

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ АТМОСФЕР СОЛНЦА И ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

Е.А.БРУЕВИЧ, В.В.БРУЕВИЧ, Е.В.ШИМАНОВСКАЯ

Поступила 8 ноября 2015

Принята к печати 16 декабря 2015

Проведен анализ атмосферной активности Солнца и звезд солнечного типа с использованием наблюдений НК-проект на обсерватории Mount Wilson, California and Carnegie Planet Search Program на обсерваториях Keck и Lick, а также Magellan Planet Search Program на обсерватории Las Campanas. Показано, что циклическая активность звезд, аналогичная 11-летней солнечной активности, различается для звезд спектральных классов F, G и K: становится наиболее выраженной у звезд класса K. Сравнительный анализ звезд солнечного типа с разным уровнем хромосферной и корональной активности подтвердил, что Солнце принадлежит к звездам с относительно низким уровнем хромосферной активности и среди этих звезд выделяется минимальным уровнем коронального излучения и минимальными вариациями потоков излучения фотосферы.

Ключевые слова: *Солнце: атмосфера: звезды солнечного типа: циклы активности: звезды: НК-проект*

1. Введение. Магнитная активность Солнца и звезд солнечного типа свидетельствует о наличии сложных электромагнитных и гидродинамических процессов в их атмосферах. Известно, что вариации как полного потока, так и потока в отдельных линиях, являются циклическим процессом для Солнца и для звезд (см., например, [1-4]). Хотя в среднем цикл солнечной активности длится около 11 лет, бывают циклы длиной от 9 до 14 лет. Средние значения также меняются на протяжении столетий. Так, в XX в. средняя длина цикла составила 10.2 года, [5,6].

На основе наблюдений звезд - аналогов Солнца в рамках программы НК-проект на обсерватории Mount Wilson были достоверно обнаружены циклы активности и у звезд. Длительности циклов хромосферной активности, определенные для 50 звезд спектральных классов F, G и K, составляют от 7 до 20 лет. Программа НК-проект, начатая О.Вилсоном в 1965г., продолжается по настоящее время. Она является одной из наиболее эффективных программ по изучению активности солнечного типа среди звезд, [1,7]. В настоящее время существуют несколько баз данных, охватывающих тысячи звезд с измеренными потоками в хромосферных линиях CaII [8-12]. К сожалению, только для нескольких десятков звезд известны периоды циклов магнитной активности [1,3,7,10].

В настоящей работе одновременно проанализированы данные из трех программ наблюдений звезд солнечного типа с известными значениями S-индекса - параметра, характеризующего уровень хромосферной активности звезд:

1. НК-проект - программа обсерватории Mount Wilson, в которой дано определение S-индекса, ставшего впоследствии стандартной характеристикой уровня хромосферной активности, см. [1,7]. С этим значением S-индекса сравнивались и по нему калибровались последующие программы наблюдения звезд с активными хромосферами.

2. Программа California and Carnegie Planet Search Program, включающая в себя наблюдения около 1000 звезд на обсерваториях Keck и Lick в хромосферных эмиссионных линиях H и K CaII. S-индексы этих звезд определялись в системе Mount Wilson, см. [8]. На основе этих измерений с использованием общих параметрических моделей были рассчитаны медианные уровни активности, возраст и периоды вращения для 1228 звезд, причем для ~1000 из этих звезд значения S-индекса прежде не публиковались.

3. Программа Magellan Planet Search Program, проводимая на обсерватории Las Campanas и включающая в себя измерения хромосферной активности 670 звезд Главной последовательности спектральных классов F, G, K и M, наблюдаемых в южном полушарии. S-индексы этих звезд также приведены к системе Mount Wilson [9].

Цель нашей работы заключается в следующем:

- 1) изучение места Солнца среди звезд солнечного типа с различными уровнями хромосферной и корональной активности;
- 2) сравнительный анализ хромосферной, корональной и циклической активности Солнца и звезд солнечного типа.

2. Место Солнца среди звезд солнечного типа с различными уровнями хромосферной и корональной активности. На рис.1 Солнце и звезды из разных выборок представлены на диаграмме Герцшпрунга-Расселла. Приведены ~1000 звезд солнечного типа из работы [8], наблюдавшиеся в рамках программы California and Carnegie Planet Search Program (полые кружки); 660 звезд солнечного типа из работы [9], наблюдавшиеся в рамках программы Magellan Planet Search Program (звездочки) и 110 звезд солнечного типа и Солнце, наблюдавшиеся в рамках Mount Wilson НК-проекта из работы [1] (закрашенные кружки). Сплошная линия соответствует начальной Главной последовательности (ZAMS) на диаграмме Герцшпрунга-Расселла: абсолютная звездная величина - показатель цвета.

Звезды, близкие к начальной Главной последовательности на рис.1, являются самыми молодыми среди всех остальных представленных звезд:

возраст около 10^8 - $10^{8.5}$ лет. Чем старше звезда, тем выше она находится над этой линией. Возраст звезд, представленных на рис.1, находится в диапазоне от 10^8 до 10^{10} лет. Кроме того, на рис.1 можно заметить существенное отклонение некоторых звезд от Главной последовательности, которое связано с тем, что наблюдатели частично включали в программы поиска планет определенное количество субгигантов с большими значениями M_p . Мы не учитываем субгиганты при анализе хромосферной и корональной активности.

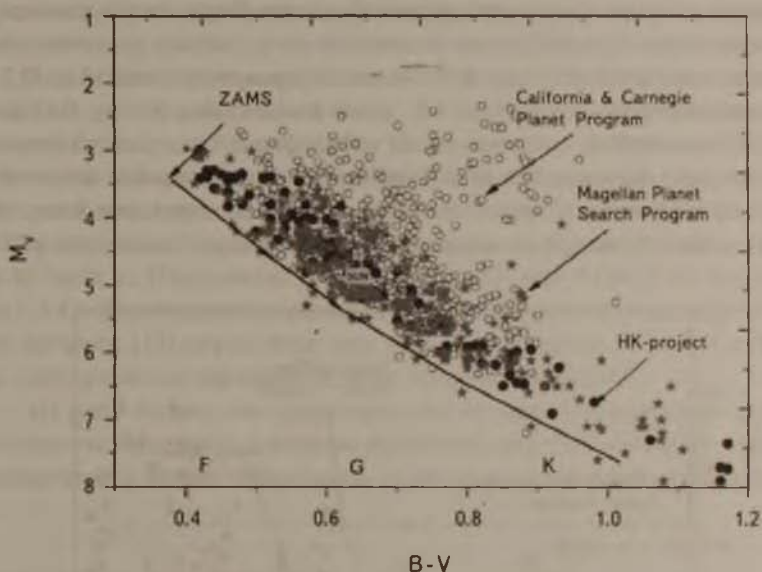


Рис.1. Солнце среди звезд солнечного типа из разных наблюдательных программ на диаграмме Герцшпрунга-Расселла.

Конвективные движения в подфотосферных слоях Солнца возбуждают в атмосфере различного рода гидродинамические волны. Поток энергии этих волн ослабевает с высотой сравнительно медленно, и сочетание быстрого уменьшения плотности вещества и медленного ослабления потока энергии волн, эффективно поглощаемых этим веществом, приводит к росту температуры. В результате на Солнце имеет место сравнительно узкая по высоте - около 100 км - область температурного минимума, над которой и начинается хромосфера. Эмиссионные линии, обнаруженные на спектрограммах при наблюдениях ярких звезд солнечного типа, возникают на разных уровнях звездной атмосферы - от нижней хромосферы до переходной зоны между хромосферой и короной. Анализ этих линий показал, что звезды солнечного типа (F-G-K) имеют практически такую же

хромосферу, как Солнце, а хромосферы активных красных карликов (М) существенно мощнее солнечной хромосферы, [13]. Систематические изменения преобладающих явлений солнечной активности вдоль Главной последовательности обусловлены сменой преобладающих явлений активности. Так, у F и части G-звезд преобладает более высокая, но менее регулярная, чем у Солнца, активность. G и K-звезды характеризуются устойчивыми циклами, а красные M-карлики - нерегулярными вспышками, [14].

На рис.2 показано как звезды с различным уровнем хромосферной активности распределены по спектральным классам. Видно, что S-индексы, характеризующие хромосферную активность звезд, сильно различаются. Для звезд спектрального класса F S-индекс варьируется от 0.13 до 0.3, для звезд класса G - от 0.13 до 0.5, а для звезд класса K - от 0.13 до 0.6-0.7. Согласно [10], средние уровни хромосферной активности (соответствующие S-индексу Mount Wilson) у звезд спектрального класса F выше, чем у G-звезд. С другой стороны, у звезд спектральных классов K и M средние уровни хромосферной активности также выше, чем у G-звезд.

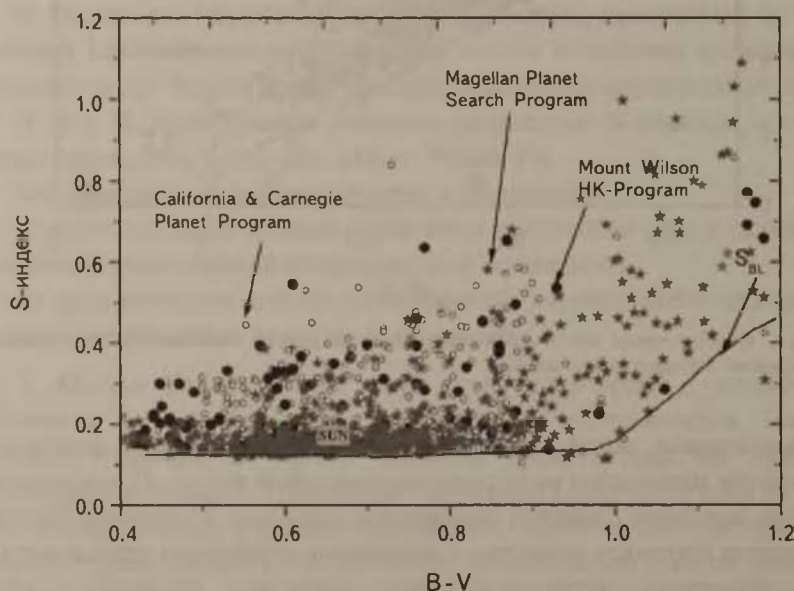


Рис.2. Хромосферная активность звезд спектральных классов F, G, K и M по данным трех программ наблюдений.

Для более крупной выборки из 2600 звезд из программы California Planet Search Program была определена нижняя огибающая уровня хромосферной активности S_{BL} - S-индекс Базового Уровня (Basic Level) как функция показателя цвета ($B-V$) и ее аппроксимация полиномом [10].

Зависимость S_{BL} показана на рис.2 сплошной линией. Для звезд, имеющих показатель цвета $0.4 < B - V < 1.0$, базовый уровень S_{BL} практически постоянен (примерно равен 0.13), а для звезд с $1.0 < B - V < 1.6$ базовый уровень S_{BL} начинает плавно расти от 0.13 до 0.6. В работе [10] предполагается, что этот рост S_{BL} связан с уменьшением потока в континууме для более красных звезд, так как S-индекс определяется как отношение эмиссии H и K CaII к близлежащему континууму. По местоположению Солнца на рис. 2 видно, что уровень его хромосферной активности несколько ниже среднего уровня хромосферной активности звезд Главной последовательности.

В звездах солнечного типа, относящихся к поздним спектральным классам, рентгеновское излучение генерируется высокотемпературной плазмой звездных корон [15]. Связь между вращением звезды и рентгеновской светимостью L_X впервые была обнаружена и описана в [16]. На рис.3 показана зависимость отношения рентгеновской светимости к болометрической L_X/L_{bol} от периода вращения P_{rot} для 824 звезд из [17] и 80 звезд из НК-проекта по данным из каталога ROSAT All-Sky Survey (0.1-2.4 кэВ), которые приведены в [18]. Рентгеновские светимости звезд из каталога [17] определены для того же диапазона 0.1 - 2.4 кэВ, что и рентгеновские светимости звезд из каталога ROSAT.

Из рис.3 видно, что существуют два основных режима корональной активности: линейный, в котором активность растет с уменьшением периода вращения, и режим насыщения, в котором отношение рентгеновской

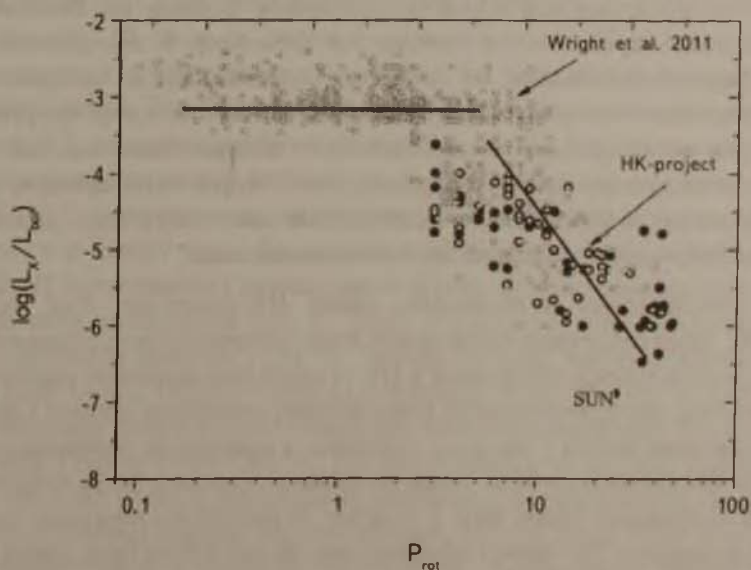


Рис.3 Отношение рентгеновской светимости к болометрической в зависимости от периода вращения.

светимости к болометрической остается постоянным: $\log(L_x/L_{bol}) = -3.13$.

Звезды НК-проекта, не являющиеся достаточно молодыми и активными, относятся к звездам с линейным режимом на рис.3. При этом Солнце подтверждает свое уникальное место среди звезд солнечного типа: оно характеризуется самым низким уровнем L_x/L_{bol} среди всех рассмотренных звезд.

Известно, что в течение 11-летнего цикла активности вариации потока излучения солнечной фотосферы очень малы, не более 0.2%. Очевидно, что вариации потока излучения фотосферы Солнца и звезд связаны с вариациями площади пятен на диске. В [14,19] приводятся оценки доли относительной площади, занимаемой пятнами ($S_{\text{пят}}$) на поверхности Солнца и звезд. Эта величина меняется в диапазоне от 0.2% (Солнце) до 2-3% у звезд НК-проекта (F-G-K спектральных классов). У сильно запятненных звезд (М-звезд), изученных в [20-22], $S_{\text{пят}}$ доходит до 10-15%.

Анализ временных рядов наблюдений потоков от фотосфер и хромосферной эмиссии в линиях CaII для звезд-аналогов Солнца, показал наличие устойчивой эмпирической корреляционной зависимости между средним уровнем хромосферной активности и переменностью в фотосферном континууме, см. [23]. Как правило, более активные звезды демонстрируют более высокий уровень переменности потока в фотосферном континууме. При этом переменность Солнца в фотосферном континууме оказалась значительно ниже, чем ожидалось в соответствии с его уровнем хромосферной активности. В [23] предполагается, что на более длительном временном масштабе (сотни лет) положение Солнца на диаграмме, связывающей переменности потоков от фотосфер в зависимости от хромосферной активности, не останется постоянным, и со временем количественные характеристики переменности потоков в фотосферном континууме могут прийти в соответствие с этой эмпирической зависимостью. Однако в настоящее время мы видим, что Солнце подтверждает свое уникальное место среди звезд с активностью солнечного типа: вариации потоков солнечной фотосферы необыкновенно малы.

3. *Циклическая активность звезд НК-проекта.* Как можно заметить, среди баз данных наблюдений звезд солнечного типа с известными значениями S-индекса отбор звезд в НК-проекте был выполнен специально для изучения звезд, являющихся ближайшими аналогами нашего Солнца. Это одиночные звезды с массами, близкими к солнечной, принадлежащие Главной последовательности. Близкие двойные системы были исключены из этой программы. Более того, в отличие от различных программ поиска планет программа НК-проект обсерватории Mount Wilson была специально разработана для изучения циклической активности солнечного типа у F, G и K-звезд.

Результаты проведенных в рамках НК-проекта совместных наблюдений потоков излучения и периодов вращения дали возможность впервые в звездной астрофизике обнаружить вращательную модуляцию наблюдаемых потоков [24]. Это означало, что на поверхности звезды имеются неоднородности, которые существуют и эволюционируют в течение нескольких периодов вращения звезды вокруг своей оси. Кроме того, эволюция периодов вращения звезд ясно указывала на существование дифференциального вращения звезд, аналогичных дифференциальному вращению Солнца.

Эволюция активных областей на поверхности звезды во временном масштабе порядка 10 лет определяет циклическую активность, аналогичную солнечной. В [1] для 111 звезд НК-проекта были рассчитаны периодограммы для определения длительности циклов в случае, когда циклическая активность была обнаружена. Значимость высоты самого высокого пика периодограммы оценивалась по методу построения периодограмм Ломба-Скаргла [25] с помощью функции FAP (False Alarm Probability). Звезды с циклами классифицировались следующим образом: если для рассчитанного периода цикла $P_{\text{сис}} \pm \Delta P$ функция $\text{FAP} \leq 10^{-9}$, то звезда относится к классу "Excellent"; если $10^{-9} < \text{FAP} \leq 10^{-5}$, то звезда относится к классу "Good"; если $10^{-5} < \text{FAP} \leq 10^{-2}$, то звезда относится к классу "Fair"; если $10^{-2} \leq \text{FAP} \leq 10^{-1}$, то звезда относится к классу "Poor".

Для 50 из 111 звезд НК-проекта с разным уровнем надежности были найдены регулярные циклы, периоды которых $P_{\text{сис}}$ меняются в диапазоне от 7 до 20 лет. При этом циклической активностью класса "Excellent" среди этих 50 звезд с циклами обладают всего 12 звезд и Солнце, циклической активностью класса "Good" - 8 звезд. Следует отметить, что звезды классов "Excellent" и "Good", характеризующиеся малой величиной $\text{FAP} \leq 10^{-5}$, по определению имеют очень стабильные значения величин периодов циклической активности $P_{\text{сис}}$. Нестабильная цикличность при $\text{FAP} \geq 10^{-2}$ характеризует звезды, как принадлежащие к классам "Fair", "Poor" и к классу звезд без выявленной цикличности - "Var".

В [2] представлены результаты 4-летних прямых наблюдений циклов магнитной активности для 19 звезд солнечного типа, относящихся к спектральным классам F, G, K. Звезды из этой выборки имеют массы от 0.6 до $1.4 M_{\odot}$ (массы Солнца) и периоды вращения от 3.4 до 43 дней. Наблюдения проводились с помощью спектрополяриметра NARVAL (Pic du Midi, France) в 2007-2011 гг. По результатам этих прямых наблюдений у 17 звезд из 19 была обнаружена цикличность, аналогичная солнечным квазидвухлетним циклам. Было показано, что для звезд τ Boo и HD 78366 (входящих также в выборку НК-проекта обсерватории Mount Wilson) также наблюдаются циклы с периодами от 2 до 3 лет, аналогичные

солнечным квазидвухлетним. В работе [1], где цикличность определялась с помощью периодограмм Ломба-Скаргла, этих циклов, аналогичных квазидвухлетним солнечным у звезд τ Boo и HD 78366 обнаружено не было. Этот факт можно объяснить, если провести аналогию с солнечными циклами: квазидвухлетние циклы характеризуются (1) - нестабильностью периода и (2) - относительно малой вариацией амплитуды в цикле. Амплитуда переменности излучения в квазидвухлетних циклах в случае Солнца на порядок меньше амплитуды переменности основного 11-летнего цикла. В работе [2] предполагается, что если бы период их спектро-поляриметрических наблюдений был достаточно длительным, были бы подтверждены также и циклы на 11-летней временной шкале, наблюдаемые у звезд τ Boo и HD 78366 на Mount Wilson.

Для звезд солнечного типа, относящихся к спектральным классам F, G и K, согласно наблюдениям орбитальной обсерватории Kepler, также были найдены "более короткие" циклы хромосферной активности с периодами около двух лет [12,26]. В работе [3] "короткий" цикл (аналогичный квазидвухлетнему солнечному) был определен для звезды EI Eri, его длительность равна 2.7 года.

Как оказалось, распределение звезд с циклами по классам "Excellent", "Good", "Fair" и "Poor" играет важную роль: звезды со стабильными

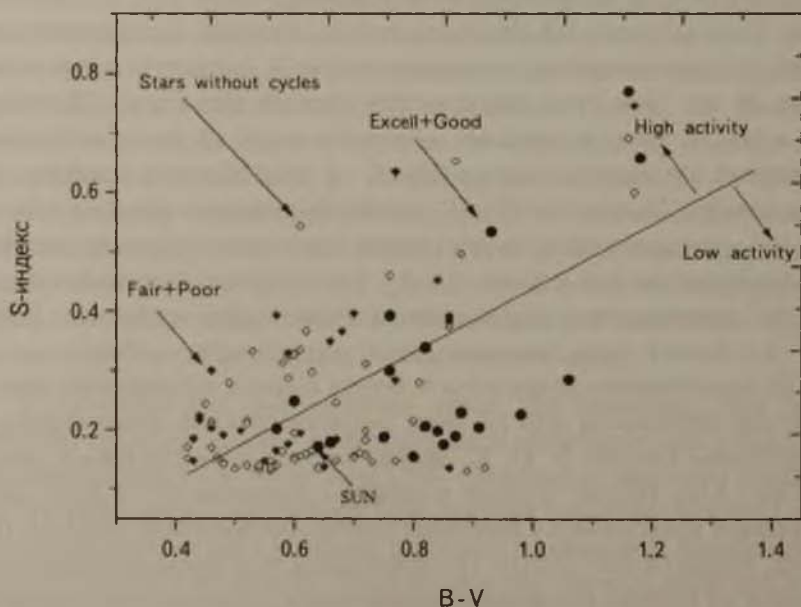


Рис.4. Звезды НК-проекта, по наблюдениям 1969-1994гг.: зависимость величины S-индекса от показателя цвета ($B - V$). Сплошная линия - линейная регрессия (1), звезды "Excellent" + "Good" - закрашенные кружки, звезды "Fair" + "Poor" - треугольники, звезды без циклов - полые ромбы.

циклами "Excellent" и "Good" и звезды с нестабильными циклами "Fair" и "Poor" относятся к разным группам на диаграммах зависимостей S-индекса от показателя цвета ($B - V$), рентгеновской светимости $\log L_X$ от ($B - V$) и периода цикла хромосферной активности $P_{\text{цик}}$ от возраста - $\log(\text{Age/yr})$, см. рис.4, 5 и 7.

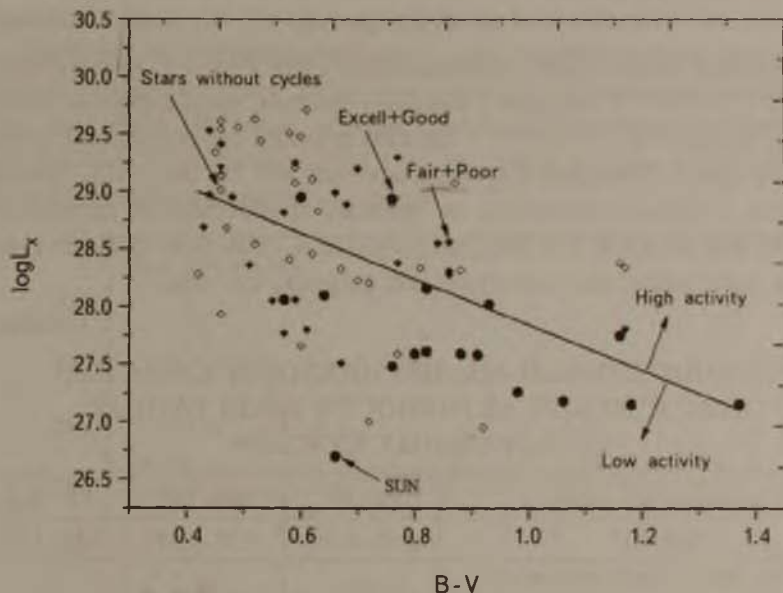


Рис.5. Звезды НК-проекта, по наблюдениям 1969-1994гг.: зависимость рентгеновской светимости L_X от показателя цвета ($B - V$). Сплошная линия - линейная регрессия (2), звезды "Excellent" + "Good" - закрашенные кружки, звезды "Fair" + "Poor" - треугольники, звезды без циклов - полые ромбы.

На рис.4 и рис.5 мы видим, что звезды со стабильными циклами "Excellent" и "Good" характеризуются в среднем более низкими уровнями хромосферной и корональной активности, чем звезды с нестабильной циклическостью. Рис.7 подтверждает факт, что звезды со стабильными циклами "Excellent" и "Good" выделяются среди звезд с циклами: тогда как все звезды не демонстрируют зависимости периодов циклов от возраста, у звезд "Excellent" и "Good" средний период циклов увеличивается примерно на 20 % с увеличением возраста звезд от $10^{8.5}$ до 10^{10} лет.

Процессы, определяющие сложные явления звездной активности и охватывающие практически всю атмосферу от фотосферы до короны, происходят по-разному в звездах солнечного типа, относящихся к различным спектральным классам. Наблюдательные данные НК-проекта обсерватории Mount Wilson дают возможность изучать у звезд циклическую активность солнечного типа одновременно с их хромосферной и корональной активностью. Выбранные данные о рентгеновской светимости $\log L_X$ для 80

звезд из НК-проекта были взяты нами из ROSAT All-Sky Survey [18]. Как отмечалось ранее в [1], средняя хромосферная активность звезд, или точнее S-индекс, растет с ростом показателя цвета ($B - V$), см. рис.2 и 4.

Проведенный нами регрессионный анализ звезд НК-проекта показал, что линейная регрессия описывается следующей формулой:

$$S = -0.10 + 0.530 \cdot (B - V). \quad (1)$$

Обозначим правую часть соотношения (1) как $F(B - V)$. Будем считать звезды с $S > F(B - V)$ звездами с высоким уровнем хромосферной активности, а звезды с $S < F(B - V)$ - с низким уровнем хромосферной активности, см. рис.4. Затем мы проанализировали все 110 звезд НК-проекта и Солнце с целью определить их уровень хромосферной активности (высокий или низкий). Мы обсудим результаты далее при сравнительном анализе звезд различных спектральных классов, см. табл.1.

Таблица 1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ И КАЧЕСТВА ЦИКЛИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

Спектральный класс	F2 - F9	G0 - G9	K0 - K7
$\Delta(B - V)$	0.42 - 0.56	0.57 - 0.87	0.88 - 1.35
Число звезд в спектральном интервале	39	44	27
Число звезд с известными L_X	27	29	24
Отн. число звезд с повышенной корональной активностью	60%	48%	41%
Отн. число звезд с повышенной хромосферной активностью	56%	39%	60%
Отн. число звезд с циклами хромосферной активности	25%	40%	72%
Качество циклов хромосферной активности "Excel + Good"/"Fair + Poor"	0/10	7/10	14/4

Для 80 звезд, корональное излучение которых нам известно из данных ROSAT, мы также провели регрессионный анализ и получили следующее соотношение между рентгеновской светимостью, нормированной на болометрическую светимость, и показателем цвета ($B - V$):

$$L_X = 29.83 - 1.99 \cdot (B - V). \quad (2)$$

Обозначим правую часть соотношения (2) как $P(B - V)$. По аналогии с анализом хромосферной активности звезд будем считать звезды с $\log L_X > P(B - V)$ звездами с высоким уровнем корональной активности, а

звезды с $\log L_X < P(B-V)$ - с низким уровнем корональной активности, см. рис.5. Как отмечалось выше, в случае хромосферной активности имеет место прямая корреляция: с ростом показателя цвета ($B-V$) среднее значение индекса хромосферной активности (S-индекс) звезд растет. Но в случае рентгеновского излучения звезд имеет место обратная корреляция: с ростом показателя цвета ($B-V$) среднее значение $\log L_X$ убывает, см. рис.4, 5.

Отметим, что большинство звезд с повышенной хромосферной активностью характеризуются также повышенной корональной активностью. При этом около 15% звезд, включая Солнце, характеризуются корональной активностью существенно ниже того значения, которое соответствует их хромосферной активности, см. рис.6.

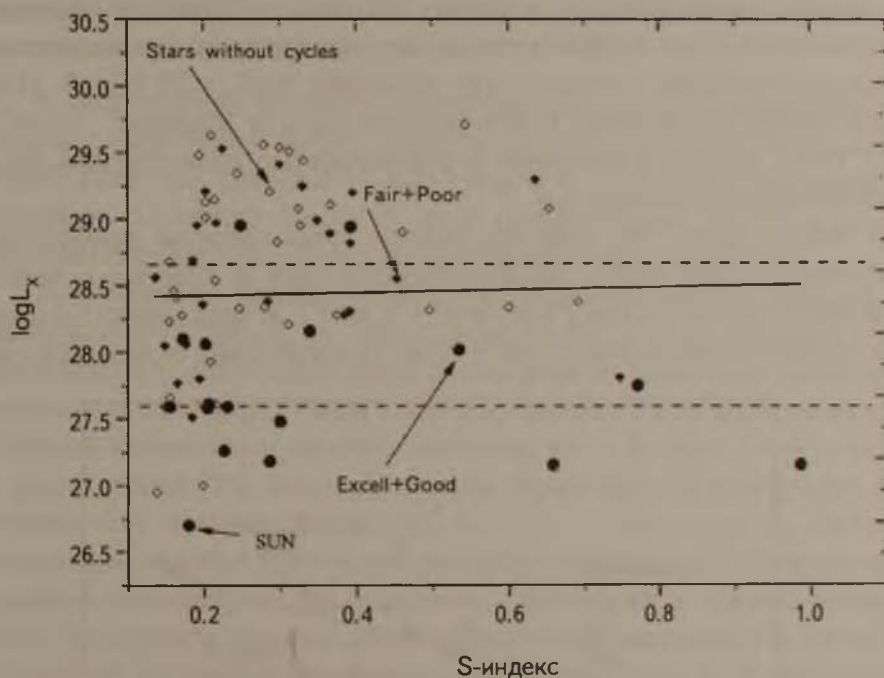


Рис.6. Звезды НК-проекта, по наблюдениям 1969-1994 гг.: зависимость рентгеновской светимости $\log L_X$ от величины S-индекса. Сплошная линия - линейная регрессия, звезды "Excellent" + "Good" - закрашенные кружки, звезды "Fair" + "Poor" - треугольники, звезды без циклов - полные ромбы.

Рис.4 и рис.5 демонстрируют, что звезды с циклами, относящимися к классам "Excellent" и "Good", большей частью (около 70%) характеризуются низким уровнем хромосферной и корональной активности, в отличие от звезд с циклами, относящимися к классам "Fair" и "Poor", которые в большинстве своем (около 75%) характеризуются высоким уровнем хромосферной и корональной активности.

Наличие или отсутствие выраженной цикличности, а также качество

найденных циклов ("Excellent", "Good", "Fair", "Poor") для звезд, принадлежащих к спектральным классам F, G и K, существенно отличается, см. табл.1.

Штриховые линии - медианные значения для звезд классов "Fair" + "Poor" + "Var" (верхняя) и "Excellent" + "Good" (нижняя).

На рис.6 показана зависимость между излучением корон и хромосфер звезд НК-проекта. Линия регрессии разделяет звезды с относительно высокими и относительно низкими потоками L_x . Видно, что звезды без циклов и звезды с плохо выраженной циклическостью ("Fair" + "Poor" + "Var") характеризуются относительно высоким уровнем потоков коронального излучения (медианное значение соответствует величине $\log L_x = 28.45$). При этом звезды, относящиеся к классам "Excellent" + "Good", в среднем характеризуются более низким уровнем потоков коронального излучения (медианное значение соответствует величине $\log L_x = 27.45$). В [18] предполагается, что различия между звездами классов "Excellent", "Good", "Fair", "Poor", связано с наличием и устойчивостью конвективных зон, расположенных под фотосферой.

Из табл.1 видно, что качество циклов хромосферной активности (отношение общего числа звезд, принадлежащих к классам с четко выраженной циклическостью ("Excellent" + "Good"), к числу звезд с плохо определяемой циклическостью ("Fair" + "Poor")) значительно отличается для

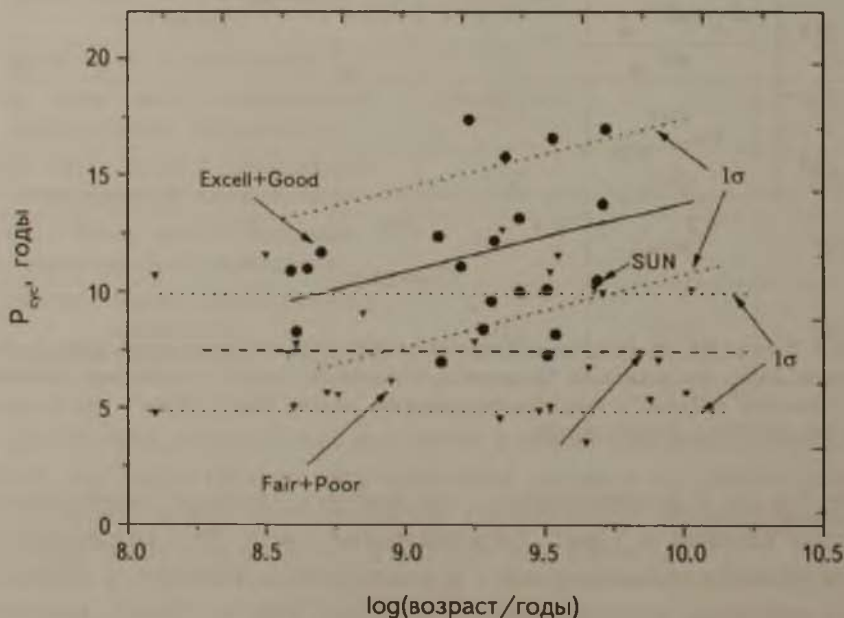


Рис.7. Зависимость периода циклической активности $P_{\text{цик}}$ от возраста для звезд НК-проекта. Показаны регрессии для звезд из полной выборки (нижняя штриховая) и для звезд с циклами класса "Excellent" + "Good" (верхняя сплошная). Для обеих регрессий пунктирными линиями указаны интервалы, соответствующие стандартному отклонению 1σ .

звезд различных спектральных классов F, G и K.

Мы проанализировали зависимость длительности циклов магнитной активности звезд от их возраста. Длительности циклов были взяты из [1]. Возраст звезд рассчитывался нами в соответствии с формулами из [8], как функция хромосферной активности.

На рис.7 представлена зависимость периода $P_{\text{сф}}$ от возраста звезд. Разброс точек вокруг линии регрессии очень велик. Для звезд с циклами "Excellent" + "Good" с увеличением возраста - $\log(\text{Age/yr})$ от 8.5 до 10 - длительность циклов растет приблизительно на 20%. Для звезд с циклами "Fair" + "Poor" зависимость $P_{\text{сф}}$ от возраста не наблюдается. Таким образом, проблема максимально точного определения $P_{\text{сф}}$, например, с помощью частотно-временного анализа (в частности, с использованием вейвлетов), становится чрезвычайно актуальной.

4. *Заключение.* Качество циклической активности, аналогичной 11-летнему солнечному циклу, существенно улучшается (от звезд классов "Fair + Poor", до "Excellent + Good") для G и K-звезд по сравнению с F-звездами. 11-летние циклы F-звезд (наблюдаемые только в четверти случаев) определены с более низким уровнем достоверности.

Хромосферная активность звезд из НК-проекта максимальна для звезд спектрального класса K, см. табл.1. G-звезды (и Солнце) обладают меньшей хромосферной активностью среди рассмотренных нами звезд. Повышенная активность атмосфер F-звезд также характеризуется повышенной хромосферной активностью, немного меньшей, чем у K-звезд. Это согласуется с результатами [10]. Базовый уровень хромосферной активности S_{BL} из работы [10] начинает расти при $(B - V) > 1$. Этот рост S_{BL} связан со снижением потока в континууме для более красных звезд. Уровень хромосферной активности Солнца сопоставим с уровнем хромосферной активности звезд НК-проекта, которые имеют хорошо выраженные циклы активности ("Excellent" + "Good") и аналогичные показатели цвета. С другой стороны, корональная активность Солнца существенно ниже корональной активности G-звезд из НК-проекта и других наблюдательных программ.

Корональная активность также более выражена у звезд спектрального класса F из-за их более сильной атмосферной активности (по сравнению со звездами спектральных классов G и K), она не связана с конвективными зонами, расположенными под фотосферой. У F-звезд практически не выявляются устойчивые хромосферные циклы.

Обнаружено, что звезды, относящиеся к классам "Excellent" + "Good", в среднем характеризуются более низким уровнем потоков коронального излучения (медианное значение соответствует величине $\log L_x = 27.45$), тогда как звезды без циклов имеют более высокий уровень потоков коронального излучения (медианное значение соответствует величине $\log L_x = 28.45$).

В настоящее время большой интерес вызывает поиск планет в зоне обитаемости, т.е. в области вокруг звезды, где планета с достаточным атмосферным давлением может поддерживать на поверхности воду в жидком состоянии. Мы считаем, что следует уделить пристальное внимание также звезде, вокруг которой обращается планета. Не исключено, что одним из условий, повышающих вероятность того, что пригодная для жизни планета обитаема, является сходность характеристик центральной звезды с уникальными характеристиками нашего Солнца: крайне низкий уровень переменности излучения фотосферы при очень низком уровне коронального излучения.

Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, МГУ,
Россия, e-mail: red-field@yandex.ru brouev@sai.msu.ru
eshim@sai.msu.ru

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACTIVITY CYCLES OF THE ATMOSPHERES OF THE SUN AND SOLAR-TYPE STARS

E.A.BRUEVICH, V.V.BRUEVICH, E.V.SHIMANOVSKAYA

The analysis of the atmospheric activity of the Sun and solar-type stars using observations of the HK project at Mount Wilson Observatory, California and Carnegie Planet Search Program at Lick and Keck observatories and the Magellan Planet Search Program at the Las Campanas Observatory. It is shown that the cyclic activity of stars similar to the 11-year solar activity varies for stars of spectral classes F, G and K: becomes most pronounced for stars of class K. A comparative analysis of solar-type stars with different levels of chromospheric and coronal activity confirmed that the Sun belongs to the stars with a relatively low level of chromospheric activity. And among these stars the Sun has the minimal level of coronal radiation and minimal level of variations of fluxes of the stellar photosphere.

Key words: *Sun: atmosphere: stars of solar type: cycles of activity: stars: the HK-project*

ЛИТЕРАТУРА

1. *S.L.Baliunas, R.F.Donahue et al.*, *Astrophys. J.*, **438**, 269, 1995.
2. *A.Morgenthaler, P.Petit, J.Morin et al.*, *Astron. Nachr.*, **332**, 866, 2011.
3. *Z.Kollath, K.Olah*, *Astron. Astrophys.*, **501**, 695, 2009.
4. *E.A.Bruevich, E.V.Kononovich*, *Moscow University Phys. Bull.*, **66**, 72, 2011.
5. *Ю.Витинский, М.Копецкий, Г.Кулин*, Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца, М., Наука, 1986.
6. *E.A.Bruevich, G.V.Yakunina*, *Moscow University Phys. Bull.*, **70**, 282, 2015.
7. *G.W.Lockwood, B.A.Skif, R.R.Radick et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **171**, 260, 2007.
8. *J.T.Wright, G.W.Marcy, R.P.Butler, S.S.Vogt*, *Astrophys. J. Suppl.*, **152**, 261, 2004.
9. *P.Arriagada*, *Astrophys. J.*, **734**, 70, 2011.
10. *H.Isaacson, D.Fisher*, *Astrophys. J.*, **72**, 875, 2010.
11. *R.A.Garcia, S.Mathur et al.*, *Science*, **329**, 1032, 2010.
12. *R.A.Garcia, T.Ceillier et al.*, *Astron. Astrophys.*, **572**, A34, 2014.
13. *Р.Е.Гершберг*, Активность солнечного типа звезд Главной последовательности, Одесса, Астропринт, 2002.
14. *Н.Г.Бочкарев, Р.Е.Гершберг, М.А.Лившиц*, Идеи С.Б.Пикельнера в контексте современной астрофизики, М., Космоинформ, 2014.
15. *G.S.Vaiana, J.P.Cassinelli, G.Fabiano et al.*, *Astrophys. J.*, **245**, 163, 1981.
16. *R.Pallavicini, L.Golub, R.Rosner et al.*, *Astrophys. J.*, **248**, 279, 1981.
17. *N.J.Wright, J.J.Drake, E.E.Mamajek, G.W.Henry*, *Astrophys. J.*, **743**, 48, 2011.
18. *E.A.Bruevich, M.M.Katsova, D.D.Sokolov*, *Astron. Reports*, **45**, 718, 2001.
19. *E.A.Bruevich, I.Yu.Alekseev*, *Astrophysics*, **50**, 187, 2007.
20. *И.Ю.Алексеев*, Запятненные звезды малых масс, Одесса, Астропринт, 2001.
21. *И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг*, *Астрон. ж.*, **73**, 589, 1996.
22. *И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг, М.М.Кацова, М.А.Лившиц*, *Астрон. ж.*, **78**, 558, 2001.
23. *A.L.Shapiro, W.Schmutz, G.Cessateur, E.Rozanov*, *Astron. Astrophys.*, **552**, A114, 2013.
24. *R.W.Noyes, L.Hartman, S.L.Baliunas et al.*, *Astrophys. J.*, **279**, 763, 1984.
25. *J.D.Scargle*, *Astrophys. J.*, **263**, 835, 1982.
26. *T.S.Metcalf, M.Monteiro, M.J.Thompson et al.*, *Astrophys. J.*, **723**, 1583, 1982.

