ФОРМА 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА ПО ЧИСЛУ ПЯТЕН И ПОЛЯРНЫХ ФАКЕЛОВ

Волобуев Д.М.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

THE SHAPE OF SUNSPOT CYCLE IN SUNSPOT NUMBERS AND POLAR FACULA

Volobuev D.M.

Pulkovo Observatory, St.-Petersburg, Russia

It is known that the evolution of the whole sequence of solar cycles in time could be described by varying a few parameters from cycle-to-cycle in a single empirical equation. Here we try to use our earlier one-parameter fit [1] for approximation not only sunspot numbers but also facular numbers recalculated to polar magnetic flux during last 100 years. We found that the shape of solar cycle is much more variable in facular numbers than in sunspot numbers so that the parameterization requires 4 parameters. Higher and lower cycles are clearly separated in facula but not in sunspot numbers. In phase space this represented as a bi-focal dynamics. We propose that this dynamics could be originated from magnetic dynamo equations truncated to the Lorenz type dynamic attractor.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-83-86

Введение

Задача параметризации формы цикла имеет ясную математическую постановку, решалась в десятках работ, и используется для долгосрочного прогноза цикла. Нам удалось показать [1], что для числа солнечных пятен приемлемая точность, порядка дисперсии 13-месячного осреднения, достигается уже двухпараметрической аппроксимацией. Если t_0 – известное время начала цикла, то эволюция числа пятен в цикле $R(t)$ определяется константами T_s и T_d :

$$R = \left(\frac{t - t_0}{T_s} \right)^2 e^{-\left(\frac{t - t_0}{T_d} \right)^2}. \quad (1)$$

Так что использование большего числа параметров не имеет смысла. В данной работе мы расширяем задачу параметризации цикла на число полярных факелов, которые являются прокси полоидального поля и «естественным» предиктором тороидального поля, т.е. числа пятен, в соответствии с моделями солнечного магнитного динамо.

Данные

Наиболее систематически данные по наблюдению полярных факелов в обсерваториях Mount Wilson (MWO) и Wilcox Solar Observatory (WSO) были обобщены по результатам серии работ Sheeley выполненных для раз-

ных эпох наблюдений [2]. Знакопеременное (с учетом знака магнитного поля) число факелов было подсчитано отдельно для каждого полушария Солнца, откалибровано по последней серии измерений и пересчитано в шкалу полярного магнитного потока на основе наблюдений SOHO MDI для широт выше $\pm 70^\circ$ каждого полушария. Усредненный по полушариям и приведенный интерполяцией к ежемесячным значениям абсолютный магнитный поток сдвинут по фазе относительно числа пятен SSN2 [3] (рис. 1).

Рис. 1. Модуль полярного магнитного потока Pf , усредненный по полушариям, пересчитан из числа полярных факелов [2] с интерполяцией до ежемесячных значений и усреднением по полушариям. Число солнечных пятен SSN2 [3], сглаженное окном 13 месяцев.

Результаты

Затянутый по времени высокий цикл 19/20 и ряд низких плосковершинных циклов полярных факелов не допускают одно- или двухпараметрической аппроксимации, поэтому мы использовали 4-х параметрическую аппроксимацию, построенную по образцу бинарной смеси (1), рис.(2).

$$Pf = \left(\frac{t-t_0}{T_{s1}} \right) e^{-\left(\frac{t-t_0}{T_{d1}} \right)^2} + \left(\frac{t-t_0}{T_{s2}} \right) e^{-\left(\frac{t-t_0}{T_{d2}} \right)^2} \quad (2)$$

11-летние циклы для полярных факелов имеют выраженное разделение амплитуд высоких и низких циклов (рис. 2, слева вверху), переход от низких циклов к высоким и обратно происходил скачками трижды за 100 лет (рис. 2, справа вверху) в отличие от циклов чисел пятен (рис. 2, внизу) где переход от низких к высоким циклам и обратно происходил почти равномерно. Поскольку полярный магнитный поток близок к максимуму в минимуме цикла, его значение в минимуме цикла является естественным прокси полоидального поля и может служить предиктором последующего максимума, но корреляция не велика (рис. 3, слева, $R = 0.67$), хотя параметризация цикла, за счет избавления от шумов, несколько улучшает эту зависимость (рис. 3, справа, $R = 0.74$).

Для анализа закономерностей 22-х летнего цикла мы использовали знакопеременный (альтернированный) ряд числа пятен и ряды полярного магнитного потока в каждом полушарии. Предполагая большое время диффузии из-за вмерзновенности магнитного поля в фотосфере и хромосфере, мы проинтегрировали знакопеременные ряды (рис. 4)

Рис. 2. Параметризация формы семейства 11-летних солнечных циклов. Аппроксимация формы циклов числа пятен (нижняя панель) и числа полярных факелов (верхняя панель) с использованием зависимости (2).

Рис. 3. Зависимость между полярным магнитным потоком в минимуме 11-летнего цикла и максимумом последующего цикла без параметризации (слева) и с параметризацией (справа).

Имеется существенный тренд накопления поля разноименного знака в полярных областях (рис. 4, слева) при этом в фазовом пространстве (рис. 4,

справа) сохраняется бифокальная структура. Такая динамическая структура характерна для аттрактора Лоренца, который предлагался в ранних моделях динамо для объяснения хаотической природы солнечного цикла [4].

Рис. 4. 22-х летний интегральный магнитный цикл. Интегрированные по времени временные ряды чисел пятен и полярный магнитный поток (справа) и фазовое пространство для этих рядов (слева).

Выводы

Форма 11-летних циклов полярного магнитного потока отличается большей вариабельностью и нелинейностью, чем форма 11-летних циклов числа пятен, и требует большего числа параметров (4) для своего описания.

Максимумы полярного магнитного потока разбиваются на две группы: «высоких» и «низких» циклов, $4 \pm 0.5 \cdot 10^{-22} \text{ Мх}$ и $1.7 \pm 0.5 \cdot 10^{-22} \text{ Мх}$.

Зависимость между полярным магнитным потоком в минимуме цикла и максимумом будущего цикла слабая, коэффициент корреляции 0.7, в области циклов средней амплитуды корреляция отрицательная.

Присутствует выраженная двухфокусная динамика в фазовом пространстве накопленного знакового полоидального и тороидального магнитных потоков Солнца для последних пяти 22-х летних циклов.

Литература

1. *Volobuev, D.M.* The shape of the sunspot cycle: A one-parameter fit // *Solar physics*, 2009, 258(2), pp.319-330.
2. *Munoz-Jaramillo, A., Sheeley, N.R., Zhang, J. and DeLuca, E.E.* Calibrating 100 years of polar faculae measurements: Implications for the evolution of the heliospheric magnetic field // *The Astrophysical Journal*, 2012, 753(2), p.146.
3. *Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J.M. and Cliver, E.W.* Revisiting the sunspot number. *Space Science Reviews*, 2014, 186(1), pp.35-103. <https://wwwbis.sidc.be/silso/newdataset>
4. *Ruzmaikin A.A.* The solar dynamo. In *Progress in Solar Physics 1985* (pp. 125-140). Springer, Dordrecht