

DOI: 10.54503/0571-7132-2024.67.4-459

ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ КАРЛИКА СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА dM4e GJ 1243

Е.С.ДМИТРИЕНКО¹, И.С.САВАНОВ²

Поступила 29 июля 2024

Принята к печати 6 декабря 2024

Карлик спектрального класса dM4e GJ 1243 (KIC 9726699) является предметом многочисленных исследований, связанных с изучением его уникальной вспышечной активности и эволюции пятен на его поверхности. В статье представлены результаты анализа проявлений долговременной активности, найденные по архивным данным фотометрических наблюдений. Установлено, что данные, полученные независимо в трех обзорах в различных фотометрических фильтрах, указывают на долговременную переменность блеска GJ 1243 с четырьмя характерными величинами длительности циклов (мы будем их нумеровать от 1 до 4), группирующимися около значений P_{cyc1} (1 - 3): 1.5 лет, 2.6 года и 6.3 года, соответственно, а также около P_{cyc1} (4) порядка 12.3 - 12.6 лет. Выполнен анализ положения данных GJ 1243 на диаграмме зависимости $P_{\text{cyc1}}/Prot$ от $1/Prot$ в логарифмических координатах и проведено сопоставление с результатами исследований других М-карликов, что привело к выводу о единой общей зависимости для коротких циклов у всех рассматриваемых объектов.

Ключевые слова: *звезды: пятна: фотометрия: переменность: циклы активности*

1. Введение. В настоящем исследовании [1] мы выполнили анализ данных наблюдений полностью конвективного карлика спектрального класса dM4e GJ 1243 (KIC 9726699), полученных с космическим телескопом Кеплер. В [1] были рассмотрены только два сета наблюдений звезды, доступные в то время из архива космического телескопа Кеплер. В дальнейшем GJ 1243 стал предметом многочисленных исследований, связанных прежде всего с изучением его уникальной вспышечной активности, а также эволюции пятен на его поверхности (см. [2], цикл из публикаций Давенпорта и др. - ссылки в [3-6]).

Основные данные о GJ 1243 содержатся в цитируемых выше литературных источниках. Блеск звезды составляет 12.83 зв. вел. в фильтре V и 7.79 зв. вел. в фильтре K. Масса GJ 1243 равна 0.24 массы Солнца, а радиус - 0.26 радиуса Солнца. Период осевого вращения звезды $Prot$ составляет 0.593 сут. Результаты детального анализа вспышечной активности GJ 1243 по наблюдениям космического телескопа Кеплер и миссии TESS можно найти в [3-6]. Звезда GJ 1243 является близко расположенным к нам dM4e карликом, расстояние до него составляет 13.48 ± 0.42 пк. Звезда обладает сильной эмиссионной линией $H\alpha$ (величина эквивалентной ширины линии более $1 \text{ \AA}$), ее

возраст составляет около 30-50 млн лет.

Результаты нашего детального анализа пятенной активности, представленные в [2], были основаны примерно на 49500 единичных измерениях блеска GJ 1243 в интервале наблюдений в 1460 сут. Периодичность изменений кривой блеска звезды составляет $P_{\text{phot}} = 0.59261 \pm 0.00060$ сут, что полностью совпадает с ранее полученным нами результатом и оценками других авторов (см. [4]). Весь наблюдательный материал был разделен на 1775 сетов, каждый из которых последовательно охватывает один период вращения звезды. Для каждого сета наблюдений космического телескопа Кеплер из решения обратной задачи восстановления температурных неоднородностей звезды были получены карты поверхностных температурных неоднородностей (факторы заполнения f) и определены положения активных областей. Анализ построенных карт привел нас к выводу о значительной эволюции положения пятен на поверхности звезды в течение анализируемого нами длительного промежутка времени. Мы выполнили оценки параметра дифференциального вращения $\Delta\Omega$ и установили, что максимальное значение нижней границы оценки его величины равно 0.0022 рад/сут. Наша более точная оценка параметра $\Delta\Omega$ меньше величин, приводимых в [3,4] (0.0058 и 0.0036 рад/сут) и вероятно связана с более точным учетом изменений положений наиболее активной долготы. Однако, полученная в [3] оценка параметра дифференциального вращения методом, использующим описание эволюции пятен двумерными Гауссовыми функциями, практически совпадает с нашей. Вопрос о присутствии у звезды полярного или приполярного пятна (области) (см. [2,5]) остается актуальным, поскольку анализ фотометрических данных не исключает его наличия, как не проявляющегося при вращательной модуляции звезды. При угле наклона оси вращения порядка 30° к лучу зрения приполярная область GJ 1243 вплоть до широт 30° видна постоянно и вносит лишь малый вклад в переменность блеска в течение одного оборота звезды вокруг оси, наибольший вклад в ее фотометрическую переменность, достигающую 0.02 зв. вел., должны вносить пятна, расположенные в зоне от -30° до 30° широты. Величина S отношения площади полной запятненной поверхности звезды к площади ее видимой поверхности за период наблюдений изменялась в пределах от 7% до 2%, с возможным характерным временем порядка 1000 сут. В [2] нами было показано, что в целом для GJ 1243 положение на диаграммах запятненность - возраст, запятненность - период вращения и запятненность - число Россби хорошо соответствует общему характеру зависимости для ранее исследованных нами карликов спектрального класса M.

Несмотря на высокую востребованность сведений о циклах активности GJ 1243 (см. обсуждение в [5]), информация о них в литературе отсутствует. В настоящей статье будут представлены результаты анализа проявлений

долговременной активности этого объекта, найденные по архивным данным фотометрических наблюдений.

2. Циклы активности. Наше исследование циклов активности звезды GJ 1243 было начато с данных отсканированных фотопластинок проекта Digital Access to a Sky Century@Harvard (DASCH) [7], которые предоставляют широкие возможности анализа долговременной активности звезды на продолжительном временном интервале. Имеющиеся в архиве данные для GJ 1243 охватывают интервал наблюдений длительностью в 94 года (с 1894.6 по 1988.7гг.) (рис.1). Всего нами было рассмотрено 222 измерения блеска звезды в системе, близкой к фотометрической в фильтре В. К сожалению, данные достаточно немногочисленны, кроме того, имеется пробел в данных в интервале с 1952 по 1967гг. Тем не менее, можно предположить, что блеск звезды характеризуется долговременной переменностью, а после пробела в данных, начиная с 1967г. - небольшим поярчением. На основе построенного спектра мощности для блеска GJ 1243 можно предположить существование длительного цикла активности $P_{\text{сул}}$ порядка 4500 сут (рис.1, нижняя диаграмма). На этом рисунке вертикальной линией (светлой) также отмечен пик, соответствующий годовичному периоду.

Еще одна попытка проведения анализа переменности блеска GJ 1243 была выполнена нами по данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field

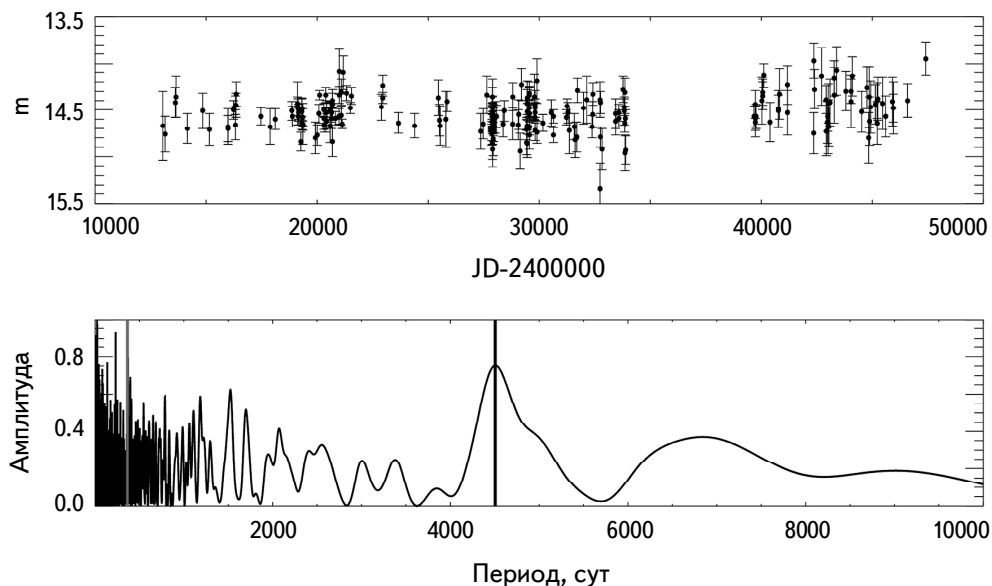


Рис.1. Вверху - кривая блеска GJ 1243 в фильтре В по данным проекта DASCH с 1894.60 по 1988.68гг. Внизу - спектр мощности для диапазона периодов 1-10000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 365 сут (1 год) (светлая) и 4500 сут (12.3 года) (темная) (см. текст).

Survey (KWS) [8] (<http://kws.cetus-net.org>). В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и Ic, они охватывают длительный интервал наблюдений с 2012г. по настоящее время (июль 2024г.), общей продолжительностью (4371 сут, 12 лет) (HJD 2456127-2460498).

Всего было рассмотрено 474 оценки блеска звезды в фильтре V. Представленные на рис.2 (верхняя диаграмма) данные свидетельствуют о присутствии возможной цикличности в изменении ее блеска. На основе построенного спектра мощности для блеска GJ 1243 можно предположить существование возможных циклов активности около 600 сут и 955 сут (вероятно, более значимого) (рис.2, нижняя диаграмма). Светлая линия на графике соответствует 365 сут сезонной переменности, присутствующей в данных. К сожалению, продолжительность наблюдений не позволяет делать заключение о наличии переменности на шкале времени порядка 4500 сут, найденной по данным проекта DASCH.

Более многочисленными являются данные о блеске объекта в фильтре Ic. В этом фильтре имеется всего 776 оценок блеска звезды. Представленные на

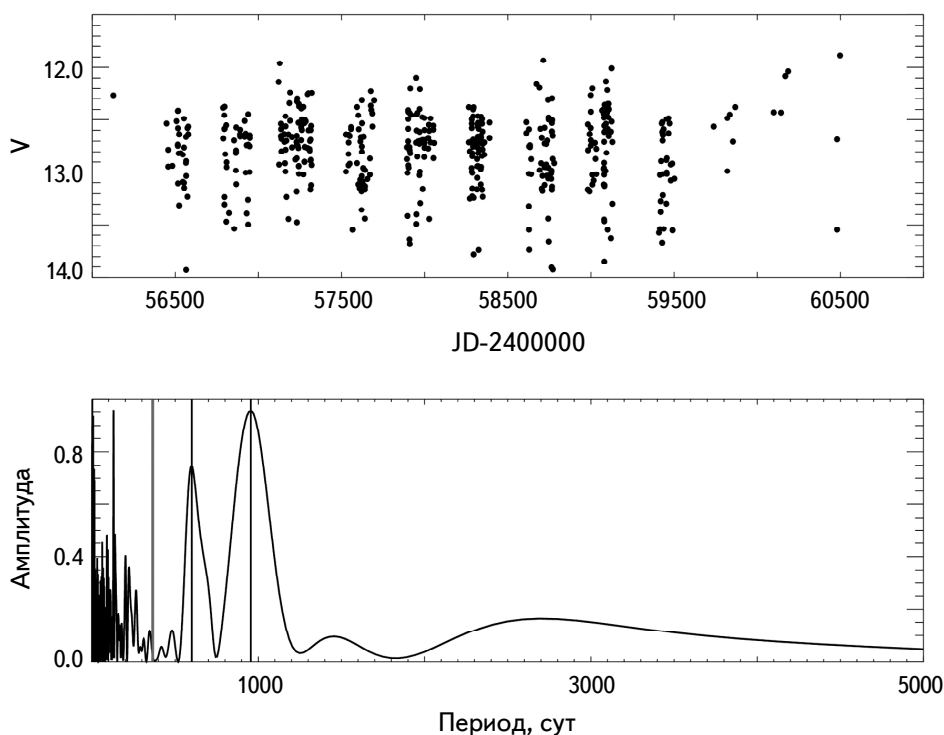


Рис.2. Вверху - блеск GJ 1243 в фильтре V по данным обзора; внизу - спектр мощности для интервала 1 - 5000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 365 сут (светлая) и 600 сут и 955 сут (темные) (см. текст).

рис.3 (верхняя диаграмма), данные, несомненно, свидетельствуют о присутствии изменения ее блеска в рассматриваемом интервале времени. Можно предположить наличие возможных циклов активности около 1100сут и 2200 сут (возможно, кратные циклы). Из рис.2 и 3 следует, что общим свойством переменности блеска звезды является возможная цикличность с характерным временем порядка 1000сут, присутствующая в данных фильтров V и Ic.

Наконец, для GJ 1243 имеются 1129 измерений блеска в фильтрах V и g в архиве проекта ASAS-SN SkyPatrol (ID: 111670491484) [9]. Наблюдения выполнялись в интервале времени HJD 2456694-2460501, их длительность составляет 3807сут. Наиболее многочисленными оказались наблюдения в фильтре g - 769 измерений (рис.4). Величины возможных циклов активности равны 720сут и 2470сут. Кроме того, в [9] представлены данные о блеске GJ 1243 в фильтре V - 360 измерений (рис.5), которые с меньшей достоверностью указывают на величины Pсусл в 530сут и 950сут. И в том и в другом случаях имеются указания на возможные долговременные циклы, сопоставимые по величине с длительностью интервала наблюдений или превосходящие его.

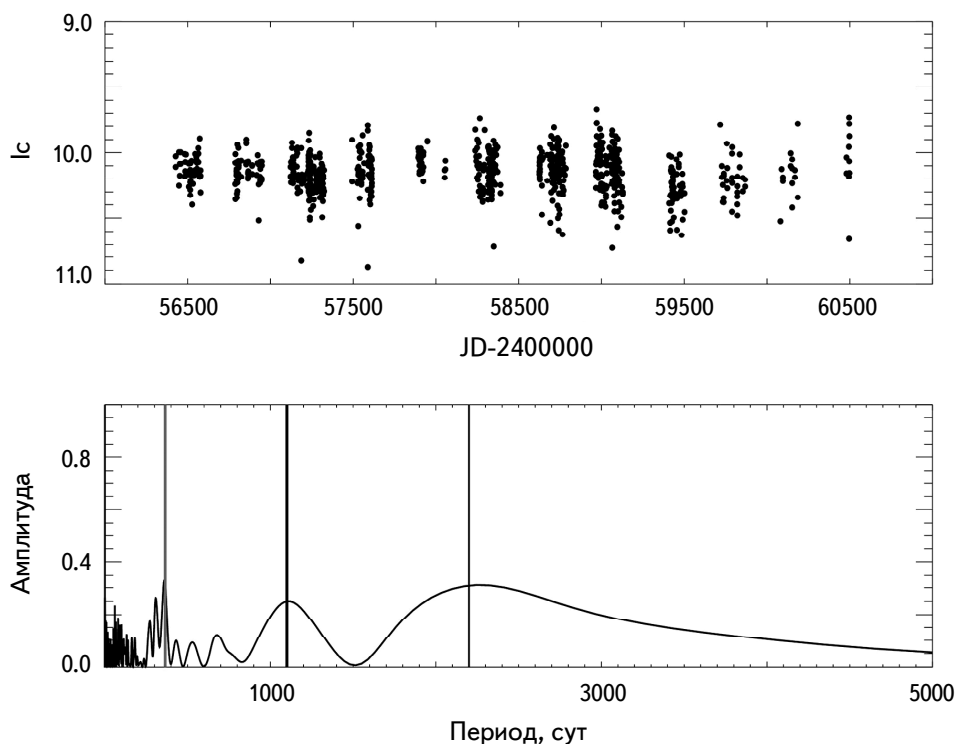


Рис.3. Вверху - блеск GJ 1243 в фильтре Ic по данным обзора KWS; внизу - спектр мощности для интервала 1 - 5000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 365 сут (светлая) и 1100 сут и 2200 сут (темные) (см. текст).

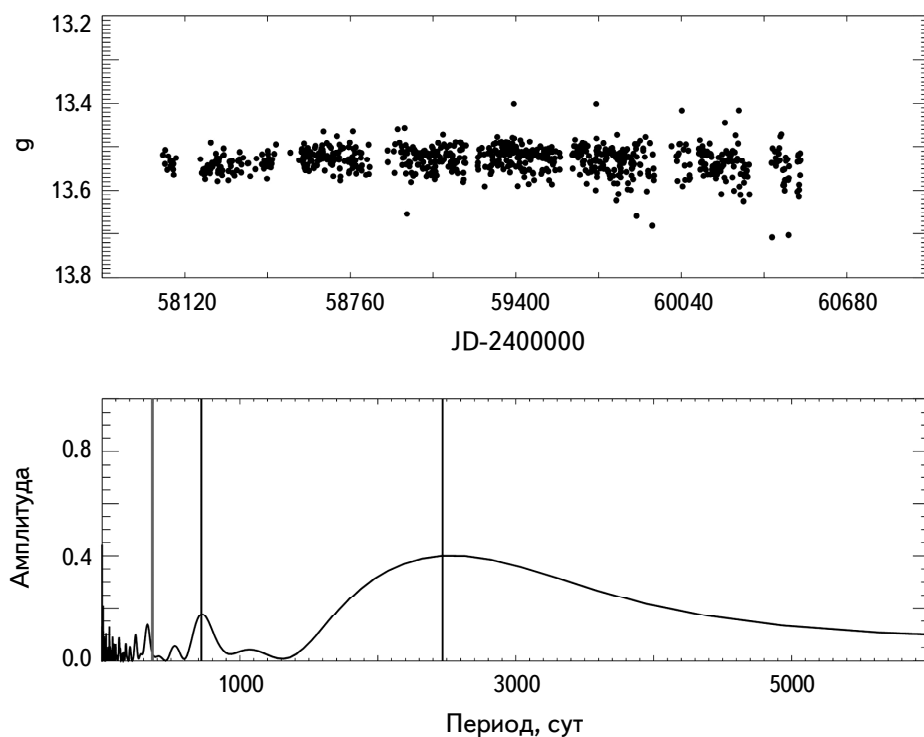


Рис.4. Вверху - блеск GJ 1243 в фильтре g по данным обзора ASAS-SN; внизу - спектр мощности для интервала 1 - 6000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 365 сут (светлая) и 720 сут и 2470 сут (темные) (см. текст).

Таблица 1

Архив данных	Фильтр	Рсycl
DASCH	B	4500 сут
KWS	V	600 сут и 955 сут
KWS	Ic	1100 сут и 2200 сут
ASAS-SN	g	720 сут и 2470 сут
ASAS-SN	V	530 сут и 950 сут

В табл.1 собраны найденные нами оценки величин $P_{\text{сycl}}$ для GJ 1243.

3. *Заключение.* В статье представлены результаты анализа проявлений активности карлика спектрального класса dM4e GJ 1243. Из рис.1-5 и табл.1 можно заключить, что данные, полученные независимо в трех обзорах в различных фотометрических фильтрах, указывают на долговременную переменность блеска GJ 1243 с четырьмя характерными величинами циклов (от 1 до 4), группирующимися около значений $P_{\text{сycl}}$ (1-3): 1.5 лет (1.4-1.6 года),

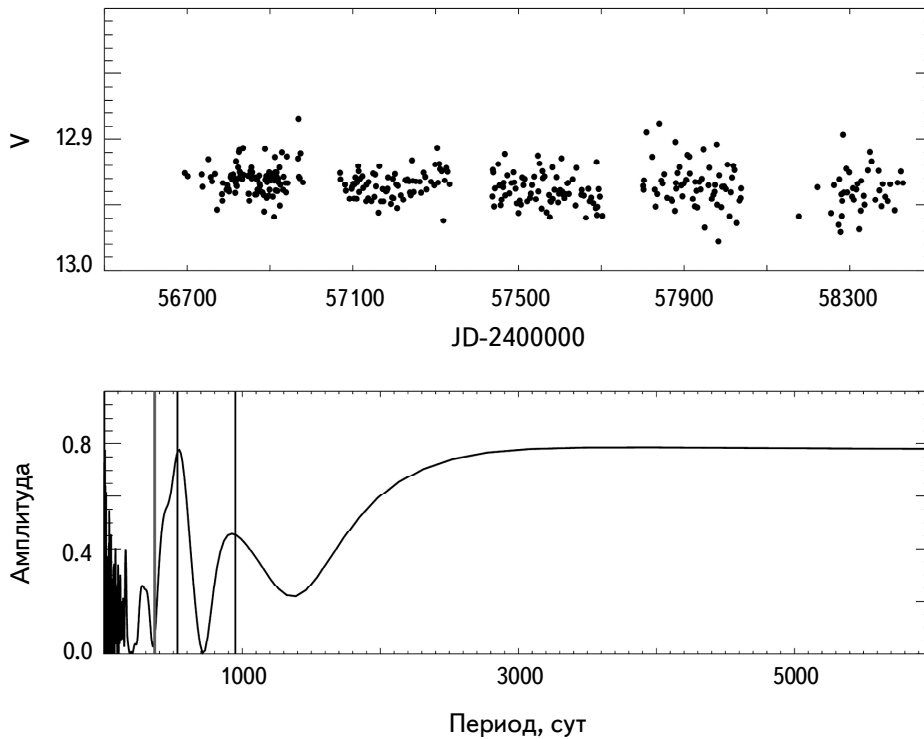


Рис.5. Вверху - блеск GJ 1243 в фильтре V по данным обзора ASAS-SN; внизу - спектр мощности для интервала 1 - 6000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 365 сут (светлая) и 530 сут и 950 сут (темные) (см. текст).

2.6 года (2-3 года) и 6.3 года (6-6.7 года), а также около P_{cycl} (4) порядка 4500-4600 сут (12.3-12.6 лет).

Ранее в [10] мы выполнили определение циклов активности наиболее холодных карликов спектрального класса M на основе фотометрических данных из обзора ASAS и установили, что большинство из изученных звезд обладают периодичностью изменений кривых блеска на интервалах времени сотни суток - годы. Анализ диаграмм, представленных в виде зависимости $P_{\text{cycl}}/Prot$ от $1/Prot$ в логарифмических координатах, привел к выводу о единой общей зависимости для всех рассматриваемых объектов, как с конвективной оболочкой, так и полностью конвективных. Анализ данных позволил заключить, что величина i - коэффициента наклона на рассматриваемой диаграмме близка к единице, как по всем данным, так и по самым коротким или длинным циклам. Установленное значение i отличается от значений, приведенных в литературных источниках для звезд других спектральных классов. В итоге был сделан вывод о том, что, вероятно, рассматриваемые карлики спектрального класса M образуют еще одну "ветвь" маломассивных

звезд, обладающих более случайной и иррегулярной магнитной активностью на своей поверхности (см. также обсуждения в [8]).

Для GJ 1243 величина $\log(1/Prot)$ составляет 0.2269. Согласно рис.3 из [10], соответствующие ей величины $\log(P_{cycl}/Prot)$ для М-карликов обзора [10] лежат в диапазоне от 2.7 до 3.2 (штрихпунктирные линии). Очевидно, что величины $\log(P_{cycl}/Prot)$ у наиболее коротких циклов 1 и 2 лежат в этом интервале и согласуются с данными о коротких периодах для других М-карликов из [10], в то время как в случае цикла 3 величина $\log(P_{cycl}/Prot) = 3.59$ и находится вне его (аналогичное поведение может быть отмечено и для ряда других М-карликов из [10]). Для цикла 4 соответствующее значение $\log(P_{cycl}/Prot) = 3.88$ - существенно больше полученных в [10] величин, однако следует отметить, что в [10] нами рассматривались только сравнительно короткие циклы (сопоставимые с длительностью наблюдений из архива обзора ASAS).

Кроме того, как и в [11], можно предположить, что наличие P_{cycl} 3 и 4 в области длительных циклов (вплоть до 10 лет) указывает на присутствие структурированности временных проявлений активности (см. рис.2 в [10] и пунктирные линии на нем). Для Солнца возможным аналогом структурированности являются циклы активности Ригера, Швабе, Хейла, Глейсберга, де Врис и Холлштатта [12].

Подавляющее большинство из исследованных нами в [10] М-карликов имеют массу более $0.35 M_{\odot}$ (граница перехода к полностью конвективным М звездам). В [10] были исследованы всего лишь две полностью конвективные звезды - GJ 551 и GJ 729. Периоды вращения этих звезд существенно различаются - GJ 551 имеет максимальное значение $Prot$ для выборки [10] (82.53 сут), период вращения второго карлика составляет 2.869 сут. И в том и в другом случаях результаты для этих объектов хорошо согласуются с общей зависимостью, и в [10] нами было сделано предположение (хотя использовались данные всего для двух маломассивных объектов) об отсутствии различий в циклах активности звезд разных масс для рассматриваемой выборки (и соответственно звезд, различающихся по внутреннему строению - с конвективной оболочкой и полностью конвективных). Результаты выполненного анализа для еще одной полностью конвективной звезды GJ 1243 также согласуются с указанным предположением.

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга,
Москва, Россия, e-mail: issesd@rambler.ru

² Учреждение Российской академии наук, Институт астрономии РАН,
Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

ACTIVITY CYCLES OF dM4e DWARF GJ 1243

E.S.DMITRIENKO¹, I.S.SAVANOV²

The dM4e dwarf GJ 1243 (KIC 9726699) is the subject of numerous studies related to the study of its unique flare activity and the evolution of spots on its surface. The article presents the results of the analysis of manifestations of long-term activity found from archival data of photometric observations. It was found that the data obtained independently in three archives in various photometric filters indicate a long-term variability of the brightness of GJ 1243 with four characteristic cycle values (we number them from 1 to 4) grouped around the values of P_{cycle} (1-3): 1.5 years, 2.6 years and 6.3 years, respectively, as well as around P_{cycle} (4) of the order of 12.3 - 12.6 years. The analysis of the position of the GJ 1243 data on the diagram of the P_{cycle}/Prot - 1/Prot in logarithmic coordinates was performed and a comparison was made with the results of studies of other M dwarfs which led to the conclusion of a single general dependence for short cycles for all the objects under consideration.

Keywords: *stars:spots:photometry:variability:activity cycles*

ЛИТЕРАТУРА

1. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **55**, 890, 2011.
2. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **62**, 273, 2018.
3. *J.R.A.Davenport, L.Hebb, S.L.Hawley*, Astrophys. J., **806**, 212, 2015.
4. *S.M.Silverberg, A.F.Kowalski, J.R.A.Davenport et al.*, Astrophys. J., **829**, 129, 2016.
5. *J.R.A.Davenport, G.T.Mendoza, S.L.Hawley*, Astron. J., **160**, 36, 2020.
6. *G. Tovar Mendoza, J.R.A.Davenport, E.Agol et al.*, Astron. J., **164**, 17, 2022.
7. *J.Grindlay, S.Tang, R.Simcoe et al.*, Preserving Astronomy's Photographic Legacy: Current State and the Future of North American Astronomical Plates, **410**, 101, 2009.
8. *H.Maehara*, JAXA - RR - 13 -010, 119, 2014.
9. *K.Hart, B.J.Shappee, D.Hey et al.*, arXiv:2304.03791, 2023. doi:10.48550/arXiv.2304.03791.
10. *I.S.Savanov*, Astron. Rep., **56**, 716, 2012.
11. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, INASAN Science Rep., **3**, 173, 2019.
12. *J.Beer, S.M.Tobias, N.O.Weiss*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **473**, 1596, 2018.