

УДК 524.3

Зависимость температуры звездных пятен от спектрального класса и светимости звезд

*И.Ю. Алексеев¹, А.В. Кожевникова²*¹ ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
*ilya-alekseev@mail.ru*² Уральский Федеральный университет, пр. Ленина, 51, Екатеринбург, 620083

Поступила в редакцию 28 сентября 2022 г.

Аннотация. Рассмотрены модели запятненности 54 звезд различных спектральных классов и классов светимости (эволюционных статусов), показывающих активность солнечного типа. Для каждой рассмотренной стадии эволюции (молодые *post T Tau* звезды, карлики ГП и проэволюционировавшие гиганты) отмечена зависимость температур пятен от температуры невозмущенной фотосферы. Показана слабая зависимость температур пятен от эволюционной стадии звезды. Получено общее аналитическое выражение для оценки температур звездных пятен по температурам невозмущенных фотосфер.

Ключевые слова: Звезды: звездные пятна

Холодные пятна в фотосферах звезд поздних спектральных классов, наряду с мощными спорадическими вспышками, протяженными коронами и хромосферами, являются одним из проявлений солнечной активности звезд с внешней конвективной оболочкой. Изучение такой активности составляет предмет исследования солнечно-звездной физики, позволяющей обобщить картину солнечного магнетизма на другие звезды с очень широким диапазоном параметров: массы от 1.5 до 0.05 M_{\odot} , возрасты – от миллиона до многих миллиардов лет, диапазон периодов осевого вращения – от десятка часов до многих десятков суток, эволюционные статусы – от молодых *T Tauri* звезд до сильно проэволюционировавших гигантов. С другой стороны, изучение общих закономерностей магнитной активности звезд позволяет взглянуть на Солнце как на подробно изученный частный случай, проверить наши общие предположения и более детально исследовать тонкие процессы звездного магнетизма.

Единственная звезда, на которой мы можем легко изучать фотосферные пятна с высоким пространственным разрешением, – это Солнце. Для всех других звезд мы вынуждены использовать только косвенные методы для получения информации о наличии звездных пятен и их физических параметрах. Первый метод независимой оценки температуры пятен был предложен [Vogt \(1981\)](#) на основе фотометрических наблюдений одновременно в двух полосах пропускания V и R. Позднее [Poe, Eaton \(1985\)](#) показали, что наиболее подходящими полосами являются полосы V и I. В обеих работах используемый метод был пригоден для звезд спектральных классов G–K, как карликов, так и гигантов. Через шесть лет [Гершберг и др. \(1991\)](#) модифицировали метод Фогта–По–Итона для карликов спектрального класса M и успешно использовали его к определению параметров пятен у вспыхивающей звезды EV Lac. Этот метод используется до сих пор, хотя бы для оценки температуры пятен в первом приближении. Дальнейшее уточнение температур пятен происходит уже с использованием различных методов восстановления изображения, например метода максимальной энтропии ([Messina et al., 1999](#)), метода Оккама ([Berdyugina et al., 2002](#)) или метода наименьших квадратов (например, [Savanov, Strassmeier, 2008](#)).

Другие методы определения температуры пятен используют уже спектральные наблюдения. Наиболее многообещающим является метод доплеровского картирования. Первые идеи этого метода предложили [Deutsch \(1958\)](#) и [Хохлова \(1975\)](#), а первый анализ наблюдательного профиля запятненной звезды выполнили [Vogt, Penrod \(1983\)](#). Но так как предметом исследования являются тонкие

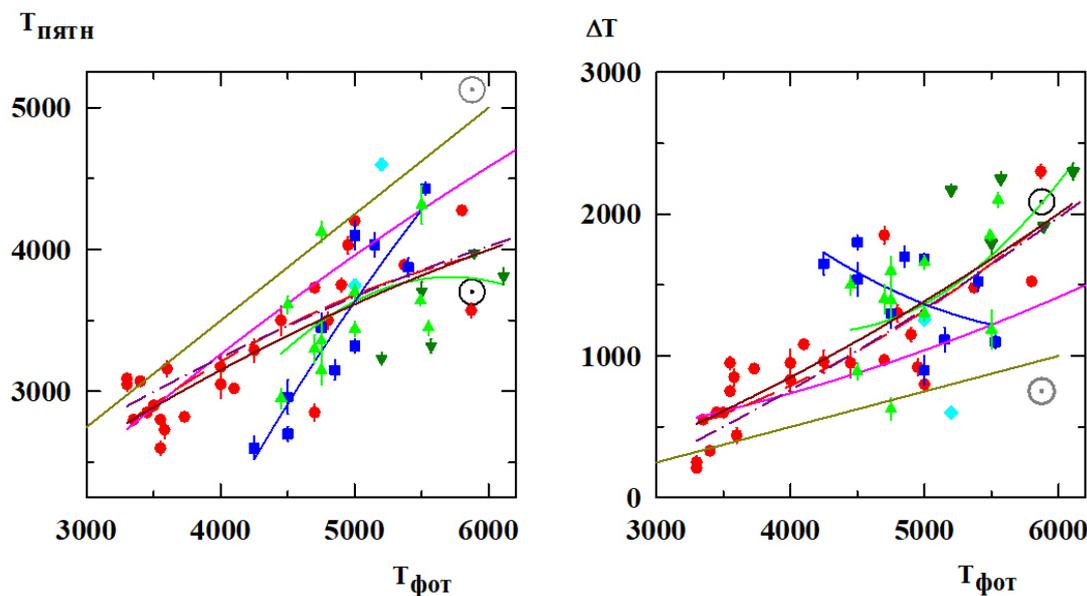


Рис. 1. Зависимость температуры пятен от температуры фотосфер. Красные кружки и пунктирная линия – расчеты Алексеев, Кожевникова (2017, 2018) и их квадратичная аппроксимация (1). Зеленые символы и линия – звезды-гиганты, синие квадраты и линия – молодые звезды. Темно-красная сплошная линия – аппроксимация (4) всего массива наших расчетов. Темно-розовая штрихпунктирная линия – аппроксимация Berdyugina (2005), розовая – аппроксимация Herbst et al. (2021), темно-желтая – расчеты Саванов, Дмитриенко (2019). Символы \odot обозначают температуры тени (черный символ) и полутени (серый символ) солнечных пятен

изменения спектральной линии, метод требует большого (порядка 300–400) отношения S/N и большой осевой скорости вращения звезды $v \sin i$, чтобы прописать профиль линии как можно детальнее, что накладывает довольно строгие ограничения на выбор программных звезд. В случае медленно вращающихся звезд доплеровское картирование переходит в более простой метод LDR, который рассматривает изменения глубин фотосферных линий и позволяет просто оценивать температуру и относительную площадь пятен (например, Catalano et al., 2002). Третий спектральный метод оценки температуры пятен и их относительной площади основан на исследовании молекулярных полос, нехарактерных для спокойной фотосферы исследуемой звезды, но типичных для более холодных запятненных областей. Обычно это полосы окиси титана TiO (Hünemörder, Ramsey, 1987) и гидроксила OH $1.563 \mu\text{m}$ (O’Neal, Neff, 1997).

Для запятненных карликов основное число исследований было проведено с помощью многоцветной фотометрии. Первые уверенные статистические характеристики параметров пятен таких звезд были получены в рамках предложенной и развитой в КРАО зональной модели запятненности звезд (Алексеев, Гершберг, 1996a, b, c, 1997; Алексеев, 2008). В этой модели предполагается, что – по аналогии с Солнцем – пятна располагаются на звездах вдоль двух полос параллельных экватору, а вращение звезды с неравномерным распределением пятен по долготе дает фотометрический эффект, идентичный эффекту непрерывных полос запятненности с переменной шириной. Из результатов первых расчетов зональных моделей, в частности, следовало, что запятненные области имеют температуры от 4000 К у звезд солнечного типа и 2500–3000 К у самых холодных М-карликов, а разности температур невозмущенных фотосфер и пятен достигают 2000 К у горячих и 300 К у холодных звезд (Алексеев, 2001, 2008).

Алексеев, Кожевникова (2017, 2018) построили модели зональной запятненности для 26 звезд-карликов спектральных классов G–M за все время их фотометрических наблюдений. Результаты этих расчетов представлены на рис. 1 красными кружками. На левой панели рисунка даны температуры пятен для разных фотосферных температур, на правой – разности температур спокойных фотосфер и пятен для разных фотосферных температур. Красная пунктирная линия – аппроксимация кривой второго порядка:

$$T_{\text{пятн}} = (-8.69 \cdot 10^{-5})(T_{\text{фот}})^2 + 1.252 T_{\text{фот}} - 409.2, \quad (1)$$

проведенная по этим точкам (Алексеев, Гершберг, 2021). Их среднеквадратичное отклонение от кривой составляет 280 К. В настоящей работе мы дополнили выборку карликов расчетами для 18 прееволюционировавших гигантов: 5 короткопериодических систем типа RS CVn (темно-зеленые треугольники, заостренные вниз), 2 быстровращающихся гиганта асимптотической ветви типа FK Com (зелено-голубые ромбы) и 11 классических систем типа RS CVn (зеленые треугольники, заостренные вверх). Используемые нами расчеты приведены в работе Кожевникова, Алексеев (2015), Алексеев, Козлова (2013). Сплошная зеленая линия обозначает аппроксимацию второго порядка:

$$T_{\text{пятн}} = (-3.392 \cdot 10^{-4})(T_{\text{фот}})^2 + 3.876 T_{\text{фот}} - 7266. \quad (2)$$

Синие квадраты – расчеты температур пятен для 10 звезд, только покинувших стадию T Tau (post T Tauri звезды) по данным Алексеев (2014), Алексеев, Козлова (2001), Кожевникова и др. (2018). Синей сплошной линией дана аппроксимация этих данных:

$$T_{\text{пятн}} = (-1.524 \cdot 10^{-4})(T_{\text{фот}})^2 + 2.892 T_{\text{фот}} - 7016. \quad (3)$$

Весь массив наших данных аппроксимируется кривой

$$T_{\text{пятн}} = (-4.058 \cdot 10^{-5})(T_{\text{фот}})^2 + 0.8295 T_{\text{фот}} + 481.9 \quad (4)$$

(темно-красная сплошная линия), а среднеквадратичное отклонение точек составляет 350 К.

Независимо от крымских результатов, в обширном обзоре по солнечным и звездным пятнам Berdyugina (2005) рассмотрела существующие методы оценки их температур, включающие, наряду с многоцветной фотометрией исследуемых звезд, и спектральные: доплеровское картирование, моделирование молекулярных полос и отношения глубин спектральных линий. Для 29 звезд разных спектральных классов и классов светимости она получила зависимость температуры пятен от фотосферной, качественно аналогичную нашей – темно-розовая штрихпунктирная линия на рисунке 1:

$$T_{\text{пятн}} = (-3.58 \cdot 10^{-5})(T_{\text{фот}})^2 + 0.751 T_{\text{фот}} + 808. \quad (5)$$

Отметим, что для EK Dra в работе приведены две существенно разные оценки температуры пятен, полученные двумя разными методами – доплеровским картированием и анализом молекулярных полос окиси титана. Последняя оценка близка к нашей. Herbst et al. (2021) несколько изменили метод Бердогиной и провели расчеты температур звездных пятен для той же выборки звезд, получив сходную зависимость:

$$T_{\text{пятн}} = (-3.58 \cdot 10^{-5})(T_{\text{фот}})^2 + 0.801 T_{\text{фот}} + 666.5. \quad (6)$$

Мы видим, что красная, темно-красная и темно-розовая линии на рис. 1 практически совпадают. Этим зависимостям удовлетворяет тень солнечных пятен. Также Herbst et al. (2021) дополнили выборку Бердогиной до 45 объектов разных классов светимостей с температурами фотосфер от 3300 до 6400 К. Их результаты представлены на рис. 1 розовой линией:

$$T_{\text{пятн}} = (-3.58 \cdot 10^{-5})(T_{\text{фот}})^2 + 1.0188 T_{\text{фот}} - 239.3. \quad (7)$$

До температур фотосфер 4900 К она практически совпадает с нашей красной кривой, потом начинает уходить от нее вверх, и расхождение около 5500 К достигает около 500 К. Соответствующая ширина полосы ошибок составляет по их оценкам от 470 К для M-звезд до 680 К для G-звезд.

Саванов, Дмитриенко (2019) по последним измерениям 15 звезд-гигантов методами доплеровского картирования и фотометрии прохождения экзопланет над пятнами получили более пологое изменение разности температур спокойной фотосферы и пятна ΔT от температуры фотосферы. Согласно их оценкам, разница температур ΔT уменьшается от примерно 1000 К у звезд G0 до 200 К у звезд M4 (темно-желтая линия) и этой зависимости удовлетворяет полутень солнечных пятен. Отметим, что некоторые звезды нашей выборки – IN Com, AR Psc, V775 Her, LQ Hyа, AB Dor – также хорошо укладываются в эту зависимость.

Таким образом, мы приходим к выводу, что применяемые нами способы определения температур звездных пятен по фотометрическим BVRI-наблюдениям позволяют говорить прежде всего о температурах тени пятен. Эти температуры практически не зависят от эволюционного статуса звезды и определяются прежде всего температурой фотосферы. Можно считать, что определенные нами зависимости (4) и аналогичные ей зависимости (5) и (6) являются универсальными для звезд различных классов светимости, и их можно рекомендовать для прямых оценок температуры тени звездных пятен по эффективным температурам фотосфер. Найденным зависимостям удовлетворяют и оценки температуры тени солнечных пятен. С другой стороны, измерения температур пятен, используемые Саванов, Дмитриенко (2019) и Herbst et al. (2021), по-видимому, больше учитывают вклад полутени и применимы, прежде всего, к оценкам ее температуры. Оценки температуры полутени солнечных пятен удовлетворяют найденной Саванов, Дмитриенко (2019) зависимости.

Благодарности. Работа А. Кожевниковой выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FEUZ-2020-0030.

Литература

- Алексеев И.Ю., 2001. Запятненные звезды малых масс. Одесса: Астропринт. [Alekseev I.Yu., 2001. Low-Mass Spotted Stars. Odessa: Astroprint. (In Russ.)]
- Алексеев И.Ю., 2008. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 104. № 1. С. 272. [Alekseev I.Yu., 2008. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 104, no. 1, p. 272. (In Russ.)]
- Алексеев И.Ю., 2014. Астрофизика. Т. 57. С. 275. [Alekseev I.Yu., 2014. Astrophysics, vol. 57, p. 254.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1996а. Астрон. журн. Т. 73. С. 589. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1996a. Astron. Rep., vol. 40, p. 538.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1996b. Астрон. журн. Т. 73. С. 579. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1996b. Astron. Rep., vol. 40, p. 528.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1996с. Астрофизика. Т. 39. С. 67. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1996c. Astrophysics, vol. 39, p. 33.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1997. Астрон. журн. Т. 74. С. 240. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1997. Astron. Rep., vol. 41, p. 207.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 2021. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 117. № 1. С. 44. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 2022. Acta Astrophys. Tau., vol. 3, no. 2, p. 27.]
- Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В., 2017. Астрон. журн. Т. 94. № 3. С. 240. [Alekseev I.Yu., Kozhevnikova A.V., 2017. Astron. Rep., vol. 61, no. 3, p. 221.]
- Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В., 2018. Астрон. журн. Т. 95. № 6. С. 421. [Alekseev I.Yu., Kozhevnikova A.V., 2018. Astron. Rep., vol. 62, no. 6, p. 396.]
- Алексеев И.Ю., Козлова О.В., 2001. Астрофизика. Т. 44. С. 529. [Alekseev I.Yu., Kozlova O.V., 2001. Astrophysics, vol. 44, p. 429.]
- Алексеев И.Ю., Козлова О.В., 2013. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 109. № 3. С. 114. [Alekseev I.Yu., Kozlova O.V., 2014. Bull. Crim. Astrophys. Obs., vol. 110, no. 3, p. 30.]
- Гершберг Р.Е., Ильин И.В., Шаховская Н.И., 1991. Астрон. журн. Т. 68. С. 959. [Gershberg R.E., Ilyin I.V., Shakhovskaya N.I., 1991. Astron. Zhurn., vol. 68, p. 959. (In Russ.)]
- Кожевникова А.В., Алексеев И.Ю., 2015. Астрон. журн. Т. 92. С. 818. [Kozhevnikova A.V., Alekseev I.Yu., 2015. Astron. Rep., vol. 59, p. 937.]
- Кожевникова А.В., Кожевников В.П., Алексеев И.Ю., 2018. Астрофизика. Т. 61. С. 41. [Kozhevnikova A.V., Kozhevnikov V.P., Alekseev I.Yu., 2018. Astrophysics, vol. 61, p. 30.]
- Саванов И.С., Дмитриенко Е.С., 2019. Ред. Бисикало Д.В., Шустов Б.М., Барабанов С.И., и др. Научные труды Института астрономии РАН. М: Янус-К. Т. 3. С. 244. [Savanov I.S., Dmitrienko E.S., 2019. In Bisikalo D.V., Shustov B.M., Barabanov S.I., et al. (Eds.), Nauchnye trudy Instituta astronomii RAN. M: Yanus-K, vol. 3, p. 244. (In Russ.)]
- Хохлова В.Л., 1975. Астрон. журн., Т. 52. С. 950. [Khokhlova V.L., 1975. Astron. zhurn., vol. 52, p. 950. (In Russ.)]
- Berdyugina S.V., 2005. Living Rev. Solar Phys., vol. 2, iss. 1, p. 8.
- Berdyugina S.V., Pelt J., Tuominen I., 2002. Astron. Astrophys., vol. 394, p. 505.
- Catalano S., Biazzo K., Frasca A., Marilli E., 2002. Astron. Astrophys., vol. 394, p. 1009.

- Deutsch A.J., 1958. In Lehnert B. (Ed), *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*. Cambridge, p. 209.
- Herbst K., Papaioannou A., Airapetian V.S., Atri D., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 907, p. 89.
- Hünemörder D.P., Ramsey L.W., 1987. *Astrophys. J.*, vol. 319, p. 392.
- Messina S., Guinan E.F., Lanza A.F., 1999. *Astrophys. Space Sci.*, vol. 260, p. 493.
- O'Neal D., Neff J.E., 1997. *Astron. J.*, vol. 113, p. 1129.
- Savanov I.S., Strassmeier K.G., 2008. *Astron. Nachr.*, vol. 329, p. 364.
- Poe C.H., Eaton J.A., 1985. *Astrophys. J.*, vol. 289, p. 644.
- Vogt S.S., 1981. *Astrophys. J.*, vol. 247, p. 975.
- Vogt S.S., Penrod G.D., 1983. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, vol. 95, p. 565.

Dependence of starspots temperature on spectral class and luminosity of stars

I. Yu. Alekseev¹, A. V. Kozhevnikova²

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
ilya-alekseev@mail.ru

² Ural Federal University, Lenin Av. 51, Ekaterinburg 620083

Abstract. We considered starspot models of 54 stars with solar-type activity at different evolutionary stages (stars with different spectral and luminosity classes). We noted the dependence of spot temperatures on the temperature of the undisturbed photosphere for stars at each stage of evolution (young post T Tau stars, dwarf stars on MS, and evolved giants). A weak dependence of spot temperatures on the evolutionary stage of the stars is shown. The general analytical expression for estimating the temperatures of starspots by the temperatures of undisturbed photospheres is obtained.

Key words: Stars: starspots