ЕЩЁ ОДНО ПРАВИЛО ВАЛЬДМАЙЕРА И ФОРМА 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

Иванов В.Г.

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

ONE MORE WALDMEIER'S RULE AND FORM OF 11-YEAR CYCLE

Ivanov V.G.

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

The form of the 11-year cycle of solar activity is used to be approximately described by its amplitude A and three key moments: those of the minimum ($T_{\min}$), maximum ($T_{\max}$) and next minimum ($T_{\min2}$). The classical Waldmeier rule states a strong anticorrelation between A and the length of the ascending branch $T_{\max} - T_{\min}$, meanwhile, correlation between A and the length of the descending branch $T_{\min2} - T_{\max}$ is much weaker. Following Waldmeier, one can introduce a moment T_V near the end of the descending branch where the activity falls to some low level of activity V . Correlation between the time interval $T_V - T_{\max}$, as opposed to $T_{\min2} - T_{\max}$, proved to be rather high. We demonstrate that this link, which can be called "one more Waldmeier rule", is well consistent with the fact that the descending branch of the 11-year cycle has a universal form.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-191-194

Одна из самых известных особенностей формы 11-летнего цикла солнечной активности описывается правилом Вальдмайера (ПВ) [1]: длина фазы роста цикла антикоррелирует с его мощностью. Однако имеются и другие, менее известные соотношения между высотой цикла и длинами различных его фаз, которые мы обсудим ниже.

Для приблизительного описания формы 11-летнего цикла обычно достаточно задать его амплитуду $A_{\max}$ (максимальное значение изучаемого индекса пятенной активности A) и три характерных момента: $T_{\min}$ — момент минимума (начала) цикла, $T_{\max}$ — момент максимума, $T_{\min2}$ — момент второго минимума. Ниже мы будем также использовать обозначения $T_{\max2}$, $A_{\max2}$ — максимум и амплитуда цикла, следующего по отношению к данному, и обозначим $T_a = T_{\max} - T_{\min}$, $T_d = T_{\min2} - T_{\max}$, $T_{\text{сyc}} = T_a + T_d$ длины фаз роста, спада и полную длину цикла соответственно.

В качестве меры выраженности ПВ можно использовать коэффициент корреляции $r_{\text{wr}} = r(T_a, T_{\max})$, и он различается для разных индексов и видов усреднения. На рис.1 изображена зависимость $r_{\text{wr}}(L)$ для различных рядов ежемесячных пятенных индексов (W — число Вольфа, SN — число солнечных пятен по версии WDC-SILSO [2], G — число групп расширенного Гринвичского каталога [3], GSN — Group Sunspot Number [4], все ряды взяты с 1875 года), сглаженных бегущим средним за L месяцев. Заметим,

что выраженность ПВ в индексах W и SN примерно одинакова, а в G и GSN — значительно хуже, хотя для G эта выраженность довольно высока при более сильном усреднении $L = 40$ месяцев. Мы будем работать с индексом SN и использовать усреднение с годовым масштабом $L = 13$, для которого $r_{wr} = -0.77$ (см. также рис. 2а, где точки соответствуют циклам и по ним построена линейная регрессия $SN = 347 - 38.1 \cdot T_a$).

Рис. 1.

Рис. 2.

Известно, что у длины фазы спада и полной длины цикла связь с мощностью цикла значительно слабее, чем для ПВ: $r(T_d, SN_{max}) = +0.39$ (рис. 2б) и $r(T_{cyc}, T_{max}) = -0.30$ (рис. 2в). Примечательно, что довольно сильна связь длины данного цикла с амплитудой следующего: $r(T_{cyc}, SN_{max2}) = -0.69$ (рис. 2г, регрессия $SN = 530 - 31.7 \cdot T_{cyc}$). Эта связь была впервые, по-видимому, отмечена в работе [5].

Отмеченное выше различие в силе связи длин разных фаз цикла с его высотой хорошо вписывается в рамки выдвинутой Вальдмайером «эруптивной гипотезы» [1]. Согласно Вальдмайеру, последовательность 11-летних циклов — это череда сравнительно независимых друг от друга «эрупций» активности, в каждой из которых индекс активности возрастает от нуля в момент T_{min} до максимума в момент T_{max} , а затем снова плавно спадает к нулю. Таким образом, можно говорить о моментах начала отдельной эрупции активности и её максимуме, но её второй минимум, очевидно, находится на бесконечности. Моменты же минимумов индекса активности определяются способом наложения нисходящей ветви старого и восходящей ветви нового цикла и могут быть, вообще говоря, связаны с характеристиками обоих. Отмеченное выше различие в коэффициентах корреляции говорит о том, что момент T_{min} сильнее связан с характеристиками нового цикла активности, чем старого.

Для того чтобы охарактеризовать положение ветви спада в цикле, Вальдмайер предложил использовать момент, в который уровень активности падает до некоторого порогового значения W_0 (обозначим этот момент

T_{W0}). Он обратил внимание на то, что при выборе порогового числа Вольфа $W_0 = 7.5$ величина $T_{W0} - T_{\max}$ хорошо коррелирует с длиной цикла. Взяв для индекса SN порог $SN_0 = 25$ и обозначив соответствующий момент T_{25} , для интервала $T_{d25} = T_{25} - T_{\max}$ получаем $r(T_{25} - T_{\max}, SN_{\max}) = +0.72$. Эта и другие корреляции между характеристиками циклов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

	$SN_{\max}$	$SN_{\max2}$	T_a	T_d	T_{d25}	T_{cyc}	$T_{\text{cyc}25}$
$SN_{\max}$	1	+0.25	-0.77	+0.39	+0.72	-0.30	+0.17
$SN_{\max2}$	+0.25	1	-0.42	-0.31	+0.20	-0.69	-0.19
T_a	-0.77	-0.42	1	-0.46	-0.70	+0.45	+0.12
T_d	+0.39	-0.31	-0.46	1	+0.76	+0.59	+0.52
T_{d25}	+0.72	+0.20	-0.70	+0.76	1	+0.13	+0.62
T_{cyc}	-0.30	-0.69	+0.45	+0.59	+0.13	1	+0.68
$T_{\text{cyc}25}$	+0.17	-0.19	+0.12	+0.52	+0.62	+0.68	1

Естественно было бы назвать эту корреляцию «вторым правилом Вальдмайера». Однако в работе [6] этот термин применён к упомянутой выше связи между T_{cyc} и $SN_{\max2}$. Чтобы не вступать в конфликт с терминологией этой работы, здесь мы назовём связь между T_{d25} и $SN_{\max}$ «ещё одним правилом Вальдмайера» (ЕОПВ).

Рис. 3.

В работах [7, 8] было показано, что нисходящие ветви 11-летнего цикла хорошо аппроксимируются кривой, форма которой не зависит от высоты цикла, а вся зависимость от последней состоит в индивидуальном сдвиге этой кривой вдоль оси времени. Этот факт иллюстрируется на рис. 3, где циклические кривые (тонкие линии) сдвинуты таким образом, чтобы удалённые от максимума части их фаз спада накладывались друг на друга и аппроксимировались кривой

(жирная линия), заданной уравнением (см. [8]).

$$A(t_0 - t) = \alpha^2 \log SN + 2\alpha \cdot SN + SN^2 / 2,$$

где $A = 4.17 \cdot 10^4 \text{ год}^{-1}$, $\alpha = 248$, $t_0 = 14.8$ года.

Очевидно, что на том участке нисходящей ветви, который универсален для всех циклов (он начинается примерно в двух-трёх годах от максимума), любая точка, в частности — описанный выше момент T_{25} , может быть выбрана в качестве меры сдвига фазы спада цикла. Если бы мы вы-

брали другой порог SN_0 , это сдвинуло бы все точки T_{25} примерно одинаково и практически не сказалось бы на величине приведённых в Таблице 1 корреляций.

Отметим также, что из-за разного знака корреляций T_a и T_{d25} с амплитудой цикла, сумма этих длин $T_{\text{сyc}25} = T_{25} - T_{\text{min}}$ коррелирует с этой ней весьма слабо: $r(T_{\text{сyc}25}, SN_{\text{max}}) = +0.17$.

Таким образом, можно выделить три характерных момента в развитии 11-летнего цикла, T_{min} , T_{max} и T_{25} , интервалы между которыми хорошо связаны с его мощностью: длина ветви роста $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ антикоррелирует с величиной максимума цикла (ПВ), а длина $T_{\text{max}} - T_{25}$, характеризующая положение ветви спада, коррелирует с этой величиной (ЕОПВ). Момент T_{25} , маркирующий снижение активности до заданного низкого уровня, близок к моменту второго минимума $T_{\text{min}2}$, однако положение первого, в отличие от второго, определяется лишь свойствами данного цикла, а не деталями его наложения на последующий. Такие свойства момента T_{25} связаны с отмеченной выше универсальностью формы нисходящей ветви 11-летнего цикла.

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-00090 и программой Президиума РАН № 28.

Литература

1. *M. Waldmeier* // *Astronomische Mitteilungen der Eidgenössischen Sternwarte Zürich*, 1935, v. 14, pp. 105–136.
2. WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels, <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
3. Greenwich — USAF/NOAA Sunspot Data, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
4. *D.V. Hoyt, K.H. Schatten* // *Solar Phys.*, 1998, v. 179, pp. 189–219.
5. *D.H. Hathaway, R.M. Wilson, E.J. Reichmann* // *Sol. Phys.*, 1994, v. 151, pp. 177–190.
6. *Takalo J. and Mursula K.* // 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p. 19303;
Takalo J. and Mursula K. // *Astron. & Aph.*, 2018, in print.
7. *R.H. Cameron and M. Schüssler* // *Astron. & Aph.*, 2016, v. 591, A46.
8. *V.G. Ivanov* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, v. 58, No. 7, pp. 930–936.