ВАРИАЦИИ ФОРМЫ 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В РЯДЕ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА

Иванов В.Г.

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

SHAPE VARIATIONS OF THE 11-YEAR SOLAR ACTIVITY CYCLE IN THE SERIES OF WOLF NUMBERS

Ivanov V.G.

The Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

The shape of the 11-year activity cycle can be described by a set of parameters which includes its amplitude, the lengths of the ascending and descending phases and the position of the descending branch. Using the recalibrated sunspot number series we demonstrate that the shape of the cycle in the series was not stable during the last 270 years. It can be explained in two ways: either some characteristics of the solar activity mechanism really change, or the part of the sunspots number series, which corresponds to the XVIII century, contains errors, with the latter hypothesis being more probable.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-189-192

Одним из главных источников данных о солнечной активности за последние три века является ряд чисел Вольфа. С середины XIX века ежедневные числа Вольфа вычисляются на основе целенаправленных наблюдений Солнца, однако этот ряд содержит и историческую часть, восстановленную Вольфом по сделанным в XVIII и первой половине XIX века различными наблюдателями зарисовкам диска Солнца. Качество такой реконструкции закономерно падает по мере движения в прошлое. Несколько лет назад классический ряд Вольфа был рекалиброван [1], но основные изменения в нём касались XIX–XX веков, а самая ненадёжная историческая часть, относящаяся к XVIII веку, осталась неизменной (если не считать умножения на общий коэффициент 5/3). Представлял бы интерес метод оценки качества ряда Вольфа в прошлом *per se*, то есть без привлечения дополнительных источников информации.

Ниже мы описываем такой метод, основанный на изучении вариаций формы 11-летних циклов. Идея метода состоит в том, что если форма циклов в различные эпохи значительно меняется, это может говорить либо о изменении характеристик механизма цикличности, либо об ошибках в определении индекса.

Мы будем использовать среднемесячные значения рекалиброванного ряда чисел Вольфа SN [2] за 1749–2018 годы, сглаженные гауссовым фильтром с $\sigma = 7$ месяцев. На рис. 1 изображена форма циклов 1–24 для индекса SN (кружками отмечены максимумы циклов).

Традиционно форма цикла описывается его высотой $SN_{\max}$, длиной фаз роста и спада T_a и T_d , сумма которых $T_{\text{len}} = T_a + T_d$ равна его длине от минимума до минимума. Существует ещё одна характеристика цикла: как показано в [3], форма кривой во второй половине фазы спада имеет универсальную форму и различается в отдельных циклах лишь сдвигом вдоль оси времени. Минимизируя среднеквадратичную разницу между кривыми, можно добиться довольно близкого их совмещения на фазе спада — при этом каждый цикл будет характеризовать свой сдвиг T_{shift} (см. рис. 2).

Рис. 1.

Рис. 2.

Как видно из матрицы корреляций (таблица 1), указанные параметры не вполне независимы: T_a антикоррелирует с $SN_{\max}$ («правило Вальдмайера»), а T_{len} коррелирует с T_d . Таким образом, в качестве параметров, описывающих форму цикла, можно выбрать любые три сравнительно независимых из них, например, $SN_{\max}$, T_{len} и T_{shift} . (Момент минимума незаконченного цикла 24, согласно прогнозу SILCO [4], принят равным 2020.0.)

Таблица 1.

	$SN_{\max}$	T_a	T_d	T_{len}	T_{shift}
$SN_{\max}$	1.00	−0.80	0.39	−0.28	−0.49
T_a	−0.80	1.00	−0.48	0.35	0.20
T_d	0.39	−0.48	1.00	0.65	−0.45
T_{len}	−0.28	0.35	0.65	1.00	−0.30
T_{shift}	−0.49	0.20	−0.45	−0.30	1.00

В таблице 2 приведены отклонения параметров формы цикла от среднего в единицах стандартного отклонения для тех случаев, когда эти величины по модулю не ниже 1.5. В таблице есть цикл 4, аномальная длина и затянутая фаза спада которого давно обсуждается (см., например, работу [5] и ссылки в ней), но имеются и другие циклы, форма которых заметно отклоняется от средней. Среди девяти таких отклонений в выбранных нами параметрах формы цикла $SN_{\max}$, T_{len} и T_{shift} , т.е. для 12.5% от всех 72 значений этих параметров, семь относятся к эпохе реконструкции (циклы 1–9). Допустим, что вариации каждого параметра для всех циклов описы-

ваются одним распределением. Тогда численное моделирование показывает, что среди циклов, выходящих за 87.5-й процентиль отклонений, должно начитываться 3 ± 1 цикла из эпохи реконструкции, а вероятность того, что их 7, составляет всего 1.3%, что указывает на ложность проверяемой гипотезы. Выбор другой тройки параметров, описывающих форму циклов, качественно на этот вывод не влияет.

Таблица 2.

	$SN_{\max}$	T_{len}	T_{shift}	T_a	T_d
2		-1.5			
3		-1.8		-1.4	
4		+2.4	-2.0		+3.0
5	-1.6			+1.9	
6	-1.7				
7				+2.3	-2.1
9			-2.3		
19	+1.9				
24			+1.8		

То же различие в форме циклов разных эпох можно проиллюстрировать и иным способом. Приведём все циклы к одной амплитуде, нормировав каждый из них на соответствующую константу (рис. 3), после чего будем считать характеристикой различия в формах циклов i и j среднеквадратичную разность ρ_{ij} между соответствующими кривыми. Матрица ρ изображена на рис. 4 (темные области соответствуют бóльшим различиям между кривыми). Можно заметить, что циклы 10–24 достаточно близки по форме, а у циклов эпохи реконструкции (1–9) сходство формы как между собой, так и с циклами более поздней эпохи, заметно меньше.

Рис. 3.

Рис. 4.

Таким образом, 11-летние циклы исторического периода (до цикла 10) в ряде чисел Вольфа разнообразнее по форме, чем периода прямого

наблюдения. Если бы в этом отклонении по форме была какая-то единая тенденция, можно было бы предполагать, что она вызвана изменениями режима работы механизма цикличности. Однако такой тенденции не наблюдается, так как вариации параметров имеют разные знаки (см. таблицу 2). Поэтому правдоподобнее выглядит альтернативное предположение: числа Вольфа, восстановленные по историческим данным, содержат ошибки, ведущие к искажению их формы. В качестве возможных искажений можно, например, указать на слишком позднее начало цикла 3 (1775.5) с аномально короткой восходящей ветвью (3.1 года), и на слишком поздний максимум цикла 7 (1830.0), ведущий к аномальному соотношению длин восходящей и нисходящей ветвей. Хотя сами по себе эти аномалии не могут быть единственным основанием к сдвигу экстремумов циклов, они могут послужить аргументами в пользу необходимости провести дополнительный анализ соответствующих мест исторической части ряда чисел Вольфа.

Данная работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-02-00088, Госзадания и программы ПРАН-Минобрнауки КП19-270.

Литература

1. *F. Clette, L. Svalgaard, J.M. Vaquero, E.W. Cliver* // Space. Sci. Rev., 2014, v.186, pp.35–103.
2. <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
3. *V.G. Ivanov* // Geomagnetism and Aeronomy, 2018, v. 58, No.7, pp.930–936
4. <http://www.sidc.be/silso/predisc>
5. *I.G. Usoskin, K. Mursula, R. Arlt, G.A. Kovaltsov* // ApJ, 2009, v.700, pp.L154–L157.