

УДК 523. 338

## Магнитные циклы у dKe-dMe звезд

*Н.И. Бондарь*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,  
АР Крым, Украина, 98409  
*otbn@mail.ru*

Поступила в редакцию 19 ноября 2013 г.

**Аннотация.** Магнитная активность является общим свойством звезд нижней части главной последовательности. В зависимости от возраста и строения звезды разделяют на неактивные, активные и с высокой активностью. Индикаторы активности в разных слоях атмосферы позволяют с уверенностью утверждать, что наиболее активными среди карликов являются dKe-звезды. У ряда звезд выявлены длинные циклы, 60–80 лет, но такие циклы можно считать заподозренными или рассматривать как медленные тренды, т.к. ряды наблюдений имеют сравнимую длительность. Короткие циклы действуют на интервалах, сравнимых со средним 11-летним солнечным циклом или короче. Общим свойством Солнца и ряда звезд является мультипериодические изменения мощности и продолжительности циклов. Встает вопрос, какой цикл является основным и модулирует активность звезды. Прогресс в изучении магнитной активности звезд и порождающих ее процессов может быть обеспечен систематическими наблюдениями различных групп звезд.

SUSPECTED MAGNETIC CYCLES ON dKe-dMe STARS, *by N.I. Bondar*. Magnetic activity is a common property of low main-sequence stars. According to the age and structure stars are distinguished into inactive, active and high active stars. Indicators of activity in different layers of the atmosphere give clear evidences that dKe-stars are the most active among the dwarfs. Some stars demonstrate long cycles, 60–80 years, but such cycles may be supposed suspected ones or considered as long trends, since series of observations have a comparable length. Short cycles operate on a scale similar to the average 11-year solar cycle or shorter. Common feature for the Sun and some stars are multiperiodic variations of cyclic lengths and power. The question arises what cycle is a basic one and modulates activity of star. The progress in studying stellar magnetic activity and responsible processes can be provided with further systematic observations of different group of stars.

**Ключевые слова:** звезды, красные карлики, магнитная активность звезд малых масс, циклы звезд

---

## 1 Введение

Признаком магнитной активности звезд нижней части главной последовательности является образование и развитие комплекса явлений в разных слоях атмосферы – поверхностных температурных неоднородностей, вспышек, корональных дыр. Наиболее изученной магнитно-активной звездой является Солнце, а наиболее изученным показателем солнечной активности

## Магнитные циклы у dKe-dMe звезд

является относительное число пятен. В 1848 г. Рудольф Вольф предложил формулу для определения численности пятен (чисел Вольфа), а в 1852 г. по результатам анализа собственных наблюдений и собранных данных о числе солнечных пятен, включая исторические сведения с 1610 г., показал, что изменения значений  $W(t)$  происходят циклически, в среднем за 11.1 г. (закон Швабе-Вольфа), ввел нумерацию циклов и установил связь между активностью Солнца и колебаниями магнитного поля Земли. Дальнейшие исследования показали, что числа Вольфа отражают в некотором приближении общую площадь запятненности солнечной фотосферы. Для повышения точности оценок запятненности и анализа свойств 11-летнего цикла используются наиболее достоверные данные о  $W(t)$ , с 1849 г., получены ряды физически более корректных величин GSN(t) и A(t) для установления связи между площадью и полным магнитным потоком пятен (Наговицын, 2005). Многолетние систематические исследования солнечной активности показали, что с циклом 11 лет изменяется интенсивность всех ее проявлений, т.к. это время, за которое восстанавливается пространственная конфигурация магнитного поля Солнца. Для восстановления полярности магнитного поля необходимо 22 года (цикл Хейла). По-видимому, 11-летний цикл можно считать основным циклом солнечной активности. При этом отметим, что его длительность в отдельные эпохи составляет от 7 до 17 лет, меняется и высота максимума с циклом 70–100 лет (цикл Гляйсберга). Несмотря на многолетние и всесторонние исследования, уверенное прогнозирование характеристик 11-летнего цикла остается задачей будущего. Существуют циклы короче 11 лет и циклы в несколько сотен и сотен тысяч лет, чему посвящены специальные публикации.

Циклы у звезд нижней части главной последовательности стали изучать сравнительно недавно – с середины 20-го века. Основу этих исследований заложили работы О. Вилсона (Вилсон, 1968, 1978) по изучению интенсивности линий H и K Ca II как индикатора хромосферной активности, успешно продолженные в рамках НК-проекта. Анализ полученных рядов данных на интервалах более 30 лет показал, что 85 % из 111 программных объектов переменны, из них циклические изменения с характерным временем около 7 лет найдены у 60 %, линейные тренды на шкале ~ 25 лет и больше – у 12 %, нерегулярные изменения – у 13 % (Балонас и др., 1995). Были установлены зависимости между характеристиками циклов (амплитудой и периодом) и параметрами звезд, рассмотрен уровень активности у разных групп звезд, разного возраста и с различной глубиной конвективной зоны. Современные проекты, поддерживающие исследования хромосферной активности звезд, ведутся на разных обсерваториях (Штрассмайер, 2005). С 1990-х годов начаты программы систематических исследований фотосферной активности, они указаны в приведенной выше работе К. Штрассмайера. Для ряда задач используются данные обзоров The All Sky Automated Survey (ASAS) и космических проектов MOST, CoRoT, Kepler (GAIA). Найдены циклы, аналогичные 11-летнему солнечному циклу пятнообразования, а также циклы смены активных долгот, изменения площади и распределения пятен, что следует учитывать при анализе характеристик циклов. Рассмотрение эволюции активности с учетом свойств разных групп F-M-звезд свидетельствует о том, что генерацию циклов обеспечивают динамо-процессы, действующие на разных уровнях конвективной зоны (Бем-Витензе, 2007; Кацова и Лившиц, 2011).

В НИИ “КрАО” изучение фотосферной активности красных карликов проводится с 1991 г. по результатам *UBVRI*-наблюдений на 1.25-м телескопе АЗТ-11. Параметры пятен получены с применением зональной модели их распределения (Алексеев, 2001). Здесь приведены результаты поиска циклов фотосферной активности у dKe-dMe звезд по крымским данным и взятым из публикаций и баз данных SIMBAD и ASAS, получены зависимости между периодами вращения и длительностью циклов – длинных и коротких, найденных у F-M-карликов по разным исследованиям.

**Таблица 1.** Амплитуды и длительности циклов dKe-dMe звезд, заподозренные по фотографическим кривым блеска

звезда	спектральный класс	временной интервал	число пластинок	$\Delta m$ (амплитуда)	оценка $P_{\text{сус}}$ (годы)	
V388 Cas	dM5e	1938–1991	172	0.27	5	
V987 Tau	dM4.5e	1960–1 1988	165	0.14		
V808 Tau	dK3e+dK3e	1905 –1988	231	0.37	17	
V833 Tau	dK5e	1905–1988	357	0.65	16	60
V998 Ori	dM4e	1941–1991	243	0.23		
V780 Tau	dM6e	1973–1989	99	0.34		
V910 Ori		1951–1993	87			
V1003 Ori		1951–1993	87	0.17		
OU Gem	dK3e	1899–1987	123	0.14		
V577 Mon	dM4.5e+dM5e	1909–1988	70	0.40		35
PZ Mon	dK2e	1899–1988	565	1.00		52
YZ CMi	dM4.5e	1927–1990	157	0.30	3	26
DX Cnc	dM6.5e	1984–1989	43	0.17		
CU Cnc	dM5e	1897–1989	80	0.28	16	
CV Cnc	dM6e	1963–1989	70	0.26	6	
AA Cnc		1983–1990	60	0.06		
EI Cnc		1963–1987	56	0.80		50?
GL Vir	dMe	1963–1991	110	0.19		
FL Vir	dM5.5e	1896–1992	404	0.38	16	
BF CVn	dM1.5e	1899–1989	104	0.26		40
DT Vir	dM1.5e	1911–1989	137	0.24		22?
VW Com	dM3.5-4e	1953–1991	141	0.26	4	
EQ Vir	dK8.5e	1914–1988	53	0.25	12	
V647 Her	dM4e	1939–1991	129	0.30	15	
V639 Her	dM4.5e	1939–1991	129	0.30	12	
V2354 Sgr	dM5	1960–1988	211	0.15		
BY Dra	dK5e+dK7e	1904–1989	125	0.50	8	50
V816 Her	dM4e	1899–1989	55	0.42		
V1216 Sgr	dM4.5e	1960–1988	237	0.11		
V1285 Aql	dM2-3e	1899–1987	108	0.32		
V775 Her	dK1e	1899–1989	97	0.25		28
V1816 Cyg		1960–1992	188	0.28	4	
V1513 Cyg	dM3e	1952–1989	88	0.21		
HU Del	dM7e	1940–1990	116	0.30	10	
V1396 Cyg	dM3e	1896–1990	358	0.22	12	
HZ Aqr	dK3e+dK7e	1912–1970	66	0.26		
FG Aqr	dM4.5	1966–1989	120	0.27		
DO Cep	dM4.5e	1899–1989	152	0.28		
HK Aqr	dM1.5e	1960–1989	55	0.07		
Gl 907.1	dM0e	1925–1989	41	0.05		

## 2 Циклы развития фотосферной активности звезд

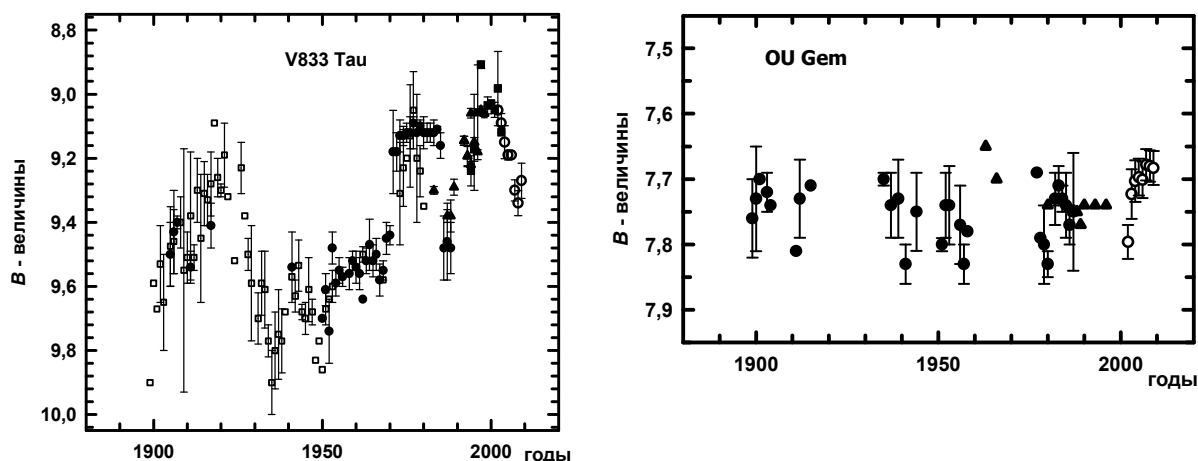
Открытие холодных пятен на поверхности звезды VY Dra, сделанное П.Ф. Чугайновым (Чугайнов, 1968), и дальнейшие ее систематические наблюдения позволили ему обнаружить изменения фотометрического периода и предположить существование активности, подобной солнечной, с периодом 8 лет (Чугайнов, 1973). Первые убедительные доказательства существования циклов пятнообразования были получены по исследованию блеска у нескольких красных карликов по пластинкам Гарвардской коллекции (Филлипс и Хартманн, 1978; Хартманн и др., 1981). Длительность заподозренных циклов активности у исследованных звезд составляла несколько десятков лет, а высокая амплитуда указывала на сильную запятненность фотосферы, у звезды V833 Tau – до 50%. Эти результаты заставили предположить, что активность красных карликов во много раз выше солнечной и поставить задачу поиска связи между параметрами звезд и показателями их активности.

В НИИ “КрАО” были выполнены исследования блеска 40 избранных dKe-dMe звезд по пластинкам коллекций ГАИШ, Одесской и Зоннебергской обсерваторий (Бондарь, 1995, 2001). Сведения об объектах можно найти в каталоге Гершбера и др. (1999). По полученным кривым среднего годового блеска у 50% (у 21 звезды) найдена медленная переменность с амплитудой 0.3–1<sup>m</sup> на шкале от 3 до 60 лет, у 8 звезд заподозрены циклические изменения, наиболее высокие амплитуды и продолжительные циклы найдены у 4-х из них – V833Tau, PZ Mon, EI Cnc, VY Dra.

Фотографические архивы позволяют получить длинные ряды, в несколько десятков лет, и по ним определить эпоху и значение максимального блеска, характерного для незапятненной фотосферы. Недостатками таких рядов являются низкая точность, неравномерность и малочисленность данных.

Современные фотометрические ряды имеют высокую точность и плотность данных и позволяют детально исследовать распределение пятен, стабильность найденных периодов, оценить величину дифференциального вращения. Однако их длительность (около 20 лет) остается недостаточной для уверенного определения максимального уровня блеска, поэтому полученные по ним амплитуды переменности соответствуют нижней оценке запятненности поверхности звезды. Значение амплитуды по ограниченному ряду можно оценить, используя метод, предложенный Мессиной и др. (2001).

Для поиска циклов наиболее информативны комбинированные кривые блеска, построенные по результатам современной фотометрии и фотографическим данным, покрывающие у некоторых звезд интервалы более 100 лет (рис. 1). Однако очевидно, что надежное определение параметров циклов – задача будущего. В настоящее время достоверность результатов повышают независимые исследования и использование различных методов анализа (Балюнас и др., 1983; Донахью и др., 1996; Добсон и др., 1990; Бондарь, Прокофьева, 2007; Ола и др., 2009). Как следует из табл.1, уже по фотографическим данным у некоторых звезд можно заподозрить наличие коротких и длинных циклов. К коротким отнесены циклы длительностью не более 17 лет, из них большинство сравнимы с 11-летним солнечным циклом, а наиболее короткие – с его 2-летним циклом. Амплитуды в табл. 1 указаны для длинных циклов – 20 лет и более. Их значения, как и значения периодов, нуждаются в уточнении по более полной и точной фотометрии объектов. Отметим также, что звезда PZ Mon, известная по каталогам как красный карлик, отнесена к гигантам (Саар, 1998).



**Рис. 1.** Кривые блеска по фотографическим и фотометрическим данным. Обозначения: черные кружки – (Бондарь, 1995), светлые квадратики – Хартманн и др. (1981); зачерненные треугольники – (Ола и Петтерсен, 1991; Штрассмайер, 1997; Ола и др., 2000, 2001), зачерненные квадратики – крымские данные 1992–2003 гг., светлые кружки – данные ASAS 2002–2009 гг.

Исследования разных индексов активности подтверждают наличие мультипериодичности у ряда звезд. У V833 Tau, наиболее изученной среди dK-звезд, обнаружено действие длинного цикла 70–80 лет и циклы 16–18 лет, 6 и 2 года (Ола и др., 2001, 2009; Бондарь, 2012). Цикл 80 лет действует с амплитудой  $\sim 0.5^m$ , но сравним с длительностью ряда данных (110 лет), и так же, как и короткие циклы 6 и 2 года, амплитуды которых лишь немногим превышают  $2.5\sigma$ , нуждается в подтверждении. Действие 18-летнего цикла прослеживается на всем интервале исследования, но его форма, амплитуда и эпоха максимума изменяются.

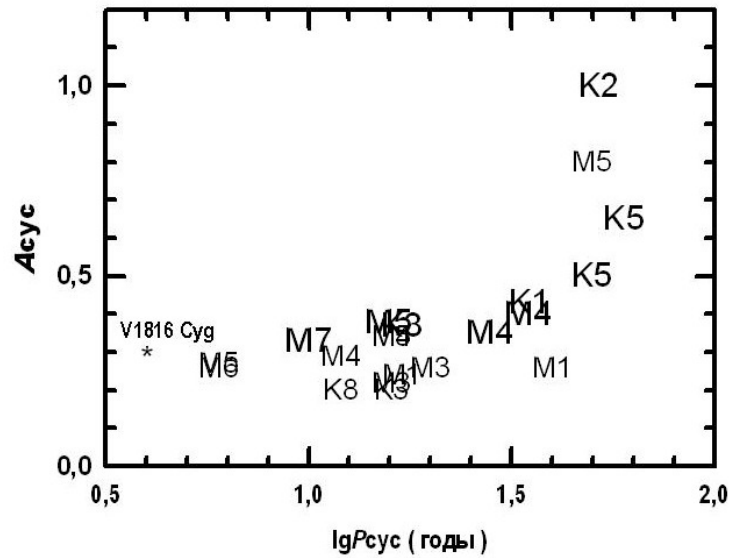
Какой из циклов является главным, ответственным за высокий уровень активности звезды? Ответ на этот вопрос требует длительного изучения каждого из найденных циклов. Принято считать основным цикл с наибольшей амплитудой.

У звезды OU Gem наблюдаются нерегулярные изменения среднего годового блеска, она относится к звездам, у которых отсутствуют циклы активности.

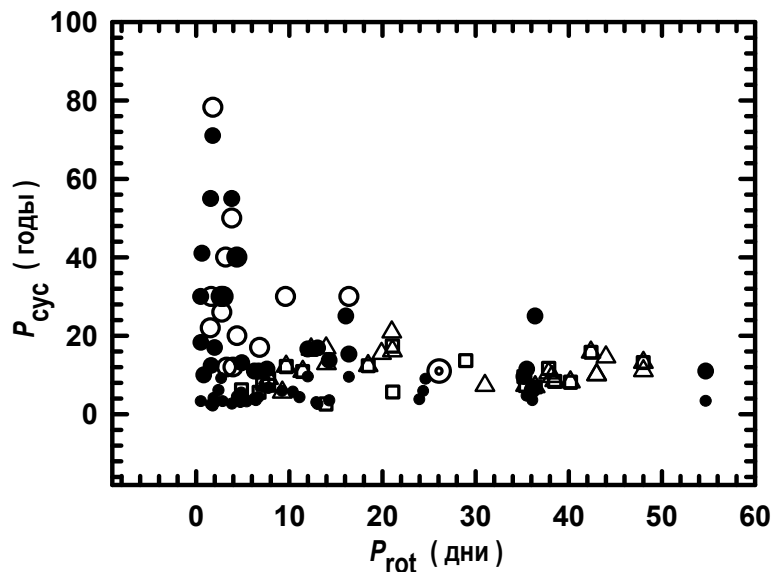
### 3 Длительности циклов и периоды вращения

В основе магнитной активности звезд солнечного типа и красных карликов лежат динамо-процессы в конвективной зоне, обеспечивающие генерацию магнитных полей. Общность природы в развитии активности у этих звезд позволяет использовать результаты наблюдений различных индикаторов активности для выявления физических параметров звезды, определяющих уровень ее активности. Наиболее точные сведения о циклах длиной менее 20 лет получены по многолетним исследованиям хромосферной активности (Балюнас и др., 1995), они используются для различных видов анализа, в том числе для теоретических расчетов циклов активности в рамках представлений о слоевом динамо (Лоренте и Монтесинос, 2005).

Уровень магнитной активности у звезд нижней части главной последовательности определяется скоростью осевого вращения  $P_{\text{tot}}$  и глубиной конвективной зоны  $\tau_c$ . Рассмотрение показателей хромосферной и фотосферной активности у звезд с разными значениями  $B-V$  (с разными значениями  $\tau_c$ ) приводит к выводам, что наиболее высокая активность наблюдается в



**Рис. 2.** Связь между амплитудой и длительностью цикла. Спектральный класс звезд указан согласно табл. 1 (Бондарь, 2002)



**Рис. 3.** Связь между периодом вращения звезды и длительностью основных и коротких циклов. Обозначения: светлые кружочки – крымские данные, квадратики – Балюнас и др., 1995; фотометрические данные из публикаций – крупные зачерненные кружки отмечают длинные циклы, маленькие – короткие; треугольники – Бем-Витензе, 2007; солнечный значок – положение Солнца согласно циклу 11 лет

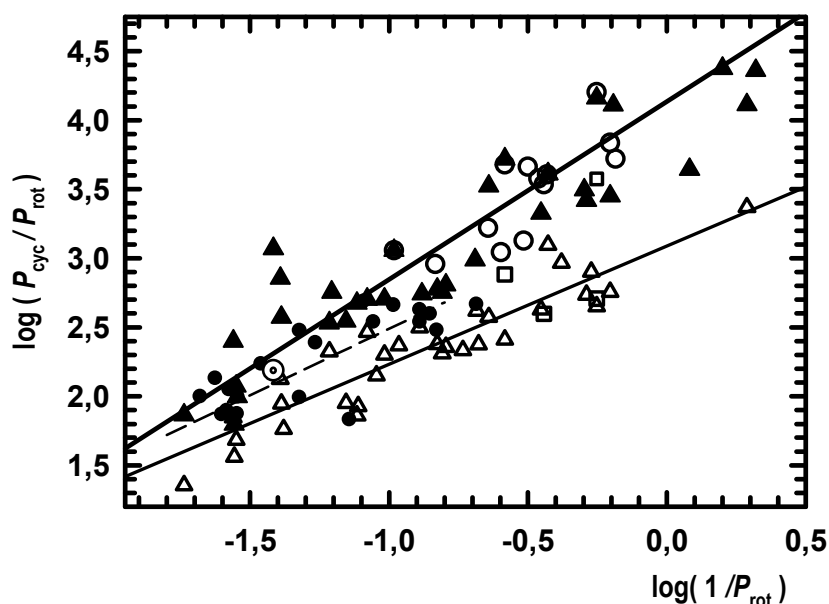
группе звезд спектральных классов G8-K5. На рис. 2 представлены амплитуды заподозренных циклов у K-M карликов согласно немногочисленным данным из табл. 1 (Бондарь, 2001).

На рис. 3 длительности циклов, найденные по результатам НК-проекта и многолетним кривым блеска, рассмотрены относительно периода вращения. В зависимости от скорости осевого вращения объекты разделяются на две последовательности. У звезд с  $P_{rot} > 10^d$

длительность циклов не превышает 20 лет, у быстровращающихся карликов циклы достигают нескольких десятилетий. Значительный разброс на более многочисленной последовательности медленно вращающихся звезд означает, что среди исследованных звезд есть отдельные группы со своими особенностями развития активности.

Важность параметров  $P_{\text{cyc}}$  и  $P_{\text{rot}}$ , получаемых из наблюдений, для понимания процессов динамо рассмотрели Балюнас и др. (1996) и показали, что  $P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}} \sim D^i$ , т.е. зная теоретическое значение числа динамо и период вращения, можно определить длительность цикла активности звезды. Значение  $i$  дает эмпирическая зависимость между  $P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}}$  и  $1/P_{\text{rot}}$  в логарифмической шкале. Согласно Балюнас и др. (1996)  $i = 0.74$ , Ола и др. (2009) по всем рассмотренным ими данным получили  $i = 0.81$ , а для коротких циклов  $i = 0.84$ .

На рис. 4 эта зависимость представлена для более широкой выборки. В нее вошли сведения о циклах из указанных в подписи публикаций (47 звезд) и крымские данные (24 объекта). Периоды вращения взяты согласно Балюнас и др. (1983). Полученные линии регрессии имеют разные наклоны для длинных и коротких циклов – 0.91 и 0.85 соответственно.



**Рис. 4.** Зависимость между  $P_{\text{cyc}}$  и  $P_{\text{rot}}$  для длинных и коротких циклов.

Обозначения: крымские данные – длинные циклы (светлые кружки), короткие – квадратики; темные кружки – Балюнас и др., 1995; фотометрические данные из публикаций: длинные циклы – черные треугольники, короткие – светлые; особый значок отмечает Солнце (11 лет). Линии регрессии: сплошная толстая линия – длинные циклы, сплошная тонкая – короткие, прерывистая – данные Балюнас и др., 1995

#### 4 Выводы

Проявления магнитной активности у красных карликов носят как нерегулярный, так и циклический характер. Циклы развиваются на шкале в несколько лет, длинные циклы составляют десятки лет, что сравнимо с современными рядами данных. Поэтому надежное определение параметров циклов является задачей будущих наблюдений. Настоящие результаты указывают на значительную разницу в интенсивности процессов пятнообразования у dK-dM звезд, наиболее высокий уровень фотосферной активности отмечен среди G8-K5 карликов, о

Магнитные циклы у dKe-dMe звезд

чем свидетельствуют продолжительные циклы и их высокие амплитуды – показатели запятненности поверхности.

Рассмотрение связи между длительностью циклов и периодом вращения звезды выполнено по данным исследований хромосферной и фотосферной активности.

Для длинных и коротких циклов существует степенная зависимость между  $P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}}$  и  $1/P_{\text{rot}}$  с показателями степени 0.91 и 0.85 соответственно.

Эти различия указывают на то, что короткие и длинные циклы формируются разными динамо, действующими в разных слоях звезды. Очевидно, что полученный результат нуждается в проверке. Необходимо дальнейшее накопление данных для выполнения раздельного анализа циклов хромосферной и фотосферной активности по однородным группам объектов.

## 5 Благодарности

Автор приносит глубокую благодарность Р.Е. Гершбергу за обсуждение статьи и полезные замечания.

## Литература

- Алексеев И.Ю. // Запятненные звезды малых масс, Одесса: Астропринт. 2001. С. 135.
- Балиюнас и др. (Baliunas S.L., Vaughan A.H., Hartmann L., et al.) // *Astrophys. J.* 1983. V. 275. P. 752.
- Балиюнас и др. (Baliunas S.L., Donahue R.A., Soon W., et al.) // *Astrophys. J.* 1995. V. 438. P. 269.
- Балиюнас и др. (Baliunas S.L., Nesme-Ribes E., Sokoloff D., et al.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 460. P. 848.
- Бем-Витензе (Bohm-Vitense) // *Astrophys. J.* 2007. V. 657. P. 486.
- Бондарь (Bondar N.I.) // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1995. V. 111. P. 259.
- Бондарь Н.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2001. Т. 97. С. 17.
- Бондарь Н.И. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. С. 542.
- Бондарь, Прокофьева (Bondar' N.I., Prokof'eva V.V.) // *Odessa Astron. Publ.* 2007. V. 20. Part 2. P. 14.
- Бондарь Н.И. // Труды международной научной конференции “Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы”. Москва, 28 мая – 1 июня 2012 г. С. 20.
- Вилсон (Wilson O.C.) // *Astrophys. J.* 1968. V. 153. P. 221.
- Вилсон (Wilson O.C.) // *Astrophys. J.* 1978. V. 226. P. 379.
- Гершберг и др. (Gershberg R.G., Katsova M.M., Lovkaya M.N., et al.) // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1999. V. 139. P. 555.
- Добсон и др. (Dobson A.K., Donahue R.A., et al.) // *A. S. P. Conf. Ser.* 1990. V. 9. P. 132.
- Донахью и др. (Donahue R.A., Saar S.H., Baliunas S.L.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 466. P. 384.
- Кацова М.М., Лившиц М.А. // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. С. 1217.
- Лоренте, Монтесинос (Lorente R., Montesinos B.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 632. P. 1104.
- Мессина и др. (Messina S., Rodono M., Guinan E.F.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 366. P. 215.
- Наговицын Ю.А. // *Письма в Астрон. журн.* 2005. Т. 31. С. 1.
- Ола, Петтерсен (Olah K., Pettersen B.R.) // *Astron. Astrophys.* 1991. V. 242. P. 443.
- Ола и др. (Olah K., Kollath Z., Strassmeier K.G.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 356. P. 643.
- Ола и др. (Olah K., Strassmeier K.G., Kovari Zs., Guinan E.F.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 372. P. 119.
- Ола и др. (Olah K., Kollath Z., Granzer T., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 501. P. 703.



- Саар (Saar S.H.) // *Inf. Bull. Variable Stars*. 1998. N. 4580.
- Чугайнов (Chugainov P.F.) // *Inf. Bull. Variable Stars*. 1968. N. 172.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1973. Т. 48. С. 3.
- Филлипс, Хартманн (Phillips M.J., Hartmann L.) // *Astrophys. J.* 1978. V. 224. P. 182.
- Хартманн и др. (Hartmann L., Bopp B.W., Dussault M., et al.) // *Astrophys. J.* 1981. V. 249. P. 662.
- Штрассмайер и др. (Strassmeier K.G., Bartus J., et al.) // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1997. V. 125. P. 11.
- Штрассмайер (Strassmeier K.G.) // *Astron. Nachr.* 2005. V. 326. P. 269.