

ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ У ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

И. Ю. Алексеев¹, А. В. Кожевникова², О. В. Козлова¹

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН,*

²*Уральский федеральный университет*

Рассмотрены методы и результаты исследования холодных пятен, хромосферных неоднородностей, вспышечной активности и их долговременных изменений у звезд поздних спектральных классов.

ACTIVITY CYCLES OF LATE-TYPE STARS

I. Ju. Alekseev, A. V. Kozhevnikova, O. V. Kozlova

¹*Crimean Astrophysical Observatory,* ²*Ural Federal University*

We considered methods and results of the observations of long-term variations of stellar spots, chromospheric inhomogeneities, and flare activity on late-type stars.

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 запытенности, 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. Такие длительные вариации солнечной активности исследуются уже с помощью толщин годовых колец деревьев, содержания в них изотопа ¹⁴C, слоистой структуры гренландских и антарктических льдов; они позволяют говорить об изменениях солнечной активности на протяжении нескольких тысячелетий. Исследование циклической активности других звезд позволяет говорить об изучении механизма генерации звездных магнитных полей и делать выбор между различными моделями звездного динамо.

Пятенная активность звезд

Электрофотометрия

Запятненность звезды проявляется прежде всего фотометрически, как вращательная модуляция блеска с типичной амплитудой около 0.10^m , достигающей у самых активных *T Tauri* звезд до 0.5^m (*V471 Tau*). Изменения конфигурации пятен дают медленные (с характерным временем около месяца) смены параметров вращательной модуляции, например, уровня среднего блеска в данную эпоху. На протяжении длительных (до 50 лет) промежутков времени общая переменность запятненных звезд составляет обычно $0.1-0.3^m$, также доходя у некоторых объектов до $0.43-0.56^m$ (у оранжевых карликов *V775 Her*, *V833 Tau*, *BY Dra*, красного карлика *EV Lac* или классических *RS CVn* систем *IM Peg* и *HU Vir*). Для Солнца, как запятненной звезды, такие эффекты составляют около 0.001^m .

В настоящее время фотометрию холодных звезд изучают с помощью космических телескопов (*Kepler*, *MOST*, *COROT*, *Gaia*), наземных фотометрических телескопов-автоматов малого диаметра (*Wolfgang – Amadeus*, *Phoenix 10*, *Fairborn*, *STELLA II/AIP*, *Strömgren APT*) и обычных фотометрических телескопов различных обсерваторий (обсерватория Катании, Южноафриканская, Крымская и др.).

Характерные времена таких циклов составляют $P_{cyc} = 3-30$ лет.

Фотопластинки

Долговременная переменность фотосферной активности холодных звезд была обнаружена для некоторых объектов при исследовании архивов фотопластинок. Так, Филлипс и Хартманн в 1978 г. обнаружили по пластинкам Гарвардской коллекции длительные (порядка 50–60 лет) изменения среднего блеска *BY Dra* и *CC Eri* с амплитудой до 0.5^m , по-видимому, аналогичные вековому циклу Глайсберга [1]. Сходные результаты получила на материалах пластинок ГАИШ, обсерваторий Зоннеберга и Одессы Бондарь, отметившая длительную и сильную цикличность у *V833 Tau*, *BY Dra* и особенно *PZ Mon*, у которой амплитуда переменности достигает 1.20^m . Добавление к фотографическим результатам данных многолетней электрофотометрии позволяет говорить о долговременных изменениях активности у *V775 Her* ($0.^m56$, $P_{cyc} = 80$ лет), *V833 Tau* (0.46^m , $P_{cyc} = 68$ лет) и *BY Dra* (0.48^m , $P_{cyc} = 55$ лет).

Площади и широты пятен

В ряде статей Алексеев и Кожевникова (2015–2017) [2, 3] рассматривали моделирование запятненности активных звезд различных типов — молодых звезд, прошедших стадию *T Tauri* (*PTTS*), оранжевых (спектральных классов *GK*) и красных (спектральных классов *M*) карликов, короткопериодических и классических систем типа *RS CVn*, одиночных быстро вращающихся желтых гигантов асимптотической ветви типа *FK Com*.

Проводимое нами моделирование запятненности нескольких десятков активных звезд различных типов позволило нам рассмотреть вопрос о цикличности изменений полной площади и средней широты покрывающих звезду пятен. Из всей выборки исследованных нами 50 активных звезд различных типов мы обнаружили у 28 объектов циклические изменения площади и средней широты фотосферных пятен. Длительности этих колебаний (5–40) хорошо согласуются с известными длительностями фотометрических циклов рассмотренных звезд.

Независимо от эволюционного статуса все программные звезды демонстрируют широтный дрейф пятен по мере их развития, т. е. роста полной площади. У большинства звезд (все они имеют спектральные классы *G–K*) этот дрейф происходит в направлении экватора, — мы считаем это грубым аналогом солнечной диаграммы бабочек. Скорость широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ довольно сильно варьируется от цикла к циклу и от звезды к звезде, составляя в среднем по модулю 0.2–2.9 градуса в год, в то время как солнечное значение скорости широтного дрейфа составляет 3–4 градуса в год. У наиболее холодных звезд выборки спектральных классов *M* мы видим, наоборот, дрейф пятен к полюсу со скоростями 0.2–1.4 градуса в год.

Хромосферная активность

Линии CaII

Широко известны циклы хромосферной активности карликов солнечного типа, определяемые по потокам в эмиссионных линиях *CaII* (*HK* проект Вильсона (1978) [4] и многочисленные работы, продолжающие программу). Было показано, что сотню звезд выборки можно разделить на следующие группы: 47 % — старые (с логарифмом возраста 9.46) звезды с относительно небольшой эмиссией и ее циклическими изменениями с периодами от 2.5 до 25 лет,

подобными солнечным, хотя наиболее уверенные циклы превышают по длительности 7 лет; 26 % — молодые (логарифм возраста 9.03) звезды с сильной и хаотически меняющейся кальциевой эмиссией и 26 % — еще более старые (логарифм возраста 9.86) звезды с постоянной эмиссией или с долговременными трендами или очень длительными циклами.

Линия H_{α}

Наши последние результаты [5, 6] показывают, что циклическая активность видна также и в наблюдениях линии H_{α} , причем такие эффекты были обнаружены нами как для молодой *post T Tauri* звезды *VY Ari*, так и для быстровращающегося желтого АВГ гиганта *IN Com*. Отметим, что, в отличие от линий кальция, «водородные» циклы активности звезд совпадают по длительности с пятнами.

Вспышки

Для холодных M вспыхающих карликов типа *UV Cet*, *EV Lac*, *AD Leo*, *YZ CMi* обнаружены циклы вспышечной активности продолжительностью 7–8 лет, проявляющиеся в темпах энерговыделения вспышек и изменениях их энергетического спектра (зависимости частоты вспышек от энергии). Эти эффекты не коррелированы с запятненностью звезд.

Вращение звезды

Flip-flop 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 аналогичные результаты были получены для всех типов запятненных звезд — классических *RS CVn* переменных, запятненных карликов и звезд типа *FK Com* [7]. Активные долготы также хорошо видны из длительных серий доплеровских карт [8] и поляризационных наблюдений [9]. Вблизи этих долгот также концентрируются области повышенной хромосферной активности [10–14] и наиболее мощные вспышки [15].

В 1991 г. Йэтсу и др. [16] обнаружили происходящее время от времени переключение доминирующей активной долготы с одной на другую — так называемый *flip – flop* эффект. Подобные переключения часто показывают тенденцию к цикличности, хотя у некоторых звезд они могут происходить и нерегулярно. Эффект наличия и переключения активных долгот обнаружен в слабой степени и на Солнце [17].

Помимо циклических изменений средней широты и полной площади пятен у ряда запятненных гигантов наблюдаются циклические переключения активных долгот — *flip – flop* эффект. В слабой степени такой эффект известен и на Солнце с периодом около 3.7 года. Длительности циклов переключения активных долгот не совпадают с циклом пятнообразования, но соотносятся как целые числа $P_{cyc}/P_{flip-flop} = 3 : 1, 2 : 1, 3 : 2, 5 : 4$ и пр. 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 [18].

Дифференциальное вращение

По длительным рядам фотометрических наблюдений и доплеровских карт для ряда звезд проводились сопоставления найденных широт пятен с периодами осевого вращения звезды в соответствующие эпохи. Альтернативным вариантом является изучение долговременных изменений положений минимумов блеска звезды (главной и вторичной активных долгот) и их сопоставление с параметрами пятен. Таким образом, для этих звезд были получены оценки дифференциального вращения. Первые такие оценки были получены с помощью двухпятенной модели и показали для восьми десятков двойных звезд вращение солнечного типа (экватор вращается быстрее полюсов).

В то же время доплеровское картирование показало для некоторых активных гигантов (*V711 Tau, UX Ari, HU Vir, V1794 Cyg*) отрицательное значение коэффициента D_r , которое соответствует антисолнечному типу вращения (околополюсная зона вращается быстрее экваториальной). Признаки антисолнечного дифференциального вращения были обнаружены и у некоторых звезд солнечного типа по корреляции вращательного периода с ходом линии CaII НК в течение цикла. Вместе с тем эти результаты тоже не являются окончатель-

ными, так как разные авторы отмечают для одной и той же звезды разный характер дифференциального вращения.

На основе разработанной нами зональной модели мы получили оценки дифференциального вращения у нескольких десятков звезд разных типов [2, 3]. Сравнение полученных нами из моделей средних широт пятен с фотометрическими периодами звезды (или фазами ее минимального блеска) показало для большинства объектов ($G-K$ карлики) наличие дифференциального вращения солнечного типа. Коэффициенты дифференциального вращения в среднем составляют $D_r = 0.01-0.05$ для молодых *post T Tau* звезд спектрального класса K ; $0.03-0.09$ для K карликов; $-0.01-0.04$ для запятненных M карликов; $-0.02-0.04$ для звезд типа $RS CVn$; 0.05 для быстровращающегося одиночного гиганта $IN Com$, в то время как солнечное значение $D_r^{\odot} = 0.19$. Вероятно, что характер дифференциального вращения зависит от спектрального класса звезды, и переход к антисолнечной картине вращения происходит при достижении некоторого критического значения показателя цвета $B - V$.

Изменения положения активных долгот и фотометрических периодов звезды также могут показывать цикличность, синхронизированную с циклом пятенной активности звезды.

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. Так, широко известные циклы хромосферной линии $CaII$ могут как совпадать с пятенными ($\kappa Cet = HD 20630$), так и не показывать никакой корреляции (например, $BE Cet$ или $EK Dra$, где нерегулярная переменность линий кальция сочетается с 9-летним фотометрическим циклом). У активной вспышечной звезды $EV Lac$ 7-летний цикл вспышечной активности плохо согласуется с пятнообразованием, и, кроме того, наблюдается длительная (около 40 лет) переменность показателя цвета $U - B$, зависящего от хромосферной активности звезды. Пятенный цикл может быть достаточно плохо коррелирован и с излучением хромосферы в линии H_{α} ($LQ Hya$, $EV Lac$), хотя для АВГ гиганта $IN Com$ или молодой звезды $VY Ari$ мы видим обратную картину.

Длительность циклов активности не показывает явных зависимостей от показателя цвета, глубины конвективной зоны, периода

вращения или числа Россби. Более удобным параметром оказалось отношение $P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}}$, которое для выборки звезд НК проекта показывает зависимость от потока в линиях $\langle R'_{\text{НК}} \rangle$ и числа Россби. Существует и более общая зависимость $\lg(P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}})$ от $\lg(1/P_{\text{rot}})$, в которую хорошо укладываются циклы, определенные всеми методами (пятнообразование, *flip – flop*, *CaII НК*, вспышечная активность, дифференциальное вращение и даже циклические вариации орбитальных периодов у алголей и *RS CVn* звезд). Из всего множества циклов зависимость выделяет три последовательности — цикл Глайссберга, цикл Швабе и наблюдаемый у ряда звезд короткий цикл.

Работа А. В. Кожевниковой выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006). Работа И. Ю. Алексеева выполнена в рамках плановой темы ФГБУН КраО РАН «Магнитные поля и эволюция магнитной активности звезд». Работа О. В. Козловой и И. Ю. Алексеева частично выполнена в рамках проекта «Активность звезд поздних спектральных классов на разных стадиях эволюции» (грант РФФИ 16-02-00689).

Библиографические ссылки

1. *Phillips M. J., Hartmann L.* Long-term variability of dMe stars // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — P. 182–184.
2. *Kozhevnikova A. V., Alekseev I. Y.* Long-term spottedness variations of 16 RS CVn stars // *Astronomy Reports.* — 2015. — Vol. 59. — P. 937–951.
3. *Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V.* Long-term variations in the spottedness of BY Dra M dwarfs // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61. — P. 221–232.
4. *Wilson O. C.* Chromospheric variations in main-sequence stars // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 226. — P. 379–396.
5. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V., Gorda S. Y. et al.* Long-Term Spectral Variability of the Spotted Star IN Com // *Stars: From Collapse to Collapse / ed. by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin : Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 2017. — Vol. 510. — P. 149.
6. *Kozlova O. V., Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V.* Long-Term Spectral Variability of the Spotted Star in Com // *Astrophysics.* — 2017. — Vol. 60. — P. 41–56.

7. *Zeilik M., Blasi C. de, Rhodes M., Budding E.* A Half Century of Starspot Activity on SV Cam // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1987. — Vol. 19. — P. 1086.
8. *Berdyugina S. V., Tuominen I.* Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 336. — P. L25—L28.
9. *Huovelin J., Saar S. H., Tuominen I.* Relations between broad-band linear polarization and CA II H and K emission in late-type dwarf stars // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 329. — P. 882—893.
10. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Spots and active regions on the emission-line, red dwarf star V775 Her. // *Astrophysics.* — 2000. — Vol. 43. — P. 245—255.
11. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Spots and Active Regions on the Emission-Line Star VY Ari // *Astrophysics.* — 2001. — Vol. 44. — P. 429—439.
12. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Starspots and active regions on the emission red dwarf star LQ Hydrae // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 396. — P. 203—211.
13. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Starspots and active regions on the chromospherically active binary MS Ser // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 403. — P. 205—215.
14. *Kozlova O. V., Alekseev I. Y.* The stellar wind as a key to the understanding of the spectral activity of IN Com // *Bull. Crimean Astrophys. Observatory.* — 2014. — Vol. 110. — P. 37—44.
15. *Alekseev I. Y., Gershberg R. E.* Spottedness of red dwarfs: Zonal spottedness models for 13 stars of the by dra type // *Astrophysics.* — 1996. — Vol. 39. — P. 33—45.
16. *Jetsu L., Pelt J., Tuominen I., Nations H.* The spot activity of FK Comae Berenices // *IAU Colloq. 130: The Sun and Cool Stars. Activity, Magnetism, Dynamos* / ed. by I. Tuominen, D. Moss, G. Rüdiger : *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag. — 1991. — Vol. 380. — P. 381.
17. *Berdyugina S. V., Usoskin I. G.* Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 405. — P. 1121—1128.
18. *Järvinen S. P., Berdyugina S. V., Tuominen I. et al.* Magnetic activity in the young solar analog AB Dor. Active longitudes and cycles from long-term photometry. // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 432. — P. 657—664.