

УДК 523.982

В. П. Бабий, В. М. Ефименко, В. Г. Лозицкий

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

Статистические характеристики крупных солнечных пятен в циклах солнечной активности №№ 17—23

Изучаются интегральные и дифференциальные распределения диаметров солнечных пятен в семи последних 11-летних циклах солнечной активности. Используются данные Гринвичского каталога, Пулковской базы данных, а также бюллетеня «Солнечные данные». Найдено, что в интегральных распределениях в диапазоне диаметров 50—90 Мм показатель распределения в среднем равен 6.0 и не зависит от чисел Вольфа, однако в большинстве циклов (в четырех из семи) зависит от фазы цикла: он больше на фазе роста, имеет промежуточное значение в фазе максимума и минимален на спаде активности. Иначе ведут себя циклы 17, 18 и 22, в которых параметр либо не изменяется с фазой цикла, либо эти изменения отличны от указанных выше. Оказалось, что циклы № 17 и 18 «аномальны» также потому, что в них наблюдались наибольшие за последние 80 лет солнечные пятна — с диаметром до 140—180 Мм. Высказано три предположения о природе этих гигантских пятен: а) их появление связано с изменением скорости дифференциального вращения Солнца; б) эти пятна представляют собой некий отдельный статистический ансамбль, образующийся в спорадически возникающей дискретной области конвективной зоны; в) это всплывающие на поверхность «куски» реликтового магнитного поля солнечного ядра.

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЛИКИХ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ У ЦИКЛАХ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ №№ 17—23, Бабій В. П., Єфіменко В. М., Лозицький В. Г. — Вивчаються інтегральні і диференційні розподіли діаметрів сонячних плям у семи останніх 11-річних циклах сонячної активності. Використано дані Гринвіцького каталогу, Пулковської бази даних та бюлетеня «Солнечные данные». Знайдено, що в інтегральних розподілах в діапазоні діаметрів 50—90 Мм показник розподілу в середньому дорівнює 6.0 і не залежить від

чисел Вольфа, однак для більшості циклів (чотирьох з семи) залежить від фази циклу: він більший на фазі росту, має проміжне значення у фазі максимуму і мінімальний на спаді активності. Інакше ведуть себе цикли 17, 18 і 22, в яких параметр \bar{D} або не змінюється з фазою циклу, або ці зміни відмінні від вказаних вище. Виявилось, що цикли №№ 17 і 18 «аномальні» також тому, що в них спостерігались найбільші за останні 80 років сонячні плями — з діаметром до 140—180 Мм. Висловлено три припущення щодо природи цих гігантських плям: а) їхня поява пов'язана зі зміною швидкості диференційного обертання Сонця; б) ці плями є окремим статистичним ансамблем, який утворюється у спорадичній дискретній області конвективної зони; в) це «куски» реліктового магнітного поля сонячного ядра, що спливають на поверхню.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF LARGE SUNSPOTS IN SOLAR ACTIVITY CYCLES 17—23, by Babij V. P., Efimenko V. M., Lozitsky V. G. — Integral and differential distributions of sunspot diameters are studied for last seven 11-year cycles of solar activity. Some data of the Greenwich catalogue, of Pulkovo's data base and of bulletin "Solniechnyie Dannyye" are used. It is found that the average index of integral distribution \bar{D} is 6.0 for the diameter range from 50 to 90 Mm and does not depend from Wolf's number. However, for the majority of cycles (four from seven) the average index of integral distribution depends on cycle's phase: it is maximum for the grown phase, intermediate for the peak of a cycle and minimum for the phase of recession. Cycles 17, 18, and 22 have an alternative evolution of index. For these cases the value of \bar{D} index does not depend on a phase of the cycle or the evolution of \bar{D} index differs from one described above. It is revealed that cycles 17 and 18 are peculiar by sunspot diameters, namely, during these cycles the largest sunspots up to 140–180 Mm were observed. Three assumptions in relation to the nature of these gigantic sunspots are proposed: a) these sunspots occur due to changes of differential rotation of the Sun; b) these sunspots are a separate unique statistical assembly which occurs sporadically in a discrete region of convective zone; c) these sunspots are 'fragments' of the relict magnetic field of the solar nucleus which come to the surface.

ВВЕДЕНИЕ

Статистические особенности солнечной активности изучались неоднократно [2, 4, 6—8]. Тем не менее, в опубликованных работах недостаточно полно освещен вопрос статистики диаметров солнечных пятен, включая их интегральные и дифференциальные распределения. В сущности это простейший подход к анализу статистических ансамблей, который, однако, при его параметризации позволяет сделать определенные выводы о тождественности или отличии физических условий в разных случаях формирования элементов ансамбля.

Напомним, что дифференциальная и интегральная функции распределения могут быть получены следующим образом. Предположим, в некотором ансамбле имеются элементы с разными характеристиками (например, диаметрами d_i), причем соответствующие количества N_i этих элементов различны при разных d_i . Поскольку каждая из характеристик d_i находится из наблюдений всегда с некоторой погрешностью, целесообразно для уменьшения ошибок провести усреднение, например построив гистограмму распределения количества элементов N_i по параметру d_i . Такая гистограмма, где в определенные интервалы значений $d_i + \Delta d_i$ будут попадать соответствующие количества элементов N_i , и есть дифференциальное распределение для данного ансамбля.

Индивидуальные гистограммы для разных ансамблей могут быть весьма различными — симметричными, асимметричными, узкими, широкими и пр., и чтобы описать их одним параметром необходимо рассмотреть зависимость типа

$$N = x^{-\alpha}, \quad (1)$$

где N — количество элементов с параметрами d_i (d_i)_{min} x .

Фактически это означает, что каждый раз мы суммируем количество всех элементов, которые на дифференциальной зависимости по оси абсцисс попадают в область справа от значения x .

Если, в частности, мы имеем очень узкое распределение, то для всех значений x далеко справа от его центра будем иметь $N = 0$, и только вблизи центра будем иметь $N = \text{const} = \text{const} \cdot x^0$ (т. е. $\alpha = 0$). Если же дифференциальное распределение является широким, то тогда будет существенно отличаться от нуля, притом тем больше, чем шире гистограмма дифференциального распределения. Таким образом можно составить представление о мере дисперсности характеристик данного ансамбля.

Для интегрального распределения энергий оптических солнечных вспышек было найдено значение $\alpha = 0.77$ [5]. Близкое к этому значение получено и для энергий красных вспыхивающих звезд типа UV Cet [3]. Согласно данным [5] это может свидетельствовать об общности физической природы процессов на Солнце и вспыхивающих звездах.

Такая точка зрения, однако, представляется не бесспорной. Действительно, различных статистических ансамблей может быть невообразимое множество, тогда как величина α заключается в относительно небольших пределах, примерно 0—10. Ясно, что некоторые совершенно различные по физической природе ансамбли могут иметь совпадающие или почти одинаковые значения величины α . Поэтому одинаковость или близость значений α для разных ансамблей еще не доказывает тождественность их физической природы.

Иное дело, если мы рассматриваем один и тот же процесс или явление. Тогда неодинаковость параметра α должна отражать не только

изменение статистики ансамбля, который представляет это явление или процесс, но и, весьма вероятно, изменение физики этого процесса или тех условий, при которых этот процесс протекает.

Соответствующий статистический анализ диаметров солнечных пятен в четырех последних циклах (№№ 20—23) сделан в работе [1]. Оказалось, что величина σ не зависит от чисел Вольфа, но показывает изменение с фазой цикла: в большинстве циклов (исключая цикл № 22) она максимальна в начале цикла, имеет промежуточное значение в максимуме и минимальное — на фазе спада. В работе [1] высказано предположение, что поскольку циклы 22 и 23 образуют хейловскую пару 22-летнего цикла, некоторая своеобразность изменения параметра σ в цикле № 22 могла быть предвестником нарушения правила Гневышева — Оля в последующем цикле № 23. В случае подтверждения такого предположения открывалась возможность для более надежных прогнозов нечетных циклов. Это, однако, следовало проверить на дополнительном материале наблюдений. В настоящей работе с этой целью анализируются новые данные, включающие семь 11-летних циклов, с 17-го по 23-й.

МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ И ЕГО ОБРАБОТКА

Были использованы такие источники данных о диаметрах солнечных пятен: а) бюллетень «Солнечные данные»; б) сайт Пулковской обсерватории (<http://www.gao.spb.ru/database/>); в) Гринвичский каталог (<http://solar.science.msfc.nasa.gov/greenwich/>).

Сначала строились зависимости для солнечных пятен всех диаметров больше 10 Мм (10000 км). Однако впоследствии выяснилось, что если для определения параметра σ строить зависимость (1) с логарифмическим масштабом по осям абсцисс и ординат, то линейный участок (необходимый для определения этого параметра), приходится в большинстве случаев на диапазон значений 50—90 Мм, соответствующий очень большим (видимым без телескопа) солнечным пятнам.

В области меньших и больших значений диаметров d имеют место нелинейные «завалы» на зависимостях, которые не позволяют найти здесь какое-нибудь конкретное значение σ (рис. 1).

Следует также отметить, что при построении зависимостей учитывались данные по всем пятнам — как правильным, так и сложным, неправильной формы. В последнем случае для пятна определялся наибольший и наименьший размеры d_{\max} и d_{\min} в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и средний диаметр $\langle d \rangle$ пятна находился как среднее геометрическое из этих величин:

$$\langle d \rangle = (d_{\max} d_{\min})^{1/2}. \quad (2)$$

Последнее, по существу, эквивалентно тому, что диаметр пятна оценивался как корень квадратный из их площади. Позже при работе с

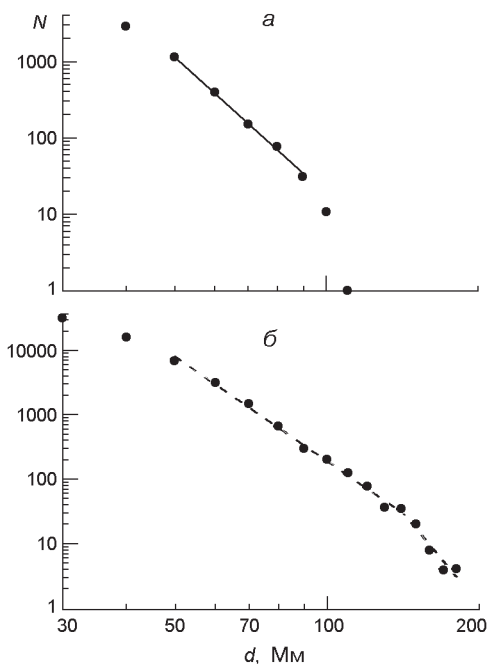


Рис. 1. Интегральное распределение количества N солнечных пятен по значениям диаметров d : a — для 21-го цикла, b — для циклов 18—23 (см. текст)

базами данных оказалось, что для наибольших пятен в группах имеются в каталогах готовые площади. Учитывая это, была построена (по правильным пятнам) калибровочная зависимость между площадью пятен (в миллионных долях полусферы) и их диаметрами (в Мм). Это ускорило обработку, поскольку позволило по площади пятна находить его диаметр без непосредственных измерений на гелиограммах (что делалось вначале).

Кроме того, для пятен недалеко от лимба (но не ближе 20° по гелиодолготе) учитывалось проекционное сокращение их диаметров. Пятна, которые находились еще ближе к лимбу, не учитывались.

Всего для каждого цикла (как видно из рис. 1 на примере цикла № 21) были проанализированы данные о нескольких тысячах пятен, а для всех семи циклов — около 30000 пятен.

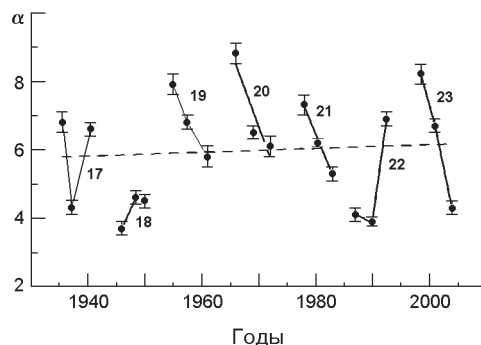
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ЦИКЛОВ №№ 17—23

Полученные значения параметра для последних семи циклов представлены на рис. 2. Видно, что циклы №№ 19, 20, 21 и 23 имеют качественно аналогичные изменения параметра, тогда как циклы №№ 17, 18 та 22 — оригинальные, не похожие на другие циклы.

В четырех условно «нормальных» циклах величина изменяется с фазой 11-летнего цикла монотонным образом, в целом уменьшаясь с фазой цикла. В «аномальных» циклах параметр ведет себя иначе:

а) в цикле № 18 все три значения (для фазы роста, максимума и спада) значительно ниже среднего 6.0 и близки к 4. Кроме то-

Рис. 2. Значения показателей интегрального распределения для всех семи циклов (обозначены цифрами). Штриховая линия — линейный тренд



го, этот цикл начинается не с большего, а с меньшего значения α ;

б) цикл № 22 также начинается по существу с наименьшего (в этом цикле) значения α . Максимальное значения параметра достигается не в начале цикла, а в его конце;

в) цикл № 17 имеет весьма низкое значение параметра (также

4) в его максимальной фазе. Изменение параметра α в этом цикле немонотонно: сначала параметр уменьшается, а затем растет.

Еще одна особенность интегральных распределений состоит в суммарной зависимости для всех циклов выделяются два линейных участка: в области диаметров 50—140 Мм и в области 140—180 Мм (рис. 1, б).

Таким образом, на этой зависимости нелинейный «завал» в области особо больших пятен почему-то исчезает, так что вполне можно определить два значения параметра: $\alpha = 5.3$ для пятен диаметром 50—140 мм и $\alpha = 10.5$ для особо больших пятен диаметром 140—180 мм. Возможно, среди суммы всех пятен действительно мог быть еще один статистический ансамбль с другим значением α .

Наличие этого второго ансамбля хорошо прослеживается и по дифференциальным распределениям. На рис. 3 показано сопоставление таких распределений для двух циклов хейловской пары, а именно 18 и 19. Видно, что в диапазоне площадей $S = 0 \dots 2000$ м. д. п. оба цикла отличаются мало, но для больших пятен (особенно в диапазоне $S = 4000 \dots 7000$ м. д. п.) — весьма существенно. В частности, цикл № 18 имеет такие большие пятна, которых в цикле № 19 вообще не было.

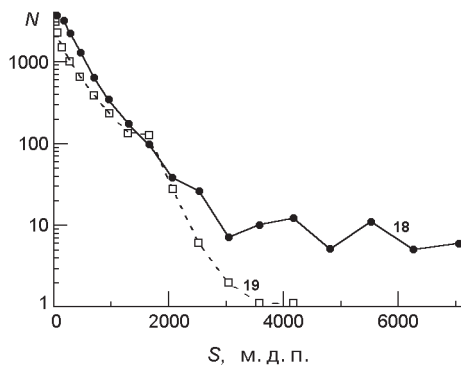


Рис. 3. Дифференциальные распределения количества N пятен по их площади S для циклов 18 и 19

ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРОВ НАИБОЛЬШИХ ПЯТЕН СО ВРЕМЕНЕМ

Интересную особенность солнечной активности в XX ст. подметил В. Н. Ишков [4]: он обнаружил, что в 18-м цикле (1944—1954 гг.) возникали аномально большие пятна — с площадью около 6000 м. д. п., тогда как в других циклах за последние 100 лет площадь пятен не превышала 3000—4000 м. д. п. (рис. 4).

Поскольку цикл 18 попадает в число «аномальных» по рассмотрению параметра (см. выше), было более детально изучено изменение диаметров наибольших пятен от цикла к циклу.

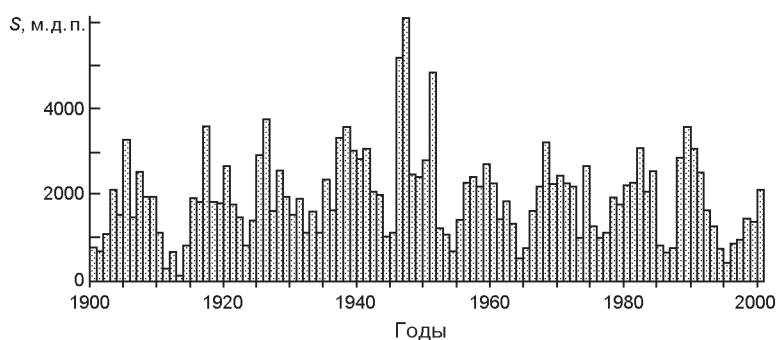


Рис. 4. Значения максимальных за год площадей пятен в 1900—2000 гг.

На рис. 4 представлены максимальные за год значения диаметров наибольших пятен согласно [4]. Видно, что наибольшие пятна с площадью свыше 6000 м. д. п. возникали не в одном цикле, а в двух: 17 и 18. На третьем месте в этом отношении стоит цикл 22 — тот же самый, который в рассмотрении параметра также проявил себя как «аномальный». Интересно также, что цикл № 19 — наиболее мощный по числам Вольфа в вековом цикле — почти никак не проявил себя среди других циклов по максимальной площади пятен: в нем максимальной площади пятен только в один месяц была близка к 4000 м. д. п.

Еще более очевидна выделенность циклов 17, 18 и 22, если взять последние десять циклов, а не семь (рис. 6). Видно, что наибольшие пятна были в 1939, 1946, 1947 и 1989 гг. Заметно также, что кривые изменений площадей солнечных пятен не имеют такой очевидной асимметрии, как кривые чисел Вольфа. Максимальные по размерам пятна возникали на фазе максимума или спада циклов, но никогда — на фазе минимума.

Таким образом, данные прямых измерений диаметров подтверждают, что циклы 17 и 18, были несколько необычными. Построенные для них дифференциальные и интегральные зависимости явно указывают на особенность типа второй моды в области особо больших пятен с диаметрами 140—180 Мм. Эта вторая мода выделяется и по по-

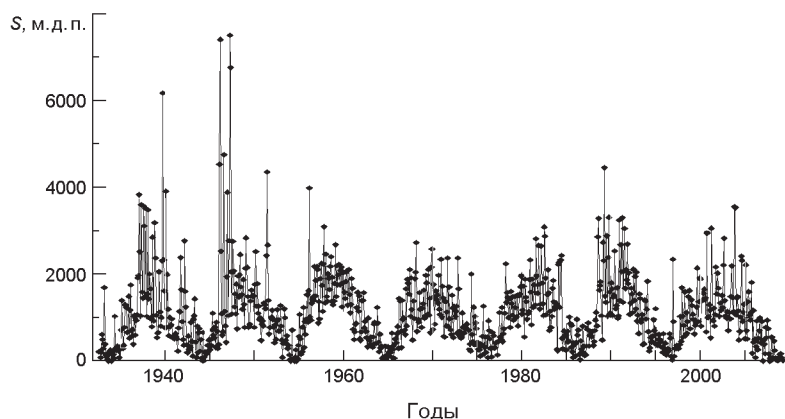


Рис. 5. Площади наибольших за месяц солнечных пятен (по оси ординат, в м.д.п.) для семи последних солнечных циклов

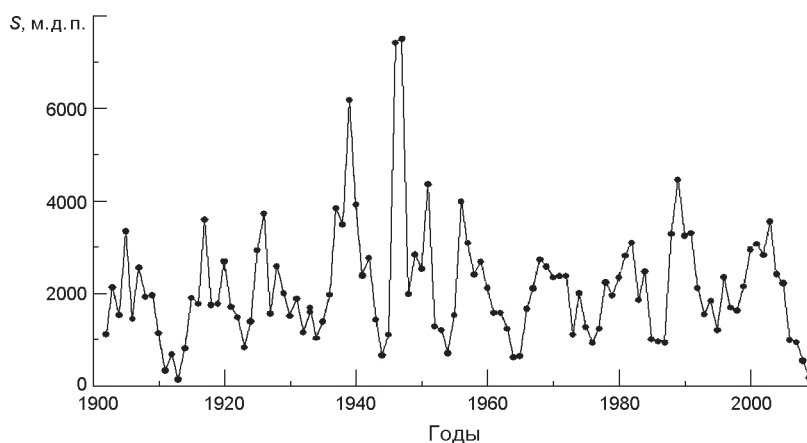


Рис. 6. Площади наибольших за год солнечных пятен в последних десяти солнечных циклах

казателю σ , и по появлению особо больших пятен на временной зависимости (рис. 5 и 6).

ВЫВОДЫ

Для последних семи циклов (№№ 17—23) найдено, что в интегральных распределениях в диапазоне диаметров 50–90 Мм показатель распределения σ в среднем равен 6.0 и не зависит от чисел Вольфа. В большинстве циклов (в четырех из семи) величина σ зависит от фазы цикла: она больше на фазе роста, имеет промежуточное значение в фазе максимума и минимальна на спаде активности. Иначе ведут себя три цикла, а именно № 17, 18 и 22, в которых параметр σ либо не изменяется с фазой цикла, либо эти изменения отличны от указанных выше. Оказалось, что циклы № 17 и 18 «аномальны» также и в том, что

в них наблюдались наибольшие за последние 80 лет солнечные пятна — с диаметром до 140—180 Мм. О природе этих гигантских пятен можно сделать следующие предположения.

1. Возможно, что появление таких пятен связано с резкими изменениями углового вращения Солнца. В работе [8] показано, что в нечетных циклах среднее значение скорости экваториального вращения больше, чем в четных. Использовались Гринвичские (1879—1976 гг.) и NOAA (1977—2002 гг.) данные о группах пятен. Резкие уменьшения обнаружены от цикла 13 к циклу 14 (0.017 мкрад/с), от цикла 17 к циклу 18 (0.008 мкрад/с) и от цикла 21 к циклу 22 (0.016 мкрад/с). Сделан вывод, что в эти периоды времени происходили резкие изменения дифференциального вращения Солнца. Поскольку в настоящей работе также найдены особенности в распределениях пятен в 17-, 18- и 22-м циклах, то это может быть следствием резких изменений дифференциального вращения Солнца.

2. Возможно, эти особо большие пятна представляют собой некий отдельный статистический ансамбль, образующийся в спорадически возникающей дискретной области конвективной зоны, где условия генерации магнитных полей существенно отличаются от обычных.

3. Особо большие пятна могут быть своеобразными кусками «реликтовых» магнитных полей солнечного ядра, всплывающих на поверхность транзитом сквозь зону лучистого переноса и конвективную зону.

На данный момент выбрать из этих гипотез одну не представляется возможным.

1. *Бабій В. П., Лозицький В. Г.* Особливості інтегрального розподілу діаметрів сонячних плям у 20–23 циклах сонячної активності // Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Астрономія. 2009. Вип. 45. С. 43–46.
2. *Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 296 с.
3. *Гершберг Р. Е.* Вспыхивающие звезды малых масс. М.: Наука, 1978. 127 с.
4. *Ишков В. Н.* Двадцать третий цикл солнечной активности // Земля и Вселенная. 2001. № 2. С. 3–12.
5. *Курочка Л. Н.* Распределение по энергиям 15000 солнечных вспышек // Астрон. журн. 1987.—64, № 2. С.
6. *Обридко В. Н.* Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985. 256 с.
7. *Соловьев А. А., Наговицын Ю. А.* Развитие диффузионной модели солнечного цикла: новый взгляд на структуру и природу хэйловской магнитной пары // Тр. IX Пулковской Междунар. конф. «Солнечная активность как фактор космической погоды». Санкт-Петербург: ГАО РАН, 2005. С. 447–452.
8. *Javaraiah J.* Prediction of strengths of long-term variations in sunspot activity // Solar Phys. 2003. 212, N 1. P. 23–49.

Поступила в редакцию 10.03.10