а Λ — безразмерный параметр, определяемый как

$$\Lambda = \frac{\omega_p^2 s}{\omega_c c}. \quad (2)$$

В последнее выражение входят геометрическая толщина излучающей области вдоль луча зрения s и плазменная частота ω_p . Коэффициент поглощения в формуле (1) дан в единицах $\omega_p^2/\omega_c c$. Полная интенсивность излучения определяется суммой двух мод поляризации:

$$I = I_+ + I_-. \quad (3)$$

Анализ спектрального материала полярных свидетельствует о растянутости зон циклотронного излучения, что проявляется в различии наблюдаемых спектров и теоретических спектров простых моделей [35, 36]. Указание на растянутость излучающих областей также проявляется при анализе фотополариметрического материала [37, 38]. Несмотря на существующие проблемы моделирования циклотронных спектров, используемое в данной работе предположение малости зоны циклотронного излучения может быть использовано для оценки усредненных параметров излучающей области и часто применяется в анализе современных спектроскопических данных [39, 40].

Определение физических характеристик зоны циклотронных эмиссий проводилось путем сравнения теоретического и наблюдаемого спектров при варьировании параметров B , T_e , θ и Λ . Сложное влияние данных параметров на вид циклотронного спектра проявляется в эффектах разного рода. Так, положение циклотронных гармоник чувствительно к напряженности магнитного поля B . Температура среды T_e сказывается на ширине гармоник, она же влияет на наклон спектра. Похожий эффект дает параметр Λ . Ориентация вектора магнитного поля по отношению к лучу зрения θ отражается на остроте циклотронных пиков и вносит небольшой вклад в изменение положения гармоник.

В итоге наилучшее совпадение пиков и интенсивностей линий получилось при усреднении

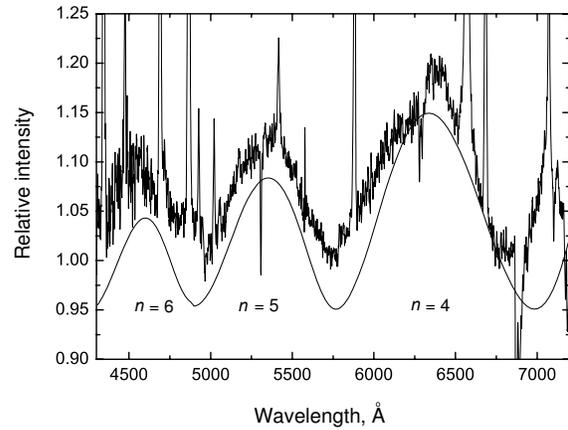


Рис. 16. Сравнение наблюдаемых и теоретических спектров циклотронных гармоник. Отмечены номера гармоник.

нескольких модельных спектров в диапазоне параметров $B = 31\text{--}34$ МГц, $T_e = 10\text{--}12$ КэВ, $\theta = 80\text{--}90^\circ$ и $\Lambda = 10^5$ (рис. 16).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге работы по исследованию полярных CSS 081231 получены следующие результаты:

1. При долговременном мониторинге наблюдалось три состояния блеска объекта: низкое, $R_c \sim 17^m 5$, промежуточное, $R_c \sim 16^m 0$, и высокое, $R_c \sim 15^m 0$. Переход в разные состояния происходит без какой-либо закономерности. Наблюдательные особенности кривых блеска в разных состояниях связаны с пространственными размерами аккреционной структуры, которая изменяется в зависимости от темпа аккреции.
2. Уточнен орбитальный период системы $P_o = 0^d 08137673(2)$.
3. Измерена длительность полного затмения системы и наложены ограничения на угол наклона системы $78^\circ 7 < i < 79^\circ 3$.
4. В спектрах объекта, типичных для катаклизмических переменных, присутствуют эмиссионные линии H I, He I, He II. Спектральные данные указывают на то, что с 20 на 21 сентября 2011 г. произошли изменения геометрии областей формирования эмиссионных линий и распределения энергии в оптическом спектре объекта.
5. Анализ доплеровских карт показал, что во время наблюдений 20 сентября 2011 г. эмиссионные линии формировались в основном на поверхности вторичного компонента, красного карлика, что подтверждается появлением на фазах

$\varphi = 0.34\text{--}0.49$ красных пиков в профилях линий. Сутками позже (21 сентября 2011 г.), эта область перестала доминировать, появилась другая, расположенная на доплеровских картах вблизи $V_x = -500 \text{ км с}^{-1}$. Вполне вероятно, что возникновение этой дополнительной области разреженного газа ответственно за появление компонент поглощения в профилях эмиссионных линий H I, He I и He II в фазах орбитального периода $\varphi = 0.84\text{--}0.95$.

6. В результате расчетов получены следующие параметры системы: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_\odot$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_\odot$, $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_\odot$, $A = 0.8 \pm 0.03 R_\odot$, $q = 0.21 \pm 0.01$. Сравнение теоретического спектра красного карлика со спектром, полученным в затмении, подтвердило надежность определения параметров и использованного метода.

7. Сравнение наблюдаемых линий циклотронного излучения с теоретическими позволило оценить параметры аккрецирующей структуры вблизи поверхности белого карлика: $B = 31\text{--}34 \text{ МГс}$, $T_e = 10\text{--}12 \text{ КэВ}$, $\theta = 80^\circ\text{--}90^\circ$ и $\Lambda = 10^5$.

Данный поляр обладает крайне нестабильным темпом аккреции, что находит отражение в его наблюдательных проявлениях. Можно отметить и вспышку на 3^m , когда объект был открыт, и изменение кривых блеска не только при смене состояний, но и от периода к периоду в течение одной ночи. Уникальное явление, которое нам удалось наблюдать — изменение наклона континуума и областей формирования эмиссионных линий при неизменном среднем блеске системы в V . Скорее всего, блеск менялся и в других полосах, но, к сожалению, у нас нет данных для проверки этой гипотезы. Можно предположить, что у полярных бывают локальные изменения аккреционной структуры, которые не проявляются при наблюдениях с одним фильтром. Для детектирования подобных явлений перспективным видится многополосный мониторинг этих объектов. Получая спектральные данные в разных состояниях системы, можно обстоятельно исследовать физику струи аккрецирующего вещества. Моделирование циклотронного излучения позволит более детально изучить аккреционную структуру, формирующуюся вблизи поверхности белого карлика.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА и Цейсс-1000 проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 14-50-00043), а

также грантов РФФИ (14-02-00825, 15-02-06178, 15-42-02573 и 16-32-60039) и грантов VEGA 2/0002/13 и NSH-1675.2014.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Warner, *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995).
2. M. Livio and J. E. Pringle, *Astrophys. J.* **427**, 956 (1994).
3. H. Maehara, vsnet-alert 10867.
4. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, et al., *Astrophys. J.* **696**, 870 (2009).
5. D. Denisenko and S. Korotkiy, vsnet-alert 10870.
6. T. Kato, vsnet-alert 10874.
7. M. Templeton, A. Oksanen, D. Boyd, et al., *CBET*, No. 1652 (2009).
8. K. Thorne, P. Garnavich, and K. Mohrig, *IBVS*, No. 5923, 1 (2010).
9. N. Katysheva and S. Shugarov, *Mem. Soc. Astron. Italiana* **83**, 670 (2012).
10. N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, and V. L. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **71**, (2016).
11. M. M. Gabdeev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 460 (2015).
12. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
13. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363, (2011).
14. R. C. Bohlin, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **28**, 910, (1996).
15. A. D. Schwöpe, F. Mackebrandt, B. D. Thinius, et al., *Astronomische Nachrichten* **336**, 115 (2015).
16. G. D. Schmidt, P. Szkody, L. Home, et al., *Astrophys. J.* **620**, 422 (2005).
17. F. Verbunt, E. P. J. van den Heuvel, T. J. van der Linden, et al., *Astron. and Astrophys.* **86**, 10 (1980).
18. G. Ramsay and P. J. Wheatley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **301**, 95 (1998).
19. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
20. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
21. V. V. Shimanskiy, N. V. Borisov, and N. N. Shimaskaya, *Astronomy Reports* **47**, 763 (2003).
22. N. A. Sakhbullin and V. V. Shimanskiy, *Astronomy Reports* **40**, 723 (1996).
23. D. V. Ivanova, N. A. Sakhbullin, and V. V. Shimanskiy, *Astronomy Reports* **46**, 390 (2002).
24. R. L. Kurucz, SAO CD-Roms, (Cambridge, MA02138, 1994).
25. V. F. Suleimanov, *Astronomy Letters* **22**, 92 (1996).
26. H. A. Сахибуллин, *Труды Казанск. горн. астрон. обс.* **48**, 9 (1983).
27. E. Anders and N. Grevesse, *Geochimica Cosmochimica Acta.* **53**, 197 (1989).
28. K. Horne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **213**, 129 (1985).

29. H. Ritter and U. Kolb, *Astron. and Astrophys.* **404**, 301 (2003).
30. J. A. Panei, L. G. Althaus, and O. G. Benvenuto, *Astron. and Astrophys.* **353**, 970 (2000).
31. T. R. Marsh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **231**, 1117 (1988).
32. H. C. Spruit, arXiv:astro-ph/9806141 (1998).
33. A. Schwobe, K.-H. Mantel, and K. Horne, *Astron. and Astrophys.* **319**, 894 (1997).
34. R. Mahadevan, R. Narayan, and I. Yi, *Astrophys. J.* **465**, 327 (1996).
35. A. D. Schwobe, K. Beuermann, and H.-C. Thomas, *Astron. and Astrophys.* **230**, 120 (1990).
36. D. T. Wickramasinghe and L. Ferrario, *Astrophys. J.* **334**, 412 (1988).
37. M. Cropper and K. Horne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **267**, 481 (1994).
38. S. B. Potter, M. Cropper, and P. J. Hakala, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315**, 423 (2000).
39. R. K. Campbell, T. Harrison, A. D. Schwobe, and S. B. Howell, *Astrophys. J.* **672**, 531 (2008).
40. G. H. Tovmassian, P. Szkody, J. Greiner, et al., *Astron. and Astrophys.* **379**, 199 (2001).

**Photometric and Spectral Studies of the Eclipsing Polar CRTS
CSS 081231 J071126+440405**

**N.V. Borisov, M.M. Gabdeev, V.V. Shimansky, N.A. Katysheva, A.I. Kolbin, S.Yu. Shugarov, and
V.P. Goranskij**

We present the results of the study of the eclipsing polar CRTS CSS 081231 J071126+440405. Photometric observations allowed us to refine the orbital period of the system $P_o = 0^d08137673$. Considerable changes in the appearance of the object's spectra have occurred over the period of September 20–21, 2001: the slope of the continuum changed from “red” to “blue”, and the variability of the line profiles over the duration of the orbital period has also changed. Doppler maps have shown a shift of the emission line-forming region along the accretion stream closer to the white dwarf. We measured the duration of the eclipse of the system and imposed constraints on the inclination angle $78^{\circ}7 < i < 79^{\circ}3$. The derived radial velocity amplitude was used to obtain the basic parameters of the system: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_{\odot}$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_{\odot}$, $q = 0.21 \pm 0.01$, $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_{\odot}$, $A = 0.80 \pm 0.03 R_{\odot}$. The spectra of the object exhibit cyclotron harmonics. Their comparison with model spectra allowed us to determine the parameters of the accretion column: $B = 31\text{--}34$ MG, $T_e = 10\text{--}12$ keV, $\theta = 80\text{--}90^{\circ}$, and $\Lambda = 10^5$.

Keywords: *novae, cataclysmic variables — method: polarization*