

УДК 523.9-327:519.246.8:517.443:519.688

Вращение солнечных структур в верхней хромосфере I. Средние параметры вращения за три солнечных цикла

О.А. Андреева¹, Я.И. Зелык², Н.Н. Степанян¹

¹ НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория"

² ИКИ НАНУ - НККУ

Поступила в редакцию 2 марта 2006 г.

Посвящается памяти
Карен Харви

Аннотация.

По синоптическим картам в линии HeI λ 1083 нм определено вращение нескольких видов солнечных образований в верхней хромосфере. Рассмотрены средние за три солнечных цикла характеристики вращения крупных активных областей, флоккулов средних размеров и корональных дыр на широтах от -80° до $+80^\circ$.

Широтные зоны твердотельного вращения для всех видов солнечных образований составляют 10 и более градусов. Вращение всех образований в N- и S- полусферах несколько различается. В N-полусфере наиболее мощным является период вращения 26.8 сут. для всех рассмотренных видов образований. В S-полусфере - периоды 28.1 - 28.8 сут. Для всех образований характерно наличие нескольких периодов обращения в одной и той же широтной зоне.

ROTATION OF SOLAR STRUCTURES IN THE UPPER CHROMOSPHERE. I. Average parameters of rotation during three solar cycles, by *O.A. Andryeyeva, Ja.I. Zyelyk and N.N. Stepanian*. Rotation of several kinds of solar structures in the upper chromosphere was determined at the synoptic maps in the HeI λ 1083 nm line. The average characteristics of rotation of large active areas, flocculi of middle sizes and coronal holes at latitudes $\pm 80^\circ$ were considered for the three cycles.

Latitude zones of solid-state rotation for studied solar structures have 10 or more degrees. Rotations of all structures in the N- and S-hemispheres are somewhat different. The rotation period 26.8 days is most powerful for all considered kinds of solar phenomena in the N-hemisphere. The periods 28.1-28.8 days have maximal power in the S-hemisphere. The presence of several periods of rotation in the same latitude zone is typical for all phenomena.

Ключевые слова: Солнце, вращение

1 Введение

Вращение солнечных образований - одна из "долгоживущих" проблем физики Солнца. Давно установлен факт дифференциальности вращения Солнца. Многими авторами показано, что для

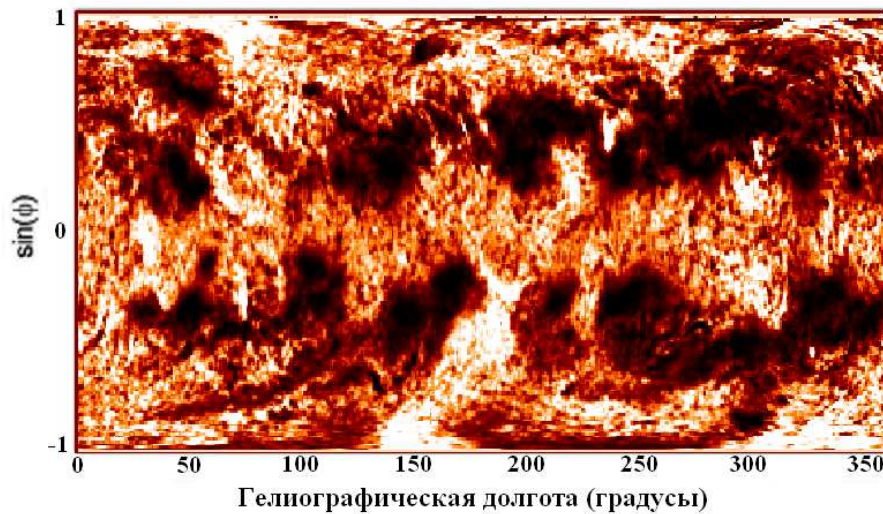


Рис. 1. Пример синоптической карты в линии HeI

солнечных структур разных видов законы изменения скорости вращения с широтой различны. Кроме того, установлено и изменение вращения со временем. Поскольку вращения внешних и внутренних слоев Солнца связаны, дифференциальное вращение входит как необходимый параметр в модели строения Солнца и теории солнечного цикла.

Целью настоящей работы является определение по одному и тому же материалу вращения нескольких видов солнечных образований в верхней хромосфере. В предлагаемой здесь первой части работы будут рассмотрены средние за три солнечных цикла характеристики вращения в верхней хромосфере крупных активных областей, флоккулов средних размеров и корональных дыр на широтах от -80° до $+80^\circ$.

2 Материал наблюдений

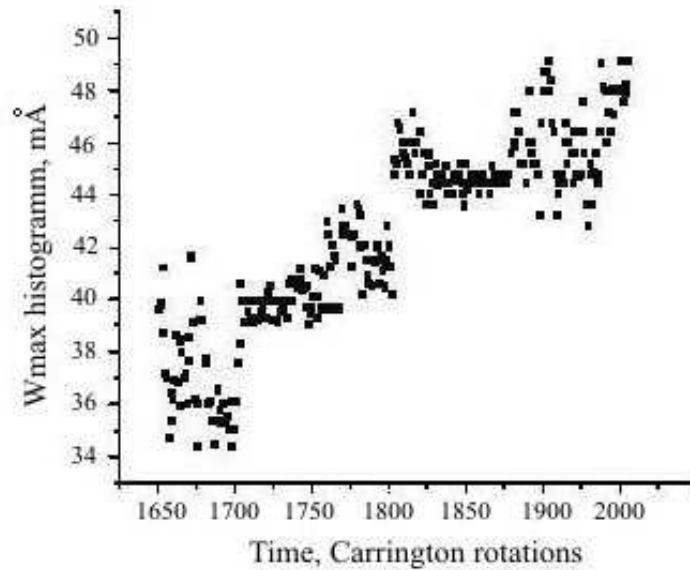
Исходным материалом послужили наблюдения Солнца в линии HeI λ 1083 нм (далее в тексте будем называть ее "линия HeI"). Они были получены в обсерватории Китт Пик (США) и любезно предоставлены нам их авторами. Наблюдения относятся к временному интервалу с начала 1977 до конца сентября 2003 года. Это соответствует 357 Кэррингтоновским оборотам Солнца №№ 1650-2006. Данные охватывают три солнечных цикла, начиная с фазы роста 21-го цикла и кончая спадом 23-го цикла. Материал наблюдений представляет собой синоптические карты, составленные из ежедневных изображений Солнца в линии HeI в течение одного оборота Солнца (27,25 сут.). На Рис. 1 приведен пример такой синоптической карты. По оси X карты отложена гелиографическая долгота от 0° до 360° , а по оси Y - $\sin\varphi$ от -1 до +1, где φ - гелиографическая широта. Пространственное разрешение таких карт 1° по X и $1/90$ по Y. Таким образом, каждой карте соответствует двумерный массив 360×180 пикселей, содержащий интенсивности спектра Солнца в центре линии HeI для всех точек поверхности Солнца. Для перехода от центральных интенсивностей к эквивалентным ширинам линии HeI мы воспользовались формулами, выведенными для этого материала сотрудниками обсерватории Китт Пик. Перевод интенсивности I в эквивалентную ширину W осуществляется по формуле

$$W = a + b * I \quad (1)$$

Коэффициенты a и b для разных интервалов времени даны в Таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты в формуле (1) перевода интенсивностей в эквивалентные ширины.

№№ Каррингтоновских оборотов	a	b
1650 – 1755	32.42	-0.59
1756 – 1855	35.17	-0.60
1855 – 1931	40.84	-0.50
1932 – 2006	46.21	-0.72

Рис. 2. Изменение со временем эквивалентной ширины W линии HeI, соответствующей максимуму гистограммы распределения величин W на синоптических картах Солнца

Среднее отклонение эквивалентных ширин W , полученных по формуле (1), от реальных измерений W , проведенных Ливингстоном, составляет ± 4 mÅ. После перевода всех карт в эквивалентные ширины мы провели нормирование каждой карты по максимуму ее гистограммы распределения числа пикселей по значениям W . Необходимость такой операции стала ясной после определения максимумов таких гистограмм для всех карт. На рис. 2 представлено изменение W максимума гистограммы со временем (W_{\max}). Практически нормировка осуществлялась следующим образом. Для каждой карты строилась гистограмма распределения числа пикселей по величине соответствующих им значений W . Полученная гистограмма аппроксимировалась функцией Гаусса, для которой находилось значение W_{\max} , соответствующее максимуму распределения. Затем все значения на карте делились на полученное выше W_{\max} .

3 Выделение отдельных солнечных образований

Изображения Солнца в линии HeI представляет исключительную возможность иметь одновременно информацию о положении на диске и яркости сразу нескольких видов солнечных образований. На солнечных изображениях, нормированных к величине эквивалентной ширины линии HeI в невозмущенных областях, флоккулы, пятна и волокна имеют $W > 1$, для корональных дыр $W < 1$. Интенсивности, близкие к 1, относятся к невозмущенным, мало структурным областям. Принятые

ограничения для W отдельных солнечных образований даны в Таблице 2.

Таблица 2. Эквивалентные ширины W линии HeI для четырех солнечных образований

№	Солнечное образование	Интервал W
1	Активные области с пятнами (AR)	$2.00 < W \leq 10$
2	Флоккулы среднего размера (FL)	$1.05 < W \leq 2$
3	Невозмущенные области (BG)	$0.95 < W \leq 1.05$
4	Корональные дыры (CH)	$0.10 < W \leq 0.95$ $0.05 < (1-W) \leq 0.9$

Следует отметить, что мы не рассматриваем такие образования как вспышки, волокна, выбросы масс ввиду их малой площади и достаточной редкости появления на Солнце. Остановимся отдельно на корональных дырах (CH). Как сказано выше, для CH $W < 1$. Это происходит из-за наложения эмиссионного контура линии в CH на контур линии поглощения в невозмущенной хромосфере. Чем мощнее CH, тем больше эмиссия и тем меньше W результирующей линии. Поэтому для всех пикселей, в которых $W < 0.95$, значение W было заменено на $1 - W$. Это соответствует рассмотрению эмиссионной части контура линии HeI.

4 Построение временных рядов для каждого вида активности по всему материалу

Следующий этап обработки - разбиение карт на широтные интервалы по 5° . Как было сказано выше, массив, соответствующий одной карте, содержит 180 строк. Каждая строка представляет широтный интервал, для которого $\Delta(\sin\varphi) = 1/90$. Для перехода к шкале φ значения $\sin\varphi$ для каждой строки были заменены соответствующими им значениями φ . В результате получили вектор-строку из 180 значений $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$.

Далее мы рассматривали широтные интервалы шириной $\Delta\varphi = 5^\circ$ от -80.51° до 79.5° . Всего получилось 32 широтных интервала. Каждому 5-градусному интервалу соответствует несколько строк массива исходной синоптической карты. Количество строк в таких интервалах варьируется от девяти на низких широтах до одной строки на высоких.

К сформированным таким образом массивам был применен алгоритм фильтрации и суммирования W по столбцам для заданного вида активности. В результате такой операции для каждого широтного интервала из одного исходного массива были получены 4 строки по 360 элементов (по одной строке для каждого вида активности), а из одной синоптической карты - 4 массива размерностью 32×360 . Строки этих массивов можно рассматривать как временные ряды. Элемент ряда для каждого вида активности представляет суммарную эквивалентную ширину линии HeI в данном широтном интервале 5° в момент времени, соответствующий прохождению точки с данной долготой в рассматриваемом обороте через центральный меридиан. Временное разрешение такого ряда 0.07 суток. Величины элементов этих рядов пропорциональны полной энергии, поглощенной (а для корональных дыр излученной) в данном месте Солнца в данный момент элементами рассматриваемого вида активности.

Полученные временные ряды для отдельных карт объединялись в непрерывные ряды для всего изучаемого интервала времени с 1977 по 2003 г. Следует заметить, что при вращении Солнца долгота его центрального меридиана уменьшается. Поэтому для каждой карты временной ряд начинался с долготы 360° . После 0° к ряду добавлялась соответствующая строка следующей по времени карты, начиная с долготы 360° . Таким образом, для дальнейшего анализа были подготовлены для каждого из 4 видов активности 32 временных ряда длиной 128520 элементов. Изменение со временем суммарной эквивалентной ширины внутри 5-ти градусных зон для активных областей

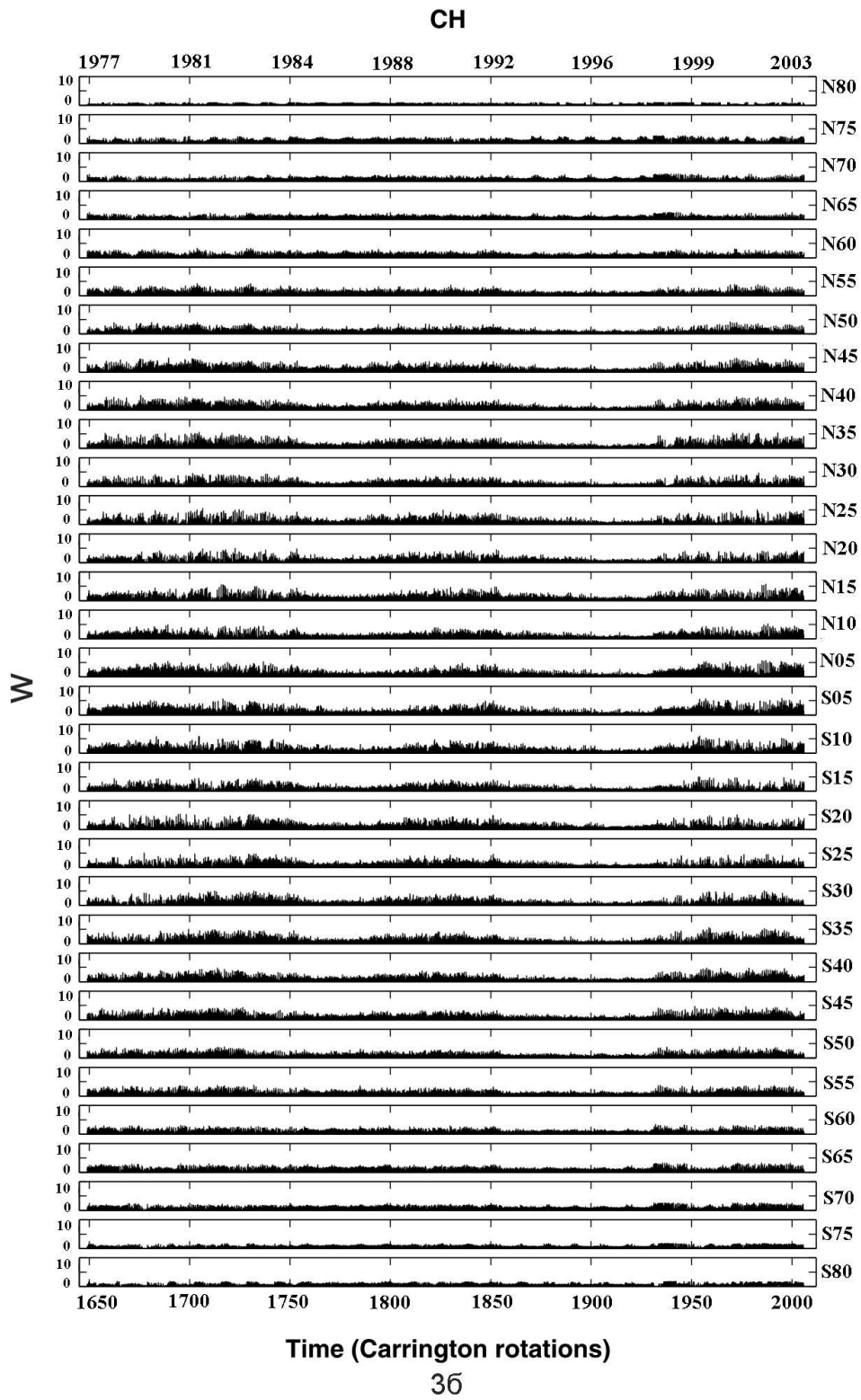


Рис. 3. Изменение со временем суммарных эквивалентных ширин внутри пятиградусных зон для активных областей (3а) и корональных дыр (3б)

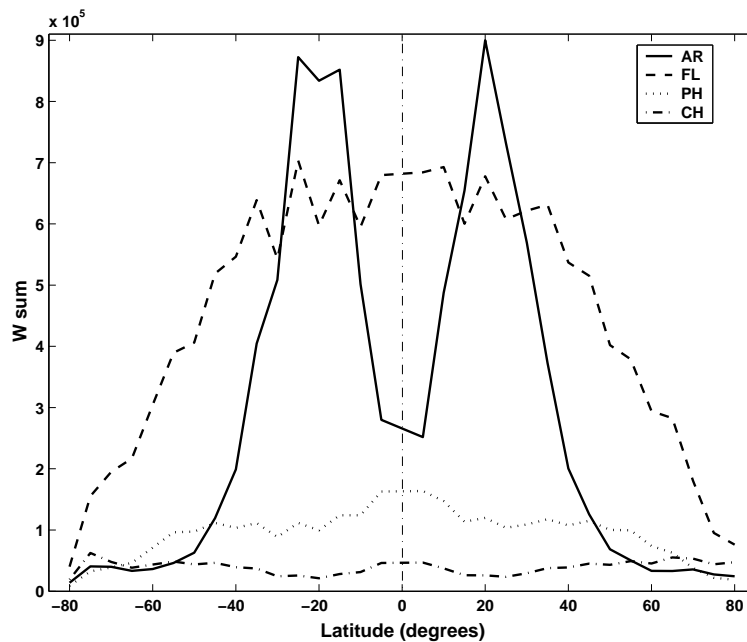


Рис. 4. Изменение с широтой суммарных эквивалентных ширин за весь исследуемый период для четырех видов образований

и корональных дыр показано на Рис. 3а и Рис. 3б соответственно. Для каждой широтной зоны были определены суммы всех членов временного ряда. Физически такие суммы пропорциональны полной энергии, излученной в случае корональных дыр, и поглощенной в остальных образованиях, на данной широте за весь исследуемый интервал времени (почти три солнечных цикла). На рис. 4 представлены изменения этих величин с широтой для активных областей, корональных дыр, флоккулов и фона.

5 Выбор метода спектрального анализа наблюдательного материала

По сформированным временным рядам оценивание вращения солнечных структур состояло в определении значимых периодов и средней мощности процесса в заданных диапазонах периодов для разных широтных зон. Применительно к решению сформулированной проблемы было опробовано несколько методов спектрального анализа. При реализации этих методов применялись следующие параметры дискретизации и Фурье-анализа:

Количество отсчетов в каждом временном ряде - $N = 357 \times 360 = 128520$

Шаг дискретизации по времени - $dt = 27,2753 / 360 = 0,07576572$ (суток)

Частота дискретизации - $fs = 1/dt = 13,19875491$ (1/сут.)

Частота Найквиста - $nyquist = 1/2 fs = 6,599377$ (1/сут.)

Количество временных отсчетов, подвергающихся быстрому преобразованию Фурье (БПФ) - $nfft = 262144$

Количество частотных отсчетов (коэффициентов Фурье) - $nfft/2 + 1 = 131073$

Для оценивания периодичностей был рассмотрен метод периодограмм Шустера (Шустер, 1898) и осуществлялась оценка значимости пиков периодограммы в отношении, не является ли очередной пик порожденным случайной флуктуацией (Теребиж, 1992). Оценка значимости пиков по такому критерию показала, что ни один из пиков периодограммы не порожден случайной флуктуацией.

Для вычисления оценки спектральной плотности мощности был исследован метод периодограмм с использованием БПФ (Бендат, Пирсол, 1989). С целью повышения разрешающей способности по частоте каждая реализация временного ряда длиной $N = 128520$ отсчетов разбавлялась нулями до реализации большей длины, равной целой степени числа 2. Удлиненная таким образом временная реализация, подвергаясь БПФ, имела длину $nfft = 262144$ отсчетов. Для уменьшения эффекта просачивания энергии с частот, далеких от главного максимума временного прямоугольного окна в спектральной области, через так называемые боковые максимумы при оценке спектральной плотности по методу периодограмм применяется временное сглаживание. Именно действию прямоугольного временного окна с его эффектами утечки энергии в область боковых лепестков в частотной области соответствует БПФ на ограниченном длиной реализации конечном временном интервале. Для уменьшения эффектов смещения периодограммы и уменьшения ее дисперсии, обусловленных указанными факторами, применяется метод модифицированных периодограмм. В этом методе используются временные окна сглаживания, в частности, окно Хемминга (Hamming).

С целью обеспечения компромисса между требованиями высокой разрешающей способности, позволяющей выявить тонкую структуру истинного спектра (узкие выбросы) и низкой дисперсии оценки спектральной плотности, исследован и применен метод мультизаострений (Multitaper Method) (Томсон, 1982). В этом методе при оценивании спектра используются группы линейных или нелинейных комбинаций модифицированных периодограмм (комбинации оптимальных фильтров в частотной области) и не используются временные окна сглаживания, выбор которых достаточно субъективен. Эти периодограммы вычисляются на основании данных временного ряда с использованием ортогональных дискретных протяженных сфероидальных последовательностей (DPSS, иначе - Slepian-sequences). Использовались последовательности из 15, 7, 5, 2 таких функций. Особенно эффективным Multitaper Method оказался при малых длинах рядов, для которых мало эффективен Welch's Method (Велч, 1967). К тому же, при малой длине выборки применение Welch's Method, может существенно изменить форму оценки спектральной плотности и обладает субъективностью в выборе временного окна сглаживания.

Для исследования зависимости от широты периодов вращения и распределения спектральной плотности процессов, связанных с различными солнечными структурами, наблюдаемыми в линии HeI, был выбран и применен Welch's Method. Эффективность применения Welch's Method обусловлена значительной длиной (128520 отсчетов) временных рядов на всем интервале наблюдения солнечных структур. Welch's Method состоит в разбиении всего временного ряда на пересекающиеся временные сегменты, вычислении на каждом из сегментов модифицированных периодограмм со сглаживанием окном, и получении в качестве оценки спектральной плотности усредненных сглаженных периодограмм по всем сегментам. Использовалось разбиение временного ряда длиной 128520 отсчетов на 3 на 50% пересекающихся временных сегмента длиной 64260 отсчетов каждый и сглаживание в каждом сегменте с использованием окна Hamming. Используя описанный выше Welch's Method, были построены спектры мощности для всех рассматриваемых солнечных образований и широт от $\pm 5^\circ$ до $\pm 80^\circ$. В дальнейшем рассматривались спектры в области периодов от 20 до 35 суток.

Последовательность обработки иллюстрируется на примере спектра мощности для активных областей в широтной зоне $N 20^\circ$. На рис. 5а приведена несглаженная оценка спектральной плотности, полученная методом периодограмм для интервала периодов 20-35 суток. Сглаженная оценка спектральной плотности, полученная с помощью Welch's Method, представлена на рис. 5б. Горизонтальная линия соответствует уровню 3σ , где σ - среднееквадратичное значение оценки спектральной плотности, представленной на графике на рис. 5б, как случайной функции частоты. Сглаженные спектры мощности для активных областей на широтах $5-80^\circ$ N-полусферы представлены на рис. 6.

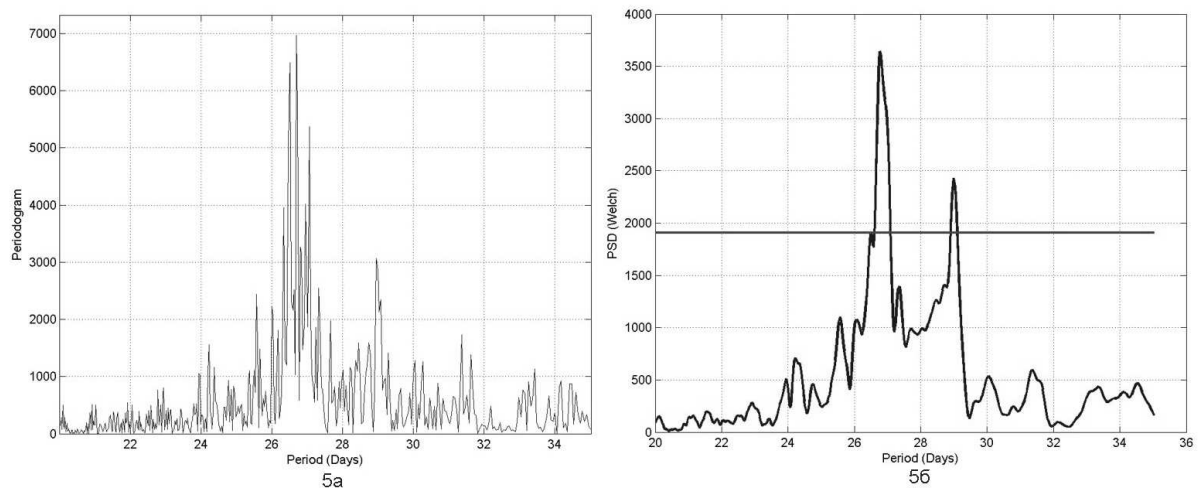


Рис. 5. Спектр мощности для интервала 20-35 суток. Несглаженный - (а), сглаженный спектр - (б)

6 Характеристики вращения солнечных образований

6.1 Широтные зоны твердотельного вращения

Прежде, чем перейти к более детальному изучению изменения вращения с широтой, рассмотрим вопрос о величине широтных интервалов, обладающих одинаковым характером вращения, т.е. близкими спектрами мощности. Для этого были определены коэффициенты корреляции между спектрами мощности для каждой двух соседних и двух, разделенных пятиградусным интервалом, широтных зон. Результаты для всех рассмотренных солнечных образований представлены на Рис. 7. На этих графиках можно увидеть следующее:

- Для активных областей в обоих полушариях высокая корреляция спектров мощности в соседних широтных зонах наблюдается лишь на низких широтах от 0 до $\pm 50^\circ$ (см. кривые $D=1$). Вид кривой ($D=2$) свидетельствует о том, что размеры зон одинакового вращения в N-полушарии больше, чем в S-полушарии.
- Для флоккулов виден существенный рост корреляции с широтой. Коэффициент корреляции становится заметно больше 0.5 только для широт выше 50° . Для более низких широт корреляция между соседними 5 -градусными широтными зонами практически отсутствует для S-полушария и становится заметной в узкой полосе около 30° в N-полушарии.
- В случае корональных дыр относительное постоянство коэффициентов корреляции спектров мощности в широтных зонах 10° , а иногда и 15° , свидетельствует о протяженных зонах твердотельного вращения корональных дыр. Характер вращения в обоих полушариях мало различается.

Эти результаты касаются общей близости спектров мощности в области периодов 20-35 суток.

6.2 Изменения периодов вращения и их мощности (PSD) с широтой

По спектрам мощности для всех рассматриваемых видов солнечных образований были построены трехмерные графики зависимости мощности (PSD) от значений периода и широты. Такой график для активных областей приведен на Рис. 8. На Рис. 9 величины PSD представлены в виде изолиний. Будем рассматривать периоды вращения, для которых PSD превышает 3σ . Для активных областей это соответствует вторым изофотам на Рис. 9(AR). Анализируя рисунки 6, 8 и 9 можно уверенно

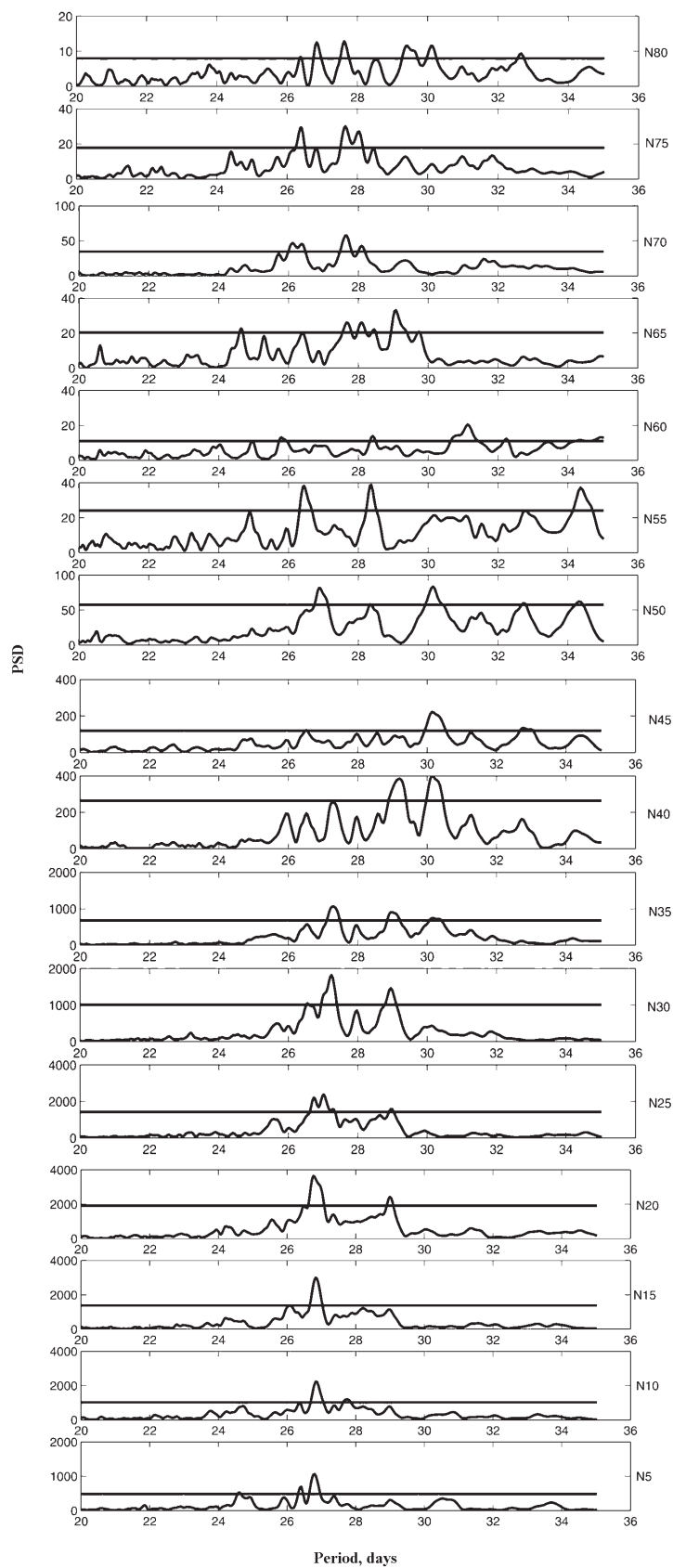


Рис. 6. Сглаженные спектры мощности в интервале периодов 20-35 суток для активных областей всех широтных зон N-полусферы

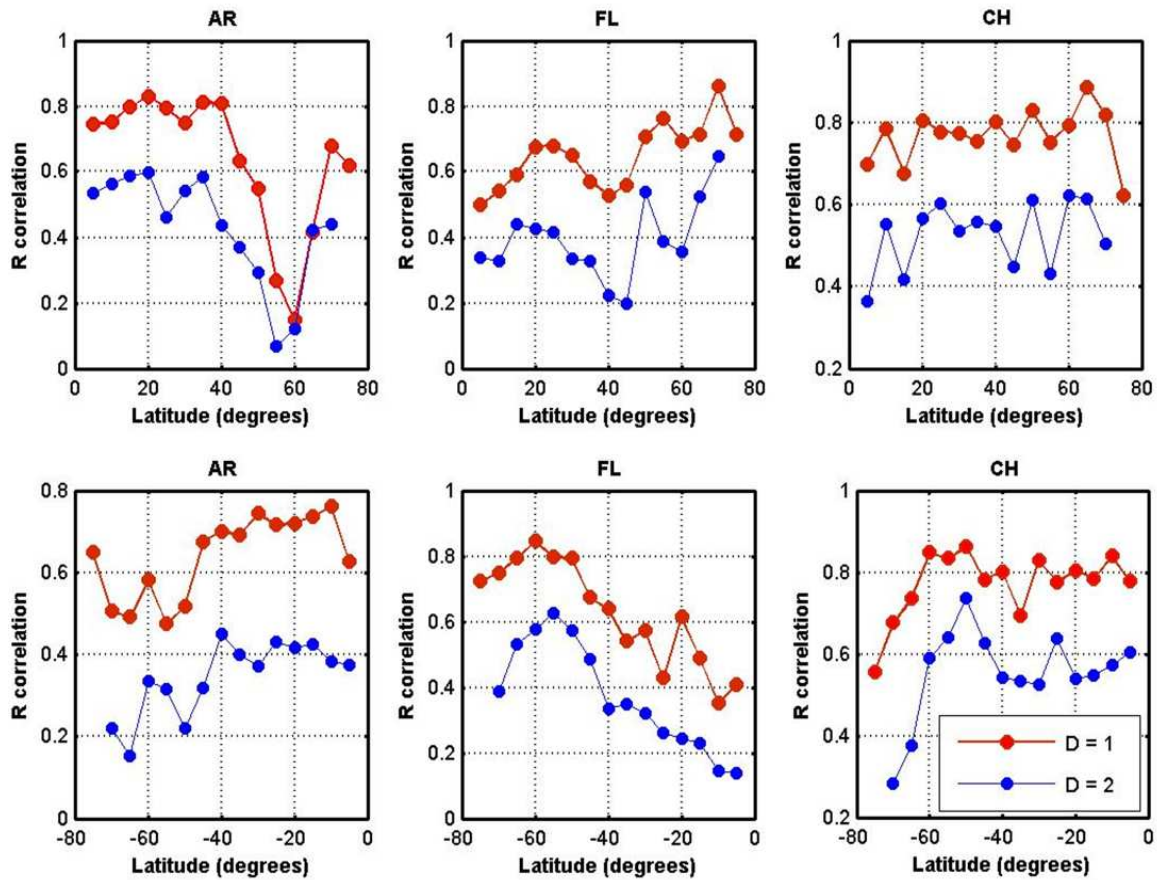


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между спектрами мощности каждой двух соседних широтных зон ($D=1$) и двух зон, разделенных одним ($D=2$) 5-градусным широтным интервалом в N- и S-полусферах для активных областей(AR), флоккулов(FL) и корональных дыр(CH).

заключить, что одни те же периоды встречаются на разных широтах, или занимают несколько широтных интервалов, и на одной широте часто наблюдается более одного периода. Результаты проведенной обработки, представленной на рис. 9, сведены в Таблице 3. Самый мощный период вращения во всех полученных нами спектрах мощности - это период 26.81 суток в спектре мощности для активных областей. Он относится к широте $+20^\circ$. Сравнимый с ним по мощности период 28.18 суток, также в спектре мощности для активных областей, достигает максимума на широте -17.5° . Для корональных дыр характерны более длинные периоды и более высокие широты. Причем в N-полусфере более короткий период вращения наблюдается на широте 64° , а более длинный на широте 30° . У флоккулов наиболее мощные периоды группируются около 27 дней на широтах зоны активности и в области 65° . Заметная концентрация вращения фона лишь в S-полусфере свидетельствует о большей активности N-полусферы по сравнению с S- полусферой.

Общий вывод из рассмотрения отдельных периодов с наибольшими значениями PSD - это отсутствие привычного дифференциального вращения - увеличения периода вращения с ростом широты. Кроме того, рассмотренные нами солнечные образования вращаются с разными скоростями.

До сих пор мы говорили об отдельных периодах с максимальными значениями PSD и тех широтах, для которых они характерны. О среднем вращении каждой полусферы можно судить

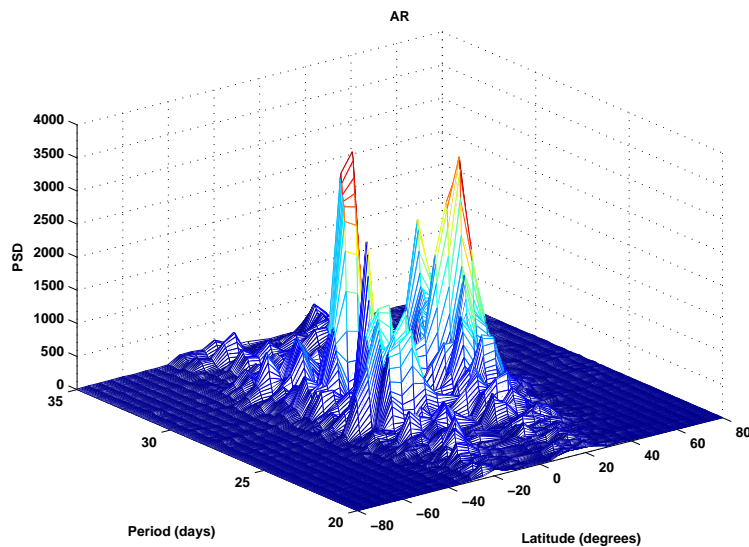


Рис. 8. Трехмерное изображение зависимости мощности (PSD) от значений периода и широты для спектра мощности, построенного для активных областей

по рисункам 10, 11 и 12. На них представлены изменения с периодом средних значений PSD для каждой полусферы в спектрах мощности для активных областей, корональных дыр и флоккулов.

Для всех образований наблюдаются разные наборы и диапазоны встречающихся периодов. Общим для N-полусферы является максимальный по мощности период 26.8 суток. В S-полусфере максимальная мощность характерна для периодов 28.1-28.8 суток. Для корональных дыр существенным по мощности является и период 30 суток.

7 Выводы

Анализ всех полученных данных позволяет сформулировать следующие средние характеристики вращения четырех видов солнечных образований в верхней хромосфере Солнца за три солнечных цикла. Широтные зоны твердотельного вращения для всех видов солнечных образований составляют 10 и более градусов. Они несколько отличаются для N- и S-полусфер. В N-полусфере наиболее мощным является период вращения 26.8 суток для всех рассмотренных видов солнечных образований. В S-полусфере максимальная мощность характерна для периодов 28.1-28.8 суток. Для всех образований характерно наличие нескольких периодов обращения в одной и той же широтной зоне. Один и тот же период встречается в разных широтных зонах. При использованном нами усреднении материала за все три цикла нельзя разделить пространственное и временное изменение вращения. Во второй части этой работы будет изучено изменение широтного распределения вращения со временем.

Сравним наши результаты с полученными ранее результатами других авторов. В работе (Котов и др., 2001) по наблюдениям общего магнитного поля, т.е. в фотосфере Солнца, в 1968 - 1999 гг. было получено преобладание периода вращения Солнца 26.92 суток, что близко к полученному нами 26.81 суток для активных областей на широте 20° . В спектре мощности, полученном в работе (Котов и др., 2001), наблюдаются также менее мощные периоды 27.14, 27.43 и 28.14 суток. Последний из этих периодов совпадает с полученным нами периодом 28.18 суток на широте -17.5° . В работе (Бадалян, 2005) по наблюдениям зеленой корональной линии получено вращение короны на экваторе с периодом 27 суток, а на широте 40° с периодом 29.5 суток.

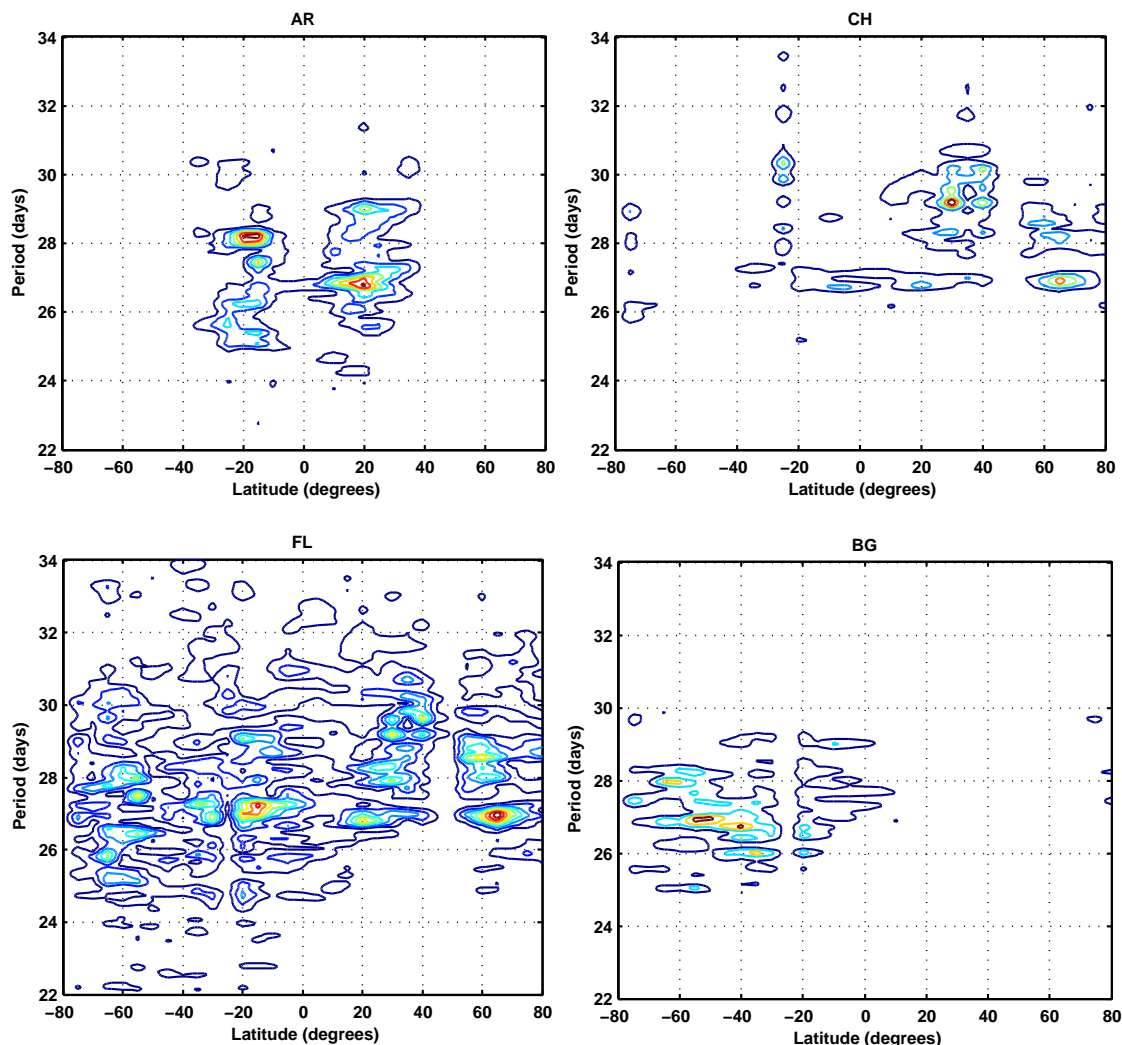


Рис. 9. Изменение PSD в спектрах мощности с широтой и периодом с представлением PSD в виде изолиний. (AR) - для активных областей, (CH) для корональных дыр, (FL) для флоккулов и (BG) для фона

Таблица 3. Широты наиболее мощных периодов в спектрах мощности четырех солнечных образований

Активные области		Корональные дыры		Флоккулы		Фон	
Наиболее мощные периоды (сутки)	Широта (градусы)	Наиболее мощные периоды (сутки)	Широта (градусы)	Наиболее мощные периоды (сутки)	Широта (градусы)	Наиболее мощные периоды (сутки)	Широта (градусы)
25.68	-25	30.32	-24	27.1	-17.4	26	-35
28.18	-17.5	29.25	30	26.9	64.5	27	-55
27.43	-16.2	28.30	64.8	26.7	20		
25.4	-15.6						
26.81	19.9						
28.92	20						

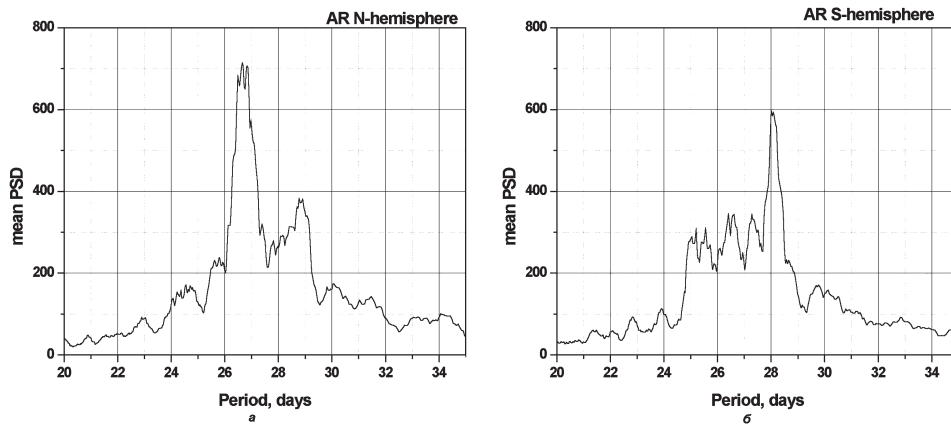


Рис. 10. Изменение с периодом средних значений PSD для каждой полусферы в спектрах мощности для активных областей

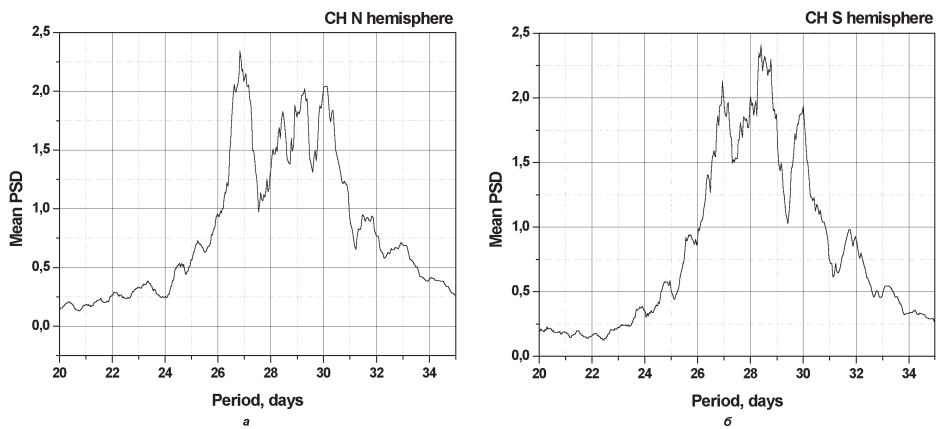


Рис. 11. Изменение с периодом средних значений PSD для каждой полусферы в спектрах мощности для корональных дыр

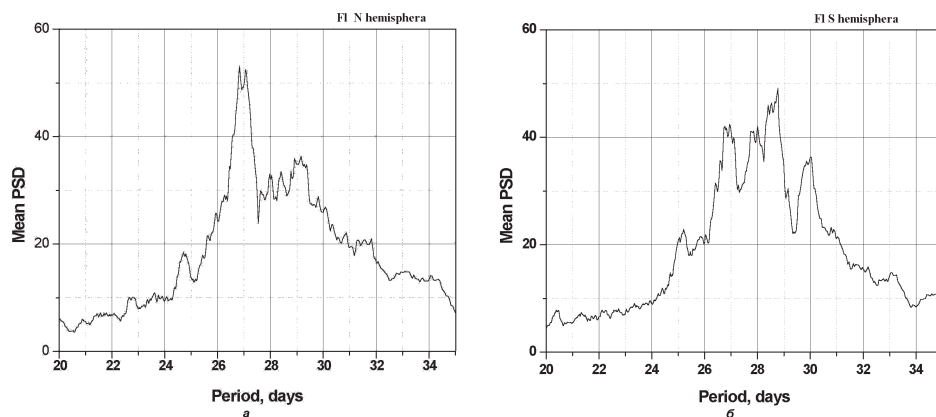


Рис. 12. Изменение с периодом средних значений PSD для каждой полусферы в спектрах мощности для флоккулов

Напомним, что наши измерения относятся к отдельным образованиям в верхней хромосфере. И использованные в настоящей работе данные NSO/Kitt Peak получены при кооперации NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

Литература

- Бадалян О.Г. // Юбилейная конференция КрАО. "Физика небесных тел", 2005. Научный, Крым, Украина.: Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2006. Т.103. (В печати)
- Бендат Дж., Пирсол А. // Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир. 1989.
- Велч (Welch P.D.) // IEEE Trans. Audio Electroacoustics, Vol. AU-15 (June 1967), P. 70.
- В.А. Котов, В.И. Ханейчук, Т.Т. Цап // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т.97. С.60.
- Теребиж В.Ю. // Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука. 1992.
- Томсон (Thomson D.J.) // Proceedings of the IEEE, Vol. 70 (1982), P. 1055.
- Шустер (Schuster A.) // Terrest. Magn. 1898. V. 3. P. 13.