

ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА ИНДЕКСОВ АКТИВНОСТИ
АТМОСФЕР СОЛНЦА И ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА
НА ФАЗАХ ПОДЪЕМА И СПАДА ЦИКЛОВ

Е.А.БРУЕВИЧ, Г.В.ЯКУНИНА

Поступила 19 апреля 2016

Принята к печати 22 июня 2016

Анализируется эффект гистерезиса, который проявляется в неоднозначной взаимосвязи излучения фотосферы, хромосферы и короны на фазах роста и спада циклов солнечной и звездной активности. Анализируются и сопоставляются на разных фазах цикла следующие солнечные индексы: поток излучения в спектральной линии возорода Лайман-альфа - $F_{Ly\alpha}$, радиоизлучение на волне 10.7 см - $F_{10.7}$, число солнечных пятен SSN, поток излучения в зеленой корональной линии 530.3 нм - $F_{530.3}$, солнечная постоянная TSI и относительный поток в линии 280 нм Mg II s/w (отношение потока в центре к крыльям - core to wing ratio). У звезд с циклами рассмотрен эффект гистерезиса между хромосферным индексом активности S-индексом CaII, определенным для звезд НК-проекта на обсерватории Mount Wilson, и потоком излучения фотосферы этих звезд F_{ph} .

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

1. **Введение.** Эффект гистерезиса при разном уровне солнечной активности проявляется в неоднозначной зависимости излучения солнечной фотосферы, хромосферы и короны. Явление гистерезиса в солнечно-земной физике активно изучается, начиная с работ [1-3]. Этот эффект существует у самых различных явлений активности - от вариаций в коротковолновом диапазоне солнечного излучения до оптического и радиодиапазонов. Гистерезис наблюдается в тех случаях, когда состояние изучаемой системы определяется внешними условиями не только в данный момент времени, но и в предшествующие моменты, т.е. поведение системы на интервале времени во многом определяется ее предысторией. Известно, что солнечные циклы несимметричны относительно своих максимумов и минимумов - подъем к максимуму короче, чем снижение до минимума, и время нарастания короче для больших амплитуд циклов. Нами была исследована корреляция между несколькими индексами солнечной активности и $F_{10.7}$ для 21-23 циклов [4]. Оказалось, что коэффициент корреляции является функцией фазы цикла активности и его зависимость от времени в периоды роста и спада циклов несимметрична. Этот факт наряду с обнаруженными сдвигами во времени между максимумами различных

индексов солнечной активности в течение одного цикла указывает на существование гистерезисов. Кроме того, ход временной зависимости индексов на фазах роста и спада циклов различается и от цикла к циклу.

Гистерезис 7-и индексов активности по наблюдениям 1970-1990 гг. изучался в [3]. Утверждается, что гистерезис является результатом относительной задержки в наступлении максимума и минимума у разных индексов солнечной активности и является важным ключом в поисках физических процессов, ответственных за изменение солнечного излучения на различных длинах волн. Гистерезис пары индексов - потока УФ-излучения в линии Лайман-альфа (Lyman alpha) и потока радиоизлучения на волне 10.7 см - исследовался в [5] по наблюдениям 1980-1990 гг. на нескольких российских ИСЗ (Прогноз 7,8, Фобос и Коронас-1).

Космические лучи галактического происхождения должны показывать постоянный уровень интенсивности на Земле, но воздействие на них со стороны гелиосферной среды вызывает значительные вариации интенсивности галактических лучей. Наблюдаются 11-летние вариации, которые антикоррелируют с активностью солнечных пятен. Интенсивность космических лучей в максимуме солнечных пятен минимальна, а в минимуме максимальна, но это соотношение выполняется не точно. Наблюдаются задержки (лаги), например, между максимумами потока космических лучей и минимумами активности солнечных пятен в несколько месяцев. Интенсивность космических лучей отстает от числа солнечных пятен, в результате чего наблюдается эффект гистерезиса [6,7].

В работе [8] анализируются временные связи между р-модами на частотах, измеряемых одновременно на аппаратуре наземной гелиосейсмологической сети GONG и инструменте MDI, установленной на SOHO. Одновременно были исследованы несколько солнечных индексов на ветви роста и спада солнечной активности в 23-м цикле. Предварительные результаты показали, что частоты р-мод изменяются с задержкой в один месяц от SSN.

Для настоящего исследования эффекта гистерезиса в солнечной активности нами выбран 22-й цикл. Временная эволюция солнечной активности в этом цикле характеризуется стандартным поведением индексов на фазах роста и спада, в отличие от 23-го цикла, имеющего аномально затяжную фазу спада. Целью данной работы является анализ эффекта гистерезиса индексов солнечной активности на фазе подъема и спада 22-го цикла. Исследуется также обнаруженный нами гистерезис у звезд НК-проекта (обладающих устойчивыми циклами активности, аналогичными солнечным) между потоками излучения их фотосфер и хромосфер в линиях H и K CaII.

2. Гистерезис индексов солнечной активности в 22-м цикле.

2.1. Анализ данных наблюдений солнечных индексов. Для

исследования эффекта гистерезиса в качестве объективного показателя, определяющего текущий уровень активности Солнца, мы выбрали индекс $F_{10.7}$ - поток радиоизлучения на волне 10.7 см (2800 МГц). Поток $F_{10.7}$ измеряется в sfu (solar flux units). 1 sfu соответствует потоку в 10^{22} Вт м⁻² Гц⁻¹. Мы проанализировали несколько индексов солнечной активности: поток излучения в спектральной линии водорода Лайман-альфа $F_{L\alpha}$, радиоизлучение на волне 10.7 см $F_{10.7}$, число солнечных пятен SSN, поток излучения в зеленой корональной линии 530.3 нм $F_{530.3}$, солнечную постоянную TSI и относительный поток в линии 280 нм Mg II c/w (core to wing). В работе использованы данные наблюдений $F_{10.7}$, SSN и других индексов активности из архивов NOAA National Geophysical Data Center, см. ссылки в табл.1.

В [3] анализируется связь между потоком $F_{L\alpha}$ и $F_{10.7}$, данные соответствуют 27-дневным скользящим средним для фазы спада и подъема циклов 21-22. Оказалось, что на фазе спада поток $F_{L\alpha}$ опережает поток

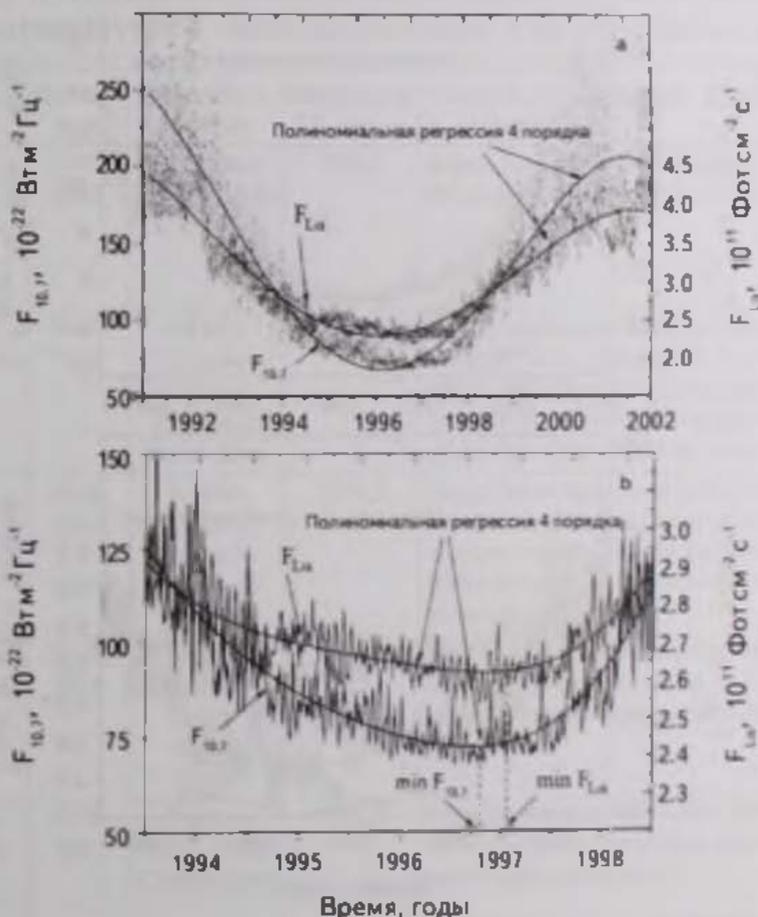


Рис.1. Временные ряды ежедневных наблюдений скользящих средних величин потоков $F_{10.7}$ и $F_{L\alpha}$ (усредненных за 365 дней), по наблюдениям в 22-м цикле. Приведены полиномиальные регрессии 4-го порядка в 22-м цикле (а); временные ряды ежедневных наблюдений скользящих средних (за 365 дней) потоков $F_{10.7}$ и $F_{L\alpha}$ отдельно для минимума 22-го цикла (б).

радиоизлучения $F_{10.7}$, а на фазе подъема поток радиоизлучения $F_{10.7}$ опережает поток в линии Лайман-альфа $F_{Ly\alpha}$. Отмечен значительный разброс точек на графиках для пар индексов SSN - $F_{10.7}$ и др., что характерно для данных ежедневных наблюдений. Аппроксимация 365-дневными скользящими средними (сплошные линии) выявляет значительный эффект гистерезиса (20% от средней величины индекса), см. рис.1 в [3]. В [9-11] показано, что пары индексов активности (SSN - $F_{10.7}$) демонстрируют эффект гистерезиса: наблюдается различие в их относительных вариациях в зависимости от фазы солнечного цикла.

На рис.1а представлены скользящие средние величины потоков $F_{10.7}$ и $F_{Ly\alpha}$ с момента максимума 22-го цикла до момента максимума 23-го цикла. В работе [3], где приводятся сравнительные наблюдения потоков $F_{10.7}$ и $F_{Ly\alpha}$ за 21-22 цикла, показано, что эффект гистерезиса связан с тем, что

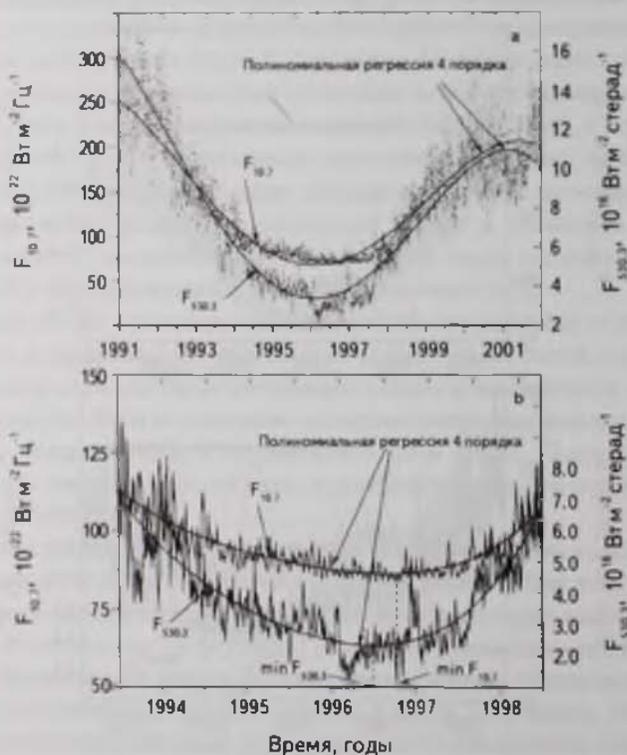


Рис.2. Временные ряды ежедневных наблюдений скользящих средних величин потоков $F_{10.7}$ и $F_{330.3}$ (усредненных за 365 дней), по наблюдениям в 22-м цикле. Приведены полиномиальные регрессии 4-го порядка в 22-м цикле (а); временные ряды ежедневных наблюдений скользящих средних (за 365 дней) потоков $F_{10.7}$ и $F_{330.3}$ отдельно для минимума 22-го цикла (б).

минимум индекса $F_{10.7}$ в 21-22 циклах наступает примерно на 3 месяца раньше, чем у индекса F_{La} , и фаза подъема $F_{10.7}$ также начинается на 3 месяца раньше. В нашем случае на рис. 1a также видно, что относительный ход временных зависимостей $F_{10.7}$ и F_{La} несимметричен относительно минимума 22-23 циклов, и фаза подъема индекса $F_{10.7}$, как и в [3], начинается раньше, чем у F_{La} . Этот эффект согласно [3] является следствием гистерезиса между $F_{10.7}$ и F_{La} . На рис. 1b показан период отдельно для минимума 22 цикла. Видно, что минимумы для скользящих средних величин потоков $F_{10.7}$ и F_{La} происходят в разное время, у $F_{10.7}$ примерно на 3 месяца раньше. Наши результаты сравнительного анализа наблюдений потоков $F_{10.7}$ и F_{La} , в основном, совпадают с результатами [3]. Отличия связаны с тем, что в [3] используются однородные данные наблюдений

Таблица 1

СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О СОЛНЕЧНЫХ ИНДЕКСАХ И МОМЕНТЫ ИХ МИНИМУМОВ, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ДЛЯ 22-ГО ЦИКЛА

Индекс активности	Интервал	Источник данных	Минимум 22 цикла	Ссылка на архивные данные в интернете
Поток в линии $La - F_{La}$ composite (ежедневный)	1947-2015	University of Colorado	1996.9	http://lasp.colorado.edu/lisard/tss/composite_lyman_alpha.html
Поток на волне 10.7 см $F_{10.7}$ (ежедневный)	1947-2016	NOAA (Penticton/Ottawa 2800 MGU Solar flux)	1996.6	http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/noon-time-flux/penticton/penticton_observed/listings/drao_noon-time-flux-observed_daily.txt
Число солнечных пятен SSN (ежедневный)	1818-2016	NOAA (Boulder-Sunspot Number)	1996.5	http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/sunspot-numbers/international/listings/listing_international-sunspot-numbers_daily.txt
Поток в линии 530.3 нм $F_{530.3}$ (ежедневный)	1939-2016	NOAA (Corona-Index-Slovak Data)	1996.8	http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/solar_corona/coronal-index/slovak/
Солнечная постоянная TSI (ежедневный)	1978-2003	NOAA (TSI Solar Composite)	1996.3	http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/total-solar-irradiance/
Mg II c/w (ежедневный)	1978-2004	NOAA (Mg II 280 nm Composite)	1996.4	ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_UV/NOAAMgII.dat

F_{La} на спутнике SME, мы используем F_{La} composite, охватывающий более широкий временной диапазон, см. табл.1.

На рис.2а мы видим временной ход величин потоков $F_{10.7}$ и $F_{530.3}$ для периода с максимума 22-го цикла по максимум 23-го цикла. Временные зависимости потоков $F_{10.7}$ и $F_{530.3}$ явно несимметричны для фазы подъема и спада цикла, этот эффект выражен более сильно, чем для потоков на рис.1. Как мы покажем ниже, эффект гистерезиса для данной пары индексов выражен более значимо. На рис.2б представлен отдельно период минимума 22-го цикла. Также, как и на рис.2а, видна асимметрия кривых потоков и неодновременные моменты наступления минимумов потоков $F_{10.7}$ и $F_{530.3}$. Время наступления минимумов для исследуемых нами индексов, отмеченные на рис.1б, рис.2б, представлены в табл.1. Видно, например, что минимум для SSN наступил примерно на 1 месяц раньше, чем для $F_{10.7}$ и на 4 месяца раньше, чем минимум для F_{La} .

2.2. Результаты анализа пар индексов активности. Мы проанализировали данные для фаз роста и спада в 22-м цикле активности для 6 пар индексов солнечной активности из табл.1.

На рис.3а представлены сравнительные вариации ежедневных SSN в зависимости от $F_{10.7}$ в 22-м цикле - сплошными линиями показаны кривые полиномиальной регрессии на фазах роста (rise cycle's phase) и спада (decline cycle's phase) солнечного цикла, рассчитанные для данных ежедневных наблюдений. Для сравнения на рис.3а показаны также среднемесячные значения SSN в зависимости от $F_{10.7}$ в 22 цикле - штриховые линии. Эффект гистерезиса солнечных индексов мы исследуем с помощью полиномов второго порядка. Использование полиномов более высоких порядков не целесообразно, так как соответствующие члены уравнений регрессии пренебрежимо малы. Это подтверждается оценками величины Residual Sum of Squares (RSS), известной как сумма квадратов невязок (отклонений прогнозных значений от реальных эмпирических данных). RSS - мера несоответствия между данными и моделью оценки. Небольшая величина RSS показывает плотное прилегание модели к данным. RSS используется в качестве критерия оптимальности при выборе параметров и выбора модели. В нашем случае величины RSS минимальны при описании зависимости индексов активности от величины $F_{10.7}$ с помощью полиномов второго порядка. Видно, что на фазах роста и спада цикла существует неоднозначная связь между индексами, что связано с задержкой между временами минимумов этих индексов (1 месяц). Максимально величина гистерезиса (наибольшее относительное отклонение в цикле) составляет около 15%.

На рис.3б представлены сравнительные вариации среднегодовых SSN в зависимости от $F_{10.7}$ суммарно в трех циклах - 21, 22 и 23 (кружки).

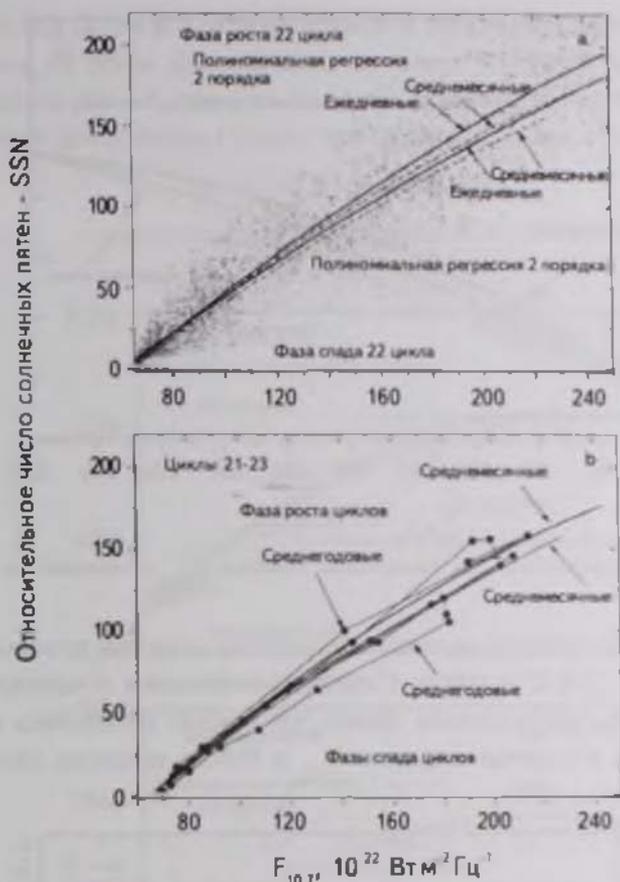


Рис.3. Эффект гистерезиса ежедневных SSN в зависимости от $F_{10.7}$ (а); для среднемесячных и среднегодовых значений SSN в зависимости от $F_{10.7}$ (б).

Видно, что величина гистерезиса в этом случае увеличивается примерно до 25%, что значительно больше величины гистерезиса для среднемесячных значений пары индексов SSN - $F_{10.7}$ (сплошные линии на рис.3б).

На рис.4 представлены данные ежедневных величин потоков F_{La} в зависимости от $F_{10.7}$ в 22-м цикле. Сплошными линиями показаны кривые регрессии на фазах роста и спада солнечного цикла, рассчитанные для данных ежедневных наблюдений. Штриховыми линиями показаны кривые регрессии на фазах роста и спада цикла, рассчитанные для среднемесячных данных. Ниже в табл.2 приведены коэффициенты регрессии для ежедневных значений индексов солнечной активности отдельно для фаз роста и спада в соответствии с уравнением квадратичной регрессии (1). Видно, что величина гистерезиса (наибольшее относительное отклонение в цикле) достигает примерно 15-20% в случае ежедневных наблюдений и примерно 10-12% для среднемесячных.

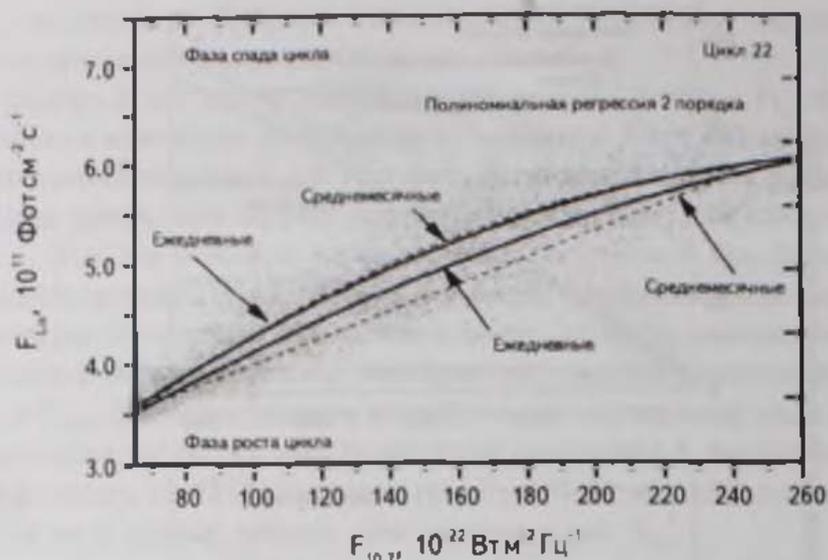


Рис. 4. Эффект гистерезиса для ежедневных величин $F_{L\alpha}$ в зависимости от $F_{10.7}$.

На рис. 5 представлены данные ежедневных величин потоков $F_{530.3}$ в зависимости от $F_{10.7}$ в 22-м цикле. Сплошными линиями показаны кривые регрессии на фазах роста и спада. Видно, что эффект гистерезиса выражен значительно, как и в случае индексов $F_{L\alpha}$ и SSN, и величина гистерезиса достигает примерно 20%.

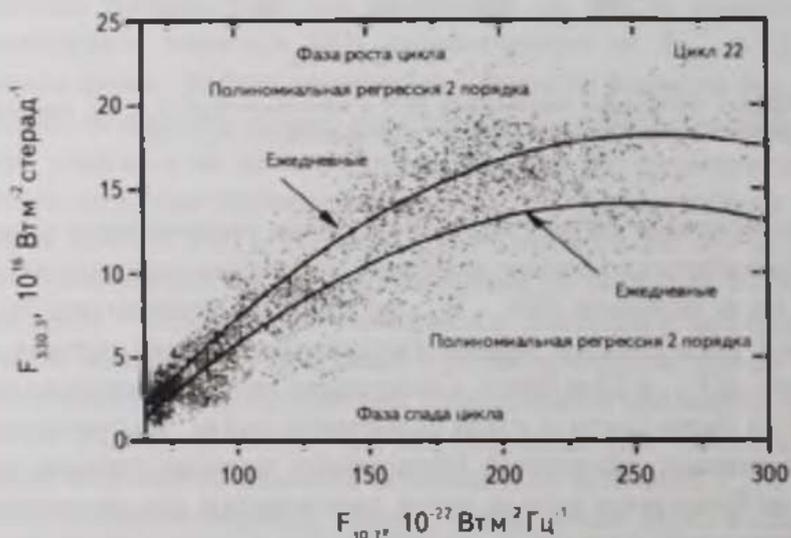


Рис. 5. Эффект гистерезиса для ежедневных величин $F_{530.3}$ в зависимости от $F_{10.7}$.

На рис. 6 представлены ежедневные данные наблюдений индексов Mg II c/w и TSI в зависимости от величины потока $F_{10.7}$. Видно, что у индексов Mg II c/w и TSI эффект гистерезиса незначителен, что связано с тем, что

у индексов Mg II c/w и TSI относительные вариации в циклах активности очень малы, не более десятой доли процента. Квадратичные регрессии, показанные на рис.3-6, для всех индексов активности (Activity Indices - AI) описываются уравнением (1), как для фазы роста, так и для фазы спада:

$$AI = A + C_1 F_{10.7} + C_2 F_{10.7}^2, \quad (1)$$

где A , C_1 и C_2 - коэффициенты полиномиальной регрессии, представленные в табл.2.

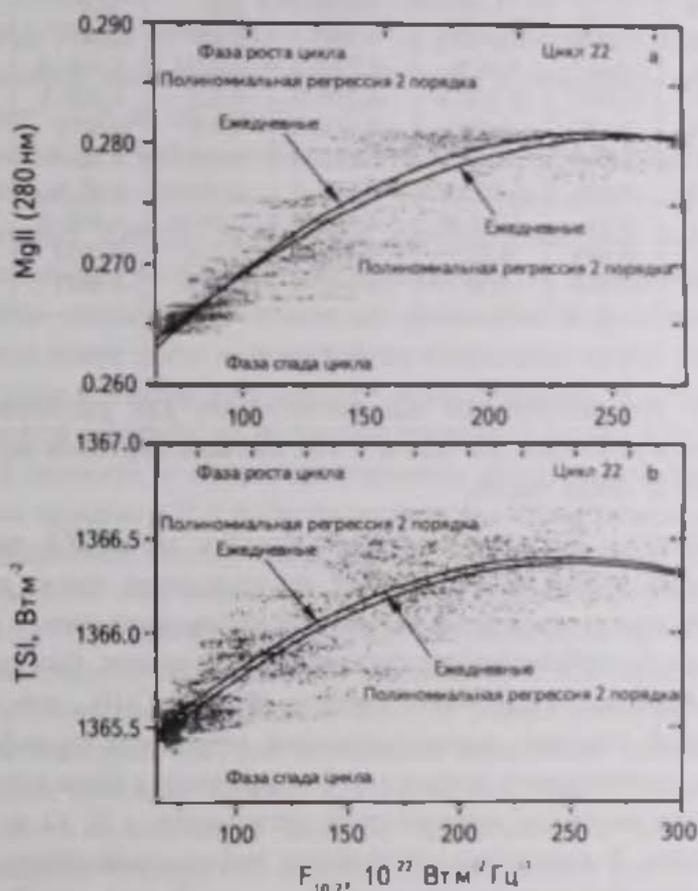


Рис.6. Эффект гистерезиса для ежедневных рядов наблюдений индексов в зависимости от $F_{10.7}$ - Mg II 280 нм с/w (а); TSI (б).

С помощью коэффициентов квадратичной регрессии из табл.2 возможно прогнозировать величины индексов солнечной активности в режиме реального времени, так как величину потока $F_{10.7}$ мы получаем ежедневно. Если речь идет о фазах роста и спада цикла активности, учет различия коэффициентов регрессии для этих фаз позволяет уточнить точность прогноза величин индексов. Нужно отметить, что цикл 22 выбран, как средний по величине и длительности, коэффициенты регрессии для других циклов активности могут отличаться от коэффициентов цикла 22 из

Таблица 2

**КОЭФФИЦИЕНТЫ КВАДРАТИЧНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ
ЕЖЕДНЕВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ИНДЕКСОВ
АКТИВНОСТИ (AI) В 22-м ЦИКЛЕ НА ФАЗАХ РОСТА (R-RISE)
И СПАДА (D - DECLINE)**

AI ↔ F _{10.7}	A	C ₁	C ₂	σA	σC ₁	σC ₂
SSN ↔ F _{10.7} R	-87.27	1.48	-0.0014	2.85	0.04	1.27E-2
SSN ↔ F _{10.7} D	61.855	-0.648	0.005	0.848	0.0170	7.30E-5
TSI ↔ F _{10.7} R	1364.7	0.0138	-2.79E-5	0.0223	3.14E-4	9.8E-7
TSI ↔ F _{10.7} D	1364.7	2.25E-4	-4.23E-7	0.023	4.36E-6	1.40E-8
F _{La} ↔ F _{10.7} R	2.142	0.024	-4.15E-5	0.074	0.0011	3.3E-6
F _{La} ↔ F _{10.7} D	1.275	0.044	-1.04E-4	0.065	9.8E-4	3.17E-6
MgII ↔ F _{10.7} R	0.248	2.72E-4	-5.53E-7	2.7E-4	3.8E-6	1.18E-8
MgII ↔ F _{10.7} D	0.251	2.25E-4	-4.23E-7	2.9E-4	4.36E-6	1.4E-8
F _{530.3} ↔ F _{10.7} R	10.644	0.222	4.29E-4	0.225	0.0032	9.86E-6
F _{530.3} ↔ F _{10.7} D	-9.334	0.19	-3.84E-4	0.289	0.0043	1.36E-5

табл.2, однако это различие не так значительно, как различие между коэффициентами регрессии для одной и той же пары индексов активности на фазах роста и спада цикла.

3. Гистерезис в циклической активности звезд НК-проекта.

На обсерватории Mount Wilson с 1965г. по настоящее время в рамках программы НК-проект проводятся регулярные наблюдения звезд - аналогов Солнца. Для звезд, отобранных для программы НК-проект, был определен универсальный индекс Mount Wilson S-индекс (S-index CaII) - впоследствии наиболее важный стандарт, характеризующий активность атмосфер звезд в оптическом спектральном диапазоне. Эта программа была специально разработана для изучения циклической активности у F, G и K-звезд солнечного типа. В результате длительных наблюдений (более 40 лет) были достоверно обнаружены циклы активности у 50-ти 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 [12,13]. Это означает, 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 указывает на существование дифференциальных вращений звезды, аналогичных дифференциальным вращениям Солнца. Впервые вращательная модуляция фотометрического излучения звезд была объяснена с помощью эффектов, вызванных звездными пятнами в [14].

В [12] для 111-ти звезд НК-проекта для рядов наблюдений S-индекс CaII были рассчитаны периодограммы с целью определения периодов циклов в случае, когда циклическая активность была обнаружена. Значимость высоты самого высокого пика периодограммы оценивалась с помощью функции FAP (False Alarm Probability). Звезды с циклами классифицировались следующим образом: если для рассчитанного периода цикла $P_{\text{оч}} \pm \Delta P$ функция $FAP \leq 10^{-9}$, то звезда относится к классу "Excellent"; если $10^{-9} < FAP \leq 10^{-5}$ - то к классу "Good"; если $10^{-5} < FAP \leq 10^{-2}$ - то к классу "Fair"; если $10^{-2} \leq FAP \leq 10^{-1}$ - то к классу "Poor". Периоды циклов хромосферной активности, определенные с помощью периодограмм, составляют от 7 до 20 лет.

Параллельно с наблюдениями значений S-индекс CaII на обсерватории Mount Wilson для 32-х звезд из той же выборки в течение 13-20 лет на обсерватории Lowell проведены фотометрические наблюдения (с использованием b , y - фотометрии Stromgren) [13]. В большинстве случаев обнаружена связь между потоками хромосфер и фотосфер звезд: для одних звезд имеет место положительная корреляция между этими потоками (как в случае Солнца), для других - отрицательная. В [15] по данным о переменности оптического излучения проведена оценка запятненности для звезд НК-проекта и сильнозапятненных звезд, наблюдаемых в КрАО [16,17], для которых в [18] были построены зональные модели распределения пятен. Выявлена тесная связь между запятненностью и мощностью рентгеновского излучения звезд с сильно различающимися уровнями активности [15]. Анализ атмосферной активности звезд солнечного типа с использованием наблюдений, включающий НК-проект и еще три обширные программы поиска планет, в рамках которых определялись величины S-индекса CaII для нескольких тысяч звезд, показал, что звезды НК-проекта наиболее близки к Солнцу по уровню хромосферного и коронального излучения, а также по циклической активности [19].

Мы выбрали 4 звезды НК-проекта с самым высоким классом циклической активности "Excellent", согласно вычисленным для них величинам FAP из [12]: HD 103095 (a); HD 160346 (b); HD 81809 (c); HD 152391 (d). Эти звезды с устойчивыми циклами относятся к спектральным классам G и K. Для этих звезд в [13] представлены графики одновременных наблюдений хромосферных S-индексов, полученных на Mount Wilson и наблюдений фотометрических потоков $F_{\text{об}}$, полученных на обсерватории Lowell. У звезд HD 103095 и HD 160346, характеризующихся циклической активностью с периодами около 7 лет, мы изучали 3 полных цикла активности, для звезд HD 81809 и HD 152391 с более длительными циклами - 2 полных цикла активности. Используя графические зависимости из [13], мы создали массив данных для этих 4 звезд, которые представляют собой усредненные за 3

месяца пары индексов хромосферной и фотосферной активности: S-индекс CaII - F_{ph} , отдельно для фаз роста и фаз спада циклов.

На рис.7 представлены усредненные за 3 месяца данные наблюдений величин S-индекс CaII в зависимости от F_{ph} . Сплошными линиями показаны кривые регрессии на фазах роста (rise cycle's phase) и спада (decline cycle's phase) звездных циклов хромосферной активности. Данные наблюдений звездных индексов также исследуются с помощью полиномов второго порядка. Фазы роста и спада циклов активности определены по возрастанию и уменьшению универсального индекса активности хромосферы S-индекс CaII.

Видно, что для выбранных звезд с цикличностью класса "Excellent" наблюдается эффект гистерезиса для анализируемой пары индексов, характеризующих хромосферную и фотосферную активность. Отметим, что с возрастанием активности хромосферы, активность фотосферы не всегда растет (как в случае Солнца и звезд HD 103095 и HD 81809 на

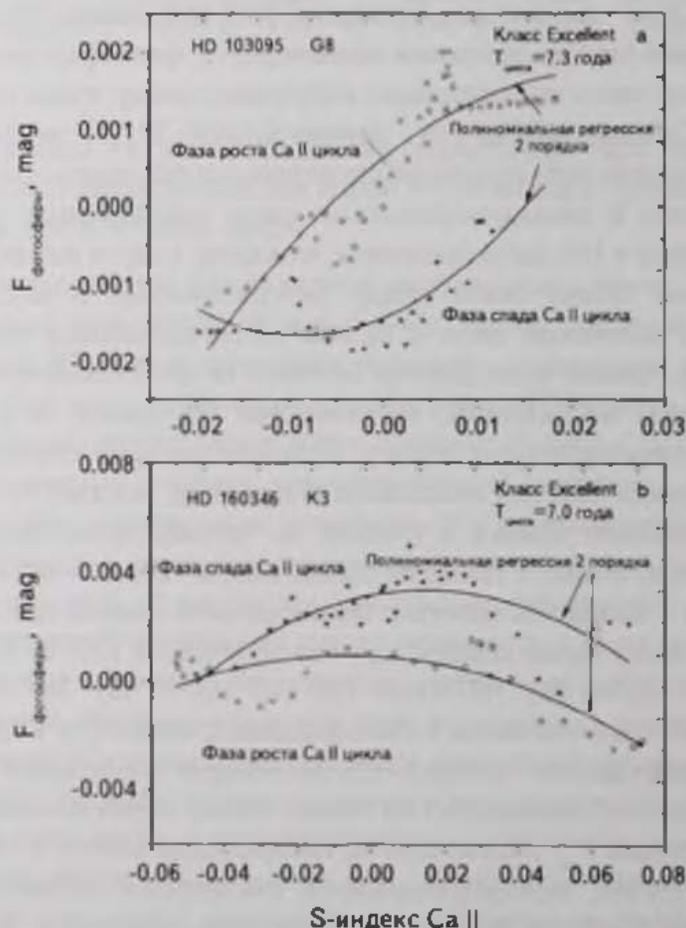


Рис.7. Эффект гистерезиса у звезд с циклами активности между хромосферным S-индексом CaII и потоком излучения фотосферы F_{ph} : HD 103095 (а); HD 160346 (б); HD 81809 (с); HD 152391 (д). Полые кружки соответствуют фазе роста циклов для S-индекса CaII, звездочки соответствуют фазе спада циклов.

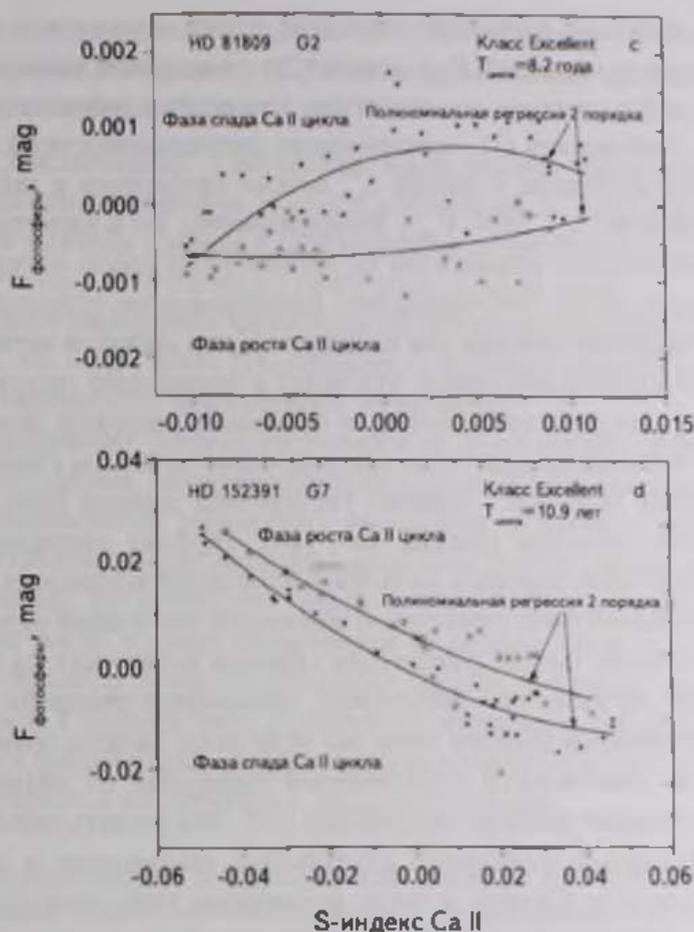


Рис. 7. (Продолжение).

рис. 7а и 7с), а может оставаться примерно постоянной или уменьшаться, см. рис. 7б и 7д.

4. *Обсуждение.* Из приведенного рассмотрения видно, что эффекты гистерезиса существуют для самых различных проявлений солнечной активности - от вариаций в коротковолновом диапазоне до циклических изменений в оптическом и радиодиапазонах, а также обнаруживаются у звезд с хорошо выраженной циклической активностью.

Для отдельных индексов (F_{La} , SSN, $F_{510.3}$, $F_{10.7}$) эффект гистерезиса можно объяснить с помощью двухкомпонентной модели, описанной в [20]. Согласно двухкомпонентной модели, поток излучения в линии I_λ равен:

$$I_\lambda = B_0 + B_1(F_{10.7}^B - 60)^2 + B_2(F_{10.7} - F_{10.7}^B)^2, \quad (2)$$

где $F_{10.7}^B$ - фоновый (Background) поток излучения от невозмущенной (без активных областей) поверхности солнечного диска. $F_{10.7}^B$ на волне 10.7 см изменяется в цикле активности ~ от 60 до 120 sfu. Величина $(F_{10.7} - F_{10.7}^B)$,

описывающая вклад от активных областей, также меняется в цикле. Анализ циклических вариаций $F_{10.7}$ показал, что в среднем выполняется эмпирическое регрессионное соотношение для потока радиоизлучения $F_{10.7} = a + bF_{10.7}^R$. Зависимость (2), описывающую двухкомпонентную модель вариаций потока излучения в линии I_{λ} , можно применить к индексам солнечной активности $F_{L\lambda}$, SSN, $F_{530.3}$. Коэффициенты a и b характеризуют вклад двух компонентов и изменяются на разных фазах цикла активности, а также от цикла к циклу. Это определяет неравномерное относительное уменьшение и увеличение потоков для исследуемых пар индексов активности на разных фазах солнечного цикла, что ведет к появлению гистерезиса. Поток в слабых циклах определяется, в основном, потоком фонового излучения, а в сильных циклах относительно более весомым становится вклад от активных областей - эффект гистерезиса должен быть более выражен в более сильных циклах, см. [20]. Эффект гистерезиса в циклических изменениях индексов солнечной и звездной активности скорее всего связан с особенностями структуры и временной эволюцией солнечных и звездных магнитных полей, различным образом влияющих на те или иные проявления активности в фотосфере, хромосфере и короне.

На масштабах времени порядка сотен лет модельные расчеты солнечного динамо с учетом зависимости турбулентной диффузии от магнитного поля, также показывают явление гистерезиса [21]. Эти расчеты объясняют феномен нерегулярных появлений длительных минимумов в циклах магнитной активности Солнца и звезд солнечного типа спектральных классов G и K. Результатом этих расчетов нелинейной модели динамо является гистерезисный характер зависимости амплитуды колебаний торроидального магнитного поля B как функции динамо-числа D : $B \sim f(D)$. В области гистерезиса этой зависимости имеются два возможных режима: затухающие колебания малой амплитуды (режим глобальных минимумов активности) и установившиеся циклы относительно большой амплитуды (основной режим). Эти два режима подтверждаются наблюдениями магнитной активности Солнца, когда сменяют друг друга эпохи относительно высокой активности с глобальными минимумами. Флуктуации параметра теории динамо α в рассматриваемой модели позволяют воспроизвести наблюдаемую перемежаемость, так как именно флуктуации α могут приводить к переходам между двумя возможными режимами в области гистерезиса зависимости $B \sim f(D)$. Таким образом, согласно модельным расчетам [21] в некотором интервале значений D вблизи критического значения D_c имеются два возможных режима: магнитные циклы постоянной и относительно большой амплитуды и затухающие колебания малой амплитуды. Это соответствует наблюдениям солнечной активности, когда имеет место чередование "обычных" 11-летних циклов с эпохами глобальных

минимумов активности, среди которых наиболее известен минимум Маундера, см., например, [22]. Глобальные минимумы присутствуют и на звездах, подобных Солнцу [23].

5. *Заключение.* Гистерезис представляет реальную задержку в наступлении максимума и спада солнечной и звездной активности и является важным ключом в поисках физических процессов, ответственных за изменение излучения на различных длинах волн.

Эффект гистерезиса характерен не только для пар индексов солнечных циклов, но и для звезд НК-проекта, у которых обнаружены устойчивые циклы активности, аналогичные солнечным.

По-видимому, эффект гистерезиса является общим свойством астрономических систем, характеризующихся различными проявлениями циклической активности, связанной с эволюцией во времени магнитных полей.

Для некоторых пар солнечных индексов эффект гистерезиса проявляется более сильно, для других пар - менее отчетливо. При этом кривые гистерезиса на фазах роста и спада изменяются от одного цикла к другому.

Гистерезисы между различными парами индексов, характеризующие активность Солнца и звезд в различных интервалах энергий, по-видимому, являются фундаментальным проявлением магнитной активности и связаны с гистерезисом солнечного и звездного динамо.

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

THE EFFECT OF THE HYSTERESIS OF INDICES OF ACTIVITY OF THE ATMOSPHERES ON THE OBSERVATIONS OF THE SUN AND SOLAR-TYPE STARS ON THE OF RISE

A

280 nm Mg II c/w (core to wing ratio) flux were studied. The stars with the well-determined cycles were examined to detect the effect of hysteresis between the chromosphere's S-index CaII fluxes versus the photosphere's fluxes F_{ph} .

Key words: *Sun: activity indices, solar-type stars: the HK project, activity cycles*

ЛИТЕРАТУРА

1. K.Watanabe, H.E.Hinteregger, J. Geophys. Res., **67**, 999, 1962.
2. B.K.Ching, Y.T.Chiu, J. Atmos. Terr. Phys., **35**, 1615, 1973.
3. K.T.Bachmann, O.R.White, Solar Phys., **150**, 347, 1994.
4. E.A.Bruevich, V.V.Bruevich, G.V.Yakunina, J. Astrophys. Astron., **35**, 1, 2014.
5. T.V.Kazachevskaya, V.V.Katyushina, Phys. Chem. Earth., **25**, 425, 2000.
6. R.P.Kane, Ann. Geophys., **25**, 2087, 2007.
7. R.P.Kane, Solar Phys., **269**, 451, 2011.
8. S.C.Tripathy, K.Jain, K.T.Bachmann, Characteristic, Spring Meeting, abstract #SP11B-13, 2005.
9. K.L.Harvey, in R.F.Donnely (ed.) Proceedings of the Workshop on the Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle, **22**, 113, 1992.
10. G.J.Rottman, Adv. Space Res., **8**, 53, 1988.
11. R.F.Donnely, J. Geomag. Geoelectr. Suppl., **43**, 835, 1991.
12. S.L.Baliunas, R.F.Donahue et al., Astrophys. J., **438**, 269, 1995.
13. G.W.Lockwood, B.A.Skiff, R.R.Radick et al., Astrophys. J. Suppl., **171**, 260, 2007.
14. G.E.Kron, Publ. Astron. Soc. Pasif., **59**, 261, 1947.
15. Е.А.Бруевич, И.Ю.Алексеев, Астрофизика, **50**, 233, 2007, (Astrophysics, **50**, 187, 2007).
16. Р.Е.Гершберг, Активность солнечного типа звезд Главной последовательности, Одесса, Астропринт, 2002.
17. И.Ю.Алексеев, Запятненные звезды малых масс, Одесса, Астропринт, 2001.
18. И.Ю.Алексеев, Р.Е.Гершберг, Астрон. ж., **73**, 589, 1996.
19. Е.А.Бруевич, В.В.Бруевич, Е.В.Шимановская, Астрофизика, **59**, 115, 2016, (Astrophysics, **59**, 101, 2016).
20. А.А.Нусинов, Radiophysics and Quantum Electronics., **39**, 830, 1996.
21. L.L.Kitchatinov, S.V.Olemskoy, Astron. Lett., **36**, 292, 2010.
22. Ю.И.Витинский, М.Копецкий, Г.В.Куклин, Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца, М., Наука, 1996.
23. S.H.Saar, S.L.Baliunas, ASP Conf. Ser., **27**, 150, 1992.