

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ “ПОТЕРЯННОГО” ЦИКЛА И ПРАВИЛА ГНЕВЫШЕВА–ОЛЯ В РЯДЕ ПЛОЩАДЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ЗА 410 ЛЕТ

© 2024 г. Ю. А. Наговицын^{1,2*},

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 30.06.2024 г.

После доработки 16.08.2024 г.; принята к публикации 11.09.2024 г.

Правило Гневывшева–Оля рассмотрено для нового ряда площадей солнечных пятен на четырехвековой шкале Наговицына и Осиповой (MNRAS 505, 1206, 2021). Принята гипотеза Усокина и др. (Astron. Astrophys. 370, L31, 2001) о существовании на ветви спада цикла № 4 цюрихской нумерации дополнительного малого цикла. Это приводит к изменению четности циклов ранее № 5. Выделены 11-летние циклы в XVII в. Их средняя продолжительность — от минимума до минимума — составляет $T = 8.9 \pm 1.4$ года. Новые данные и подходы позволили заключить, что правило Гневывшева–Оля выполняется для 410-летнего интервала в целом без исключения пары циклов №№ 4–5 цюрихской нумерации, принимаемого в правиле ранее.

Ключевые слова: солнечная активность, цикличность, солнечные пятна.

DOI: 10.31857/S0320010824080059, EDN: LXVPYJ

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные пятна наблюдались невооруженным глазом в Китае, начиная с первых веков до НЭ (Виттманн, Сю, 1987) и с начала XVII в. в Европе, с помощью изобретенного телескопа первыми наблюдателями были Фабрициус, Галилей, Шейнер, Гарриот.

Первоначальная гипотеза Шейнера о том, что пятна не принадлежат Солнцу, а являются проекцией на солнечный диск планет внутри орбиты Меркурия, была отвергнута сравнительно краткосрочными — от месяцев до года-двух — наблюдениями, показавшими отсутствие периодичности в числе и конфигурации пятен на соответствующих временах. Во второй половине XVIII в. Горребов провел многолетние наблюдения Солнца и открыл цикличность пятнообразования с периодом около десятка лет. Однако его открытие не было воспринято. Только после длительных (более двух десятков лет) наблюдений астронома-любителя Г. Швабе в Дессау и его вывода о периодичности появления групп пятен Р. Вольф поддержал это открытие и организовал регулярные профессиональные наблюдения пятен. Он также ввел знаменитый индекс, называемый ранее числом Вольфа W (или R), а сейчас — числом пятен SN , такой, что

$$SN = k(10 \cdot GN + f), \quad (1)$$

где GN — число групп пятен, а f — число собственно самих пятен, k — коэффициент, для Вольфа равный 1.

Путем обработки архивов исторических телескопических наблюдений пятен Вольф представил ряды среднемесячных значений W с 1749 г., среднегодовых с 1700 г. и установил присутствие во всех этих данных цикла, который мы сейчас называем 11-летним (с оговоркой, что продолжительность этого цикла изменяется в пределах нескольких лет). Была предложена цюрихская нумерация циклов, так что циклом № 0 стал цикл с максимумом в 1750 г. Преемник Р. Вольфа — основной наблюдатель солнечной активности в Цюрихе — А. Вольфер несколько изменил правила подсчета пятен и их групп, введя поправочный коэффициент в (1) $k = 0.6$. Уже в наше время, в 2016 г., эта система подсчета была преобразована в современную версию 2.0, в отличие от существовавшей до этой даты версии 1.0.

После обнаружения Дж.Хэйлом магнитной природы пятен (1908) и главным образом после его же открытия смены характера полярности биполярных групп в последовательных 11-летних циклах, стало понятно, что физическим циклом пятнообразования является 22-летний (цикл Хэйла), так что циклы Швабе–Вольфа объединены попарно. Тёрнер (1913), а затем Людендорф (1931) обосновывали предположение, что первую половину цикла Хэйла образует нечетный 11-летний цикл, а вторую — четный по цюрихской нумерации. Гневывшев и Оль (1948) опубликовали результат, который стал в дальнейшем называться правилом Гневывшева–Оля (ПГО). Ими была рассмотрена интегральная величина — суммарное число пятен за цикл, в современных обозначениях

*Электронный адрес: nag-yury@yandex.ru

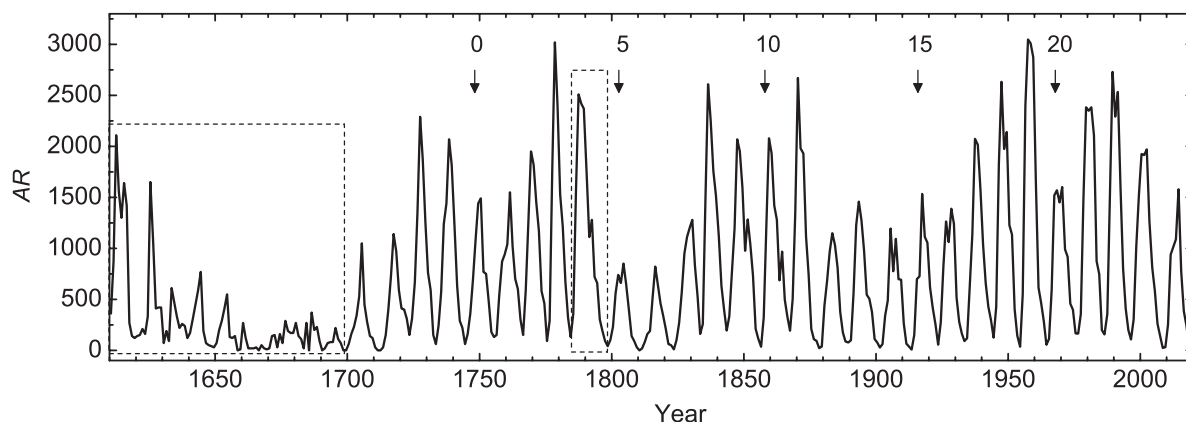


Рис. 1. Ряд суммарных площадей солнечных пятен по Наговицыну и Осиповой (2021). Стрелками обозначены циклы в цюрихской нумерации. Пунктиром обозначены времена ряда, специально обсуждаемые в этой работе.

ΣSN , — и было показано, что корреляция четного цикла ΣSN_E с последующим нечетным ΣSN_O высокая, а корреляция ΣSN_O с последующим четным ΣSN_E низкая. Таким образом, последовательные циклы четный E и нечетный O образуют пару, в которой нечетный, как правило, имеет большую величину. В литературе имеется много проверок и интерпретаций результата, полученного Гневашевым и Олем. Ссылки на большинство из них содержатся в работе Наговицына и др. (2024), поэтому в настоящей статье мы их не приводим. В цитируемой работе было разобрано “классическое” ПГО в индексе чисел пятен SN на интервале с 1700 г. по наше время.

ИНДЕКС ПЛОЩАДЕЙ ПЯТЕН

В конце XX в. Д. Хойт и К. Шаттен предложили рассматривать индекс GN , входящий в (1), в качестве самостоятельного индекса (Хойт, Шаттен, 1998), умножив его на 12.08 — для близости к шкале SN — и обозначив GSN . В настоящее время имеется несколько версий временных рядов GN : длительный ряд Свальгаарда и Шатена (2016) и менее длительные Усопкина и др. (2016), Клайвера и Линга (2016), Хаджистергоса и др. (2017).

Кроме того, существует еще один индекс пятенной активности — суммарная площадь пятен AR , — ведущий свое начало от У. Деларю (Деларю и др., 1870). Наиболее длительный наблюдательный ряд этого индекса — гринвичский: 1874–1976 гг. Неоднократно ставился вопрос о продлении этого ряда в однородной с ним системе. В ряде работ (Бальмачева и др., 2005; Наговицын и др., 2009; Фоукал, 2014; Муносырамайи и др., 2015; Мандал и др., 2020) было показано, что с этой точки зрения наилучшим является киловодский ряд.

Созданию четырехвекового ряда AR были посвящены наши работы: Наговицын (2009), Наговицын и др. (2016), Наговицын и Осипова (2021). Наиболее

приемлемым с нашей точки зрения является ряд, полученный в последней из этих работ, основанный на использовании зависимости AR от SN версии 2.0 на разных фазах 11-летнего цикла, также на эксплуатации связи AR и GN для XVII в. Этот ряд приведен на рис. 1, стрелками обозначены циклы в цюрихской нумерации. На нем и далее единицы измерения AR — миллионные доли видимой полусферы Солнца (мдп — mvh).

“ПОТЕРЯННЫЙ” ЦИКЛ

Правило Гневашева—Оля в точной формулировке содержит оговорку о том, что пара цюрихских циклов №№ 4–5 является исключением из корреляционного соотношения, и должна быть удалена из статистики. Это обстоятельство, названное “фазовой катастрофой” (Витинский и др., 1986), вызывает вопрос о выполнении ПГО в целом. Так, в применении к индексу AR посмотрим, как выглядит зависимость суммарных площадей пятен нечетного цикла ΣAR_O от величины ΣAR_E предыдущего четного цикла для интервала с 1700 г. по наше время (рис. 2). Понятно, что даже без статистических тестов пара циклов №№ 4–5 является исключением из общей зависимости. Попробуем преодолеть это обстоятельство.

В ряде работ Усопкиным и др. (2001, 2003, 2009) обосновывалось предположение, что на ветви спада сверхдлинного (13 лет от минимума до минимума и 17 от максимума до максимума) цикла № 4 присутствует потерянный в цюрихском исчислении отдельный малый цикл (см. пунктир на рис. 1). В качестве обоснования предлагались новые архивные данные наблюдений Штаудахера и Гамильтона и обнаруженное увеличение широты пятен на фоне ее спада на нисходящей ветви цикла № 4. Датой нового минимума становился 1793 г. Для полноты изложения заметим, что в ряде работ (Кривова и др., 2002; Арлт, 2008; Джианг и др., 2011) приводились аргументы против гипоте-

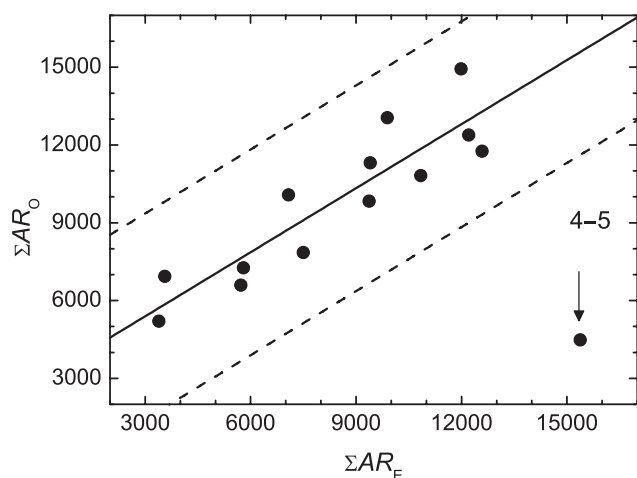


Рис. 2. Зависимость суммарной за цикл среднегодовой площади пятен нечетного цикла от этой же величины предыдущего четного цикла (с 1700 г. по н/вр). Пунктир — удвоенное среднеквадратическое отклонение. Стрелкой показана пара циклов 4–5, выпадающая из общей зависимости.

зы Усоскина и его коллег. В частности, в последней из этих работ эти аргументы основывались на физической модели переноса магнитного потока.

В работе Усоскина и др. (2001) рассматривалось также ПГО на основе *GSN* в предположении “потерянного” цикла. В настоящее время мы, вероятно, должны заключить, что ряд *GSN* содержит изменяющиеся со временем потери информации, приводящие к значимому тренду. На рис. 3 приведено сравнение ряда *GSN* и ряда *GN* современной версии Свальгаарда–Шаттена (2016). С 1700 г. первый из них имеет значимый (на уровне 8.4σ) положительный линейный тренд $b = 0.194 \pm 0.023$, второй значимого тренда не имеет: $b = 0.0012 \pm 0.0019$.

В этой работе мы будем рассматривать ПГО для сумм площадей пятен ΣAR за цикл при введении в оборот дополнительного цикла, так что для циклов цюрихской нумерации перед № 4 изменится четность, как и в статье Усоскина и др. (2001). Суммы площадей будем рассчитывать, учитывая, что соседние циклы перекладываются в минимумах, поэтому при вычислении ΣAR значения среднегодовых AR в эти годы разделим пополам и отнесем каждую половину к соседствующим циклам. Перед тем как перейдем к, собственно, рассмотрению ПГО, рассмотрим циклы до 1700 г. — во времена Маундеровского минимума и несколько раньше.

ЦИКЛЫ В XVII ВЕКЕ

В работе Наговицына и Осиповой (2021) получены среднегодовые значения AR , в том числе и для времен Маундеровского минимума и периода, ему предшествующего. Данные для этих времен не достаточно надежные (рис. 1), и необходимы специальные подхо-

ды для выделения отдельных циклов.

Рассчитаем сглаженные за три соседние точки среднегодовые $\overline{AR}_i$ в год i :

$$\overline{AR}_i = \frac{1}{4}(AR_{i-1} + 2AR_i + AR_{i+1}) \quad (2)$$

и найдем их минимумы в годы первого столетия телескопических наблюдений солнечных пятен (рис. 4). Оговоримся, что в период с 1660 по 1680 гг. циклы выделяются ненадежно. Для нахождения их минимумов на этом промежутке мы выбирали именно локальные минимальные по сравнению с соседними значениями $\overline{AR}_i$ и считали, что продолжительность отдельных циклов не может быть больше 13 лет (как и на “надежном” промежутке с 1700 г. по наше время). Полученная средняя продолжительность циклов в XVII в. составила $T = 8.9 \pm 1.4$ г. Такая сравнительно малая продолжительность циклов в грандиозном минимуме согласуется с данными в работах Вакеро и др. (2015) и Ян и др. (2023).

После проведенных процедур нам нужно изменить цюрихскую нумерацию циклов до цикла № 5. Заметим, что четность всех циклов после пятого не изменится. В табл. 1 приведены характеристики циклов в нашей новой и старой цюрихской нумерации.

ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА–ОЛЯ В ИНДЕКСЕ СУММАРНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ПЯТЕН В ПОСЛЕДНИЕ 400 ЛЕТ

После процедур уточнения локализации некоторых 11-летних циклов ряда площадей, описанных в предыдущих разделах, мы можем протестировать и сравнить связи четных циклов E с последующими нечетными O и, наоборот, нечетных с последующими четными, фигурирующие в ПГО.

Рассмотрим ΣAR за циклы с 1610 г. по наше время, составив эмпирические соотношения, и аппроксимируем их линейными зависимостями в форме:

$$\Sigma AR_O = a_{OE} + b_{OE} \Sigma AR_E, \quad \Sigma AR_E = a_{EO} + b_{EO} \Sigma AR_O. \quad (3)$$

Методом наименьших квадратов получаем

$$a_{OE} = 1380 \pm 910, \quad b_{OE} = 0.96 \pm 0.12, \\ R_{OE} = 0.89, \quad D_{OE} = 4.28 \times 10^6, \quad n_{OE} = 19, \quad (4)$$

$$a_{EO} = 2200 \pm 1500, \quad b_{EO} = 0.57 \pm 0.17, \\ R_{EO} = 0.61, \quad D_{EO} = 10.8 \times 10^6, \quad n_{EO} = 20. \quad (5)$$

Здесь R — коэффициент корреляции, D — остаточная дисперсия, n — объем выборки. Полученные зависимости приведены на рис. 5.

Сравним зависимости (а) и (б) рис. 5. В работе (Наговицын и др., 2024) отмечено, что статистическое сравнение коэффициентов корреляции с целью

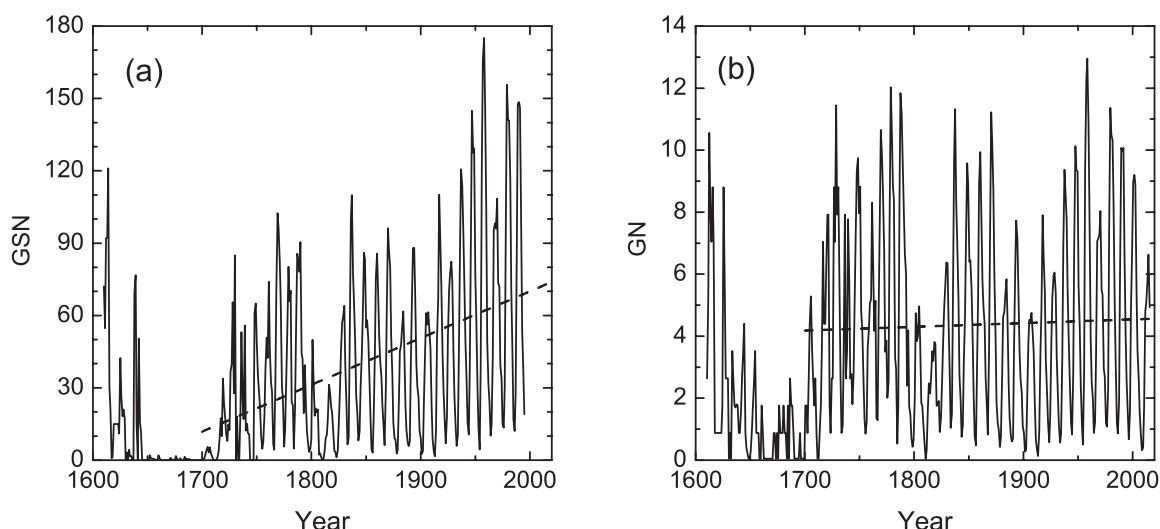


Рис. 3. Ряды: (a) *GSN* Хойта и Шаттена (1998); (b) *GN* Свальгаарда и Шаттена (2016). Пунктиры — линейные тренды рядов после 1700 г.

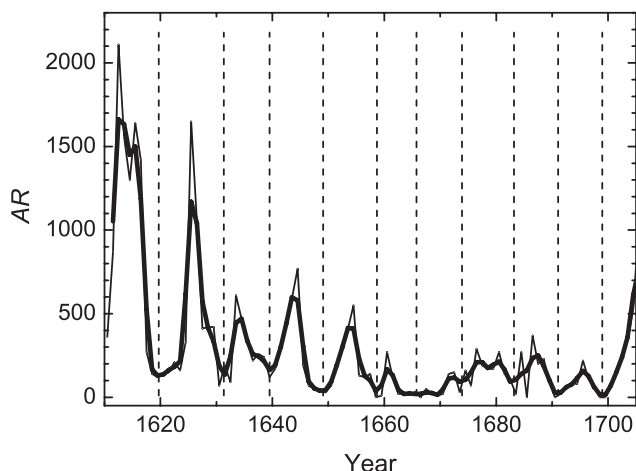


Рис. 4. 11-летние циклы в индексе суммарных площадей пятен вблизи Маундеровского минимума: по Наговицыну и Осиповой (2021) — тонкая линия; сглаженные по (2) значения — жирная. Вертикальные пунктирные линии обозначают минимумы циклов.

различия тесноты связей возможно, строго говоря, только для больших выборок, $n \geq 30$. Было предложено сравнивать не R , а дисперсии D . Для этого существует мощный тест Фишера. Однако для его проведения необходимо, чтобы соблюдалось нормальное распределение выборок. Проверим это обстоятельство.

Для теста на нормальность остаточных среднеквадратических отклонений (4)–(5) проведем, следуя (Наговицын и др., 2024), тест Шапиро–Уилка (1965). После необходимых процедур получаем, что распределение этих величин на уровне значимости $\alpha = 0.05$ не противоречит гипотезе об их нормальном распределении.

Далее, из (4) и (5) получаем отношение дисперсий

$$F_{\text{obs}} = \frac{D_{EO}}{D_{OE}} = 2.52. \quad (6)$$

Критическое значение в распределении Фишера–Снедекора при числе степеней свободы $k_1 = n - 3 = 17$ (большая дисперсия), $k_2 = n - 3 = 16$ (меньшая) и $\alpha = 0.05$ будет $F_{\text{crit}} = 2.31$. Таким образом, гипотеза о равенстве дисперсий (4) и (5) отвергается на выбранном уровне значимости. ПГО о разнице тесноты последовательных связей в зависимости от четности циклов подтверждается.

В ПГО содержалось также утверждение о том, что нечетный цикл, как правило, имеет большую величину, чем предыдущий, образующий с ним пару. Проверим это утверждение для нашего ряда. Обозначив величину разности в паре $\Delta = \Sigma AR_O - \Sigma AR_E$, ее среднее $\bar{\Delta}$ и дисперсию D_{Δ} , получаем

$$t_{\text{obs}} = \left| \frac{\bar{\Delta}\sqrt{n}}{\sqrt{D_{\Delta}}} \right| \approx \frac{1143}{461} \approx 2.48. \quad (7)$$

Критическое значение распределения Стьюдента при $\alpha = 0.05$ составляет $t_{\text{crit}} = 2.09$, т.е. $t_{\text{obs}} > t_{\text{crit}}$. Таким образом, утверждение ПГО о большей величине нечетного цикла по сравнению с предыдущим четным на уровне значимости $\alpha = 0.05$ также статистически не опровергается.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты этой статьи, продолжающей работу (Наговицын и др., 2024), следующие.

Правило Гневешева–Оля рассмотрено для нового ряда площадей солнечных пятен на четырехвековой шкале (Наговицын, Осипова, 2021).

Таблица 1. Нумерация циклов — новая и цюрихская, год минимального значения среднегодовых суммарных площадей пятен и суммы среднегодовых AR за цикл

Новый номер цикла	Номер цикла по Цюриху	Год начала цикла	ΣAR , мдп	Новый номер цикла	Номер цикла по Цюриху	Год начала цикла	ΣAR мдп
–15	—	1610.5	9550	6	6	1810.5	3555
–14	—	1619.5	5165	7	7	1823.5	6928
–13	—	1631.5	2375	8	8	1833.5	12202
–12	—	1639.5	2660	9	9	1843.5	12382
–11	—	1648.5	1960	10	10	1856.5	10843
–10	—	1658.5	475	11	11	1867.5	10818
–9	—	1665.5	420	12	12	1878.5	5800
–8	—	1673.5	1530	13	13	1889.5	7265
–7	—	1682.5	1245	14	14	1901.5	5722
–6	—	1691.5	640	15	15	1913.5	6598
–5	–4	1699.5	3390	16	16	1923.5	7085
–4	–3	1711.5	5205	17	17	1933.5	10073
–3	–2	1723.5	9365	18	18	1944.5	11990
–2	–1	1733.5	9840	19	19	1954.5	14931
–1	0	1744.5	7495	20	20	1964.5	9886
0	1	1755.5	7850	21	21	1976.5	13047
1	2	1766.5	9400	22	22	1986.5	12585
2	3	1775.5	11320	23	23	1996.5	11767
3	4	1784.5	13755	24	24	2008.5	6368
4	—	1793.5	1620	25	25	2019.5	—
5	5	1798.5	4480				

Принята гипотеза Усокина и др. (2001) о существовании на ветви спада цикла № 4 цюрихской нумерации дополнительного малого цикла. Это приводит к изменению четности циклов, предшествующих циклу № 5.

Выделены 11-летние циклы в XVII в. Их средняя продолжительность — от минимума до минимума — составляет $T = 8.9 \pm 1.4$ года. Такая сравнительно малая продолжительность циклов в грандиозном минимуме Маундера согласуется с результатами в работах Вакеро и др. (2015) и Ян и др. (2023).

Новые данные и подходы позволили заключить, что ПГО в индексе площадей пятен выполняется для 410-летнего интервала в целом, включая минимум Маундера, причем без исключения пары циклов №№ 4–5 цюрихской нумерации, принимаемого пра-

вилом ранее.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Мировой центр данных SILSO (Королевская обсерватория, Бельгия, Брюссель) за открытую политику использования данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арлт (R. Arlt), Solar Phys. **247**, 399 (2008).
2. Бальмачеда и др. (L.A. Balmaceda, S.K. Solanki, and N. Krivova), Mem. Soc. Astron. Italiana **76**, 929 (2005).
3. Вакеро и др. (J.M. Vaquero, G.A. Kovaltsov, I.G. Usoskin, V.M.S. Carrasco, and M.C. Gallego), Astron. Astrophys. **577**, A71 (2015).

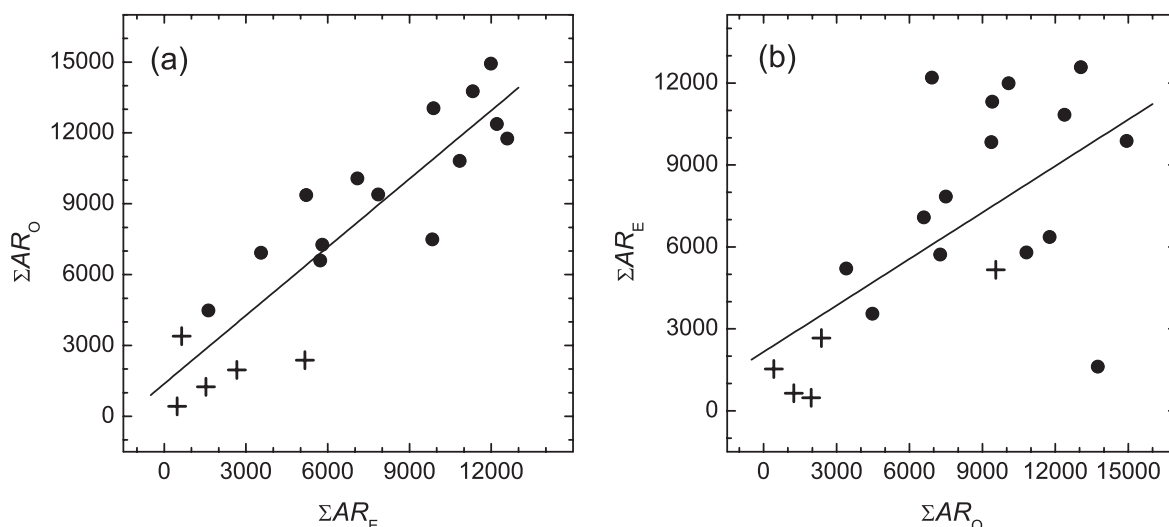


Рис. 5. Зависимости суммарной за цикл среднегодовой площади пятен нечетного от предыдущего четного цикла (а) и четного от предыдущего нечетного (б). Кружки соответствуют значениям после 1700 г., крестики представляют 17-й век. Прямые линии — зависимости (3) с коэффициентами (4) и (5).

4. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В., Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца (М.: Наука, 1986).
5. Витманн, Сю (A.D. Wittmann and Z.T. Xu), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **70**, 83 (1987).
6. Гневышев М.Н., Оль А.И., *Астрон. журн.* **25**, 18 (1948).
7. Деларю и др. (W. De la Rue, B. Stewart, and B. Loewy), *Philos. Trans.* **160**, 389 (1870).
8. Джианг и др. (J. Jiang, R.H. Cameron, D. Schmitt, and M. Schussler), *Astron. Astrophys.* **528**, A83 (2011).
9. Клайвер, Линг (E.W. Cliver and A.G. Ling), *Solar Phys.* **291**, 2763 (2016).
10. Кривова и др. (N.A. Krivova, S.K. Solanki, and J. Beer), *Astron. Astrophys.* **396**, 235 (2002).
11. Людендорф (H. Ludendorff), *Zeit. Astrophys.* **2**, 370 (1931).
12. Мандал и др. (S. Mandal, N.A. Krivova, S.K. Solanki, N. Sinha, and D. Banerjee), *Astron. Astrophys.* **640**, id. A78 (2020).
13. Мунос-Йарамийо и др. (A. Munoz-Jaramillo, et al), *Astrophys. J.* **804**, 12 (2015).
14. Наговицын, Осипова (Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Osipova), *MNRAS* **505**, 1206 (2021).
15. Наговицын и др., *Письма в Астрон. журн.* **35**, 625 (2009). [Yu.A. Nagovitsyn, E.Yu. Nagovitsyna, and V.V. Makarova, *Astron. Lett.* **35**, 564 (2009)].
16. Наговицын и др., *Астрон. журн.* **93**, 819 (2016b) [Yu. A. Nagovitsyn, A.G. Tlatov, and E.Yu. Nagovitsyna, *Astron. Rep.* **60**, 831 (2016)].
17. Наговицын и др., *Астрон. журн.* **101**, 56 (2024) [Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Osipova, and V.G. Ivanov, *Astron. Rep.* **68**, 89 (2024)].
18. Свальгаард, Шаттен (L. Svalgaard and K.H. Schatten), *Solar Phys.* **291**, 2653 (2016).
19. Тёрнер (H. Turner), *MNRAS* **74**, 82 (1913).
20. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, K. Mursula, and G.A. Kovaltsov), *Astron. Astrophys.* **370**, L31 (2001).
21. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, K. Mursula, and G.A. Kovaltsov), *Astron. Astrophys.* **403**, 743 (2003).
22. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, K. Mursula, R. Arlt, and G.A. Kovaltsov), *Astrophys. J.* **700**, L154 (2009).
23. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, G.A. Kovaltsov, M. Lockwood, K. Mursula, M. Owens, and S.K. Solanki), *Solar Phys.* **291**, 2685 (2016).
24. Фоукал (P. Foukal), *Solar Phys.* **289**, 1517 (2014).
25. Хаджистергос и др. (T. Chatzistergos, I.G. Usoskin, G.A. Kovaltsov, N.A. Krivova, and S.K. Solanki), *Astron. Astrophys.* **602**, A69 (2017).
26. Хойт, Шаттен (D.V. Hoyt and K.H. Schatten), *Solar Phys.* **179**, 189 (1998).
27. Хэйл (G.E. Hale), *PASP* **20**, 220 (1908).
28. Шапиро, Уилк (S.S. Shapiro and M.B. Wilk), *Biometrika* **52**, 591 (1965).
29. Ян и др. (L. Yan, F. He, X. Yue, Y. Wei, Y. Wang, S. Chen, et al.), *AGU Advances* **4**, e2023AV000964 (2023).