

ЗАПЯТНЕННОСТЬ МОЛОДЫХ PMS ЗВЕЗД

И.Ю.АЛЕКСЕЕВ

Поступила 27 июня 2013

Принята к печати 19 февраля 2014

На основе долговременных многополосных фотометрических наблюдений 8 молодых PMS звезд построены модели их запятненности. Показано, что средняя площадь пятен доходит до 40% полной поверхности звезды (V824 Aга), в то время как разность температур спокойной фотосферы и пятна составляет от 870 К (AB Dog) до 1700-1800 К (PZ Tel, V1321 Ori, V395 Ser). Пятна расположены на низких (2 - 8°, V343 Nor) и средних (25 - 61°) широтах, в то время как наибольшая широта пятен составляет 16 - 80°. Для звезд PZ Tel, TY Col, V824 Aга, AB Dog отмечена циклическая активность, проявляющаяся в изменениях полной площади и средней широты пятен. Отмечено наличие широтного дрейфа пятен и дифференциального вращения звезды, аналогичных солнечному.

Ключевые слова: *звезды: PMS - звезды: запятненность*

1. *Введение.* Запятненность звезд была обнаружена в середине прошлого века по деформациям кривых блеска затменных двойных систем различных типов. Позднее, в середине 60-х годов, была обнаружена фотометрическая переменность незатменных систем и одиночных звезд, состоящая из вращательной модуляции блеска и медленных вариаций кривой блеска от сезона к сезону, связанных с изменениями конфигурации покрывающих звезду пятен. Подробно история открытия звездных пятен описана нами в [1]. Несмотря на развитие таких прогрессивных методов исследования запятненных звезд, как доплеровское картирование, фотометрические методы до сих пор остаются весьма распространенными и актуальными. Это связано с тем, что доплеровское картирование накладывает сильные ограничения на отношение сигнала к шуму (типичное S/N составляет около 200-400) и спектральное разрешение (обычно около $R=40000$). Хотя четыре программные звезды из восьми исследовались методом доплеровского картирования, подавляющее число молодых T Tauri и weak T Tauri звезд таким наблюдениям недоступны. В настоящей статье мы сравниваем параметры запятненности, получаемые с помощью доплеровского картирования и фотометрических методов.

Получение характеристик звездных пятен (полная площадь пятен, их температура и средняя широта) с помощью фотометрии сводится к решению для разных фотометрических полос и в характерных точках кривой блеска переменной системы уравнений вида:

$$\Delta m_{\lambda} = -2.5 \log \left(\frac{1 - (a_{\lambda} I + b_{\lambda} J)}{1 - u_{\lambda}^{ph} / 3} \right), \quad (1)$$

где мы ввели обозначения: $\alpha_\lambda = 1 - u_\lambda^{ph} - (1 - u_\lambda^{sp})\beta_\lambda$ и $\delta_\lambda = u_\lambda^{ph} - u_\lambda^{sp}\beta_\lambda$. Здесь β_λ - контраст блеска пятна относительно спокойной фотосферы. Параметры u_λ^{phot} и u_λ^{spot} - коэффициенты потемнения к краю в данной длине волны для фотосферы и пятна, зависящие только от характеристик модели атмосферы: температур фотосферы и пятна и ускорения силы тяжести на поверхности звезды. Величины

$$I = \pi^{-1} \iint \cos\alpha \sin\theta \, d\theta \, dl \quad \text{и} \quad J = \pi^{-1} \iint \cos^2\alpha \sin\theta \, d\theta \, dl, \quad (2)$$

характеризуют площадь проекции пятна на картинную плоскость и положение пятен относительно центра диска. Они зависят от принятой конфигурации звездных пятен. Если температурные параметры определяются достаточно легко из многоцветных наблюдений при разумных предположениях о распределении энергии в спектре пятна, то оценка геометрических параметров требует некоторых дополнительных априорных предположений. Этому вопросу посвящена обширная (более 500 названий) литература и многочисленные модели той или иной степени изощренности (см. обзор в книге Гершберга [2]). Часто применяемая в расчетах запятненности иерархическая модель представляет фотометрическое поведение звезды с помощью 1-3 больших пятен, причем главное пятно обычно является высокоширотным или даже околополярным. Такая картина получается практически для всех активных звезд, независимо от спектрального класса и скорости вращения, резко отличаясь от картины солнечных пятен.

Разработанная в КраО зональная модель запятненности [1] показала для звезд различных типов, что их фотометрическое поведение возможно адекватно описать моделью, качественно аналогичной солнечной, содержащей многочисленные мелкие пятна на низких и средних широтах. С другой стороны, подавляющее большинство запятненных звезд (в том числе и Солнце), показывает наличие двух разнесенных на примерно на 180° активных долгот, вблизи которых концентрируются пятна, выходы локального магнитного поля, максимумы вспышечной активности и хромосферной эмиссии. Фотометрически такой эффект проявляется как двугорбая кривая блеска, где два минимума, разделенные примерно на полпериода, соответствуют двум активным долготам. Алексеев [3] разработал для случая двух активных долгот билинейную модель и применил ее к описанию запятненности красных карликов.

Как и в простой линейной модели [1], вся совокупность запятненных областей на звезде представляется двумя симметричными относительно экватора поясами запятненности, которые занимают области с широтами от $\pm\varphi_0$ до $\pm(\varphi_0 + \Delta\varphi)$, с плотностью заполнения пятнами, меняющейся по долготе от некоторого числа f_1 (при значении блеска ΔV_{max} в долготе Θ_3) до единицы (в главном минимуме с глубиной ΔV_1 и долготой Θ_1). Во вторичном минимуме с глубиной ΔV_2 и долготой Θ_2 скважность заполнения характеризуется параметром f_2 причем $0 < f_1 < f_2 < 1$. Такая модель не

накладывает никаких ограничений на широту нахождения пятен, кроме естественного: $\varphi_0 + \Delta\varphi < 90^\circ$. В настоящей работе мы рассматриваем запятненность 8 молодых звезд, не дошедших до Главной последовательности. Их основные параметры приведены в табл.1.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММНЫХ ЗВЕЗД

Звезда	Sp	dupl	M_V mag	ΔV mag	$\Delta(V)$ mag	U-B mag	B-V mag	V-R mag	V-I mag	P_{max} сутки	$V \sin i$ км/с
PZ Tel	G9IV/V	S	4.86	0.22	0.06	0.30	0.77	0.66	1.12	0.94	68
TY Col	G5V	S	4.63	0.10	0.08	0.16	0.70	0.61	1.05	3.72	55
V1321 Ori	K3 wTTs	S	2.01	0.40	0.37	0.88	1.28	1.07	1.89	5.70	75.5
V824 Ara	G5IV+K0IV	SB2	4.04	0.12	0.25	0.35	0.77	0.66	1.13	1.68	37
V343 Nor	K0IV/V	S	4.96	0.20	0.23	0.37	0.82	0.71	1.22	4.24	17.5
FK Ser	K5IV+K7V	SB2	3.78	0.26	0.18	0.70	1.30	1.27	2.30	5.20	
V395 Cep	G 5.8 V	S		0.17	0.10	0.51	0.80	0.65	1.17	3.43	
AB Dor	K1IV	S	5.83	0.18	0.19	0.35	0.84	0.71	1.25	0.51	100

При расчетах запятненности программных звезд мы используем полосы джонсоновской системы *BVRI*, которая позволяет не только корректно отделить геометрический эффект запятненности от температурного, но и учесть широтные эффекты в распределении пятен [1]. Мы не использовали в своих расчетах данные в фотометрической полосе *U*, так как излучение в ней для всех типов запятненных звезд заметно определяется хромосферной активностью программной звезды. В расчетах довольно важно предположение о распределении энергии в спектре пятна. Как и в случае линейной зональной модели, мы предполагаем, что энергия в спектре холодного пятна распределена так же, как в спектре звезды более позднего спектрального класса. Согласно нашим оценкам [1], для активных PMS звезд имеют место следующие соотношения между контрастами пятна в различных полосах:

$$\beta_B = \beta_V^{1.18}, \quad \beta_R = \beta_V^{0.72}, \quad \beta_I = \beta_V^{0.42}. \quad (3)$$

Определяемыми характеристиками рассматриваемой модели являются значения φ_0 , $\Delta\varphi$, f_1 и f_2 , из которых определяются площадь пятен S и их средняя широта $\langle\varphi\rangle = \varphi_0 + \Delta\varphi/2$. Также из модели получается контраст пятен в какой-либо полосе (например β_V), или, соответственно, разность температур спокойной фотосферы и пятен. Входными переменными для моделирования являются: величина ΔV_{max} (разность величин между локальным и абсолютным максимумами блеска), величина ΔV_1 (полная амплитуда вращательной модуляции блеска) и ΔV_2 (глубина вторичного минимума относительно локального максимума блеска), и значения активных долгот Θ_1 и Θ_2 , выраженные в долях периода. Таким образом, мы получаем систему из 12 нелинейных уравнений. Величины T_{eff} и $\log g$, являясь входными параметрами

модели, корректно определяют используемые в моделировании значения коэффициентов потемнения к краю, определенные согласно расчетам Ван Хамме [4] по моделям Куруца для температур от 3500 К до 7000 К и значений $\log g$ от 2.0 до 5.0 км/с². Угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения i оценивается из скорости осевого вращения звезды $V \sin i$, ее радиуса и периода осевого вращения.

Задаваемые значения спектральных классов компонентов двойных систем FK Ser и V824 Ara, и их классов светимости позволяют корректно учесть эффект дилуции во всех полосах. Величины dB/dV , dR/dV , dI/dV , надежно определяемые из наблюдений, позволяют нам переходить в расчетах от полосы V к другим полосам системы $BVRI$, и тоже служат входными параметрами при расчетах. Входные параметры моделирования даны в табл.2.

Таблица 2

ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ ЗАПЯТНЕННОСТИ

Звезда	dU/dV	dB/dV	dR/dV	dI/dV	T_{phot} , К	$\log g$, км/с ²	i , °
PZ Tel	1.37 ± 0.08	1.08 ± 0.05	0.92 ± 0.05	0.72 ± 0.08	5000	4.0	60
TY Col	1.62 ± 0.14	1.19 ± 0.09	0.77 ± 0.04	0.62 ± 0.03	5530	4.0	60
V1321 Ori	1.09 ± 0.04	1.03 ± 0.04	0.87 ± 0.01	0.71 ± 0.02	4850	3.0	62
V824 Ara	1.36 ± 0.05	1.17 ± 0.02	0.72 ± 0.04	0.65 ± 0.02	5400	4.0	52
V343 Nor	1.53 ± 0.03	1.22 ± 0.01	0.84 ± 0.01	0.60 ± 0.01	5150	4.0	90
FK Ser	1.02 ± 0.36	1.25 ± 0.14	0.97 ± 0.04	0.82 ± 0.10	4500	3.5	60
V395 Cep	1.04 ± 0.07	1.02 ± 0.05	0.82 ± 0.04	0.80 ± 0.03	4500	3.5	60
AB Dor	1.41 ± 0.03	1.20 ± 0.02	0.80 ± 0.01	0.59 ± 0.01	5000	4.0	60

2. *Запятненность программных звезд.* Результаты моделирования запятненности программных звезд приведены в табл.3.1-3.8 (таблицы даны в электронной форме на странице <http://www.crao.cimea.ua/~ilya>). В таблицах представлены эпоха наблюдений (колонка 1, epoch), входные переменные моделирования ΔV_{max} , ΔV_1 , ΔV_2 (колонки 2, dV_{max} ; 3, dV_1 ; 4, dV_2), значения параметров пятенной модели ϕ_0 (dp0), $\Delta\phi$ (dphi), f_1 , f_2 , β_V , полная площадь пятен S , выраженная в процентах полной площади звезды (колонки 5-10), значения активных долгот Θ_1 (11) и Θ_2 (12), выраженные в долях периода (колонки 11-12), и ссылки на источник наблюдений (reference, колонка 13).

PZ Tel = HD 174429 - одиночная быстровращающаяся звезда спектрального класса GIV/V, классифицируемая как молодой PMS объект [5,6]. Она показывает полное заполнение фотосферного профиля в линии $\text{H}\alpha$ и сильную эмиссию в CaII HK [5-8]. Переменная известна как активный микроволновый источник [9] и показывает большое содержание лития [10]. Балона [11] и Иннис и др. [8] из анализа лучевых скоростей звезды причислили PZ Tel к движущейся группе Плеяд. Оптическую переменность

нашли Коатес и др. [12], длительную серию наблюдений рассматривают Иннис и др. [13-16], Ллойд-Эванс и Коэн [17], дальнейшие наблюдения приводятся в работах [18-20]. Барнс и др. [21] оценили параметры звездной атмосферы и угла наклона оси вращения. Максимальный блеск звезды $8^m.33$ наблюдался в 1983г. [13]. Значения долгот минимумов блеска приведены в эфемериде [13]:

$$JD = 2444179.256 + 0.94486E. \quad (4)$$

Характеристики запятненных областей даны в табл.3.1 (существует в электронном виде).

Согласно нашим расчетам, расстояние от экватора до нижнего края пояса пятен φ_0 изменяется от 19 до 30° , при ширине пояса $\Delta\varphi = 8-21^\circ$. Это дает среднюю широту пятен $\langle\varphi\rangle = 25-40^\circ$, а максимальная широта пятен не превышает в нашей модели 51° . Параметры скважности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00-0.68$ и $f_2 = 0.46-0.94$, соответственно, что дает наибольшую площадь пятен $S_{\text{платк}} = 16\%$ полной поверхности звезды (в 1982г.). Долговременная кривая блеска звезды, изменения полной площади

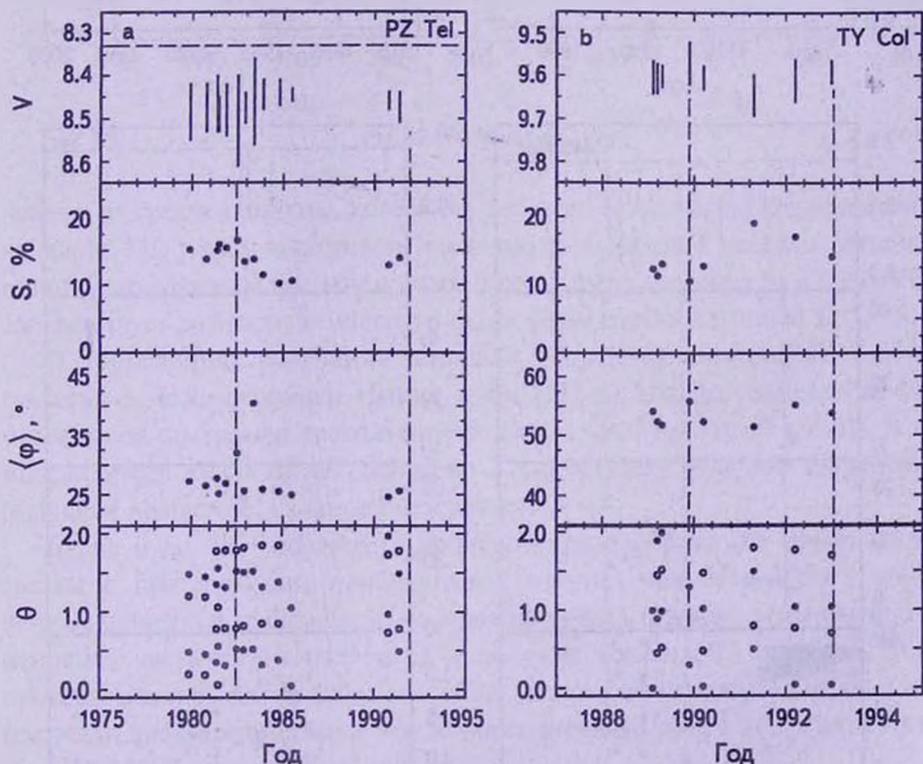


Рис.1. Долговременная кривая блеска (звездные величины), временной ход полной площади пятен S (проценты полной поверхности звезды), средней широты пятен $\langle\varphi\rangle$ (градусы) и значения активных долгот θ (доли периода) программных звезд. Точки - доминирующая долгота, открытые кружки - вторичная. а: PZ Tel, б: TY Col, в: V1321 Ori, д: V824 Aql, е: V343 Nor, ф: FK Ser, г: V395 Cen, ж: AB Dor.

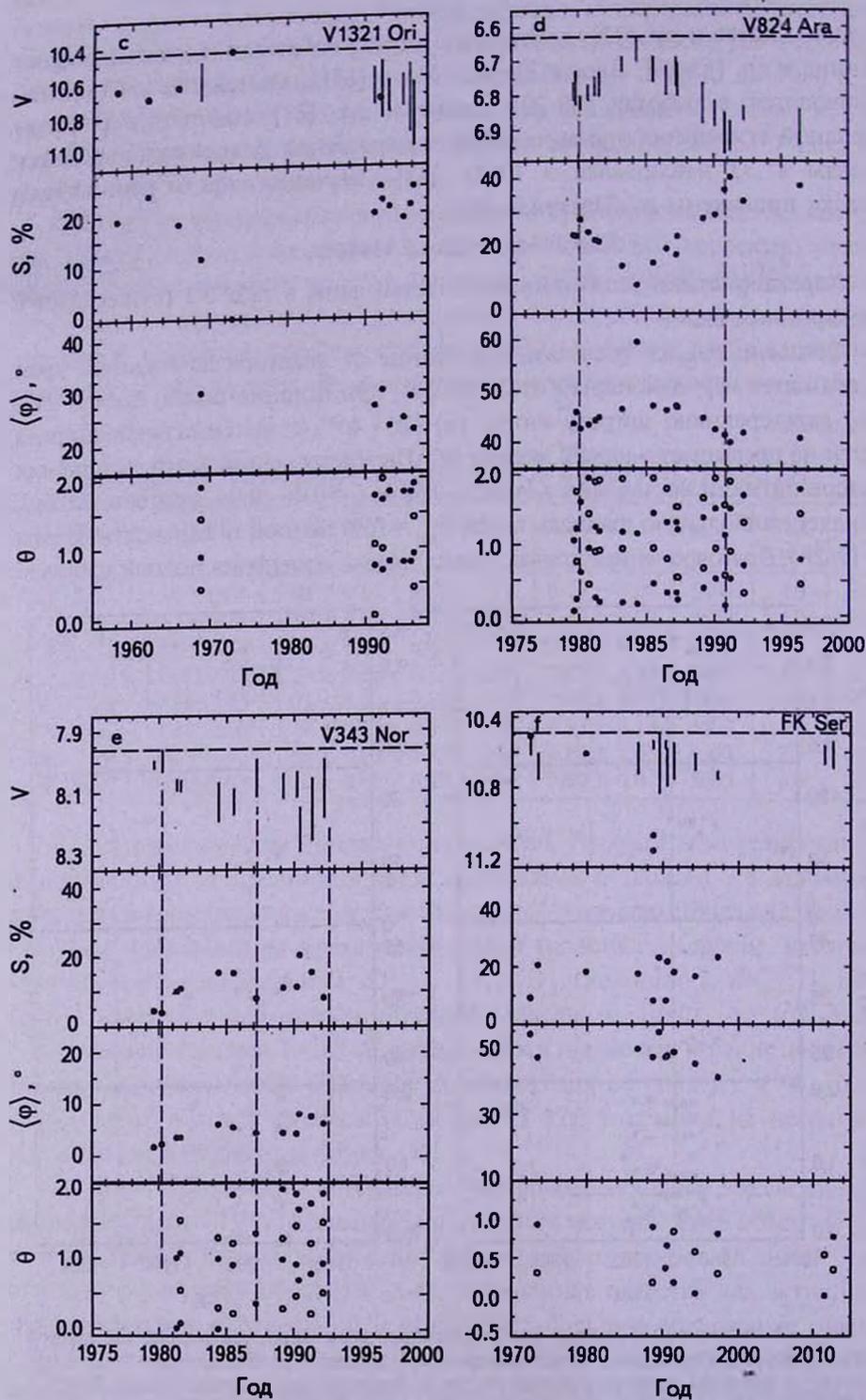


Рис.1. (Продолжение).

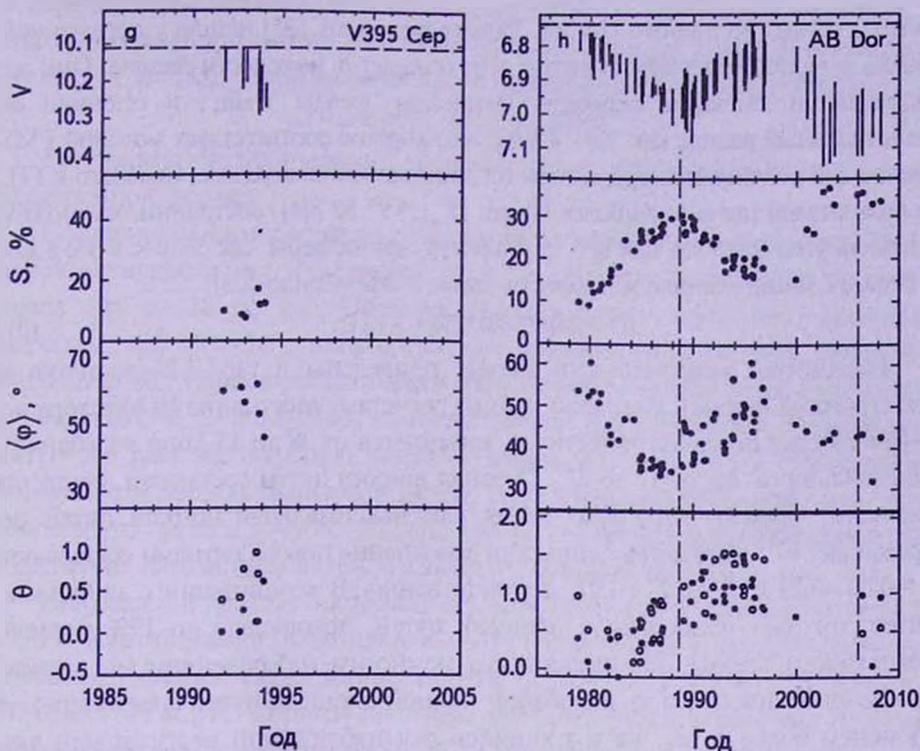


Рис.1. (Окончание).

пятен и их средней широты, колебания значений активных долгот приведены на рис.1а. Мы можем подозревать цикличность изменений площади звездных пятен с характерным временем более 9 лет. Контраст пятен $\beta_V = 0.06 - 0.08$ соответствует разности температур фотосферы пятен $\Delta T = 1680$ К.

О корреляциях колебаний площади и средней широты мы ничего сказать не можем, однако Иннис и др. [13] из анализа изменения фаз минимумов построили трехпятенную модель запятненности звезды. В их модели время жизни пятен составляет 2 года и более, отмечено дифференциальное вращение, сходное с солнечным.

Барнс и др. [21] построили доплеровское изображение поверхности звезды в приближении наибольшей энтропии для лета 1998г., когда фотометрические наблюдения не проводились. Согласно этим расчетам, основная часть пятен находится в высоких (более 60°) широтах, хотя предсказывались пятна и более низких (вплоть до экватора) широт. Они получили дифференциальное вращение солнечного типа с коэффициентом $D_p = 0.01$ (у Солнца $D_p^\odot = 0.19$).

TU Col была впервые обнаружена как рентгеновский источник [22]. Кутиспото и др. [23] обнаружили ее оптическую переменность с периодом 3.72 суток и быстрыми изменениями кривой блеска. Дальнейшая фотометрия была

опубликована Кутиспото [24-26]. Тальяферри и др. [27] нашли у переменной очень высокое содержание лития, что говорит о молодости звезды. Они же определили значение скорости вращения звезды $V \sin i$, и оценили ее минимальный радиус как $3.9 - 4.1 R_{\odot}$, что хорошо соответствует молодой PMS звезде. Из положения переменной на двухцветной диаграмме, близкого к ГП, и показателей цвета в наиболее ярком ($V_{max} = 9^m.52$ [24]) состоянии, мы можем оценить угол наклона как 60° , температуру фотосферы как 5530 K и $\log g$ как 4.0 км/с^2 . Фазы минимумов блеска даны в эфемериде [23]:

$$JD = 2447548.7756 + 3.72E. \quad (5)$$

Параметры запятненности звезды приведены в табл.3.2 (доступна в электронной форме). Согласно нашим расчетам, расстояние от экватора до нижнего края пояса активности ϕ_0 изменяется от 38 до 45° , при колебаниях ширины пояса $\Delta\phi$ от 17 до 27° . Средняя широта пятен составляет, согласно расчетам, $\langle\phi\rangle = 51 - 56^\circ$, в то время как максимальная широта пятен не превышает 67° . Параметры плотности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00 - 0.29$ и $f_2 = 0.27 - 0.97$, соответственно. В комбинации с широтами пятен это дает наибольшую площадь пятен, доходящую до 19% полной поверхности звезды. По имеющимся немногим наблюдениям мы можем заподозрить цикличность колебаний полной площади пятен с характерным временем более 4 лет, но имеющийся ряд наблюдений недостаточен для более конкретных выводов (рис.1b). Контраст пятен β_v составляет $0.29 - 0.33$, что дает температуру пятен $T_{\text{пят}} = 4390 - 4480 \text{ K}$, или $\Delta T = 1050 - 1140 \text{ K}$.

V1321 Ori (EXO 053237 - 0510.1 или Par 1724) - член скопления Трапеции Ориона. Ее активность была открыта по наблюдениям спутника EXOSAT [27]. Звезда находится рядом с туманностью Ориона, но принадлежность ее к туманности остается неясной [28]. Переменная отмечена в каталоге Хербига и Белла [29] как T Tau звезда спектрального класса G8 с сильной линией LiI 6708 Å и эмиссией H α . Позднее Тальяферри и др. [27] также отметили для переменной высокое содержание лития ($\log N(\text{Li}) = 3.6$), говорящее о ее молодости, а также высокую (75 км/с) скорость осевого вращения (соответствующую минимальному радиусу $8.0 - 8.6 R_{\odot}$) и отсутствие признаков двойственности, и подтвердили, что это T Tau звезда. Прейбиш [30] определил спектральный класс звезды как K2 - 3, рассмотрел ее рентгеновскую переменность, и предположил, что это одна из наиболее активных TTS звезд (в частности, показавшая одну из наиболее мощных рентгеновских вспышек), см. также [31].

О фотометрической переменности V1321 Ori впервые говорили Кутиспото и др. [24], обнаружившие вращательную модуляцию блеска с амплитудой около $0^m.2$. Позднее Кутиспото и др. [25,26,32] существенно продлили свой ряд наблюдений. Долговременную переменность блеска рассматривали Нойхойзер и др. [31]. Они также оценили температуру звезды, ее радиус и

ускорение силы тяжести на поверхности, которые затем использовались в доплеровском картировании. Максимальный блеск звезды $V=10^m.44$ достигался осенью 1972г. [33]. Фазы минимального блеска приведены в эфемериде [31]:

$$JD = 2450067.70257 + 5.679E. \quad (6)$$

Результаты моделирования запятнненности приведены в табл.3.3 (в электронной форме).

Согласно нашим расчетам, расстояние от экватора до нижнего края пояса активности ϕ_0 изменяется от 9 до 21°, при колебаниях ширины пояса $\Delta\phi$ от 18 до 28°. Средняя широта пятен составляет, согласно расчетам, $\langle\phi\rangle = 23-30^\circ$, в то время как максимальная широта пятен не превышает 43°. Параметры плотности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00 - 0.38$ и $f_2 = 0.12 - 0.63$, соответственно. В комбинации с широтами пятен это дает наибольшую площадь пятен, доходящую до 25% полной поверхности звезды. Контраст пятен β_V составляет 0.05 - 0.07, что дает температуру пятен $T_{\text{пятн}} = 3080 - 3220$ К, или $\Delta T = 1630 - 1770$ К. О цикличности изменений параметров пятен мы ничего говорить не можем (рис.1с).

Нойхойзер и др. [31] построили доплеровские карты звезды для сезона 1996.2. Картирование было проведено методом Фогта и др. [34] (вариант метода наибольшей энтропии) по линиям FeI 6393.6, 6430.8 Å; CaI 6439.1 Å; TiI 6643.6, 7122.2 Å. Расчеты показали три близкорасположенных темных пятна (холоднее фотосферы на 800 К), а также три полутемных особенности (холоднее фотосферы на 500 К), занимающие широты больше 30°, и покрывающие 12% поверхности звезды. Такая конфигурация воспроизводит кривую блеска в полосе V с точностью около 0^m.03, но весьма сильно отличается от наших результатов расчетов.

V824 Ara - двойная короткопериодическая ($P=1^d.68$) система, состоящая из двух G5IV и K0IV-V компонент близкой массы. Первоначально она была классифицирована как RS CVn система из-за сильного хромосферного излучения в линиях CaII HK, MgII hk, Na [18,35], рентгеновского излучения [36] и фотометрической переменности [37,38]. Как PMS звезду ее классифицировали по сильным линиям лития [39,40] и пространственным скоростям. Наблюдаемая активность звезды не противоречит этой гипотезе. Фотометрическая переменность звезды от сезона к сезону была получена из сравнения первых фотоэлектрических наблюдений звезды, полученных в [37,41,42]. Первые кривые блеска звезды были получены в 1979г. [17], полный ряд наблюдений был получен до 1996г. [43].

Согласно [44], система обладает следующими параметрами: $V_{\text{max}} = 6^m.63$, $M_V = 4^m.73 + 5^m.60$ с точностью из-за неуверенности параллакса около 0^m.05. Спектральные классы компонент составляют Sp = G5IV + K0IV - V; параметры фотосферы главного компонента $T_{\text{эф}} = 5400$ К; $\log g = 4.0$ км/с²; $i = 52^\circ$ учитывают также спектральные наблюдения [43-45] и другие.

Отношения $dB/dV = 1.17$, $dR/dV = 0.72$, $dI/dV = 0.65$ получены из всех опубликованных наблюдений обсерватории Катании [19,20,25,46-48]. Значения активных долгот приведены в эфемериде Паскуини и др. [39]:

$$JD = 2446998.4102 + 1.681652E. \quad (7)$$

Параметры запятненности главной компоненты V824 Aга даны в табл.3.4. (в электронной форме).

Согласно расчетам, расстояние от экватора до нижнего края пояса пятен φ_0 изменяется от 22 до 50°, при ширине пояса $\Delta\varphi = 15-39^\circ$. Это дает среднюю широту пятен $\langle\varphi\rangle = 40-60^\circ$, а максимальная широта пятен составляет в нашей модели 55-69°. Параметры скважности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00-0.74$ и $f_2 = 0.54-0.98$, соответственно, что дает наибольшую площадь пятен $S_{\text{max}} = 40\%$ полной поверхности звезды (в 1991г.). Мы подозреваем, что изменения площади звездных пятен цикличны с характерным временем около 11 лет, причем наблюдается антикорреляция площади и широты пятен (рис.1d). Таким образом, на главной компоненте звезды, согласно нашим расчетам, вероятно наблюдается широтный дрейф пятен к экватору со скоростью $\delta\varphi = -1.16 \pm 0.30$ градусов в год, и дифференциальное вращение солнечного типа с коэффициентом $D_r = 0.007 \pm 0.004$. Контраст пятен $\beta_V = 0.13-0.17$ соответствует разности температур фотосферы пятен $\Delta T = 1460-1590$ К ($T_{\text{спри}} = 3810-3940$ К).

Звезда несколько раз использовалась для доплеровского картирования [43-45,47]. Все эти расчеты предсказывают наличие на яркой компоненте системы холодного околополярного пятна в сочетании с околоэкваториальными деталями. Ожидаемая разность температур фотосферы и пятна различна: около 500 К в [44,45,47] или более близкое к нашим расчетам значение 1700 К [43]. Во всех случаях синтетические кривые блеска звезды, полученные из представленных доплеровских карт, плохо воспроизводят наблюдаемые вариации блеска системы, с разницей 0 - С, доходящей в некоторых фазах до 0^m.05.

V343 Nor = HD 139084 - очень активная одиночная звезда, входящая в группу Плеяд [49]. Она демонстрирует сильную хромосферную эмиссию в линиях CaII НК [50] и H α [51]. Андерс и др. [49] и Рандих и др. [10] отметили для звезды большое содержание лития, а также отметили ее молодость. Переменная известна как сильный источник в микроволновом [9] и EUV [52] диапазонах.

Оптическую переменность звезды открыли Удальский и Гейер [53]. Дальнейшую фотометрию проводили Бопп и др. [18] и Ллойд Эванс и Коэн [17]. Затем большой ряд наблюдений представил Кутиспото [20,25,48,54]. Максимальный блеск звезды $V_{\text{max}} = 7^m.96$ достигался в 1980г. [17]. Параметры фотосферы оценены в работе [49]. Фазы минимума приведены в эфемериде [53]:

$$JD = 2445802.9 + 4.24E. \quad (8)$$

Параметры пятен даны в табл.3.5 (в электронной форме).

Согласно расчетам, расстояние от экватора до нижнего края пояса пятен ϕ_0 составляет 0° , при ширине пояса $\Delta\phi = 3.4 - 16^\circ.0$. Это дает среднюю широту пятен $\langle\phi\rangle = 2 - 8^\circ$, а максимальная широта пятен не превышает в нашей модели 16° . Параметры скважности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00 - 0.66$ и $f_2 = 0.02 - 0.90$, соответственно, что дает наибольшую площадь пятен $S_{\max} = 20\%$ полной поверхности звезды (в 1990г.). Мы можем подозревать цикличность изменений площади звездных пятен с характерным временем около 6 лет. При этом можно говорить об антикорреляции площади и широты пятен. Контраст пятен $\beta_V = 0.22 - 0.28$ соответствует разности температур фотосферы пятен $\Delta T = 1030 - 1200$ К ($T_{\text{спот}} = 3950 - 4120$ К). О цикличности пятенной активности звезды мы ничего сказать не можем (рис.1e).

FK Ser была отмечена Хербигом [55] как post T Tauri система. Она демонстрирует инфракрасную эмиссию [56,57], что говорит о наличии околозвездного диска, как у типичной T Tau звезды. Фотометрическую иррегулярную переменность FK Ser обнаружил в 1971г. Кирсзэнберг [58]. Хербиг [55] отметил сильную эмиссию в линии H α и ее профиль типа P Cug, наличие сильной абсорбции LiI 6707 Å и эмиссию дублета кальция CaII HK. Вращательную модуляцию блеска звезды нашел Чугайнов [59]. В дальнейшем фотометрические наблюдения звезды проводили Батала и др. [60] и Алексеев и Шаховская [61]. Наибольший блеск звезды $V_{\max} = 10^m.49$ достигался в 1989г. [60]. Параметры фотосферы $T_{\text{эф}} = 4500$ К, $\log g = 3.5$ км/с² мы оценили из абсолютной звездной величины и показателей цвета в наиболее ярком состоянии. Значение угла наклона $i = 60^\circ$ мы взяли произвольно, и таким образом, полученные при моделировании широты пятен являются весьма условными. Фазы минимального блеска приведены в эфемериде Чугайнова [59]:

$$\text{JD} = 2441939.200 + 5.20 \text{E}. \quad (9)$$

Параметры запятненности FK Ser приведены в табл.3.6. (в электронной форме).

Расстояние от экватора до нижнего края пояса пятен ϕ_0 составляет в нашей модели $31 - 45^\circ$, при ширине пояса $\Delta\phi = 10 - 47^\circ$. Это дает среднюю широту пятен $\langle\phi\rangle = 41 - 55^\circ$, а максимальная широта пятен не превышает в нашей модели 78° . Полученные значения, при всей своей произвольности, вполне типичны для T Tauri звезд. Параметры скважности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00 - 0.78$ и $f_2 = 0.45 - 0.66$, соответственно, что дает наибольшую площадь пятен $S_{\max} = 23\%$ полной поверхности звезды (в 1989 и 1997г.). Контраст пятен $\beta_V = 0.04 - 0.07$ соответствует разности температур фотосферы пятен $\Delta T = 1420 - 1660$ К ($T_{\text{спот}} = 2840 - 3080$ К).

В сезон 1988.7 у звезды наблюдалась переменность типа UX Ori в виде алголеподобного минимума с глубиной в полосе V около $0^m.5$ ([60], рис.1f).

V395 Ser (AS 507) спектрально исследовалась Хербигом [62]. Спект-

ральный класс ее определен как G 5.8e, отмечено наличие линии лития. Звезда связана с темной туманностью L 1259 [63,64]. По всем этим признакам, свидетельствующим о молодости звезды, она отнесена к типу T Тельца. Связанную с пятнами вращательную модуляцию блеска обнаружили Чутайнов и др. [65]. Последние результаты были представлены в [66]. Для этой звезды отмечены во всех эпохах наличие двух активных долгот, разделенных примерно на полпериода, и быстрые изменения кривой блеска от сезона к сезону в течение нескольких месяцев. Цвета переменной в наиболее ярком состоянии звезды ($V_{max} = 10^m.11$, $U - B = 0^m.51$, $B - V = 0^m.80$, $V - R = 0^m.65$, $V - I = 1^m.17$) вполне характерны для звезды спектрального класса K1 - K4, типичного для большинства T Тау звезд. Если значения температуры фотосферы звезды ($T_s = 4500$ K) довольно хорошо оцениваются из показателей цвета переменной, то ее ускорение свободного падения и угол наклона оси вращения нам не известны, и принимаемые нами значения ($\log g = 4.0$, $i = 60^\circ$) достаточно условны. Значения блеска программных звезд были свернуты с периодом осевого вращения согласно эфемериде [65]:

$$JD = 2448531.345 + 3.43E. \quad (10)$$

Максимальный блеск звезды $V_{max} = 10^m.11$ достигался в 1991-1992гг. Параметры запятненности $\check{V}395$ Сер представлены в табл.3.7. (в электронной форме).

Расстояние от экватора до нижнего края пояса пятен ϕ_0 составляет в нашей модели $39 - 52^\circ$, при ширине пояса $\Delta\phi = 13 - 32^\circ$. Это дает среднюю широту пятен $\langle\phi\rangle = 46 - 62^\circ$, а максимальная широта пятен не превышает в нашей модели 78° . Параметры скважности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00 - 0.46$ и $f_2 = 0.51 - 0.89$, соответственно, что дает наибольшую площадь пятен $S_{max} = 17\%$ полной поверхности звезды (в 1993г.). Контраст пятен $\beta_V = 0.04 - 0.07$ соответствует разности температур фотосферы пятен $\Delta T = 1750 - 1850$ K ($T_{spot} = 2650 - 2750$ K). Это хорошо согласуется с нашими оценками [66].

AB Dor - одна из наиболее изученных активных PMS звезд. Ее оптическая переменность рассматривалась в работах [8,17,51,48,68-96]. Долговременную кривую блеска строили и анализировали Иннис и др. [8,96], Кутиспото и др. [26], Ярвинен и др. [87]. Звезда показывает сильную эмиссию в хромосферных линиях CaII [50]. У переменной найдена вращательная модуляция в рентгене и радиоизлучении, а также вспышечная активность [97,98]. Рандих и др. [10] нашли очень высокое содержание лития, что в сочетании с быстрым вращением позволяет говорить о молодости звезды. Окончательно эволюционный статус AB Dor установил Камерон [99,100].

Максимальный блеск звезды $V_{max} = 6^m.738$ достигался в 1995 и 1996гг. [89], параметры $dB/dV = 1.20$; $dR/dV = 0.80$; $dI/dV = 0.59$ были определены из наблюдений Кутиспото [20,25,26,48,84,85].

При моделировании запятненности мы использовали следующие параметры атмосферы: $T = 5000$ К, $i = 60^\circ$, $\log g = 4.0$ км/с², соответствующие данным доплеровского картирования [81,91,92,99,101,105] ($T_{\text{эф}} = 5000 - 5250$ К, $\log g = 4.0 - 4.3$ км/с², $i = 60^\circ$). Минимумы блеска приведены в эфемериде [8]:

$$JD = 2444296.575 + 0.51479E. \quad (11)$$

Параметры модели запятненности приведены в табл.3.8. (в электронной форме).

Согласно таблице, запятненность AB Drog полностью описывается зональной моделью с расстоянием от экватора до нижнего края полосы пятен $\varphi_0 = 18 - 46^\circ$ и шириной пояса пятен $\Delta\varphi = 14 - 40^\circ$, что дает среднюю широту пятен $\langle\varphi\rangle = 32 - 61^\circ$, а наибольшая широта пятен не превышает в нашей модели 80 градусов. Параметры плотности заполнения поясов пятнами составляют $f_1 = 0.00 - 0.83$ и $f_2 = 0.08 - 1.00$, что дает полную площадь пятен, доходящую до $S_{\text{max}} = 36.8\%$ полной поверхности звезды. Контраст пятен составляет $\beta_V = 0.28 - 0.36$, соответствуя разности температур фотосферы и пятна $\Delta T = 800 - 1000$ К ($T_{\text{фот}} = 4000 - 4200$ К).

Ход среднего блеска звезды, полной площади пятен и их средней широты демонстрирует цикличность с характерным временем около 15-16 лет (рис.1h), и при этом наблюдается антикорреляция площади пятен и их средней широты. Таким образом, мы видим аналог солнечной картины запятненности, где рост полной площади пятен сопровождается их дрейфом к экватору со скоростью $\delta\varphi = -2.87 \pm 0.05$ градусов в год, что вполне сравнимо с солнечным значением. Ход фазы минимума блеска в сравнении с ходом средней широты пятен позволяет говорить о дифференциальном вращении солнечного типа с коэффициентом $D_r = 0.005 \pm 0.002$, в то время как доплеровские карты дают значение $D_r = 0.056$ [101] или $D_r = 0.004$ [102]. Согласно Ярвинен и др. [87], AB Drog демонстрирует цикличность переключения активных долгот с характерным временем 5.5 лет ($P_{\text{сус}}/P_{\text{flip-flop}} = 3:1$).

Запятненность AB Drog неоднократно моделировалась различными методами: фотометрическими (наиболее полный анализ приведен в [87]), так и методами доплеровского картирования в предположении максимальной энтропии [81,91,92,99,101-103] и Зеeman-доплеровского картирования (например [104,105]), которое также позволяет судить о распределении холодных пятен на поверхности звезды. Все эти расчеты демонстрируют довольно большое разнообразие как в определении площадей и температур пятен (холоднее фотосферы на 500 - 1500 К), так и в их широтном распределении, показывая как среднеширотные пояса, так и околополярные детали.

3. Заключение. В настоящей работе мы рассмотрели зональные модели запятненности с учетом двух активных долгот для 8 молодых post T Tau звезд. У звезды TY Col мы можем подозревать наличие 4-летнего цикла активности, который выражается в изменении полной площади пятен. Три

других звезды - AB Dor, PZ Tel, V824 Ara - показывают, как и родственная им звезда VY Ari [3], циклическую переменность среднего блеска звезды, полной площади пятен и их средней широты, аналогичную 11-летнему солнечному циклу Вольфа. При этом мы видим вполне солнечную картину - дрейф пятен к экватору при росте полной площади пятен, и дифференциальное вращение солнечного типа (экватор вращается быстрее полюса). Переменная AB Dor также показывает циклическое переключение активных долгот с характерным временем 5.5 лет, составляющим одну треть от длительности фотометрического цикла. Остальные переменные показывают достаточно хаотическое переключение активных долгот. Параметры циклов активности приведены в табл.4.

Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Звезда	$P_{\text{ср}}$ годы	$P_{\text{др-др}}$ годы	$\delta\phi$ град/год	D_r	$\langle\phi\rangle$	S_{max} %
Солнце	11	3.7	-3 + -4	0.19	10 + 37	0.5
VY Ari	9.5		-0.81 ± 0.05	0.05 ± 0.03	23 + 43	30.9
PZ Tel	>9		-0.6 + -1.1	0.01	25 + 40	16.5
TU Col	>4	-	-	-	51 + 56	19.1
V824 Ara	11		-1.16 ± 0.30	0.007 ± 0.004	40 + 60	40.1
AB Dor	16.5	5.5	-2.87 ± 0.05	0.005 ± 0.002	32 + 61	36.8

Полученные значения площадей, температур и средних широт пятен мы сопоставили с аналогичными результатами, полученными нами для запятненных карликов [3], площадями пятен у малоактивных звезд солнечного типа [106] и параметрами солнечных пятен. Результаты приведены на рисунке 2, из которого мы видим, что полученные параметры звездных пятен хорошо согласуются с найденными ранее зависимостями.

Как было отмечено выше, для четырех переменных были получены доплеровские карты, которые плохо согласуются с нашими результатами, предсказывая для всех звезд наличие высокоширотных и околополярных пятен. Однако для трех звезд - V1321 Ori, V824 Ara и AB Dor - существуют фотометрические наблюдения, синхронные с моментами доплеровского картирования [45,47,81]. Сравнения синтетических кривых блеска, полученных из доплеровских карт, с фотометрическими наблюдениями показывают, что предполагаемая из доплеровских карт картина пятен воспроизводит оригинальную фотометрию в полосе V с точностью 0^m.03 для V1321 Ori [31] и V824 Ara [47], и 0^m.05 для AB Dor [45,81]. Такая точность намного меньше точности представления фотометрии зональной моделью, не превышающей 0^m.01-0^m.02. Аналогичное различие полученных из доплеровских карт синтетических кривых блеска и оригинальных наблюдений мы отметили для

запятненного карлика LQ Нуа [107]. В этой работе мы высказали предположение, что причиной таких расхождений может быть различная чувствительность выбираемых спектральных линий и показателей цвета к температуре.

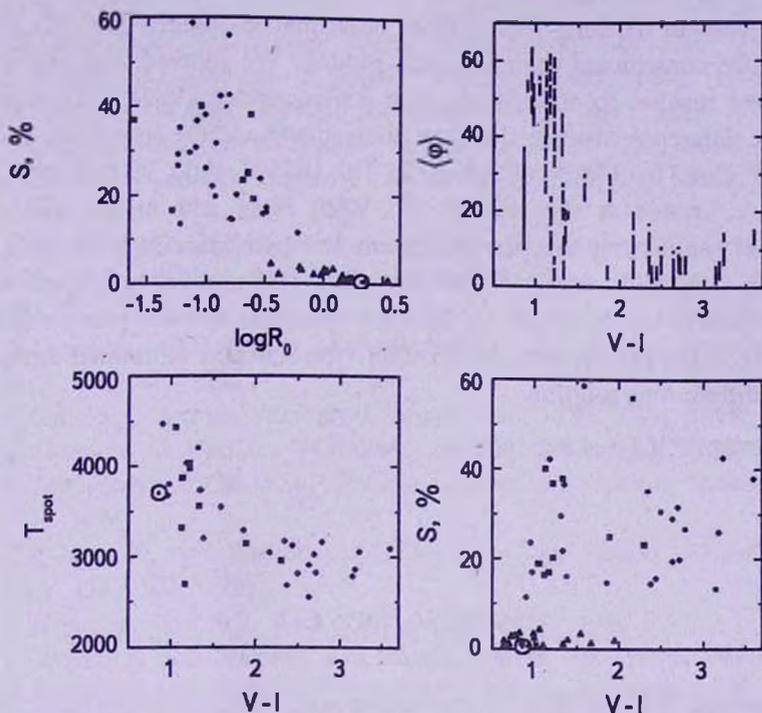


Рис.2. Зависимость наибольшей площади пятен S (в процентах полной поверхности звезды), средней широты пятен $\langle \phi \rangle$ (в градусах) и температуры пятен T_{spot} (в кельвинах) от показателя цвета $V-I$ и числа Россби для программных звезд (квадраты, короткие штрихи), запятненных карликов типа BY Dra [3] (заполненные круги и длинные штрихи), звезд солнечного типа [106] (заполненные треугольники) и Солнца (знак \odot и сплошная линия).

Также различен и вклад хромосферной эмиссии в глубину линий и изменения цвета звезды. Таким образом, для изучения звездной запятненности необходимы комбинированные методы, сочетающие доплеровских карт, многоцветную фотометрию и исследования хромосферной активности.

Автор благодарен за полезные замечания Р.Е.Гершбергу, П.П.Петрову, К.Н.Гранкину (НИИ КраО) и Г.В.Зайцевой (ГАИШ).

НИИ, Крымская астрофизическая обсерватория, Крым,
Украина, e-mail: ilya-alekseev@mail.ru

STARSPOTS OF YOUNG PMS STARS

I.Yu.ALEKSEEV

On the basis of the long-term *UBVRI* photometric observations of 8 young PMS stars we constructed their starspots models. We showed, that the mean starspots area reaches to 40% of the total stellar surface (V824 Ara), and the temperature difference between the quiet photosphere and the spotumbra is from 870 K (AB Dor) to 1700 - 1800 K (PZ Tel, V1321 Ori, V395 Cep). The starspots are located at the low (2 - 8°, V343 Nor) and middle (25 - 61°) latitudes. On the other hand, the maximum starspots latitude is 16 - 80°. For PZ Tel, TY Col, V824 Ara, AB Dor, we show the cyclical activity of stars, which is shown in the variations of the total spotarea, and the mean starspots latitudes. We noted the presence of the solar-type starspots latitudinal drift, and the stellar differential rotation.

Key words: *PMS - stars: starspots*

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Ю.Алексеев, Запятненные звезды малых масс. Одесса: АстроПринт, 2001.
2. Р.Е.Гершберг, Активность солнечного типа звезд Главной последовательности. Одесса: АстроПринт, 2002.
3. И.Ю.Алексеев, Известия Крым. астрофиз. обсерв., 104(1), 272, 2008.
4. W. Van Hamme, Astron. J., 106, 2096, 1993.
5. J.L.Innis, K.Thompson, D.W.Coates, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 223, 183, 1986.
6. N.Houk, Michigan Catalogue of two Dimensional Spectral Types for the HD Stars, 2, Ann. Arbor. Univ. of Michigan, 1978.
7. J.L.Innis, K.Thompson, D.W.Coates, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 233, 887, 1988.
8. J.L.Innis, K.Thompson, D.W.Coates, Th.Lloyd-Evans, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 235, 1411, 1998.
9. O.B.Slee, G.J.Nelson, R.T.Stewart et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 229, 659, 1987.
10. S.Randich, R.Gratton, R.Pallavicini, Astron. Astrophys., 273, 194, 1993.
11. L.A.Balona, South. Africa Astron. Obs. Circ., 11, 1, 1987.
12. D.W.Coates, L.Halprin, P.A.Sartori, K.Thompson, Inform. Bull. Var. Stars, 1849, 1980.
13. J.L.Innis, D.W.Coates, K.Thompson, Th.Lloyd-Evans, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 242, 306, 1990.

14. *J.L.Innis, D.W.Coates, K.Thompson*, Publ. Astron. Soc. Austral., 5, 540, 1984.
15. *D.W.Coates, J.L.Innis, K.Thompson*, Inform. Bull. Var. Stars, 2248, 1982.
16. *J.L.Innis, D.W.Coates, T.T.Moon, K.Thompson*, Inform. Bull. Var. Stars, 2378, 1983.
17. *Th.Lloyd-Evans, M.C.J.Koen*, South. Africa Astron. Obs. Circ., 11, 21, 1987.
18. *B.W.Bopp, J.L.Africano, R.Quigley*, Astron. J., 92, 1409, 1986.
19. *G.Cutispoto, G.Leta*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 121, 369, 1997.
20. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 127, 207, 1998.
21. *J.R.Barnes, A.Collier Cameron, D.J.James, J.-F.Donati*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 314, 162, 2000.
22. *P.Giommi, G.Tagliaferri, K.Beuermann et al.*, Astrophys. J., 378, 77, 1991.
23. *G.Cutispoto, G.Tagliaferri, P.Giommi et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 87, 233, 1991.
24. *G.Cutispoto, G.Tagliaferri, R.Pallavicini et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 115, 41, 1996.
25. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 131, 321, 1998.
26. *G.Cutispoto, S.Messina, M.Rodonó*, Astron. Astrophys., 367, 910, 2001.
27. *G.Tagliaferri, G.Cutispoto, R.Pallavicini et al.*, Astron. Astrophys., 285, 272, 1994.
28. *K.P.Tian, F. van Leeuwen, J.L.Zhao, C.G.Su*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 118, 503, 1996.
29. *G.H.Herbig, K.P.Bell*, Lick Obs. Bull., 1111, 1988.
30. *Th.Preibisch, R.Neuhauser, J.M.Alcala*, Astron. Astrophys., 304, L13, 1995.
31. *R.Neuhauser, S.J.Wolk, G.Torres et al.*, Astron. Astrophys., 334, 873, 1998.
32. *G.Cutispoto, S.Messina, M.Rodonó*, Astron. Astrophys., 400, 659, 2003.
33. *M.V.Penston, J.K.Hunter, A.O'Neill*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 171, 219, 1975.
34. *S.S.Vogt, G.D.Penrod, A.P.Hatzes*, Astrophys. J., 341, 456, 1987.
35. *J.G.Stacy, R.E.Stencel, E.J.Weiler*, Astron. J., 85, 858, 1980.
36. *F.M.Walter, W.Cash, P.A.Charles, C.S.Boyer*, Astrophys. J., 236, 212, 1980.
37. *F.Scaltriti, M.Busso*, Astron. Astrophys., 135, 23, 1984.
38. *A.Udalsky, E.H.Geyer*, Inform. Bull. Var. Stars., 2593, 1984.
39. *L.Pasquini, G.Cutispoto, R.Gratton, M.Mayor*, Astron. Astrophys., 248, 72, 1991.
40. *E.L.Martin, W.Brandner*, Astron. Astrophys., 294, 744, 1995.
41. *R.H.Stoy*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. South. Africa, 22, 157, 1963.
42. *O.J.Eggen*, Inform. Bull. Var. Stars., 1426, 1978.
43. *K.G.Strassmeier, J.B.Rice*, Astron. Astrophys., 360, 1019, 2000.
44. *M.Kürster, A.P.Hatzes, R.Pallavicini, S.Randich*, Cool e, Stellar Systems, and the Sun, M.S.Giampapa, J.A.Bookbinder (eds.), Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser, 26, 249, 1992.
45. *A.P.Hatzes, M.Kürster*, Astron. Astrophys., 346, 432, 1999.
46. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 84, 397, 1990.
47. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 102, 655, 1993.
48. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 119, 281, 1995.

49. *G.J.Anders, J.L.Innis, D.W.Coates, K.Thompson*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 252, 408, 1991.
50. *W.P.Bidelman, D.J.Mc.Connell*, Astron. J., 78, 687, 1973.
51. *B.W.Bopp, J.B.Hearnshaw*, Astrophys. J., 267, 653, 1983.
52. *J.P.Pye, P.A.Mc.Gale, D.J.Allan et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 274, 1165, 1995.
53. *A.Udalsky, E.H.Geyer*, Inform. Bull. Var. Stars., 2692, 1985.
54. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 102, 655, 1993.
55. *G.H.Herbig*, Astrophys. J., 182, 129, 1973.
56. *R.R.Zappala*, Astrophys. J., 187, 257, 1974.
57. *J.A.Hackwell et al.*, Astrophys. J., 192, L.79, 1974.
58. *F.M.Stienon*, Inform. Bull. Var. Stars., 545, 1971.
59. *П.Ф.Чугайнов*, Известия Крым. астрофиз. обсерв., 55, 94, 1976.
60. *C.C.Batalha, G.R.Quast, C.A.O.Torres et al.*, Astron. Astrophys., Suppl. Ser., 128, 561, 1998.
61. *И.Ю.Алексеев, Н.И.Шаховская*, Известия Крым. астрофиз. обсерв., 89, 93, 1995.
62. *G.H.Herbig*, Astrophys. J., 214, 747, 1977.
63. *B.T.Lynds*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 7, 1, 1962.
64. *G.H.Herbig, K.P.Bell*, Lick Observ. Bull., 1111, 1988.
65. *П.Ф.Чугайнов, Г.В.Зайцева, М.Н.Ловкая*, Письма в Астрон. ж., 21, 515, 1995.
66. *П.Ф.Чугайнов, Г.В.Зайцева, М.Н.Ловкая, И.Ю.Алексеев, Н.И.Шаховская*, Физика звездных атмосфер, материалы международной конференции, КраО, 2007.
67. *A.Collier-Cameron*, South. Afr. Astron. Obs. Circ., 11, 57, 1987.
68. *G.J.Anders, D.W.Coates, K.Thompson*, Proc. Astron. Soc. Austral., 10, 33, 1992.
69. *M.W.Pakull*, Astron. Astrophys., 104, 33, 1981.
70. *S.M.Rucinski*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 52, 281, 1983.
71. *M.Kubiak*, Acta Astron., 35, 369, 1985.
72. *S.M.Rucinski*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 215, 591, 1985.
73. *Th.Lloyd-Evans*, South. Africa Astron. Obs. Circ., 11, 73, 1987.
74. *A.C.Cameron, D.K.Bedford, Th.Lloyd-Evans et al.*, Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, M.Zeilik, D.M.Gibson (eds), Berlin: Springer-Verlag, Lecture Notes in Physics, 254, 313, 1986.
75. *L.Jetsu, O.Vilhu, C. la Dous*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 85, 1127, 1990.
76. *G.Cutispoto, M.Rodonó*, Inform. Bull. Var. Stars., 3232, 1988.
77. *M.Kubiak, K.Stepien, M.Kiraga, K.Jahn*, Acta Astron., 45, 279, 1995.
78. *R.Pallavicini, G.Cutispoto, S.Randich*, Surface Inhomogeneities on Late Type Stars, P.B.Byrne, D.J.Mullan (eds), Berlin: Springer-Verlag, Lecture Notes in Physics, 397, 319, 1992.
79. *G.J.Anders, D.W.Coates, K.Thompson, J.L.Innis*, Surface Inhomogeneities on Late Type Stars, P.B.Byrne, D.J.Mullan (eds), Berlin: Springer-Verlag, Lecture Notes in Physics, 397, 163, 1992.
80. *K.Thompson, I.Thompson*, Inform. Bull. Var. Stars, 3320, 1989.
81. *M.Kürster, J.H.M.M.Schmitt, G.Cutispoto*, Astron. Astrophys., 289, 899, 1994.

82. *G.J.Anders*, Inform. Bull. Var. Stars., 3437, 1990.
83. *T.Banks, P.M.Kilmartin, E.Budding*, Astrophys. Space Sci., 183, 309, 1991.
84. *G.Cutispoto*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 111, 507, 1995.
85. *G.Cutispoto, R.Pallavicini*, Surface Inhomogeneities on Late Type Stars, P.B.Byrne, D.J.Mullan (eds), Berlin: Springer-Verlag, Lecture Notes in Physics, 397, 264, 1992.
86. *J.Lim*, Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, M.S.Giampapa, J.A.Bookbinder (eds), Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser., 26, 322, 1992.
87. *S.P.Järvinen, S.V.Berdyugina, I.Tuominen, G.Cutispoto, M.Bos*, Astron. Astrophys., 432, 657, 2005.
88. *E.Budding, G.Hudson, R.Hudson*, Inform. Bull. Var. Stars, 4139, 1994.
89. *M.Bos*, Inform. Bull. Var. Stars, 4111, 1994.
90. *G.J.Anders*, Inform. Bull. Var. Stars., 3985, 1994.
91. *Y.C.Unruh, A.Collier Cameron, G.Cutispoto*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 277, 1145, 1995.
92. *G.A.J.Hussain, Y.C.Unruh, A.Collier Cameron*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 288, 343, 1997.
93. *M.Bos, E.Budding, G.Hudson, R.Hudson*, Inform. Bull. Var. Stars, 4203, 1995.
94. *M.Bos, G.Hudson, R.Hudson, E.Budding*, Inform. Bull. Var. Stars, 4330, 1996.
95. *J.H.M.M.Schmitt, G.Cutispoto, J.Krautter*, Astrophys. J., 500, 25, 1998.
96. *J.L.Innis, E.Budding, K.Oláh*, Inform. Bull. Var. Stars, 5832, 2008.
97. *O.Vilhu, T.Tsuru, A.Collier Cameron et al.*, Astron. Astrophys., 278, 467, 1993.
98. *J.L.J.Leong*, Proc. Astron. Soc. Austral., 10, 364, 1993.
99. *A.Collier Cameron, F.M.Walter, O.Vilhu et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 308, 493, 1999.
100. *A.Collier Cameron, B.H.Foing*, Observatory, 117, 218, 1997.
101. *A.Collier Cameron, J.-F.Donati, M.Semel*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 330, 699, 2002.
102. *A.Collier Cameron, J.-F.Donati*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 329, L23, 2002.
103. *A.Collier Cameron, Y.C.Unruh*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 269, 814, 1994.
104. *G.R.Pointer, M.Jardine, A.Collier Cameron, J.-F.Donati*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 330, 160, 2002.
105. *J.-F.Donati, A.Collier Cameron, M.Semel et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 345, 1145, 2003.
106. *Е.А.Бруевич, И.Ю.Алексеев*, Астрофизика, 50, 233, 2007.
107. *И.Ю.Алексеев, О.В.Козлова*, Астрофизика, 46, 41, 2003.

