

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СПЕКТРА ВАРИАЦИЙ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА

Исследование временных вариаций различных индексов солнечной активности с применением разных методов проводилось многими авторами. Основные результаты этих исследований можно найти в обзорах [1,2,6] и в библиографиях к ним. Из последних работ можно отметить [3], в которой проведено сравнение нескольких методов численной обработки ряда чисел Вольфа, а именно, преобразования: Фурье, вейвлет и нелинейное - кепстр.

Из анализа исследований (см. рис.1) все наблюдаемые в спектре квазипериодичности можно разделить на три группы по механизму их образования это:

- 1) циклы, связанные с временными особенностями изменениями числа и мощности солнечных групп пятен,
- 2) квазипериодичности связанные с неравномерным распределением солнечной активности по гелиодолготе и вращением Солнца,
- 3) модуляционные пики,
- 4) обертоны основного цикла.

К первой группе относятся (см. рис.1,а): хорошо известный уже более полутора веков 11-летний цикл Швабе-Вольфа, вековой 80–120 лет (цикл Гляйсберга) и более 200 лет рис.2 (цикл Зюсса). Кроме того к этой группе следует отнести 22-летний цикл, который появляется в спектре ряда чисел Вольфа из-за специфического чередования высот четных и нечетных 11-летних циклов. А также, по-видимому, циклы 8,6 и ~ 50 лет, свойства которых не изучены.

Применение метода максимальной энтропии позволяет с большей степенью точности исследовать интересующие нас диапазоны частот, особенно в длинноволновой части спектра при коротких рядах, но это преобразование не содержит информации об амплитудах колебаний. На рис.2 кроме векового и 50-летнего циклов выделяется и более длинный цикл в ~ 200 лет, а также наблюдается

более сложная структура спектра в районе 11-летнего цикла. Наличие пиков расщепления 10 и 11 лет на рис.2 позволяет предположить, что имеется модуляция продолжительности 11-летних циклов с периодом порядка 220 лет (цикл Зюсса).

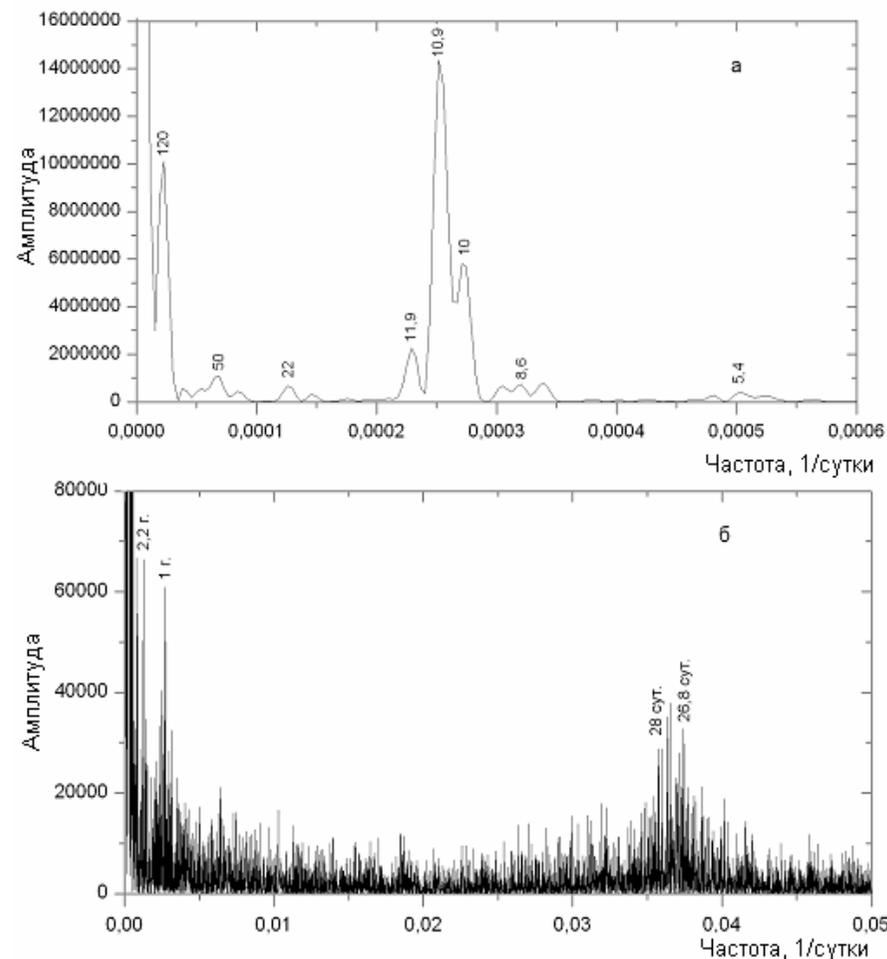


Рис. 1. Быстрое преобразование Фурье ряда ежедневных значений чисел Вольфа: а - низкочастотная часть спектра, б – высокочастотная

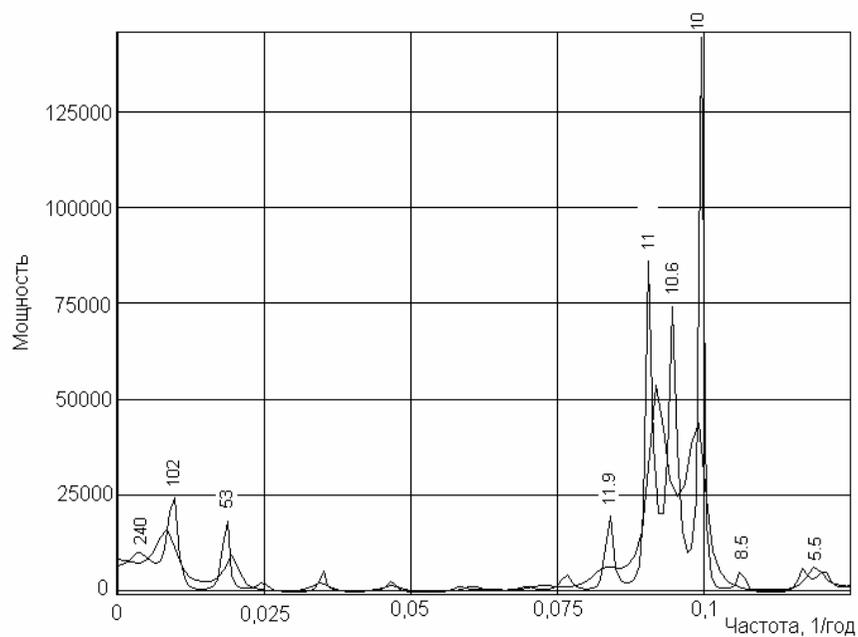


Рис.2. Спектр ряда годовых значений чисел Вольфа (1700-2006 гг.), рассчитанный методом максимальной энтропии для двух значений порядка авторегрессии равных 1/3 и 1/2 длины исходного ряда

Ко второй группе относятся квазипериодичности наблюдаемые в диапазоне частот дифференциального вращения Солнца рис.1,б. Их появление связано с неоднородным, постоянно меняющимся во времени долготным распределением дифференциально вращающихся активных областей. Изменения со временем связаны с конечным временем жизни активных областей и постоянной генерацией новых. Все это приводит к появлению, в исследуемом ряду, цугов колебаний с периодами равными периодам вращения активных областей с меняющимися во времени амплитудой и фазой. Кроме того, изменение средней широты пятен с фазой 11-летнего цикла приводит к частотной модуляции основных гармоник с периодом модуляции ≈ 11 лет.

Применение двойного преобразования Фурье к ряду ежедневных чисел Вольфа, отфильтрованному полосовым фильтром ($0,001 - 0,2 \text{ сут}^{-1}$), приводит к автокорреляционной функции, которая показывает, что вращательная гармоника вариаций чисел Вольфа 27 суток рис.3б промоделирована 11-летним циклом рис.3,а и сохраняется более четырех оборотов Солнца.

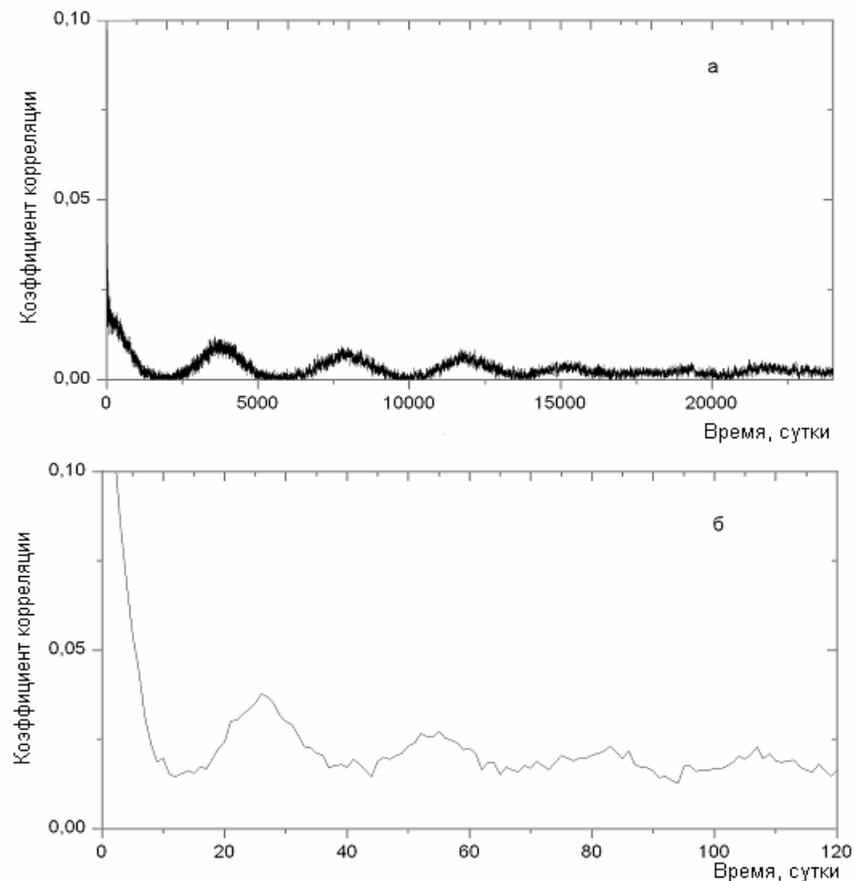


Рис.3. Двойное преобразование Фурье ряда ежедневных значений чисел Вольфа, отфильтрованного полосовым фильтром ($0,001-0,2 \text{ сут}^{-1}$)

В результате всего этого в интересующем нас диапазоне частот мы наблюдаем сложный линейчатый спектр, а не сплошной, несмотря на то, что несущая частота пробегает все значения частот в пределах заданного интервала. Такая картина поведения спектра подтверждается в работе А.А. Харкевича [5], исследовавшего спектры частотно-модулированных рядов. Отсюда можно сделать вывод, что наличие линейного спектра в диапазоне частот дифференциального вращения Солнца не является достаточным доказательством существования «активных долгот».

Для исследования динамики спектральных составляющих в диапазоне частот, соответствующих дифференциальному вращению Солнца, мы использовали текущие спектры. Они рассчитывались по пятилетним выборкам, которые были предварительно отфильтрованы полосовым фильтром (граничные частоты 0,02 и 0,2 сут⁻¹), и скользили по исходной реализации 1749–2002 гг. со сдвигом один год. Выбор длины ряда пять лет для расчета спектров определялся желанием получить удовлетворительное частотное и временное разрешение. В нашем случае частотное разрешение в диапазоне периодов 27 суток составит $\approx 0,0005$ сут⁻¹, а временное определяется усреднением в пять лет, которое плавно изменяется с шагом один год. Полученные в результате такой обработки исходных данных текущие спектры были представлены в виде карты изолиний равных значений квадрата амплитуды A^2 в координатах период-время рис.4. Кроме того, для исключения влияния модуляционного эффекта 11-летним циклом на амплитуды мод, каждый спектр был нормирован на свое максимальное значение.

Анализируя рис.4, видим, что можно выделить несколько мод вращения, набор которых несколько изменяется от цикла к циклу. Можно также отметить, что вращение крупномасштабных структур солнечной активности изменяется с интервалом несколько 11-летних циклов.

Описанные выше методы дают усредненные характеристики за исследуемый период и применимы, в общем, то к стационарным рядам. А, строго говоря, ряд чисел Вольфа является нестационарным рядом. Т.е. продолжительность наблюдаемых циклов и их

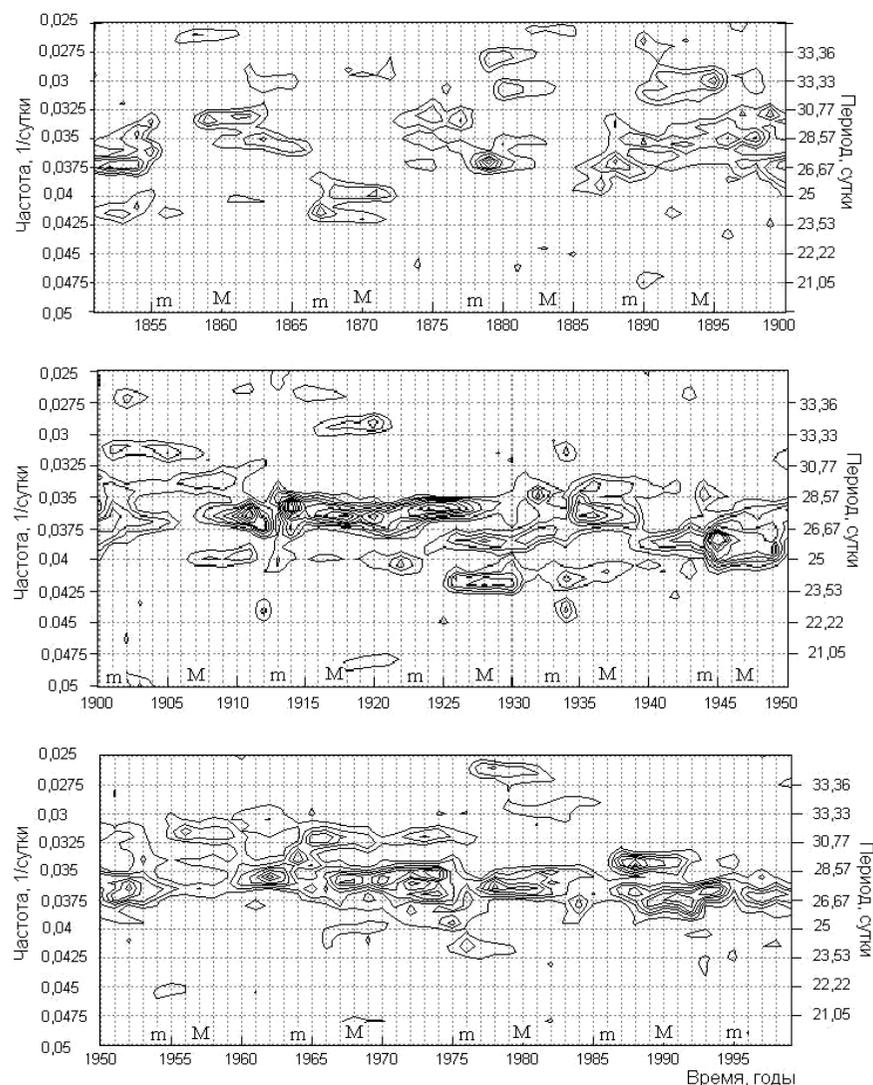


Рис.4. Нормированный динамический спектр ряда чисел Вольфа. М – моменты максимума 11-летнего цикла, m – минимумы

амплитуда изменяются во времени. Если процесс отличен от нуля в сравнительно узкой полосе частот, то для его исследования применим гильбертовский подход. Частной реализацией, которого является метод комплексной демодуляции, описывающий процесс $W(t)$ одним колебанием с переменной амплитудой $D(t)$ и обобщенной фазой $\Phi(t)$ в виде:

$$W(t) = D(t)\cos\Phi(t),$$

что позволяет изучить характер изменения амплитуды и фазы гармоники в окрестностях некоторой опорной частоты. Изменение периода гармоники $T(t)$ можно определить как первая производная обобщенной фазы.

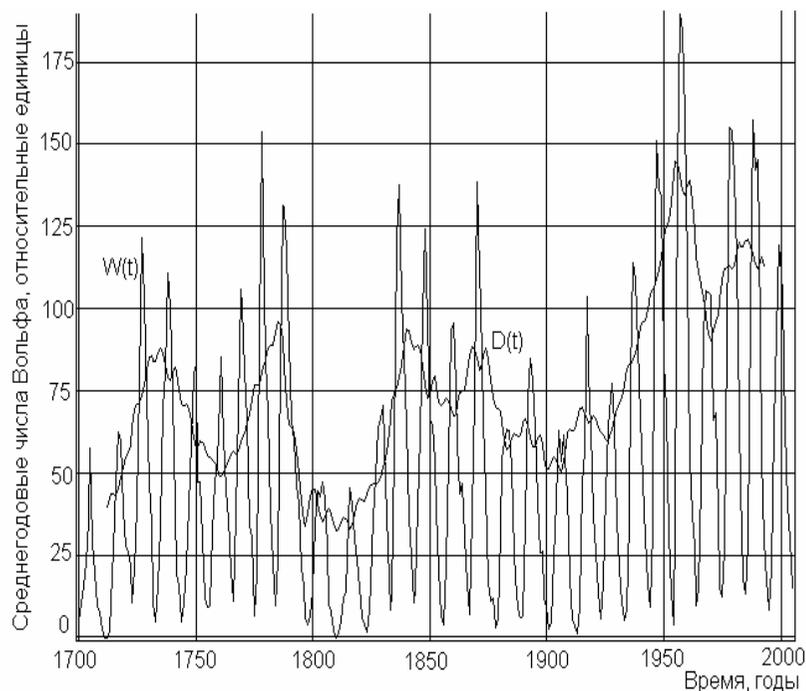


Рис. 5. Ряд среднегодовые значения чисел Вольфа $W(t)$ и его огибающая $D(t)$

Применение метода комплексной демодуляции к ряду к ряду чисел Вольфа рис.5 и рис.6 позволяют наглядно исследовать свойства векового цикла по виду огибающей $D(t)$ и кривой изменения продолжительности цикла. Анализируя форму огибающей 11-летних циклов, видим, что вековой цикл, по крайней мере, двухвершинен. Что согласуется с выводами В.Ф. Чистякова [7]. Однако при меньшем сглаживании можно видеть, что на ветви спада наблюдаются еще несколько всплесков солнечной активности, но два первых всплеска более значительны, поэтому они остаются и при более сильном сглаживании.

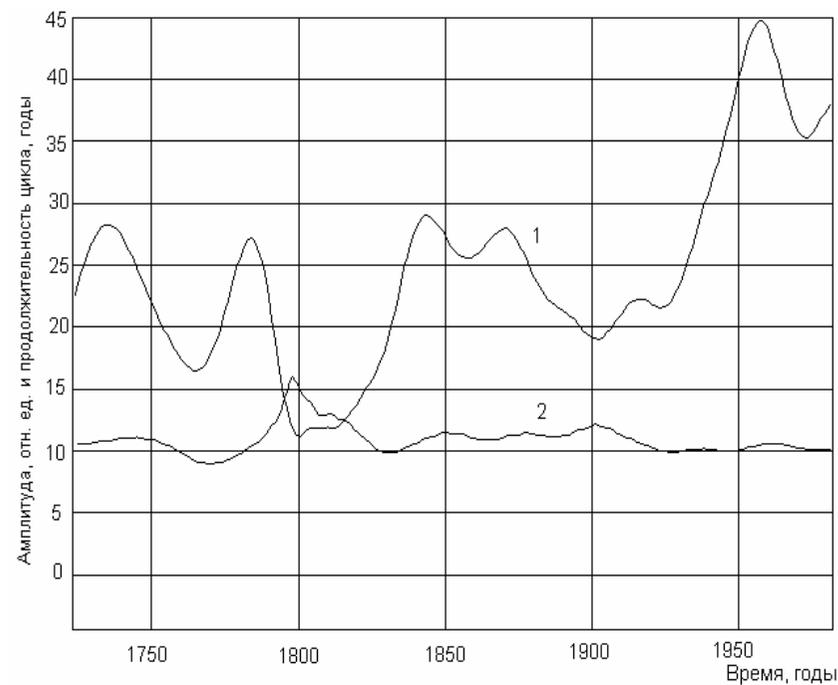


Рис.6. Огибающая ряда чисел Вольфа $D(t)$ – 1 и изменение продолжительности 11-летних циклов – 2

На рис.6 видно также, что кроме нерегулярных короткоживущих изменений продолжительности 11-летних циклов наблюдаются и более-менее регулярные. Когда продолжительность 11-летнего на протяжении одного векового цикла слабо варьирует около некоторого значения и затем практически скачком принимает другое значение в следующем вековом цикле. Т.е. в вариациях продолжительности 11-летних циклов солнечной активности можно предположить наличие периодичности в два вековых цикла. Это подтверждается модуляционным расщеплением 11-летней периодичности на рис.2, о чем говорилось ранее. Кроме того, в 1800 г. наблюдается фазовая аномалия, которая связана с резким увеличением продолжительности циклов с номерами 4,5 и 6. Ранее фазовая аномалия была отмечена Г.В. Куклиным [4].

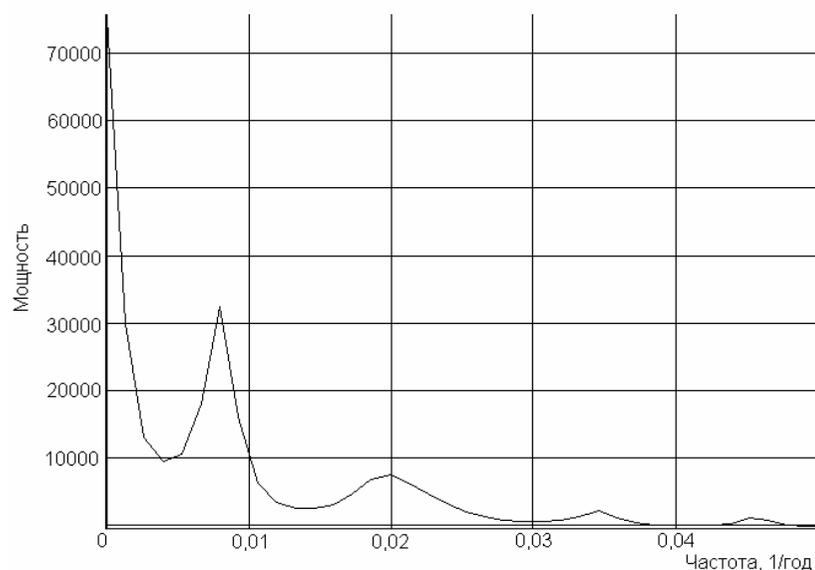


Рис.7. Спектр вариаций огибающей чисел Вольфа.

В спектре огибающей $D(t)$ рис.7, описывающей временные изменения амплитуды 11-летнего цикла наблюдаются вековые (~ 120 лет) и ~ 50 -летние вариации, которые вносят свой вклад в ам-

плитудную модуляцию 11-летних циклов, в дополнение к частотной модуляции, которая связана с вековыми изменениями продолжительности 11-летних циклов (рис.6 кривая – 2).

Итак, по ежедневным и годовым значениям чисел Вольфа исследованы некоторые особенности временного спектра вариаций солнечной активности в диапазонах частот наиболее выдающиеся пики. В низкочастотной части спектра это соответствует вековому, 50-летнему и одиннадцатилетнему циклам. В высокочастотной – диапазону частот дифференциального вращения Солнца. Продолжительность векового цикла, по-видимому, более 100 лет. А его двухвершинность, по-видимому, объясняется наличием 50-летнего цикла.

Показано, что появление модуляционных пиков в диапазоне частот 11-летнего цикла связано не только с вековым изменением амплитуды циклов, но с вариациями их продолжительности с периодом 2 вековых цикла.

В диапазоне частот дифференциального вращения Солнца можно выделить несколько мод вращения. Этот набор несколько изменяется от цикла к циклу. Причем амплитуды их модулированы 11-летним циклом. Доминирующий период вращения крупномасштабных структур солнечной активности, по-видимому, изменяется с интервалом несколько 11-летних циклов. Линейчатый спектр в этом диапазоне частот можно объяснить присутствием в ряду ежедневных чисел Вольфа частотной и угловой модуляции, не прибегая к гипотезе «активных долгот». Т.е. наличие линейчатого спектра в этом диапазоне не является достаточным условием доказательства «активных долгот».

ЛИТЕРАТУРА

1. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. 1986, М., Наука, Ф.-М., 296 с.
2. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1973. 257 с.
3. Э.В. Кононовича, И.В. Мироновой, В.А. Батурина «Частотно-временной анализ рядов солнечной активности» в электронном журнале «Исследовано в России» [<http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2006/182.pdf>].

4. Куклин Г.В. Некоторые результаты исследования 11-и 22-летних циклов чисел Вольфа // Исследование по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Москва: Наука, вып.68, 1984. С.45-56.

5. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М., Изд. Техничко-теоретическая литература. 1957. 236 с.

6. Чистяков В.Ф. Солнечные циклы и колебания климата // Труды УАФО, Владивосток: Дальнаука, вып.1, 1997. 156 с.

7. Чистяков В.Ф. К вопросу о солнечной природе брикнерова цикла // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, вып.2, 1997. С.118-134.

А.П. Крамынин, Г.П. Воробьева

ДИНАМИКА СПЕКТРА ВАРИАЦИЙ СУММАРНОЙ ПЛОЩАДИ ФОТОСФЕРНЫХ ФАКЕЛОВ В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ СОЛНЦА

В первых спектральных исследованиях вариаций индексов солнечной активности обнаружено, что в спектрах присутствует целый набор периодичностей, которые связывают с жестким вращением устойчивых, долгоживущих, обширных структур, образованных активными областями. Дальнейшие исследования [1–4,6] показали, что в изменениях индексов активности Солнца присутствует не только основные гармоники, связанные с вращением структур, но и кратные им, такие как 13,5 и 9 суток и т. д., а амплитуды этих гармоник модулируются циклом солнечной активности.

Настоящая статья посвящена анализу временных изменений спектра вариаций ежедневных значений суммарной площади фотосферных факелов в диапазоне частот дифференциального вращения Солнца. Сравнению динамических спектров северного и южного полушарий.

Для анализа использовался ряд наблюдений фотосферных факелов Уссурийской астрофизической обсерватории за период 1954–2005 гг. и Горной астрофизической обсерватории ГАО за интервал времени 1949–1953 гг.

Благодаря особенностям наблюдений фотосферных факелов (они имеют максимум контраста на лимбе Солнца и не видны в центре диска) мы можем получить четыре независимых реализации. Это - суммарная площадь факелов на восточном лимбе северного полушария $S_{NE}(t)$ и ее повторение в северо-западном квадранте $S_{NW}(t)$. Аналогично для южного полушария также имеем две реализации $S_{SE}(t)$ и $S_{SW}(t)$. Кросскорреляционная функция $S_{NE}(t)$ и $S_{NW}(t)$ (рис.1) показывает, что максимальное значение коэффициента корреляции между этими реализациями возникает при сдвиге их относительно друг друга 9 суток. Так как временной сдвиг 9 суток значительно