

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/

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 ≈ 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).

В ходе многолетних патрульных наблюдений на Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН (далее УАФО) измерялись координаты и площади пятен, входящих в состав групп. Это, в частности, дает возможность оценить такие параметры биполярных и многопятенных групп пятен, как их размеры (расстояния между их магнитными полюсами) и наклон их осей к параллелям. Эти характеристики, определенные по данным УАФО, исследовались нами в работах [1–3,5]. Следует отметить, что ранее подобные параметры определялись по многолетним рядам фотогелиограмм на обсерваториях Маунт Вилсон и Кодайканал [6–9]. Однако методика измерений там была существенно иная, чем в УАФО, поэтому полученные на разных обсерваториях параметры не вполне аналогичны и имеют систематические различия, хотя между данными обс. Маунт Вилсон и Кодайканал, с одной стороны, и УАФО, с другой, имеется положительная корреляция [3]. Кроме того, хотя измерения, полученные на обс. Маунт Вилсон и Кодайканал, использовались для разного рода статистических исследований, в частности, для анализа изменений параметров групп пятен в ходе их развития, подробного изучения эволюции этих параметров на временной шкале 11-летнего цикла и более длительной проделано не было. В настоящей работе мы исследуем систематические изменения размеров групп пятен, происходившие в период с 1956 по 2009 г., на протяжении пяти циклов солнечной активности.

ДААННЫЕ

Нами использовались данные о группах пятен с максимальными наблюденными площадями S более 20 миллионных долей полусферы (м.д.п.), наблюдавшихся в УАФО по программе Службы Солнца с 1956 по 2009 г. Ограничение снизу по максимальным площадям групп связано с тем, что мелкие группы имеют малое время жизни, и для них эффекты наблюдательной селекции весьма значительны. Всего за указанный период наблюдалось 12095 групп пятен с $S > 20$ м.д.п., однако часть из них были униполярными или наблюдались только вблизи лимба, где их характеристики измеряются с большими погрешностями. Для 7698 групп, которые содержали два

или более пятен и наблюдались на расстояниях от лимба, превышающих 0.25 радиуса солнечного диска, были определены размеры следующим способом. В случае групп с хорошо выраженной биполярной структурой на фотогелиограммах измерялись гелиографические координаты ведущего и хвостового пятен, а для групп со сложной структурой – координаты двух (в некоторых случаях и больше) пятен в ведущей и хвостовой частях, которые потом усреднялись и использовались как оценки положений лидирующего и хвостового полюсов группы. Ввиду того, что в случае многопятенных групп выделение их полюсов содержит элемент субъективизма и зависит от деталей структуры данной группы, существующей в момент наблюдения, координаты центров каждой из групп были усреднены за время ее прохождения по диску Солнца. Таким образом, для каждой группы получены две пары координат, для лидирующего (l_1, f_1) и хвостового (l_2, f_2) полюсов (здесь l – эррингтоновская долгота, f – широта). Размер группы d определялся по формуле

$$d = \sqrt{(l_1 - l_2)^2 \cos^2 F + (f_1 - f_2)^2}, \quad (1)$$

где F – широта центра группы, и выражался в гелиографических градусах. Кроме того, были выделены рекуррентные группы пятен, и данные за их второе и последующие прохождения при расчетах не использовались (кроме одного специального случая). В результате получен набор данных о 6894 группах, включающий в себя их размеры d и максимальные наблюденные площади пятен S .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как известно, существует прямая статистическая зависимость между размерами групп пятен и их максимальными площадями [1,5,6], которая аналогична зависимости расстояние между полюсами – магнитный поток для биполярных магнитных областей [10]. Такая зависимость для нашего набора данных представлена на графике рис.1. Она сильно нелинейна, и для не слишком больших групп

с $S < 1300$ м.д.п. (составляющих подавляющее большинство) хорошо аппроксимируется степенной функцией

$$d(S) = 1.97S^{0.23} \quad (2)$$

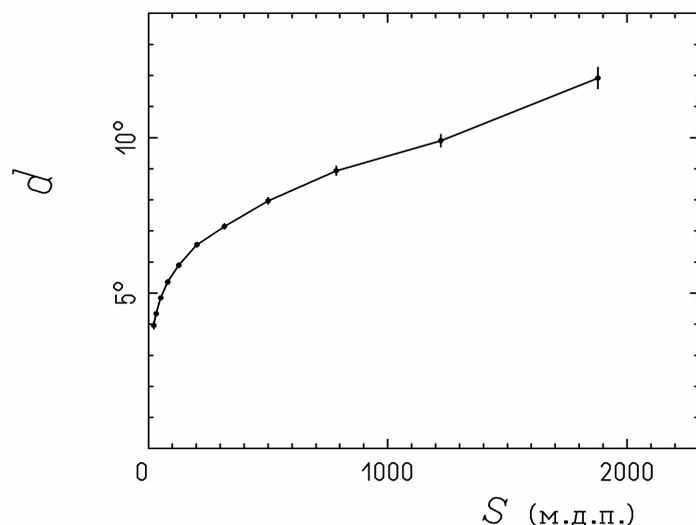


Рис.1. Зависимости средних размеров d групп пятен от максимальных площадей пятен в группах S , по всем данным за 1956–2009 гг.

Зависимость $d(S)$ кажется довольно универсальной, если для ее построения используются данные за весь 54-летний интервал наблюдений. Так, эта зависимость практически не изменяется с широтой, что можно видеть на рис.2а, где показаны оценки $d(S)$ для групп пятен, наблюдавшихся в разных интервалах гелиоширот. Зависимость $d(S)$ также не подвержена (или мало подвержена) влиянию времени жизни и возраста групп пятен. Чтобы показать это, были использованы данные о рекуррентных группах. На рис.2б сравниваются зависимости $d(S)$ для нерекуррентных и рекуррентных групп, причем последние разделены по возрастам (расчеты проведены отдельно по данным для 1-го и последующих прохождений по диску Солнца). Хотя, как кажется, есть тенденция к небольшому

уменьшению d для рекуррентных групп по сравнению с короткоживущими, различия кривых $d(S)$ на самом деле сравнимы с величиной вероятных ошибок, т.е. статистически не достоверны.

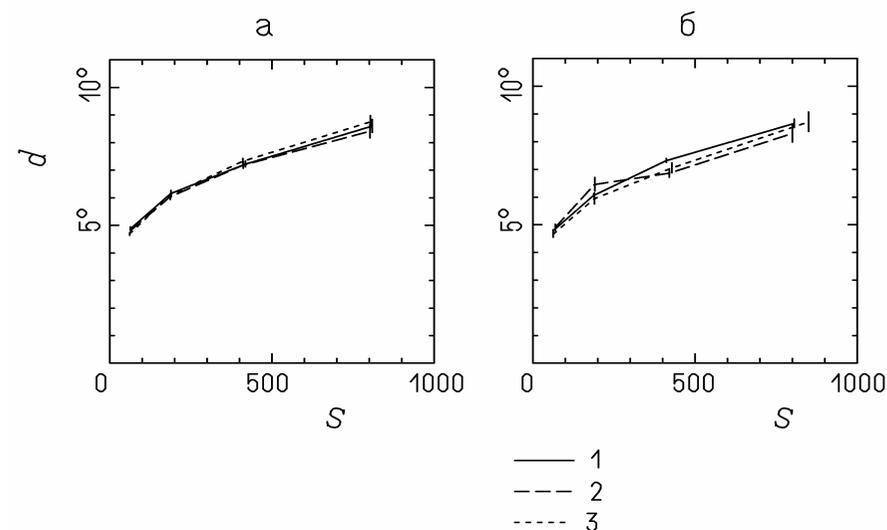


Рис.2. Зависимости средних размеров d групп пятен от максимальных площадей пятен в группах S , (а) – для разных гелиоширот (1 – $|F| < 12^\circ$; 2 – $12^\circ < |F| < 18^\circ$; 3 – $|F| > 18^\circ$), (б) – для групп с разными временами жизни и разного возраста (1 – нерекуррентные группы; 2 – рекуррентные группы, 1-е прохождение по диску Солнца; 3 – рекуррентные группы, 2-е и последующие прохождения)

Теперь рассмотрим временную динамику размеров групп пятен. На рис.3а показаны изменения среднегодовых значений параметра d в циклах 19–23. Можно видеть, что средний размер групп претерпевает вариации с разными характерными временами, которые можно разделить на три типа. Во-первых, хорошо видны изменения d , связанные с 11-летним солнечным циклом: вблизи минимумов активности значения этого параметра существенно понижаются. Во-вторых, имеются вариации среднего размера групп пятен в ходе каждого цикла, характерное время которых примерно равно 5 годам. Эти вариации имеют общие свойства для большинства (четырех из пяти) циклов активности, и их можно охарактеризовать как

более или менее выраженную бимодальность зависимости размеров групп от времени. В период сразу после минимума активности

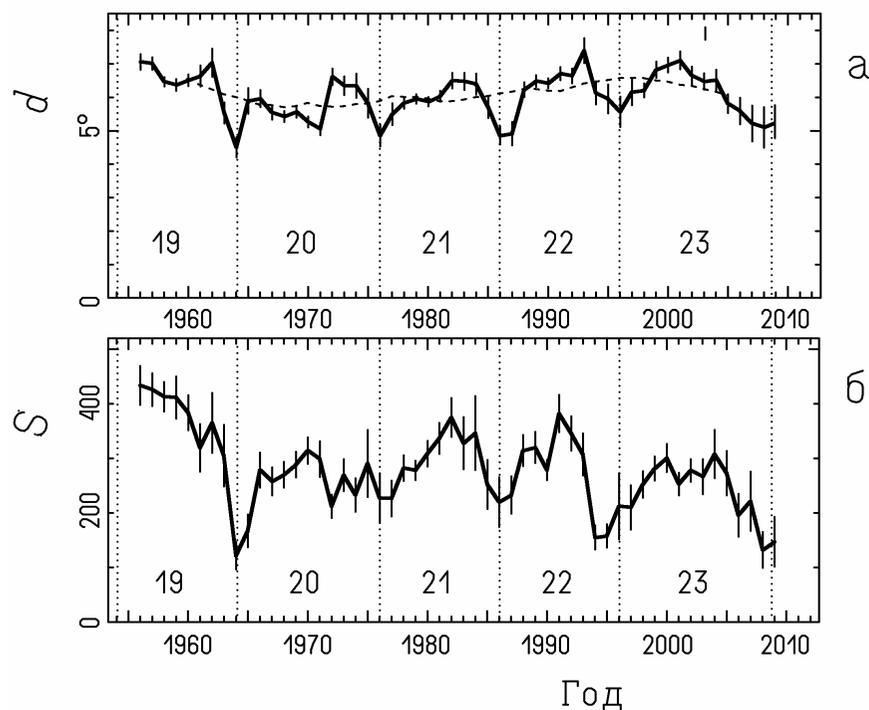


Рис.3. Вариации среднегодовых значений размеров групп пятен (а) и их максимальных площадей (б) в циклах активности 19–23. Пунктирными линиями показаны эпохи минимумов активности, номера циклов приведены на графиках

происходит возрастание d , которое вскоре сменяется стабилизацией (циклы 21, 22) или даже некоторым уменьшением этого параметра (циклы 19, 20). Вскоре после максимума активности снова происходит быстрое возрастание d , в результате чего появляется второй максимум этого параметра, который располагается на спаде цикла, за 2–3 года до эпохи следующего минимума активности. Этот второй максимум по высоте равен (в цикле 19) или превышает (в цик-

лах 20–22) первый максимум, имеющий место на фазе роста активности. Цикл 23, однако, является аномальным: средний размер групп пятен достигает наибольшего значения на фазе максимума цикла, а затем довольно монотонно уменьшается вплоть до минимума активности в 2009 г., т.е. возрастание d на фазе спада цикла 23 отсутствует. Третий тип вариаций среднего размера групп представляет собой долговременное изменение, которое проявляется как уменьшение d при переходе от 19 к 20 циклу, сменяющееся затем монотонным ростом (трендом) на протяжении трех циклов активности, с 20 по 23. Характерное время долговременных изменений, таким образом, порядка длины нашего ряда данных (54 года) или больше.

Поскольку существует статистическая связь между размерами групп пятен и их максимальными площадями S , изменения со временем среднего значения d могут быть вызваны изменениями количества групп с большой площадью пятен по отношению к числу мелких групп, т.е. вариациями статистического распределения групп по площадям $N(S)$. Изменения $N(S)$ действительно происходят как в ходе 11-летнего цикла (вблизи минимумов активности относительное число групп с большими площадями уменьшается), так и в связи с долговременными изменениями солнечной активности (в более высоких 11-летних циклах относительное число групп с большими площадями выше) [4]. В связи с этим возникает предположение, что описанные выше вариации среднегодовых значений d полностью обусловлены вариациями $N(S)$ и, таким образом, не содержат новой информации. Хотя влияние изменений $N(S)$ на поведение d нельзя полностью отрицать, высказанное выше предположение не подтверждается. Действительно, уже сравнение временного хода среднегодовых значений d (рис.3а) и S (рис.3б) показывает их существенное различие. Хотя 11-летние вариации присущи обоим этим параметрам, их изменения внутри циклов активности часто совершенно разные (например, в ходе 20 цикла изменения d и S практически антикоррелируют). На рис.3 хорошо видно также различие в ходе долговременных вариаций d и S . Это говорит о том, что, скорее всего, временным изменениям подвержена сама зависимость между размерами групп и площадями пятен в них.

Мы рассчитали зависимости $d(S)$ отдельно для каждого из пяти циклов активности, результаты расчетов представлены на рис.4. На этом рисунке хорошо видно систематическое различие кривых $d(S)$ для разных циклов, которое показывает, что, начиная с цикла 20 и до цикла 23 происходил рост средних размеров у всех групп, независимо от их максимальной площади. Отметим, что различие кривых $d(S)$ для циклов 20 и 23 намного превышает вероятные ошибки, т.е. оно вполне достоверно. Можно также отметить, что различие это (т.е. величина долговременного тренда параметра d) увеличивается с возрастанием площадей групп пятен.

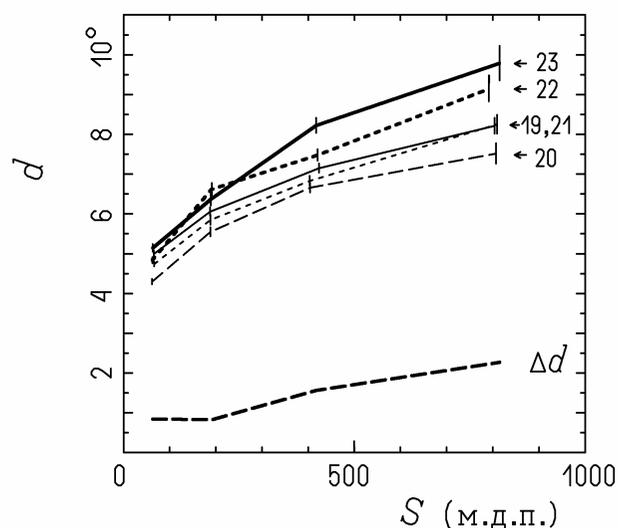


Рис.4. Зависимости средних размеров d групп пятен от максимальных площадей пятен в группах S , для циклов активности 19–23 (номера циклов указаны на графике). Δd –разность между значениями d в циклах 20 и 23

Еще одна иллюстрация изменения зависимости $d(S)$ приведена на рис.5, где показаны вариации средних размеров групп пятен, рассчитанных отдельно по трем выборкам данных. Эти выборки содержат группы с ограниченными диапазонами максимальных площадей: $20 < S < 150$, $150 < S < 500$ и $S > 500$ м.д.п. На рис.5 можно видеть, что долговременные вариации размеров происходят подобным обра-

зом у групп с разными площадями, однако у групп с $S > 500$ м.д.п. амплитуда этих вариаций наибольшая. Это еще раз подтверждает выводы, полученные выше на основании данных рис.4.

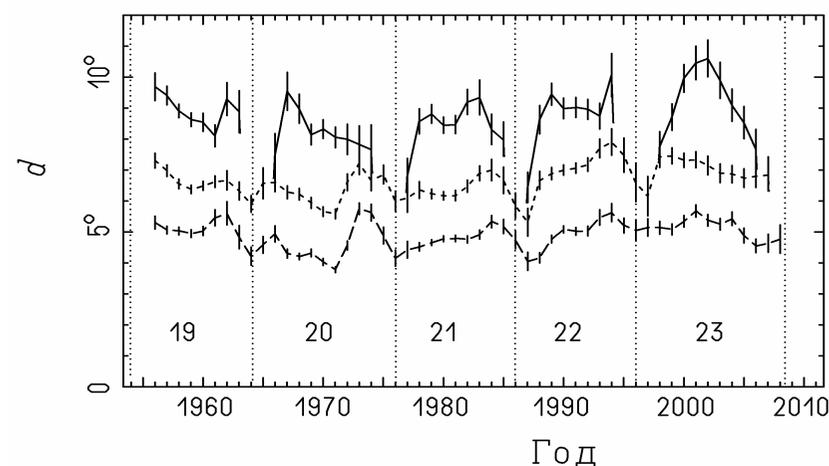


Рис.5. Вариации средних размеров групп пятен, для групп с максимальными площадями $20 < S < 150$ м.д.п. (длинный штрих), $150 < S < 500$ м.д.п. (короткий штрих) и $S > 500$ м.д.п. (сплошная линия). Временное разрешение 2 года. На графике указаны эпохи минимумов (вертикальные пунктирные линии) и номера циклов активности

В дополнение к этому, на рис.5 видно, что по крайней мере у групп малых и средних размеров (выборки с $20 < S < 150$ и $150 < S < 500$ м.д.п.) синхронными являются также вариации d внутри 11-летних циклов, происходящие с характерным временем ≈ 5 лет, следовательно и эти вариации в основном обусловлены изменением зависимости $d(S)$, а не статистического распределения групп пятен по площадям. В то же время довольно резкие «провалы» в периоды минимумов активности, которые видны на временной зависимости d , построенной по всем данным (рис.3а), гораздо хуже выражены на графиках рис.5 для $S < 500$ м.д.п. На графике же для $S > 500$ м.д.п. данные для минимумов активности отсутствуют, что означает почти полное отсутствие больших групп пятен в это время. Из вышесказанного можно заключить, что уменьшение среднего размера групп

вблизи минимумов активности обусловлено, в значительной степени, именно изменением $N(S)$, которое заключается в резком падении относительного числа крупных групп пятен.

ВЫВОДЫ

Анализ данных о группах солнечных пятен, полученных в УАФО в ходе пяти циклов солнечной активности, позволяет сделать следующие выводы.

1. Средние размеры групп пятен претерпевают систематические изменения, которые можно разделить на три типа. Первый тип – вариации с периодом солнечного цикла (11 лет), выражающиеся в резком падении размеров групп вблизи минимумов активности. Второй тип – вариации в пределах одного цикла с характерным временем ≈ 5 лет, выражающиеся в бимодальной форме кривой изменения размеров групп, с большим максимумом на спаде солнечного цикла. Третий тип – долговременные вариации, происходящие на временной шкале, равной или превышающей длину использованного ряда данных (54 года). Ход долговременных вариаций отличается от хода активности по интегральным индексам, таким как числа пятен или их суммарные площади. В циклах 20–23 происходил монотонный рост средних размеров групп пятен.
2. Хотя существует прямая связь между размерами и площадью групп пятен, описанные выше вариации размеров групп в основном не связаны с изменениями статистического распределения групп по площадям. Напротив, сам вид зависимости между размерами групп пятен и их максимальными площадями претерпевает изменения как в пределах одного цикла активности, так и на временной шкале ≥ 50 лет.
3. Последний, 23-й цикл активности был экстремальным по средним размерам групп пятен, и необычным по характеру их изменения в ходе цикла (отсутствовал второй максимум на фазе спада цикла).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерофеев Д.В.* Ориентация осей биполярных групп солнечных пятен // Солнечная активность и её влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука. 2002. Вып. 6. С.29-49.
2. *Ерофеев Д.В.* О связи между пятенной активностью в соседних 11-летних циклах. // Солнечная активность и её влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука. 2004. Вып. 8. С. 37-52.
3. *Ерофеев Д.В., Ерофеева А.В.* Статистические распределения параметров биполярных групп пятен. // Солнечная активность и её влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука. 2005. Вып.9. С. 43-50.
4. *Витинский Ю.И., Конецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М. Наука, 1986. 296 с.
5. *Erofeev D.V.* The relationship between solar activity and the large-scale axisymmetric magnetic field. // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 31–50.
6. *Howard R.F.* Axial tilt angles of sunspot groups. // Solar Phys. 1991. V. 136. P. 251-262.
7. *Howard R.F.* Tilt-angle variations of active regions. // Solar Phys. 1996. V. 167. P. 95-113.
8. *Howard R.F., Sivaraman K.R., Gupta S.S.* Measurement of Kodaikanal white-light images. V. Tilt-angle and size variations of sunspot groups. // Solar Phys. 2000, V. 196, P. 333-348
9. *Sivaraman K.R., Gupta S.S., Howard R.F.* Measurement of Kodaikanal white-light images. IV. Axial tilt angles of sunspot groups.// Solar Phys. 1999. V. 189. P. 69-83.
10. *Wang Y.-M, Sheeley N.R.* Average properties of bipolar magnetic regions during sunspot cycle 21. // Solar Phys. 1989. V. 124. P. 81-100.