

СВЯЗЬ ДЛИНЫ И АМПЛИТУДЫ 11-ЛЕТНИХ ЦИКЛОВ ДЛЯ ТЫСЯЧЕЛЕТНЕГО РЯДА ПЯТЕННОГО ИНДЕКСА

Иванов В.Г.

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

LINK BETWEEN LENGTH AND AMPLITUDE OF 11-YEAR CYCLES FOR MILLENIUM SUNSPOT INDEX SERIES

Ivanov V.G.

The Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo, Saint Petersburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-131-134>

In the recent work by Usoskin et al. a series of annual sunspot indices for years 971–1899 was reconstructed. Using this series, we study "the Length-Amplitude Rule" (LAR), according to which the length of a given 11-year solar cycle from minimum to minimum anti-correlates with the amplitude of the next cycle. We show that approximately since the 14th century two regimes can be selected in the series: I) epochs of normal activity, when LAR holds true; II) epochs of Maunder, Spörer and Wolf grand minimums, when there are no noticeable links between amplitudes and lengths of cycles. Before the 14th century the LAR and its relation to the level of global activity of the Sun is less pronounced, which, probably, is a consequence of inaccuracies of 11-year cycle parameters determination in this epoch.

Одно из проявлений нелинейного характера солнечной цикличности — связь между амплитудами циклов и длинами их частей. Например, известна антикорреляция между длиной ветви роста цикла и его амплитудой («правило Вальдмайера») [1]. Отмечается также антикорреляция между длиной данного 11-летнего цикла и амплитудой следующего (правило «Длина-Амплитуда», или ПДА) [2–6].

В недавней статье Усоскина и др. [7] предложена реконструкция ряда среднегодового числа Вольфа за 997–1899 годы (SN_R). Авторы, в частности, показали, что для некоторых из 85 одиннадцатилетних циклов выполняется правило Вальдмайера. Интересен вопрос о том, проявляется ли ПДА в этой реконструкции, его выяснению и посвящена данная работа.

Результаты реконструкции представлены в [7] в двух формах: (а) годовой ряд индекса (рис. 1) и (б) таблица 1, в которой приведены годы экстремумов циклов, а также флаги качества выделения цикла q . Так как эти формы являются результатом разных способов усреднения 10000 случайных реализаций модели, данные (а) и (б) не полностью согласуются [8]: экстремумы из (б) иногда отличаются от локальных экстремумов ряда (а). Поэтому мы корректируем данные (б), сдвинув в них минимумы пятнадцати и максимумы семи циклов на годы, соответствующие экстремумам ряда (а). Зная моменты минимумов $t_m(k)$ (они даны в [7] с точностью до года, но мы уточняем их, проводя интерполяцию ряда по трём годам вблизи мини-

мум), мы получаем длины ряда от минимума до минимума $T_{mm}(k) = t_m(k+1) - t_m(k)$, а зная моменты максимумов — амплитуды циклов $SN_M(k)$, где k — номер цикла. В результате мы получаем ряд SN_R [9], с которым и будем работать ниже.

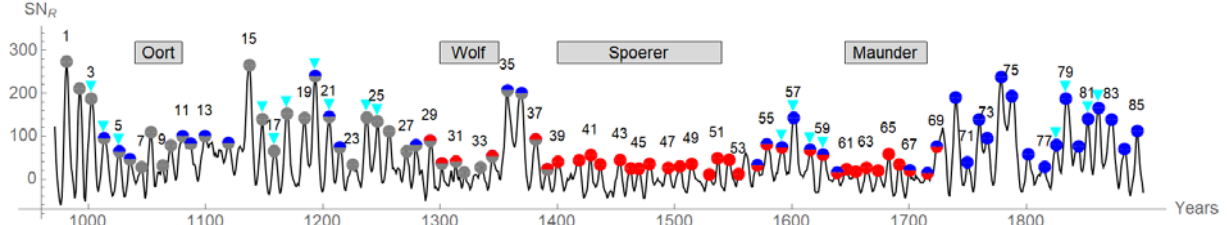


Рис. 1. Годовой ряд реконструкции [7] и его 11-летние циклы (циклы нумерованы согласно [7], цикл № 73 соответствует первому циклу цюрихской нумерации). Голубые треугольники — пары качественных циклов с $q \geq 4$, синие и красные кружки — циклы, которые относятся к ветвям I и II соответственно, серые кружки — циклы вне ветвей, двухцветные кружки обозначают циклы промежуточного типа, относящиеся к нескольким группам. Серые прямоугольники помечают эпохи глобальных минимумов.

На рис. 2а изображена зависимость ПДА для ряда Вольфа SN_W за 1700–2022 годы [10], а на рис. 3 — для реконструированного ряда SN_R . Можно видеть, что для полного набора циклов этого ряда (анти)корреляции между длиной и амплитудой нет (рис. 3а), однако она появляется, если брать только 11 пар качественных циклов с $q \geq 4$ (рис. 3б).

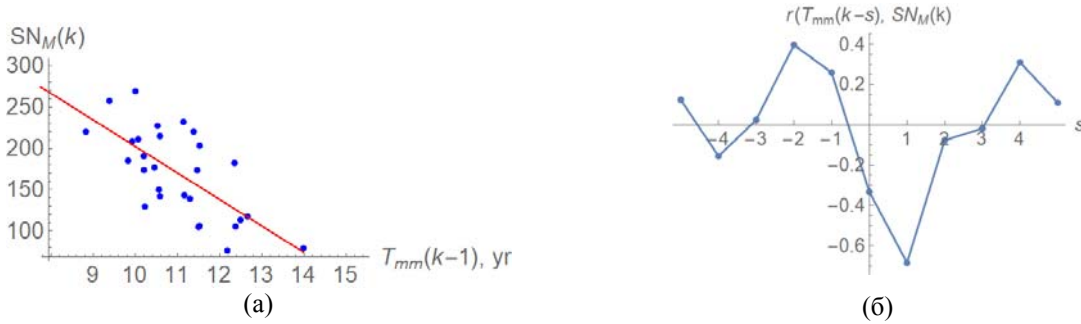


Рис. 2. ПДА для SN_W : (а) связь между $T_{mm}(k-1)$ и $SN_M(k)$, коэффициент корреляции $r = -0.68$, значимость $p = 3 \cdot 10^{-5}$, регрессия $SN_M(k) = (523 \pm 74) - (32 \pm 7) T_{mm}(k-1)$; (б) коэффициент корреляции $r(T_{mm}(k-s), SN_M(k))$ как функция s .

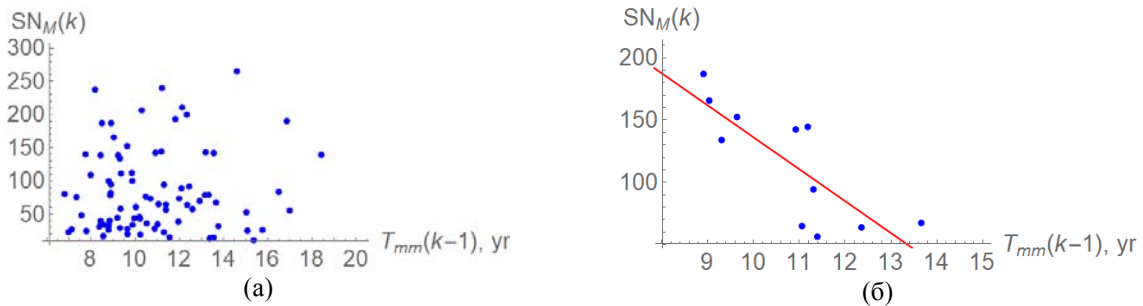


Рис. 3. ПДА для SN_R : (а) связь между $T_{mm}(k-1)$ и $SN_M(k)$ для полного ряда: $r = +0.08$, $p = 0.24$; (б) та же связь для пар циклов с $q \geq 4$: $r = -0.80$, $p = 0.002$, $SN_M(k) = (393 \pm 70) - (26 \pm 6) T_{mm}(k-1)$.

Построим ряды $SN_{M,4}$ и $T_{mm,4}$, сглаживая ряды SN_M и T_{mm} с помощью скользящего среднего по 4 циклам. Эта операция уменьшает разрешение по времени, но снижает ошибки реконструкции параметров циклов. Можно видеть, что с начала XV века (т.е. с начала минимума Шпёрера, в циклах 38–85) зависимость между $SN_{M,4}(k)$ и $T_{mm,4}(k-1)$ отчётливо делится на две ветви (рис. 4а): для ветви I, с индексом $SN \geq 65$, ПДА выполняется, а для ветви II, с $SN < 65$, связь между длиной цикла и амплитудой мала при любых сдвигах (рис. 4б). На рис. 1 показано, как распределены эти циклы по времени. Циклы ветви II тяготеют к эпохам глобальных минимумов Шпёрера (1400–1540) и Маундера (1645–1715), а циклы ветви I — к эпохам нормальной глобальной активности. Заметим, что из-за сглаживания мы можем относить к той или иной ветви только группы из четырёх циклов. Из-за этого существуют «промежуточные» циклы, которые входят в четвёрки, соответствующие обеим ветвям. Эти циклы, как легко ожидать, сосредоточены в зонах, переходных между двумя режимами 11-летней цикличности. При этом для ПДА ветви I максимум антикорреляции, как и в случае ПДА для SM_W , приходится на сдвиг $s = 1$ (ср. рис. 2б и 4б).

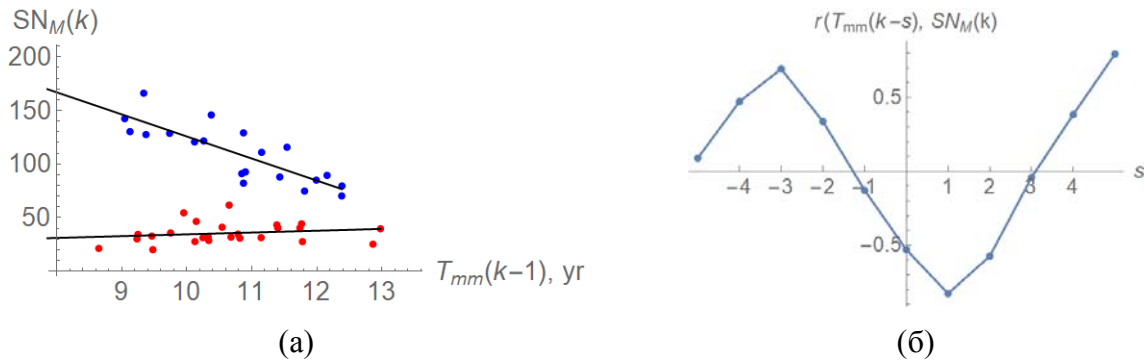


Рис. 4. (а) ПДА для части ряда $SN_{R,4}$, начинающейся с цикла 38. Каждая точка соответствует четверке циклов сглаженного ряда. Для верхней ветви I (синие точки) $r = -0.83$, $p = 3 \cdot 10^{-6}$, $SN_{M,4}(k) = (332 \pm 36) - (21 \pm 3) T_{mm,4}(k-1)$, для нижней ветви II (красные точки) $r = +0.33$, $p = 0.05$; (б) коэффициент корреляции $r(T_{mm,4}(k-s), SN_{M,4}(k))$ в зависимости от сдвига s для ветви I.

Используя выделенные ветви, мы можем классифицировать оставшиеся циклы ряда SN_R №№ 1–37 следующим образом (рис. 5): четверку циклов будем относить к ветви I (II), если расстояние по оси ординат Δ между соответствующей точкой и регрессионной кривой для ветви I (II) меньше, чем для ветви II (I), и при этом $\Delta \leq 2.5 \sigma_x$, где σ_x — остаточное стандартное отклонение для регрессии I (II) (для ветви I $\sigma_x = \sigma_I = 14.8$, а для ветви II $\sigma_x = \sigma_{II} = 9.3$). Таким образом, мы разбиваем четверки циклов на три группы: относящиеся к ветвям I, II и не относящиеся ни к какой из ветвей (при этом, как и выше, мы можем получать «промежуточные» циклы, не поддающиеся точной классификации). Из рис. 1 видно, что в глобальном минимуме Вольфа располагаются циклы, которые можно отнести

к ветви II, однако при дальнейшем движении в прошлое связь ветвей с уровнем глобальной цикличности размывается — например, циклы глобального минимума Оорта частично относятся к ветви I. Возможно, такая ситуация связана с ухудшением качества выделения параметров циклов в первой трети прошлого тысячелетия.

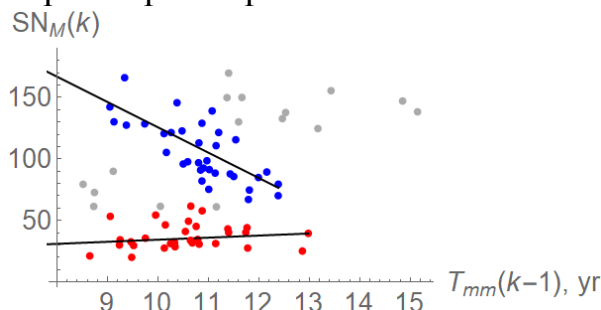


Рис. 5. Классификация циклов ряда SN_R . Синие кружки — четвёрки циклов, относящиеся к ветви I, красные — к ветви II, серые — вне ветвей.

Итак, мы показали существование ПДА в тысячелетней реконструкции пятенного индекса SN_R [1]. Для хорошо выделенных циклов (при $q \geq 4$) соответствующая ПДА антикорреляция равна -0.80 , то есть правило выражено даже сильнее, чем в 300-летнем ряде Вольфа SN_W ($r = -0.68$). При этом, начиная примерно с XIV века, в ряде индекса отчётливо выделяются два режима:

I) эпохи нормальной активности, в которые ПДА выполняется; II) эпохи глобальных минимумов активности (Шпёрера, Маундера и Вольфа), в которые связь амплитуды цикла с его длиной слаба или отсутствует. Есть указания на то, что эти же два режима существовали и до XIV века, однако невысокая надёжность выделения 11-летних циклов в эту эпоху не позволяет говорить об этом уверенно.

Литература

1. Waldmeier M. // Astron. Mitt. Eidgenössischen Sternwarte Zürich, 1935, v. 14, pp. 105–136.
2. Chernosky E.J. // Publ. Astron. Soc. Pac., 1954, v. 392, pp. 241
3. Hathaway D.H., Wilson R.M., Reichmann E.J. // Solar Phys., 1994, v. 151, pp. 177–190.
4. Solanki S.K., Krivova N.A., Schüssler M., Fligge M. // Astron. Astrophys., 2002, v. 396, pp. 1029–1035.
5. Hathaway D.H. // Living Rev. Solar Phys., 2015, v.12, pp. 4–87.
6. Ivanov V.G. // Geomagnetism and Aeronomy, 2021, v. 61, No. 7, pp. 1029–1034.
7. Usoskin I., Solanki S.K., Krivova N.A. et al. // Astron. Astrophys., 2021, v.649, A141.
8. Усоскин Илья, частная переписка.
9. <http://www.gaoran.ru/personal/ivanov/data1/>
10. Clette F, Svalgaard L, Vaquero J.M., Cliver E.W. // Space. Sci. Rev., 2014, v. 186, pp. 35–103; https://www.sidc.be/silso/DATA/SN_y_tot_V2.0.dat