РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ГОДА ПРОГРАММЫ ПОИСКА ПОЛЯРОВ 3BS

© 2020 г. М. М. Габдеев^{1, 2*}, Т. А. Фатхуллин¹, Н. В. Борисов¹, В. В. Шиманский³, А. И. Колбин¹, А. С. Москвитин¹, В. Н. Аитов¹, Г. Ш. Митиани¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия ²Институт прикладных исследований АН РТ, Казань, Россия ³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия Поступила в редакцию 01.05.2020 г. После доработки 21.05.2020 г.; принята к публикации 26.05.2020 г.

Представлены результаты первого года поиска кандидатов в поляры по программе 3BS (3-Band Survey) с использованием среднеполосных фильтров. В ходе реализации программы получены наблюдательные данные для 84 отобранных объектов из каталога катаклизмических переменных обзора неба CRTS DR1. Обнаружены карликовая новая во время вспышки и поляр. Проведен анализ имеющихся архивных данных. Карликовая новая относится к типу U Gem или Z Cam и содержит массивный вторичный компонент $M_2 = 0.94 \pm 0.04 M_{\odot}$. Для найденного поляра получена оценка продолжительности орбитального периода $P_O = 0.94437$ и вычислена величина магнитного поля белого карлика $B \approx 32 MG$.

Ключевые слова: катаклизмические переменные, поляры.

DOI: 10.31857/S0320010820060030

ВВЕДЕНИЕ

Поиск новых катаклизмических переменных является актуальной задачей. Короткие орбитальные периоды этих тесных двойных систем позволяют за небольшой промежуток времени определить их динамические и физические характеристики и сделать вывод об их текущем состоянии и эволюции. Для поиска используются большие фотометрические и спектральные обзоры неба, такие как SDSS (Шкоди и др., 2011), CRTS (Дрэйк и др., 2009), OGLE (Мроз и др., 2015), LAMOST (Хоу и др., 2020) или анализ наблюдений рентгеновских обсерваторий ROSAT, Integral, XMM-Newton, Swift (см., например, Буерман, Томас, 1993; Розен и др., 2016). Благодаря выполнению перечисленных поисковых работ найдены тысячи новых тесных двойных систем, в том числе катаклизмических переменных разных типов. Наша группа предложила и рассмотрела возможности поиска кандидатов особого типа катаклизмических переменных — поляров с помощью среднеполосных фильтров (Габдеев и др., 2020). Практическая реализация данной поисковой задачи 3BS (3-Band Survey) выполнена

с применением наблюдений на телескопе Цейсс-1000 САО РАН.

Поляры (звезды типа AM Her) — магнитные катаклизмические переменные, состоящие из магнитного белого карлика (B > 10MG) и красного карлика М-К класса. Сильное магнитное поле определяет наблюдательные особенности этих систем: синхронное вращение компонент системы, аккреция вещества вдоль магнитных силовых линий, включение циклотронного механизма охлаждения, приводящего к поляризации излучения в оптическом и инфракрасном диапазонах. Основная область излучения континуума компактна, и поэтому внезатменная амплитуда орбитальной переменности блеска может достигать 2^m звездных величин. В отличие от других классов катаклизмических переменных, в полярах, как правило, не наблюдается взрывного увеличения блеска. В системе изменяется темп аккреции вещества, в результате чего объект переходит в более высокое или более низкое состояние блеска. Исключением является поляр V1500 Cyg, который взорвался как новая с увеличением блеска системы на 19^m звездных величин (Хонда и др., 1975; Стокман и др., 1988). Спектры поляров имеют голубой континуум с наложенными на него широкими линиями циклотронного излучения и сильными узкими однопиковыми

^{*}Электронный адрес: gamak@sao.ru

линиями водорода серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия. Особенностью излучения поляров является сравнимая интенсивность линий $H\beta$ и линии He II $\lambda 4686$ Å. Подробнее об этих объектах можно прочитать в обзорных работах Кроппера (1990) и Уорнера (2003). В этой работе мы публикуем результаты первого года поиска кандидатов в поляры программы 3BS. Статья состоит из следующих секций: наблюдения, результаты, заключение.

НАБЛЮЛЕНИЯ

Наблюдения выполнены на телескопе Цейсс-1000 САО РАН с использованием многорежимного фотометра-поляриметра (ММРР, Емельянов и др., 2019). Наблюдения проводились с использованием трех среднеполосных фильтров, SED470, SED540 и SED656, с центральными длинами волн 4700, 5400 и 6560 Å и шириной пропускания 100 Å. В полосу пропускания этих фильтров попадают линии излучения HeII $\lambda4686$ Å, Hlpha и участок непрерывного спектра, не содержащий сильные эмиссионные или абсорбционные линии. Каждое исследуемое поле наблюдалось последовательно в трех фильтрах 470, 540 и 656 с экспозициями 300, 240 и 240 с по три цикла. Всего было проведено 13 ночей наблюдений в различных погодных условиях. Также проводились поляриметрические наблюдения отдельных объектов в белом свете, с поляроидом и фазовой пластинкой $\lambda/4$.

Обработка фотометрических и поляриметрических наблюдений проводилась в автоматическом режиме с использованием программ SExtractor (Бертин, Арно, 1996), Astrometry (Ланг и др., 2010), PSFEx (Бертин, 2011). Результаты наблюдений хранятся в базе данных 3BS на сайте обсерватории САО РАН¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выбор объектов для наблюдений проводился путем анализа их кривых блеска из базы данных CRTS DR1 (Дрэйк и др., 2009). Отбирались звезды с высокой амплитудой переменности (>0^m5), без пикообразной вспышечной активности. В результате наблюдательные данные были получены для 84 отобранных звездных площадок. Только два объекта CRTS CSS131014 J005347+405549 СЅЅ110920 Ј153024+220646 (далее и CRTS CSS131014 и CSS110920) оказались интересны для более детального изучения.

¹ https://www.sao.ru/3BS/

Кривая блеска объекта CSS131014² показывает суточную переменность в диапазоне $V = 18 \stackrel{.}{.}5 - 18 \stackrel{.}{.}5$ $-19^{m}_{...5}$ и несколько увеличений яркости до 18^{m} и 17^{m} . По данным 3BS (см. табл. 1). объект удовлетворяет предложенным критериям отбора кандидатов в поляры (Габдеева и др., 2020). Тем не менее для подтверждения классификации объекта были проведены дополнительные поляризационные наблюдения с целью обнаружения круговой поляризации оптического излучения. В результате анализа 1.5-часового ряда наблюдений мы не обнаружили у объекта CSS131014 поляризацию излучения на уровне 0.3%.

В обзоре неба LAMOST (Жанг и др., 2019) имеется спектр³ этого объекта с низким разрешением (R = 1800 на $\lambda = 5500$ Å) в диапазоне длин волн ($\lambda = 3700 - 9100$ Å), в котором наблюдается выраженный голубой континуум с сильными широкими (FWHM = 20 Å) двухпиковыми эмиссионными линиями водорода серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия. Двухпиковая форма профилей линий и доминирование линий HeII $\lambda 4686,5411$ Å над линиями нейтрального гелия указывают на наличие в CSS131014 высокотемпературного ($T_e \geq 30~000~{\rm K}$) оптически тонкого в континууме аккреционного диска. Анализ временных рядов кривых блеска встроенными в базу данных CRTS⁴ программами показал два наиболее вероятных орбитальных периода P_{Orb} = = 0.28914(9) и $P_{\text{Orb}} = 0.35147(3)$. Приняв наиболее вероятную для катаклизмических переменных массу аккретора $M_1 = 0.75 \pm 0.10 \ M_{\odot}$ и значение периода $P_{
m Orb}=0d28914,$ мы получили оценку массы донора $M_2 = 0.94 \pm 0.04 \ M_{\odot}$ (Жирарди и др., 2000) в предположении заполнения им своей полости Роша и нахождения на Главной последовательности нулевого возраста. Соответствующие значения радиуса и эффективной температуры звезды составили $R_2 = 0.84 \pm 0.04$ R_{\odot} и $T_{
m eff} =$ $= 5400 \pm 180$ К (Жирарди и др., 2000), а отношение масс компонент $q = \frac{M_1}{M_2}$ варьируется в пределах q = 0.66 - 0.94. Таким образом, CSS131014 должна содержать крупную и яркую вторичную компоненту, излучение которой сравнимо с излучением оптически тонкого аккреционного диска. В спектре объекта мы обнаружили абсорбционные детали на длинах волн $\lambda = 4270 - 4320$ Å (G-полоса CH

⁴ http://nunuku.caltech.edu/cgi-

² http://nesssi.cacr.caltech.edu/catalina/20131014/ 1310141400044134796.html

³ http://dr4.lamost.org/spectrum/view?obsid=279513203

bin/getcssconedb release img.cgi

Объект	Mag SED540	SED470-SED540	SED540-SED656
CSS131014	17.86 ± 0.01	-0.11	0.27
	18.54 ± 0.02	-0.31	0.19
	19.33 ± 0.04	0.21	0.67
CSS110920	19.64 ± 0.05	0.32	-0.15
	19.40 ± 0.05	0.26	-0.20
	19.53 ± 0.05	0.06	-0.18

Таблица 1. Звездные величины и показатели цвета объектов CSS131014 и CSS110920

и TiI), $\lambda = 5159 - 5190$ Å (триплет MgI) и $\lambda =$ = 3885-3899 Å (дублет NaI), формирующиеся в атмосфере G-карлика с температурой 5000 K < $\leq T_{e} \leq 6000$ К. Перечисленные характеристики донора в CSS131014 позволяют предположить ее принадлежность к карликовым новым типа U Gem или Z Cam. Малая амплитуда 1^m и достаточно высокая частота вспышек MHD_{bursts} = = 55162, 56569 (CRTS), 57003 (LAMOST), 58824 (3BS) подтверждают данную классификацию. В обзоре Моралес-Руеда и Марша (2002) представлен спектр карликовой новой EX Dra типа U Gem во время вспышки 2001 г., аналогичный спектру CSS131014. Однако доминирование линий HeII говорит о нахождении системы в высоком состоянии с очень горячим аккреционным диском, что более характерно для типа Z Cam. В последней версии каталога Риттера и Колба (2004) представлена информация о 13 таких системах, параметры которых аналогичны CSS131014.

Кривые блеска объекта CSS110920⁵, по данным каталога CRTS, показывают суточную переменность с амплитудой 1^{*m*} и квазисинусоидальную долговременную переменность среднего блеска в диапазоне $V = 18^m - 19^m 5$. Измерения в рамках программы 3BS представлены в табл. 1. Объект не показал ожидаемой переменности блеска и показателей цвета. Однако имеющиеся спектры⁶ объекта CSS110920 в обзоре неба SDSS ($\lambda =$ = 3000-10 400 Å) показывают голубой континуум с сильными узкими (*FWHM* = 6 Å) однопиковыми эмиссионными линиями водорода серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия и более тяжелых элементов. Всего в обзоре SDSS имеется 5 спектров в ночи MHD=55649 (3 спектра) и 55650 (2 спектра). Лучевые скорости, измеренные по ядрам эмиссионных линий H β и He II λ 4686 Å, варьировались от -200 ± 20 до 180 ± 20 км/с. Значения лучевых скоростей линий в соседние ночи имеют одинаковый тренд на уменьшение. В итоге мы пришли к выводу, что спектры получены в близкие фазы орбитального периода. Определить примерное значение орбитального периода по этим данным не удалось. На суммарном спектре видны линии циклотронного излучения, сглаженные вследствие усреднения. Поэтому мы исследовали спектры по отдельности для выделения наиболее контрастных и четких линий циклотронного излучения.

Моделирование циклотронных спектров проводилось на основе однородной модели излучающей области (см., например, Колбин, 2019). Эта модель характеризуется напряженностью магнитного поля В, электронной температурой T_e, углом между линией магнитного поля и лучом зрения в и параметром $\Lambda = \omega_p^2 l / \omega_c c$, где l — геометрическая глубина излучающей области вдоль луча зрения, а ω_p и ω_c — плазменная и циклотронная частоты соответственно. Варьирование в широких диапазонах параметров B, T_e, θ и Λ не привело к удовлетворительному описанию наблюдаемых спектров. По этой причине мы усложнили модель, путем включения в нее источника спектра Рэлея-Джинса. Область допустимых оценок оказалась сильно вытянутой по параметрам T_e, θ и Λ и исключает их однозначное определение. Удовлетворительное описание наблюдаемых спектров достигается для напряженности магнитного поля $B = 32 \pm 2$ МГс. На рис. 1 показаны результаты моделирования трех спектров CSS110920 для температуры $T_e =$ = 25 кэВ. Вышеперечисленные факты позволяют однозначно классифицировать объект CSS110920 как поляр.

⁵ http://nesssi.cacr.caltech.edu/catalina/20110920/ 1109201210794130197.html

⁶ http://skyserver.sdss.org/dr12/en/get/SpecById.ashx?id= 4446402577529761792



Рис. 1. Наблюдаемый (серая линия) и теоретические спектры CSS110920. Показаны Рэлей-Джинсовская и циклотронная составляющие, рассчитанные для температуры $T_e = 25$ кэВ, и итоговый теоретический спектр (сплошные линии). Также показаны примеры описания наблюдаемого спектра с температурами циклотронной составляющей 15 кэВ (штриховая линия) и 35 кэВ (штрихпунктирная линия).

Дополнительно мы провели анализ временных рядов имеющихся кривых блеска. Встроенные в базу данных CRTS процедуры поиска орбитального периода⁴ не дали положительного результата. Для дальнейшего исследования мы выделили фотометрические данные для более высокого состояния яркости объекта $\langle V \rangle \approx 18^m$. Анализ временных рядов проводился программой Горанского EFFECT⁷. Пик спектра мощности, вычисленный методом Лафлера и Кинмана (1965), соответствовал периоду $P_{\rm Orb} = 0.00001$. Он сопровождался двумя суточными алиасами $P_{\rm Orb} = 0.00001$. Полученная орбитальная кривая блеска имеет квазисинусоидаль-

ную форму с амплитудой 1^m (рис. 2). Такая кривая блеска свойственна полярам с углом наклона системы $45^\circ-60^\circ$ (см., например, кривые блеска EF Eri в работе Уильям, Хильтнер, 1982, или V347 Pav в Бейлей и др., 1995).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен поиск кандидатов в поляры из каталога катаклизмических переменных CRTS DR1(Дрэйк и др., 2014) на основе анализа их кривых блеска. За время выполнения наблюдательной программы 3BS на телескопе Цейсс-1000 с января 2019 г. по март 2020 г., в течение 13 наблюдательных ночей были исследованы 84 кандидата и их звездные площадки. Получена фотометрия звезд

⁷ http://www.vgoranskij.net/software/



Рис. 2. Кривая блеска объекта CSS110920 в высоком состоянии, свернутая с найденным орбитальным периодом.

поля с использованием фильтров SED 470, 540 и 656 с предельной яркостью до 20^m. В процессе ее анализа была обнаружена карликовая новая CSS131014, наблюдавшаяся во время вспышки. Наблюдаемые особенности спектра позволили сделать оценку массы вторичного компонента системы $M_2 = 0.94 \pm 0.04 \ M_{\odot}$ и предположить, что система принадлежит к карликовым новым типа U Gem или Z Cam. Объект CSS110920 не показал ожидаемой переменности блеска и показателей цвета, но архивные спектры из обзора неба SDSS дают основание классифицировать его как поляр. Анализ имеющихся данных позволил определить наиболее вероятный орбитальный период системы $P_{\rm Orb} = 0.054437$ и получить оценку напряженности магнитного поля белого карлика $B \approx 32 MG$. Мы делаем предположение, что объект не был детектирован при фотометрических наблюдениях с использованием среднеполосных фильтров вследствие своего нахождения в состоянии низкого темпа аккреции. В этом состоянии эмиссионные линии имеют низкую интенсивность, а циклотронные гармоники дают больший вклад в формирование континуума. Это может привести к равномерному распределению энергии в выбранных диапазонах спектра и уменьшению орбитальной переменности блеска.

Несмотря на отсутствие на сегодняшний день прямого детектирования поляров в рамках наблюдательной программы 3BS, мы продолжим поиск кандидатов в поляры при помощи среднеполосных фильтров. Планируется начать использовать новые 50-см телескопы САО РАН с полем зрения 1.5 угловых градуса для слепого поиска кандидатов в поляры в приполярной и близких к Млечному Пути областях, в которых отсутствует покрытие существующими фотометрическими обзорами неба.

Работа основана на наблюдательных данных,

полученных на телескопе Цейсс-1000 САО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 18-72-00106). В.Н. Аитов благодарит Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 18-29-21030) за поддержку его участия в наблюдениях. В.В. Шиманский благодарит Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 18-42-160003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бертин (E. Bertin), Astronomical Data Analysis Software and Systems XX **442**, 435 (2011).
- 2. Бертин, Арно (E. Bertin and S. Arnouts), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **117**, 393 (1996).
- 3. Буерманн, Томас (К. Buermann and H.-C. Thomas), Adv. Space Res. **13**, 115 (1993).
- Бэйлей и др. (J.A. Bailey, L. Ferrario, D.T. Wickramasinghe, et al.), MNRAS 272, 579 (1995).
- 5. Габдеев и др. (M.M. Gabdeev, T.A. Fatkhullin, and N.V. Borisov), arXiv e-prints arXiv:2004.11764 (2020).
- 6. Дрэйк и др. (A.J. Drake, S.G. Djorgovski, A. Mahabal, et al.), Astrophys. J. **696**, 870 (2009).
- 7. Дрэйк и др. (A.J. Drake, B.T. Gänsicke, S.G. Djorgovski, et al.), MNRAS **441**, 1186 (2014).
- 8. Емельянов Э.В., Фатхуллин Т.А., Москвитин А.С., САО РАН, Технический отчет № 340 (2019).

- 9. Жанг и др. (S. Zhang, A.-L. Luo, G. Comte, et al.), VizieR Online Data Catalog J/ApJS/240/31 (2019).
- 10. Жирарди и др. (L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, et al.), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **141**, 371 (2000).
- 11. Колбин и др. (A.I. Kolbin, N.A. Serebryakova, M.M. Gabdeev, et al.), Astrophys. Bull. **74**, 80 (2019).
- 12. Кроппер (М. Cropper), Space Sci. Rev. **54**, 195 (1990).
- 13. Ланг и др. (D. Lang, D.W. Hogg, K. Mierle, et al.), Astron. J. **139**, 1782 (2010).
- 14. Лафлер, Кинман (J. Lafler and T.D. Kinman), Astrophys. J. Suppl. Ser. **11**, 216 (1965).
- 15. Моралес-Руеда, Марш (L. Morales-Rueda and T.R. Marsh), MNRAS **332**, 814 (2002).
- 16. Мроз и др. (Р. Mróz, A. Udalski, R. Poleski, et al.), Acta Astron. **65**, 313 (2015).
- 17. Риттер, Колб (H. Ritter and U. Kolb), Astron. Astrophys. **404**, 301 (2004).
- 18. Розен и др. (S.R. Rosen, N.A. Webb, M.G. Watson, et al.), Astron. Astrophys. **590**, A1 (2016).
- 19. Стокман и др. (H.S. Stockman, G.D. Schmidt, and D.Q. Lamb), Astrophys. J. **332**, 282 (1988).
- 20. Уильям, Хилтнер (G. Williams and W.A. Hiltner), Astrophys. J. 252, 277 (1982).
- 21. Уорнер (B. Warner), Polars. In Cataclysmic Var. Stars 307 (2003).
- 22. Хонда и др. (М. Honda, K. Osawa, K. Osada, et al.), IAU Circ. **2826**, 1 (1975).
- 23. Хоу и др. (Wen Hou, A.-li Luo, Yin Bi Li, et al.), Astron. J. **159**, 18 (2020).
- 24. Шкоди и др. (P. Szkody, S.F. Anderson, K. Brooks, et al.) Astron. J. **142**, 181 (2011).