

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДНЫХ ПЯТЕН НА ПОВЕРХНОСТИ КРАСНОГО КАРЛИКА V647 HER

© 2024 г. Н. И. Бондарь^{1,*}, К. А. Антонюк^{1,2}, Н. В. Пить¹, И. Ю. Алексеев¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, Россия

*E-mail: otbn@mail.ru

Поступила в редакцию 16.11.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята в печать 29.01.2024 г.

Представлен анализ фотометрических наблюдений звезды V647 Her (M3.5V), проведенных в 2022 г. на 1.25 м телескопе Крымской астрофизической обсерватории. Подтверждено присутствие малоамплитудной переменности блеска звезды с периодом 20.69 дней, обнаруженного по наблюдениям 2019 г., показано, что с понижением блеска звезда становится более красной. Наблюдаемый характер фотометрической переменности обусловлен присутствием холодных пятен на поверхности звезды и проявлением вращательной модуляции блеска с полной амплитудой не более $0^m.05$. Выполнено сравнение результатов фотометрии 2019 г., 2022 г. и 2004 г. По фазовым кривым определены зоны концентрации пятен в разные эпохи. Распределение пятен сохраняется в течение 40–100 дней. В рамках зональной модели получены оценки параметров пятен. Температура пятен 2700–2800 К, занимаемая ими площадь в 2004 г. составляла 15% от полной площади поверхности звезды, в 2019 г. и 2022 г. — возросла до 30%, различие между запятненностью полушарий вследствие сезонного перераспределения пятен составляет менее 2%.

Ключевые слова: звезды малых масс, красные карлики, магнитная активность звезд, фотометрия, V647 Her

DOI: 10.31857/S0004629924020068 **EDN:** KTBJQU

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда V647 Her является ярким компонентом ($V = 11^m.2$) астрометрической двойной системы G1 669 AB. Со второй звездой, V639 Her ($V = 12^m.93$), они образуют широкую пару, разделенную в проекции на $16.8''$ [1, 2], и исследуются как невзаимодействующие одиночные объекты. Обе звезды являются вспыхивающими красными карликами [3], однако по наблюдениям в разных областях спектра в проявлениях их активности отмечены различия [4], которые объясняются их внутренним строением. Теоретические расчеты [5] показали, что звезды с массами $M < 0.35 M_{\odot}$ являются полностью конвективными. Согласно массе и эффективной температуре, V647 Her (M3.5), имея развитую конвективную зону, еще сохраняет радиоактивное ядро, а V639 Her (M4.5) относится к полностью конвективным звездам. Условия для развития активности у таких звезд различны, различными будут и механизмы ее генерации. Подтверждения этому получены по наблюдениям этих звезд в радиодиапазоне [4]. Важным параметром, определяющим топологию магнитных полей и уровень звездной активности, является скорость осевого вращения звезды [6]. Периоды

вращения многих звезд определены по рядам спектральных и фотометрических наблюдений в оптическом диапазоне [7, 8]. Такие исследования для обеих звезд G1 669AB немногочисленны, а полученные результаты существенно различаются [4]. О быстром вращении звезды V647 Her с периодом 0.95 сут сообщалось в статье [9] по результатам анализа данных из каталога ASAS, однако позднее был принят период 20.14 сут [10]. Близкое значение (19.81 сут) получено по фотометрическим рядам из каталога SuperWASP [8]. По выборке V -величин из фотометрического каталога SuperWASP был заподозрен период вращения 1.09 сут [11]. Анализ фотометрических наблюдений, полученных в 2019 г. на 1.25-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории (КрАО), показал проявление вращательной модуляции блеска с периодом 20.69 дней и низкую вероятность изменений с периодом 1.098 дней [12]. В 2022 г. в КрАО был получен новый ряд ПЗС-наблюдений с целью уточнения характеристик переменности блеска звезды и их связи с процессами активности.

В этой работе приведены результаты анализа поведения блеска и цвета звезды V647 Her. Показано,

что наблюдаемая вращательная модуляция с периодом 20.69 дней обусловлена наличием холодных пятен. По фазовым кривым 2019 г., 2022 г. и 2004 г. (каталог SuperWASP) рассмотрено распределение пятен по поверхности звезды в разные эпохи. В рамках зональной модели получены оценки параметров пятен.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ V647 HER И ЗВЕЗД СРАВНЕНИЯ

Фотометрические наблюдения звезды были выполнены на 1.25-м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории с помощью ПЗС-фотометра в полосах BV(RI)_c системы Джонсона-Козинса. Использовалась ПЗС-камера GE-2048 VI (формат 2k×2k, размер пикселей 13.5×13.5 мкм, поле в кадре 9'.7×9'.7, масштаб изображения 0".57/пиксель при бинировании 2×2). На интервале с 5 июля по 15 ноября 2022 г. фотометрические данные получены для 48 дат. В даты наблюдений в каждом фильтре последовательно выполнялось не менее 5 записей, время экспозиции одного кадра в фильтрах BV(RI)_c составляло соответственно 60, 30, 10 и 5 с. В каждом фильтре результирующий массив наблюдений содержит по 609 кадров. Журнал наблюдений приведен в табл. 1. В сентябре и октябре для 7 дат, указанных в табл. 2, наблюдения выполнены

Таблица 1. Даты наблюдений V647 Her и звезд сравнения в 2022 г.

Интервал наблюдений	JD 2450000+	Число дат	Число измерений
05–30.07	9766.3374–9791.2662	11	60
12–30.08	9804.2904–9822.2588	9	45
01–28.09	9824.2524–9851.3133	12	307
01–29.10	9854.2067–9882.2262	11	162
01–15.11	9885.1606–9899.1566	5	35

Таблица 2. Данные о блеске контрольной звезды и V647 Her по результатам мониторинга в сентябре и октябре 2022 г.

Дата	JD 2459800+	TYC 2082-2142-1		V647 Her		Число измерений
		$\langle V \rangle_{\text{ch}}$	$\sigma(V_{\text{ch}})$	$\langle V \rangle$	$\sigma(V)$	
16.09	39.2179–39.3635	0.597	0.006	0.171	0.006	79
19.09	42.2399–42.3575	0.586	0.006	0.162	0.006	67
25.09	48.2207–48.3243	0.597	0.007	0.197	0.007	57
28.09	51.2099–51.3133	0.596	0.006	0.175	0.005	60
15.10	68.1771–68.2723	0.585	0.005	0.179	0.006	50
21.10	74.1730–74.2468	0.592	0.005	0.157	0.006	43
29.10	82.1770–82.2262	0.581	0.006	0.153	0.005	29

Примечание. Значения блеска приведены относительно звезды сравнения TYC 2082-2143-1.

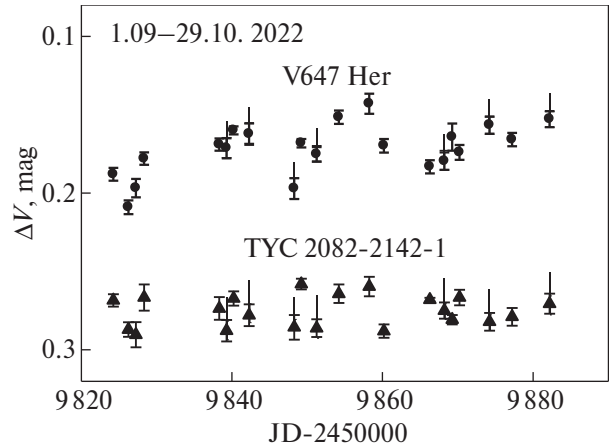


Рис. 1. Изменения средних значений блеска V647 Her в сентябре-октябре 2022 г. Значения блеска контрольной звезды (треугольники) приведены с нуль-пунктом, равным -0.31 , бары отмечают средние квадратические ошибки, черточки — даты мониторинга.

в режиме мониторинга длительностью 1–3.5 часа. При этом смена фильтра выполнялась после записи одного кадра, время экспозиций в соответствующих фильтрах сохранялось.

Обработка изображений выполнена программой MaximDL, в качестве звезд сравнения взяты близкие звезды TYC 2082-2143-1 ($V = 11^m.22$) и TYC 2082-2142-1 ($V = 11^m.99$) (SIMBAD database). Оценки блеска V647 Her и контрольной звезды TYC 2082-2142-1 получены в инструментальной системе, а также определены дифференциальные величины относительно звезды сравнения, что позволило исключить влияние атмосферной экстинкции и ошибочные измерения. По результатам мониторинга программной и контрольной звезды были построены кривые блеска, по которым у обеих звезд не выявлено регулярной переменности в течение ночи. Средние значения блеска звезд в течение ночи определены с точностью $0^m.006$ (табл. 2). На всем интервале наблюдений значения среднего блеска контрольной звезды

не выходят за пределы 2σ , средний уровень ее блеска оставался постоянным, равным $0^m.591 (\pm 0.007)$. У звезды V647 Her средний блеск меняется от ночи к ночи. На рис. 1 приведены кривые блеска для обеих звезд по наблюдениям в сентябре-октябре, значения $\langle v \rangle_{ch}$ смещены, $\Delta V_{ch} = \langle v \rangle_{ch} - 0^m.31$.

3. АНАЛИЗ БЛЕСКА И ЦВЕТА V647 HER

Поведение блеска V647 Her по результатам фотометрии в июле-ноябре 2022 г. представлено в инструментальных величинах на рис. 2а. После первичной обработки из ряда данных ($N = 609$) были исключены 8 значений, относящихся к вспышке (JD 2459789) и случайным отклонениям, и определены средние значения в даты наблюдений ($N = 47$). Для сравнения с результатами 2019 г., опубликованными в [12], получен ряд оценок блеска относительно блеска звезды сравнения (рис. 2б). Характер переменности блеска звезды в 2022 г. такой же, как в 2019 г., на обеих кривых блеска сохраняется уровень максимального блеска, но в отдельные эпохи максимальные и минимальные значения не достигаются.

В октябре-ноябре на интервале JD 2459854-2459899 максимальные значения блеска ниже мак-

симального уровня на $\sim 7\%$, а минимумы стали менее глубокими на $\sim 10-12\%$.

Наибольшие изменения блеска ΔV составили $0^m.066$, что незначительно отличается от этих значений в 2019 г., где $\Delta V = 0^m.07$. Средний уровень блеска сохраняется равным $0^m.171 (\sigma = 0.016)$.

По ряду ΔV -величин 2019 г. методами Юркевича, Скаргля и Хартли у звезды была выявлена переменность с периодом 20.69 (0.07) сут [12]. Эти же методы были применены для анализа кривой блеска 2022 г. Результаты поиска периодов в интервале значений от 1 до 40 дней подтвердили полученное значение фотометрического периода. На рис. 3а показана кривая блеска 2022 г. и присутствие периодической переменности, представленное синусоидой с периодом 20.69 сут (рис. 3б). На вставке приведена периодограмма, полученная методом Ломба-Скаргля, с высоким пиком на частоте, соответствующей этому периоду, линии показывают уровни значимости FAP (0.3, 0.05 и 0.01), соответствующие 1σ , 2σ и 3σ . Свертка всех данных была выполнена с фотометрическими элементами $HJD = 2453128.5102 + 20.69 \times E$, принятыми в [12]. Учитывая, что амплитуда переменности в октябре-ноябре уменьшилась, мы построили фазовые кривые

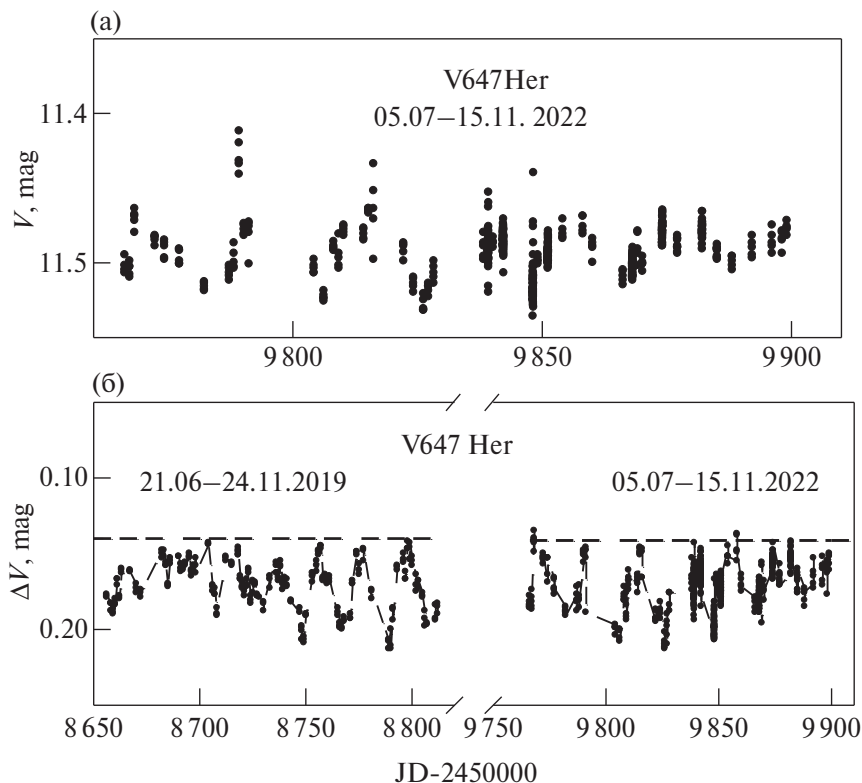


Рис. 2. Поведение блеска V647 Her по наблюдениям 2019 и 2022 гг. (а) результаты наблюдений 2022 г., (б) ряды ΔV -величин после первичной обработки данных 2019 г. и 2022 г., ΔV определены относительно звезды сравнения ГYC 2082-2143-1, пунктирной линией отмечен максимальный уровень блеска.

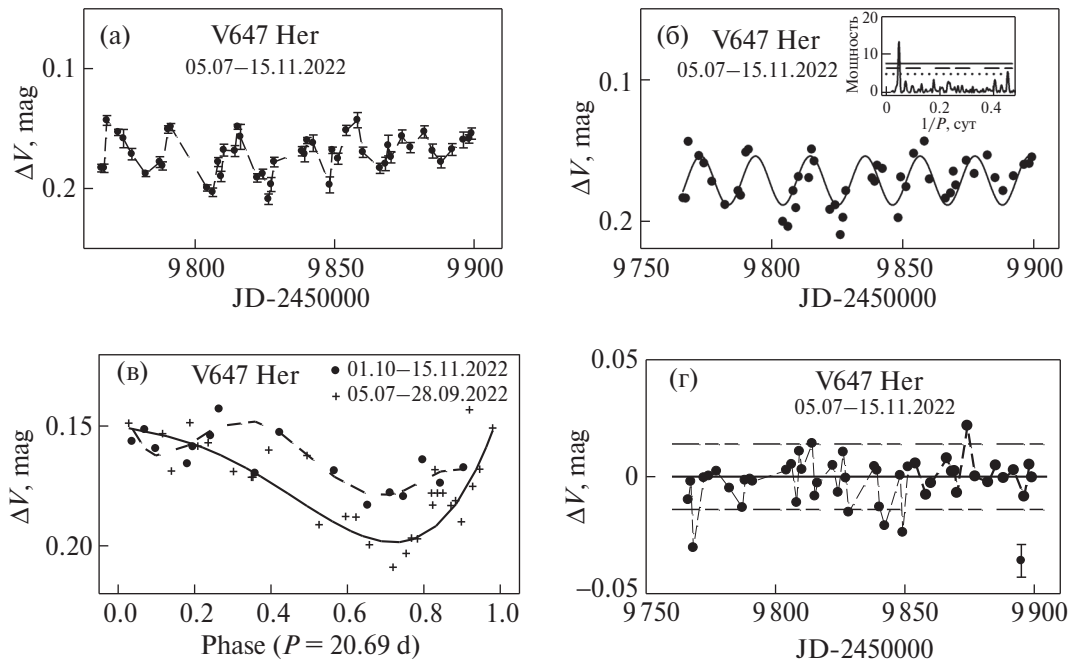


Рис. 3. Изменения блеска V647 Her с периодом 20.69 дней. (а) кривая блеска по наблюдениям 2022 г. и ошибки усредненных в дату наблюдения ΔV -величин; (б) изменения блеска V647 Her с периодом 20.69 сут, на вкладке — период 20.69 сут по результатам частотного анализа методом Ломба-Скаргля; (в) свертки данных на интервалах 05.07–28.09 (крестики) и 1.10–15.11 (зачерненные кружки), линиями приведены аппроксимирующие полиномы; (г) ряд остатков после вычитания вклада переменности с $P = 20.69$ сут и средняя квадратическая ошибка (ско) остаточных значений, пунктирами отмечены уровни $\pm 2\sigma$.

для этого интервала и для данных, полученных в июле-сентябре. Аппроксимации этих кривых полиномами 4-й и 5-й степени представлены на рис. 3в.

Видно, что в октябре-ноябре произошли не только изменения амплитуды переменности, но и формы фазовой кривой, на которой стал проявляться еще один минимум. Данные ряда остатков, полученные после вычитания переменности с периодом 20.69 сут, не показывают значимых изменений, превышающих уровень 2σ (рис. 3г). Дальнейший анализ ряда остатков не проводился.

Наблюдаемые особенности переменности блеска V647 Her — малая амплитуда, изменение формы кривой — являются характерными для красных карликов, на поверхности которых присутствуют холодные пятна. Наличие таких пятен приводит к покраснению звезды, что хорошо заметно по показателям цвета в красной области спектра. На рис. 4а приведены изменения блеска и показатели цвета $V-I$ по наблюдениям V647 Her в 2022 г. Показатели цвета меняются в пределах 2.7–2.75, при этом в минимумах блеска звезда становится более красной. Свертка значений $V-I$ с периодом 20.69 сут показана на рис. 4б. Амплитуда переменности составляет $\sim 0^m.04$, фаза минимума 0.70. После вычитания вклада переменности с периодом 20.69 сут получен

ряд остатков, в котором не выявлено изменений, превышающих 2σ (рис. 4в).

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЯТЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ЗВЕЗДЫ И ОЦЕНКИ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Изменения блеска и цвета V647 Her по крымским наблюдениям 2019 г. и 2022 г. и по данным 2004 г. из каталога SuperWASP происходят с периодом 20.69 сут, что позволяет считать это значение периодом вращения звезды. Фазовые кривые, построенные с этим периодом, представляют характеристики вращательной модуляции, которая наблюдается при неоднородном распределении пятен на поверхности звезды. Форма фазовой кривой, амплитуда и фаза минимума меняются, оставаясь стабильными в течение 40–100 дней (рис. 3в, рис. 5). Согласно фазам минимума, можно выделить два типа фазовых кривых: с одним минимумом, когда вращательная модуляция обусловлена появлением области повышенной концентрации пятен на одном из полушарий, и двумя минимумами, как было в октябре-ноябре 2022 г., когда такие области наблюдались на обеих полушариях. В табл. 3 приведены данные об амплитудах и фазах минимума на указанных интервалах.

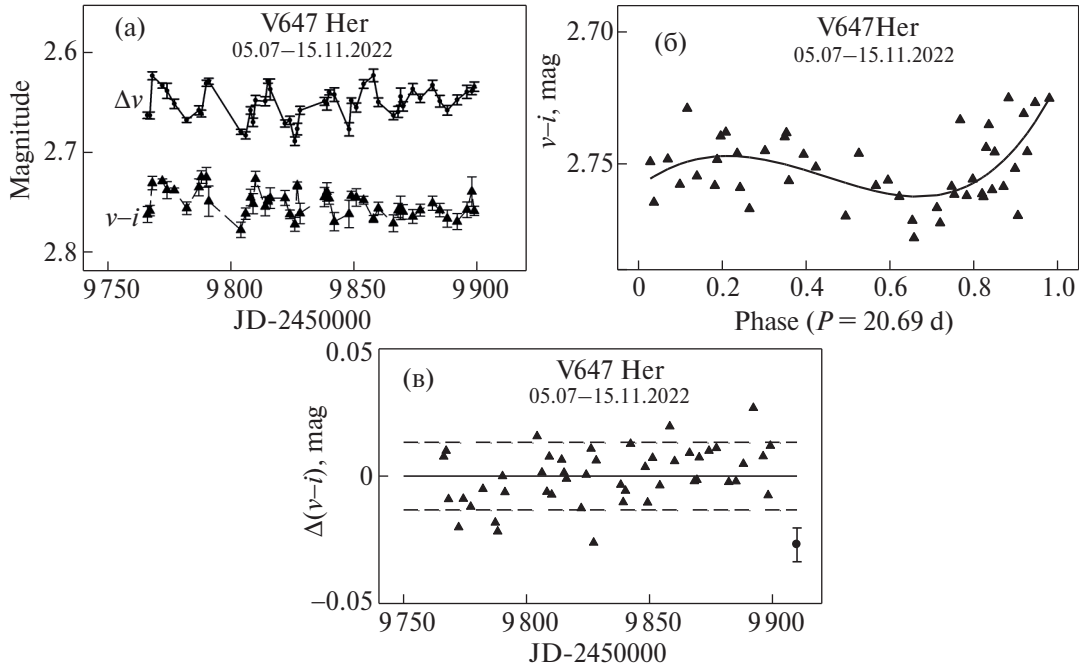


Рис. 4. Изменения показателя цвета $V-I$ с периодом 20.69 дней. (а) изменения блеска и показателя цвета $V-I$ и соответствующие ско; (б) фазовая кривая — свертка данных $V-I$ с периодом 20.69 сут и аппроксимирующий полином 4-го порядка (сплошная линия); (в) ряд остатков $\Delta(V-I)$ после учета периодичности 20.69 сут, значение σ и уровни $\pm 2\sigma$ (пунктирные линии).

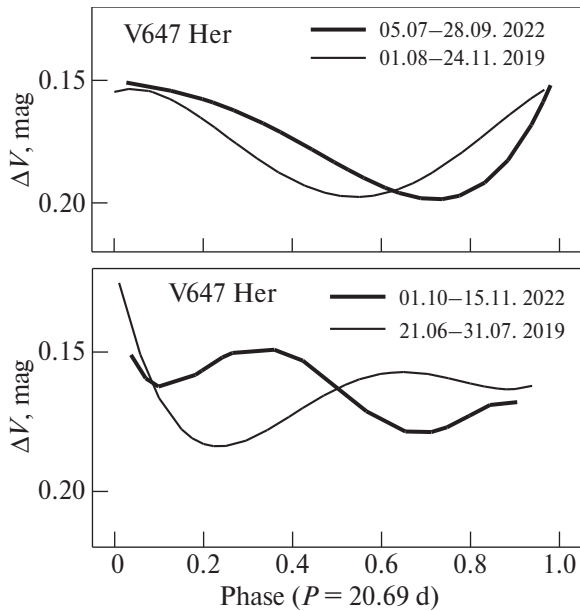


Рис. 5. Проявления вращательной модуляции блеска в 2019 г. и 2022 г. Фазовые кривые (представлены полиномами) показывают изменения амплитуды и фазы минимумов в 2019 г. (тонкая линия) и в 2022 г. (жирная линия).

Характеристики вращательной модуляции меняются как на короткой временной шкале, так и на более длинной, выраженной в годах. Максимальная амплитуда модуляции в 2019 г. и 2022 г. возросла по сравнению с 2004 г. на 30%. Сезонные изменения

Таблица 3. Характеристики вращательной модуляции блеска V647 Her в разные эпохи ($P_{\text{rot}} = 20.69$ сут).

Год	Интервал наблюдений	Фаза минимума	Амплитуда A_{mod}
2004	24.05–23.07	0.43	0.03
	15.08–24.09	0.17	0.026
2019	21.06–31.07	0.22	0.027
	01.08–24.11	0.55	0.044
2022	05.07–28.09	0.72	0.046
	01.10–15.11	0.66	0.028
	01.10–15.11	0.09	0.015

амплитуды и фазы минимумов обусловлены эволюцией пятен и их поверхностным распределением, изменения на более длинной шкале свидетельствуют об изменениях интенсивности процессов пятнообразования.

Для оценки параметров пятен в рамках зональной модели необходимы следующие фотометрические данные: значение максимального блеска и его изменений в эпоху наблюдений и значения показателей цвета $B-V$, $V-R$, $V-I$ [13]. На ограниченном временном интервале мы можем наблюдать некоторый максимальный уровень блеска, соответствующий минимальной запятненности звезды в данную эпоху, но блеск в отсутствии пятен (V_{max}) определя-

ется по долговременным наблюдениям среднего годового блеска. Для V647 Her была построена компилированная кривая блеска по данным с 1939 г. по 2018 г., из которой следует, что $V_{\max} = 11^m.1(\pm 0.1)$ [14]. С этим значением максимального блеска и необходимыми входными параметрами, принимая эффективную температуру фотосферы при отсутствии пятен $T_{\text{eff}} = 3300$ К [15], мы получили следующие оценки: площадь, занимаемая пятнами в 2004 г., составляла $\sim 15\%$ от полной площади поверхности звезды, а в 2019 г. и 2022 г. возросла до 30%, температура пятен 2700–2800 К. Согласно малоамплитудным сезонным вариациям блеска, различие между максимальными и минимальными значениями площади, покрытой пятнами, составляют 1–2%. Детальные расчеты параметров пятен готовятся к опубликованию.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотометрические исследования М-карлика V647 Her, выполненные нами по результатам ПЗС-наблюдений в 2019 г. и 2022 г. в КрАО, показали присутствие малоамплитудной переменности блеска с периодом 20.69 сут. Фаза минимума и амплитуда переменности сохраняются на интервале 40–100 дней. Изменения показателей цвета $V-I$ происходят с этим же периодом, в минимуме блеска звезда становится более красной. Такой характер переменности указывает на присутствие холодных пятен на поверхности звезды и их неравномерное распределение, что приводит к модуляции блеска с периодом вращения. Вращательная модуляция происходит при сохранении максимального уровня блеска в годы наблюдений, амплитуда вращательной модуляции не превышает $0^m.05$. Согласно фазовым кривым, зоны повышенной запятненности обычно обнаруживаются только на одном из полушарий — в одни эпохи — на фазах 0.6–0.7, в другие — на фазах 0.1–0.2, но в октябре–ноябре 2022 г. концентрация пятен наблюдалась в указанных фазах на обоих полушариях. В 2004 г. (каталог SuperWASP) более запятненным оставалось одно из полушарий с локализацией пятен на фазах 0.43 и 0.17.

По данным из публикаций и фотометрических каталогов мы приняли значение максимального блеска звезды равным $V_{\max} = 11^m.1$ и в рамках зональной модели выполнили расчеты площади и температуры пятен. В 2004 г. пятна занимали 15%, а в 2019 г. и 2022 г. — до 30% полной площади поверхности звезды, температура пятен 2700–2800 К при температуре спокойной фотосферы 3300 К. Се-

зонные различия в распределении пятен приводят к изменению запятненности полусфер звезды на 1–2%. Изменения среднего годового блеска на шкале в несколько лет указывает на изменение интенсивности процессов пятнообразования, что заметно, если сравнить площадь запятнения в 2004 г. и в современную эпоху.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента за полезные комментарии и рекомендации, а также коллективы, обеспечивающие использование ресурсов астрономической базы данных SIMBAD в Страсбурге, Франция, The International Variable Star Index (AAVSO) и каталога SuperWASP, Чехия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *E.W. Weis*, *Astron. J.* **101**, 1882 (1991).
2. *N. Samus, O. V. Durlevich, et al.*, *VizieR Online Data Catalog*: II/ 250 (2004).
3. *N.I. Shakchovskaya, W. Sofina*, *Inf. Bull. Var. Stars*, No.730 (1972).
4. *L.H. Quiroga-Nuñez, H.T. Intema, J.R. Callingham, J. Villadsen, H.J. van Langevelde, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **633**, id. A130 (2020).
5. *G. Chabrier, and I. Baraffe*, *Astron. and Astrophys.* **327**, 1039 (1997).
6. *J. Morin, J.-F. Donati, P. Petit, X. Delfosse, T. Forveille, and M.M. Jardine*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **407**, 2269 (2010).
7. *S.L. Baliunas, A.H. Vaughan, L. Hartmann, F. Middelkoop, D. Mihalas, et al.*, *Astrophys. J.* **275**, 752 (1983).
8. *A. J. Norton, P. J. Wheatley, R. G. West, C. A. Haswell, R. A. Street, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **467**, 785 (2007).
9. *M. Kiraga, and K. Stepień*, *Acta Astron.* **57**, 149 (2007).
10. *M. Kiraga*, *Acta Astron.* **62**, 67 (2012).
11. *N.I. Bondar', M.M. Katsova, and M.A. Livshits*, *Geomagnetism and Aeronomy* **59** (7), 832 (2019).
12. *N.I. Bondar, K.A. Antonyuk, and N.V. Pit*, *Astrophysics* **65** (4), 4833 (2022).
13. *I.Y. Alekseev, and R.E. Gershberg*, *Astron. Zhurn.* **73** (4), 589 (1996).
14. *N.I. Bondar*, *Astron. and Astrophys. Trans.* **31**(3), 295 (2019).
15. *P.J. Amado, C.J. Butler, and P.B. Byrne*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **310**, 1023 (1999).

DISTRIBUTION OF COOL STARSPOTS ON THE SURFACE OF THE RED DWARF V647 HER

N. I. Bondar^{a,*}, K. A. Antonyuk^{a,b}, N. V. Pit^a, I. Yu. Alekseev^a

^a*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Russia*

^b*Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia*

Photometric observations of the star V647 Her (M3.5V) obtained in 2022 at the 1.25 m telescope of the Crimean Astrophysical Observatory are analyzed. The presence of a low-amplitude variability in brightness of the star with a period of 20.69 d, found from observations in 2019, is confirmed; it is shown that as the brightness decreases, the star becomes redder. The observed nature of photometric variability is due to the presence of cool spots on the surface of the star and manifestation of rotational brightness modulation with a full amplitude of no more than 0^m.05. We have performed a comparison of the photometric results obtained in 2019, 2022 and 2004. The zones of starspot concentrations in different epochs were determined from the analysis of phase curves. The distribution of spots has been maintained for 40–100 days. Starspot parameters were estimated in the framework of the zonal model. The temperature of the spots is 2700–2800 K. The area they occupied in 2004 is 15% of the total surface area of the star. According to the 2019 and 2022 data, it increases to 30%. The difference between the spottedness of the hemispheres caused by their seasonal redistribution is less than 2%.

Keywords: low-mass stars, red dwarfs, magnetic activity of stars, photometry, V647 Her