

УДК 523.9-327:519.246.8:517.443:519.71

Я. И. Зелык¹, Н. Н. Степанян², О. А. Андреева²

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

²Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», Крим

**О методах оценивания вращения
солнечных структур по наблюдениям Солнца
в линии He I λ 1083 нм**

Доповідь на конференції 05.09.05

Отримані широтні розподіли періодів обертання в інтервалі 20—35 доби і потужності, що поглинається на цих періодах, у визначених широтних зонах для трьох типів сонячних структур, що спостерігаються у лінії He I λ 1083 нм у верхній хромосфері на часовому інтервалі тривалістю понад 26 років.

Регулярное получение изображений Солнца в линии He I λ 1083 нм представляет исключительную возможность иметь одновременно информацию о яркости и положении на диске сразу нескольких видов солнечных образований находящихся в верхней хромосфере: активных областей с группами солнечных пятен (AR), флоккулов (FL), корональных дыр (KH) [2, 3, 5, 6]. Исходным материалом для данной работы послужили наблюдения Солнца в линии He I λ 1083 нм, полученные в обсерватории Китт Пик (США) и любезно предоставленные нам. Наблюдения относятся к временному интервалу с начала 1977 г. до конца сентября 2003 г. Это соответствует 357 каррингтоновским оборотам Солнца №№ 1650—2006. Данные охватывают три солнечных цикла, начиная с фазы роста 21-го цикла 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 в течение одного оборота Солнца (27.2753 сут). По оси абсцисс карты отложена гелиографическая долгота от 0 до 360°, а по оси ординат — $\sin\varphi$ от -1 до +1, где φ — гелиогра-

фическая широта. Пространственное разрешение таких карт составляет 1° и 1/90 соответственно. Таким образом, каждой СК соответствует двумерный массив 180×360 пикселей, содержащий интенсивности спектра Солнца в центре линии He I λ 1083 нм для всех точек поверхности Солнца. Далее выполнены переход от центральных интенсивностей к эквивалентным ширинам линии He I λ 1083 нм и нормирование данных каждой карты к максимуму гистограммы распределения числа пикселей в зависимости от значений эквивалентной ширины. На нормированных СК выделены указанные выше солнечные структурные образования, которые имеют различные интервалы значений эквивалентной ширины: AR: $2 < W < 10$; FL: $1.05 < W < 2$; KH: $0.1 < W < 0.95$. Далее в массивах нормированных данных СК выделяются блоки по строкам, соответствующие 5-градусным широтным полосам. Внутри каждого блока производится выделение указанных трех типов образований и суммирование по столбцам элементов каждого типа. Таким образом, для каждого типа образований для каждой СК получают элементы временных рядов для каждой широтной зоны.

Величины членов этих рядов пропорциональны полной энергии, поглощенной в данном месте Солнца элементами рассматриваемого типа образований. Полученные временные ряды для отдельных карт объединяются в ряды для всего наблюдательного материала с начала 1977 г. по сентябрь 2003 г. Всего получается для каждого из четырех типов образований по 32 временных ряда длиной 128520 элементов каждый.

Оценивание вращения солнечных структур состояло в определении периодов вращения и распределения пиков спектральной плотности мощности на найденных периодах, а также суммарной мощности в заданных интервалах периодов в зависимости от гелиографической широты. Для этого использовался метод спектрального анализа временных рядов, для которых были характерны следующие параметры:

количество отсчетов в каждом ряде —

$$N = 357 \times 360 = 128520$$

шаг дискретизации по времени —

$$dt = 27.2753/360 = 0.07576572 \text{ сут}$$

частота дискретизации —

$$f_s = 1/dt = 13.19875491 \text{ сут}^{-1}$$

частота Найквиста —

$$f_n = 1/2f_s = 6.599377 \text{ сут}^{-1}$$

количество временных отсчетов, подвергающихся БПФ —

$$N_1 = 262144$$

количество частотных отсчетов (коэффициентов Фурье) —

$$M = N_1/2 + 1 = 131073$$

При оценивании периодичностей использовался метод периодограмм Шустера и осуществлялась оценка достоверности пиков периодограммы [4]. Оказалось, что ни один из пиков периодограммы не порожден случайной флуктуацией. Для уменьшения эффектов смещения периодограммы и уменьшения ее дисперсии, обусловленных конечностью интервала применения преобразования Фурье, использовался метод модифицированных периодограмм [1]. В этом методе были использованы временные окна сглаживания, в частности, окно Хемминга.

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) [7]. 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 (Slepian-sequences). Использовались последовательности из 15, 7, 5, 2 таких функций. Особенно эффективным этот метод оказался при малых длинах рядов.

При исследовании зависимости от широты периодов вращения и распределения спектральной плотности процессов, связанных с различными наблюдаемыми в линии He I λ 1083 нм солнечными структурами, был эффективно использован Welch's Method [8]. Эффективность его применения была обусловлена значительной длиной (128520 отсчетов) временных рядов на всем интервале наблюдения солнечных структур. Метод состоит в разбиении всего временного ряда на пересекающиеся временные сегменты, вычислении на каждом из сегментов модифицированных периодограмм со сглаживанием

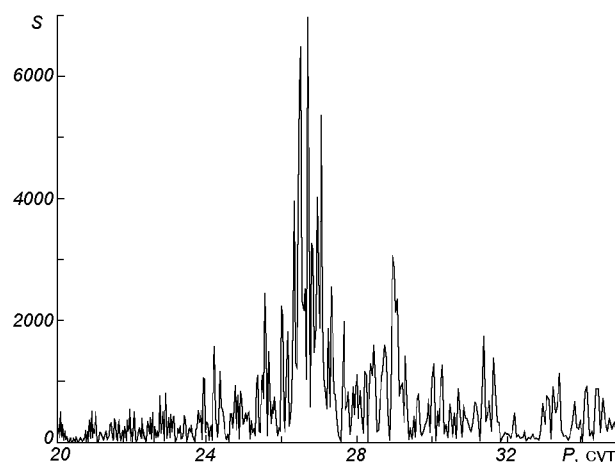


Рис. 1. Периодограмма для активных областей на широте 20° для интервала периодов 20—35 сут

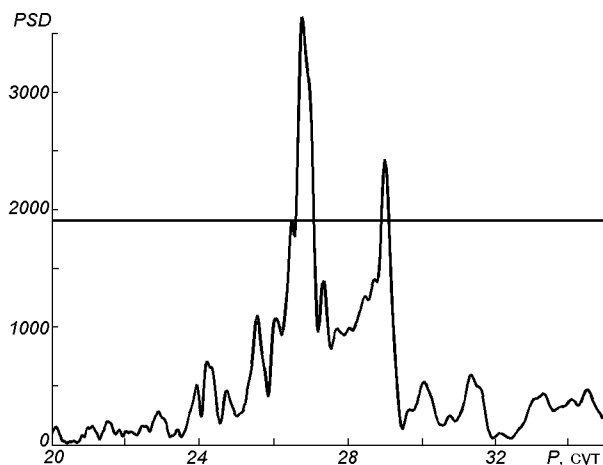


Рис. 2. Оценка спектральной плотности с помощью метода [8] для активных областей

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 % пересекающиеся временные сегменты длиной 64260 отсчетов каждый и сглаживание в каждом сегменте с применением окна Хемминга.

Используя описанные методы спектрального анализа, для каждого ряда мы построили спектры мощности в области периодов от 20 до 35 сут для всех рассматриваемых солнечных образований на широтах от 5 до 80°. Результаты обработки иллюстрируются здесь на графиках, полученных для процессов вращения активных областей на примере анализа спектральной плотности мощности для активных областей.

На рис. 1 приведена периодограмма для активных областей в 5-градусной широтной зоне с верхней широтой 20° для интервала периодов 20—35 сут. На рис. 2 представлена оценка спектральной плотности мощности, полученная для этого вида образований с помощью метода Welch's. Горизонтальная линия соответствует уровню 3σ , где σ — среднее квадратичное отклонение оценки спектра. В дальнейшую обработку включались максимумы в спектральных плотностях мощности, превышающие 3σ . В большинстве широтных зон таких максимумов было три, а в каждой зоне обнаруживалось не менее одного. Как видно из рис. 2, в широтной зоне 20° таких

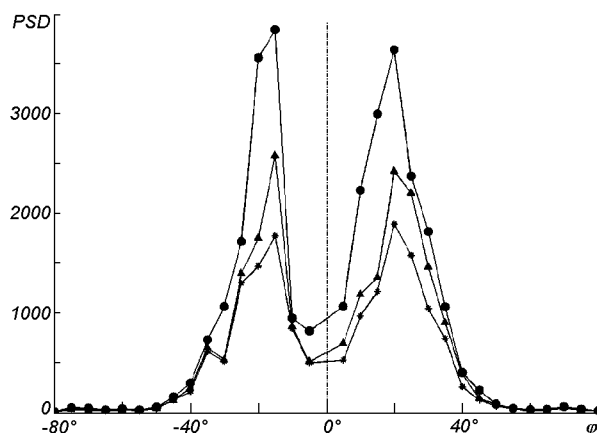


Рис. 3. Широтное распределение спектральной плотности в трех наиболее мощных периодах для активных областей

максимумов оказалось два. Поэтому мы рассматривали в дальнейшем до трех максимумов в каждой широтной зоне, доопределяя эту группу в случае недостающих до трех ближайшими по амплитуде пиками, находящимся в спектре ниже уровня 3σ . Для указанных трех пиков, отранжированных (1, 2, 3) в порядке убывания, были определены значения периода (обратная величина к частоте) вращения и значения спектральной плотности мощности.

На рис. 3 изображено широтное распределение спектральной плотности в трех наиболее мощных периодах для активных областей. Кружками, треугольниками и звездочками помечены кривые распределения спектральной плотности соответственно для первого, второго и третьего (1, 2, 3) из трех отобранных отранжированных в порядке убывания наиболее мощных пиков спектральной плотности. Максимальные значения спектральной плотности первого пика достигаются на широте 20° в N-полусфере и 17° в S-полусфере. На широтах 45—50° мощность первого пика уменьшается в 100 раз.

На рис. 4 изображено широтное распределение значений трех наиболее мощных периодов вращения для активных областей. Кружками, треугольниками и звездочками помечены кривые распределения значений периодов соответственно для первого, второго и третьего (1, 2, 3) из трех отобранных отранжированных в порядке убывания наиболее мощных пиков спект-

Результаты оценивания широтного распределения спектральной плотности и значений трех наиболее мощных периодов вращения для трех типов наблюдаемых солнечных структур

Интервал плотности мощности	Распределение мощности периодов с широтой в полусфере	Периоды, сут		Характер изменения длительности периодов с широтой
		N-полусфера	S-полусфера	
Активные области, 100—4000	Одновершинное (в полусфере) с максимумами $\varphi = 20^\circ$, $\varphi = -17^\circ$	24—35	24—32	В среднем рост с широтой. Несколько периодов на одной широте. Один период на нескольких соседних широтах
Флоккулы, 40—200	Двухвершинное (в полусфере) с максимумами $\varphi = 25^\circ$, $\varphi = 26^\circ$, $\varphi = -15^\circ$, $\varphi = -55^\circ$	25.5—30	25—30.5	В среднем рост с широтой. Несколько периодов на одной широте. Один период на нескольких соседних широтах
Корональные дыры, 1—12	Одновершинное (в полусфере) с максимумами $\varphi = 65^\circ$, $\varphi = -55^\circ$	25—31	25.5—32	Рост с широтой для $ \varphi > 65^\circ$. Постоянство для $ \varphi < 65^\circ$. Несколько периодов на одной широте. Один период на нескольких соседних широтах

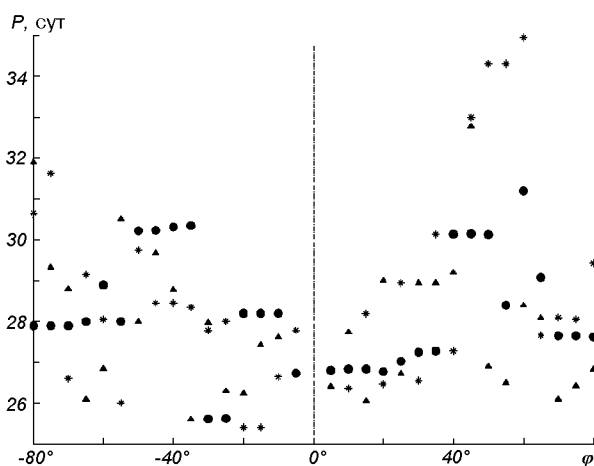


Рис. 4. Широтное распределение значений трех наиболее мощных периодов вращения для активных областей

ральной плотности. Из рисунка видно, что один и тот же период вращения наблюдается на нескольких широтах. Период 26.8—27.3 сут (кружки) наблюдается на 5—36°. На широтах от 20 до 36° одновременно с ним виден период около 29 сут (треугольники). На широтах 36—50° наблюдается период 30 сут (кружки). В S-полусфере мы также одновременно видим два или три периода вращения на одной и той же широте. Причем каждый из этих периодов наблюдается в широком интервале широт. Тем не менее, N- и S-полусферы заметно отличаются

по набору периодов вращения. Общим для обеих полусфер является увеличение значений периодов с широтой в среднем до широт $+60^\circ$ и -55° и уменьшение значений периодов на более высоких широтах. В N-полусфере интервал встречающихся периодов 24—35 сут, а в S-полусфере — от 24 до 32 сут.

Результаты оценивания широтного распределения спектральной плотности и значений трех наиболее мощных периодов вращения для трех типов наблюдаемых солнечных структур приведены в таблице.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

- Интервал периодов вращения на разных широтах для активных областей 24—35 сут, а для корональных дыр и флоккулов — 25—32 и 25—30.5.
- Картина вращения несимметрична относительно экватора. Минимальные периоды вращения для корональных дыр и флоккулов наблюдаются на широтах -5° — -40° .
- На одной широте существуют несколько периодов вращения.
- Один период наблюдается в нескольких соседних широтных зонах.
- В среднем увеличение периодов вращения с ростом широты можно наблюдать только для корональных дыр.
- Для флоккулов в северном полушарии видны две «волны» увеличения периода с широтой.
- Для активных областей среднее увеличение

периодов с широтой наблюдается для широт $0-60^\circ$. На более высоких широтах периоды становятся такими же, как на приэкваториальных широтах.

Эти особенности свидетельствуют о наличии в верхней хромосфере протяженных структур (до нескольких десятков градусов по широте) с твердотельным вращением. Осуществляется интерпретация полученных результатов с точки зрения кинематики и физики солнечных процессов.

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989.—540 с.
2. Маланушенко Е. Обнаружение корональных дыр по наблюдениям в линии He I λ 10830 // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1992.—89.—С. 93—98.
3. Степанян Н. Н. Корональные дыры и фоновые магнитные поля на Солнце // Солнечный цикл: Сб. науч. тр. — Санкт-Петербург: Физико-технический ин-т. им. А. Ф. Иоффе, 1993.—С. 44—55.
4. Теребиж В. Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. — М.: Наука, 1992.—392 с.
5. Malanushenko E. V., Stepanian N. N. Areas of coronal holes at the levels of solar chromosphere and corona // IV Russ. Symp. "Mathematical Models of the Sun-Earth Environment" / Eds A. P. Kropotkin, A. E. Antonova,

I. S. Veselovsky. — Moscow: MSU, 1996.—P. 41.

6. Stepanian N. N. Coronal holes and background magnetic fields on the Sun // IAU Colloq. 144 "Solar coronal structures" / Eds V. Rushin, P. Heinzel, J.-C. Vial. — Poprad: Slovak Astronomical Institute, 1994.—P. 61—64.
7. Thomson D. J. Spectrum estimation and harmonic analysis // Proc. IEEE.—1982.—70.—P. 1055—1096.
8. 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.—1967.—AU-15.—P. 70—73.

ON SOME METHODS OF ESTIMATION OF SOLAR STRUCTURE ROTATION FROM OBSERVATIONS OF THE SUN IN THE LINE HE I λ 1083 NM

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

We obtained latitudinal distributions of the rotation periods in the interval from 20 to 35 days and the capacity absorbed during these periods in the certain latitudinal zones for three types of the solar structures observable in the line He I of λ 1083 nm in the top chromosphere during the time interval greater than 26 years.