

## ЦИКЛЫ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ У ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

**И.Ю. Алексеев, О.В. Козлова**

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия  
ilya-alekseev@mail.ru

### STARSPOT ACTIVITY CYCLES OF LATE-TYPE STARS

**I.Yu. Alekseev, O.V. Kozlova**

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchnyi, Russia  
ilya-alekseev@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены методы и результаты исследования холодных пятен (электрофотометрия и фотопластинки), активных долгот, хромосферных неоднородностей, вспышечной активности и их долговременных изменений у звезд поздних спектральных классов.

**Ключевые слова:** звездные пятна, долговременные изменения площади, фотометрическая переменность, активные долготы, хромосферная активность.

**Abstract.** We considered the methods and results of observations of long-term variations of stellar spots (electrophotometry and photographic photometry), flip-flop effect, the chromospheric inhomogeneities, and flare activity of the late-type stars.

**Keywords:** starspots, long-term spotarea variations, photometric variability, active longitudes, chromospheric activity.

### ВВЕДЕНИЕ

Цикличность солнечной активности была открыта в середине XIX в. любителем астрономии Генрихом Швабе, и сейчас 11-летний солнечный цикл, регулирующий все стороны проявления активности Солнца от чисел Вольфа и солнечной запятненности, числа и размеров активных областей в хромосфере, частоты и интенсивности вспышек до структуры солнечной короны, характеристик солнечного ветра, солнечно-земных связей, является одним из наиболее известных явлений в жизни Солнца. Помимо этого цикла (или 22-летнего магнитного) известны также вековой (80–90 лет) цикл Глайссберга и Маундеровские минимумы, происходящие раз в два-три столетия (соответственно Маундеровский в 1645–1715, Шпереровский в 1450–1540 и Вольфовский в 1280–1340 гг.), а также сверхдлинные тысячелетние циклы (например, 2300-летний цикл Холлстатта). Такие длительные вариации солнечной активности уже исследуются с помощью толщин годовых колец деревьев, содержания в них изотопа  $^{14}\text{C}$ , слоистой структуры гренландских и антарктических льдов и позволяют говорить о изменениях солнечной активности на протяжении нескольких тысячелетий.

В настоящее время проявления солнечной активности, такие как звездные вспышки, пятна, активность хромосферы и короны — отмечены у многих звезд с внешними конвективными оболочками. Это и молодые звезды, покинувшие стадию Т Тельца, и красные карлики типа BY Dra, и содержащие гиганты и субгиганты двойные системы типа RS CVn, и быстровращающиеся одиночные гиганты Асимптотической ветви типа FK Com. Исследование циклической активности таких звезд позволяет говорить об изучении механизма генерации звездных магнитных полей и делать выбор между различными моделями звездного динамо. В настоящем докладе мы рассмотрим циклы пятенной активности звезд поздних спектральных классов.

### ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД

Пятенная активность звезд проявляет себя прежде всего как небольшое (около  $0.^m10$ – $0.^m20$ ) пони-

жение блеска звезды, когда группа холодных пятен проходит через луч зрения. Для Солнца, как звезды, такой фотометрический эффект в полосе V составляет около  $0.^m001$ . Эффект пятен на звездах был впервые отмечен Джеральдом Кроном [Kron, 1947] как деформация затменных кривых блеска двойных звезд и впоследствии Чугайновым [1966] для одиночных переменных. При этом кривая блеска звезды меняется от сезона к сезону вслед за изменениями конфигурации пятен.

Многочисленные результаты долговременной фотометрии запятненных звезд были получены с помощью наземных фотометрических телескопов-автоматов малого (80–1.25 см) диаметра. Такие результаты были опубликованы в большой серии статей (например, [Oláh et al., 2016]). Уже первые наблюдения показали наличие у программных звезд циклов активности с характерным временем 10–16 лет и амплитудой переменности до  $0.^m16$ . При этом эти циклы сочетаются с более коротким (6–7 лет) малоамплитудными циклами, и даже иногда с третьим циклами с характерным временем около 2–3 лет. Более поздние исследования показали небольшую (порядка года-двух) переменность длительности основного цикла от сезона к сезону.

Добавление к электрофотометрии архивов фотопластинок (рис. 1) позволило обнаружить для ряда звезд длительные Долговременная переменность фотосферной активности холодных звезд была обнаружена для некоторых объектов при исследовании архивов фотопластинок длительные (порядка 50–80 лет) изменения среднего блеска некоторых звезд с амплитудой до  $1.^m2$ , по-видимому аналогичные вековому циклу Глайссберга [Phillips, Hartmann, 1978; Bondar, 1995].

### ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗДНЫХ ПЯТЕН

Фотометрические наблюдения успешно использовались для определения таких параметров пятен, как площадь и температура. Для хорошо исследованных звезд рассмотрение длительных фотометри-

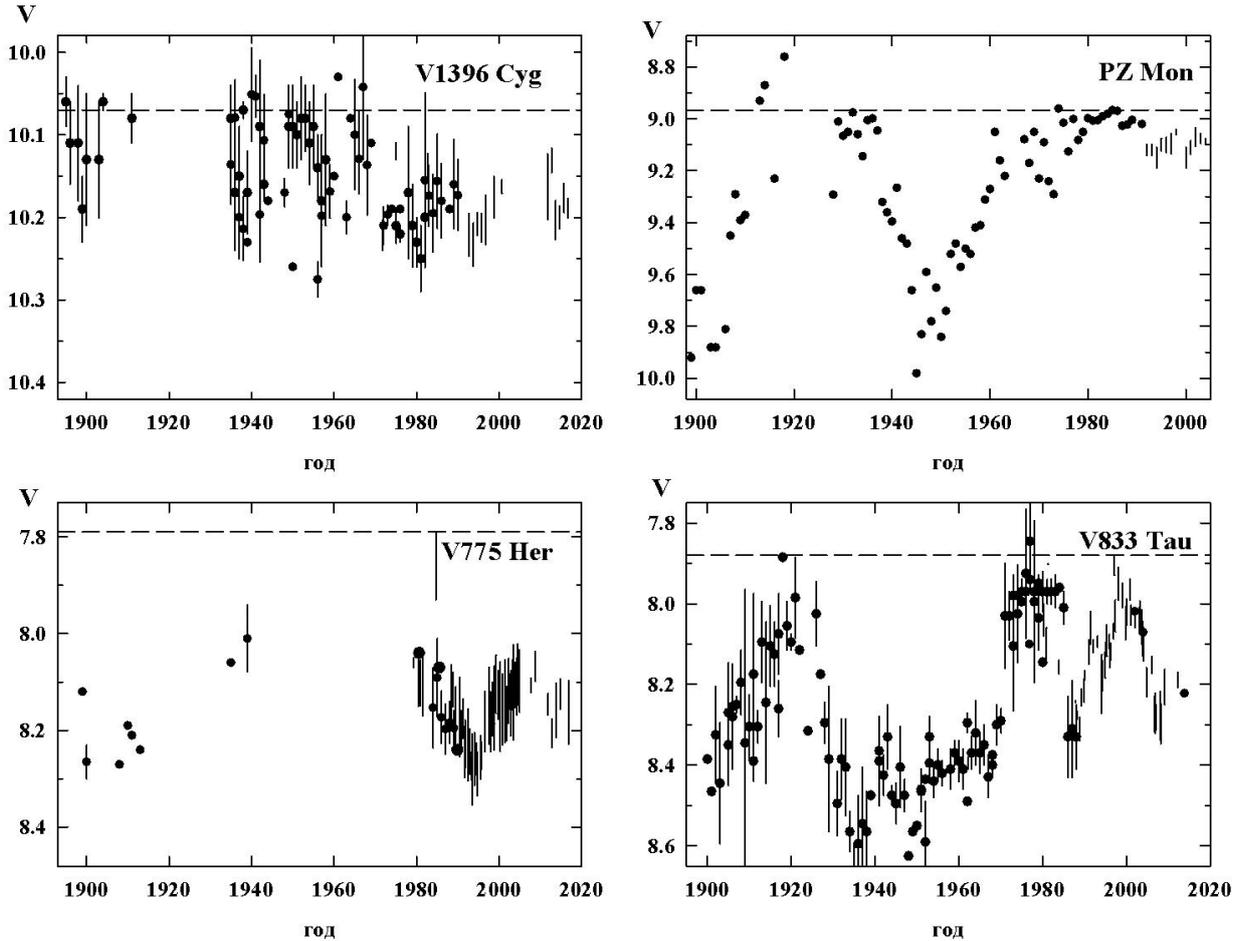


Рис. 1. Долговременные изменения блеска запятненных звезд по данным измерений фотопластинок [Bondar, 1995] (точки с барами ошибок). Также приведены данные электрофотометрии (вертикальные штрихи обозначают пределы вращательной модуляции блеска в данную эпоху)

ческих рядов позволило сделать вывод о наличии примерно у половины звезд выборки циклических изменений полной площади и иногда средней широты покрывающих звезду пятен [Ribarik et al., 2003; Алексеев, Кожевникова, 2017; 2018; Berdyugina et al., 2001]. Длительности этих колебаний (5–40 лет) хорошо согласуются с известными длительностями фотометрических циклов рассмотренных звезд.

Однако наиболее успешным способом изучения поверхностных неоднородностей звезды является метод Доплеровского картирования, основанный на исследованиях малых деформаций профилей фотосферных линий в присутствии поверхностных неоднородностей. Амплитуда сдвига таких деформационных деталей (обычно выглядят как небольшая квазиэмиссия), их ширина и интенсивность позволяют судить о параметрах запятненных областей и их расположении на поверхности звезды. Такие исследования требуют высокого отношения сигнал/шум и хорошего спектрального разрешения внутри линии. Поэтому в настоящее время методом Доплеровского картирования исследовано около 80 объектов из нескольких сотен известных запятненных звезд [Berdyugina, 2005; Strassmeier, 2009]. И, к сожалению, только для считанных звезд существуют многолетние регулярные Доплеровские

наблюдения. Прежде всего, это следующие пять звезд: IM Peg II Peg, V711 Tau; LQ Hya и AB Dor, исследуемые с 80-х гг. 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.

### ДВИЖЕНИЕ ПЯТЕН И ВРАЩЕНИЕ ЗВЕЗД

Согласно всем методам картирования пятен, звезды, независимо от эволюционного статуса, демонстрируют широтный дрейф пятен по мере их развития, т. е. роста полной площади. Даже простейшие расчеты фотометрических моделей позволили заподозрить у 13 звезд из полусотни дрейф пятен в сторону экватора, в то время как у 20 звезд вероятно широтный дрейф происходит по направлению к полюсу [Алексеев, Кожевникова, 2018]. Дрейф пятен к полюсу отмечается и методами Доплеровского картирования (например, [Vogt et al., 1999] для V711 Tau).

Очень часто запятненные звезды демонстрируют периодические изменения периода осевого вращения в зависимости от фазы цикла активности, что указы-

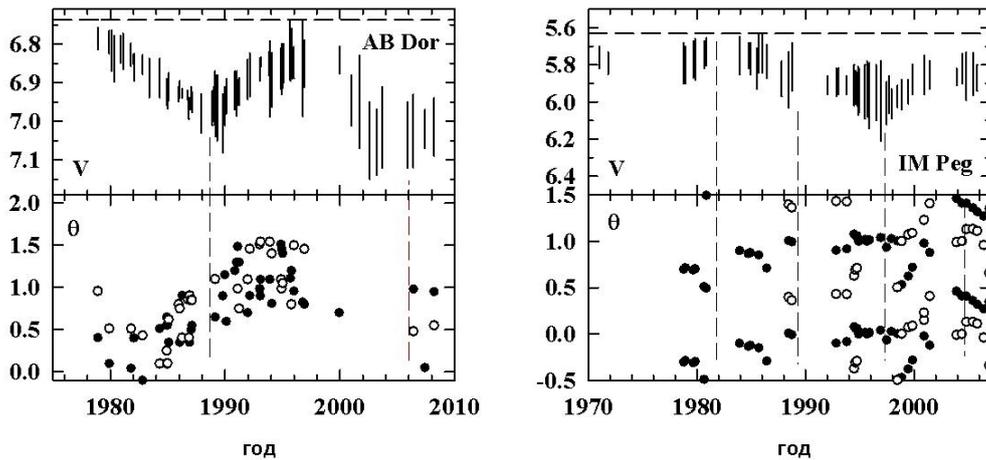


Рис. 2. Переключения активных долгот (flip-флор эффект). Верхняя панель — долговременная кривая блеска, нижняя — положения активных долгот. Заполненные кружки соответствуют главной активной долготе, открытые — вторичной. Для AB Dor отмечается цикл запятненности  $P_{\text{сис}}=16.5$  лет,  $P_{\text{flip-флор}}=5.5$  лет [Berdyugina, Järvinen, 2005]; для IM Peg обнаружен цикл переключения активных долгот  $P_{\text{flip-флор}}=6.5$  лет [Berdyugina et al., 2000]. Переменная AB Dor также демонстрирует плавные изменения положений активных долгот как следствие дифференциального вращения звезды и широтного дрейфа пятен

вает на дифференциальное вращение звезды и широтный дрейф пятен и активных областей в течение цикла (например, [Messina, Guinan, 2003]). Эффект дифференциального вращения проявляется как при исследованиях запятненности (фотометрическими методами либо с помощью Допплеровского картирования), так и при исследовании хромосферно-активных областей (например, в линиях CaII НК). При невозможности точного определения периода в данную эпоху можно рассматривать долговременные изменения положений главной и вторичной активных долгот (например, минимумов блеска звезды), полученных в одной эфемериде, и их сопоставление с параметрами пятен (активных областей). Такие изменения периодов осевого вращения или положений активных долгот часто показывают цикличность, синхронизированную с циклом пятенной активности звезды (DX Leo, LQ Hyа и IN Com, AB Dor).

Фотометрические методы и Допплеровское картирование показало наличие у звезд как дифференциального вращения солнечного типа (экватор вращается быстрее полюса) так, для некоторых активных гигантов (V711 Tau, UX Ari, HU Vir, V1794 Cyg) и обратную картину. Возможно, характер дифференциального вращения зависит от эволюционного статуса звезды.

Кросс-корреляционный анализ доплеровских изображений показал для ряда звезд классов G2–M2 дифференциальное вращение солнечного типа [Petit et al., 2004; Barnes et al., 2005]. Рассмотренные оценки показывают зависимость дифференциального вращения от спектрального класса (рост от M класса к G). Однако Солнце несколько выпадает из этой зависимости. В отличие от горячих F–G карликов, не обнаружено явных зависимостей от темпа вращения звезды. Интересно, что при оценке дифференциального вращения по пятнам и по магнитным областям мы получаем различные значения [Donati et al., 2003]. Однако это может быть как недостатком

пространственного разрешения методов, так и собственными движениями пятен и активных областей. Сильные систематические ошибки вносит и неопределенность в оценке наклона угла оси вращения звезды.

### АКТИВНЫЕ ДОЛГОТЫ И FLIP-FLOR ЭФФЕКТ

Общеизвестна секторная структура солнечного магнитного поля и солнечного ветра. Очевидно, что подобные структуры существуют и для других, много более активных звезд. Первые сообщения о существовании у звезд двух выделенных активных долгот появились в конце 80-х гг., в виде двухпятенной модели. Позднее существование двух разнесенных примерно на полпериода активных долгот. Вблизи которых наиболее концентрируются пятна, было показано по фотометрическим наблюдениям для всех типов запятненных звезд — классических RS CVn переменных [Berdyugina, Tuominen, 1998], запятненных карликов [Berdyugina, Järvinen, 2005], молодых post T Tau звезд и переменных типа FK Com [Jetsu et al., 1993]. Устойчивые активные долготы также хорошо видны из длительных серий доплеровских карт [Berdyugina, 1998].

Хотя активные долготы очень устойчивы, находящиеся на них запятненные области демонстрируют изменение площади со временем. В то время как запятненные области вблизи одной долготы уменьшаются, области в противоположном полушарии растут и происходит перераспределение запятненных площадей между двумя полушариями. Когда эти области сравниваются по площади пятен, происходит переключение доминирующей активности с одной долготы на другую — так называемый flip-флор эффект. Впервые такой эффект обнаружили по фотометрическим наблюдениям FK Com Йэтсу и др. в 1991 г. [Jetsu et al., 1991]. Бердюгина и Туоинен [Berdyugina, Tuominen, 1998] для четырех звезд типа RS CVn отметили, что такие переключения проис-

ходят регулярно, т. е. что можно говорить о новом виде цикла активности. Помимо активных гигантов регулярный flip-flop эффект могут показывать карлики (LQ Hyа) и молодые запятненные звезды (AB Dor), хотя у ряда звезд такие переключения могут происходить и нерегулярно. Эффект наличия и переключения активных долгот (с циклом  $P_{\text{flip-flop}}=3.7$  лет) обнаружен в слабой степени и на Солнце [Berdyugina, Usoskin, 2003].

Длительности циклов переключения активных долгот не совпадают с циклом пятнообразования, но соотносятся как целые числа  $P_{\text{сy}}/P_{\text{flip-flop}}=3:1, 2:1, 3:2, 5:4$  и пр. Возможно, что эти отношения различаются для одиночных и двойных звезд. У переменных V711 Tau (3:1) и CG Cyg (5:4) циклы flip-flop эффекта проявляются и в запятненности, как более слабые вторичные изменения. При этом смена долгот происходит вблизи эпохи локального минимума площади пятен. Вероятно, такие отношения выражают взаимодействие различных мод звездного динамо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытым остается вопрос о совпадении между собой циклов, определяемых разными методами. Если у Солнца цикл Швабе синхронизирует все процессы активности, то для других звезд такой однозначной картины нет. Длительности пятенных циклов могут и не совпадать с длительностями циклов, найденных по другим индикаторам активности. Так, широко известные циклы хромосферной линии CaII могут как совпадать с пятенными (к Cet = HD 20630), так и не показывать никакой корреляции (например, BE Cet с 9-летним кальциевым циклом и нерегулярной пятенной переменностью, или EK Dra, где нерегулярная переменность линий кальция возможно сочетается с 27-летним фотометрическим циклом). У слабозапятненных звезд с амплитудой фотометрической переменности порядка  $0.002$  (HD 10476, HD 18256) поток в линиях и болометрическая светимость звезды повышается, как и у Солнца [Radick et al., 1998]. У более активных переменных излучение хромосфер и корон не способно компенсировать дефицит поглощаемой пятнами энергии, и в максимуме запятненности светимость звезды уменьшается.

Работа выполнена в рамках проекта «Супервспышки на звездах и Солнце» (грант РФФИ № 17-52-80064).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В. Изменения запятненности M карликов типа BY Dra на долговременной шкале // *Астрон. журн.* 2017. Т. 94, № 3. С. 240–252.  
 Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В. Изменения запятненности 13 G–K карликов типа BY Dra на долговременной шкале // *Астрон. журн.* 2018. Т. 95, № 6. С. 421–437.  
 Barnes J.R., Collier Cameron A., Donati J.-F., et al. The dependence of differential rotation on temperature and rotation // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2005. V. 357. L. 1–5.  
 Berdyugina S.V. Surface imaging by the Occamian approach. Basic principles, simulations and tests // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 338. P. 97–105.  
 Berdyugina S.V. Starspots: a key to the stellar dynamo // *Living Rev. Solar. Phys.* 2005. V. 2. P. 8–70.

Berdyugina S.V., Tuominen I. Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 336. L. 25–28.  
 Berdyugina S.V., Usoskin I.G. Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 405. P. 1121–1128.  
 Berdyugina S.V., Järvinen S.P. Spot activity cycles and flip-flops on young solar analogs // *Astron. Nachr.* 2005. V. 326. P. 283–286.  
 Berdyugina S.V., Pelt J., Tuominen I. Magnetic activity in the young solar analog LQ Hyа. Active longitudes and cycles // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 394. P. 505–515.  
 Berdyugina S.V., Bedyugin A.V., Ilyin I.V., Tuominen I. The long-period RS CVn binary IM Peg. First surface images // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 360. P. 272–280.  
 Bondar N.I. The long-term variability in active red dwarfs // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. V. 111. P. 259–264.  
 Chugajnov P.F. On the variability of HD 234677 // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1966. V. 122. P. 1–2.  
 Donati J.-F., Collier Cameron A., Petit P. Temporal fluctuations in the differential rotation of cool active stars // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2003. V. 345. P. 1187–1199.  
 Jetsu L., Pelt J., Tuominen I. Spot and flare activity of FK Com: long-term photometry // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 278. P. 449–462.  
 Kron G.E. The probable detection of patches of varying brightness on AR Lacertae B. // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 1947. V. 350, P. 261–265.  
 Messina S., Guinan E.F. Magnetic activity of six young solar analogues. Surface differential rotation from long-term photometry // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 409. P. 1017–1030.  
 Oláh K., Kövári Zs., Petrovay K., et al. Magnetic cycles at different ages of stars // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 590. A. 133–146.  
 Petit P., Donati J.-F., Collier Cameron A. Differential rotation of cool active stars // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325. P. 221–224.  
 Phillips M.J., Hartmann L. Long-term variability of dMe stars // *Astrophys. J.* 1978. V. 224. P. 182–184.  
 Radick R.R., Lockwood G.W., Skiff B.A., Baliunas S.L. Patterns of variation among sun-like stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1998. V. 118. P. 239–258.  
 Ribárik G., Oláh K., Strassmeier K.G. Time-series photometric spot modeling. A new computer code and its application to 23 years of photometry of the active giant IM Peg // *Astron. Nachr.* 2003. V. 324. P. 202–214.  
 Strassmeier K.G. Starspots // *Astron. Astrophys. Rev.* 2009. V. 17. P. 251–308.  
 Vogt S.S., Hatzes A., Misch A., Kürster M. Doppler imagery of the spotted RS CVn star HR 1099 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1999. V. 121. P. 547–589.