

УДК 523.9-327: 519.246.8: 517.443

Я. И. Зельк¹, Н. Н. Степанян², О. А. Андреева²

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Національного космічного агентства України, Київ
adapt@space.is.kiev.ua

² НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», Научний, Крим
nataly@crao.crimea.ua

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ЛИНИИ He I λ 1083 НМ

Из застосуванням методів спектрального аналізу оцінені такі характеристики диференціального обертання трьох типів сонячних структур, що спостерігаються у верхній хромосфері, у десятиградусних широтних зонах у характерних інтервалах періодів у трьох останніх циклах активності Сонця: 1) значущі стаціонарні періодичні складові обертання у трьох циклах; 2) часові зміни періодичних складових обертання на різних широтах у межах кожного циклу за результатами спектрального аналізу у ковзному часовому вікні довжиною 1 рік зі зсувом на півроку на всьому 26-річному інтервалі спостережень. Встановлено, що для всіх широтних розподілів усіх типів структур сумарна потужність процесів у кожному з декількох інтервалів значущих періодів обертання змінюється з часом як протягом кожного циклу, так і від циклу до циклу. Сумарна потужність процесів для активних ділянок із плямами і флокул істотно відрізняється на високих широтах і близька до збігу на низьких. Зміни сумарної потужності із широтою для корональних дір істотно відрізняються від її змін для активних ділянок і флокул. Міра диференціального обертання для всіх розглянутих сонячних структур змінюється з часом, і спостерігаються навіть моменти зміни її знаку. Коротко проаналізовано фактори еволюції диференціального обертання розглянутих сонячних утворень із широтою і часом, що виражаються у різній природі, розмірах, часі життя цих структур, глибини знаходження їхніх джерел і характері власних рухів.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением цикла публикаций [1, 5, 6, 8] по освещению результатов совместных исследований сотрудников Института космических исследований (ИКИ НАНУ–НКАУ) и Лаборатории физики Солнца НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» в области исследования вращения солнечных структур. В работе [6] охарактеризованы объекты исследований — активные процессы в атмосфере Солнца. Указано, что в линии He I λ 1083 нм можно наблюдать солнечные структурные образования на уровне верхней хромосферы — слоя солнечной атмосферы, простирающегося на 10 тыс. км и выше над самым глубоким ее слоем — фотосферой (толщиной 200–300 км), которая формирует непрерывный спектр оптического излучения, и в котором наб-

людаются солнечные пятна. Наблюдения Солнца на уровне верхней хромосферы позволяют получить информацию о положении на диске Солнца и яркости изображений трех типов структурных образований: корональные дыры (КД), активные области без солнечных пятен (флоккулы) (ФЛ) и активные области с группами солнечных пятен (АО) [1, 5, 6]. Источники этих образований располагаются ниже верхней хромосферы, а для некоторых структур, возможно, даже под фотосферой. Взаимодействие этих источников между собой, а также с фоновыми магнитными полями на Солнце влияет на активные солнечные процессы, в частности на извержение из корональных дыр высокоскоростных потоков плотной плазмы — солнечного ветра, которые существенно влияют на космическую погоду.

Уже давно установлен факт дифференциального вращения Солнца, который проявляется в

различном характере вращения структур одного типа на разных гелиоцентрических широтах и структур разных типов на одной гелиографической широте. Исследуются также временные изменения дифференциального вращения Солнца и связь между дифференциальным вращением структур во внутренних (под фотосферой) и внешних (атмосфера) слоях Солнца. Дифференциальное вращение Солнца и его магнитных полей является важной характеристикой при разработке моделей теории дифференциального вращения и строения Солнца.

За последние несколько десятилетий разработана теория дифференциального вращения звезд, и в частности Солнца. Наиболее полным обзором современного состояния теории дифференциального вращения звезд, трудностей и перспектив ее развития является работа [9], в которой проанализировано 122 библиографических источника. Для Солнца в наибольшей степени проведены удачные численные эксперименты, согласующиеся с результатами наблюдений, основанные на применении теоретических моделей. Теоретические модели дифференциального вращения звезд базируются на применении квазилинейного приближения гидродинамики средних волн. В основе этого подхода лежит следующая идея, высказанная еще А. И. Лебединским в 1941 г. [9]. Дифференциальное вращение возникает в результате взаимодействия турбулентной конвекции с глобальным вращением. Конвективная турбулентность во вращающейся среде испытывает воздействие кориолисовых сил. Обратное воздействие возмущает вращение и приводит к его дифференциальному характеру. В адекватных моделях дифференциального вращения необходимо учитывать влияние таких факторов: Λ -эффект [24] — наличие турбулентных потоков углового момента в однородно вращающихся средах; меридиональная циркуляция [17]; конвективный перенос тепла [20, 22, 26]. Основные механизмы формирования дифференциального вращения звезд (в частности Солнца) детально изучены в гидромеханике средних полей вращающихся турбулентных сред [23, 25]. Применительно к теоретическому обоснованию изменения диф-

ференциального вращения со временем, особенно на Солнце при объяснении периодических 11-летних изменений вращения, используется аппарат крутильных колебаний [16, 19], в том числе и данные о распределении крутильных колебаний в недрах Солнца [27]. Для проверки разработанной теории дифференциального вращения в приближении средних полей перспективными считаются не глобальные вычислительные эксперименты, а локальные численные расчеты конвекции для малой части вращающейся конвективной зоны [14, 15, 18].

Таким образом, теория дифференциального вращения звезд, в частности Солнца, рассмотренная в [9], касается неоднородного вращения поверхностей звезд в целом и их недр: от поверхности через конвективную зону до тахоклина и лучистой зоны. Однако значительный интерес представляет дифференциальное вращение отдельных солнечных структурных образований, наблюдаемых на поверхности и на разных уровнях в атмосфере Солнца и структур магнитных полей на Солнце.

подавляющее большинство исследований дифференциального вращения структурных образований касалось солнечных пятен и различных структур магнитного поля Солнца [4, 10–13]. Ранние исследования временных вариаций дифференциального вращения Солнца проводились по так называемым трассерам (солнечным образованиям на последовательных во времени снимках диска Солнца). В более поздних исследованиях измерялись изменения лучевых скоростей [4, 11].

В последние десятилетия при оценивании дифференциального вращения Солнца и его временных изменений, а также при изучении такого важного, более общего, чем дифференциальное вращение, феномена физики Солнца, как северо-южная асимметрия солнечной активности, широко используются методы разнообразных функциональных преобразований (анализа в спектральной области). Этот анализ проводится применительно к определенным рядам, полученным по наблюдательным данным для отдельных широтных зон диска Солнца или исходных изображений диска Солнца в разно-

образных линиях с выделением (или без) определенных зон на изображении. В частности, применяют спектральный анализ в базисе Фурье, других базисах функций в скользящих по продолжительному интервалу наблюдений коротких временных окнах (частотно-временной анализ) [2, 4, 10, 11], вейвлет-анализ [2] в выделенных широтных зонах. Использование методов частотно-временного анализа позволяет получить объективные индексы вращения Солнца в отдельных широтных зонах в определенные моменты времени и связать их с индексами солнечной активности, которые характеризуют активность Солнца не интегрально (как, например, числа Вольфа), а в каждой широтной зоне в соответствующий момент времени. В частности, в [4, 11] получен индекс вращения структур крупномасштабного магнитного поля Солнца в виде суммы спектральной плотности поля в разных характерных диапазонах периодов. Этот индекс характеризует скорость вращения структур поля (двухсекторной и четырехсекторной) в разных широтных зонах в зависимости от времени и связан с изменениями активности в ходе солнечного цикла. В [2] методы спектрального анализа использованы для оценивания северо-южной асимметрии солнечной активности и ее временных изменений для каждой широтной зоны Солнца на продолжительных временных интервалах по спектрам нескольких индексов солнечной активности. Итак, в [2, 4, 11] получены результаты, которые подтверждают важность исследований временных вариаций вращения и его широтного распределения для магнитных полей Солнца, а также широтно-временных изменений северо-южной асимметрии солнечной активности для выявления и понимания механизмов генерирования магнитных полей во внутренних слоях Солнца.

Таким образом, актуальной является проблема оценивания дифференциального вращения и его временных изменений для солнечных структур, наблюдаемых в разных слоях атмосферы Солнца, в частности наблюдаемых в линии He I λ 1083 нм, и установление закономерностей изменений вращения с уровнем солнечной активности на продолжительных временных интерва-

лах в ходе солнечного цикла. Результаты решения этой проблемы являются важными для поиска физических основ краткосрочного прогноза солнечной активности.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДАННЫХ

Исходным материалом для обработки были данные наблюдений Солнца в линии He I λ 1083 нм, полученные в Национальной обсерватории Китт Пик (США) (Kitt Peak National Observatory (KPNO), (<http://www.noao.edu/kpno/>)), которая является частью Национальной оптической астрономической обсерватории США (National Optical Astronomy Observatory (NOAO), (<http://www.noao.edu/>)). Эти данные были получены в рамках общих фундаментальных исследований Национальной обсерватории Китт Пик с другими организациями Национальной оптической астрономической обсерватории США NOAO при поддержке Национального научного фонда США (National Science Foundation (NSF), <http://www.nsf.gov/>), с Центром космических полетов имени Годдарда (Goddard Space Flight Center (GSFC), <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>), при поддержке Национального космического агентства США (NASA), с Лабораторией космической окружающей среды (Space Environment Laboratory (SEL), <http://www.swpc.noaa.gov/AboutUs/93review.pdf>), при поддержке Национального агентства океана и атмосферы (США) (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <http://www.noaa.gov/>). Указанные данные были любезно предоставлены нам господином и госпожой Харви — сотрудниками обсерватории Китт Пик, главными авторами этого наблюдательного материала.

Данные получены на временном интервале от начала января 1977 г. до конца сентября 2003 г. Это соответствует 357 каррингтоновским оборотам Солнца №№ 1650–2006. Данные охватывают 3 солнечных цикла, начиная с фазы роста 21-го и заканчивая спадом 23-го цикла. Материал наблюдений представляет собой синоптические карты (СК), каждая из которых составлена из изображений Солнца в линии He I λ 1083 нм

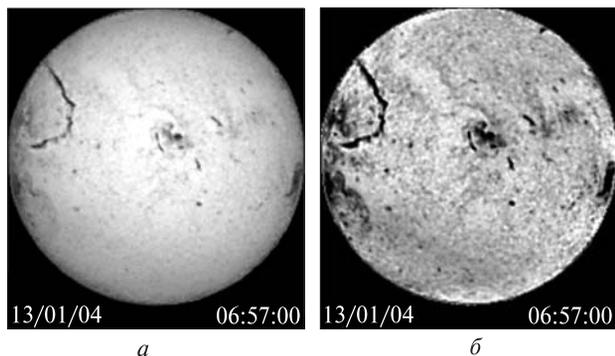
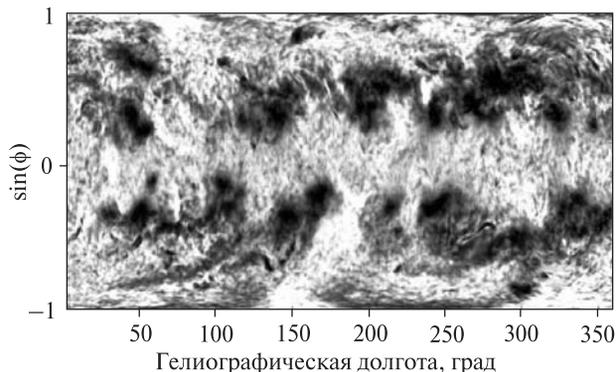


Рис. 1. Изображение диска Солнца в линии He I λ 1083 нм: *a* — оригинальное; *б* — с учетом потемнения изображения к краю диска

Рис. 2. Синоптическая карта в линии He I λ 1083 нм



на протяжении одного оборота Солнца. Изображение диска Солнца в линии He I λ 1083 нм по наблюдениям в НИИ «КрАО» представлено на рис. 1: *a* — оригинальное; *б* — полученное с учетом потемнения изображения к краю солнечного диска. Синоптическая карта изображена на рис. 2. По оси абсцисс синоптической карты отложена гелиографическая долгота от 0 до 360°, а по оси ординат — $\sin \phi$ от -1 до $+1$, где ϕ — гелиографическая широта. Светлые области на такой карте соответствуют ярким областям на Солнце. Для приведения всех наблюдений к единой фотометрической системе интенсивности всех карт были нормированы таким образом, чтобы интенсивность невозмущенных (фоновых) областей (не относящихся к КД, АО и ФЛ), занимающих на Солнце максимальную площадь, принимала значения 1. По нормированном таким образом синоптическим картам на основании опыта обработки наблюдений в линии He I λ 1083 нм в НИИ «КрАО» были определены интервалы интенсивностей, характеризующие каждый из трех типов солнечных образований, которые приведены в табл. 1.

Каждая синоптическая карта представляется массивом пикселей изображения, содержащим 180 строк и 360 столбцов. Столбец массива с номером n , соответствующий гелиографической долготе L_n , представляет собой значения интенсивностей Солнца на центральном меридиане на всех широтах в тот момент, когда долгота

центрального меридиана равна L_n . Даты прохождения центрального меридиана на карте увеличиваются справа налево для участков Солнца с долготами L_n от 360 до 0°. По широте каждая синоптическая карта разбивается на 17 широтных интервалов в области $-0.95 < \sin \phi < 0.95$. Каждому широтному интервалу соответствует 10 строк массива пикселей изображения. В

Таблица 1. Интервалы интенсивностей для разных типов солнечных структурных образований

Тип солнечного образования	Интервал интенсивностей
Корональные дыры (КД)	$I > 1.05$
Активные области без солнечных пятен («флоккул») (ФЛ)	$0.6 < I < 0.8$
Активные области с группами солнечных пятен (АО)	$I < 0.55$

Таблица 2. Средние широты широтных интервалов

Номер широтного интервала	Широта середины интервала, град	Номер широтного интервала	Широта середины интервала, град
L1	-59	L10	6.4
L2	-49.4	L11	12.8
L3	-41	L12	19.4
L4	-33.3	L13	26.2
L5	-26.2	L14	33.3
L6	-19.4	L15	41
L7	-12.8	L16	49.4
L8	-6.4	L17	59
L9	0		

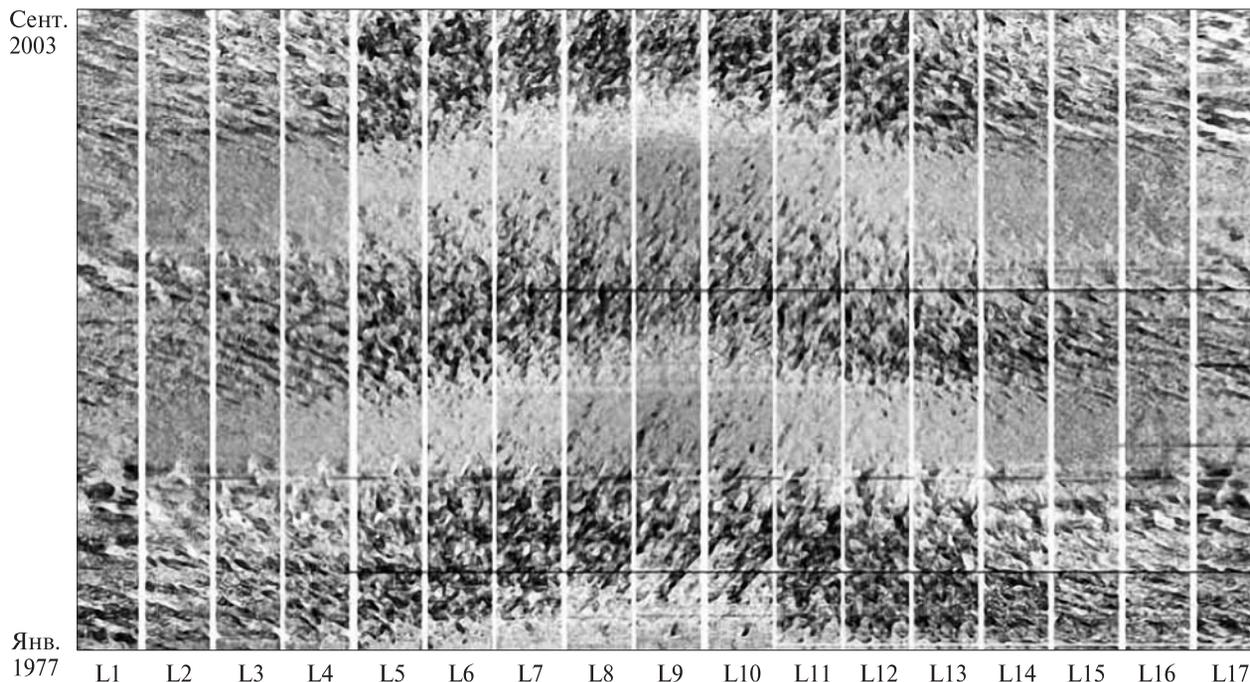


Рис. 3. Временные развертки, полученные из участков 357 синоптических карт на 26-летнем интервале наблюдений в 17 широтных интервалах для активных областей

табл. 2 приведены средние широты для всех широтных интервалов.

На рис. 3 представлены временные развертки, полученные из участков 357 синоптических карт на 26-летнем интервале наблюдений в 17 широтных интервалах для активных областей. По оси X отложен номер широтного интервала, по оси Y — вырезанные участки синоптических карт, соответствующие каждому широтному интервалу, а в каждом широтном интервале эти участки отложены последовательно снизу вверх в порядке, соответствующем возрастанию номеров каррингтоновских оборотов от 1 до 357 на 26-летнем интервале наблюдений. Из анализа рис. 3 следует, что скорость вращения АО зависит от широты, т. е. имеет место их дифференциальное вращение.

Усреднение десяти значений интенсивности для каждого значения долготы (усреднение в каждом столбце вспомогательного массива размером $357 \times 10 \times 360$ в блоке по 10 строкам) дает среднее распределение интенсивности вдоль долготы для каждого из 17 широтных интервалов. В каждом широтном интервале стро-

ится временной ряд в результате откладывания строк усредненного вспомогательного массива последовательно одна за другой (начиная с первой, при прохождении элементов каждой строки справа налево) в единую вектор-строку. Массив данных временного ряда содержит $357 \times 360 = 128520$ элементов. Такие временные ряды представляют изменения интенсивности изображения Солнца на центральном меридиане в 17 широтных интервалах за время с начала января 1977 г. до конца сентября 2003 г. и являются предметом дальнейшего исследования. Для двух широтных интервалов (L2 и L7) данные этих рядов показаны на рис. 4, а и б. На рис. 4, в для сравнения показано изменения относительного числа солнечных пятен на всем диске Солнца (чисел Вольфа) на том же интервале наблюдений.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ СТРУКТУР ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

При оценивании вращения трех типов солнечных образований определялись значимые пики

спектральной плотности мощности, вычисленной по каждому из 17 временных рядов и соответствующие этим пикам значимые периоды вращения, а также суммарная мощность в заданных интервалах периодов в зависимости от гелиографической широты и их временные изменения. Применительно к решению проблемы оценивания дифференциального вращения и его временных изменений авторами использовались методы спектрального анализа, рассмотренные в публикациях [6, 7], основанные на применении быстрого преобразования Фурье (БПФ) и некоторых других, отличных от составляющих ряда Фурье базисных функций. При реализации этих методов имели место такие параметры дискретизации и анализа:

Количество отсчетов в каждом временном ряду — $N = 357 \times 360 = 128520$.

Шаг дискретизации по времени — $dt = 27.2753/360 = 0.07576572$ (сутки).

Частота дискретизации — $fs = 1/dt = 13.19875491$ (1/сутки).

Частота Найквиста — $nyquist = 1/2 fs = 6.599377$ (1/сутки).

Количество временных отсчетов, подвергающихся БПФ — $nfft = 262144$.

Количество частотных отсчетов (коэффициентов Фурье или других функциональных преобразований) — $M = nfft/2 + 1 = 131073$.

Для временных рядов, которые соответствуют трем типам солнечных структур, было выполнено два типа спектрального анализа:

1) на всем временном интервале наблюдений продолжительностью около 26 лет;

2) спектральный анализ в скользящем временном окне длиной 1 год со сдвигом на полгода на всем 26-летнем интервале наблюдений.

При каждом из двух типов спектрального анализа применялся свой метод из таких трех апробированных методов: Shuster Periodogram Method [5–8], Welch Method [1, 5, 7, 8], Multitaper Method [7, 21]; выбирался наиболее адекватный метод с точки зрения получения реалистических оценок спектральной плотности мощности.

Таким образом, в случае 1 был выбран Welch Method [3, 7, 28], а в случае 2 — Shuster Periodogram Method [6, 7]. Детальное обоснование та-

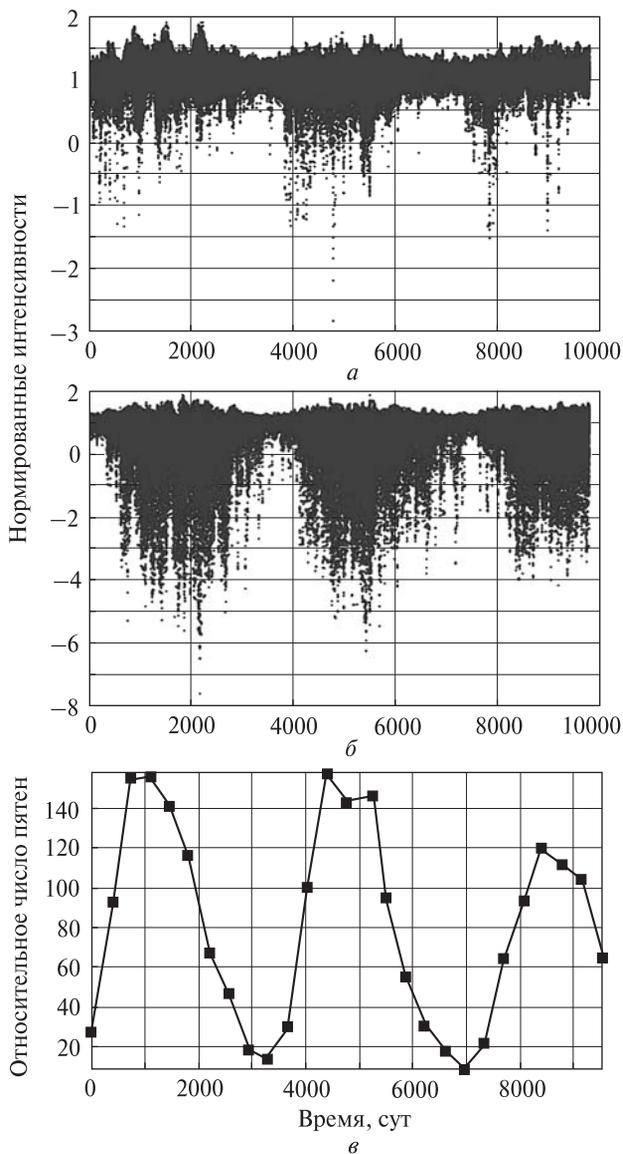


Рис. 4. Временные ряды для широтных интервалов L2 и L7 (а, б) и изменения относительного числа солнечных пятен на всем диске Солнца (чисел Вольфа) (в)

кого выбора методов спектрального анализа проведено в [7].

На рис. 5–7 отображены оценки спектральной плотности мощности по Shuster Periodogram Method (рис. 5), по Welch Method (рис. 6) — в зависимости от периода, а на рис. 7 — по Multitaper Method — в зависимости от частоты в интервале периодов [20; 35] сут в широтном интервале L12 (средняя широта 19.4°) (см. табл. 2)

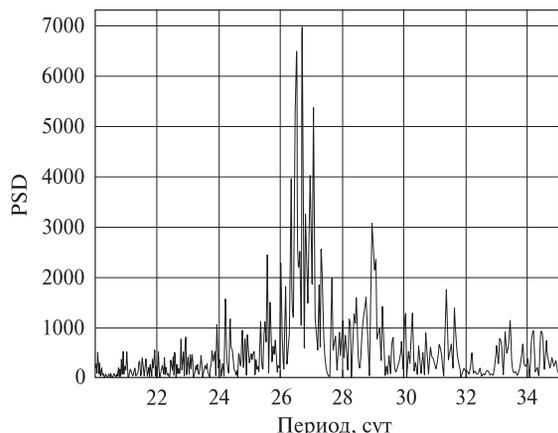


Рис. 5. Оценка спектральной плотности мощности PSD (Shuster Periodogram Method)

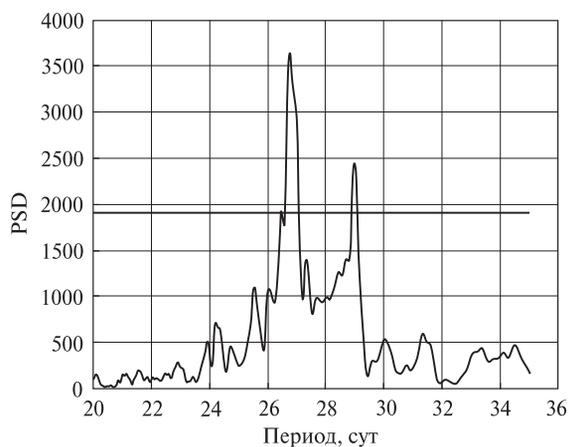


Рис. 6. Оценка спектральной плотности мощности PSD (Welch Method)

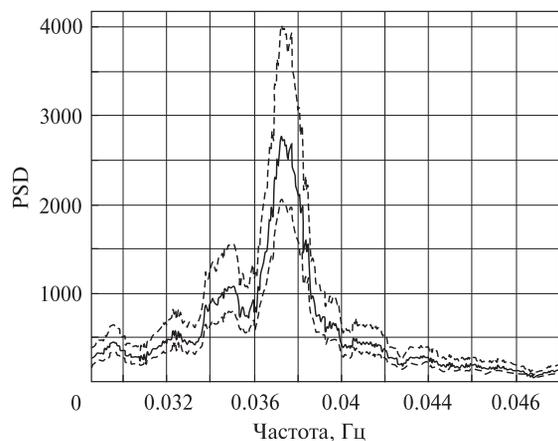


Рис. 7. Оценка спектральной плотности мощности PSD (Multitaper Method)

для активных областей. На рис. 6 горизонтальной линией отображено утроенное значение среднего квадратичного отклонения $3\sigma_{Sp}$ оценки спектральной плотности мощности как случайной функции по Welch Method, а на рис. 7 — пунктирными линиями отображены зависимости от частоты доверительных интервалов оценивания с вероятностью 0.9 спектральной плотности мощности по Multitaper Method.

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТРЕХ ТИПОВ СОЛНЕЧНЫХ СТРУКТУР В ХАРАКТЕРНЫХ ИНТЕРВАЛАХ ПЕРИОДОВ В ТРЕХ ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ

Стационарные составляющие вращения. Для каждого из трех типов солнечных структурных образований КД, ФЛ, АО по соответствующим временным рядам были оценены зависимости спектральных плотностей мощности от частоты (периода) в 17 широтных интервалах в каждом из трех солнечных циклов. На рис. 8 приведены полученные спектральные плотности мощности для активных областей и корональных дыр в широтных диапазонах L2 ($\varphi = -50^\circ$) и L7 ($\varphi = -13^\circ$) для 21 цикла активности (с 1 по 3460 сут наблюдений). Видно, пики спектральной плотности сосредоточены в определенных интервалах периодов. Для диапазона периодов от 1 до

Таблица 3. Интервалы периодов, в которых сосредоточены пики спектральной плотности мощности

Номер интервала	Начало интервала, сут	Конец интервала, сут	Среднее значение интервала, сут
1	1	7.7	4.3
2	7.7	11	9.3
3	11	20	15.5
4	20	35	27.5
5	35	100	67.5
6	100	180	140
7	180	280	230
8	280	390	335
9	390	800	595
10	800	1200	1000
11	1200	1600	1400
12	1600	2400	2000
13	2400	5500	3950

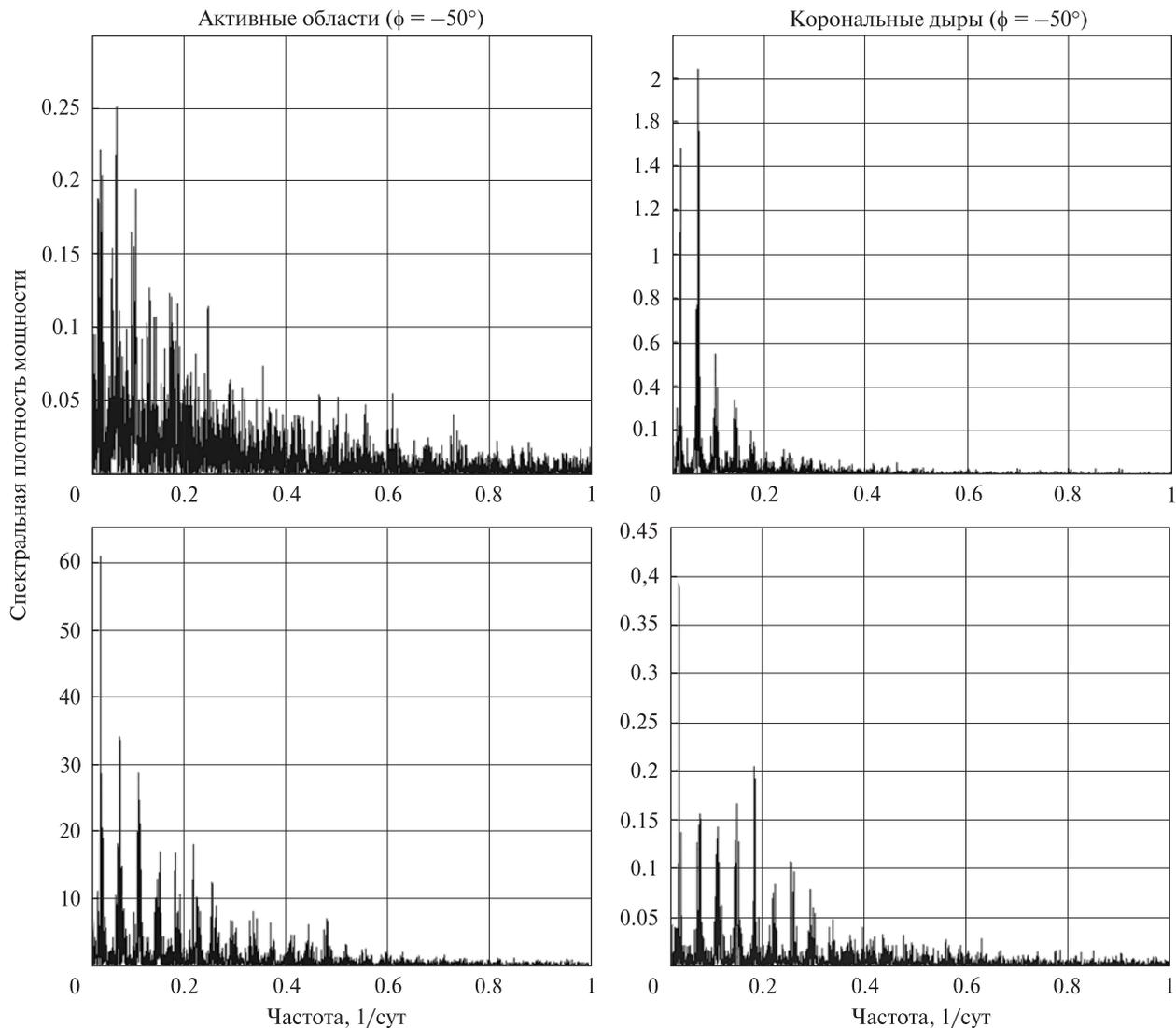


Рис. 8. Оценки спектральные плотности мощности для активных областей и корональных дыр в широтных диапазонах L2 ($\phi = -50^\circ$) и L7 ($\phi = -13^\circ$) для 21-го цикла активности

4000 было выделено 13 таких интервалов, которые приведены в табл. 3.

Проанализированы оцененные суммарные мощности процессов в 17 широтных интервалах в характерных интервалах периодов 7.7–11, 11–20 и 20–35 сут для трех типов солнечных образований в трех циклах солнечной активности. Суммарная мощность в каждом широтном интервале в каждом из указанных интервалов периодов определялась как сумма значений спектральных плотностей мощности для всех частот-

ных отсчетов, попавших в заданный интервал периодов, умноженная на величину шага дискретизации по частоте.

Результаты сравнения для каждого типа солнечных структур суммарных мощностей процессов в указанных трех интервалах периодов со средними значениями 9.2, 15.5 и 27.5 сут для 21-го, 22-го и 23-го циклов проиллюстрированы в табл. 4 и на рис. 9 и 10. В табл. 4 указаны суммарные мощности процессов в трех диапазонах периодов для трех циклов активности. На рис. 9

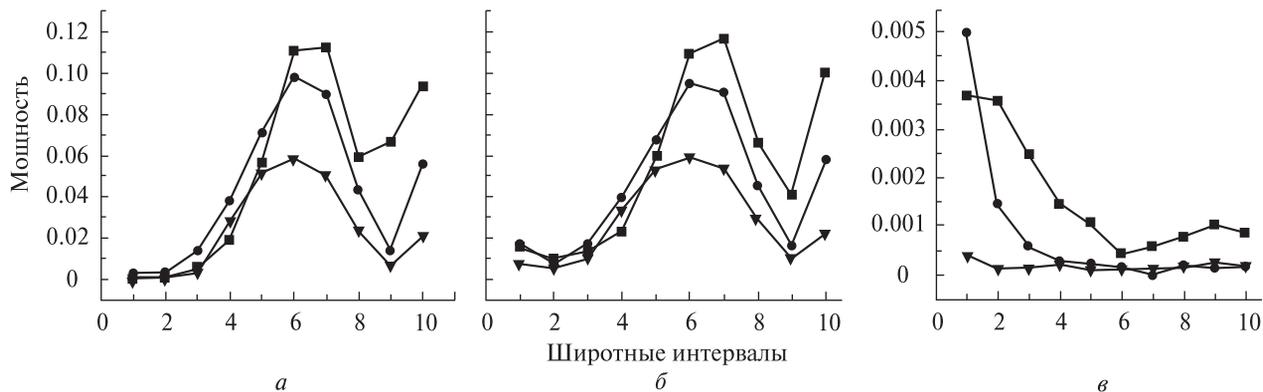


Рис. 9. Широтные распределения суммарной мощности процессов, соответствующие трем типам солнечных образований (*а* — активные области, *б* — флоккулы, *в* — корональные дыры) для трех циклов активности (■ — цикл 21, ● — цикл 22, ▼ — цикл 23) в диапазоне периодов со средним значением 27.5 сут

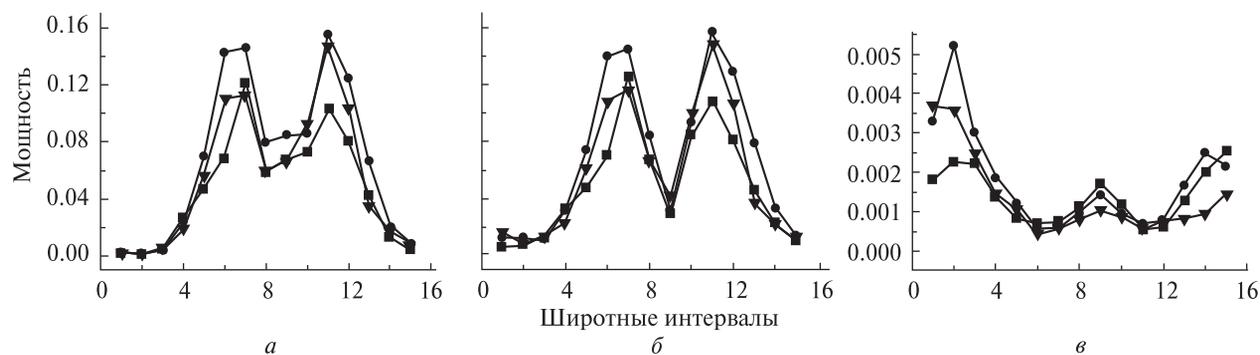


Рис. 10. Широтные изменения суммарной мощности в трех интервалах периодов (■ — период 9.2, ● — период 15.5, ▼ — период 27) цикла для всех типов солнечных образований (*а* — активные области, *б* — флоккулы, *в* — корональные дыры) в 21-м цикле солнечной активности

Таблица 4. Суммарные мощности процессов в трех интервалах периодов для трех типов солнечных структур в трех циклах активности

Цикл активности	Суммарная мощность в интервалах периодов с соответствующими средними значениями периодов, сут								
	9.2			15.5			27.5		
	АО	ФЛ	КД	АО	ФЛ	КД	АО	ФЛ	КД
21	0.12	0.13	0.0025	0.115	0.16	0.0055	0.11	0.12	0.0035
22	0.10	0.10	0.002	0.16	0.15	0.0035	0.1	0.095	0.0050
23	0.05	0.05	0.023	0.09	0.09	0.0037	0.06	0.06	0.0045

приведены широтные распределения суммарной мощности процессов, соответствующие трем типам солнечных образований для трех циклов активности в диапазоне периодов со средним значением 27.5 сут. Рис. 10 демонстрирует широтные изменения суммарной мощности в трех интер-

валах периодов для трех типов солнечных образований в 21-м цикле солнечной активности.

Анализ табл. 4, рис. 9 и 10 приводит к следующим выводам. Для каждого типа солнечных структур максимальное значение суммарной мощности чаще всего приходится на интервал

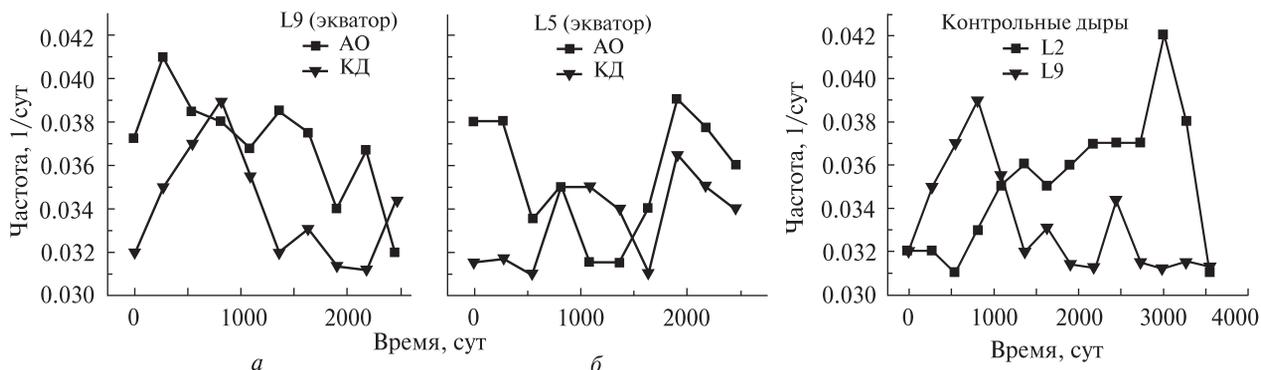


Рис. 11. Изменения частоты вращения АО и КД на экваторе 0° (L9) (а) и на широте 26° (L5) (б)

Рис. 12. Временные изменения частоты вращения структур, соответствующих корональным дырам, в широтном интервале L5 (средняя широта 26.2°) по сравнению с их вращением на экваторе L9 (0°)

периодов 11–20 сут. Это свидетельствует о долгосрочном существовании на Солнце двухсекторных структур. Время жизни таких структур соизмеримо с циклом активности.

В одних тех же диапазонах периодов максимальное значение суммарной мощности изменяется от цикла к циклу даже для одного типа солнечных образований.

Широтные изменения суммарной мощности процессов в интервале периодов 20–35 сут для КД существенно отличается от изменения с широтой для АО и ФЛ.

Суммарные мощности спектров для АО и ФЛ на низких и средних широтах практически совпадают. Отличия заметны лишь на высоких широтах. Этот вывод подтверждает более ранние результаты Н. Н. Степанян [13] о различных источниках активных образований (АО, ФЛ) и КД.

Временные изменения вращения солнечных структур на разных широтах в пределах одного цикла (изменения характера дифференциального вращения). Для изучения временных изменений вращения всех типов образований в течение 21-го цикла солнечной активности для всех временных рядов были вычислены спектральные плотности мощности в скользящем окне длиной один год (365 сут) с текущим сдвигом на полгода (182.5 сут) (спектральный анализ типа 2).

В диапазоне периодов 20–35 сут для всех широтных зон определялись значения периодов,

соответствующих доминирующим пикам зависимостей спектральной плотности мощности от периода. Значения спектральной плотности в этих пиках превосходят утроенное значение среднего квадратичного отклонения $3\sigma_{Sp}$ оценки спектральной плотности мощности как случайной функции (см. рис. 6). Эти периоды характеризуют вращение отдельных типов солнечных образований на каждой широте в текущее время. Для дальнейшего анализа полученные кривые временных изменений периодов вращения для каждого временного ряда были аппроксимированы полиномами второго порядка.

Результаты этих расчетов показали, что для разных солнечных структур периоды вращения изменяются со временем и широтой по-своему. В качестве примера на рис. 11 приведены изменения частоты вращения АО и КД на экваторе 0° (L9) (а) и на широте 26° (L5) (б).

Результаты сравнения вращения АО, ФЛ и КД для времени от максимума до начала спада активности 21 цикла (750–1750 сут от начала рядов) приведены в табл. 5.

Из анализа табл. 5 следует тенденция увеличения со временем периода вращения на низких широтах и уменьшения его на средних широтах. Граница смены знака изменения периода вращения для времени от максимума (750 сут) до начала спада (1750 сут от начала рядов) активности 21-го цикла для каждой из структур находится на своей широте.

Таблица 5. Изменение периодов вращения солнечных структур от начала максимума до середины спада 21-го цикла

Солнечная структура	Широтный интервал	Средний период, сут		Изменение периода, сут
		750	1750	
Активные области	L2	27.8	34.5	+6.7
	L3, L4	29.8	31.8	+2
	L5, L6, L7, L8	29.9	29	-0.9
	L9	26	27.4	1.4
Флоккулы	L2, L3	30.3	27.4	-2.9
	L4, L5, L6, L7	30.3	27.6	-2.7
	L8	29.8	29.4	-0.4
	L9	26	27.8	+1.8
Корональные дыры	L2	30.3	27.2	-2.1
	L3, L4, L5	31.25	30.55	-0.7
	L6, L7, L8, L9	28.2	29.8	+1.6

Дифференциальный характер вращения солнечных структурных образований будем характеризовать мерой дифференциальности вращения, которую определим как разность периодов вращения солнечных структур на некоторой широте и на экваторе в некоторый момент времени. В качестве примера изменения дифференциального характера вращения со временем на рис. 12 отображены графики временных изменений частоты вращения структур, соответствующих корональным дырам, в широтном интервале L5 (средняя широта 26.2°) по сравнению с их вращением на экваторе L9 (0°).

Анализ временных изменений дифференциального вращения трех типов солнечных структур на всех широтах показал, что мера дифференциальности вращения для АО, ФЛ и КД изменяется со временем в широких пределах, становясь иногда отрицательной, в то время как из общепринятого представления следует, что на экваторе Солнце вращается быстрее, чем на высоких широтах.

АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Был проведен анализ методов спектрального анализа на базе быстрого преобразования Фурье и других функциональных преобразований временных рядов и их применения к решению проблемы оценивания дифференциального

вращения солнечных структур и его временных изменений. Установлено, что успех решения поставленной проблемы в большой мере зависит от соответствия выбранных методов характеристикам анализируемых рядов, в частности их длине.

Проведено два типа спектрального анализа:

1) на всем временном интервале наблюдений около 26 лет;

2) в скользящем временном окне длиной 1 год со сдвигом на полгода на всем 26-летнем интервале наблюдений.

В первом случае был выбран Welch Method [3, 28], а во втором — Shuster Periodogram Method [6, 7].

Анализ результатов спектрального анализа временных рядов, соответствующих солнечным структурным образованиям, позволяет сделать следующие выводы.

Для всех рассмотренных солнечных структур на всех интервалах времени из 26 летнего промежутка наблюдений на всех широтах в спектрах мощности имеется несколько характерных интервалов периодов со значительной спектральной плотностью мощности.

Суммарная мощность процессов в каждом из этих диапазонов периодов изменяется со временем как в течение каждого цикла, так и от цикла к циклу. Наибольшая суммарная мощность в этих интервалах периодов чаще всего приходится на интервал 11–20 сут. Это справедливо для всех широтных распределений всех рассмотренных солнечных структур.

Суммарная мощность процессов для АО и ФЛ существенно различается на высоких широтах и близка к совпадению на низких широтах. Изменение суммарной мощности с широтой для КД существенно отличается от изменений для АО и ФЛ.

Мера дифференциального вращения для всех рассмотренных солнечных структур изменяется со временем и наблюдаются даже моменты смены ее знака.

Все эти результаты свидетельствуют о широком диапазоне изменения дифференциального вращения со временем и широтой для всех рассмотренных солнечных структур. Объяснение

этому надо искать в разной природе, размерах и времени жизни рассмотренных образований, глубине нахождения их источников и характере собственных движений.

Не претендуя на полное решение этой сложной проблемы, кратко проанализируем эти факторы.

Разная природа корональных дыр и активных областей (с пятнами или без них) очевидна. Корональные дыры — униполярные области, напряженность магнитного поля в которых не превышает 10 Гс. Активные области в большинстве случаев биполярны. Напряженность магнитного поля во флоккулах около 300 Гс, а в пятнах — 1500–3000 Гс. При таких различиях в напряженности магнитных полей естественно ожидать и разных глубин нахождения источников этих образований. В работе [13] были найдены различия даже в глубинах образования КД и фоновых магнитных полей, хотя по напряженности магнитных полей этих образований близки.

Есть основания считать, что вращение солнечных структур, наблюдаемых в фотосфере и хромосфере, отражает вращение их источников. Тогда долгоживущие структуры, каковыми являются КД и АО, выходя в атмосферу Солнца со скоростью вращения, близкой к скорости вращения своего источника, и мигрируя в дальнейшем по поверхности Солнца, должны дать сложное пространственное и временное распределения вращения Солнца, определяемое по этим структурам.

Остановимся еще на различиях во вращении флоккул и активных областей с пятнами. В солнечной физике принято считать, что эти структуры являются разными этапами развития одного солнечного образования — активной области. Активная область всегда начинает свое развитие с появления флоккула. В громадном большинстве случаев на этом и заканчивается ее жизнь. И только малая доля активных областей развивается до стадии появления в ней солнечных пятен. Но имеется одно существенное различие между флоккулами и активными областями с пятнами. Пространственное распределение солнечных пятен довольно строго подчиняется закону Шперера. В начале 11-летнего солнечного цикла пятна появляются на широтах около

40° в обеих полусферах Солнца. С ходом цикла зона пятнообразования смещается к экватору. Для флоккул нет такой строгой закономерности. Они встречаются и на более высоких широтах. Отражением этого является полученное нами различие между широтным распределением вращения ФЛ и АО. Не исключено, что мы имеем дело с двумя видами флоккул. Одни не связаны с появлением пятен, имеют свои пространственно-временные характеристики и пределы напряженности магнитного поля. Другие являются начальной стадией развития группы солнечных пятен. Их параметры значительно меняются с развитием активной области. Наши результаты говорят в пользу такого предположения.

Использованные в настоящей работе данные NSO/Kitt Peak получены при кооперации NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

1. Андреева О. А., Зельк Я. И., Степанян Н. Н. Вращение солнечных структур в верхней хромосфере // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2006. — **102**. — С. 84–98.
2. Бадалян О. Г., Обридко В. Н., Рыбак Я., Сикора Ю. Северо-южная асимметрия солнечной активности и ее квазидвухлетние вариации // Астрон. журн. — 2005. — **82**, № 8. — С. 740–752.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
4. Васильева В. В., Макаров В. И., Тлатов А. Г. Циклы вращения секторной структуры магнитного поля Солнца и его активности // Письма в Астрон. журн. — 2002. — **28**, №3. — С. 228–234.
5. Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. Временные изменения глобальных характеристик вращения Солнца // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 1. — С. 127–135.
6. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. О применении аппарата анализа временных рядов для оценивания вращения солнечных структур в верхней хромосфере // Проблемы управления и информатики. — 2006. — № 3. — С. 102–115.
7. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Спектральные методы анализа вращения солнечных структур // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2007. — **103**, № 1 — С. 56–69.
8. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Широтно-временные изменения вращения солнечных структур в трех циклах активности Солнца // Проблемы управления и информатики. — 2008. — № 1. — С. 139–146.

9. Кичатинов Л. Л. Дифференциальное вращение звезд // Успехи физ. наук. — 2005. — **175**, № 5. — С. 475–494.
10. Котов В. А., Ханейчук В. И., Цан Т. Т. Новые измерения общего магнитного поля Солнца и его вращение // Астрон. журн. — 1999. — **87**, вып. 3. — С. 218–222.
11. Тлатов А. Г. Долговременные вариации вращения и распределения крупномасштабных магнитных полей Солнца // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Специальность 01.03.03 — Физика Солнца. — С.-Пб.: Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2006. — 32 с.
12. Степанян Н. Н. Изменение дифференциального вращения фоновых магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1983. — **67**. — С. 59–65.
13. Степанян Н. Н. Корональные дыры и фоновые магнитные поля на Солнце // Солнечный цикл: Сборник науч. тр. — РАН, ФТИ. — 1993. — С. 44–55.
14. Brandenburg A. et al. Magnetic structures in a dynamo simulation // J. Fluid Mech.—1996. — **306**. — P. 325–352.
15. Brummell N. H. Turbulent compressible convection with rotation. II. Mean flows and differential rotation // Astrophys. J. — 1998. — **493**. — P. 955–969.
16. Howard R. LaBonte B. J. The Sun is observed to be a torsional oscillator with a period of 11 years // Astrophys. J. — 1980. — **239**, part 2. — P. L33–L36.
17. Kippenhahn R. Differential rotation in stars with convective envelopes // Astrophys. J. —1963. — **137**. — P. 664–678.
18. Käpylä P. J. et al. Local models of stellar convection: Reynolds stresses and turbulent heat transport // Astron. and Astrophys. — 2004. — **325**. — P. 793–816.
19. LaBonte B. J., Howard R. Torsional waves on the Sun and the activity cycle // Solar Phys. — 2002. — **75**, N 1–2. — 1982. — P. 161–178.
20. Moss D., Vilhu O. Models of stellar differential rotation on the lower main sequence // Astron. and Astrophys. — 1983. — **119**, N. 1. — P. 47–53.
21. Persival D.B., Walden A.T. Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques. — Cambridge University Press, 1993. — 481 p.
22. Pidotella R.M. et al. The role of inhomogeneous heat transport and anisotropic momentum exchange in the dynamics of stellar convection zones — Application to models of the Sun's differential rotation. // Astron. and Astrophys — 1986. — **156**, N. 1–2. — P. 22–32.
23. Rüdiger G. Differential rotation and stellar convection: sun and solar-type stars. — New York: Gordon and Breach Science Publishers. — 1989. — 328 p.
24. Rüdiger G. Reynolds stresses and differential rotation. I. On recent calculations of zonal fluxes in slowly rotating stars // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. — 1980. — <http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713642804~db=all~tab=issueslist~branches=16> — v1616, N 1. — P. 239–261.
25. Rüdiger G., Hollerbach R. The Magnetic Universe. Geophysical and astrophysical dynamo theory. — WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA. — 2004. — 328 p.
26. Schmidt W. Models of solar differential rotation // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. — 1982 — **21**. — P. 27–57.
27. Vorontsov S. V. et al. Helioseismic measurement of solar torsional oscillations // Science. — 2002. — **296**. — P. 101–103.
28. Welch P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoustics, Vol. AU–15 (June 1967). — P. 70–73.

Надійшла до редакції 22.07.08

Ya. I. Zyelyk, N. N. Stepanian, O. A. Andreyeva

DIFFERENTIAL ROTATION OF SOLAR STRUCTURAL FORMATIONS FROM OBSERVATIONS IN THE HE I λ 1083 NM LINE

Using spectral analysis methods, we estimated some characteristics of the differential rotation for three types of the solar structures observed in the upper chromosphere, in 10-degree latitude zones in the characteristic period intervals during last three cycles of the solar activity, namely, 1) significant stationary periodic rotation components during three cycles; 2) temporal variations of periodic rotation components at different latitudes within the bounds of each cycle on the basis of the results of the spectral analysis in the sliding temporal one-year window with the half-year shift for the overall 26-year observation interval. It is found that for all the latitudinal distributions of all structure types the total power of processes in each of several intervals of significant rotation periods varies with time both during each cycle and from cycle to cycle. The total power of the processes for the active regions with spots and floccules differs essentially at high latitudes and is close to good agreement at low ones. The total power variations with latitude for coronal holes differ essentially from its variations for active regions and floccules. The differential rotation measure for all the solar structures under consideration varies with time, even the moments of change of its sign are observed. We analyzed briefly the evolution factors of differential rotation of solar formations under consideration with latitude and time, expressing in various nature, sizes, lifetime of these structures, depth of their sources occurrence and character of proper motions.