

ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ РЯДА ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

© 2023 г. А. В. Кожевникова^{1,*}, И. Ю. Алексеев², В. П. Кожевников¹

¹Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Научно-исследовательский институт “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, Россия

*E-mail: alla.kozhevnikova@urfu.ru

Поступила в редакцию 23.04.2023 г.

После доработки 26.05.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

В работе представлен анализ многолетних фотометрических наблюдений нескольких десятков хромосферно-активных звезд, обладающих активностью солнечного типа (как по нашим собственным наблюдениям, так и по имеющимся в литературе данным). Выполнено моделирование распределения холодных фотосферных пятен на основе зональной модели — получено несколько сотен моделей. Получено, что у большинства звезд пятна расположены на средних и умеренных широтах, максимальные площади пятен могут занимать от 7 до 58% поверхности звезды. Показано, что у ряда звезд можно заподозрить дрейф пятен по широте, как в сторону экватора, так и в сторону полюса, однако скорость такого дрейфа ниже в несколько раз, чем у солнечных пятен. Выявлено наличие циклов звездной активности у 15 звезд длительностью от 3 до 28 лет, выраженных в изменениях блеска системы, а также в изменениях общей запятненности звезды. Статья основана на докладе, сделанном на астрофизическом мемориальном семинаре “Новое в понимании эволюции двойных звезд”, приуроченном к 90-летию профессора М.А. Свечникова.

Ключевые слова: переменные звезды, звездная активность, звездные пятна

DOI: 10.31857/S0004629923090086, EDN: HSIWCM

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы активности, аналогичные тем, что наблюдаются на Солнце, все шире отмечаются на других звездах и, таким образом, раздел солнечно-звездной физики активно развивается [1–3]. Звезды поздних спектральных типов с конвективными оболочками подвержены влиянию внутренних магнитных полей, которые вызывают богатое разнообразие проявлений активности: холодные фотосферные пятна, хромосферные факелы, корональные петли, вспышки, излучение в ультрафиолетовом, рентгеновском и радиодиапазоне [4]. Звездные пятна, представляющие собой наиболее наглядное проявление звездной активности, образуются в местах выхода магнитного поля, достаточного сильного, чтобы подавить конвективные движения в подфотосферных слоях и, таким образом, позволяют получить некоторое представление о структуре магнитного поля звезды. Обзоры свойств активных запятненных звезд и их роли в понимании звездного магнетизма приведены, например, в работах Бруна [1], Штрассмайера [4], Бердугиной [5] и ссылках в них. Изменения параметров пятен с течением времени позволяют исследовать циклы активно-

сти звезд, аналогичные циклу активности Солнца, а также выявлять наличие или отсутствие так называемых активных долгот — областей, в которых преимущественно группируются фотосферные пятна. Поэтому очень важно получать информацию о запятненности звезд на больших временных промежутках, составляющих несколько десятилетий. Знания о динамике параметров звездных пятен со временем позволяют улучшить наше понимание теории звездных магнитных полей и способствуют развитию единой теории солнечно-звездного магнетизма.

Единственная звезда, на которой мы можем изучать фотосферные пятна с высоким пространственным разрешением — это Солнце. Для других звезд мы вынуждены использовать только косвенные методы для получения информации о наличии звездных пятен и их физических параметрах. Для долговременного анализа поведения запятненных звезд наиболее подходящим методом являются фотометрические наблюдения, поскольку они позволяют получать длительные временные ряды наблюдений для каждой звезды на протяжении многих лет. Именно на основе такого мониторинга, проводимого в Крым-

ской астрофизической обсерватории, а также в Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, выполнена данная работа.

Холодные темные пятна фотометрически проявляются во вращательной модуляции блеска звезды с амплитудами от нескольких сотых до десятых звездной величины [5]. Медленные изменения конфигурации пятен вызывают вариации кривой блеска от сезона к сезону, которые могут выражаться не только изменением формы вращательной модуляции блеска, но и изменением общего уровня яркости системы. Из многоцветных фотометрических наблюдений наиболее надежно определяются температура и общая площадь звездных пятен, в то время как оценка широтного распределения пятен представляет наиболее трудную задачу и требует некоторых априорных предположений. Этому вопросу посвящена обширная литература и разработаны различные модели (см. обзор в монографии Гершберга [6]).

В данной работе мы представляем обобщенный анализ запятненности нескольких десятков хромосферно-активных звезд спектральных классов от G до K, относящихся к типам RS CVn и BY Dra, на временной шкале в десятки лет с целью обнаружения долговременных изменений фотосферных пятен и поиска циклов активности.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения активных переменных звезд проводились в двух обсерваториях: в астрономической обсерватории Уральского Федерального университета на 70-см телескопе и многоканальном фотометре, который позволяет одновременно измерять световые потоки двух звезд (исследуемой и звезды сравнения) и фона неба непрерывно в течение всей ночи, а также в Крымской астрофизической обсерватории на 1.25-метровом телескопе АЗТ-11. Была проведена дифференциальная фотометрия в стандартных полосах системы Джонсона U, B, V, R и I, стандартные ошибки определения блеска звезды и ее показателей цвета не превышают 0^m01 . Подробности методики наблюдений и результаты наблюдений опубликованы нами в цикле наших работ [7–9].

У всех наблюдаемых звезд была выявлена вращательная модуляция блеска, связанная с наличием холодных фотосферных пятен. Форма кривых блеска, ее амплитуда и средний уровень показывают изменения от сезона к сезону, что может быть вызвано медленными изменениями конфигурации пятен. Анализ фотометрической переменности в полосах U, B, V, R и I показал, что у всех звезд наблюдается покраснение блеска в фотометрическом минимуме вращательной мо-

дуляции, что подтверждает, что эта модуляция вызвана холодными фотосферными пятнами, как было показано в работе [6].

Для построения долговременных кривых блеска исследуемых звезд мы использовали не только собственные наблюдения, но и данные о фотометрических наблюдениях этих звезд из литературных источников, примеры таких кривых блеска представлены на рис. 1. Горизонтальная штриховая линия показывает уровень исторически максимального блеска за все время наблюдений. Вертикальными линиями обозначены изменения блеска в каждую эпоху наблюдений, которые были получены из данных о вращательной модуляции, точками отмечены эпизодические наблюдения, если таковые имелись. Основные фотометрические данные были взяты из следующих работ и ссылок в них [8–28].

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОСФЕРНОЙ ЗАПЯТНЕННОСТИ ЗВЕЗД

Моделирование запятненности фотосфер было проведено как по нашим собственным наблюдениям звезд, так и по всем доступным в литературе фотометрическим данным. Для моделирования применялась зональная модель запятненности, разработанная в Крымской Астрофизической Обсерватории [29]. В предложенной модели вместо одного-двух пятен на звезде, как в традиционной схеме, рассматриваются общие характеристики запятненной области в целом, и описывается фотометрическое поведение запятненных звезд с помощью картины многочисленных мелких пятен, расположенных в двух широтных поясах, по аналогии с королевскими широтами на Солнце. В отличие от предыдущей версии [30], теперь модель позволяет рассматривать одновременное наличие на звезде двух активных долгот, на которых формируются пятна. Как было показано в ряде работ [4, 5, 31], одновременное присутствие двух активных долгот наблюдается довольно часто у запятненных звезд всех спектральных классов и светимостей, включая Солнце. Важно, что при моделировании в рамках этой модели учитывается долговременное поведение звезды в течение предыдущих десятилетий, что дает возможность оценить значение наибольшего блеска звезды за все время ее фотометрических наблюдений и рассматривать эту величину, с большой вероятностью, как блеск звезды в состоянии, свободном от пятен.

Вся совокупность запятненных областей на звезде представляется двумя симметричными относительно экватора поясами запятненности. Они занимают области с широтами от $\pm\varphi_0$ до $\pm(\varphi_0 + \Delta\varphi)$ с плотностью заполнения пятнами $f(l)$,

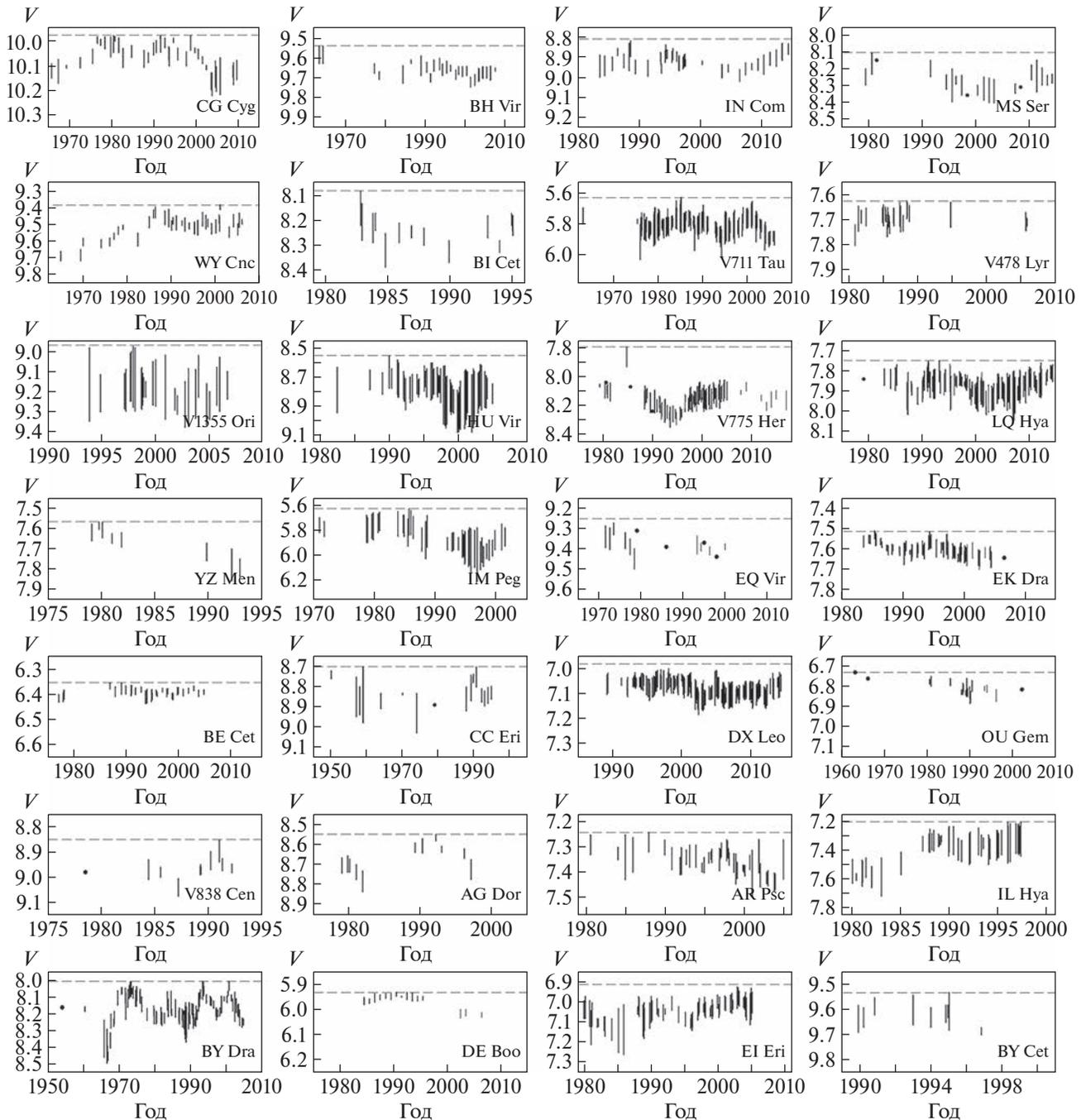


Рис. 1. Долговременные диаграммы блеска хромосферно-активных звезд. Вертикальная линия обозначает величину изменения блеска звезды от минимума до максимума в данную наблюдательную эпоху. Сплошной линией обозначены циклы активности.

меняющейся по долготу от единицы в главном минимуме блеска звезды до некоторых чисел f_1 и f_2 в сезонном максимуме и вторичном минимуме соответственно, причем $0 < f_1 < f_2 < 1$. При моделировании используются для каждого сезона три экстремальных точки кривой блеска — локального максимума, первичного и второго минимумов

блеска (ΔV_{\max} , ΔV_1 и ΔV_2 соответственно) относительно максимального блеска системы за все время наблюдений V_{\max} (столбец 3 табл. 1 и горизонтальные пунктирные линии на рис. 1). При расчетах используются наблюдения в полосах Джонсоновской системы В, V, R и I, которые позволяют не только корректно отделить геометрический эффект запятненности от температур-

Таблица 1. Основные параметры пятен анализируемых звезд

| Звезда | Sp | V_{\max} , mag | Число эпох | ΔT_{spot} , К | $\langle \varphi \rangle$, ° | S_{\max} , % | $\delta \varphi$, °/год | R ($\langle \varphi \rangle$, S) | $P_{\text{сус}}$, годы |
|-----------|----------------|------------------|------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|---|-------------------------|
| LQ Hya | K1V | 7.75 | 166 | 800 | 35–51 | 29.5 | –0.9...–1.7 | – | 18, 11.2, 15, 6.75, 5.2 |
| EQ Vir | K6V | 9.25 | 15 | 960 | 2.2–5.7 | 14.6 | – | 0.74 | – |
| EK Dra | G1V | 7.48 | 82 | 2300 | 46–64 | 23.6 | –1.6...–2.0 | –0.73 | 27, 12, 9.2, 6.5, 4.5 |
| DX Leo | K0V | 6.98 | 137 | 1480 | 38–54 | 17.0 | –2.2...–2.6 | –0.56 | 14, 3.2 |
| OU Gem | K3V + K5V | 6.73 | 24 | 1850 | 18–20 | 16.1 | – | – | – |
| V833 Tau | K5V | 7.88 | 67 | 950 | 20–29 | 58.6 | 0.8 | 0.75 | 20, 6.4 |
| BY Dra | K7V + K8V | 8.00 | 125 | 950 | 2.7–21.5 | 56.0 | 1.2...1.6 | 0.95 | 13.7, 9, 2.7 |
| BE Cet | G2V | 6.352 | 33 | 1570 | 52.6–55.2 | 11.4 | – | – | 6.7, 9.1 |
| CC Eri | K7V + M0V | 8.70 | 17 | 830 | 3.8–17.0 | 35.1 | – | 0.74 | – |
| V838 Cen | K1V + K1V | 8.85 | 11 | 970 | 5.8–12.4 | 36.6 | – | 0.87 | – |
| AG Dor | K1V + K5V | 8.55 | 11 | 1300 | 1.2–7.3 | 21.8 | – | 0.90 | – |
| DE Boo | K2V | 5.93 | 15 | 1200 | 0.4–2.5 | 7.1 | 0.2 | 0.92 | – |
| CG Cyg | G9V + K3V | 9.98 | 39 | 2100 | 0–7 | 18 | 0.8 | 0.93 | 17 |
| BH Vir | G0V + G5V | 9.54 | 26 | 2300 | 32–34 | 26 | – | – | 23 |
| WY Cnc | G5V + M2V | 9.38 | 37 | 1700 | 1–7 | 21 | –0.2 | 0.96 | – |
| BI Cet | G6IV/V + G6V | 8.08 | 14 | 2250 | 26–52 | 47 | – | – | – |
| IN Com | G5III/IV | 8.81 | 40 | 600 | 39–55 | 22 | 0.6 | –0.50 | 7; 20 |
| MS Ser | K2IV + G8V | 8.11 | 19 | 1300 | 23–49 | 24 | –2.5 | –0.76 | – |
| V711 Tau | K1IV + G5V | 5.63 | 255 | 1300 | 30–46 | 41 | –1.9 | – | 16.5; 5.5 |
| V478 Lyr | G8V + M3V | 7.625 | 25 | 1850 | 18–27 | 10 | – | –0.65 | 6.7 |
| IL Hya | K1III/IV + G0V | 7.20 | 48 | 1500 | 40–58 | 43 | – | –0.54 | 13 |
| EI Eri | G5IV | 6.92 | 61 | 1200 | 40–57 | 36 | –1.0...–2.9 | – | 16 |
| BY Cet | G7V + K5V | 8.08 | 9 | 2100 | 2–4 | 12 | – | – | – |
| AR Psc | K1IV + G5/6V | 7.24 | 39 | 600 | 7–17 | 40 | – | 0.73 | – |
| V1355 Ori | K2IV/V + G8V | 8.97 | 28 | 1500 | 40–56 | 34 | – | – | – |
| HU Vir | K1IV | 8.55 | 58 | 1650 | 6–12 | 27 | 0.8 | 0.78 | 6 |
| YZ Men | K1III | 7.52 | 8 | 900 | 23–27 | 46 | – | – | – |
| IM Peg | K2III | 5.55 | 43 | 1500 | 6–13 | 29 | 1.1...–0.9 | 0.89 | 10.1; 28.2 |

ного, но и учесть широтные эффекты в распределении пятен [26]. Данные в фотометрической полосе U мы не использовали, так как излучение в этой полосе для всех типов запятненных звезд искажается хромосферной активностью. В расчетах важную роль играет предположение о распределении энергии в спектре холодного пятна. Мы предполагаем, что эта энергия распределена так же, как в спектре звезды более позднего спектрального типа. Другими важными входными параметрами моделей являются значения угла наклона оси вращения звезды i , температуры фотосферы T_{phot} и ускорения силы тяжести $\lg g$ (необходимые для выбора коэффициентов потемнения к краю). Эти величины брались из литературных источников [10–28].

Определяемыми характеристиками в рассматриваемой модели являются значения расстояния

запятненных поясов от экватора $\pm \varphi_0$, ширина этих поясов $\Delta \varphi$, скважности f_1 и f_2 , контраст пятен в какой-либо полосе (например, β_V). Из этих величин определяются средняя широта пятен $\langle \varphi \rangle = \varphi_0 + \Delta \varphi / 2$, площадь пятен в процентах от полной поверхности звезды $S = (2\pi)^{-1} (\sin(j_0 + Dj) - \sin j_0) \int f(l) dl$, где интегрирование по долготе ведется от 0 до 2π , а также разность температур ΔT между спокойной фотосферой и пятнами.

В табл. 2 приведены точности определения параметров запятненных областей в зависимости от неопределенностей входных параметров моделей. Так, точность определения величин φ_0 и $\Delta \varphi$ может составлять до 10° и определяется, главным образом, ошибками в оценке угла i , а также коэффициента dB/dV . Ошибки параметров скважно-

Таблица 2. Зависимость ошибок в определении параметров запятненных областей от неопределенностей входных параметров моделей

| Параметр | \pm | $\varphi_0, ^\circ$ | $\Delta\varphi, ^\circ$ | f_1, f_2 | β_V | $\Delta T, K$ | $S, \%$ |
|------------------------------|-------|---------------------|-------------------------|------------|-----------|---------------|---------|
| T_{phot}, K | 250 | 1 | 2 | 0.01 | 0.01 | 70 | 1.5 |
| $\lg g$ | 0.5 | <1 | <0.1 | <0.01 | <0.01 | 5 | <0.1 |
| $V_{\text{max}}, \text{mag}$ | 0.01 | 1 | 1.5 | 0.04 | <0.01 | 10 | 1 |
| $i, ^\circ$ | 10 | 5 | 6 | 0.02 | 0.05 | 80 | 6 |
| dB/dV | 0.05 | 6 | 10 | 0.02 | 0.04 | 80 | 10 |
| dR/dV | 0.02 | 3 | 5 | 0.01 | 0.04 | 60 | 7 |
| dI/dV | 0.01 | 2 | 4 | 0.01 | 0.03 | 50 | 3 |

сти f_1 и f_2 зависят, главным образом, от неопределенности экстремальных точек кривой блеска и угла i и, как правило, не превышают 0.04. Площадь пятен S оценивается с точностью не хуже 10%. Ошибка в определении температуры пятна задается неопределенностью в оценке коэффициентов dB/dV , dR/dV , dI/dV , которые определяются по многоцветным фотометрическим наблюдениям, и при их ошибке 0.01–0.05 составляет 50–80 К.

Часть из анализируемых звезд является двойными, поэтому, как и в большинстве других работ, мы считали запятненным главный компонент системы [19, 33–37]. Как было показано, например, в работе [38] у анализируемых короткопериодических систем типа RS CVn температура и светимость вторичных компонентов настолько меньше, чем у главных, что активность вторичного компонента не может дать наблюдаемый фотометрический эффект. У классических систем RS CVn разность светимостей компонентов еще больше. В результате при моделировании запятненности мы учитывали, прежде всего, эффект дилуции от вторичного компонента, т.е. вычитали его вклад в общий блеск звезды.

В настоящее время наиболее успешным способом изучения поверхностных неоднородностей звезды является метод доплеровского картирования, основанный на исследованиях малых деформаций профилей фотосферных линий в присутствии поверхностных неоднородностей. Однако такие исследования требуют высокого отношения сигнал–шум и хорошего спектрального разрешения внутри линии и поэтому могут применяться далеко не ко всем звездам. В настоящее время методом доплеровского картирования исследовано только около 80 объектов из нескольких сотен известных запятненных звезд. Из звезд нашего списка для 11 объектов (IM Peg, II Peg, V711 Tau, LQ Hya, EK Dra, AG Dor, IN Com, V1355 Ori, IL Hya, EI Eri, HU Vir) существуют такие наблюдения хотя бы для одного сезона. Обычно их результаты не противоречат нашим расчетам в определении площадей пятен, но нередко пред-

сказывают более теплые пятна, что возможно связано с меньшей чувствительностью метода к низким температурам пятна. При этом для большинства звезд метод может предсказывать наличие высокоширотных пятен, в то время как наши методы скорее приводят к низко- и среднеширотным пятнам. Алексеев и Козлова [39] построили для опубликованных доплеровских карт LQ Hya синтетические кривые блеска в полосах BVRI и показали, что если экстремальные точки кривых блеска воспроизводились с точностью хуже, чем $0^m.03$, то определенные ими коэффициенты dB/dV , dR/dV и dI/dV воспроизводились с точностью худшей, чем 0.10. То есть доплеровское картирование зачастую не может дать удовлетворительного согласия с фотометрическими наблюдениями.

К сожалению, только для считанных звезд существуют многолетние регулярные доплеровские наблюдения. Из объектов нашей выборки это всего 4 звезды: IM Peg (регулярные наблюдения начаты в 1996 [40]); II Peg (картирование начато в 1992 [41]), V711 Tau (с 1981 г., [42]) и LQ Hya (исследуется с 1991 г., [43]). Для этих переменных мы можем отследить долговременные изменения площадей и средних широт запятненных областей, связанные с циклами активности звезд. Отметим, что длительности этих циклов уже известны из фотометрических наблюдений и совпадают с найденными нами.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренное моделирование запятненности двадцати восьми хромосферно-активных звезд, относящихся к типам RS CVn и BY Dra, на временных интервалах от 11 до 52 лет показало, что фотометрическое поведение всех исследованных звезд хорошо описывается при помощи зональной модели пятен, которая позволяет описывать одновременное присутствие на звезде пятен на двух активных долготах. Полученные параметры запятненных областей всех звезд приведены в табл. 1. Для каждой звезды в таблице содержится

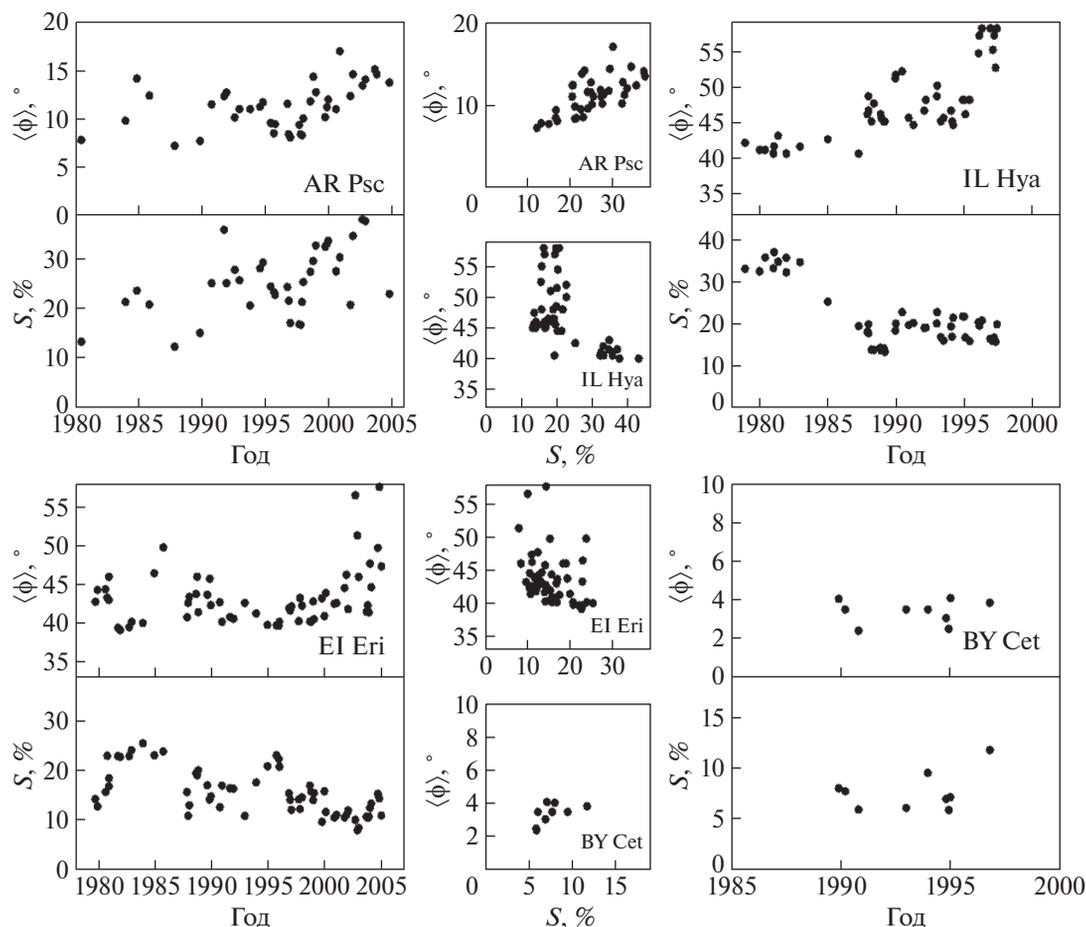


Рис. 2. Примеры изменения средней широты пояса запятненности в северном полушарии и общей площади S , занимаемой пятнами, в зависимости от времени для четырех короткопериодических систем типа RS CVn: AR Psc, IL Hya, EI Eri и BY Cet. В центральной части показаны зависимости средней широты запятненных областей для всех эпох наблюдений от полной площади пятен.

спектральный класс S_p , исторически максимальный блеск V_{\max} , число проанализированных эпох, разница температур пятен и незапятненной фотосферы ΔT_{spot} , диапазон изменения средней широты поясов запятненности $\langle \phi \rangle$ для северного полушария звезды, исторически максимальная общая площадь запятненности звезды S_{\max} в процентах от всей поверхности звезды, а также скорости широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ и коэффициенты корреляции $R(\langle \phi \rangle, S)$, если были обнаружены зависимости широты пятен от их площади, а также циклы активности $P_{\text{сус}}$.

Проведенное моделирование показало, что значения средних широт запятненных областей $\langle \phi \rangle$ заключены между 0° и 64° . Для некоторых звезд были получены данные о высокоширотной активности: например, для звезды IL Hya верхняя граница пятен достигала 81° в 1996 г. У девяти звезд две симметричные относительно экватора полосы запятненности сливаются в одну (расстояние от экватора звезды до ее поясов запятненно-

сти $\phi_0 = 0^\circ$ для всех эпох). Это три системы, состоящие из карликовых компонентов – CG Cyg, WY Cnc, BY Cet, два компонента-субгиганта – HU Vir и IM Peg, а также карлики типа BY Dra: CC Eri, BY Dra, EQ Vir и AG Dor. Половина звезд показывают дрейф пятен по широте, как в сторону экватора, так и в сторону полюса на определенных временных интервалах. Такое поведение можно считать грубым аналогом солнечной диаграммы бабочек Маундера, как впервые было предложено в работе Лившица и др. [44]. Скорости предполагаемого широтного дрейфа пятен, как правило, меньше по модулю аналогичного значения для солнечных пятен в 2–3 раза, но согласуются с оценками для нескольких карликовых звезд спектральных типов G и K [45]. Площади пятен S изменяются от 7 до 58% полной поверхности звезды в различные эпохи наблюдений. Примеры изменения параметров пятен в зависимости от времени, полученные в рамках зональной модели, а также зависимости средних

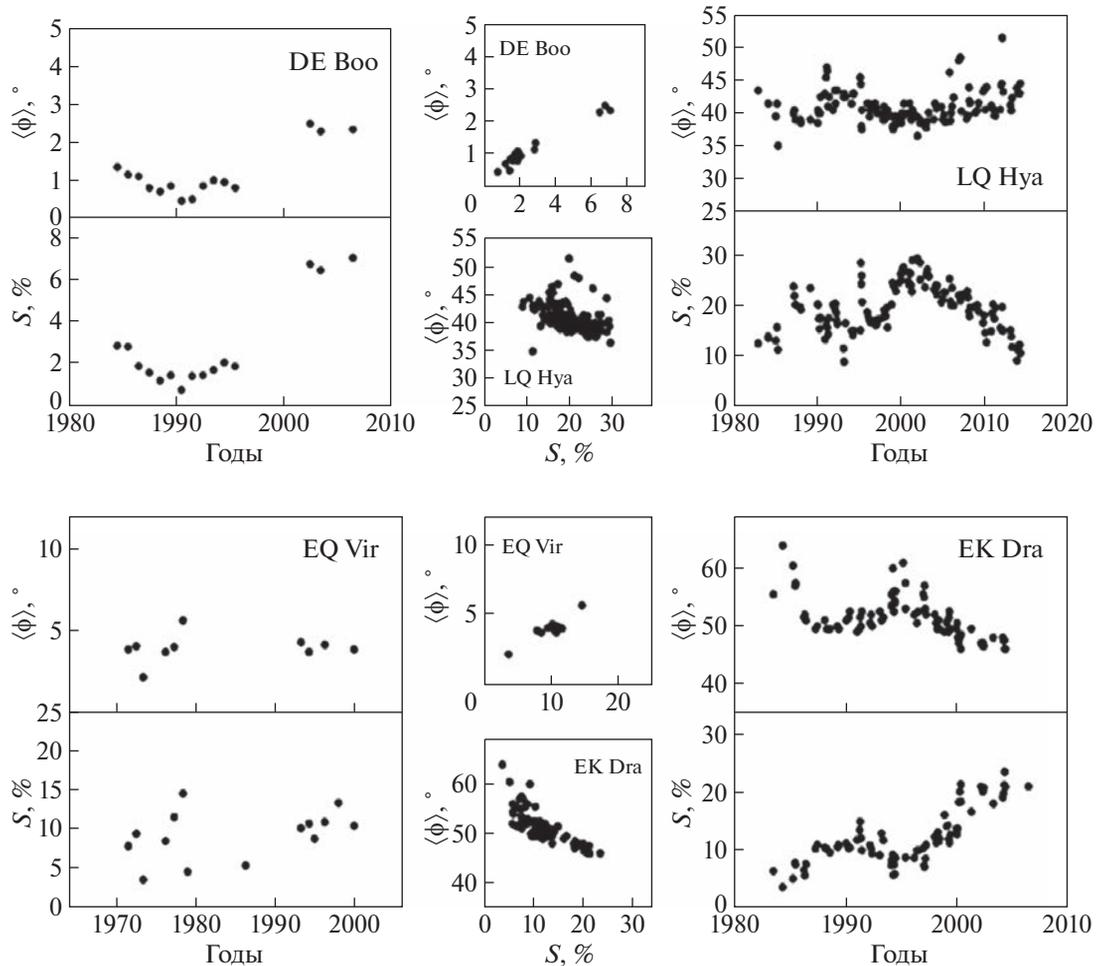


Рис. 3. Примеры изменения средней широты пояса запятненности в северном полушарии и общей площади S , занимаемой пятнами, в зависимости от времени для четырех звезд типа BY Dra: DE Boo, LQ Hya, EQ Vir и EK Dra. В центральной части показаны зависимости средней широты запятненных областей для всех эпох наблюдений от полной площади пятен.

широт запятненных областей от их широты, показаны на рис. 2 (для звезд типа RS CVn) и рис. 3 (для звезд тип BY Dra).

У восемнадцати звезд отмечена как корреляция, так и антикорреляция широты запятненных областей и их площади. Для четырех систем, показывающих увеличение площади пятен при увеличении их широты на всем анализируемом интервале (32–50 лет), коэффициент корреляции $R(\langle\phi\rangle, S)$ очень высок: CG Cyg ($R = 0.93$), WY Cnc ($R = 0.96$), IM Peg ($R = 0.89$), BY Dra ($R = 0.95$). Увеличение площади с уменьшением широты аналогично картине солнечных пятен, отмечено у шести систем, однако коэффициенты корреляции ниже: MS Ser ($R = -0.76$), IN Com ($R = -0.50$), V478 Lyr ($R = -0.65$) и IL Hya ($R = -0.54$), EK Dra ($R = -0.73$), DX Leo ($R = -0.56$). Таким образом, корреляция выше у тех звезд, которые показывают увеличение площади пятен при увеличении

их широты на всем анализируемом интервале времени.

Для некоторых звезд показано, что пятна наблюдаются на двух выделенных, так называемых активных долготах, т.е. наиболее запятненные области расположены вблизи выделенных активных долгот. У некоторых звезд эти области зафиксированы на протяжении всего исследуемого временного периода и разделены примерно на 180° (см. рис. 4). У других звезд наблюдается картина, как у системы WY Cnc: максимумы запятненности дрейфуют с течением времени, оставаясь при этом разделенными примерно на половину орбитального периода. У всех систем время от времени происходит переключение активности с одной долготы на другую – так называемый “flip-flop” эффект, который впервые был обнаружен в звездах типа FK Com, а потом в системах типа RS CVn [46]. Наличие двух выделенных активных

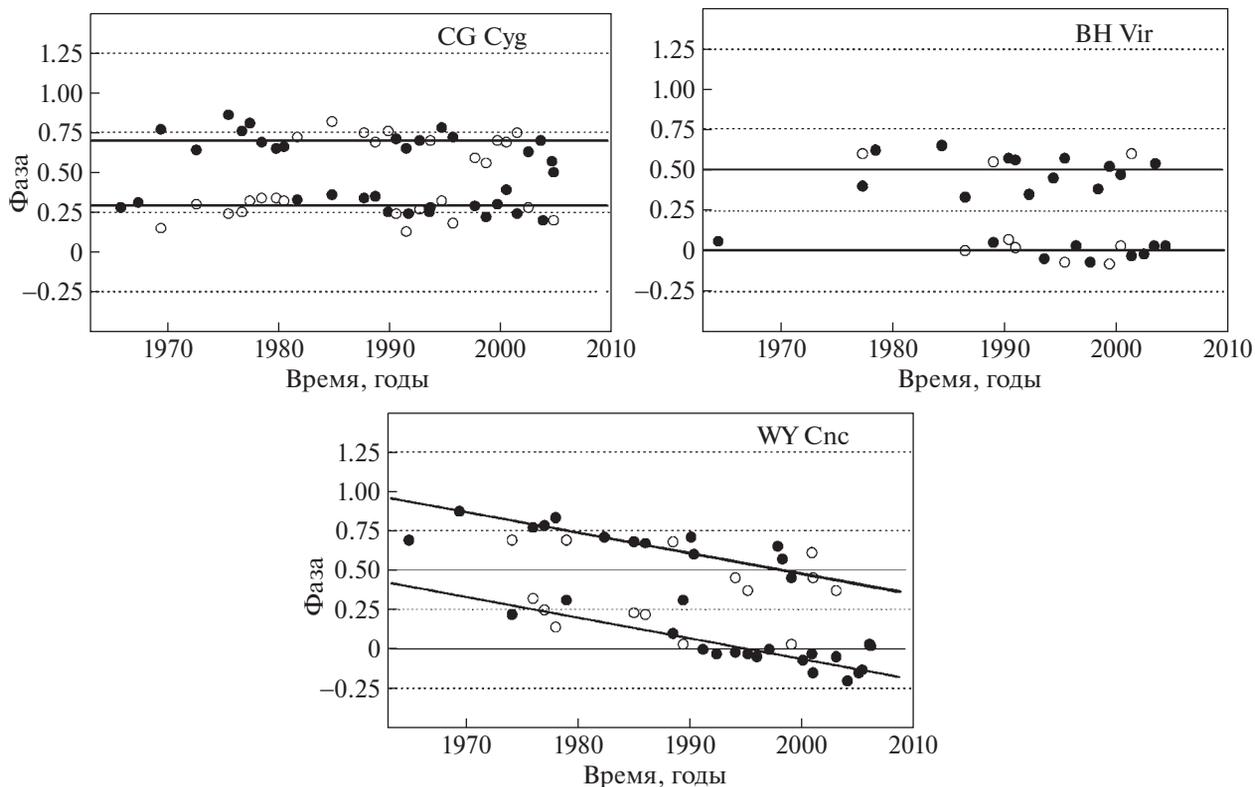


Рис. 4. Изменение положения долгот максимумов запятненности с течением времени для BH Vir, CG Cyg и WY Cnc. Прямые линии обозначают среднее положение активных долгот. Закрашенный символ обозначает доминирующую активную долготу, а пустой символ обозначает вторичную долготу.

долгот может указывать на неосесимметричность звездных магнитных полей.

Периодические изменения фотометрического блеска и широт пятен предполагают наличие циклов активности для 15 звезд, длительность циклов от 2.7 до 28 лет: CG Cyg, BH Vir, AR Psc, V478 Lyr, IN Com, V 711 Tau, EI Eri, II Hya, AD Leo, EV Lac, FF And, V1005 Ori, GT Peg и DT Vir. Циклы активности выражаются в синхронных изменениях площади и широты пятен от времени, а также изменениях общего фотометрического блеска звезды. Длительности определенных циклов согласуются с известными ранее циклами данных активных звезд, найденными как по изменению оптического блеска звезд, так и по анализу хромосферного и рентгеновского излучения — от нескольких до десятков лет [47–49]. Качественной разницы долговременных изменений запятненности между системами типа RS CVn и карликами BY Dra мы не обнаружили, как и между двойными и одиночными звездами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2023-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Brun and M. K. Browning, *Liv. Rev. in Sol. Phys.* **14**, 133 (2017).
2. M. M. Katsova, L. L. Kitchatinov, D. Moss, K. Oláh, and D. D. Sokoloff, *Astron. Rep.* **62**, 513 (2018).
3. V. N. Obridko, M. M. Katsova, and D. D. Sokoloff, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **516**, 1251 (2022).
4. K. G. Strassmeier, *Astron. and Astrophys. Rev.* **17**, 308 (2009).
5. S. V. Berdyugina, *Liv. Rev. in Solar Phys.* **2**, 1 (2005).
6. P. E. Герцберг, *Активность солнечного типа звезд главной последовательности* (Одесса: АстроПринт, 2002).
7. А. В. Кожевникова, В. П. Кожевников, И. Ю. Алексеев, И. А. Юшков, А. А. Дорогов, *Астрон. журн.* **89**, 318 (2012).
8. А. В. Кожевникова, И. Ю. Алексеев, *Астрон. журн.* **92**, 818 (2015).
9. I. Yu. Alekseev and A. V. Kozhevnikova, *Astron. Rep.* **62**, 396 (2018).
10. M. Zeilik, S. Gordon, E. Juderlund, et al., *Astrophys. J.* **421**, 303 (1994).
11. S. A. Nafilan and E. F. Milone, *Astron. J.* **84**, 1218 (1979).
12. C. Lazaro and M. J. Arevalo, *Astron. J.* **113**, 2283 (1997).

13. *M. Afsar, P. A. Heckert, and C. Ibanoglu*, *Astron. and Astrophys.* **420**, 595 (2004).
14. *S. Messina and E. F. Guinan*, *Astron. and Astrophys.* **393**, 225 (2002).
15. *S. Messina and E. F. Guinan*, *Astron. and Astrophys.* **409**, 1017 (2003).
16. *S. P. Jarvinen, S. V. Berdyugina, and K. G. Strassmeier*, *Astron. and Astrophys.* **440**, 735 (2005).
17. *K. G. Strassmeier and J. B. Rice*, *Astron. and Astrophys.* **330**, 685 (1998).
18. *J. D. Dorren, M. Güdel, and E. F. Guinan*, *Astrophys. J.* **448**, 431 (1995).
19. *G. Cutispoto, S. Messina, and M. Rodonó*, *Astron. and Astrophys.* **400**, 659 (2003).
20. *A. Udalski and E. H. Geyer*, *Inform. Bull. Var. Stars.* **2525** (1984).
21. *A. Udalski and E. H. Geyer*, *Inform. Bull. Var. Stars.* **2691** (1985).
22. *G. Cutispoto*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **131**, 321 (1998).
23. *S. V. Berdyugina, J. Pelt, and I. Tuominen*, *Astron. and Astrophys.* **394**, 505 (2002).
24. *S. L. Baliunas, R. A. Donahue, W. H. Soon, et al.*, *Astrophys. J.* **438**, 269 (1995).
25. *S. Messina, E. F. Guinan, A. F. Lanza, and C. Ambruster*, *Astron. and Astrophys.* **347**, 249 (1999).
26. *G. W. Lockwood, B. A. Skiff, G. W. Henry, S. M. Henry, R. R. Radick, et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **171**, 260 (2007).
27. *T. Lloyd-Evans and M. C. J. Koen*, *South. Afr. Astron. Obs. Circ.* **11**, 21 (1987).
28. *G. Cutispoto, S. Messina, M. Rodonó*, *Astron. and Astrophys.* **367**, 810 (2001).
29. *И. Ю. Алексеев*, *Изв. Крым. Астрофиз. Обс.* **104**, 272 (2008).
30. *И. Ю. Алексеев, P. E. Гершберг*, *Астрон. журн.* **73**, 589 (1996).
31. *K. Olah*, *Astrophys. and Space Science* **304**, 1–4, 145 (2006).
32. *И. Ю. Алексеев*, *Запятненные звезды малых масс* (Одесса: АстроПринт, 2001).
33. *D. P. Kjurkchieva, D. V. Marchev, and W. Ogloza*, *Astron. and Astrophys.* **400**, 623 (2003).
34. *D. P. Kjurkchieva, D. V. Marchev, P. A. Heckert, and C. A. Shower*, *Astron. and Astrophys.* **424**, 993 (2004).
35. *M. Zeilik, M. Ledlow, M. Rhodes, et al.*, *Astrophys. J.* **354**, 352 (1990).
36. *D. Kjurkchieva, D. Marchev, and W. Ogloza*, *Astron. and Astrophys.* **415**, 231 (2004).
37. *E. Budding and M. Zeilik*, *Astrophys. J.* **319**, 827 (1987).
38. *P. Vivekananda Rao, M. B. R. Sarma, and B. V. N. S. Praksa Rao*, *J. Astrophys. Astron.* **12**, 225 (1991).
39. *I. Yu. Alekseev and O. V. Kozlova*, *Astron. and Astrophys.* **396**, 203 (2003).
40. *S. V. Berdyugina, A. V. Berdyugin, I. V. Ilyin, and I. Tuominen*, *Astron. and Astrophys.* **360**, 272 (2000).
41. *S. V. Berdyugina, I. V. Berdyugin, I. V. Ilyin, and I. Tuominen*, *Astron. and Astrophys.* **350**, 626 (1999).
42. *S. S. Vogt, A. Hatzes, A. Misch, and M. Kürster*, *Astrophys. J. Suppl.* **121**, 547 (1999).
43. *K. G. Strassmeier, J. B. Rice, W. Wehlau, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **268**, 671 (1993).
44. *М. А. Лившиц, И. Ю. Алексеев, М. М. Кацова*, *Астрон. журн.* **80**, 613 (2003).
45. *M. M. Katsova, M. A. Livshits, and G. Belvedere*, *Solar Phys.* **216**, 353 (2003).
46. *S. V. Berdyugina and I. Tuominen*, *Astron. and Astrophys.* **336**, 25 (1998).
47. *Е. А. Бруевич, М. М. Кацова, Д. Д. Соколов*, *Астрон. журн.* **78**, 827 (2001).
48. *D. S. Hall*, *Astrophys. J.* **380**, L85 (1991).
49. *K. Oláh, Z. Kolláth, and K. G. Strassmeier*, *Astron. and Astrophys.* **356**, 643 (2000).

PECULIARITIES OF LONG-TERM SPOT ACTIVITY OF SOME LATE SPECTRAL-TYPE STARS

A. V. Kozhevnikova^a, I. Yu. Alekseev^b, and V. P. Kozhevnikov^a

^a*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia*

^b*Research Institute "Crimean Astrophysical Observatory", Nauchny, Russia*

We present an analysis of long-term photometric observations of several dozen chromospherically active stars with solar-type activity (both from our own observations and from data available in the literature). The distribution of cold photospheric spots has been modeled based on a zonal model — several hundred models have been obtained. It has been found that the majority of stars have spots located at middle and moderate latitudes, the maximum spot areas can occupy from 7 to 58% of the star's surface. It is shown that for some stars we can suspect the drift of spots in latitude, both towards the equator and towards the pole. However, the speed of such a drift is several times lower than that of sunspots. The presence of stellar activity cycles in 15 stars was revealed: cycles last from 3 to 28 years and expressed in changes in the brightness of the system, as well as in changes in the total spottedness of the star. The paper is based on a talk presented at the astrophysical memorial seminar "Novelties in Understanding the Evolution of Binary Stars", dedicated to the 90th anniversary of Professor M.A. Svechnikov.

Keywords: variable stars, stellar activity, star spots