

УДК: 524.3

ПЯТНА, ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ И
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ НА
ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗДАХ

И. Ю. АЛЕКСЕЕВ

Поступила 12 мая 2004

Принята к печати 15 ноября 2004

Представлены первые результаты по поиску циклов активности звезд солнечного типа на основе моделирования их запятненности по разработанному в КРАО алгоритму. Из более чем трех десятков программных звезд 10 объектов показали цикличность средних широт и полных площадей звездных пятен. Обнаруженные циклы имеют длительность 4-15 лет, то есть аналогичны солнечным 11-летним циклам Швабе. У большинства звезд наблюдается грубый аналог солнечной диаграммы бабочек - понижение средней широты пятен с ростом их площади. Для ряда объектов (например, аналог молодого Солнца LQ Hya или переменная типа RS CVn V711 Tau) отмечается эффект переключения активных долгот (т.н. *flip-flop* эффект), происходящий в эпохи максимумов средней широты, а также уменьшение фотометрического периода вращения звезды с дрейфом пятен к экватору - аналог эффекта дифференциального вращения Солнца. В отличие от Солнца, обнаруженные циклы пятнообразования не показывают однозначной корреляции с другими индикаторами активности - хромосферной эмиссией звезд в линиях CaII HK (BE Cet, EK Dra, DX Leo), водородной эмиссией в линии H α (LQ Hya, VY Ari, EV Lac) или цикличной вспышечной активностью (EV Lac). У V833 Tau, BY Dra, EK Dra, VY Ari короткие циклы Швабе существуют с аналогичными солнечному циклу Глайссберга длительными циклами, при которых площадь пятен может достигать половины полной поверхности звезды.

1. *Введение.* Цикличность солнечной активности была открыта в середине XIX века любителем астрономии Генрихом Швабе, и сейчас 11-летний солнечный цикл является одним из наиболее известных явлений в жизни Солнца. Помимо этого цикла известны также вековой (80-90 лет) цикл Глайссберга и Маундеровские минимумы, происходящие раз в два-три столетия. Первые данные о возможных аналогах солнечных циклов у активных звезд появились при рассмотрении их долговременной фотометрии. Так, в 1973г. Чугайнов [1] заподозрил существование 8-летней цикличности у известной запятненной системы BY Dra, а Филлипс и Гартманн [2] по пластинкам Гарвардской коллекции обнаружили длительные (50-60 лет) изменения среднего блеска у звезд BY Dra и SS Eri, по-видимому аналогичные циклу Глайссберга. Широко известны циклы хромосферной активности карликов солнечного типа, определяемые по потокам в эмиссионных линиях CaII (HK-проект Вильсона). В последнее время обнаружены циклические изменения во вспышечной активности звезд типа UV Cet [3], в переключении активных долгот и проявлении дифференциального вращения у звезд типа RS CVn, FK Com и некоторых

запятненных карликов [4].

Разработанная нами [5,6] зональная модель запятненности звезд позволила провести массовые определения температур, полных площадей и средних широт пятен для более чем трех десятков активных звезд различных типов (результаты моделирования приведены на сайте <http://www.ctao.cimea.ua/ilya>). В настоящей работе мы рассматриваем полученные нами свидетельства цикличности пятнообразования на этих звездах и наличия у них аналогов бабочек Маундера и эффектов дифференциального вращения.

2. *Результаты.* В программу проводимого нами исследования активных запятненных звезд поздних спектральных классов входит более 30 объектов, попадающих в достаточно широкий диапазон спектральных классов (от G0 до M4.5), классов светимости (III-V) и скоростей вращения (до 100 км/с). Выборка программных звезд охватывает не только запятненные карлики и звезды солнечного типа, но и активные системы типа RS CVn и молодые PMS-звезды. Применение разработанной нами зональной модели ко всем программным звездам показало, что их

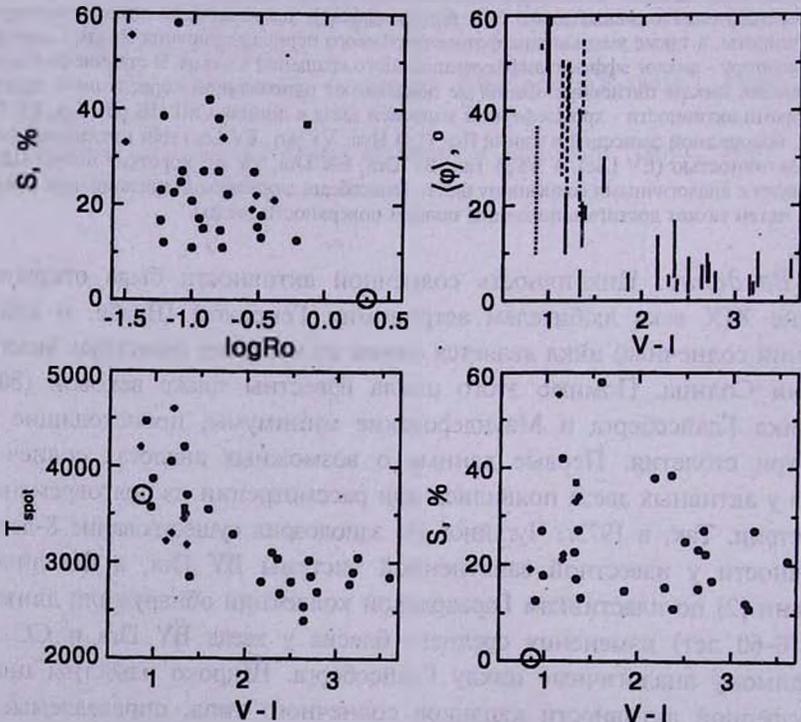


Рис.1. Зависимость максимальной полной площади звездных пятен S , их средней широты $\langle \phi \rangle$ и температуры T_{spot} от основных параметров звезд: показателя цвета $V-I$ и логарифма числа Россби Ro . Кружки и сплошные линии - запятненные карлики, ромбы и штриховые линии - звезды типа RS CVn, квадраты и штрих-пунктирные линии - молодые PMS-звезды, значок \odot и пунктир - Солнце.

фотометрическое поведение хорошо представляется с помощью картины запятненности, качественно аналогичной солнечной: многочисленные мелкие пятна, находящиеся в низких (холодные М-карлики) и средних (более горячие G-K звезды различных типов) широтах. На рис.1 хорошо видна тенденция роста возможных широт нахождения пятен (ϕ) к более горячим звездам. Площадь запятненных областей превышает для некоторых объектов 50% полной поверхности звезды. Максимальная площадь пятен на звезде S растет с уменьшением числа Россби и периода осевого вращения звезды. Отмечается тенденция понижения числа S к красному (полностью конвективные звезды) и синему (звезды без внешней конвективной оболочки) концам выборки. Температура пятен $T_{\text{пят}}$ растет к более горячим звездам. При этом разность температур невозмущенной фотосферы и пятен ΔT изменяется от 1000-2000 К у горячих G-карликов и звезд типа RS CVn до 300 К у самых холодных М-звезд. Во все найденные зависимости вписывается тень солнечных пятен.

Для десяти звезд из нашей программы была известна цикличность их активности, определяемая по различным индикаторам. Это фотометрические циклы звезд, хромосферное излучение в линиях CaII НК, вспышечная активность, картирование поверхности звезды, переключение активных долгот и дифференциальное вращение. Основные параметры программных звезд приведены в табл.1. Обсудим каждую из них.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММНЫХ ЗВЕЗД

Звезда	Sp	Двойств.	log Ro	M_V mag	P_{rot} сутки	P_{Gibber} годы	P_{phot} годы	P_{other} годы
EK Dra	G1V	S	-0.54	4.83	2.68	>30 [7]	9.2 [7,9]	var(1), 12(2)
BE Cet	G2V	S	-0.21	4.80	7.76		6.7 [7,9]	9.1 (1)
DX Leo	K0V	S	-0.48	5.75	5.42		3.2 [7,9]	2.8(1), 3.9(3)
LQ Hya	K0V	S	-1.14	6.44	1.61		11.4; 6.75 [10]	15, 5.2 (4)
V833 Tau	K5V	SB1	-1.12	6.92	1.79	68 [8]	6.4 [10]	
BY Dra	K4V+K7V	SB2	-0.81	7.04	3.83	55 [2]	13.7; 2.7 [10]	
EV Lac	M4.5V	S	-0.81	11.58	4.38	>40 н.и.	4-5 [11]	7.5 (5)
V711 Tau	K1IV+G5V	SB2	-1.51	2.85	2.84		16.5; 5.5 [10]	3.5 (6)
IN Com	G5III/IV	SB1	-0.52	3.34	5.92		8 [12]	
VY Ari	K3-4IV	SB1	-0.14	5.07	16.42	30 н.и.	15.3 [10]	

1: CaII НК эмиссия [13], 2: UV линии [14], 3: моделирование запятненности [15], 4: цикличность flip-flop эффекта и дифференциального вращения [4], 5: вспышечная активность [3], 6: Доплеровское картирование [16]

EK Dra - одиночная молодая звезда, аналог молодого (не более 10^8 лет) Солнца, входящая в движущуюся группу Плеяд. Это самая активная звезда НК-проекта, фотометрические и ультрафиолетовые наблюдения

которой позволили заподозрить ее цикличность с характерным временем 9-13 лет [7,9,14] в сочетании с трендом, в то время как переменность линий CaII НК явной цикличности не показывает [13]. Согласно нашим расчетам, пятна на этой звезде находятся на средних ($48-62^\circ$) широтах, а их площадь достигает 27% полной поверхности звезды. Из рис.2а хорошо видна тенденция понижения широты пятен с увеличением их полной площади. Это аналог солнечной диаграммы бабочек [17], которая указывает на дрейф запятненных областей к экватору по мере развития пятен в течение цикла. Скорость такого дрейфа составляет $-1.6 + -2.0$ градусов в год, то есть в два раза меньше соответствующего солнечного значения. Изменения площади и средней широты пятен показывают возможную цикличность с характерным временем 9.2 лет, совпадающим с длительностью фотометрического цикла [7,9], и тренд, вероятно, связанный с более длительным (более 30 лет) циклом, аналогом цикла Глайсберга. Проведенное нами сравнение фотометрических периодов звезды [9] (то есть периодов осевого вращения звезды на широте нахождения пятен) с определенными нами широтами пятен показало их корреляцию. Это говорит о наличии на звезде дифференциального вращения солнечного

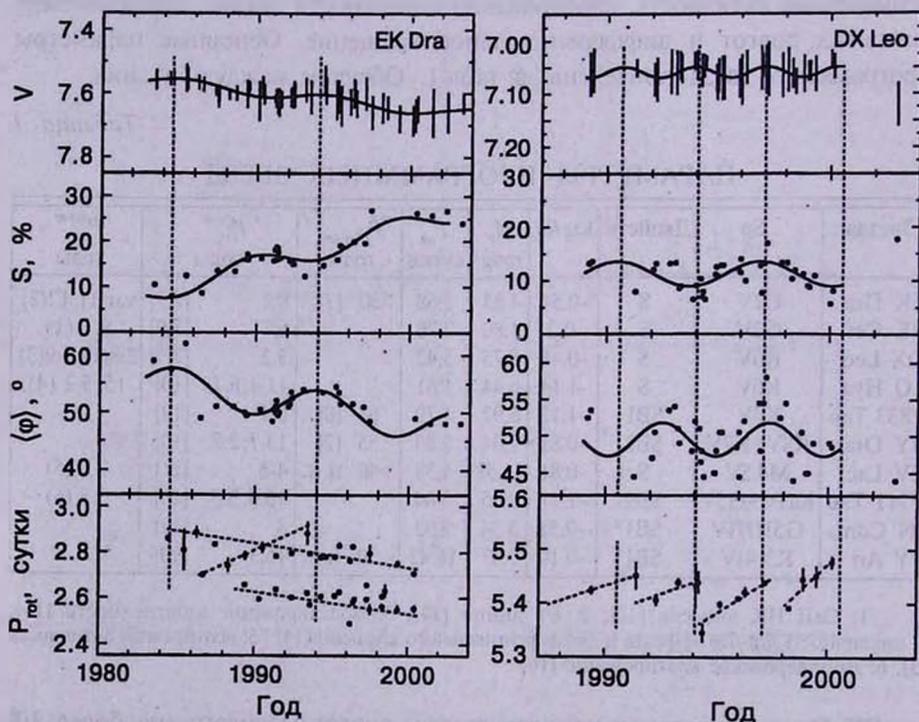


Рис.2а-д. Циклические изменения пятенной активности звезд: долговременная кривая блеска, зависимость полной площади пятен S и их средней широты $\langle \phi \rangle$ от времени, изменения фотометрического периода P_{rot} (или долготы максимальной запятненности θ). Фотометрические периоды приведены по данным [9].

типа с коэффициентом $D_r = 0.07 + 0.08$, в два раза меньшим солнечного.

BE Cet - молодая (600 млн. лет) одиночная звезда, член движущейся группы Гиад. Она входит в программу CaII НК-проекта, который обнаружил цикличность ее хромосферной активности с характерным временем 9.1 лет [13]. Фотометрические данные Мессины [7,9] показали цикличность изменения блеска звезды с длительностью цикла 6.7 лет. Согласно нашим расчетам, пятна находились на широтах 53-54°, а их площадь изменялась от 7 до 13% поверхности звезды. Изменения площади пятен отражают найденную по фотометрии 6.7-летнюю цикличность. Согласно [9], в течение цикла происходит плавное уменьшение фотометрического периода звезды, связанное с дифференциальным вращением. Однако неуверенность определения и малая амплитуда колебаний получаемой нами средней широты пятен не позволяют сделать определенных выводов о знаке и величине дифференциального вращения.

DX Leo - одиночная K0 звезда возраста 130 млн. лет, входящая в движущуюся группу Плеяд. Данные CaII НК-проекта показали цикличность ее хромосферной активности с характерным временем 2.8 лет [13], а фотометрические данные [7,9] дали значение цикла фотосферной активности, равное 3.21 лет. Этим циклом определяется и плавный рост фотометрического периода звезды в течение цикла. Пятна расположены на средних широтах 44-58°, в целом совпадая с результатами [15], причем средняя широта пятен показывает цикличность полуторной длительности (4.8 лет). Полная площадь пятен изменяется от 6 до 18% поверхности звезды, также в хорошем согласии с [15], и эти изменения показывают цикличность удвоенной длительности. Обнаруженные Мессинией и др. [15] 3.8-летняя и 2.6-летняя цикличности широтного и долготного распределений пятен в наших результатах не отражаются. Сопоставление средних широт пятен и фотометрических периодов звезды позволяет заподозрить наличие слабого дифференциального вращения солнечного типа с коэффициентом $D_r = 0.03$, в хорошем согласии с результатами [15] ($D_r \approx 0.04$).

LQ Нуа - одиночная K0-звезда, только достигшая Главной последовательности, аналог молодого (60 млн. лет) Солнца. Фотометрические данные позволили Ола и др. [10] говорить о наличии у звезды двух (11.2-летнего и 6.75-летнего) циклов. Близкие (11.4+13.8 и 6.2+6.9 лет) значения фотометрических циклов найдены в [9,18]. Также у звезды обнаружена 5.2-летняя цикличность в проявлении *flip-flop* эффекта и 15-летняя - в эффекте дифференциального вращения [4]. Согласно нашим расчетам [19,20], пятна на LQ Нуа находятся на средних (24-48°) широтах, что хорошо согласуется и с последними данными доплеровского картирования [18]. Площадь пятен показывает циклические изменения с двумя известными из фотометрии периодами в 11.2 и 6.75 лет. Как и на

Солнце, рост площади пятен сопровождается понижением их средней широты, то есть мы видим аналог диаграммы бабочек [17]. Средняя широта пятен (ϕ) показывает ярковыраженную цикличность с характерным временем 11.2 года. Сравнение средней широты пятен с фотометрическими периодами вращения звезды указывает на присутствие дифференциального вращения солнечного типа с коэффициентом $D_p = 0.09$. Сравнение запятненности звезды с многолетними данными по ее хромосферной эмиссии в линии $H\alpha$ [20] не показало ни каких-либо корреляций этих величин, ни цикличности хромосферного излучения.

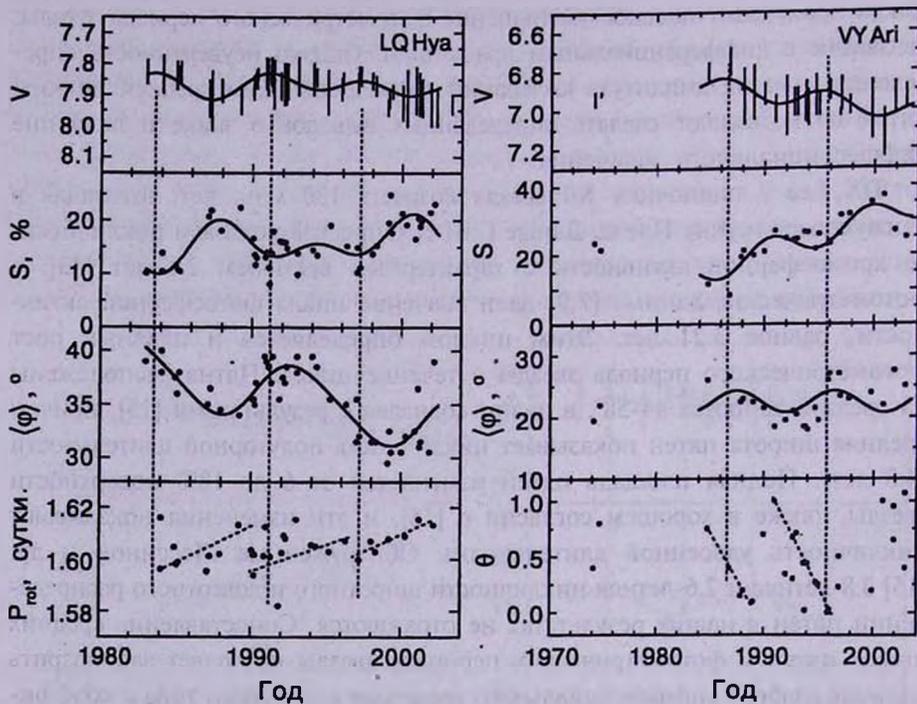


Рис.2b. LQ Hya и VY Ari.

V833 Tau - спектрально двойная SB1 система, член скопления Гиады с возрастом 630 млн. лет. Помимо широко известного 68-летнего [8,21,22] цикла, аналогичного солнечному циклу Глайсберга, звезда показывает присутствие двух более коротких (6.4 и 2.4 лет) фотометрических циклов [10]. Согласно нашим расчетам, пятна на V833 Tau локализованы на широтах 23-30°, а их площадь может достигать до 58% полной поверхности звезды. Известная из фотометрии цикличность с 6.4-летним периодом хорошо проявляется в площадях и средних широтах пятен. Однако, в отличие от звезд солнечного типа, мы видим у V833 Tau не аналог бабочек Маундера, а корреляцию площади пятен и их средней широты. Таким образом, пятна на V833 Tau смещаются по мере развития не к

экватору, а к полюсу. Скорость такого широтного дрейфа составляет $1.5 + 2.5$ градусов в год. Сопоставление средних широт пятен, полученных нами для эпох 1990-2000гг., с фазами минимального блеска [21] показало их корреляцию. Следовательно околополярные области V833 Tau вращаются быстрее экватора. Звезда демонстрирует слабое дифференциальное вращение антисолнечного типа с коэффициентом $D_r = -0.006$.

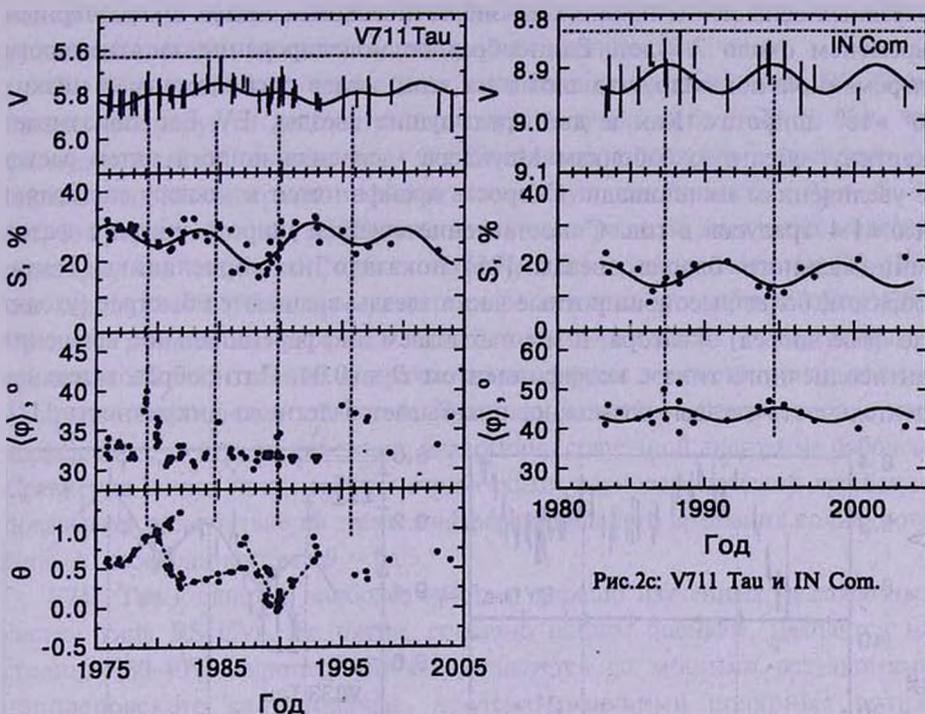


Рис.2с: V711 Tau и IN Com.

VY Dra - прототип запятненных красных карликовых звезд и наиболее изученная система этого типа. Проведенное нами моделирование запятненности переменной показало, что пятна на VY Dra находятся в низких ($\langle \phi \rangle < 14^\circ$) широтах. Известная из литературы 13.7-летняя цикличность блеска звезды [10] хорошо выражается также в изменениях средней широты и полной площади пятен. Как и V833 Tau, VY Dra дает картину развития цикла активности, обратную солнечной - широтный дрейф пятен к полюсу по мере их развития. Картина колебаний широт и площадей пятен хорошо согласуется с отмеченной Петтерсоном и др. [23] цикличностью колебаний фазы минимума блеска. Ее сопоставление со средней широтой пятен показывает их корреляцию, указывающую на то, что экваториальные области звезды отстают по фазе от высокоширотных. Таким образом, звезда показывает дифференциальное вращение антисолнечного типа с коэффициентом $D_r = -0.02$. При наблюдениях в 1966-1970гг. звезда показала

выход из глубокого минимума 55-летнего цикла, аналогичного циклу Глайсберга. Согласно нашим оценкам, площадь пятен на BY Dra в глубине такого минимума доходит до 38% полной поверхности звезды.

EV Lac - полностью конвективная (M4.5Ve) одиночная активная вспыхивающая звезда. Проведенный нами [3,24] анализ ее вспышечной активности позволил заподозрить цикличность в среднем излучении звездных вспышек и наклоне их энергетического спектра с характерным временем около 7.5 лет. Единообразное моделирование запятненности переменной показало, что пятна на этой звезде расположены в низких $6^\circ + 16^\circ$ широтах. Как и две предыдущие звезды, EV Lac показывает картину, обратную бабочкам Маундера - средняя широта пятен растет с увеличением их площади. Скорость дрейфа пятен к полюсу составляет $1.0 + 1.4$ градусов в год. Сопоставление средней широты пятен с фазой минимального блеска звезды [25] показало их корреляцию. Таким образом, более высокоширотные части звезды вращаются быстрее (уходят по фазе вперед) экватора, и мы наблюдаем дифференциальное вращение антисолнечного типа с коэффициентом $D_p = -0.04$. Пятнообразовательная деятельность звезды, возможно, показывает 5-летнюю цикличность [11].

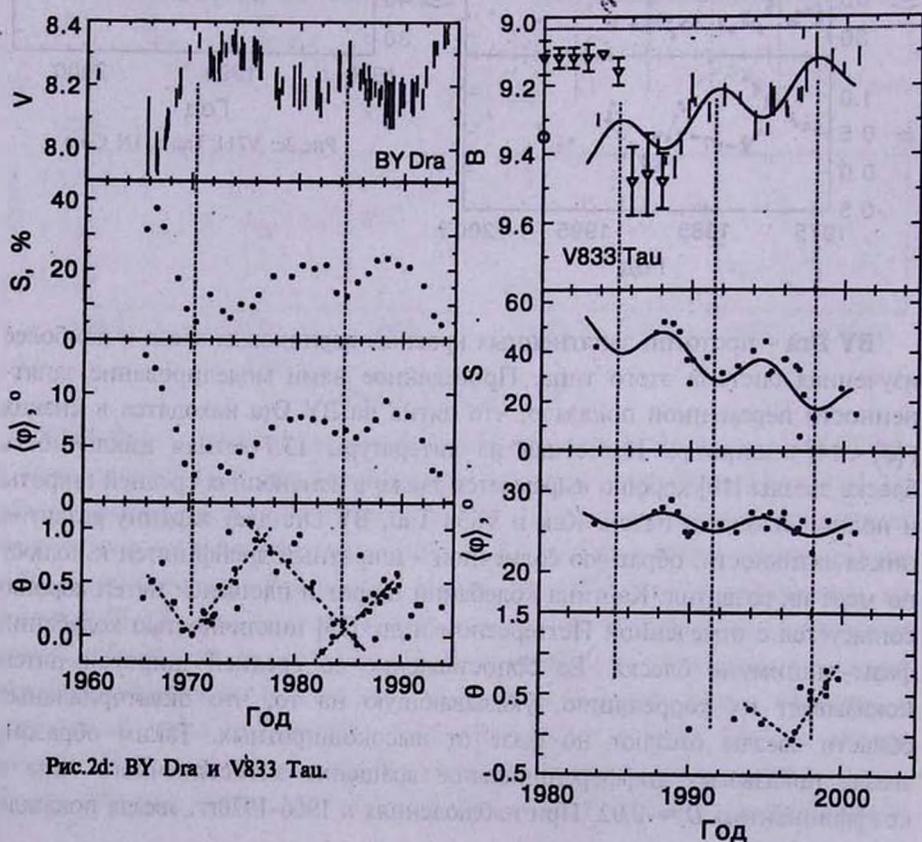


Рис.2d: BY Dra и V833 Tau.

Этот цикл отражается в полных площадях и средних широтах пятен, но с 7.5-летним циклом вспышечной активности коррелирует очень плохо. Зависящий от хромосферного излучения показатель цвета $U-B$ показывает около 1980-1985гг. существенное покраснение. Возможно, это отражает какую-то долговременную (более 40 лет) переменность, аналогичную циклу Глайссберга. В то же время, эмиссия спокойной хромосферы в линии $H\alpha$ не показывает какой-либо цикличности и не коррелирует с запятненностью и средней вспышечной активностью.

IN Com - главный компонент незатменной системы типа RS CVn. Звезда проецируется на центр планетарной туманности LoTr 5, хотя ее физическая связь с центральным O-субкарликом до сих пор однозначно не определена. Мы впервые отмечаем возможную цикличность ($P_{cyc} \approx 7 + 8$ лет) ее среднего блеска [12]. Проведенные нами расчеты зональных моделей показали, что пятна на IN Com находятся на средних широтах ($39-51^\circ$), что хорошо согласуется с результатами доплеровского картирования [26]. Средняя широта пятен также показывает цикличность с характерным временем 7-8 лет. Сходные циклические изменения демонстрирует и полная площадь запятненных областей. Эти две величины показывают антикорреляцию, то есть их поведение аналогично солнечной диаграмме бабочек. Сравнение широт пятен с фотометрическими периодами осевого вращения показывает присутствие на звезде дифференциального вращения солнечного типа с коэффициентом $D_r = 0.05$.

V711 Tau - одна из наиболее ярких и хорошо изученных незатменных систем типа RS CVn. Ее пятна, согласно нашим оценкам, находятся на средних ($30-40^\circ$) широтах, что не согласуется со многими результатами доплеровского картирования, предсказывающими полярные пятна. Средние широты пятен ясно показывают цикличность с двумя характерными периодами (16.5 и 5.5 лет), известными из фотометрии [10]. Аналогичную цикличность демонстрируют и изменения полной площади запятненных областей. Однако мы не обнаружили следов 3-летнего цикла, предсказываемого доплеровским картированием [16]. Изменения средней широты пятен и их полной площади показывают аналог диаграммы бабочек. В эпохи максимального значения средней широты пятен на кривых блеска звезды видны два минимума, соответствующие двум активным долготам, и наблюдается их "переключение" (смена главного и вторичного минимума, т.н. *flip-flop* эффект). В течение развития пятен и понижения их средней широты происходит постепенный рост фазы минимума блеска. Таким образом, запятненные области при дрейфе к экватору начинают вращаться быстрее, то есть на V711 Tau присутствует дифференциальное вращение солнечного типа с коэффициентом $D_r = 0.03$ [12].

VY Ari - яркий компонент спектрально-двойной SB1 системы. Ее

кинематика, сильный инфракрасный избыток, высокое содержание лития и несинхронизованное вращение говорят о том, что переменная скорее является не RS CVn системой, как обычно считается, а молодой PMS-звездой. Фотометрические наблюдения [10] позволили заподозрить цикличность изменения блеска VY Aг1 с характерным временем $P_{\text{ср}} = 14 + 15$ лет. Однако мы считаем, что длительность цикла несколько короче и составляет 9-10 лет. Согласно нашим расчетам [27], пятна на VY Aг1 локализируются в средних широтах от 18 до 28°, а их площадь меняется от 8 до 37% поверхности звезды. Эти величины показывают цикличность с характерным временем около 9 лет, вероятно, наложенную на более длительную (примерно 30 лет) переменность. Как и для большинства рассмотренных звезд, мы видим у VY Aг1 аналог диаграммы бабочек. Сравнение наших оценок средних широт пятен (ϕ) и фотометрических периодов вращения звезды показало их корреляцию, указывая на дифференциальное вращение солнечного типа с коэффициентом $D_r = 0.05$ [28]. Собранные нами [27] данные по хромосферному излучению в линии H α не показали цикличности и какой-либо значимой корреляции с запятненностью.

3. *Обсуждение.* В настоящей работе представлены первые результаты исследования звездных циклов активности, проведенного на основе построения зональных моделей запятненности. Была рассмотрена цикличность пятенной активности 10 красных звезд, находящихся на различных стадиях эволюции: молодых звезд солнечного типа и активных красных карликов, двух систем типа RS CVn и активной молодой PMS-звезды. В табл.2 приведены значения скорости широтного дрейфа пятен, коэффициента дифференциального вращения и длительностей циклов,

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ ПРОГРАММНЫХ ЗВЕЗД

Звезда	Широтный дрейф $\delta\phi$, град/год	D_r	$P_{\text{ср}}$ (широта), годы	$P_{\text{ср}}$ (площадь), годы	Временной интервал, годы
Солнце	-3 + -4	0.19	11	11	
EK Dra	-1.6 + -2.0	0.08	9.2	9.2	20
BE Cet	-	-	-	6.7	22
DX Leo	-2.2 + -2.6	0.04	4.8	6.4	14
LQ Hya	-0.9 + -1.7	0.09	11.2	11.2, 6.75	19
V833 Tau	1.5 + 2.4	-0.006	6.4	6.4	17
BY Dra	0.7 + 1.2	-0.020	13.7	13.7	28
EV Lac	1.0 + 1.4	-0.04	5	5	29
V711 Tau	-1.3 + -2.6	0.03	16.5, 5.5	16.5, 5.5	27
IN Com	-1.0 + -1.3	0.05	7 + 8	7 + 8	20
VY Aг1	-0.8 + -0.8	0.05	9 + 10	9 + 10	29

полученным по колебаниям полной площади и средней широты пятен. Полученные результаты позволяют нам сделать следующие выводы:

Обнаруживаемые циклы пятенной активности имеют характерную длину 4-16 лет, то есть сравнимы с 11-летним циклом Швабе. Длительности циклов, обнаруженных по колебаниям средней широты и площади пятен, хорошо согласуются с известными длительностями фотометрических циклов для всех звезд, кроме DX Leo, где мы нашли циклы полуторной и двойной длительности. Длительности цикла не показывают явной зависимости от спектрального класса звезды, ее скорости вращения и числа Россби. Однако Ола и др. [10] отметили для фотометрических циклов наличие зависимости между числом оборотов звезды в течение цикла $\log(P_{\text{rot}}/P_{\text{syn}})$ и ее угловой скоростью вращения $\log(1/P_{\text{rot}})$. Значения длительностей рассмотренных нами циклов пятенной активности хорошо согласуются с этой зависимостью.

У половины программных звезд сравнительно короткие циклы типа цикла Швабе сочетаются с более длительными и глубокими циклами, аналогичными вековому циклу Глайссберга. У V833 Tau, BY Dra, EK Dra, VY Aг1 этот цикл проявляется в пятенной активности. При этом полная площадь пятен может доходить в глубине вызванного циклом минимума блеска до половины поверхности звезды. У активной вспыхивающей звезды EV Lac вековой цикл проявляется в ее хромосферном излучении как более чем 40-летняя переменность показателя цвета $U-V$. В запятненности звезды эта переменность никак не выражается. Длительности вековых циклов у рассмотренных звезд также согласуются с найденной в [10] зависимостью.

Согласно табл.1, для шести программных звезд существуют независимые определения цикличности по таким индикаторам, как кальциевая активность, вспышки, доплеровское картирование, дифференциальное вращение и переключение активных долгот. Мы видим, что пятенный цикл у этих звезд достаточно плохо коррелирован с активностью в других атмосферных слоях, особенно с излучением хромосферы в линии $H\alpha$ (LQ Hya, VY Aг1, EV Lac [19,20,27,28]). Вероятно, это связано с тем, что рассматриваемые звезды существенно моложе Солнца и их циклическая активность еще не установилась [29].

Независимо от эволюционного статуса, все программные звезды демонстрируют широтный дрейф пятен по мере их развития, то есть роста полной площади. У большинства объектов, кроме трех наиболее холодных звезд V833 Tau, BY Dra и EV Lac, наблюдается аналог солнечной диаграммы бабочек - дрейф пятен к экватору на фазе роста их площади. Скорость широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ довольно сильно варьируется от цикла к циклу и от звезды к звезде, составляя в среднем $\delta\phi = -0.8 + -2.6$ градусов в год, в то время как солнечное значение

скорости широтного дрейфа составляет $\delta\phi^{\odot} = -3 + -4$ градуса в год. Наиболее холодные звезды V833 Tau, BY Dra и EV Lac демонстрируют картину, противоположную солнечной - дрейф пятен к полюсу по мере увеличения их площади. Из рис.3 следует, что скорость широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ зависит от спектрального класса звезды, изменяя знак (направление дрейфа) при достижении критического спектрального класса.

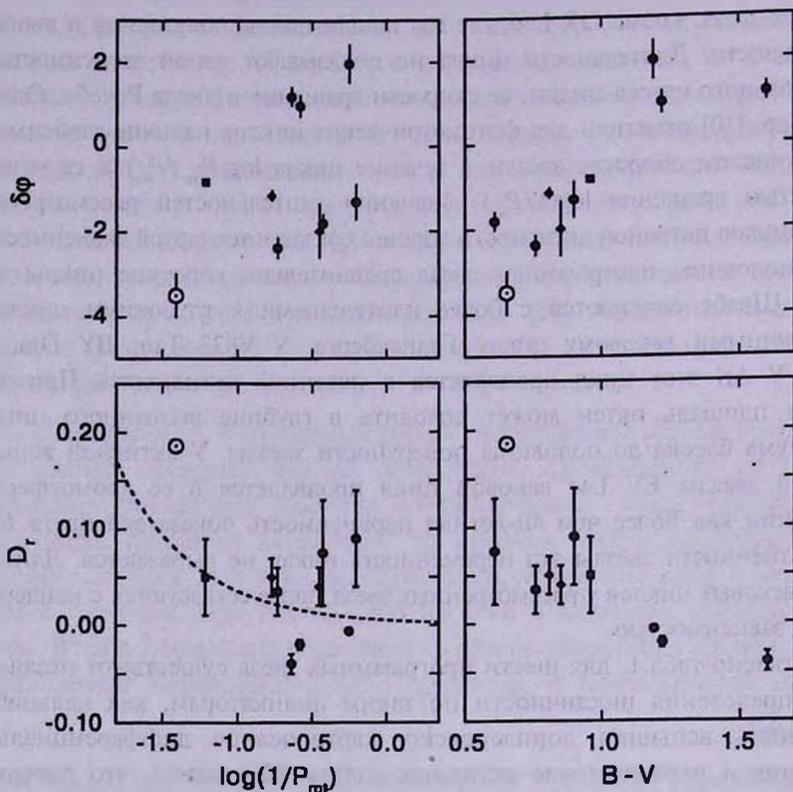


Рис.3. Зависимость коэффициента дифференциального вращения D_t и скорости широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ от угловой скорости вращения звезды $1/P_{rot}$ и показателя цвета $B-V$. Штриховая линия - зависимость Холла [30], обозначения типов звезд соответствуют рис.1.

Для ряда звезд (DX Leo, LQ Hya, EK Dra, IN Com, VY Ari) отмечается плавное уменьшение фотометрического периода, то есть периода вращения звезды на широте пятен, происходящее в фазе с дрейфом пятен к экватору. Для V711 Tau наблюдается аналогичный эффект, проявляющийся как плавный рост фазы минимума блеска, также происходящий синфазно с уменьшением средней широты пятен. Это указывает на присутствие на рассмотренных звездах дифференциального вращения солнечного типа, при котором экватор вращается быстрее полюсов. Сравнение средних широт пятен с фотометрическими периодами

позволило оценить коэффициенты дифференциального вращения звезд, которые в среднем составляют $D_r = 0.03 - 0.09$, в то время как солнечное значение $D_r^\odot = 0.19$. Наиболее холодные звезды, V833 Tau, VY Drg и EV Lac, показали дифференциальное вращение антисолнечного типа с коэффициентом D_r от -0.01 до -0.04 . Отметим, что как диаграммы бабочек, так и дифференциальное вращение солнечного типа обнаружены не только у звезд - родственников Солнца, но и у проэволюционировавших систем типа RS CVn и у молодых PMS-звезд. Переход к антисолнечной картине происходит, по-видимому, для звезд более поздних, чем какой-то критический спектральный класс. На рис.3 приведена зависимость коэффициента дифференциального вращения D_r от спектрального класса и скорости осевого вращения звезды. Из рисунка следует, что наши данные в целом не противоречат найденному Холлом [30] росту D_r к более медленно вращающимся звездам. В то же время, мы видим, что значение D_r по нашей выборке показывает тенденцию уменьшения к более поздним спектральным классам.

Звезды V711 Tau, LQ Hya, VY Aг1 демонстрируют в некоторые эпохи наличие двух активных долгот. Для LQ Hya и V711 Tau наблюдается их периодическое переключение [4,12] (*flip-flop* эффект), синхронизованное с пятненным циклом, при котором переход главной долготы в менее активную происходит вблизи эпохи максимальной широты и минимальной площади пятен, то есть в начале цикла. Для ряда звезд солнечного типа (BE Cet, DX Leo, LQ Hya) видны в эти эпохи резкие скачки фотометрических периодов. Таким образом, для всех указанных звезд мы видим картину, качественно аналогичную солнечному пятнообразованию - зарождение запятненных областей на некоторой активной долготе, их развитие (рост) и дрейф к экватору в течение цикла.

Автор благодарен сотрудникам КраО Р.Е.Гершбергу и С.И.Плачинде за обсуждение работы. Работа частично поддерживалась грантом № 02.07/00300 Украинского фонда фундаментального развития.

Крымская астрофизическая обсерватория,
Украина, e-mail: ilya@crao.crimea.ua

STARSPOTS, ACTIVITY CYCLES AND DIFFERENTIAL
ROTATION ON COOL STARS

I.Yu.ALEKSEEV

We present the first results in searching for stellar cycles by the analysis of the stellar spottedness with the algorithm developed in CrAO. From more than 30 active spotted stars we find 10 targets which demonstrate cyclical variations of middle latitudes and total areas of starspots. Activity cycles detected by this method have a typical cycle length about 4-15 years similarly to the 11-year Schwabe cycle. A most of program stars demonstrate a rough analogue of the solar butterfly diagram. They show a tendency of an average starspots latitude lowering when the total spot area grows. A number of stars (for example young solar analogue LQ Hya or RS CVn-type variable V711 Tau) demonstrate cyclical switches of the dominant activity between two active longitudes (so-called *flip-flop* phenomenon). These switches are synchronized with spottedness cycles and occurring near epoches of the maximum starspots latitudes. At the same time we can see a tendency for decreasing of stellar photometric period (which is tracing by starspots) with the starspots drift toward the stellar equator analogously to the solar differential rotation effect. Unlike the solar case the spottedness cycles do not show clear correlations with the stellar activity observed by chromospheric emission in CaII HK lines (BE Cet, EK Dra, DX Leo), in H α line (LQ Hya, VY Ari, EV Lac) or by cyclical flare activity (EV Lac). For V833 Tau, BY Dra, VY Ari, EK Dra the Schwabe-like cycles co-exist with long Gleissberg-like ones, for which the total spot area can reach up to 50% of the total stellar surface during the cycle minimum.

Key words: *stars: spots: activity cycle*

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Ф.Чугайнов, Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 48, 3, 1973.
2. M.J.Phillips, L.Hartmann, Astrophys. J., 224, 182, 1978.
3. I.Yu.Alekseev, R.E.Gershberg, The Earth and the Universe, eds. G.Asteriadis, A.Bantelas, M.E.Contadakis et al., Thessaloniki, Ziti Editions, 43, 1997.
4. S.V.Berdyugina, J.Pelt, I.Tuominen, Astron. Astrophys., 394, 505, 2002.
5. И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг, Астрон. ж., 73, 579, 1996.
6. И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг, Астрон. ж., 73, 589, 1996.

7. *S.Messina, E.F.Guinan*, *Astron. Astrophys.*, **393**, 225, 2002.
8. *L.Hartmann, B.W.Bopp, M.Dussault et al.*, *Astrophys. J.*, **249**, 662, 1981.
9. *S.Messina, E.F.Guinan*, *Astron. Astrophys.*, **409**, 1017, 2003.
10. *K.Oláh, Z.Kolláth, K.G.Strassmeier*, *Astron. Astrophys.*, **356**, 643, 2000.
11. *L.N.Mavridis, G.Asteriadis, F.M.Mahmoud*, *Compendium in Astronomy*, eds. E.G.Mariolopoulos, P.S.Theocaris, L.N.Mavridis, Reidel. Dordrecht, 253, 1982.
12. *И.Ю.Алексеев, А.В.Кожеевникова*, *Физика космоса*, ред. П.Е.Захарова, Э.Д.Кузнецов, А.Б.Островский и др., Екатеринбург: Изд. УрГУ, 2004, с.277.
13. *S.L.Baliunas, R.A.Donahue, W.H.Soon et al.*, *Astrophys. J.*, **438**, 269, 1995.
14. *J.D.Dorren, M.Güdel, E.F.Guinan*, *Astrophys. J.*, **448**, 431, 1995.
15. *S.Messina, E.F.Guinan, A.F.Lanza, C.Ambruster*, *Astron. Astrophys.*, **347**, 249, 1999.
16. *S.S.Vogt, A.P.Hatzes, A.A.Misch*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **121**, 547, 1999.
17. *М.А.Лившиц, И.Ю.Алексеев, М.М.Кацова*, *Астрон. ж.*, **80**, 613, 2003.
18. *Zs.Kövári, K.G.Strassmeier, Th.Granzer et al.*, *Astron. Astrophys.*, **417**, 1047, 2004.
19. *I.Yu.Alekseev, O.V.Kozlova*, *Astron. Astrophys.*, **396**, 203, 2002.
20. *И.Ю.Алексеев, О.В.Козлова*, *Астрофизика*, **46**, 41, 2003.
21. *И.Ю.Алексеев, Н.И.Бондарь*, *Астрон. ж.*, **75**, 750, 1998.
22. *K.Oláh, K.G.Strassmeier, Zs.Kövári, E.F.Guinan*, *Astron. Astrophys.*, **372**, 119, 2001.
23. *B.R.Pettersen, K.Oláh, W.H.Sandmann*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **96**, 497, 1992.
24. *И.Ю.Алексеев, В.Э.Чаленко, Д.Н.Шаховской*, *Астрон. ж.*, **77**, 777, 2000.
25. *И.Ю.Алексеев*, *Астрон. ж.*, **73**, 81, 1996.
26. *K.G.Strassmeier, B.Hubl, J.B.Rice*, *Astron. Astrophys.*, **322**, 511, 1997.
27. *И.Ю.Алексеев, О.В.Козлова*, *Астрофизика*, **44**, 529, 2001.
28. *И.Ю.Алексеев*, *Астрон. ж.*, **80**, 467, 2003.
29. *Е.А.Бруевич, М.М.Кацова, Д.Д.Соколов*, *Астрон. ж.*, **78**, 827, 2001.
30. *D.S.Hall*, *The Sun and Cool Stars: Activity, Magnetism, Dynamos*, eds. I.Tuominen, D.Moss, G.Rüdiger, Berlin: Springer-Verlag, 1991, p.353.