

УДК 524.338:520.82/84

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРА CRTS CSS 130604 J 215427+155714

© 2017 Н. В. Борисов¹, М. М. Габдеев^{1*},
В. В. Шиманский², Н. А. Катышева³, С. Ю. Шугаров^{3,4}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

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

³Государственный астрономический институт им. П. К. Штенберга, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

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

Поступила в редакцию 21 сентября 2016 года; принята в печать 2 февраля 2017 года

Представлены результаты спектральных и фотометрических исследований нового поляра CRTS CSS 130604 J 215427+155714, выполненных на телескопах САО РАН. Анализ рядов фотометрических наблюдений позволил уточнить орбитальный период системы $P_o = 0^d0672879 (\pm 0.0000003)$. Построены кривые лучевых скоростей и прослежены изменения интенсивностей линий водорода $H\beta$ и $H\gamma$ и ионизованного гелия $He II \lambda 4686 \text{ \AA}$. По линиям $H\beta$ и $He II$ построены доплеровские карты. Показано, что область формирования линий локализована вблизи точки Лагранжа. Выполнены оценки параметров системы $M_1 = 0.83 \pm 0.10 M_\odot$, $M_2 = 0.15 \pm 0.01 M_\odot$, $q = M_2/M_1 = 0.18 \pm 0.03$, $i = 53^\circ \pm 5^\circ$. По результатам спектральных, фотометрических и опубликованных ранее поляриметрических наблюдений рассмотрена возможная геометрическая модель системы.

Ключевые слова: *новые, катаклизмические переменные — звезды: индивидуальные: CRTS CSS 130604 J 215427+155714 — метод: поляризация*

1. ВВЕДЕНИЕ

CRTS CSS 130604 J 215427+155714 (далее CSS 130604), исследуемый нами, впервые был обнаружен Шкоди и др. [1] в работе, посвященной поиску катаклизмических переменных из каталогов SDSS [2], CRTS [3] и vsnet alert¹. Амплитуда его орбитальной переменности блеска составила 1^m5 . В спектре обнаружена сильная линия ионизованного гелия $He II \lambda 4686 \text{ \AA}$. Измеренная по ней полуамплитуда изменения лучевых скоростей достигала 300 км с^{-1} с орбитальным периодом $P_o = 96.9$ мин. Поляриметрические наблюдения, представленные в работе [4], показали, что объект обладает сильной круговой поляризацией в полосе V с максимальной степенью до -22% без изменения знака поляризации в течение орбитального периода. Это позволило классифицировать CSS 130604 как поляр.

Поляры являются немногочисленным подклассом новоподобных катаклизмических переменных,

относящихся к короткопериодическим тесным двойным системам (ТДС). В таких системах белый карлик (главный компонент) обладает сильным магнитным полем ($10\text{--}100 \text{ МГс}$), что приводит к реализации канализированного режима аккреции на его магнитные полюса. Считается, что в таких ТДС альбеновский радиус превышает размеры системы. Вместо аккреционного диска магнитные силовые линии формируют струю перетекающего вещества, которое выпадает в области магнитных полюсов белого карлика. Излучение поляров сильно поляризовано, в некоторых случаях до $30\text{--}40\%$, так как имеет циклотронную природу. Наблюдения показывают высокую степень фотометрической и спектральной переменности на временной шкале от секунд до нескольких лет, иногда она проявляется в виде вспышечной активности. Излучение поляров регистрируется в широком диапазоне электромагнитного спектра: от рентгеновского до инфракрасного.

Отметим, что наблюдательные проявления взаимодействия компонентов подтверждаются не только процессами аккреции, но и эффектами переизлучения ультрафиолетового и рентгеновского

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

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

излучения в струе перетекающего вещества и на поверхности вторичного компонента.

Данная статья продолжает цикл работ по изучению полярных [4–6], посвященных определению фундаментальных параметров исследуемых систем по спектральным, фотометрическим и поляриметрическим данным, полученным на телескопах САО РАН.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Фотометрия

Фотометрические наблюдения CSS 130604 проводились на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН в ноябре 2014 г. и августе 2015 г. Использовался штатный фотометр с набором широкополосных фильтров системы Джонсона–Коузинса B, V, R_c и ПЗС-приемник EEV 42-40 (2048×2048 пикселей размером 13.5×13.5 мкм) с азотным охлаждением. На рис. 1 показано поле вокруг исследуемого объекта с отмеченными опорными звездами. Информация о них представлена в таблице 1.

2.2. Спектроскопия

Спектроскопия выполнялась на 6-м телескопе БТА САО РАН с применением редуктора светосилы SCORPIO [7] и светоприемника EEV 42-40 (2048×2048) с азотным охлаждением. Наблюдения были проведены 22 ноября 2014 г. при средней прозрачности атмосферы; размер изображения около $2''5$. Применялась объемная голографическая решетка с 1200 штр.мм $^{-1}$ (VPHG1200G) и щель шириной $1''$. Мы получили 21 спектральное изображение в диапазоне 3900 – 5700 Å с разрешением 5.5 Å и одинаковыми экспозициями в 300 с. Для калибровки длин волн использовалась лампа с He-Ne-Ag наполнением, в качестве спектрофотометрического стандарта — звезда BD 28+4211 [8]. Обработка осуществлялась по стандартной методике в среде IDL².

3. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1. Фотометрия

По результатам фотометрических наблюдений в полосе R_c был проведен гармонический анализ временных рядов. Применялся метод Лафлера–Кинмана [9], реализованный в программе В. П. Горанского EFFECT³. Уточнена эфемериды объекта,

при этом за нулевую фазу выбран момент минимума блеска системы:

$$\begin{aligned} \text{HJD} &= 2456987^{\text{d}}189 (\pm 0.001) \quad (1) \\ &+ 0^{\text{d}}0672879 (\pm 0.0000003) E. \end{aligned}$$

Найденная эфемерида использовалась для построения кривых блеска. Они имеют квазисинусоидальную форму с максимумом продолжительностью $\delta\phi = 0.3$ и минимумом $\delta\phi = 0.2$. Форма кривых в фильтрах B, V, R_c схожа (рис. 2). Звездная величина в максимуме блеска в полосах $V = 16^{\text{m}}45 \pm 0.03$, $R_c = 16^{\text{m}}77 \pm 0.03$ и $B = 17^{\text{m}}90 \pm 0.08$. Амплитуда вариации блеска в полосе R_c составляет приблизительно $1^{\text{m}}5$. Это совпадает с результатом в полосе V , представленным в работе [4]. Средний блеск системы в полосе R_c в ноябре 2014 г. равен ее среднему блеску по наблюдениям в августе 2015 г.

3.2. Спектроскопия

В спектрах исследуемого объекта наблюдаются интенсивные эмиссионные линии водорода серии Бальмера, нейтрального He I и ионизованного He II гелия (рис. 3), а в фазах максимума блеска — также и линии циклотронного излучения. Следует отметить, что интенсивности линии He II $\lambda 4686$ Å и H β почти одинаковы, что свойственно полярам [10, 11].

Интенсивность линий изменяется с орбитальным периодом в противофазе с кривой блеска (см. рис. 4). Из их сравнительного анализа можно заключить, что область формирования эмиссионных линий локализована вблизи точки Лагранжа. Лучевые скорости по пикам эмиссионных линий были измерены методом кросс-корреляции. Результаты измерений лучевых скоростей и их аппроксимация синусоидой представлены на рис. 5. Полученные величины полуамплитуд по линиям H γ , H β и He II $\lambda 4686$ Å составили 276 ± 23 , 317 ± 21 и 335 ± 11 км с $^{-1}$ соответственно. Как правило, у полярных мы наблюдаем рост амплитуды лучевых скоростей с повышением потенциала возбуждения исследуемых линий. Однако в случае CSS 130604 незначимые различия полуамплитуд обусловлены углом наклона плоскости орбиты системы к лучу зрения. Отметим, что полученный нами набор амплитуд не противоречит модели формирования линий при канализированной аккреции.

Доплеровское картирование было сделано по профилям линий H β и He II $\lambda 4686$ Å при помощи пакета программ Шпруита Дортар, реализующих метод минимизации энтропии [12]. Отметим, что

²<http://www.itervis.com/idl>

³<http://www.vgoranskij.net/software/>

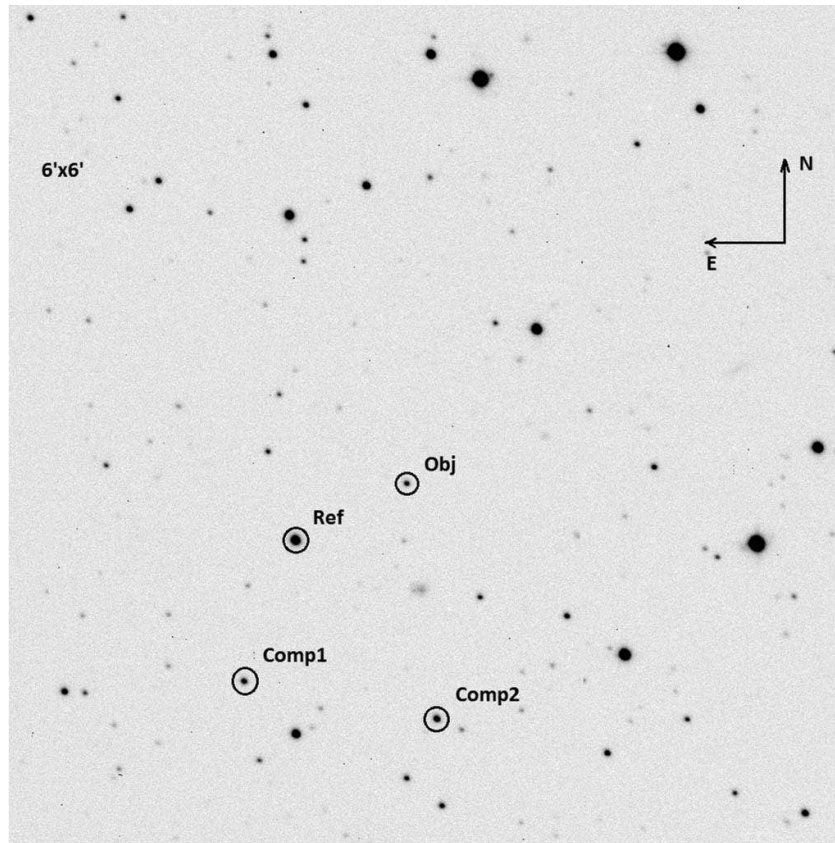


Рис. 1. Изображение окрестностей объекта с отмеченными вторичным стандартом и звездами сравнения.

Таблица 1. Информация об опорных звездах

ID	α , hh:mm:ss.ss	δ , dd:mm:ss.ss	R_c , mag	B , mag	V , mag
Ref	21:54:31.32	+15:56:45.5	14.90 ± 0.01	16.67 ± 0.01	14.61 ± 0.01
Comp1	21:54:33.33	+15:55:31.5	16.70 ± 0.02	18.17 ± 0.05	16.27 ± 0.02
Comp2	21:54:36.49	+15:55:09.7	16.27 ± 0.02	19.5 ± 0.1	16.74 ± 0.02

доплеровские карты восстанавливаются в плоскости скоростей, где ось X направлена от белого карлика к красному, а ось Y — вдоль движения красного карлика по орбите. К сожалению, отношение сигнал/шум линии $H\gamma$ оказалось для корректного использования метода недостаточным. Согласно построенным доплеровским картам (рис. 6), дисковая аккреция отсутствует, а область формирования линий расположена вблизи точки Лагранжа и охватывает начало струи перетекающего вещества.

3.3. Определение Параметров Системы

Была выполнена оценка масс компонентов и угла наклона системы. Воспользовавшись полуэмпирическими зависимостями период—масса [13, 14], мы наложили ограничения на массу красного

карлика $0.11\text{--}0.16 M_{\odot}$. Для определения функции масс белого карлика была использована формула

$$F(M_1) = 10385 \times 10^{-11} (1 - e^2)^{3/2} K_2^3 P_o, \quad (2)$$

где e — эксцентриситет орбиты, P_o — орбитальный период, K_2 — полуамплитуда лучевых скоростей центра масс вторичного компонента. Расчет проводился для линии $H\beta$, т.к. измерения для нее имеют наибольшую точность, а область ее формирования находится вблизи точки L_1 . Полученная оценка была исправлена за разность значений центра масс красного карлика и горячего пятна на его поверхности. Метод расчета соответствующей поправки ΔK_2 подробно описан в разделе 5 работы [5]. Его использование применительно к CRTS CSS130604 J215427+155714 показало, что $\Delta K_2 = 31 \pm 3 \text{ км с}^{-1}$ со слабой зависимостью от

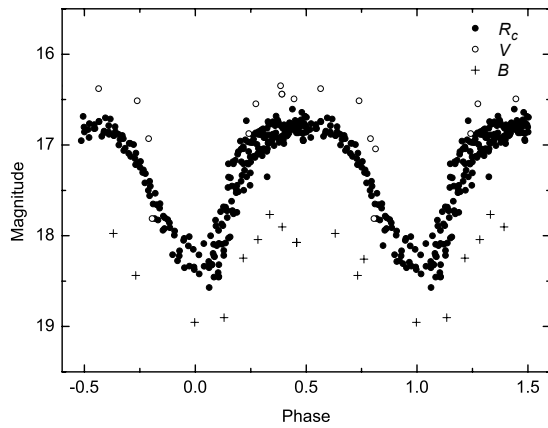


Рис. 2. Изменение блеска системы в полосе R_c с фазой орбитального периода в ноябре 2014 г. и августе 2015 г. Ошибки оценок блеска не превышали $0^m.1$ (меньше размера символов).

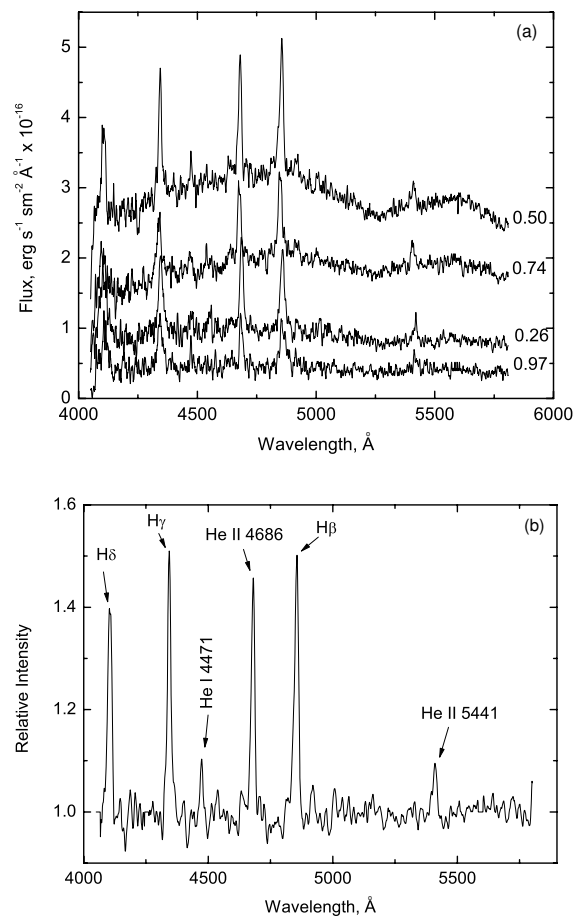


Рис. 3. Изменение вида спектра объекта в абсолютных величинах с фазой орбитального периода (а). Суммарный нормированный на континуум спектр объекта с отмеченными основными эмиссионными линиями (б).

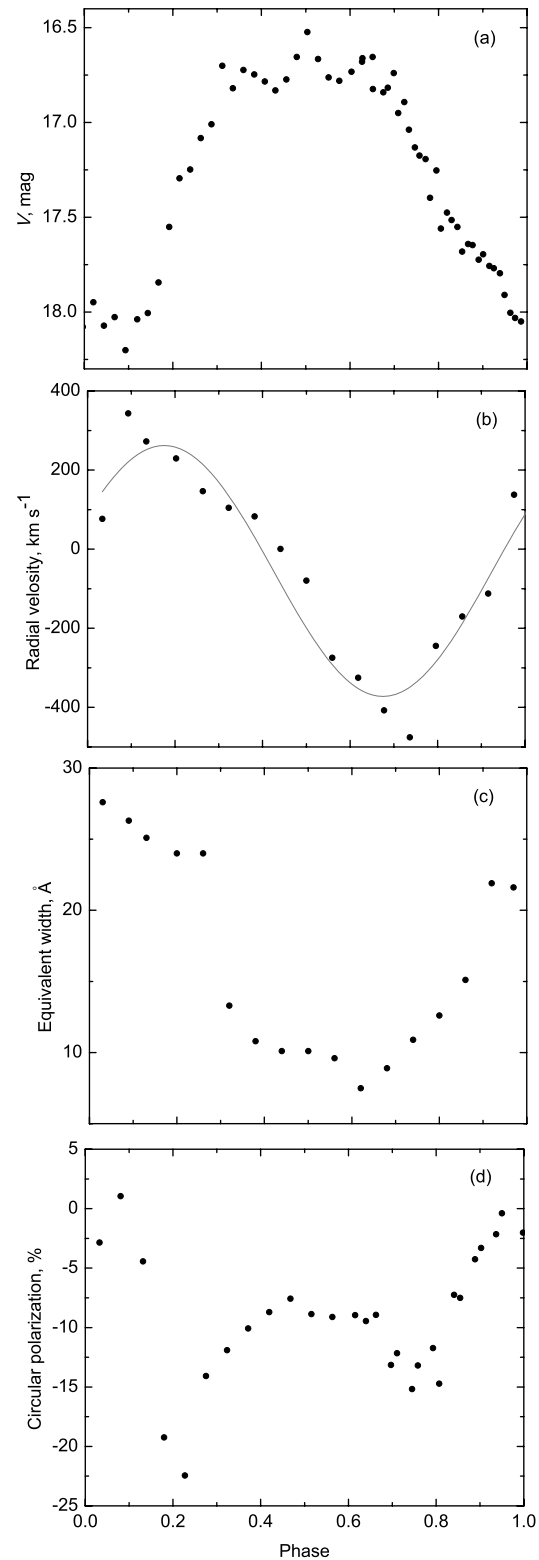


Рис. 4. Изменения характерных величин в течение орбитального периода: (а) кривая блеска в полосе V , (б) кривая лучевых скоростей, измеренная по линии $H\beta$, и её аппроксимация синусоидой, (с) изменение эквивалентной ширины линии $H\beta$, (д) кривая круговой поляризации в полосе V .

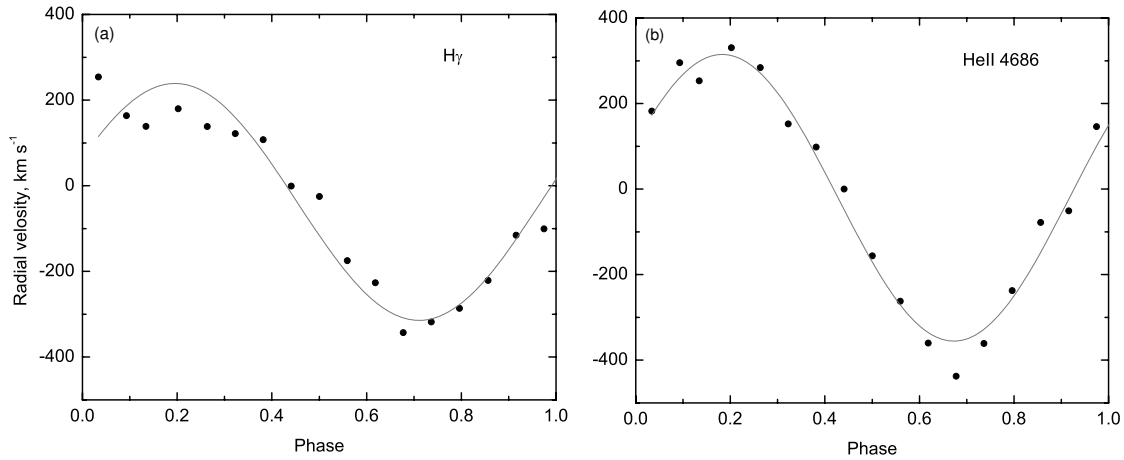


Рис. 5. Кривые лучевых скоростей по линиям $H\gamma$ (a) и $He\ II\ \lambda\ 4686\ \text{\AA}$ (b).

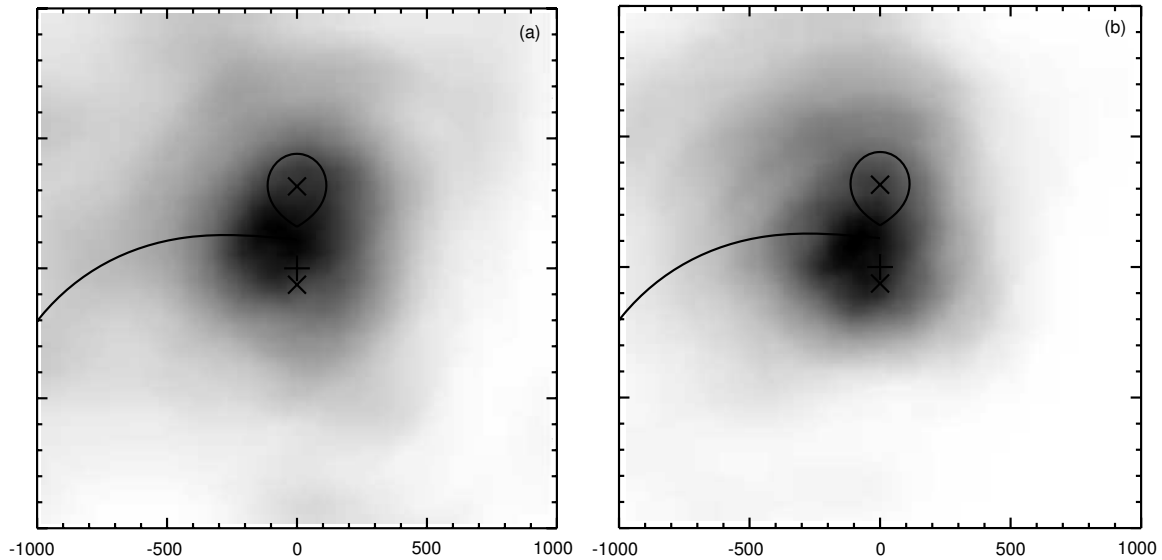


Рис. 6. Доплеровские карты, построенные по линиям $H\beta$ (a) и $He\ II\ \lambda\ 4686\ \text{\AA}$ (b). На картах отмечены: «x» — центры масс белого и красного карликов, «+» — центр масс двойной системы, а также полость Роша вторичного компонента и траектория падения вещества с кеплеровскими скоростями.

параметров системы. В результате полуамплитуда центра масс вторичного компонента составила $K_2 = 348\ \text{km s}^{-1}$. Стоит отметить, что в случае с объектом CSS 130604 уточнение скорости орбитального движения вторичного компонента влияет только на определение угла наклона системы. Таким образом, рассчитанная по формуле (2) при $e = 0$ функция масс белого карлика $F(M_1) = 0.29$.

В то же время

$$F(M_1) = \frac{M_2^3 \sin^3(i)}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (3)$$

где M_1 , M_2 — массы компонентов системы, i — угол наклона плоскости орбиты к лучу зрения

наблюдателя. И, варьируя массу белого карлика, для разных углов наклона системы мы находили параметры, при которых функция масс, определенная по формуле (3), в пределах заданной ошибки совпадала с оценкой $F(M_1) = 0.29 \pm 0.002$.

Верхняя граница угла наклона $i \sim 75^\circ$, так как в системе нет ни частного, ни тем более полного затмения (см. обсуждение). Минимальный угол наклона $i \sim 40^\circ$ ограничивается пределом Чандрасекара (рис. 7). Далее по эволюционным трекам холодных звезд Главной последовательности [15] были найдены значения радиуса красного карлика $R_2 = 0.13, 0.16$ и $0.18 M_\odot$ для трех масс $M_2 = 0.11, 0.14$ и $0.16 M_\odot$ соответственно с химическим составом, близким к солнечному. Предполагая, что

Таблица 2. Оценка параметров системы

M_2/M_\odot	R_2/R_\odot	q	M_1/M_\odot	R_{L2}/R_\odot	R_2/R_{L2}	i , deg
0.11	0.132	0.09	1.22	0.144	1.088	41
0.14	0.159	0.15	0.93	0.169	1.063	48
0.14	0.159	0.16	0.88	0.173	1.085	50
0.16	0.178	0.21	0.76	0.189	1.063	56
0.16	0.178	0.22	0.73	0.192	1.079	58

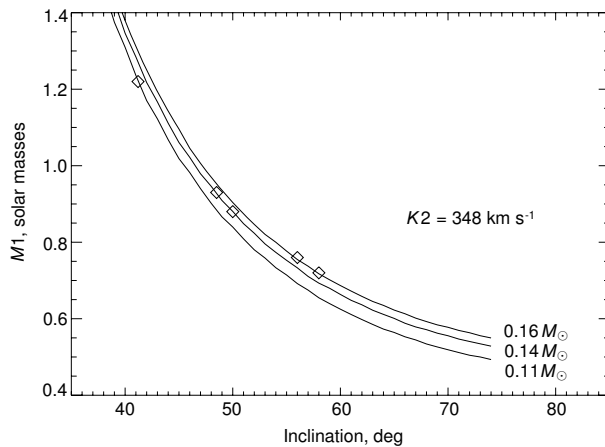


Рис. 7. Масса белого карлика при изменении угла наклона системы при заданных массе и скорости вращения красного карлика. Ромбами отмечены значения, полученные при сравнении радиуса вторичного компонента с радиусом полости Роша (см. таблицу 2).

величина радиуса полости Роша R_{L2} заключена в диапазоне $1.05R_2 < R_{L2} < 1.09R_2$, можно получить оценку массы белого карлика. С этой целью мы вычисляли значения R_{L2} для разных величин отношения масс компонентов q по формуле Игглтона [16]

$$R_{L2} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}, \quad 0 < q < \infty$$

и сравнивали их с полученными ранее радиусами красного карлика R_2 . Результаты представлены в таблице 2.

Отбрасывая оценку массы $M_2 = 0.11M_\odot$ как наименее правдоподобную, получаем следующие средние значения: $M_1 = 0.83 \pm 0.10M_\odot$, $q = 0.18 \pm 0.03$, $i = 53^\circ \pm 5^\circ$. Эти параметры использовались для схематичного изображения компонентов системы на доплеровских картах, показанных на рис. 6.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены спектральные и фотометрические наблюдения для детального изучения объекта

CSS 130604. В рассмотрение также включены материалы по его поляриметрии и фотометрии из нашей работы [4]. Для фазовой привязки всех данных использовалась уточненная эфемериды (1).

При анализе полученных данных мы сочли очень важным привлечь результаты более раннего исследования затменных полярных, таких как CRTS CSS 081231 J071126+440405 [5] и BS Tri [17]. В затменных системах с высоким уровнем достоверности определяется положение компонентов в разных фазах орбитального движения. Затмение происходит из-за закрытия области аккреции, находящейся на видимой стороне белого карлика, красным карликом и, как правило, приходится на максимум кривой блеска.

Лучевая скорость области формирования эмиссионных линии на поверхности вторичного компонента в момент фазы затмения равняется гамма-скорости (проекция на луч зрения наблюдателя равна 0) при переходе от отрицательных к положительным значениям (см., например, рис. 10 из [5]).

В системе CSS 130604, наоборот, в момент, когда красный карлик находится ближе к наблюдателю, блеск минимален, а эмиссионные линии наиболее интенсивны. Кривая круговой поляризации имеет два экстремума, совпадающих с экстремумами лучевых скоростей: в фазах 0.25 и 0.75, -23% и -13% соответственно и два плато со средними значениями -2.5% на фазах 0.95–0.1 и -8% на фазах 0.4–0.6.

С учетом этих особенностей возможен следующий вариант геометрической модели системы. Как отмечено выше, угол наклона системы близок к 50° . Ориентация магнитной оси белого карлика такова, что область аккреции всегда находится в поле зрения наблюдателя. Это подтверждается неизменностью знака круговой поляризации. Минимум блеска наблюдается в момент самозатмения области формирования континуума, когда холодная часть закрывает более горячую. Максимум круговой поляризации излучения достигается при приближении угла между магнитной осью и лучем зрения к 90° в фазе 0.25. Этот же эффект, но в меньшей степени, повторяется в фазе 0.75. В фазах около 0.5 основание аккреционной колонки не закрыто и

наиболее доступно наблюдениям. В результате на кривой блеска формируется широкий максимум, а угол наклона магнитной оси практически не меняется. Область формирования эмиссионных линий, связанная со струей вещества, перетекающего через точку Лагранжа, также всегда находится в поле зрения наблюдателя. Уменьшение эквивалентных ширин линий в момент максимума блеска обусловлено повышением уровня континуума, что характерно для излучения полярков.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках долговременной программы поиска и изучения полярков нами проведен комплексный анализ наблюдений полярка CRTS CSS 130604 J215427+155714. По фотометрическим данным определен орбитальный период системы $P_o = 0^d.0672879 (\pm 0.0000003)$. Наблюдаемые спектры имеют вид, характерный для катаклизмических переменных с канализированной аккрецией. Измерены лучевые скорости объекта по эмиссионным линиям H I и He II, построены фазовые кривые изменения их эквивалентных ширин, а также карты доплеровской томографии. Показано, что область формирования линий расположена вблизи точки Лагранжа. Поэтому полуамплитуда лучевой скорости линии H β использовалась для оценки масс компонентов системы ($M_1 = 0.83 \pm 0.10 M_\odot$, $M_2 = 0.15 \pm 0.01 M_\odot$, $q = 0.18 \pm 0.03$, $i = 53^\circ \pm 5^\circ$). По анализу полученных данных, в том числе и поляриметрических, предложена геометрическая модель системы. Таблицы с измерениями блеска системы и лучевых скоростей разных линий доступны на сайте <https://www.sao.ru/hq/lon/results.html>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор

проекта RFMEFI61914X0004). Обработка наблюдательных данных выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 14-50-00043), а теоретическое моделирование — при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ 15-42-02573-а и 16-32-50200). Н. А. Катыхева и С. Ю. Шугаров благодарят грант Президента «Ведущая научная школа» (НШ-7690.2016.2). С. Ю. Шугаров также выражает благодарность агентству VEGA за поддержку грантом № 2/0002/13.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Szkody, M. E. Everett, S. B. Howell, et al., *Astron. J.* **148**, 63 (2014).
2. D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., et al., *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).
3. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, et al., *Astrophys. J.* **696**, 870 (2009).
4. N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, and V. L. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **71**, 95 (2016).
5. N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, V. V. Shimansky, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 101 (2016).
6. M. M. Gabdeev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 460 (2015).
7. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
8. R. C. Bohlin, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **28**, 910 (1996).
9. J. Lafler and T. D. Kinman, *Astrophys. J. Suppl.* **11**, 216 (1965).
10. N. F. Voikhanskaya, *Soviet Astron. Lett.* **13**, 250 (1987).
11. J. Patterson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 209 (1994).
12. H. C. Spruit, arXiv:astro-ph/9806141 (1998).
13. S. B. Howell, L. A. Nelson, and S. Rappaport, *Astrophys. J.* **550**, 897 (2001).
14. C. Knigge, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **373**, 484 (2006).
15. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
16. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
17. N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, V. V. Shimansky, et al., *Astronomy Letters* **41**, 646 (2015).

Spectral and Photometric Studies of Polar CRTS CSS 130604 J 215427+155714**N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, V. V. Shimansky, N. A. Katysheva, and S. Yu. Shugarov**

We present the results of spectroscopic and photometric studies of a new polar CRTS CSS 130604 J 215427+155714, conducted at the telescopes of the SAO RAS. Analysis of the photometric series of observations allowed to clarify the orbital period of the system, $P_o = 0^d.0672879 (\pm 0.0000003)$. We build radial velocity curves and trace the intensity variations in the $H\beta$ and $H\gamma$ hydrogen lines and He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ ionized helium line. Based on the $H\beta$ and He II lines we build Doppler maps. It is shown that the line formation region is localized near the Lagrange point. The following parameter estimates of the system are obtained: $M_1 = 0.83 \pm 0.10 M_\odot$, $M_2 = 0.15 \pm 0.01 M_\odot$, $q = M_2/M_1 = 0.18 \pm 0.03$, $i = 53^\circ \pm 5^\circ$. Based on the results of spectral, photometric and previously published polarimetric observations the possible geometric model of the system is discussed.

Keywords: *novae, cataclysmic variables—stars: individual: CRTS CSS 130604 J 215427+155714—methods: polarization*