НЕОСЕССИМЕТРИЧНАЯ И ОСЕССИМЕТРИЧНАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В 1874–2016 гг.

Вернова Е.С.¹, Тясто М.И.¹, Баранов Д.Г.²

¹Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия;

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

NONAXISYMMETRIC AND AXISYMMETRIC COMPONENTS OF THE SUNSPOT DISTRIBUTION IN 1874–2016

Vernova E.S.¹, Tyasto M.I.¹, Baranov D.G.²

¹IZMIRAN, St. Petersburg Filial, St. Petersburg, Russia;

²A.F. Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

The study of axisymmetric and nonaxisymmetric components of solar activity (SA) was carried out using data of Greenwich USAF/NOAA (sunspot area, 1874–2016). The longitudinal distribution of activity over the Sun's disk was considered. To estimate the magnitude of the nonaxisymmetric component (longitudinal asymmetry), the method of vector summation of sunspot areas was used. Due to this approach, the contribution of sunspots uniformly distributed over the longitude was reduced, allowing to separate the nonaxisymmetric part of the activity. It is shown that at the maximum of SA, the nonaxisymmetric component is approximately one-third of the total area of sunspots, and two-thirds fall on the axisymmetric part. The Gnevyshev-Ohl rule manifests itself both for the area of sunspots and for axisymmetric component. Averaging all even and all odd cycles showed a significant excess of odd cycle height. The longitudinal asymmetry obeys another rule: in each group of four cycles (12–15, 16–19, 20–23) the 1st and 4th cycles were lower than the neighboring 2nd and 3rd cycles. To study long-period variations of the nonaxisymmetric component, the integral of longitudinal asymmetry for each individual SA cycle was used. It has been shown that the relative contribution of the nonaxisymmetric component tends to decrease over time in 12–23 cycles.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-53-56

В настоящее время представление об осесимметричном Солнце и осесимметричности проявлений солнечной активности (СА) не способно объяснить весь накопленный наблюдательный материал. Стало очевидно, что нарушение симметрии – не случайность, а закономерное проявление особенностей солнечного цикла. Долготная асимметрия, так же как N-S асимметрия, должна учитываться при создании новых моделей солнечного динамо [1]. В данной работе мы оцениваем вклад неосесимметричной компоненты в распределение солнечных пятен и рассматриваем ее изменения во времени.

Неосесимметричная компонента солнечной активности изучалась с использованием данных о площади и гелиокоординатах солнечных пятен за 1874–2016 гг.: Royal Observatory, Greenwich–USAF/NOAA Sunspot Data (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>). Мы применили метод

векторного суммирования площади солнечных пятен, который позволяет выделить неосесимметричную компоненту солнечной активности (долготную асимметрию LA) за счет подавления вклада стохастической части активности, равномерно распределенной по долготе [2].

Рис. 1. Площадь солнечных пятен (а) и компоненты распределения солнечных пятен: (b) осесимметричная компонента AS и (c) неосесимметричная компонента LA. Данные сглажены методом скользящего среднего по 13 точкам.

В качестве оценки осесимметричной компоненты (AS component) использована разность между общей суммарной площадью пятен и величиной неосесимметричной компоненты. Из рис. 1 видно, что осесимметричная (рис. 1b) и неосесимметричная (рис. 1c) компоненты изменяются в фазе с 11-летним циклом СА (площадь пятен, рис. 1a). Высоты циклов долготной асимметрии (рис. 1c) примерно в 3 раза меньше, чем для площади солнечных пятен. Таким образом, осесимметричная часть активности составляет в среднем $\sim 2/3$ от площади солнечных пятен. Площадь солнечных пятен и величина осесимметричной компоненты находятся в тесной связи друг с другом (коэффициент корреляции $R = 0.95$), в то время как связь площади пятен с неосесимметричной частью слабее, хотя и довольно высокая ($R = 0.78$).

Рис. 2. (а) Усредненные профили площади солнечных пятен Sp для четных (низких) и нечетных (высоких) циклов. Продолжительность циклов перед суммированием приведена к общему интервалу от 0 до 1. (б) То же для долготной асимметрии LA . В каждой четверке циклов суммировались отдельно низкие циклы (1, 4) и высокие (2, 3).

Для осесимметричной части, также как и для площади солнечных пятен, выполняется правило Гневывшева-Оля (Г-О) в следующей формулировке: четный цикл ниже, чем следующий за ним нечетный [3]. Это правило нарушается для циклов 22–23. Для долготной асимметрии (неосесимметричная часть солнечной активности) наблюдалась следующая схема чередования высоких и низких циклов: первая пара из каждой группы из 4 циклов (циклы 12–15, 16–19, 20–23) следовала правилу Г-О, следующая пара следовала антиправилу Г-О, т.е. четный цикл был выше следующего за ним нечетного. Такая 44-летняя цикличность (двойной цикл Хейла) сохранялась в течение 12 циклов (12–23 циклы).

В связи с большим статистическим разбросом солнечных данных указанные особенности не всегда очевидны. Мы усреднили данные путем суммирования отдельно площадей пятен всех четных и всех нечетных циклов. Перед суммированием циклы приводились к единой продолжительности путем замены времени на переменную x согласно формуле: $x = (t - t_1)/(t_2 - t_1)$, где t_1 и t_2 – начало и конец цикла. Результат такого суммирования для 5 четных и 5 нечетных циклов представлен на рис. 2а (циклы 12–21). Видно, что сумма нечетных циклов значительно выше, чем сумма четных циклов. Для долготной асимметрии схема суммирования была выбрана с таким расчетом, чтобы проверить чередование правила Г-О и антиправила в последовательных парах циклов. Из каждой четверки циклов в одну из сумм включались 1 и 4 циклы (низкие), в другую сумму – 2 и 3 циклы (высокие). Перед суммированием также все циклы приводились к общей длине цикла. Результат суммирования для 12 циклов (циклы 12–23) приведен на рис. 2б, который показывает существенное превышение высоких циклов над низкими для всех 12 циклов.

В максимуме солнечного цикла разница между высоким и низким усредненными циклами составляла для площади солнечных пятен (рис. 2а)

34% от величины активности. Аналогичное соотношение высоких и низких циклов для долготной асимметрии также имеет близкое значение – 35%, что свидетельствует о значимости явления чередования в долготной асимметрии циклов, подчиняющихся правилу и антиправилу Г-О.

Рис. 3. (a) Изменение интегралов Sp и LA в 12–23 солнечных циклах. Максимумы кривых приходятся на разные циклы (указаны стрелками). (b) Интеграл площади пятен Sp и относительный вклад неосесимметричной компоненты LA/Sp. Горизонтальные линии соответствуют средним значениям.

Мы рассмотрели интегральную характеристику солнечной активности: сумму площадей пятен Sp за каждый цикл. Аналогично были вычислены интегралы осесимметричной AS и неосесимметричной LA компонент, которые изменялись в тесной связи с интегралом Sp ($R = 0.99$ и 0.94 соответственно). При общем подобии кривых (рис. 3a), для долготной асимметрии самым высоким является 18 цикл, в то время как для площади пятен самым высоким является 19 цикл.

На рис. 3b приведены интеграл Sp и отношение интегралов LA/Sp. Среднее значение отношения отмечено горизонтальной линией на уровне 0.38. Наблюдается некоторая тенденция в изменении отношения LA/Sp со временем: для 12–16 циклов точки LA/Sp лежат выше среднего, в то время как для 17–23 циклов LA/Sp ниже среднего. Увеличение интеграла Sp приводит к уменьшению отношения. Однако при постоянном росте интеграла Sp в 17–19 циклах отношение в 18 цикле повышается, что подчеркивает особенность этого цикла для долготной асимметрии. Анализ поведения двух компонент – осесимметричной и неосесимметричной – на протяжении 13 циклов СА показывают, что их изменения носят регулярный характер и являются неотъемлемой частью солнечного цикла.

Литература

1. Pipin V.V., Kosovichev A.G. // *Astrophys. J.*, 813, 134, 2015.
2. Nagovitsyn Y.A., Nagovitsyna E.Y., Makarova V.V. // *Astron. Lett.*, 35, 564, 2009.
3. Vernova E.S., Tyasto M.I., Baranov D.G., Danilova O.A. // *Solar Phys.*, 295:86, 2020.