

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХ МАГНИТНЫХ КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ SDSS J215427+155713 И SDSS J032855+052254

Ю.В.БАБИНА, Е.П.ПАВЛЕНКО, О.И.АНТОНЮК

Поступила 13 октября 2016

Принята к печати 14 декабря 2014

В данной работе представлены результаты анализа впервые полученных длинных фотометрических рядов наблюдений двух малоизученных полярных SDSS J032855+052254 и SDSS J215427+155713 (далее - SDSS J0328 и SDSS J2154) в Крымской астрофизической обсерватории и в обсерватории Терскол в интегральном свете и в полосах *BVRc*. По результатам уточнены их орбитальные периоды и впервые определены орбитальные эфемериды. Показано, что у SDSS J0328 наблюдалась двухполюсная аккреция. По высокоточным наблюдениям с разрешением 15 с были зарегистрированы колебания блеска с характерным временем около 4 мин и амплитудой, достигавшей 0^m.5. Для SDSS J2154 по показателям цвета сделан вывод о том, что на протяжении орбитального цикла в изменение блеска системы вносят вклад несколько источников, максимум излучения которых приходится на разные диапазоны спектра.

Ключевые слова: *аккреция; поляры; катаклизмические переменные; SDSS J032855+052254; SDSS J215427+155713*

1. *Введение.* Поляры - это такие системы, которые состоят из мало-массивной звезды - спутника позднего спектрального класса, заполняющего свою полость Роша, вследствие чего через внутреннюю точку Лагранжа происходит перенос плазмы на компактную звезду - белый карлик с магнитным полем порядка 10^7 - 10^8 Гс [1]. Вещество из аккреционной струи, попадая в область действия магнитного поля, начинает двигаться вдоль силовых линий и выпадает в область магнитных полюсов. Поскольку у полярных нет аккреционных дисков из-за того, что магнитное поле не допускает их образование, такие объекты не показывают вспышек типа карликовых новых, которые вызваны нестабильностью в аккреционном диске. Вместо этого поляры могут демонстрировать два состояния яркости с непредсказуемым переходом из одного состояния в другое. Предполагается, что изменение состояний яркости вызывается изменением темпа потери вещества красным карликом и, как следствие, изменением темпа аккреции. Поэтому высокие и низкие состояния полярных понимаются как высокие и низкие состояния аккреции. Нельзя исключить, что в процессе эволюции поляр может претерпеть вспышку типа классической новой, как это продемонст-

рировала Новая Лебеда 1975 - V1500 Cyg, впоследствии оказавшаяся полярном [2,3].

SDSS J0328 и SDSS J2154 - малоизученные полярны, для которых известны из литературы только эпизодические наблюдения. Поэтому основной целью данной работы было получение фотометрических рядов наблюдений, уточнение орбитального периода и характера аккреции для каждого объекта, спустя несколько лет с момента последних наблюдений.

В статье приводятся впервые полученные длинные фотометрические ряды данных, описывается характер аккреции, уточнена величина орбитального периода для двух магнитных катаклизмических систем SDSS J032855+052254 [4] и SDSS J215427+155713[5].

2. *SDSS J032855+052254*. SDSS J032855+052254 впервые была определена как магнитная катаклизмическая переменная Шкоди и др. [4]. Ими же были приведены единственные спектрополяриметрические и фотометрические наблюдения объекта и результаты их обработки. Показано, что круговая поляризация SDSS J0328 имеет величину +0.48% и за 2 часа изменяется с амплитудой 2.5%. По спектру этого объекта была определена величина магнитного поля, которая составляет 33 ± 5 МГ. По эмиссионной линии H α был найден период 120 ± 9 мин (0.0833 ± 0.0063 сут.). В этой же работе по полученным данным авторы сделали вывод, что система имеет два активных полюса, но аккреция у SDSS J0328 идет преимущественно на один полюс.

2.1. *Наблюдения*. В данной работе используются результаты фотометрических ПЗС-наблюдений SDSS J0328, полученные в декабре 2008г. и январе 2009г. Наблюдения проводились в обсерватории Пик Терскол на 60-см телескопе с помощью ПЗС PixelVision и в Крымской астрофизической обсерватории в первичном фокусе 2.6-м телескопа ЗТШ с помощью ПЗС FLI 1001E. Все наблюдения были выполнены в интегральном свете. В обработке

Таблица 1

СВОДКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ SDSS J0328

| JD 2400000+..... | Телескоп | Количество наблюдений | Интервал наблюдений ΔT^h |
|------------------|----------|-----------------------|----------------------------------|
| 54807 | 60-см | 163 | 5.3 |
| 54814 | 60-см | 152 | 8.18 |
| 54816 | 60-см | 151 | 5.75 |
| 54818 | 60-см | 217 | 7.14 |
| 54820 | 60-см | 210 | 6.84 |
| 54821 | 60-см | 178 | 6.18 |
| 54853 | 2.6-м | 495 | 3.12 |

использовались результаты 7 ночей, включающих 1566 оценок блеска (табл.1).

Обработка изображений проводилась методом апертурной фотометрии по программе MaxIM DL. Точность одного измерения блеска колебалась от $0^m.02$ - $0^m.04$ в максимуме блеска до $0^m.05$ в минимуме. На рис.1 приведена область SDSS J0328 с обозначениями исследуемой звезды и звезд сравнения.

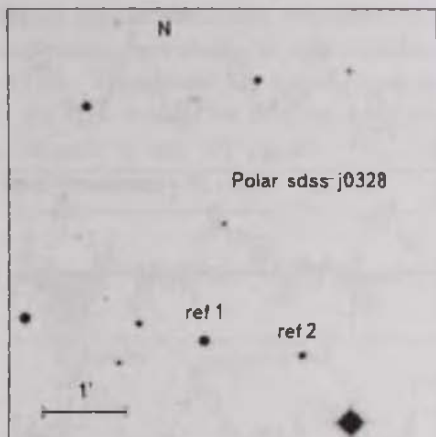


Рис.1. Карта окрестности поляра SDSS J0328 (север наверху). Обозначено положение объекта исследований и звезд сравнения.

2.2. Кривые блеска. По всем 7 ночам наблюдений были построены кривые блеска, которые приведены на рис.2. По осям даны гелиоцентрическая Юлианская дата и относительная звездная величина, полученная относительно двух звезд сравнения, которые приведены на рис.1. Согласно каталогу USNO A2.0 звездная величина звезд сравнения ref1 ref2 составила $R_c = 15^m.0$ и $R_c = 16^m.7$, соответственно.

Интервал наблюдений во все ночи превышает орбитальный период (см. рис.2). Форма кривой блеска незначительно меняется от цикла к циклу, но от ночи к ночи изменения более заметны. В течение одного цикла кривая блеска состоит из основного горба большей амплитуды в среднем $0^m.75$, длительность которого равна половине орбитального периода (яркая фаза) и малого горба с амплитудой от $0^m.3$ до $0^m.1$ (слабая фаза). За время наблюдений средний блеск системы относительно звезд сравнения изменялся от $1^m.6$ до $1^m.8$.

В ряде ночей основной горб сильно изрезан квазипериодическими колебаниями. Масштаб этих колебаний хорошо виден в ночь JD 2454853 по высокоточным наблюдениям на ЗТШ с временным разрешением 15с (см. рис.2). Амплитуда колебаний достигала $0^m.5$ за время 4 мин. Такие же

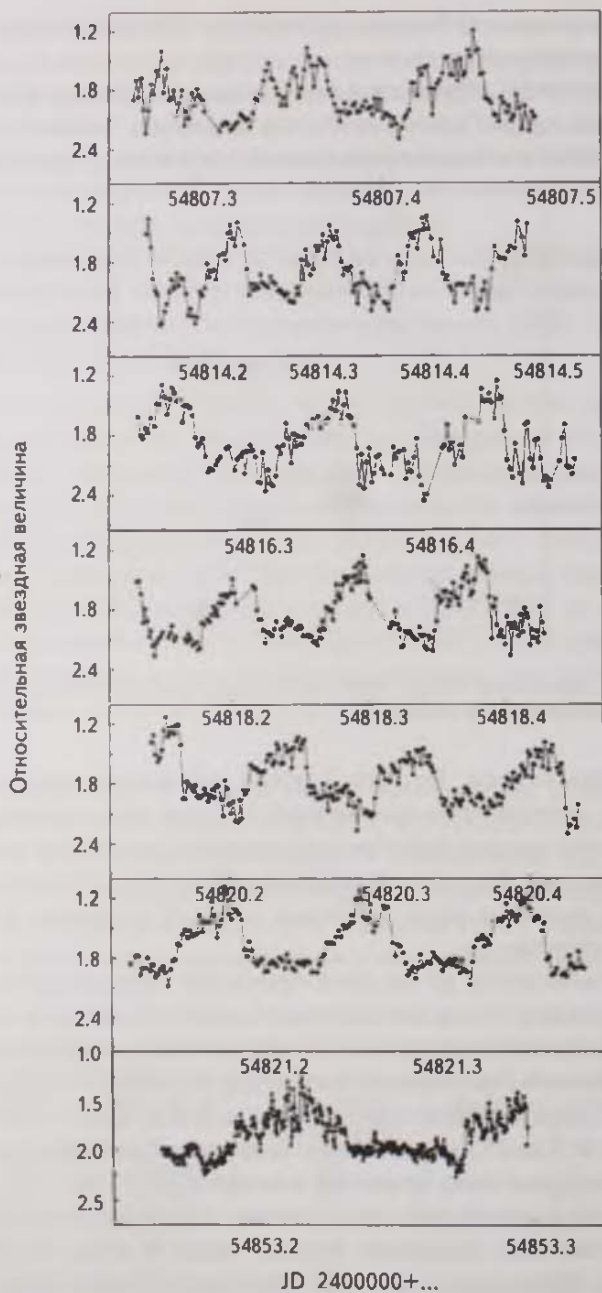


Рис.2. Кривые блеска SDSS J0328 для каждой ночи.

короткопериодические высокоамплитудные колебания отмечались еще у другого поляр - BY Cam [6]. Профиль основного горба на кривой блеска в основном характеризуется медленным подъемом и более быстрым падением блеска.

2.3. Периодограммный анализ. Для всего массива данных (7 ночей) был проведен периодограммный анализ. Поиск периодов проводился с помощью программы ISDA [7] не параметрическим методом Стеллингверфа. На рис.3 представлена периодограмма, полученная по всем данным в диапазоне периодов от 0.12 сут. до 0.02 сут. Наиболее значимый период получился равным 0.084771 ± 0.000025 сут. Он совпадает с орбитальным периодом системы, найденным ранее Шкоди и др. [4] (далее - P_{orb}), однако точность его определения на два порядка выше.

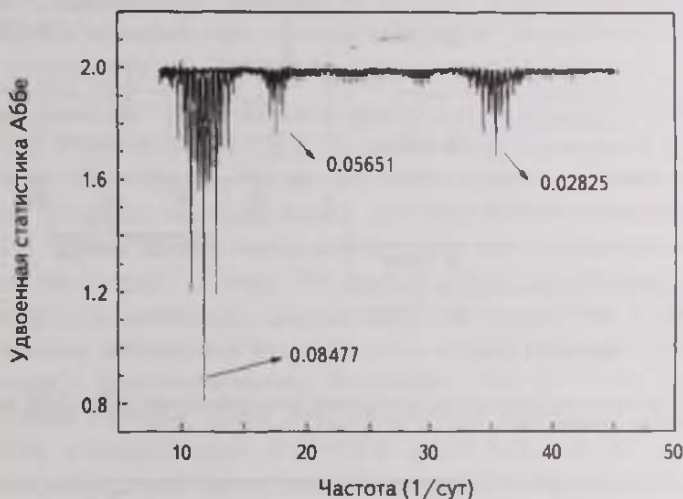


Рис.3. Периодограмма по всем данным наблюдений SDSS J0328.

Помимо доминирующей частоты, можно отметить еще несколько пиков, соответствующих $P_1 = 0.02825$ и $P_2 = 0.05651$ сут., связанных с орбитальным периодом: $P_1 = 1/3 P_{orb}$ и $P_2 = 2/3 P_{orb}$.

На рис.4 приведены периодограммы, построенные для каждой ночи отдельно. Из рисунка видно, что орбитальный период и периоды P_1 и P_2 присутствуют каждую ночь.

По всем данным была сделана свертка с орбитальным периодом, т.е. получена средняя кривая, которая представлена на рис.5. Видно, что в течение орбитального периода наблюдаем один основной горб и один маленький горб. Отметим, что возрастанию блеска основного горба предшествует минимум, наиболее глубокий на кривой блеска. Основной горб длится половину

орбитального периода и, вероятнее всего, отвечает за основную аккреционную область, куда идет преобладающая часть аккреционного потока. Его амплитуда в среднем в три раза больше амплитуды второго меньшего горба. Основной горб имеет несимметричную форму, увеличение блеска происходит более плавно, чем падение. В течение второй половины периода наблюдается меньший по амплитуде горб, отвечающий за вторую аккреционную область.

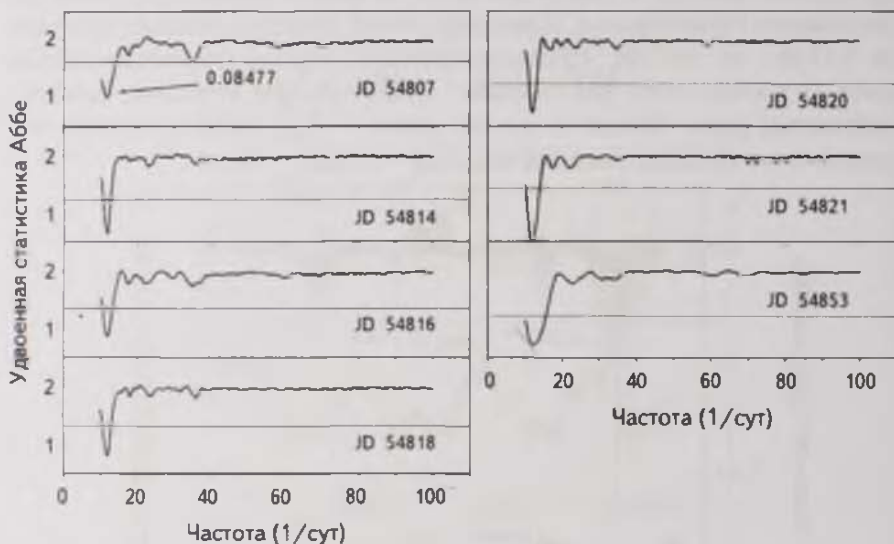


Рис. 4. Периодограммы, построенные для каждой ночи наблюдений SDSS J0328 отдельно, линией обозначен уровень 3σ .

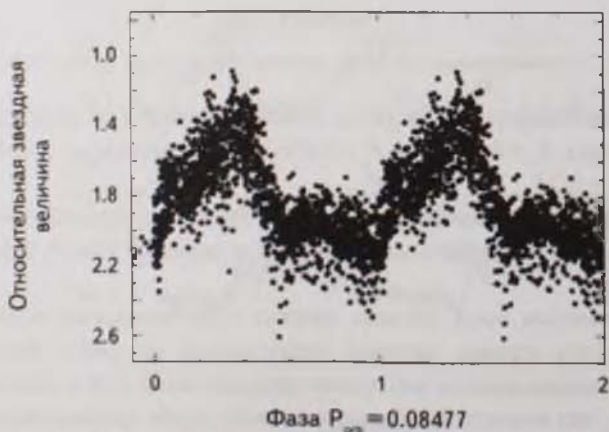


Рис. 5. Свертка всех данных SDSS J0328 с орбитальным периодом, построенная согласно эфемериде [1].

На основании полученных данных и, используя уточненную величину орбитального периода, мы получили эфемериду для более глубокого минимума, который хорошо виден на рис.5:

$$JD_{\text{hel}}(\text{min}) = 2454807.3268 + 0.084771E, \quad (1)$$

где E - номер цикла.

2.4. Выводы. На основании полученных данных удалось существенно уточнить орбитальный период $P_{\text{orb}} = 0.0847709 \pm 0.0000254$ сут. и получить эфемериду для более глубокого минимума. Фазовые диаграммы показывают, что, вероятно, у системы есть основная аккреционная область, куда идет большая часть аккреции, эта область видна в виде основного горба, длящегося половину орбитального периода. В течение второй половины периода наблюдается меньший горб с амплитудой в три раза меньше основного.

3. SDSS J215427+155713 (далее - SDSS J2154). 4 июня 2013г., согласно vsnet-alert [8], появилось сообщение о вспышке CRTS (Catalina Real-Time Transient Survey) [9] катаклизмической переменной SDSS J2154, достигшей $17^m.5$. Кривая блеска показывала одиночный горб с периодом 96.9 мин. Четырьмя месяцами позже, как стало ясно из наблюдений Шкоди и др. [5], кривая блеска имела аналогичный вид с единственным горбом большой амплитуды (1.5 mag). По мнению Шкоди, полученные результаты характерны для магнитной катаклизмической переменной, т.е. поляра. Из спектральных наблюдений был определен период 96.9 мин. (0.067292 сут.), совпавший с фотометрическим. В октябре 2009г. по SDSS фотометрии, проведенной в течение одной ночи, наблюдения показывали меньший блеск ($g = 18.65$) и голубой цвет ($u - g = 0.10$, $g - r = 0.02$), что не согласуется с данными наблюдений других полярных звезд, имеющих максимальную амплитуду в красной области спектра. Однако Шкоди и др. предположили, что система во время наблюдений находилась в низком состоянии яркости, похожем на низкое состояние у EF Eri, когда белый карлик доминировал в оптике [10].

Для выявления поведения объекта, спустя 5 лет, мы провели многоцветную фотометрию, охватившую два с половиной месяца в 2014г. В статье приводятся результаты многоцветной фотометрии $BVRc$ и фотометрии в интегральном свете.

3.1. Наблюдения. Фотометрические наблюдения поляра SDSS J2154 были получены в Крымской астрофизической обсерватории на телескопе К-380 (38 см) и на телескопе ЗТШ (2.6-м) с помощью ПЗС Arogee Alta E47 с июля по октябрь 2014г. На протяжении 7 ночей наблюдения проводились в интегральном свете, и в течение одной ночи в полосах $BVRc$ фотометрической системы Джонсона-Кузинса. Обработка проводилась по результатам наблюдений

СВОДКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ SDSS J2154

| JD 2400000+..... | Телескоп | Количество наблюдений | Интервал наблюдений ΔT^h |
|------------------|----------|-----------------------|----------------------------------|
| 56871.37 | 38 -см | 29 | 4.3 |
| 56889.33 | 38 -см | 29 | 4.1 |
| 56891.45 | 2.6 -м | 63 | 3.1 |
| 56899.38 | 38 -см | 64 | 4.5 |
| 56902.40 | 38 -см | 30 | 4.3 |
| 56917.23 | 38 -см | 33 | 5.0 |
| 56930.29 | 38 -см | 38 | 6.2 |
| 56951.18 | 38 -см | 24 | 3.6 |

в течение 8 ночей, включающих 35 часов чистого времени. Общая сводка данных приведена в табл.2. Обработка изображений проводилась методом апертурной фотометрии по программе MaxIM DL. Для наблюдений, полученных на 38-см телескопе, ошибка одной оценки в максимуме блеска составила 0.06 звездных величин, а в минимуме блеска 0.15 звездных величин. Для наблюдений, полученных на 2.6-м телескопе, ошибка одной оценки блеска в наблюдаемых нами фотометрических полосах составила в B - 0^m.06, в V - 0^m.05, в R_c - 0^m.015.

На рис.6 приведена область SDSS J2154 с обозначениями поляр и звезд сравнения. Для калибровки шкалы звездных величин мы использовали данные из каталога UCAC4: R_1 - 16^m.12, V_1 - 16^m.362, B_1 - 17^m.01 и R_2 - 17^m.93, V_2 - 18^m.14, B_2 - 18^m.77. Поскольку максимум чувствительности матрицы

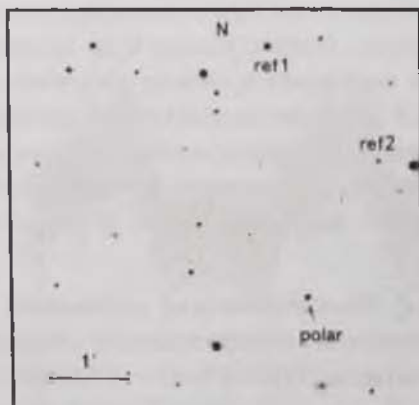


Рис.6. Карта окрестности поляр SDSS J2154. Обозначено положение объекта исследований и звезд сравнения.

близок к эффективной длине волны полосы R_c , мы приписываем наблюдениям, выполненным без фильтра, нуль-пункт шкалы R_c .

3.2. *Кривые блеска.* На рис.7 изображены кривые блеска для 8 ночей, где по осям даны гелиоцентрическая Юлианская дата и звездная величина.

На кривых блеска видим фотометрическое поведение системы в течение двух или трех орбитальных циклов для каждой ночи. В течение одного орбитального цикла кривая блеска имеет одnogорбый вид, т.е. за время одного орбитального цикла мы видим одну аккреционную область. Амплитуда этого горба в среднем составляет $2^m.0$. На кривой блеска в ночь JD 56951 заметно изменение глубины минимума на $1^m.0$.

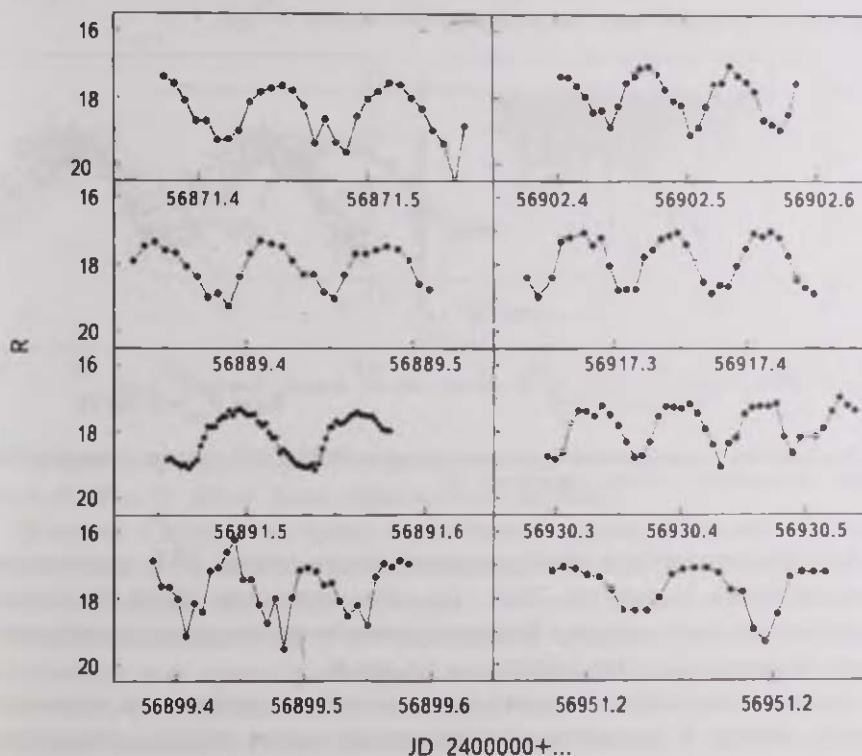


Рис.7. Кривые блеска SDSS J2154 для каждой ночи наблюдений.

За время наблюдений средний блеск системы в интегральном свете изменялся от $16^m.7$ в максимуме до $19^m.7$ в минимуме, что, согласно данным [5] указывает на низкое аккреционное состояние поляра во время наших наблюдений.

3.3. *Периодограммный анализ.* По 8 ночам наблюдений была построена

периодограмма в диапазоне периодов от 0.06 сут. до 0.08 сут. Обработка велась с помощью программы ISDA [7] непараметрическим методом Стеллингверфа. Результат представлен на рис.8. Основной период получился равным 0.0672975 ± 0.0000028 сут. Он совпадает с орбитальным периодом системы, найденным ранее Шкоди и др. [5], однако получен с большей точностью, что позволило нам найти следующую эфемериду:

$$JD_{hel}(\min) = 2456871.4113 + 0.067297E, \quad (2)$$

где E - номер цикла, JD_0 - значение первого минимума в первую ночь наблюдений, найденное методом касательных.

Используя найденную эфемериду и орбитальный период, мы построили свертку по всем данным, представленную на рис.8.

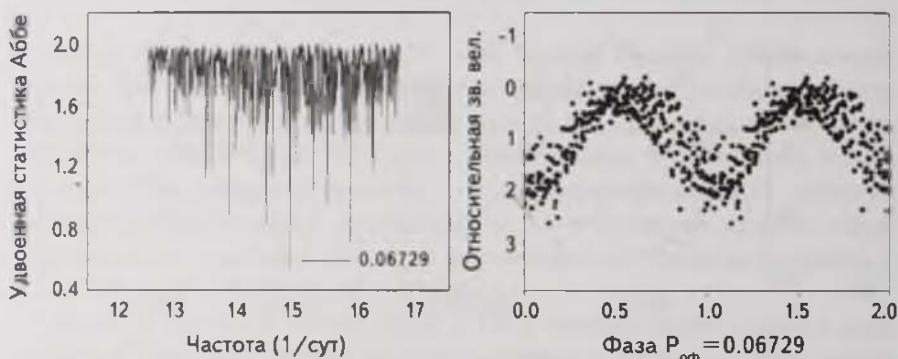


Рис.8. Слева - периодограмма по всем данным SDSS J2154, справа - свертка всех данных, построенная согласно эфемериде [2].

3.4. Многоцветная фотометрия. Многоцветная $BVRc$ фотометрия была получена 21 августа 2014г. на 2.6-м телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории. Фазовые кривые блеска строились по найденной нами эфемериде [2]. Они приведены на рис.9.

Кривые показывают одногорбый вид за орбитальный период несимметричной формы. В противоположность предыдущему полюру, возрастание блеска происходит немного быстрее, чем падение. Амплитуда в полосе B и Rc составляет 2^m , а в полосе V - $1^m.6$. Форма фазовых кривых блеска в B и V полосе похожа. В полосе Rc кривая блеска отличается продолжительным максимумом. Ошибки единичной оценки блеска в разных полосах составили: для B - $0^m.06$, V - $0^m.05$, Rc - $0^m.015$. Заметим, что это внутренняя точность. Сами же величины показателей цвета могут быть несколько сдвинуты относительно истинных показателей в системе $BVRc$ из-за возможного систематического несовпадения звездных величин звезд сравнения в каталоге

UCAC с истинными величинами в системе $BVRc$. Поэтому в данной работе имеет смысл рассматривать изменения показателей цвета, а не их величины.

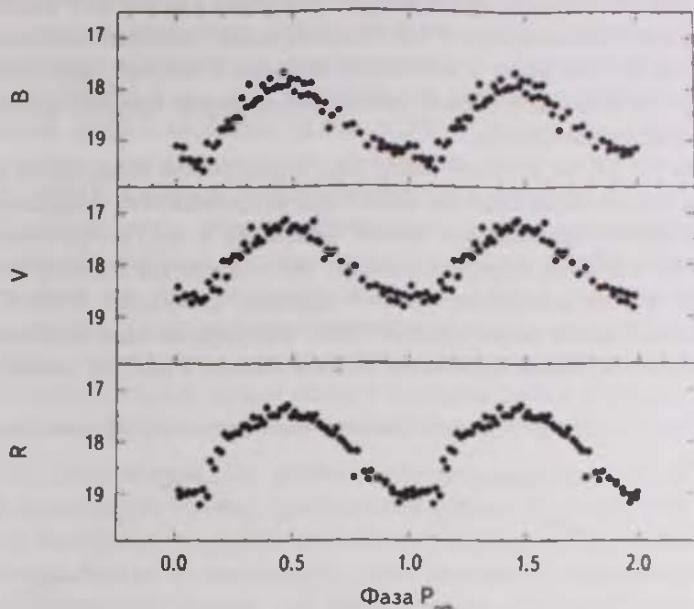


Рис.9. Фазовые кривые блеска поляра SDSS J2154 в системе $BVRc$.

На рис.10 приведены фазовая кривая в полосе V и зависимость показателей цвета $B - V$ и $V - Rc$ от фазы орбитального периода.

В полосе V активность поляра представлена односторонней кривой несимметричной формы, с плавным и продолжительным минимумом блеска. Показатели цвета не повторяют форму кривой блеска в полосе V . На фазе 0.1 орбитального периода показатель цвета $B - V$ (по усредненной кривой) показывает минимум (система красная), который совпадает с минимумом блеска на фазовой кривой в полосе V , а по отношению к показателю цвета $V - Rc$ приходится на его максимум (система голубая). Далее показатель цвета $B - V$ увеличивается и с небольшими колебаниями длится до конца орбитального цикла. Противоположная картина видна на графике изменения показателя цвета $V - Rc$ от фазы орбитального периода. За орбитальный цикл кривая изменения цвета $V - Rc$ показывает два горба, каждый из которых длится пол орбитального периода. Два острых минимума приходятся на подъем и на спад блеска в полосе V . Первый горб на кривой изменения цвета совпадает с максимальным блеском в полосе V . Этот горб имеет амплитуду $0^m.4$ и продолжительный плоский максимум. Максимум второго горба приходится на минимум блеска системы

в полосе V Амплитуда этого горба $0^m.7$. По изменениям показателей цвета $B-V$ и $V-R_c$ видно, что в минимуме блеска система становится более голубой во всех полосах, но несинхронно: максимум кривой $B-V$ наступает немного раньше, чем максимум $V-R_c$. Рассмотренные цветовые особенности указывают на то, что вклад в излучение системы в течение орбитального цикла вносит несколько источников, максимумы излучения которых приходятся на разные диапазоны спектра.

У полюра EF Eri, на который похож наш исследуемый полюр SDSS J2154 [5], вклад в общий блеск системы вносят два источника: это аккреционная колонна и горячая приполярная шапка. Бюерманн и др. [11] по смоделированному оптическому спектру показали, что температура горячей шапки, занимающая 6% на поверхности белого карлика, составляет 15000 К при температуре поверхности белого карлика 9500 К. Ультрафиолетовые исследования EF Eri в низком состоянии, описанные в статье Шкоди и др. [12], согласуются

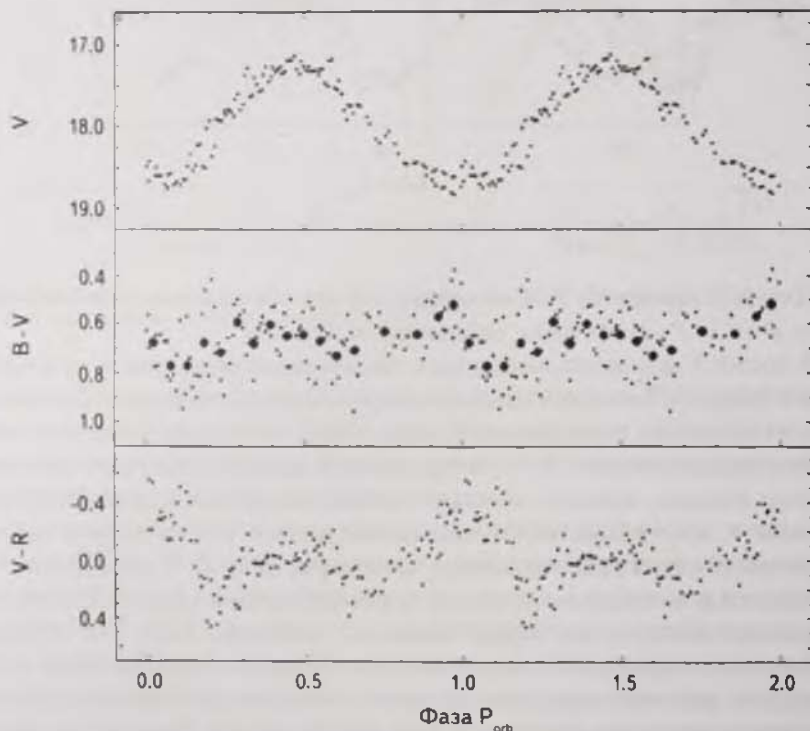


Рис.10. (Сверху вниз) Изменения блеска SDSS J2154 в V от фазы орбитального периода. Изменения показателей цвета полюра $B-V$ и $V-R_c$ от фаз орбитального периода. Черными кружками на средней панели показаны средние значения показателя цвета $B-V$.

с результатами, полученными при анализе оптического спектра, а общая площадь горячей шапки занимает около 22%, и наиболее нагретая часть полностью совпадает с основной аккреционной областью, которая у полярнов приходится на магнитные полюса. Эти результаты совпадают с расчетами Зеэмановской томографии в низком состоянии яркости системы EF Eri [13]. В статье Швоуп и др. [14], рассчитанные величины температуры горячей полярной шапки несколько выше, а УФ исследования показывают, что температура горячей шапки на поверхности белого карлика может быть 30000-70000 К в низком состоянии яркости у полярнов.

Исходя из этого, можно предположить, что у нашего полярна, помимо аккреционной колонны, которая вносит вклад в более красную область спектра, присутствует еще один источник излучения - горячая шапка на поверхности белого карлика. Ее центральная, более нагретая часть, совпадает с аккреционной областью, вносит вклад в максимум блеска системы, и является единственным источником, который вносит вклад в минимум блеска системы. Этот вывод согласуется с результатом, полученным Шкоди и др. [5].

3.5. Заключение. По фотометрическим наблюдениям полярна SDSS J2154 существенно уточнен орбитальный период $P_{orb} = 0.0672975 \pm 0.0000028$ суток и определена эфемерида для глубокого минимума. Мы показали характер изменения блеска и показателей цвета системы в течение орбитального цикла. Анализируя данные, мы предположили, что у исследуемого полярна SDSS J2154 вклад в изменения блеска системы в течение орбитального цикла вносят несколько источников, максимумы излучения которых приходятся на разные диапазоны спектра. Этот вывод согласуется с независимыми исследованиями других авторов.

Ю.В.Бабина выражает благодарность М.А.Андрееву за предоставленную возможность наблюдений в обсерватории Пик Терскол на 60-см телескопе.

ФГБУН "КрАО РАН", Научный, Республика Крым,
Россия, e-mail: juliaradyga@mail.ru

PHOTOMETRIC STUDY OF TWO MAGNETIC CATAclySMIC VARIABLES SDSS J215427+155713 AND SDSS J032855+052254

Ju.V.BABINA, E.P.PAVLENKO, O.I.ANTONYUK

We present first long photometric rows in integral light and in *BVRc* bands for two poorly studied polars, SDSS J032855+052254 and SDSS J215427+155713 (further SDSS J0328 and SDSS J2154), obtained at the Crimean astrophysical observatory and the Terskol observatory. We refine the orbital periods and present for the first time an orbital ephemerides. During our observations SDSS J0328 showed two pole accretion. Using color indexes of SDSS J2154 we we concluded that the brightness variation of the system during orbital cycles is due to the emission of several sources with radiation maxima located differently in the spectrum.

Key words: *accretion: polars: cataclysmic variables: SDSS J032855+052254; SDSS J215427+155713*

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.Warner*, Cataclysmic Variable Stars, Cambridge University Press, 1995.
2. *G.D.Schmidt, H.S.Stockman*, *Astrophys. J.*, **371**, 749, 1991.
3. *Е.П.Павленко, Я.Пельт*, *Астрофизика*, **34**, 169, 1991, (*Astrophysics*, **34**, 168, 1991).
4. *P.Szkody, A.Henden, L.Mannikko et al.*, *Astron. J.*, **134**, 185, 2007.
5. *P.Szkody, M.E.Everett, S.B.Howell et al.*, *Astron. J.*, **148**, 63, 2014.
6. *M.Andreev*, 17th European white dwarf workshop ASP Conf. Ser., **1273**, 317, 2010.
7. *J.Pelt*, Irregularity Spaced Data Analysis, User Manual - Helsinki, 1992.
8. *T.Kato*, vsnet-alert, 15803, 2013a.
9. *A.J.Drake, S.G.Djorgovski, A.A.Mahabal et al.*, *Bulletin of the American Astron. Soc.*, **41**, 669, 2009.
10. *P.J.Wheatley, G.Ramsay*, 13th North American Workshop on Cataclysmic Variables and Related Objects, eds. S.Howell, E.Kuulkers, C.Woodward, in ASP Conf. Ser., **137**, 521, 1998.
11. *K.Beuermann, P.Wheatley, G.Ramsay et al.*, *Astron. Astrophys.*, **354**, 49, 2000.
12. *P.Szkody, A.Mukadam, B.T.Gansicke et al.*, *Astrophys. J.*, **716**, 1531, 2010.
13. *K.Beuermann, F.Euchner, K.Reinsch et al.*, *Astron. Astrophys.*, **463**, 647, 2007.
14. *A.D.Schwope, A.Staude, D.Koester, J.Vogel*, *Astron. Astrophys.*, **469**, 1027, 2007.