

ЗАПЯТНЕННОСТЬ ЗВЕЗД С НИЗКИМ УРОВНЕМ АКТИВНОСТИ, БЛИЗКИМ К СОЛНЕЧНОМУ

Е.А.БРУЕВИЧ¹, И.Ю.АЛЕКСЕЕВ²

Поступила 5 января 2007

Принята к печати 16 февраля 2007

По данным о переменности непрерывного оптического излучения впервые проведена оценка степени запятненности звезд с уровнем активности, близким к солнечному. Показано, что величина запятненности возрастает постепенно от Солнца к сильно запятненным звездам, для которых ранее Алексеевым и Гершбергом были построены зональные модели распределения пятен. Выявлена тесная связь между запятненностью и мощностью рентгеновского излучения звезд с сильно различающимися уровнями активности.

Ключевые слова: *(звезды:)пятна, звездная корона, звезды солнечного типа*

1. *Введение.* Фотометрические наблюдения красных карликовых звезд, регулярно проводимые в оптическом диапазоне на разных обсерваториях с начала пятидесятих годов XX в., выявили малоамплитудную квазипериодическую переменность блеска у части из них, вызванную наличием на поверхности вращающихся звезд темных пятен, подобных солнечным. Как оказалось, наблюдаемые изменения блеска звезды связаны, в основном, с тем, что суммарная площадь пятен наиболее запятненных звезд может быть существенно больше, чем на Солнце в эпоху максимума цикла, и охватывать до 40% поверхности диска. Дальнейшие наблюдения показали присутствие на звездах всех основных проявлений активности типа солнечной не только на фотосферном, но и на хромосферном и корональном уровнях [1]. Уже в течение примерно 40 лет изучается хромосферная активность звезд в ходе специальной программы регулярных наблюдений линий H и K Ca II, сначала на обсерватории Маунт Вилсон, а затем на Смитсоновской обсерватории. У некоторых из этих 111 звезд так называемого "НК-проекта" выявлены регулярные циклические изменения хромосферного излучения с периодами, в основном, от 7 до 15 лет [2]. В этой же работе звезды были разделены на группы по характеристикам долговременных изменений блеска и степени выраженности циклов.

Начало массовому изучению корональной активности звезд поздних спектральных классов - их потоков в мягком рентгеновском диапазоне - положил запуск астрофизической обсерватории высоких энергий

НЕАО-2 (обсерватории Эйнштейна) в 1978г.

Самый большой вклад в получение данных о рентгеновском излучении звезд внесен наблюдениями на спутнике ROSAT [3]. Оказалось, что наилучшим индикатором активности внешней атмосферы звезд является отношение рентгеновской светимости к болометрической L_X/L_{bol} . Этот индекс известен в настоящее время для нескольких сотен звезд. При этом наибольшие значения индексы L_X/L_{bol} достигают у звезд спектрального класса F с высокой, но нерегулярной активностью [4].

В последнее время у нескольких звезд выявлены циклические изменения потоков мягкого рентгеновского излучения, что подтверждает существование циклической активности типа солнечной у звезд разных спектральных классов (как фотосферной, так и хромосферной и корональной активности). В этой работе мы ограничимся рассмотрением только квазистационарных явлений - развитием активных областей, не рассматривая собственно вспышек.

Существует несколько методов определения относительной площади пятен по наблюдениям долговременной переменности в континууме или в линиях оптического диапазона. Среди них самыми распространенными являются: построение карт поверхностных неоднородностей (так называемое доплеровское картирование, или Doppler imaging) и метод зональных моделей. В большинстве случаев оба этих метода приводят к близким значениям площадей пятен на поверхности звезд. Для звезд, фотометрическая переменность которых регулярно наблюдалась в КрАО, были построены зональные модели, и достаточно точно определена площадь темных пятен на их поверхности [5,6]. В эту выборку звезд вошли несколько известных М-карликов (вспыхивающих звезд), а также около десятка K и G-звезд. Амплитуда вращательной модуляции оптического континуума этих звезд хорошо выражена и, соответственно, величины запятненности поверхности оказались значительными. Эту выборку звезд мы будем называть сильнозапятненными.

Сравнительно недавно, при выполнении программы поиска планет, были обнаружены несколько сотен звезд с проявлением активности типа солнечной [7]. В составе примерно тысячи звезд с обнаруженной эмиссией в линиях H и K Ca II содержалось довольно большое число звезд, уровень хромосферной активности которых был достаточно низким, близким к солнечному. Появилась необходимость определить запятненность поверхности этих звезд для сопоставления с другими характеристиками их активности. Фотометрические наблюдения части этих звезд со слабой поверхностной активностью проводились в течение примерно 10 лет также в рамках "НК-проекта" [8].

Целью данной работы является сравнение запятненности поздних

звезд с различным уровнем активности и их сопоставление с другими характеристиками активности.

2. *Оценка запятненности звезд солнечного типа.* Как известно, наблюдательная программа "НК-проект" изучения хромосферной активности звезд включает в себя определение отношения потока излучения в центрах эмиссионных линий Н и К Ca II (396.8 и 393.4 нм соответственно) к потоку излучения в близлежащем континууме (400.1 и 390.1 нм) - так называемого авторами наблюдений индекса S Ca II (как среднего значения по обеим линиям) [2]. Ниже мы сравнили запятненность двух групп звезд: сильнозапятненных, изучаемых в КрАО, и звезд "НК-проекта", более близких к Солнцу. Для этого мы использовали данные о фотометрических наблюдениях в стрёмгеновских полосах "b" и "y" [8]; данные $(b+y)/2$ очень близки к стандартной джонсоновской полосе I. Группа звезд "НК-проекта" с ярко выраженной эмиссией в линиях Ca II, относящихся к спектральным классам F, G и K, редко пересекающихся с выборкой сильнозапятненных звезд, включает лишь несколько поздних K и одну M-звезду. К тому же в нашем рассмотрении имеются лишь две звезды, общие для обеих групп.

Для оценки запятненности звезд солнечного типа мы использовали вышеупомянутые фотометрические наблюдения 35 звезд "НК-проекта" [8]. Эти 35 звезд наблюдались в течение 10 лет параллельно с продолжением почти сорокалетних рядов наблюдений этих же звезд в линиях Н и К Ca II в составе 111 других. При всем этом модуляция фотометрических кривых блеска звезд "НК-проекта" оказалась в среднем намного ниже, чем у звезд, наблюдаемых в КрАО. Это и понятно, так как звезды, наблюдаемые в КрАО, и звезды "НК-проекта" принадлежат к различным выборкам звезд: первые - наиболее яркие представители запятненных звезд, вторые характеризуются выдающейся хромосферной активностью. Тем более интересным является сравнение этих звезд с точки зрения одновременного проявления ими как запятненности, так и хромосферной и корональной активности. В нашем случае по данным о результатах наблюдений в одной фотометрической полосе мы оцениваем общую запятненность звездной поверхности по амплитуде вращательной модуляции и максимальному блеску звезды, соответствующему уровню незапятненной фотосферы. Мы используем выражение для яркости запятненной звезды, полученное по приближению Фогта [6]:

$$\Delta m_{\lambda} = -\log(1 - (1 - \beta_{\lambda}) G_{\lambda}), \quad (1)$$

где

$$G_{\lambda} = ((1 - u_{\lambda}) I + u_{\lambda} J) / (1 - u_{\lambda} / 3). \quad (2)$$

Здесь контраст β_{λ} - отношение поверхностных яркостей пятна и

фотосферы, u_λ - линейный коэффициент потемнения к краю, величина I равна выраженной в долях видимого диска звезды площади проекции пятна на картинную плоскость, а J характеризует положение пятна относительно центра диска. Разность звездных величин Δm_λ отсчитывается от уровня блеска незапятненной атмосферы. Если пренебречь эффектом потемнения звезды к краю, выполняется примерное соотношение: $J=2 I/3$, тогда мы получаем следующее соотношение для вычисления доли диска, занятой пятном:

$$I = (1 - 10^{-0.4\Delta m}) / (1 - \beta_\lambda). \quad (3)$$

Используя формулу (3) для звезд "НК-проекта", мы проводим примерные оценки величины I , численно равной относительной площади диска звезды, занятой пятнами - $S_{\text{пятн}}$. Соответствующие величины Δm_λ мы определяем по фотометрическим кривым блеска этих звезд из [8].

Одним из основных результатов обработки наблюдений методом построения зональных моделей является выявление четкой связи между температурой пятен и абсолютным блеском звезды M_V (рис.1). Мы используем эту зависимость, чтобы определить контраст β_λ и для других поздних звезд, в частности, рассматриваемых здесь звезд "НК-проекта". Абсолютный блеск для этих звезд известен и заимствован нами из [8].

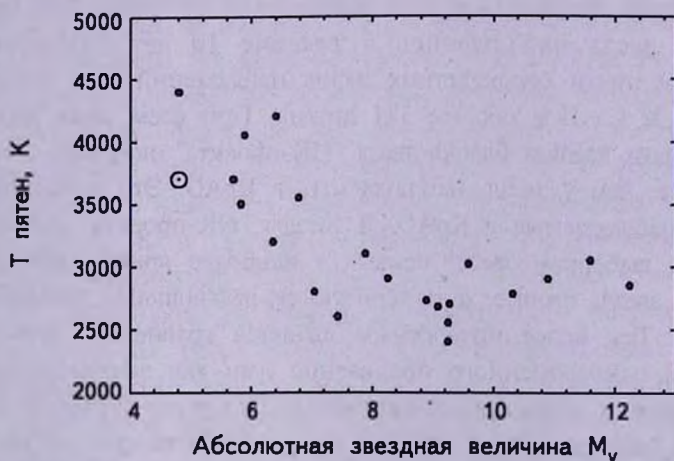


Рис.1. Зависимость температуры пятен от абсолютной звездной величины согласно расчетам по зональной модели [6]. Символом ☉ обозначено Солнце.

Из рисунка видно, что зависимость величин контрастов варьируется незначительно, в диапазоне $\beta_\lambda = 0.1 - 0.25$. Возможность проведения успешных оценок запятненности звезд "НК-проекта" по упрощенной схеме, включающей определение контрастов звезд β_λ в зависимости от абсолютной звездной величины M_V , подтвердилась в результате проведения нами контрольных обратных вычислений с помощью

формулы (3) величин общей площади пятен для 25 звезд КрАО (запятненности которых известны из расчетов с помощью зональных моделей). Максимальная погрешность наших вычислений выявляется в случае звезды EK Dra = HD129333, общей для обеих групп звезд, когда величина запятненности по зональным моделям в 1.2-1.3 раза превышает найденное нами значение. Для второй общей для двух групп звезды BE Cet = HD1835 запятненность совпадает при вычислении обоими методами.

Далее мы проанализировали, как рассчитанные нами площади максимальной запятненности 24 звезд "НК-проекта", которые были выбраны для дальнейшего анализа (они одновременно входят и в рентгеновский каталог ROSAT) и 24 звезд, наблюдаемых в КрАО, зависят от показателей цвета ($B - V$), или спектральных классов. Оказалось, что звезды с активными хромосферами, имеющие большую запятненность по сравнению с остальными объектами из "НК-проекта", принадлежат, в основном, к спектральным классам F, G и частично K. Большая часть сильнозапятненных звезд КрАО принадлежит спектральным классам K и M. Видно, что звезды "НК-проекта", уровень активности которых близок к солнечному, обладают существенно меньшей запятненностью. Кроме того, часть этих звезд с хорошо определенными циклами хромосферной активности, в том числе и Солнце, характеризуются еще меньшей (в 2-3 раза) площадью пятен (единственное исключение - V2292 Oph = HD152391) по сравнению с остальными рассматриваемыми звездами "НК-проекта", запятненность которых в свою очередь в 2-5 раз меньше звезд, наблюдаемых в КрАО.

Для 46 рассматриваемых звезд обеих групп (EK Dra и BE Cet - общие для этих групп) имеются данные о мягком рентгеновском излучении, зарегистрированном на спутнике ROSAT. Одновременно с определением степени запятненности звезд, величины S_{spot} (относительной площади видимого диска звезды, занятой пятнами и выраженной в процентах), мы анализируем связь между S_{spot} и L_X/L_{bol} . Как отмечалось выше, L_X/L_{bol} является хорошим индексом, характеризующим мощность звездной короны.

Результаты наших расчетов площади максимальной запятненности 24 звезд "НК-проекта", которые были выбраны для дальнейшего анализа, и 24 звезд, наблюдаемых в КрАО, собраны в табл.1. Боллометрические светимости L_{bol} звезд "НК-проекта" взяты из [4] и с помощью метода, используемого в этой работе, величины L_{bol} рассчитаны для звезд КрАО. Зависимость запятненности S_{spot} от отношения рентгеновской светимости к боллометрической $\log(L_X/L_{\text{bol}})$ представлена на рис.2.

Здесь впервые выявляется то, что величина запятненности изменяется

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОСТИ ПРОГРАММНЫХ ЗВЕЗД

HD звезды, имя звезды	$\log(L_X)$	$\log(L_{bol})$	$\log(L_X/L_{bol})$	S пятен, %
Sun	26.7	33.58	-6.88	0.20
HD 81809	28.1	33.59	-5.49	0.80
HD114710, β Com	28.06	33.72	-5.66	1.20
HD115404	28.02	33.28	-5.26	2.00
HD160346	27.48	33.25	-5.77	1.00
HD201091, 61 Cyg A	27.15	33.1	-5.95	1.20
HD201092, 61 Cyg B	27.15	32.93	-5.78	1.80
HD149661, V2133 Oph	28.16	33.38	-5.22	2.40
HD1835, BE Cet	28.99	33.54	-4.55	4.50
HD18256, ρ^3 Ari	27.61	34.05	-6.44	0.90
HD25998, 50 Per	29.54	33.93	-4.39	1.80
HD35296, 111 Tau	29.44	33.78	-4.34	3.00
HD39587, χ^1 Ori	29.08	33.69	-4.61	3.60
HD75332	29.56	33.87	-4.31	2.90
HD82885, SV LMi	29.3	33.42	-4.12	3.30
HD115383, 59 Vir	29.51	33.7	-4.19	2.00
HD120136, τ Boo	28.95	33.87	-4.92	1.20
HD176095	29	33.93	-4.93	0.80
HD182572, 31 Aql	27.59	33.42	-5.83	0.60
HD185144, σ Dra	27.61	33.4	-5.79	0.70
HD190007	27.81	33.1	-5.29	3.30
HD131156, ξ Boo	28.9	33.42	-4.52	4.40
HD157856	29.21	33.93	-4.72	1.00
HD129333, EK Dra	30.01	33.64	-3.63	13.80
VY Ari	30.5	33.6	-3.1	21.80
V775 Her	30	33.38	-3.38	30.00
LQ Hya	29.6	33.35	-3.75	12.40
V838 Cen	29.9	33.38	-3.48	21.60
AG Dor	29.8	33.33	-3.53	9.20
MS Ser	30.1	33.35	-3.25	10.00
OU Cen	29.3	33.4	-4.1	7.90
V833 Tau	29.8	33.1	-3.3	24.30
EQ Vir	29.4	33.1	-3.7	8.50
BY Dra	29.6	32.95	-3.35	16.50
CC Eri	29.5	32.93	-3.43	24.70
DK Leo	29.1	32.9	-3.8	11.00
V1005 Ori	29.2	32.9	-3.7	6.80
BF CVn	29	32.82	-3.82	9.00
DT Vir	29.2	32.82	-3.62	12.20
AU Mic	29.5	32.8	-3.3	12.70
FK Aqr	29.4	32.8	-3.4	11.90
V1396 Cyg	28.9	32.78	-3.88	20.80
AD Leo	28.8	32.7	-3.9	5.30
GT Peg	29.2	32.7	-3.5	7.40
YZ CMi	28.4	32.62	-4.22	11.40
EV Lac	28.8	32.62	-3.82	16.80

постепенно от Солнца к звездам с максимально мощными коронами (среди одиночных звезд). Видно, что градиенты зависимости $S_{\text{пятн}}$ от $\log(L_X/L_{\text{bol}})$ для звезд типа Солнца и сильнозапятненных звезд сильно различаются. Это связано с тем, что часть сильнозапятненных звезд выходит уже на уровень насыщения рентгеновского излучения, когда 0.001 доля энергии, которая генерируется в ядре звезды, тратится на нагрев короны. Разумеется, часть объектов спокойнее Солнца не вошла в наше рассмотрение и должна была располагаться в левом нижнем углу рис.2.

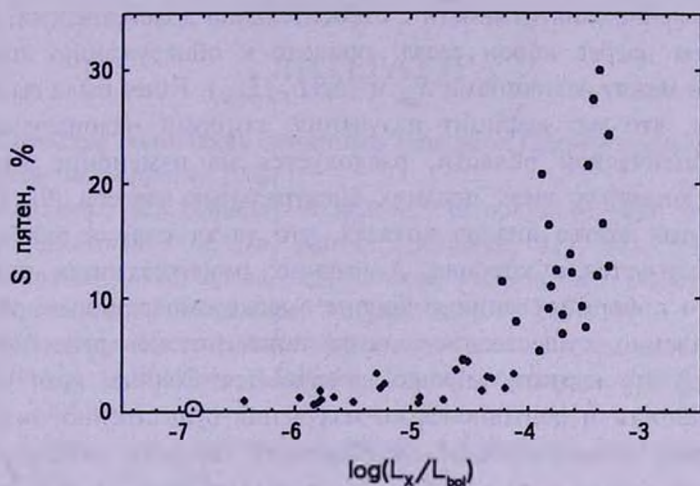


Рис.2. Зависимость площади запятненных областей от отношения $\log(L_X/L_{\text{bol}})$ для сильнозапятненных звезд (точки) и звезд НК-проекта (ромбы). Символом $\odot$ обозначено Солнце.

Следует отметить, что предложенный в этой работе метод определения контрастов пятен не из наблюдений, а по результатам расчетов зональных моделей (см. рис.1), вносит некоторую погрешность в определение величины запятненности, но эта погрешность невелика, так как сами величины контрастов изменяются очень незначительно для разных звезд и влияют на расчеты лишь косвенным образом. Также возможна погрешность в определении яркости звезды "без пятен" из-за того, что нами использовались фотометрические наблюдения звезд "НК-проекта", охватывающие временной интервал в 10 лет. При этом имеется вероятность того, что мы не учитываем долгопериодические вариации блеска на большей временной шкале. Некоторое расхождение в определении запятненности для EK Dra, возможно, связано именно с этим моментом.

3. Выводы. К настоящему времени стали известны около тысячи звезд в окрестности Солнца с процессами, аналогичными солнечной активности. Это дает возможность проследить, каким образом характеристики активности изменяются при переходе от звезд с низким уровнем активности, близким к солнечному, к звездам с мягким

рентгеновским излучением, уровень которого близок к насыщению.

В этой работе по долговременной переменности оптического континуума определена запятненность поверхности звезд с низкой активностью. Получено, что рассчитанная площадь пятен последовательно возрастает от солнечного значения 0.3% в максимуме цикла до 1-5% у звезд "НК-проекта", а затем резко возрастает до 20-35% у сильнозапятненных звезд, площади пятен которых определены из наблюдений и расчетов с помощью зональных моделей в КрАО.

Сопоставление запятненности с относительной долей энергии, расходуемой на нагрев корон звезд, привело к обнаружению довольно тесной связи между величинами $S_{\text{пол}}$ и $\log(L_X/L_{\text{bol}})$. Ранее была высказана идея о том, что тот дефицит излучения, который недоизлучается в пятнах в оптической области, расходуется на изменение внешней атмосферы активных звезд поздних спектральных классов [9]. Проведенный в этой статье анализ показал, что такая идея в наибольшей степени реализуется в коронах. А именно: развитие пятен приводит прежде всего к формированию в короне высокотемпературных областей и, соответственно, существенного возрастания потоков рентгеновского излучения. В эту картину хорошо вписывается Солнце, хотя уровень его запятненности и рентгеновского излучения существенно ниже, чем у других звезд с выявленными устойчивыми циклами активности.

Авторы благодарят М.А.Лившица (ИЗМИРАН) и Р.Е.Гершберга (КрАО) за обсуждение работы. Работа Е.А.Бруевич поддержана грантом РФФИ 04-02-16068.

¹ Государственный Астрономический институт им. П.К.Штернберга, МГУ, Россия, e-mail: bruev_e@mail.ru

² НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, Украина, e-mail: ilya@crao.crimea.ua

SPOT AREAS ON THE STARS WITH LOW ACTIVITY LEVELS SIMILAR TO SOLAR ACTIVITY

Е.А.БРУЕВИЧ¹, И.Ю.АЛЕКСЕЕВ²

The evaluation of spot areas for solar-like stars with low activity level similar to solar activity was made using the optical observations of their modulated by rotation fluxes. It was shown that values of spot areas change gradually step by step from stars with low level of atmospheric activity to stars

from CrAO observing programm with relatively large spot areas. Zonal models of spots for stars from CrAO observing programm were created earlier by Alekseev and Gershberg. The close connection between spot areas and X-ray fluxes for stars with strongly distinguish activity levels was clearly recognized.

Key words: (*stars:*)*starspots: stellar coronae: solar-type stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Р.Е.Гершберг*, Активность солнечного типа звезд Главной последовательности. Одесса: Астропринт, 2002.
2. *S.L.Baliunas, R.A.Donahue, W.H.Soon*, *Astrophys. J.*, **438**, 269, 1995.
3. *J.H.M.M.Schmitt, C.Liefke*, *Astron. Astrophys.*, **417**, 651, 2004.
4. *Е.А.Бруевич, М.М.Кацова, Д.Д.Соколов*, *Астрон. ж.*, **78**, 827, 2001.
5. *И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг*, *Астрон. ж.*, **73**, 589, 1996.
6. *И.Ю.Алексеев*, Запятненные звезды малых масс. Одесса, Астропринт, 2001.
7. *J.T.Wright, G.W.Marcy, R.P.Butler, S.S.Vogt*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **152**, 261, 2004.
8. *R.R.Radick, C.W.Lockwood, B.A.Skiff, S.L.Baliunas*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **118**, 239, 1998.
9. *И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг, М.М.Кацова, М.А.Лившиц*, *Астрон. ж.*, **78**, 558, 2001.