

УДК 524.338:520.82/85; 524.387:520.82/85

ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫБОРКИ КАНДИДАТОВ В ПОЛЯРЫ

© 2016 Н. В. Борисов, М. М. Габдеев*, В. Л. Афанасьев

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 20 октября 2015 года; принята в печать 8 декабря 2015 года

Представлены первые поляриметрические наблюдения пяти катаклизмических переменных: MT Dra, 1RXS J184542.4+483134, CRTS CSS081231 J071126+440405, IPHAS J052832.69+283837.6 и CRTS CSS130604 J215427+155714. Наблюдения в полосе V показали, что все объекты обладают значительной круговой поляризацией. У всех, кроме последнего, меняется знак поляризации в течение орбитального периода. Объект 1RXS J184542.4+483134 наблюдался в двух состояниях блеска в 2011 и в 2012 гг. Ослабление блеска системы сопровождалось увеличением амплитуды изменения круговой поляризации.

Ключевые слова: *новые, катаклизмические переменные — двойные: тесные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды типа AM Her, или полярны, — это системы, состоящие из сильно замагниченного белого карлика (главный компонент) и красного карлика K–M-класса, который заполняет свою полость Роша (вторичный компонент). Особые свойства полярнов связаны с сильным магнитным полем белого карлика. Оно направляет аккрецирующее вещество по магнитным силовым линиям на магнитные полюса белого карлика. Полярны обладают сильной орбитальной и долговременной фотометрической переменностью в оптическом диапазоне [1, 2]. Спектры полярнов типичны для катаклизмических переменных. Они содержат сильные эмиссионные линии водорода, нейтрального и ионизованного гелия и линии более тяжелых элементов. Характерной спектральной особенностью является линия He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ [3], сравнимая или превышающая по интенсивности линию H β . Несмотря на большое количество отличительных наблюдательных особенностей полярнов, описанных в работах [4–6], основным критерием их классификации остается обнаружение значительной поляризации оптического излучения. Первые поляриметрические наблюдения полярна AM Her были выполнены Тапиа в 1977 г. [7]. Он обнаружил линейную и круговую поляризацию в полосах V и I . Линейная поляризация в максимуме достигала 6.8%, круговая поляризация варьировалась от 4% до –9.5%. К 1990 г. именно по поляриметрическим наблюдениям было открыто четырнадцать

объектов данного типа (работа [4] и ссылки в ней). Наиболее полный на сегодняшний день каталог катаклизмических переменных, в том числе магнитных, Риттера и Колба [8] содержит сведения о 136 объектах, классифицированных изучавшими их исследователями как полярны. Однако далеко не во всех работах проводились поляриметрические наблюдения.

Принимая во внимание вышеописанные фотометрические и спектральные особенности, мы отобрали пять систем кандидатов в полярны: MT Dra, 1RXS J184542.4+483134, CRTS CSS081231 J071126+440405, IPHAS J052832.69+283837.6, CRTS CSS130604 J215427+155714. Цель настоящей работы — проведение первых поляриметрических наблюдений данной выборки объектов и подтверждение их классификации как полярнов. В разделе 1 описываются проведенные наблюдения, последующие разделы посвящены каждому объекту в отдельности. В Заключение подведены итоги работы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Поляриметрические наблюдения в полосе V проводились на 6-м телескопе (БТА) САО РАН с применением редуктора светосилы SCORPIO-2 [9] и матрицы EEV 42-90 (4600 × 2048). В качестве анализатора поляризации использовалась призма Волластона (WOLL-1 [10]) и поворотная фазовая пластинка $\lambda/4$. Для определения параметра Стокса V необходимо получить два изображения с углами поворота пластинки 0° и 90° . Интенсивность рассчитывается суммированием отсчетов

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

Таблица 1. Журнал наблюдений

Object name	Date	HJD 2400000 +	Exposure, s × num	Seeing, arcsec	Phase coverage
MT Dra	May 27, 2011	55709.4541–.5090	120 × 34	1.5	0.62–1.21
1RXS J184542.4+483134	Aug 28, 2011	55802.3408–.3716	30 × 60	1.1	0.94–1.49
	Apr 23, 2012	56041.4774–.5493	120 × 44	2.0	0.92–1.86
CRTS CSS081231 J071126+440405	Apr 23, 2012	56041.3137–.3884	60 × 78	2.5	0.84–1.76
IPHAS J052832.69+283837.6	Nov 15, 2012	56247.4285–.4915	10 × 226	1.0	0.5–1.5
CRTS CSS 130604 J215427+155714	Nov 21, 2014	56983.1221–.2182	120 × 66	1.0	0.54–1.96

в обычных и необычных лучах по каждому изображению. Схему поляризационных измерений, примеры и формулы для обработки данных можно найти в статье [10]. Методика поляриметрических наблюдений в режиме прямых снимков описана в работе [11].

В ряде случаев наблюдения в поляриметрической моде выполнялись как программа-дубль, и не для всех объектов удалось провести их в течение всего орбитального периода. В таблице 1 приведен журнал наблюдений, а также интервалы фаз, определенные для каждого кандидата по опубликованным или полученным авторами в ходе обработки фотометрических данных эфемеридам и периодам, представленным в разделе 3. Юлианские даты и значения фаз рассчитывались на середину экспозиции. В качестве звезды сравнения и стандарта нулевой круговой поляризации выбиралась звезда поля в предположении, что ее излучение с большой вероятностью не поляризовано и нет переменности блеска. Координаты, звездные величины, если таковые были известны из предыдущих работ или определены авторами данной работы, ошибки фотометрических и поляриметрических измерений звезд сравнения даны в таблице 2. Ошибки определения звездной величины и степени поляризации при 30-секундной экспозиции и хорошей прозрачности показаны на рис. 1. На последующих графиках колебания блеска и круговой поляризации звезд сравнения представлены незаполненными кружками. Изменения блеска исследуемых объектов выражены в относительных звездных величинах.

3. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1. MT Dra

Впервые этот объект исследовали Шварц и др. [12] в рентгеновском и оптическом диапазонах. Ими было показано, что объект имеет несколько

состояний блеска. Аккреция в высоком состоянии происходит на оба магнитных полюса белого карлика. Фотометрическое исследование системы было выполнено Зубаревой и др. [13]. В ходе долговременных наблюдений авторы обнаружили высокие, $R \sim 17^m$, и низкие, $R \sim 18^m$, состояния блеска системы, которые объясняются изменением темпа аккреции. Наблюдался переход объекта в низкое состояние блеска в течение одной ночи. За 17 лет изменения орбитального периода MT Dra не

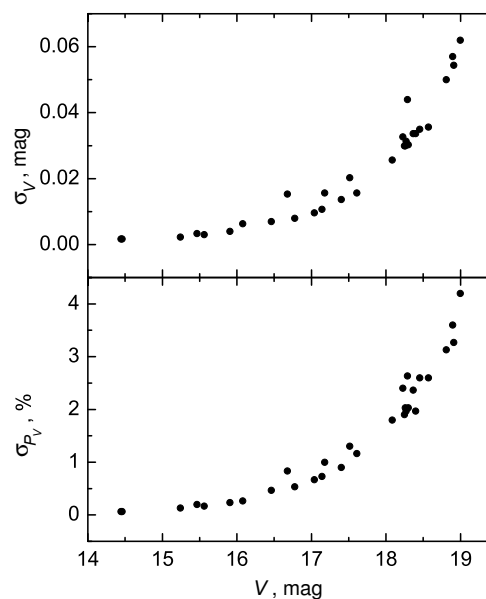


Рис. 1. Ошибки определения звездной величины (вверху) и степени поляризации (внизу) на БТА при использовании прибора SCORPIO-2 в режиме прямых поляриметрических изображений при 30-секундной экспозиции и хорошей прозрачности.

зафиксированы. Представленная в [13] эфемерида:

$$\begin{aligned} \text{HJD} &= 2454676^{\text{d}}.446 (\pm 0.001) \\ &+ 0^{\text{d}}.0893869 (\pm 0.0000001) E, \end{aligned}$$

где нулевая фаза соответствует минимуму блеска.

Поляриметрические наблюдения MT Drg были проведены нами на БТА 27 мая 2011 г. в качестве дублирующей программы. Результаты показаны на рис. 2. Небольшая амплитуда переменности порядка $0^{\text{m}}.75$ кривой блеска и плавный подъем на фазах $\varphi = 0.6-0.9$ говорят о том, что объект находился в высоком состоянии [13]. Круговая поляризация P_v изменяется в диапазоне от -6 до $+12\%$. Она растет с увеличением блеска и достигает максимума вблизи фазы $\varphi = 0.9$. Во время плато, $\varphi = 0.95-1.2$, круговая поляризация меняет знак несколько раз, достигая значения -6% в фазе $\varphi = 1.15$. Изменение знака круговой поляризации указывает на аккрецию на оба полюса белого карлика, подтверждающая вывод, сделанный в работе [12].

3.2. IRXS J184542.4+483134

В 2011 г. Денисенко и Соколовский [14], используя оригинальный метод поиска кандидатов в катаклизмические переменные по опубликованным данным, обнаружили переменность данного объекта. RXS 184542 был исследован в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах Павленко и др. [15]. Они зарегистрировали сильную орбитальную переменность блеска в видимом и ультрафиолетовом диапазонах и долговременную переменность в рентгеновском. Орбитальный период оказался коротким, $P_o = 0^{\text{d}}.05490(8)$ (порядка 78 мин). Было обнаружено кратковременное затмение глубиной более двух звездных величин.

Таблица 2. Информация о звездах сравнения

Object name	Comparison star parameters				
	α , hh:mm:ss	δ , dd:mm:ss	V , mag	σ_{phot} , mag	σ_{pol} , %
MT Drg	18:47:03	+55:39:03	—	0.009	0.14
RXS 184542	18:45:40	+48:31:47	—	0.003	0.09
	18:45:40	+48:31:47	—	0.017	0.51
CSS081231	07:11:22.8	+44:04:14	16.57	0.01	0.59
IPHAS 0528	05:28:29	+28:38:32	14.49	0.005	0.20
CSS130604	21:54:32	+15:58:01	17.90	0.033	1.14

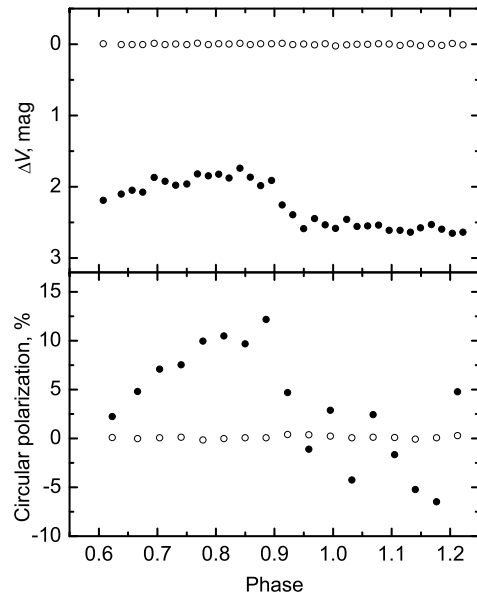


Рис. 2. Орбитальные кривые блеска (вверху) и круговой поляризации (внизу) объекта MT Drg (заполненные кружки). Незаполненные кружки — звезда сравнения.

На основе этих наблюдений система была классифицирована как поляр.

Мы провели фотополяриметрические наблюдения для подтверждения магнитной природы данного объекта. Первые наблюдения в 2011 г. были оценочными и не покрыли полный орбитальный период. Это удалось сделать в 2012 г. Результаты показаны на рис. 3. В 2011 г. объект находился в более высоком состоянии блеска, амплитуда кривой блеска составляла порядка 2^{m} , глубина затмения — около $1^{\text{m}}.25$. Круговая поляризация отрицательна, до -7% в момент максимума блеска $\varphi = 0.95-1.1$ с изменением знака в момент минимума $\varphi = 0$. С падением блеска круговая поляризация меняла знак и достигала значения 15% в фазе $\varphi = 1.4$. В 2012 г. в более низком состоянии амплитуда изменений блеска системы возросла примерно до $2^{\text{m}}.5$. Наблюдалось значительное изменение степени круговой поляризации: от -10% до 33% , что указывает на увеличение вклада циклотронного излучения. Из-за скважности наблюдений не удалось определить полную глубину затмения и зафиксировать изменение знака круговой поляризации в фазе $\varphi = 0$.

3.3. CRTS CSS081231 J071126+440405

Этот кандидат в поляры был обнаружен Маехара [16] в обзоре неба Catalina Sky Survey

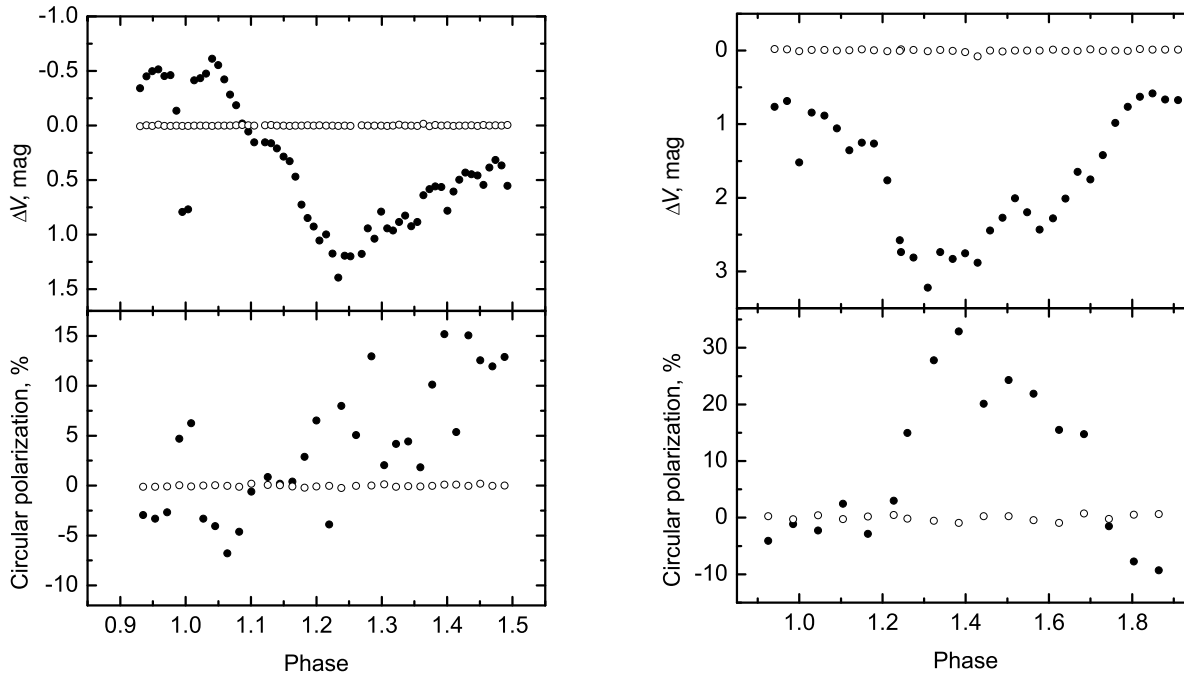


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для объекта 1RXS J184542.4+483134: в 2011 г. (слева) и в 2012 г. (справа).

(CSS¹ [17], университет Аризоны, США). Последующие фотометрические наблюдения [18–20] показали, что объект обладает сильной орбитальной и долговременной переменностью. Были обнаружены три состояния блеска: низкое — $R_c \sim 17^m5$, промежуточное — $R_c \sim 16^m0$, и высокое — $R_c \sim 15^m0$. Система имеет глубокое затмение до 4^m и «дип» (от англ. dip) — понижение блеска системы, связанное с самозатмением аккреционной структуры [19]. Фаза, в которой появляется дип, и его глубина зависят от состояния блеска системы. Торн и др. [19] наблюдали дип в фазе $\varphi = 0.1$, когда объект находился в низком состоянии. Катышева и Шугаров [20] наблюдали дип только в высоком и промежуточном состояниях в фазах $\varphi = 0.84$ и $\varphi = 0.92$. Орбитальный период системы $P_o = 0^d081376(3)$ [19].

Полученные нами кривые блеска и круговой поляризации объекта показаны на рис. 4. Амплитуда кривой блеска составляет порядка 1^m5 , глубина затмения — около 4^m5 . Из сравнения формы кривой блеска с кривыми в работе [20] следует, что на момент наших наблюдений объект находился в промежуточном состоянии блеска. Кривая круговой поляризации повторяет форму кривой блеска. Излучение поляризовано на фазах максимума блеска ($\varphi = 0.85$ – 1.25) до 8%, в момент затмения знак поляризации меняется, и она достигает –14%. Во время плато ($\varphi = 1.3$ – 1.7) поляризация

в среднем имеет отрицательный знак, степень поляризации излучения близка к нулю. Дип на кривой блеска не наблюдается.

3.4. IPHAS J052832.69+283837.6

Этот объект — один из одиннадцати кандидатов в катаклизмические переменные, отобранных Витамом и др. [21] по результатам обзора неба в линии H_α IPHAS,² показавший высокое отношение интенсивности линии $He\ II\ \lambda 4686\ \text{\AA}$ к линии $H\beta$. Габдеев [22] провел многополосный фотометрический мониторинг системы в полосах B , V , R_c и анализ кривых блеска. IPHAS 0528 обладает характерными для полярных фотометрическими особенностями: орбитальной, порядка 1^m , и долговременной переменностью блеска $\langle R_c \rangle = 15^m5$ – 16^m1 , изменением формы и амплитуды кривой блеска и показателей цвета в зависимости от среднего уровня блеска системы. На кривых блеска в более высоком состоянии также был обнаружен дип глубиной около 0^m1 в фазе $\varphi = 0.8$. Орбитальный период системы составляет примерно 80 мин. Эфемериды, определенная в работе [22]:

$$\begin{aligned} \text{HJD} &= 2455951^d192 (\pm 0.001) \\ &+ 0^d055592 (\pm 0.000002) E, \end{aligned}$$

¹<http://www.lpl.arizona.edu/css/>

²<http://www.iphas.org>

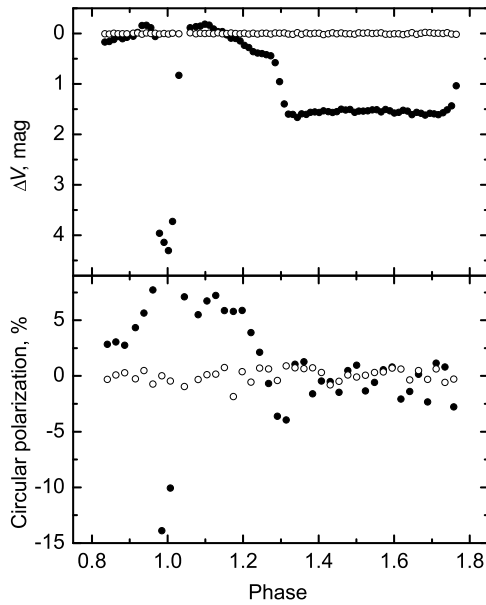


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для объекта CRTS CSS081231 J071126+440405.

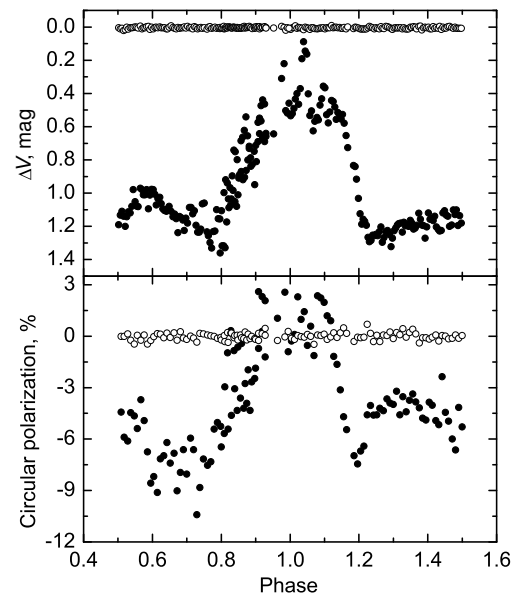


Рис. 5. То же, что на рис. 2, для объекта IPHAS J052832.69+283837.6.

где нулевая фаза соответствует моменту максимума блеска.

Объект IPHAS 0528 яркий, поэтому удалось получить кривые блеска и круговой поляризации с высоким временным разрешением. Средняя звездная величина $V \sim 15^m3$ указывает на то, что объект находится в высоком состоянии. Однако характеристики кривой блеска, представленной на рис. 5, соответствуют описанию более низкого состояния системы [22]: амплитуда блеска составляет порядка 1^m2 , отчетливо видны главный и вторичный максимумы. По-видимому, в полосе V амплитуда и форма кривой блеска сохраняются независимо от состояния блеска системы. Круговая поляризация большую часть периода отрицательна, достигает величины -10% , и лишь в фазах максимума ($\varphi = 0.9-0.1$) меняет знак, степень поляризации при этом не превышает 3% . Интересные особенности в форме кривой круговой поляризации наблюдаются в фазе окончания максимума блеска $\varphi = 1.2$, степень поляризации прекращает расти раньше, чем останавливается падение блеска. После вторичного максимума в фазе $\varphi = 0.6$ средняя степень поляризации увеличивается на 2% . Сложно рассуждать, что происходит в системе и какова ее геометрия. Для детального анализа следует проводить сравнение наблюдательных данных с теоретическими моделями. Наилучшие результаты достигаются при использовании многополосной фотополариметрии полярнов с расчетом всех параметров Стокса [23].

3.5. CRTS CSS130604 J215427+155714

Спектральные и фотометрические наблюдения этого объекта проведены Шкоди и др. [24] в рамках работы, посвященной поиску катаклизмических переменных из каталогов SDSS [25], CRTS [17] и vsnet alert.³ Амплитуда переменности блеска объекта CSS130604 составила 1^m5 . Спектр объекта содержал сильную линию ионизованного гелия He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$, измеренная по ней полуамплитуда изменения лучевых скоростей достигала 300 км с^{-1} . Орбитальный период составил 96.9 мин .

Эфемерида, полученная нами по собственным фотометрическим наблюдениям, которые будут описаны в другой работе:

$$\begin{aligned} \text{HJD} &= 2456987^d.2578 (\pm 0.0001) \\ &+ 0^d.055592 (\pm 0.000002) E, \end{aligned}$$

где нулевая фаза соответствует моменту минимума блеска.

Фотометрическая переменность, сильная линия He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ и высокая амплитуда изменения лучевых скоростей свидетельствуют о магнитной природе объекта. Для окончательной классификации системы мы провели фотополариметрические наблюдения. Результаты представлены на рис. 6.

³<http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/pipermail/vsnet-alert/>

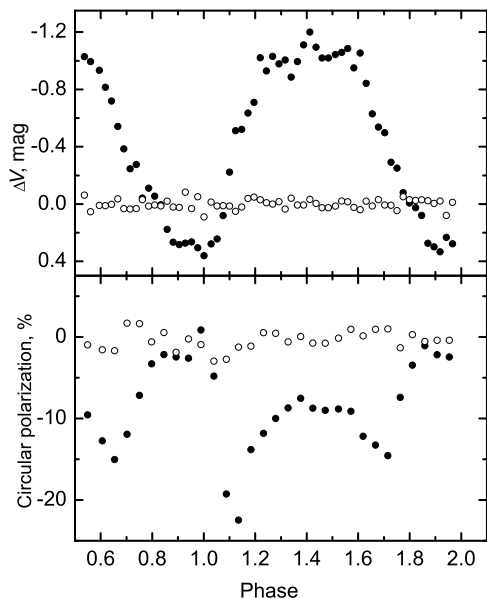


Рис. 6. То же, что на рис. 2, для объекта CRTS CSS130604 J215427+155714.

Амплитуда кривой блеска в полосе V равна примерно $1^m.5$. Форма кривой блеска квазисинусоидальна, максимум блеска ($\varphi = 1.2-1.6$) в два раза продолжительнее минимума ($\varphi = 0.9-1.1$). Увеличение блеска до максимума происходит в два раза быстрее его падения. Круговая поляризация весь период имеет отрицательный знак. Наблюдаются два минимума, в фазах $\varphi = 0.65$ и $\varphi = 1.15$. Первый минимум приходится на время ослабления блеска, второй — на время его подъема. Максимальная степень поляризации -22% была зафиксирована во время второго минимума. В момент минимума блеска степень поляризации приближается к нулю, в максимуме она близка к -10% .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На БТА с прибором SCORPIO-2 реализована возможность наблюдать излучение слабых объектов $V \simeq 19^m$ в режиме поляриметрии. Проведено первое фотополяриметрическое исследование пяти кандидатов в поляры: MT Drg, 1RXS J184542.4+483134, CRTS CSS081231 J071126+440405, IPHAS J052832.69+283837.6, CRTS CSS130604 J215427+155714. Для всех объектов обнаружена значительная поляризация излучения в полосе V , что однозначно классифицирует эти системы как поляры. Знак поляризации изменяется в течение орбитального периода у четырех из пяти объектов, что говорит об активности обоих магнитных полюсов белого карлика. Формы кривых блеска и круговой поляризации различны у всех кандидатов, указывая на различие физических

и геометрических параметров исследованных систем. Наилучшее определение параметров области формирования поляризованного излучения возможно при одновременном моделировании кривых блеска и поляризации, и желательно использовать многополосные фотополяриметрические наблюдения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на БТА 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Kalomeni, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **422**, 1601 (2012).
2. Z. Dai, S. Qian, and L. Li, Astrophys. J. **774**, 153 (2013).
3. J. Patterson, Publ. Astron. Soc. Pacific **106**, 209 (1994).
4. N. F. Vojkhanskaya, Астрофиз. исслед. (Известия CAO) **30**, 1 (1990).
5. M. Cropper, Space Sci. Rev. **54**, 195 (1990).
6. B. Warner, *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
7. S. Tapia, Astrophys. J. **212**, 125 (1977).
8. H. Ritter and U. Kolb, Astron. and Astrophys. **404**, 301 (2003).
9. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, Baltic Astronomy **20**, 363, (2011).
10. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, Astrophysical Bulletin **67**, 438 (2012).
11. V. L. Afanasiev, N. V. Borisov, and M. M. Gabdeev, Astrophysical Bulletin **70**, 328 (2015).
12. R. Schwarz, J. Greiner, G. H. Tovmassian, et al., Astron. and Astrophys. **392**, 505 (2002).
13. A. M. Zubareva, E. P. Pavlenko, M. V. Andreev, et al., Astronomy Reports **55**, 224 (2011).
14. D. V. Denisenko and K. V. Sokolovsky, Astronomy Letters **37**, 91 (2011).
15. E. Pavlenko, K. Sokolovsky, A. Baklanov, et al., Astron. Telegram, No. 3436 (2011).
16. H. Maehara, vsnet-alert/10867 (2009).
17. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, et al., Astrophys. J. **696**, 870 (2009).
18. M. Templeton, A. Oksanen, D. Boyd, et al., Central Bureau Electronic Telegrams, No. 1652 (2009).
19. K. Thorne, P. Garnavich, and K. Mohrig, Inform. Bull. Var. Stars, No. 5923 (2010).
20. N. Katysheva and S. Shugarov, Memorie della Società Astronomica Italiana **83**, 670 (2012).
21. A. R. Witham, C. Knigge, A. Aungwerowit, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **382**, 1158 (2007).

22. M. M. Gabdeev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 460 (2015).
 23. J. E. R. Costa and C. V. Rodrigues, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **398**, 240 (2009).
 24. P. Szkody, M. E. Everett, S. B. Howell, et al., *Astron. J.* **148**, 63 (2014).
 25. D. G. York, J. Adelman, J. E. Jr. Anderson, et al., *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).

Photopolarimetric Observations of the Sample of Polar Candidates

N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, and V. L. Afanasiev

We presented the first polarimetric observations of five cataclysmic variables: MT Dra, 1RXS J184542.4+483134, CRTS CSS081231 J071126+440405, IPHAS J052832.69+283837.6, and CRTS CSS130604 J215427+155714. Observations in the *V* band have shown that all the objects are highly circularly polarized. All the objects except the last one change the polarization sign during the orbital period. The object 1RXS J184542.4+483134 was observed in two brightness states in 2011 and 2012. The brightness decrease of the system was accompanied by the increase of the amplitude of circular polarization variation.

Keywords: *novae, cataclysmic variables—binaries: close*