

15. *Стенфло Я.О.* Мелкомасштабные магнитные поля на Солнце // Проблемы солнечной активности. М.: Мир, 1979. С.73-120.
16. *Caccin B., Severino G.* On the continuum diagnostics of photospheric faculae // *Astrophys. J.* 1979. V. 232, №1. P. 297-304.
17. *Chapman G.A.* New models of solar faculae // *Astrophys. J.* 1979. V.232, №3. P. 923-928.
18. *Keller C.U., Solanki S.K., Steiner O., Stenflo J.O.* Structure of solar magnetic flux-tubes from the inversion of Stokes spectra at disk center // *Astron. and Astrophys.* 1990. V. 233, N2. P.583-597.
19. <http://kurucz.harvard.edu/lineslists.html>
20. <http://ams.astro.univie.ac.at/>
21. *Gopasyuk S.I.* Changes with height of longitudinal magnetic field in active regions // *The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions.* ASP conf. Series. 1993. Vol.46. P.24-31.
22. *Holweger H., Muller E.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen // *Iyid.* 1974. V.39, N1. P.19-30.
23. *Semel M.* Magnetic fields observed in a sunspot and faculae using 12 lines simultaneously // *Astron. And Astrophysics.* 1981. V.97, N1. P.75-78.
24. *Solanki S.K.* Small-scale solar magnetic fields: an overview // *Space Sci. Rev.* 1993. Vol.31. P.1. 188 p.

УДК 523.62-726

*Д.В. Ерофеев*

## ВАРИАЦИИ ФОРМЫ И СИММЕТРИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ММП В ХОДЕ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Форма и тип симметрии пространственного распределения мощности низкочастотных флуктуаций ММП изменяются в ходе солнечного цикла. Хотя распределение почти всегда остается существенно трехмерным, вблизи экстремумов цикла степень его симметрии повышается. При высокой активности распределение принимает дискообразную форму, приблизительно симметричную относительно направления минимума дисперсии флуктуаций, причем последнее в это время близко к направлению скорости СВ. В минимумах солнечной активности распределение имеет вытянутую форму, приблизительно симметричную относительно направления максимума дисперсии флуктуаций.

Как хорошо известно, межпланетное магнитное поле (ММП), наряду с регулярной составляющей, содержит сильные флуктуации с широким спектром временных и пространственных масштабов [2,3]. Эффективным инструментом исследования флуктуаций является анализ их ковариационной матрицы. Приведение этой матрицы к главным осям позволяет найти три ортонормированных собственных вектора (СВ), которые дают направления, вариации вдоль которых взаимно не коррелированы. Собственные значения (СЗ) матрицы дают мощность флуктуаций вдоль каждого из этих направлений. СЗ, расположенные в порядке убывания, обозначим  $L_{MAX}$ ,  $L_{Int}$ ,  $L_{min}$ , а соответствующие СВ (главные оси) -  $E_{MAX}$ ,  $E_{Int}$ ,  $E_{min}$ . Долговременные вариации направлений главных осей для флуктуаций ММП низкочастотного диапазона рассматривались нами ранее, и было найдено, что эти направления изменяются в ходе 22-летнего

магнитного цикла Солнца, причем амплитуда вариаций составляет  $45-50^\circ$  [1]. В настоящей работе рассмотрим изменение формы пространственного распределения мощности флуктуаций ММП и соотношения между главными осями и физически выделенными направлениями гелиосферы.

Мощность флуктуаций  $dB^2$  равна сумме СЗ ковариационной матрицы. Для того чтобы проследить изменения свойств пространственного распределения флуктуаций, удобно скомбинировать СЗ следующим образом. В качестве меры анизотропии возьмем величину

$$A = (L_{MAX} - L_{min}) / L_{MAX}$$

которая изменяется в пределах от 0 до 1, причем предельное значение  $A=0$  соответствует случаю сферически симметричного (изотропного) распределения флуктуаций, а  $A=1$  соответствует максимальной анизотропии. Вторая величина

$$S = (L_{MAX} - L_{Int}) / (L_{MAX} - L_{min})$$

характеризует форму распределения флуктуаций. Она также изменяется в пределах от 0 до 1, причем крайние значения соответствуют осесимметричным распределениям. При  $S=0$  осью симметрии является направление минимума дисперсии, так что при значительной анизотропии распределение мощности имеет плоскую дископодобную форму (назовем ее планарной); в случае  $S=1$  осью симметрии является направление максимума дисперсии, и распределение мощности флуктуаций при значительной анизотропии будет иглоподобным (назовем его аксиальным).

Исходный ряд среднечасовых значений вектора ММП за 1965-2008 гг. получен из хорошо известной базы данных OMNI-2, которая содержит измерения магнитного поля на околоземных орбитах [4]. Ряд разделен на две выборки, соответствующие секторам ММП с разным знаком среднего поля (в противном случае распределение углов будет бимодальным). Разделение производилось по направлению сглаженного за сутки вектора ММП, поэтому кратко-

временные обращения полярности магнитного поля не исключались, в то же время интервалы времени  $\pm 1$  сутки от моментов пересечения секторных границ были исключены. Флуктуации ММП определялись как разности между последовательными среднечасовыми значениями вектора ММП. Расчеты проделаны для годовых интервалов времени, чтобы обеспечить хорошую статистическую обеспеченность каждой оценки.

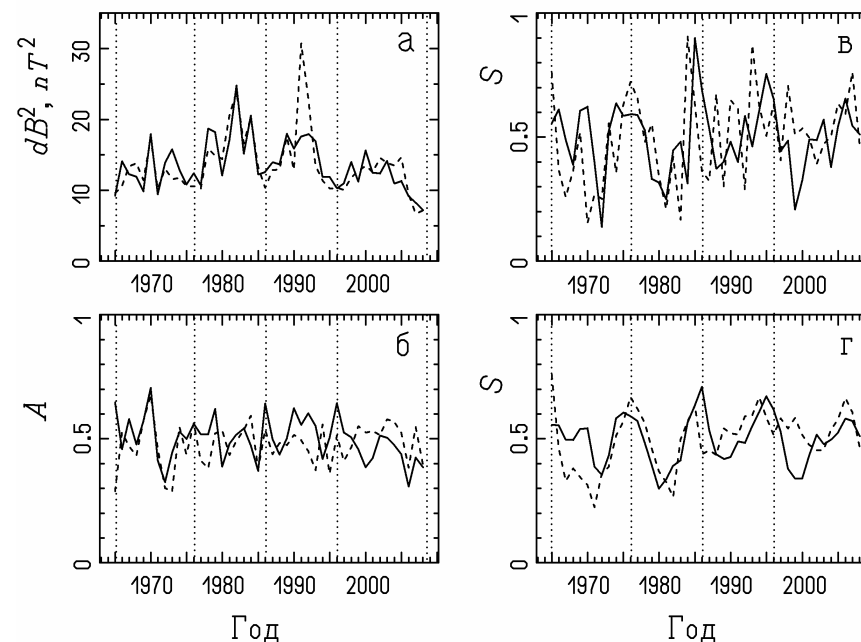


Рис. 1. Параметры, характеризующие анизотропию флуктуаций ММП

Рассмотрим временные вариации описанных выше параметров (рис.1). Как можно видеть на рис.1а, мощность флуктуаций  $dB^2$  изменяется в ходе 11-летнего цикла Солнца, имея максимумы в периоды высокой солнечной активности и минимумы вблизи минимумов циклов (эпохи минимумов солнечной активности отмечены на рисунках вертикальными пунктирными линиями). Такое изменение

мощности флуктуаций подобно изменению в ходе солнечного цикла мощности регулярной составляющей ММП. Кроме того, величина  $dB^2$  в обоих секторах ММП имеет высокочастотные (ВЧ) вариации. ВЧ вариации диапазона 2-4 года были выделены с помощью простого цифрового фильтра, и оказалось, что эти составляющие в двух секторах ММП существенно коррелируют, т.е. они обусловлены глобальным процессом в гелиосфере.

Поведение анизотропии флуктуаций  $A$  существенно иное (рис.1б). Этот параметр не показывает отчетливо выраженных изменений в ходе 11-летнего цикла, и вариации его в двух секторах ММП очень слабо коррелируют; однако применение фильтра показало, что статистически значимая корреляция между секторами ММП имеет место для ВЧ диапазона (характерное время вариаций 2-4 года), а более слабые НЧ вариации не связаны с 11-летним циклом и не коррелируют.

Поведение параметра формы распределения  $S$  (см. рис.1в, а также рис.1г, где отдельно показана НЧ составляющая вариаций) оказывается в качественном отношении обратным поведению  $A$ : этот параметр обнаруживает существенную 11-летнюю компоненту, в то же время ВЧ составляющие его вариаций в двух секторах ММП не коррелируют между собой. Судя по поведению  $S$ , пространственное распределение мощности флуктуаций в основном существенно трехмерно (значения  $S$ , близкие к 0 или 1, наблюдаются редко). В то же время в максимумах 11-летних циклов форма распределения, как правило, ближе к планарной, а в минимумах – к аксиальной. Соответственно, в определенном приближении осью симметрии распределения флуктуаций может считаться  $E_{min}$  при высокой активности и  $E_{max}$  в эпохи минимумов циклов.

Рассмотрим теперь, как оси симметрии ориентированы по отношению к физически выделенным направлениям гелиосферы – направлению среднего магнитного поля  $B_0$  и радиальному направлению  $R$ , которое практически совпадает с направлением скорости солнечного ветра. Поведение углов между этими направлениями и главными осями  $E_i$  показаны на рис.2. Как отмечалось выше, направления главных осей существенно изменяются в ходе солнечного цикла, поэтому рассматриваемые углы также сильно изменяются в

связи с солнечной активностью. Исключение составляет угол между направлением максимума дисперсии флуктуаций и средним направлением ММП, который не показывает 11-летней вариации. Как отмечалось выше, направление  $E_{max}$  сильно изменяется в ходе солнечного цикла (размах колебаний  $\approx 90^\circ$ ), однако при этом остается приблизительно ортогональным к  $B_0$ . Направление оси минимума дисперсии при высокой активности практически совпадает с радиальным направлением  $R$ , таким образом,  $R$  является приблизительной осью симметрии распределения мощности флуктуаций.

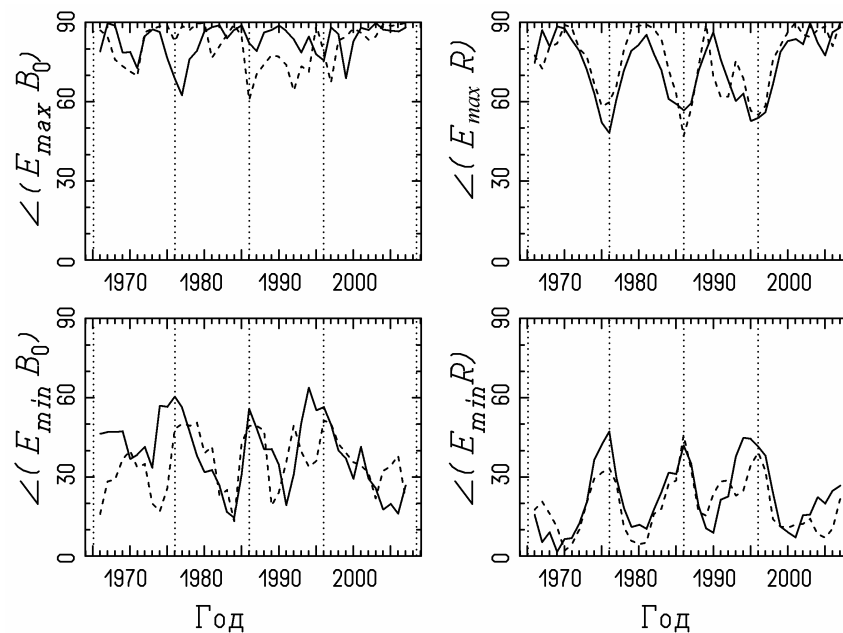


Рис.2. Зависимость от времени углов между главными осями и направлениями среднего магнитного поля ( $B_0$ ) и скорости СВ ( $R$ )

Выводы: форма и тип симметрии пространственного распределения низкочастотных флуктуаций ММП изменяются в ходе солнечного цикла. Хотя распределение почти всегда остается существенно трехмерным, вблизи экстремумов цикла оно принимает при

близительно симметричную форму. При высокой активности распределение имеет приблизительно дискообразную форму с осью симметрии в направлении минимума дисперсии флуктуаций, причем последнее в это время близко к направлению скорости СВ. В минимумах солнечной активности осью симметрии является направления максимума дисперсии флуктуаций, которое в среднем приблизительно ортогонально к направлению среднего магнитного поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерофеев Д.В.* 22-летняя и 11-летняя вариации анизотропии колебаний ММП // Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений (Тр. XI Пулковской междунар. конф. по физике Солнца), СПб, ГАО РАН, 2007, с. 165–168.
2. *Bruno R., Carbone V.* The solar wind as a turbulence laboratory // Living Reviews in Solar Physics (<http://solarphysics.livingreviews.org/articles/lrsp-2005-4>). 2005.
3. *Tu C.-Y., Marsch E.* MHD structures, waves, and turbulence in solar wind: observations and theories. // Space Sci. Rev. 1995. V. 73. P. 1-210.
4. [ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\\_data/omni/](ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/)

УДК 523.98

*Д.В. Ерофеев, А.В. Ерофеева*

### СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ 19–23

Исследованы изменения размеров групп солнечных пятен (расстояний между их полюсами) в циклах активности 19–23, по данным Уссурийской астрофизической обсерватории. Найдено, что средние размеры групп пятен претерпевают систематические изменения трех типов: вариации с периодом солнечного цикла (11 лет), вариации в пределах одного цикла с характерным временем  $\approx 5$  лет, и долговременные вариации, происходящие на временной шкале, равной или превышающей длину использованного ряда данных (54 г.). Последние выражены как положительный тренд в циклах 20–23. Описанные выше вариации в основном не связаны с изменениями распределения групп пятен по площадям, напротив, временным изменениям подвержен сам вид зависимости между размерами групп и их площадями. Последний, 23-й цикл активности был экстремальным по средним размерам групп пятен и необычным по характеру их изменения в ходе цикла.

#### ВВЕДЕНИЕ

В ходе 11-летнего и более длительных циклов активности Солнца изменяются не только интегральные показатели пятенной активности, такие как число или суммарная площадь пятен на диске, но и более тонкие статистические свойства ансамбля групп пятен. Так, известно, что в минимумах 11-летнего цикла падает относительное число групп с большими площадями и сложной структурой, и что в более высоких циклах относительное число таких групп больше, чем в слабых [4]. Изменяются и характеристики наибольших пятен в группах (см. статью В.П. Бабия, В.М. Ефименко и В.Г. Лозицкого в настоящем сборнике).