

УДК 523.98

## Солнечные магнитные поля и циклы активности

*А.Г. Тлатов*

Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, ул. Гагарина, 100, г. Кисловодск  
*tlatov@mail.ru*

Поступила в редакцию 26 ноября 2013 г.

**Аннотация.** Рассмотрены вариации солнечной активности и магнитного поля на различных интервалах времени и пространственных масштабах. Солнечная цикличность имеет совокупность различных периодов: 11-летний циклы солнечной активности (цикл Швабе), 22-летний цикл (цикл Хэйла) смены полярности магнитного поля, цикл Глайсберга с периодом около 100 лет. Также существует 230-летний цикл, на котором происходит обращение правила Гневывшева-Оля. Выполнен анализ долговременных изменений характеристик солнечных пятен, крупномасштабного магнитного поля, полярной активности, а также угла наклона магнитных биполей, и исследуется их роль в цикле активности Солнца.

SOLAR MAGNETIC FIELDS AND ACTIVITY CYCLES, *by A. G. Tlatov.* Variations in solar activity and magnetic fields at various intervals of time and spatial scales are considered. The solar cyclicity has different periods: 11-year cycles of solar activity (Schwabe cycle), 22-year cycle of reversal polarity of the magnetic field (Hale cycle), Grand cycle with a period of approximately 55 years. This period is characterized by variation of solar rotation and changes in the relative area of sunspot umbra. The Gleissberg cycle is with a period  $\sim 100$  years. This period is characterized by long-term variations in solar activity and number of sunspots in sunspot groups. 230-year cycle is a period in which the reversal of Gnevyshev-Ohl rule occurs. We study variations in the magnetic fields of sunspots, large-scale fields, polar activity and magnetic bipoles associated with these periods.

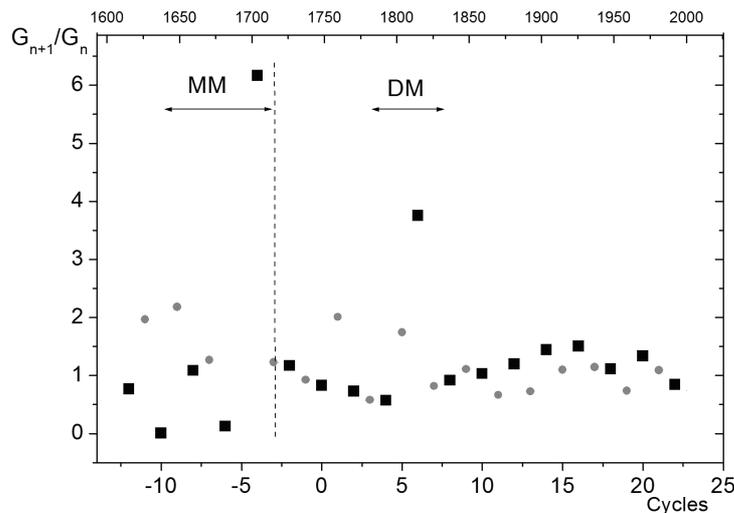
**Ключевые слова:** Солнце, солнечный цикл, солнечные пятна, магнитное поле, долговременные изменения

---

## 1 Введение

Солнечная активность – это циклический самовоспроизводящийся процесс с периодом около 11 лет. Также анализ наблюдений солнечных пятен показывает, что существуют и другие периоды, например, 22-летний (цикл Хейла), столетние (цикл Глайсберга), двухсотлетние (цикл Свиса) и другие (Хэтгэвей, 2010). Такие циклы влияют на амплитуду циклов активности и отвечают за эпохи длительных минимумов и максимумов солнечной активности. В настоящее время нет удовлетворительных моделей, описывающих длительную модуляцию циклов активности. Вместе с тем понимание физических механизмов существования нескольких периодов солнечной активности принципиально важно для длительных прогнозов солнечной активности.

Считается, что солнечный магнитный цикл является следствием нескольких последовательных



**Рис. 1.** Отношение среднеедневного количества групп солнечных пятен в соседних циклах активности. Пары нечетный и последующий четный циклы обозначены кружками; пары четный-нечетный – квадратиками

процессов. Это генерация сильных тороидальных полей из слабого полоидального, всплытие фрагментов тороидального поля в виде солнечных пятен, их распад, объединение и преобразование в новое полоидальное поле, перенос этого поля к зоне генерации, и повторение процесса. К сожалению, мы не можем наблюдать этот механизм как целое современными наблюдательными средствами. Поэтому о его достоверности мы можем говорить гипотетически, изучая отдельные его элементы и их взаимосвязи.

В данной работе исследуются причины возникновения длительных модуляций солнечной цикличности, а также рассмотрены наблюдательные аспекты, касающиеся отдельных стадий динамо-механизма, изучены их взаимосвязи.

## 2 Долговременные вариации активности солнечных пятен

### 2.1 Нарушение правила Гневьшева-Оля и вековые минимумы активности

Правило Гневьшева-Оля (Г-О), которое выполнялось на протяжении около 150 лет начиная с 10-го цикла, было нарушено в 22–23-м циклах активности. Это может свидетельствовать о грядущей смене режима солнечной цикличности, которые, возможно, происходили и ранее (Витинский и др., 1986). Причина существования длительных циклов активности до сих пор неизвестна. Остаются открытыми вопросы о характерных периодах этих циклов (Хэтэвей, 2010) и изменении характеристик пятен с вековым циклом, таких как магнитные поля, площадь пятен, свойства групп и другие. В данном разделе поставлена задача – проследить относительное изменение свойств пятен и групп солнечных пятен различной площади в циклах солнечной активности и их изменения с вековым циклом активности.

Эмпирическое правило Гневьшева-Оля (Гневьшев, Оля, 1948; Витинский и др., 1986) сформулировано для пары последовательных солнечных циклов. Существуют несколько формулировок правила Г-О, но основная интерпретация заключается в том, что амплитуда четного цикла активности меньше, чем амплитуда последующего нечетного цикла. Как правило, для проверки правила Гневьшева-Оля используют ряд чисел Вольфа, реконструированный Р. Вольфом с 1748 г. Однако, как показано в работе (Хойт, Шаттен, 1998), этот ряд имеет достаточно большой шум из-за сложного учета мелких солнечных пятен и исключение из рассмотрения ряда наблюдений. Основываясь

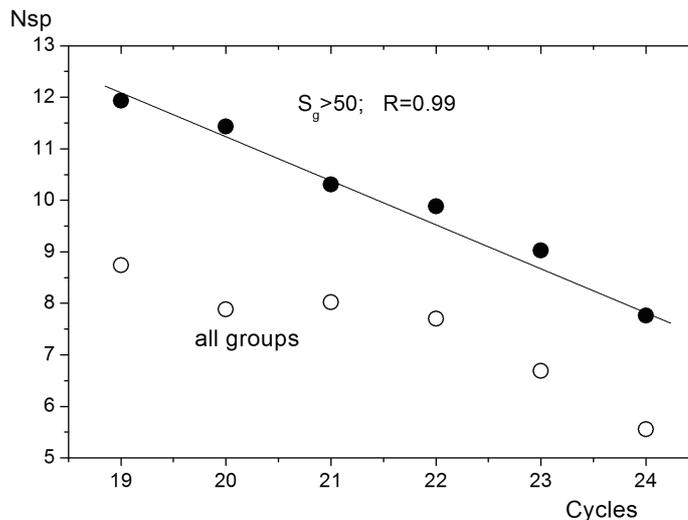


Рис. 2. Изменение среднего числа солнечных пятен в группе за цикл

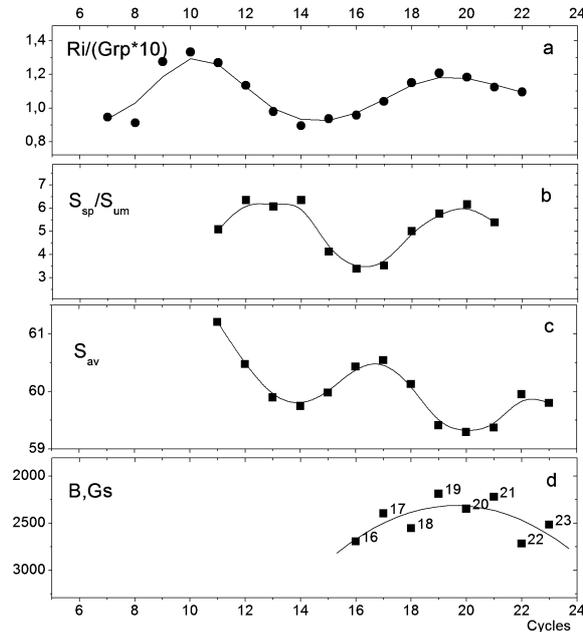
на дополнительных данных, Хойт и Шаттен (1998) предложили индекс групп солнечных пятен, реконструированный ими в период с 1610 по 1995 гг.

Для характеристики циклов активности в работе Тлатова (2013) использовалось среднее число групп в день в цикле. На рис. 1 представлено среднее число групп в цикле, регистрируемых в день, вычисленное по индексу групп солнечных пятен  $G_d(k) = \sum R_g/N_d$ , где  $N_d$  – число наблюдательных дней в цикле  $k$ ,  $T_k$  – момент начала цикла  $k$ . В качестве моментов начала и конца цикла активности мы воспользовались данными с сайта *NGDC*.

На рис. 1 представлено отношение  $G_n^{even}/G_{n-1}^{odd}$  и  $G_n^{odd}/G_{n-1}^{even}$  в период с 1610 по 2009 гг. Видно, что отношение  $G_n^{odd}/G_{n-1}^{even}$  может быть на длительных временах как больше, так и меньше единицы и имеет циклический характер, при котором Солнце переходит из одного режима цикличности в другой. Как правило, при этом наблюдаются минимумы вековых вариаций солнечной активности. Для объяснения этого мы можем предположить, что на длительных промежутках времени существует остаточное перманентное поле Солнца, которое, тем не менее, может менять свой знак, что приводит к обращению в последовательности 22-летних циклов. Причиной появления такого перманентного поля может быть “магнитная память” под зоной генерации солнечных пятен (Тлатов, 1996). Это поле появляется при усреднении магнитного поля нескольких последовательных циклов, имеющих различное направление полоидального поля, обеспечивая соотношение больше (меньше) единицы в течение длительных периодов (рис. 1). Таким образом, нарушение правила Г-О происходит на фазе спада векового цикла активности и может являться предвестником наступления длительного понижения активности, таких как минимум Маундера.

## 2.2 Долговременные изменения числа пятен в группах

Рассмотренный в предыдущем разделе индекс групп солнечных пятен в отличие от индекса солнечных пятен или чисел Вольфа не учитывает число пятен в группах. Изменение соотношения между числом групп и числом пятен, возможно, является одной из причин долговременных изменений, видимых на рис. 1. К сожалению, данные о числе пятен в группах существуют только в отдельных обсерваториях и доступны только с 19-го цикла активности. В качестве исходных данных для анализа брались ежедневные данные наблюдений групп солнечных пятен Кисловодской Горной астрономической станции (ГАС) в период с 1954 по 2012 гг. и другие данные. Помимо координат и площади, в данных ГАС представлено число ядер и пор  $N_{sp}$ , участвующих в подсчете индекса числа Вольфа, а также площадь наибольшего пятна в группе  $S_{max}$ .



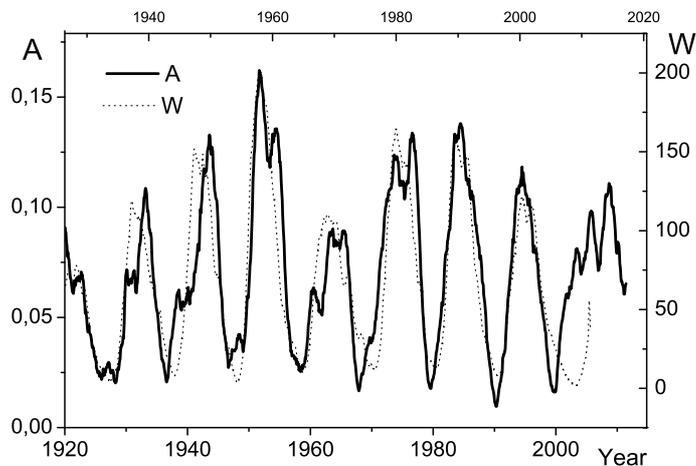
**Рис. 3.** (а) Отношение индекса чисел Вольфа к индексу числа групп за циклы. (б) Отношение площади групп к площади ядер по данным RGO (<http://solarscience.msfc.nasa.gov>). (с) Изменение средней за цикл площади групп пятен в диапазоне  $S$ : 30–100 мдп по данным RGO для циклов 11–20 и по данным ГАС для циклов 21–23. (d) Изменение средней напряженности магнитного поля по данным обсерватории MNTW для пятен с площадью более  $S > 100$  мдп в период 16–23-го циклов активности

Среднее число ядер и пор в группах пятен монотонно уменьшалось от цикла к циклу за последние 5 циклов активности (рис. 2). Особенно это заметно для групп пятен средней и большой площади  $S_g > 50$  миллионных долей солнечного диска (мдп). Как правило, основную долю в подсчете индекса  $W$  для средних и больших пятен составляют ядра и поры. Вероятно, за данный период увеличивалась средняя площадь отдельных ядер, при этом происходило уменьшение их числа.

Относительный вклад групп пятен большой площади  $S > 500$  мдп в индекс числа Вольфа растет с амплитудой цикла активности  $W_{max}$ :  $W_{500}/W_{tot} = 0.065 + 0.001W_{max}$ ;  $R = 0.93$ . Вклад групп пятен малой площади  $S < 50$  уменьшается с ростом амплитуды цикла активности:  $W_{50}/W_{tot} = 0.35 + 6.9 \cdot 10^{-4}W_{max}$ ;  $R = -0.74$ . Такая закономерность действует и для общего числа групп с наибольшим пятном площадью  $S_{max} < 20$  мдп (малые пятна) и  $S_{max} > 700$  мдп (большие пятна). Относительное число групп пятен малой и большой площади меняется разнонаправленно в зависимости от роста амплитуды цикла активности.

### 2.3 Долговременные изменения характеристик солнечных пятен

Долговременные изменения можно проверить по другим индексам активности. Как известно, в подсчете индекса числа Вольфа учитывается как число групп с фактором 10, так и общее количество пятен (ядер). В то же время существует индекс числа групп солнечных пятен (Хойт, Шаттен, 1998). На рис. 3а представлено изменение этого отношения с 1748 г., найденное по ежедневным данным и усредненное за циклы солнечной активности. Существует долговременная вариация с периодом около 10 циклов солнечной активности. Наибольшее число пятен, приходящихся на одну группу, было в 10-м и 19-м циклах активности. По данным характеристик групп пятен Гринвичской обсерватории (RGO) (<http://solarscience.msfc.nasa.gov>) можно реконструировать отношение общей площади к площади ядер (рис. 3б). Это отношение также имеет долговременную вариацию



**Рис. 4.** Сравнение индексов крупномасштабного поля с циклами активности солнечных пятен. Индекс пятен  $W$  сдвинут на 5,5 лет назад. Диполь-октупольный индекс крупномасштабного магнитного поля опережает индекс пятен на 5,5–6 лет

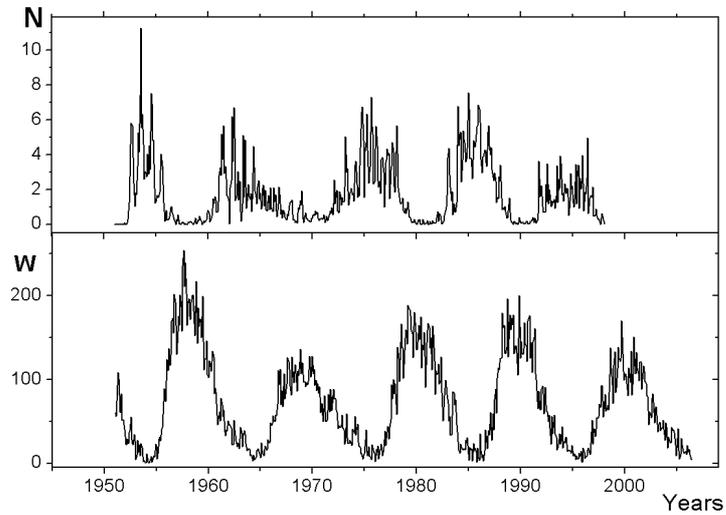
с несколько меньшим периодом  $\sim 8$  циклов, но, так же как и на рис. 3а, максимум приходится на 19-й цикл активности. Изменения существуют и в относительном вкладе площади групп различного размера, о чем свидетельствуют вариации средней за цикл площади групп пятен в диапазоне  $S : 30 \div 100$  мдп. Вариации с близким периодом существуют и для других интервалов площадей.

Рисунки 3а–3с косвенно подтверждают вывод об относительно большом числе пятен, приходящихся на одну группу в 19-м цикле (рис. 2). Но при этом должно было бы наблюдаться уменьшение средней напряженности магнитного поля в ядрах, поскольку магнитное поле ядер растет с площадью ядер (Витинский и др., 1986). Такая тенденция видна на рис. 3d для средней в цикле напряженности магнитных полей по данным обсерватории Маунт Вилсон (MNTW). С середины прошлого века до цикла 22 наблюдается рост магнитного поля  $B$ . При этом в четных циклах интенсивность магнитного поля была в среднем выше, чем в нечетных циклах.

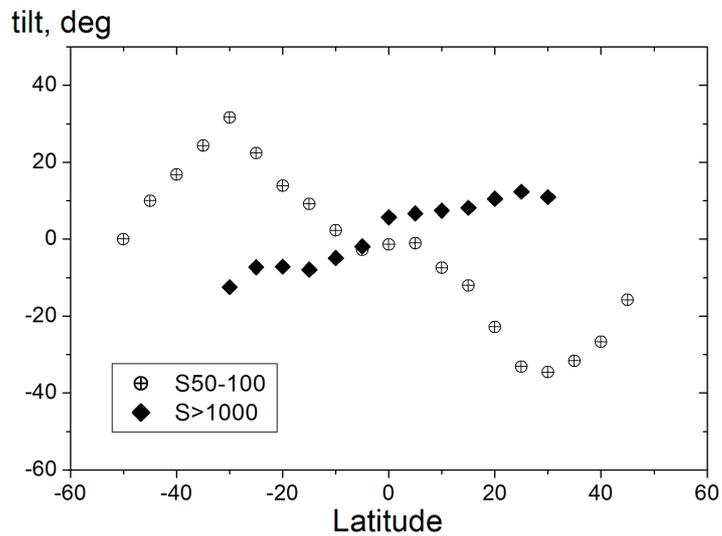
Анализ, приведенный в данном разделе, показывает, что долговременные вариации солнечной активности связаны с изменением физических характеристик солнечных пятен и групп солнечных пятен.

### 3 Циклы активности и крупномасштабное магнитное поле

Генерация магнитных полей на Солнце является циклическим процессом усиления слабых полоидальных магнитных полей в тороидальные и последующей трансформации их опять в полоидальное. Считается, что полоидальное поле проявляется на Солнце в виде глобального, т. е. поля дипольного типа. Поэтому наблюдения глобального поля могут дать ценную информацию как для моделей солнечного цикла, так и в целях прогноза солнечной активности. Изучение свойств глобального магнитного поля может осуществляться при анализе крупномасштабных магнитных полей Солнца, а также полярной активности. Рассмотрим индексы, получаемые из этих видов активности (Тлатов, 1996).



**Рис. 5.** Среднемесячное число полярных факелов на широтах выше  $70^\circ$  по данным обсерватории Митака (Япония) за период 1951–1998 гг. (верхняя панель). Месячные значения чисел Вольфа. Полярная активность предшествует циклу пятен (нижняя панель)



**Рис. 6.** Закон Джоя согласно данным анализа наблюдений SOHO/MDI в период 1996–2010 гг. Ромбами обозначено направление магнитной оси биполей большого размера  $S > 1000$  мдп, кружками – угол направления биполей малого размера  $S: 50-100$  мдп

### 3.1 Крупномасштабное магнитное поле

Долговременные вариации крупномасштабного магнитного поля на различных широтах могут быть изучены по рядам синоптических  $H_\alpha$  карт. На синоптических  $H_\alpha$  картах представлены линии раздела полярности магнитного поля. В качестве трассеров нейтральных линий используются реперы, полученные из оптических наблюдений. Это наблюдения волокон, каналов волокон или протуберанцев. Таким образом, в отличие от магнитографических наблюдений, пространственное разрешение которых постоянно увеличивается с совершенствованием телескопов, на  $H_\alpha$  картах существует предел пространственной детализации области, занятой магнитным полем той или иной полярности. В настоящее время сводный ряд  $H_\alpha$  карт охватывает период с 1887 года по настоящее время и соизмерим с длиной ряда групп солнечных пятен (МакИнтош, 1979; Макаров, Сивараман, 1989; Васильева, 1998), но наиболее достоверными можно считать данные с 1915 года.

Одним из индексов глобального магнитного поля является диполь-октупольный индекс (Макаров, Тлатов, 2000). Поверхностное магнитное поле можно представить в виде функции от координат широты  $\theta$  и долготы  $\varphi$ , используя разложения по сферическим гармоникам. Низкие моды разложения могут быть использованы для анализа глобального магнитного поля. В работе (Макаров, Тлатов, 2000) был предложен диполь-октупольный индекс  $A = \mu_1^2 + \mu_3^2/3$ . Индекс  $A(t)$  демонстрирует хорошо выраженные 11-летние циклы активности, и по отношению к 11-летним кривым чисел Вольфа  $W(t)$  наблюдается фазовое смещение  $A(t)$  в среднем на 5–6 лет. При этом, как видно на рис. 4, циклы индекса  $A(t)$  опережают циклы чисел Вольфа  $W(t)$ ,  $R = 0.95$ . Таким образом, крупномасштабное магнитное поле действительно связано с циклом активности солнечных пятен.

### 3.2 Циклы полярной активности как предвестник активности солнечных пятен

Возможно, что одним из первых обнаруженных предвестников солнечной активности были полярные факелы. Чистяков (1986), проводя обзор исторических данных наблюдений полярной солнечной активности в белом свете, установил, что еще в 1867 г. Вебер (1867) высказал идею о том, что 11-летний солнечный цикл начинается незадолго до минимума активности пятен на высоких широтах и затем скачкообразно перемещается в средние широты.

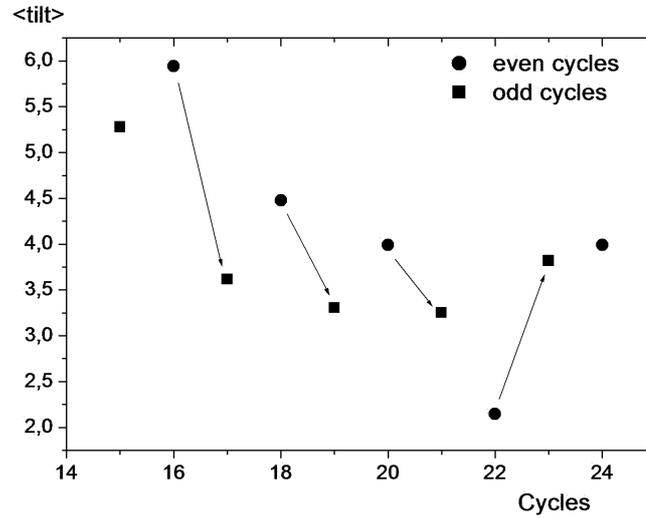
На рис. 5 представлены циклы полярных факелов на широтах выше  $70^\circ$  по данным обсерватории Митака (Япония) ([http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/en/db\\_faculae.html](http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/en/db_faculae.html)). Корреляция между циклами высокоширотных полярных факелов и пятен для 19–23 циклов составила  $R = 0.83$ .

## 4 Свойства магнитных биполей в солнечном цикле

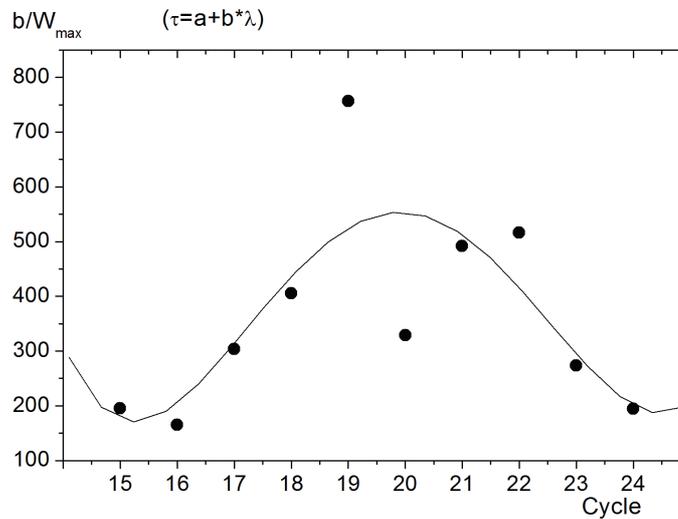
Магнитные структуры на солнечной фотосфере, как правило, представлены в виде биполярных структур. Считается, что магнитные силовые трубки тороидального магнитного поля под действием магнитной плавучести всплывают от зоны генерации, в области тахоклина, к поверхности, образуя биполярные области, ориентированные в направлении Восток-Запад. Под действием силы Кориолиса ось, соединяющая области ведущей и хвостовой полярностей биполярной группы, как правило, отклоняется к экватору (тильт-угол). Угол отклонения биполей растет с широтой. Эта особенность называется законом Джоя (the Joy's law). Наиболее хорошо ориентация биполярных групп изучена для солнечных пятен. В среднеширотной зоне угол наклона магнитной оси солнечных пятен изменяется в первом приближении линейно с широтой, достигая величины  $7-10^\circ$  на широтах  $\sim 40^\circ$  (Хэйл и др., 1919; Ховард, 1996), при этом средний наклон составляет около  $5^\circ$  (Ховард, 1996).

Помимо солнечных пятен на фотосфере могут существовать и мелкомасштабные магнитные биполярные структуры. Анализ магнитограмм обсерватории NSO/Kitt Peak (Харвей, 1993) выявил существование биполярных областей с пространственным размером не более 20 угловых секунд со временем жизни около 1 дня и средним магнитным потоком  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  Мксв. Такие биполярные структуры были названы эфемерными областями. Эфемерные области представляют особый интерес, поскольку они появляются за 1–2 года до появления солнечных пятен нового цикла и могут служить предвестником нового цикла активности (Харвей, 1993). Ряды ежедневных магнитограмм

с высоким пространственным разрешением, полученные на телескопах NSO/KPVT и SOHO/MDI, дают возможность проведения сравнительного анализа биполей солнечных пятен мелкомасштабных магнитных элементов за период 21–23 циклов активности (Тлатов и др., 2010, 2013).



**Рис. 7.** Угол наклона биполей солнечных пятен в четных и нечетных циклах активности. Угол наклона отличается в четных и нечетных циклах и соответствует правилу Г-О



**Рис. 8.** Долговременные вариации зависимости угла наклона биполей солнечных пятен к широте в соответствии с законом Джоя

В результате этого анализа была найдена зависимость направления магнитной оси биполей солнечных пятен от широты, которая оказалась близкой к закону Джоя. Однако для мелкомасштабных биполей получен удивительный результат. Направление магнитной оси мелкомасштабных противоположно биполям активных областей, а именно их ведущие области расположены ближе к полюсам, чем хвостовые области. А значит, создаваемое ими полоидальное поле в направлении N-S противо-

положно полю, создаваемому пятнами. Число мелкомасштабных биполей, существующих в каждый момент на Солнце, несколько сотен, а их время жизни составляет несколько часов. Поэтому вклад эфемерных областей в формирование нового полоидального поля, может быть, соизмерим со вкладом от солнечных пятен. И это поле по направлению противоположно полю пятен. Таким образом, эфемерные области могут существенно изменить общепринятую картину солнечной цикличности.

Ориентация магнитной оси биполей солнечных пятен не постоянна. На рис. 7 представлен средний угол направления магнитной оси биполей солнечных пятен в 15–24-м циклах активности. В период 16–21 циклов угол наклона был выше, чем в последующих нечетных циклах, но в паре 22–23 такая последовательность была нарушена. Это соответствует правилу Г-О с исключением пары 22–23. Большой угол наклона оси биполей приводит к большому полоидальному полю и, как следствие, к росту амплитуды последующего цикла активности. Угол наклона зависит от широты. В первом приближении эта зависимость является линейной и описывается формулой  $\tau = a + b\lambda$ , где  $\lambda$  – широта. На рис. 8 представлено измерение параметра  $b$  для 15–25-го циклов активности. Параметр  $b$  не постоянный и имеет долговременную огибающую с периодом около 100 лет.

Поэтому мы можем заключить, что угол наклона магнитной оси биполей, возможно, также модулирует долговременные вариации солнечной активности.

## 5 Выводы

В данной работе рассмотрены долговременные вариации физических характеристик солнечных пятен, крупномасштабных магнитных полей и полярной активности.

Рост активности в середине 20-го века сопровождался изменением свойств групп солнечных пятен. В период 14–19 циклов наблюдался рост числа пятен в группах солнечных пятен. После 19-го цикла активности наметилась тенденция к снижению этого параметра (рис. 2, 3). В первой половине 20-го века на фазе роста активности векового цикла менялось соотношение площади ядер к площади всей группы (рис. 3b) и происходило уменьшение средней напряженности магнитного поля (рис. 3d). В целом, данный анализ подтверждает предположение, что среднее число пятен в группе меняется с вековым циклом (Витинский и др., 1986), при этом уменьшение площади ядер при росте площади и числа пятен свидетельствует о перераспределении магнитного потока в пятнах от цикла к циклу. Вместе с тем, различные параметры солнечных пятен имеют разную длительность вековых циклов. Параметры, связанные с числом пятен и групп, имеют длительность около 10 циклов (рис. 3a), а параметры, связанные с площадью пятен, – около 8 циклов активности. Наличие различных периодов в вековом цикле отмечалось и ранее (Хэтэвей, 2010).

Исследование правила Гневнышева-Оля также может дать важную информацию о природе солнечной цикличности. В частности, о возможном реликтовом поле, с которым обычно связывают этот эффект (Мурсула и др., 2001). Правило обращалось и в предыдущие века, а его изменение носит циклический характер (Тлатов, 2013). Использование индекса среднего числа групп в цикле позволяет интерпретировать правило Г-О как долговременную вариацию (рис. 1). Возможно, долговременные вариации активности обусловлены существованием остаточного медленно меняющегося (перманентного) полоидального магнитного поля Солнца, которое, тем не менее, может менять свой знак, что приводит к обращению в последовательности 22-летних циклов и модулировать вековые циклы активности. Причиной появления такого перманентного поля является “магнитная память” под зоной генерации солнечных пятен (Тлатов, 1996). Если это так, то обращение правила Гневнышева-Оля в циклах 22–23 служит предвестником того, что обращение будет верным и для последующих пар четных-нечетных циклов.

Процесс преобразования тороидального поля биполей в полоидальное магнитное поле также неоднозначен. Ориентация биполей солнечных пятен и мелкомасштабных биполей противоположны (рис. 6), что необходимо учитывать в моделях солнечного цикла. Также угол наклона биполей пятен, по-видимому, меняется с фазой векового цикла (рис. 8). Таким образом, солнечный цикл, возможно, имеет больше параметров, чем это считалось ранее.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и программ РАН.

## Литература

- Васильева В.В. // в тр. конф. “Новый цикл активности Солнца: наблюдательный и теоретический аспекты”. / Ред. Макаров В.И. С.-Петербург. Пулково. 1998. С. 213.
- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. // Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. Москва: Наука. 1986.
- Вебер (Weber F.) // *Wochenschrift für Astron. Met. Geogr.* 1867. V. 10. N. 67-70. P. 155.
- Гневьшев М.Н. Оль А.И. // *Астрон. журн.* 1948. V. 25. С. 18.
- МакИнтош (McIntosh P.S.) // *Annotated Atlas of H-alpha Synoptic Charts*. NOAA. Boulder. 1979.
- Макаров, Сивараман (Makarov V.I., Sivaraman K.R.) // *Solar Phys.* 1989. V. 119. P. 35.
- Макаров, Тлатов (Makarov V.I., Tlatov A.G.) // *Astron. Rep.* 2000. V. 44. P. 759.
- Мурсула и др. (Mursula K., Usoskin I.G., Kovaltsov G.A.) // *Solar Phys.* 2001. V. 198. P. 51.
- Тлатов (Tlatov A.G.) // *Radioph. and Quant. El.* 1996. V. 39. P. 794.
- Тлатов (Tlatov A.G.) // *Solar Phys.* 2009. V. 260. P. 465.
- Тлатов (Tlatov A.G.) // *Astrophys. J. Lett.* 2013. V. 772. P. 30.
- Тлатов и др. (Tlatov A.G., Vasil'eva V.V., Pevtsov A.A.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 717. P. 357.
- Тлатов и др. (Tlatov A.G., Illarionov E., Sokoloff D., Pipin V.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 432. P. 2975.
- Чистяков В.Ф. // *Методы исследования Солнца*. Владивосток. 1986. С. 133.
- Хэйл и др. (Hale G.E., Ellerman F., Nicholson S.B., Joy A.H.) // *Astrophys. J.* 1919. V. 48. P. 153.
- Харвей (Harvey K.L.) // *Magnetic dipoles on the Sun*. PhD Thes. Dordrecht. 1993.
- Хэтгэвей (Hathaway D.) // *Living Reviews in Solar Physics*. 2010. DOI: 0.12942/lrsp-2010-1.
- Ховард (Howard R.F.) // *Solar. Phys.* 1996. V. 167. P. 95.
- Хойт, Шаттен (Hoyt D.V., Schatten K.H.) // *Solar. Phys.* 1998. V. 181. P. 491.