

шения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

1. Гопасюк О. С. Структура магнитного поля одиночного пятна // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 2.—С. 126—137.
2. Гопасюк С. И. Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1965.—33.—С. 100—110.
3. Гопасюк С. И. Некоторые особенности вращения пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1981.—64.—С. 108—118.
4. Гопасюк С. И. Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля // Астрон. журн.—1984.—61, вып. 1.—С. 157—162.
5. Гопасюк С. И., Гопасюк О. С. Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. I. Наблюдения по фотосферным линиям // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 5.—С. 389—400.
6. Гопасюк С. И., Залесов И. П. Цифровой вектор-магнитограф. I. Канал продольного поля. // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 5.—С. 48—54.
7. Гопасюк С. И., Лазарева Л. Ф. Поле скоростей и вспышечная активность в группе пятен // Изв. Крым. астрофиз.

обсерватории.—1986.—74.—С. 84—92.

8. Гопасюк С. И., Лямова Г. В. Крутильные колебания солнечных пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1987.—77.—С. 17—24.
9. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца: I. Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—65.—С. 3—34.
10. Brown B. N., Nightingale R. W., Alexander D., et al. Observations of rotating sunspots from TRACE // Solar Phys.—2003.—216, N 1-2.—P. 79—108.

#### ON SUNSPOT PENUMBRA OSCILLATIONS

O. S. Gopasyuk, S. I. Gopasyuk

Oscillations of the penumbrae of four sunspots are investigated from the observations of longitudinal components of the magnetic field and velocity in the photospheric line FeI 525.3 nm. The period of oscillations of sunspot penumbrae lies in the range from 3.4 to 7.7 days. The phase of the azimuthal component of the velocity was ahead of the phases of all other components. If the density of plasma in a penumbra is  $10 \text{ sup } \{-4\} \text{ kg/m}^3$  (the same as in the photosphere), the magnetic energy of oscillations exceeds the kinetic energy of the same components by a factor of 10 to 100.

УДК 523.9-327:519.246.8:517.443

© Я. И. Зельк<sup>1</sup>, Н. Н. Степанян<sup>2</sup>, О. А. Андреева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космічних досліджень НАН України і НКА України, Київ

<sup>2</sup>Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

### ВРАЩЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА В ЛИНИИ He I $\lambda$ 1083 нм

Методи спектрального аналізу часових рядів застосовано до досліджень обертання корональних дір, флоккул і активних областей з групами сонячних плям за спостереженнями в лінії He I  $\lambda$  1083 нм. Отримано середні характеристики обертання цих утворень за три сонячних цикли. Для 21-го циклу визначено зміни обертання з широтою і часом.

Наблюдаемые на Солнце активные и спокойные образования несомненно связаны между собой. Но в то же время каждый тип образований имеет свои характерные особенности, позволяющие судить об их природе, глубине их источников.

Регулярное получение изображений Солнца в линии He I  $\lambda$  1083 нм представляет исключительную возможность иметь одновременно информацию о яркости и положении на диске сразу нескольких видов солнечных образований.

Одной из важных характеристик солнечных образований является их дифференциальное вращение и его изменение со временем. К настоящему времени выполнено множество работ по определе-

нию вращения Солнца различными методами. Ранние измерения проводились по трассерам, затем по измерению лучевых скоростей. В последние годы основным стал метод спектрального анализа периодов вращения на основе преобразования Фурье временных рядов наблюдений различного вида. Большинство таких работ касается наблюдений солнечных магнитных полей [2, 4, 5].

Цель данной работы — изучение дифференциального вращения корональных дыр (КД), флоккулов (ФЛ) и мощных активных областей (АО) с группами солнечных пятен по наблюдениям в линии He I  $\lambda$  1083 нм.

Исходным материалом послужили наблюдения

Солнца в линии He I  $\lambda$  1083 нм, полученные на обсерватории Китт Пик (США) и любезно предоставленные в распоряжение НИИ КрАО. Наблюдения охватывают три солнечных цикла с января 1977 до сентября 2003 г. Это соответствует 358 каррингтоновским оборотам Солнца №№ 1630-2007. Материал наблюдений представляет собой синоптические карты, составленные из ежедневных изображений Солнца, полученных в линии He I  $\lambda$  1083 нм. В числовом виде каждая карта представляет собой двумерный массив, в котором 180 строк и 360 столбцов.

Для приведения всех наблюдений к единой фотометрической системе все карты были нормированы таким образом, что интенсивность невозмущенных областей, занимающих на Солнце максимальную площадь, принимала значения 1. По нормированным картам были определены интервалы интенсивностей, относящиеся к трем типам объектов:  $I > 1.05$  для КД,  $0.6 < I < 0.8$  для ФЛ и  $I < 0.5$  для АО. Для исследования широтных зависимостей карты разбивалась на 17 широтных интервалов в области  $-0.95 < \sin\varphi < 0.95$ . Соединение распределений для одноименных широтных интервалов всех карт дает 17 временных рядов изменения яркости Солнца на центральном меридиане в 17 широтных интервалах за время с января 1977 до сентября 2003 г. Эти ряды являются материалом для дальнейшего исследования. Для каждого типа солнечных образований в этих рядах всем элементам, не удовлетворяющим по интенсивности выше названным условиям, придавалось значение 1.

Применительно к решаемой задаче были исследованы следующие методы спектрального анализа [1, 3, 7]: непараметрические — метод периодограмм, Welch's method, multitaper method; параметрические — Yule-Walker autoregressive method, Burg method; частотно-временной — спектрограмм; метод построения подпространств — multiple signal classification (MUSIC) method. Методы выявления периодичностей и оценки спектральной плотности мощности в частотных интервалах, охватывающих характерные периодичности, реализованы в системе MATLAB с использованием проблемно ориентированного набора функций Signal Processing Toolbox. В конечном итоге по критерию простоты реализации и обеспечиваемой при этом достоверности и эффективности были выбраны следующие методы. Для выявления периодичностей — процедура вычисления несглаженных периодограмм, пропорциональных квадратам модулей коэффициентов Фурье, построения их зависимостей от частоты и от обратной частоты (периода) и поиск точек локальных максимумов в этих зависимостях. Для

оценивания спектральной плотности мощности — метод периодограмм, Welch's method. Обработка построенных 17 временных рядов реализуется с применением новых разработанных функций в MATLAB следующим образом.

— Фильтрация всех рядов данных с помощью спроектированного в среде SPTool цифрового фильтра нижних частот, отсекающего во всех процессах составляющие с частотами, выше частоты Найквиста в спектре.

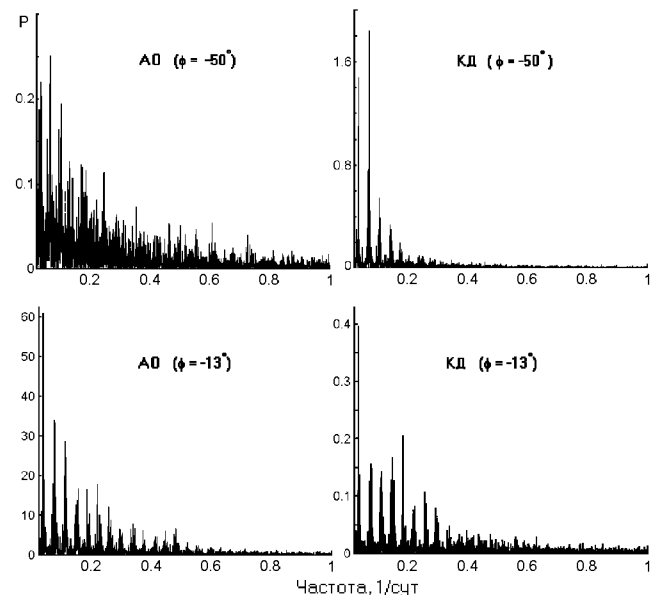
— Вычисление спектральных плотностей мощности процессов для различных широтных диапазонов. Оценка по ним периодов трех видов солнечных структурных образований, выбор диапазонов периодов, охватывающих характерные периодичности.

— Вычисление суммарных мощностей процессов в выбранных интервалах периодов для полных временных реализаций и для различных фаз циклов солнечной активности.

— Построение зависимостей суммарных мощностей всех процессов от широты и времени.

— Вычисление спектральных плотностей мощности всех процессов в некотором скользящем окне и определение по ним текущих значений периодов вращения различных солнечных образований в каждом широтном интервале.

На рисунке приведены полученные спектральные плотности мощности для активных областей и корональных дыр в широтных диапазонах L2 ( $\varphi = -50^\circ$ ) и L7 ( $\varphi = -13^\circ$ ). Вероятность случайного появления наблюдаемых пиков в спектре мощности превышает



Спектральные плотности мощности  $P$  в широтных зонах для 21-го цикла активности

ет 4 $\sigma$ . Как видно, максимальные значения спектральных плотностей сосредоточены в определенных диапазонах периодов. Ниже будут рассмотрены три диапазона периодов: 7.7—11, 11—20 и 20—35 сут. Для каждого из этих диапазонов были определены суммарные мощности процессов, соответствующих трем типам солнечных структурных образований.

Было показано, что максимальное значение суммарной мощности чаще всего приходится на интервал периодов 15.5 сут, и в одних тех же частотных диапазонах максимальное значение суммарной мощности спектра изменяется от цикла к циклу. Это свидетельствует о долгосрочном существовании на Солнце двухсекторных структур. Время жизни таких структур соизмеримо с циклом активности.

Анализ спектров мощности показал, что изменение с широтой суммарной мощности спектра 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 результат подтверждает более ранние выводы [6] о различной природе активных образований и КД. Различие суммарной мощности спектров АО и ФЛ на высоких широтах и близкое совпадение на низких широтах говорит о том, что слабые флоккулы, окружающие сильные активные области, отличаются по своим кинематическим характеристикам от изолированных слабых флоккулов. Последние резче выделяются на широтах с низким количеством сильных активных областей.

Для изучения изменения вращения со временем в течение 21-го цикла солнечной активности для всех временных рядов были вычислены спектральные плотности мощности в скользящем окне длиной 10 каррингтоновских оборотов (272.5 сут) с текущим сдвигом на пять оборотов (132.25 сут). В диапазоне периодов 20—35 сут для всех широтных зон определялись значения периодов, соответствующих точкам максимума спектральной плотности. Эти периоды характеризуют вращение отдельных типов солнечных образований на каждой широте в текущее время. Результаты этих расчетов показали, что периоды вращения изменяются со временем и широтой по-разному для рассматриваемых солнечных структур. Для времени максимума и начала спада активности 21-го цикла (750—1750 сут от начала рядов) заметно увеличение со временем периода обращения на низких широтах и уменьшение его на средних широтах для всех структурных образований. Граница перемены знака для каждой из структур находится на своей широте.

Дифференциальность вращения солнечных структурных образований определялась как разность периодов обращения структур в широтных диапазонах  $\varphi = -50^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$ . Анализ всего материала показал, что дифференциальность для АО, ФЛ и КД изменяется со временем в широких пределах, становясь иногда отрицательной, в то время общепринято представление о том, что на экваторе Солнце вращается быстрее, чем на высоких широтах.

Полученный широкий диапазон изменения дифференциального вращения со временем для всех рассмотренных солнечных образований может быть частично объяснен большими размерами отдельных структур (корональных дыр или целых комплексов активных областей) и их сильными собственными движениями, дающими заметный вклад в определение периодов вращения по материалу за 10 солнечных оборотов.

Работа выполнена в рамках контракта «Анализ», финансируемого НККАУ. В ней были использованы данные NSO/Kitt Peak, полученные совместно NSF/NOAA, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989.—540 с.
2. 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.
3. Зелик Я. І. Активна компенсація полігармонічного віброакустичного шуму і алгоритм виявлення частоти його основної гармоніки // Автоматика.—1994.—№ 3-4.—С. 22—29.
4. Котов В. А., Ханейчук В. И., Цап Т. Т. Новые измерения общего магнитного поля Солнца и его вращение // Астрон. журн.—1999.—87, Вып. 3.—С. 218—222.
5. Степанян Н. Н. Изменение дифференциального вращения фоновых магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—67.—С. 59—65.
6. Степанян Н. Н. Корональные дыры и фоновые магнитные поля на Солнце // Солнечный цикл: Сб. науч. тр. — РАН, ФТИ, 1993.—С. 44—55.
7. Hayes M. H. Statistical Digital Signal Processing and Modeling. — New York: John Wiley & Sons, 1996.—789 p.

#### ROTATION OF ACTIVE REGIONS AND CORONAL HOLES FROM OBSERVATIONS OF THE SUN IN THE LINE HE I $\lambda$ 1083 NM

Ya. Zyelyk, N. Stepanian, O. Andreeva

Some methods of the spectral analysis of time series are applied to the study of the rotation of coronal holes, plagues and active regions with sunspot groups on the basis of the observations in the line He I  $\lambda$  1083 nm. The mean characteristics for the rotation of these formations during three solar cycles are derived. The rotation changes with latitude and time are determined for 21 cycles.