

УДК 523.9

АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ФРАГМЕНТОВ ЦИКЛА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА И ПРОГНОЗ НА ПОЛЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. С. В. Яковлева^{1, *}, С. В. Старченко^{1, **}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: svyakov@inbox.ru

**e-mail: sstarchenko@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 23.05.2024 г.

Рассмотрены автокорреляции фрагментов ряда чисел Вольфа (версия V2) с целью прогнозирования на 6 лет (полцикла солнечной активности). Из физических и оптимальных соображений использовались фрагменты, подобные полутора циклам. Тестирование успешно осуществлялось на достаточно надежных парах фрагментов ряда, состоящих из фиксированного и сдвигаемого по времени фрагмента. Для тестирования выбиралась пара, если коэффициент корреляции при совмещении составляющих ее частей был 0.91 и более. Использовалась оригинальная модификация фиксированного фрагмента и следующих за ним участков ряда. Аналогичным образом сделаны прогнозы на 6 лет после 2023 г., исходящие из фрагмента (2008.5–2023.5), имеющего коэффициенты корреляции от 0.81 до 0.96 с фрагментами (1978.5–1993.5), (1901.5–1916.5), (1922.5–1937.5), (1964.5–1979.5), (1985.5–2000.5). Максимальное значение числа Вольфа (161 ± 30) ожидается в середине 2024 г.

Ключевые слова: циклы солнечной активности, числа Вольфа, корреляции, прогноз.

DOI: 10.31857/S0016794024060013, **EDN:** QOZFMT

1. ВВЕДЕНИЕ

Переменная активность Солнца изменяет космическую среду Солнечной системы, что проявляется в изменении потоков солнечной радиации, солнечных магнитных полей и солнечных энергетических частиц. В свою очередь, это влияет на работу космических и наземных технических систем (пилотируемые космические полеты, космическая навигация и аэронавигация, радары, высокочастотная радиосвязь, наземные линии электропередачи и т. д.) и определенным образом — на климат и живых организмов на Земле. Вот почему важно заранее знать уровень солнечной активности в солнечном цикле. Наиболее часто используемым параметром солнечной активности является число Вольфа, которое характеризует количество солнечных пятен на видимой поверхности Солнца. Поэтому изучение корреляционных свойств чисел Вольфа W преимущественно преследует прогностические цели, например, [Витинский, 1973; Ишков и Шibaев,

2006; Abdel-Rahman and Marzouk, 2018; Petrovay, 2020; McIntosh et al., 2020].

Многолетние наблюдения показывают, что количество солнечных пятен на поверхности Солнца (что является показателем тороидальной составляющей магнитного поля Солнца) увеличивается и уменьшается циклически со средней периодичностью 11 лет. За исключением эпизодов больших минимумов активности, например, минимума Маундера, эта тенденция сохранялась на протяжении последних четырех столетий. На рис. 1 представлена эволюция числа Вольфа за последние 200 лет в версии $V2$ из (<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>). Она охватывает как достоверные циклы солнечной активности, начиная с 10-го, так и “условно достоверные”, которыми считают циклы 8 и 9, см. подробности в работе [Ишков, 2013].

Очевидно, что хотя период солнечного цикла лишь незначительно меняется от цикла к циклу, существует значительная изменчивость его

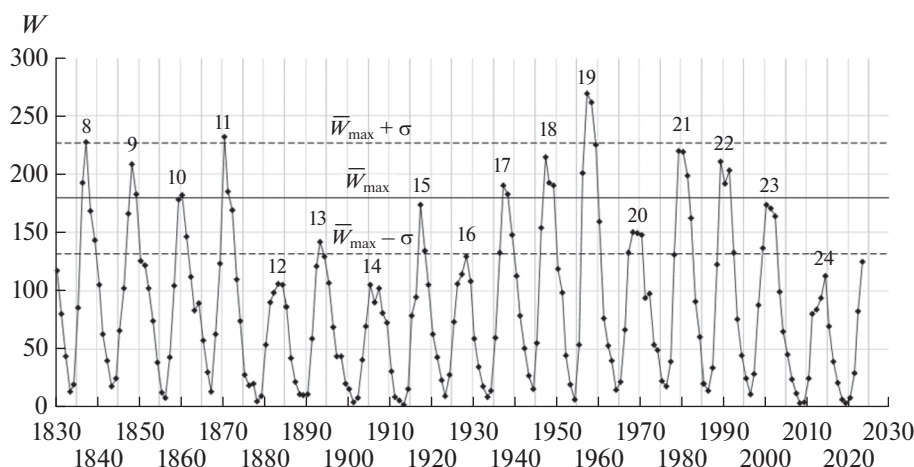


Рис. 1. Изменение среднегодовых числа Вольфа W с 1830 по 2023 г. в версии V2 из (<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>). Цифрами обозначены максимумы рассматриваемых циклов, \overline{W}_{\max} — максимальное значение в цикле, σ — стандартное отклонение.

амплитуды, измеряемая (усредненным за год) пиковым числом солнечных пятен. Для этого 200-летнего интервала мы установили среднюю амплитуду цикла солнечных пятен 179.4 ± 47.3 . Экстремальные солнечные циклы, которые лежат в этом диапазоне (среднее плюс среднеквадратичное отклонение σ), классифицируются как высокие циклы, а циклы, которые лежат ниже этого диапазона (среднее минус σ), классифицируются как низкие циклы. Отметим, что только один цикл (19) был чрезвычайно высоким, а три солнечных цикла (12, 14 и 24) были чрезвычайно низкими. Фактически, недавно завершившийся 24-й солнечный цикл оказался самым низким циклом прошлого столетия. Во временных рядах солнечных пятен нет заметной закономерности в изменчивости амплитуд от одного цикла к другому, что делает их прогнозирование сложной задачей.

Прогноз солнечной активности на несколько лет вперед так же, как прогноз характеристик следующего цикла, является одной из востребованных задач физики Солнца. Однако, к сожалению, она до сих пор так и не решена. На протяжении десятков лет перед каждым максимумом цикла появляются статьи, посвященные попыткам прогноза времени наступления и величины максимума предстоящего цикла (см. обзоры в работах [Pesnell, 2012; Hathaway, 2015; Обридко и Наговицын, 2017; Petroway, 2020; Nandy, 2021] и ссылки в них). Большинство существующих методов прогнозирования солнечной активности предсказывают только максимальное число Вольфа в солнечном цикле, причем эти прогнозы часто существенно различаются. Например, сравнения

результатов прогноза 24-го и 25-го циклов солнечной активности различными методами, выполненными различными авторами, приведены в обзорах [Pesnell, 2012] и [Nandy, 2021] соответственно.

На сегодняшний день предлагаются многочисленные методы прогноза солнечной активности, основанные на анализе периодичности различных наблюдаемых явлений на Солнце и корреляций между ними, анализе геофизических и климатологических данных, компьютерном моделировании числовых рядов и искусственных нейронных сетях.

Разумеется, мы не беремся делать полный обзор методов прогнозирования. Здесь мы только укажем основные прогностические методы, основываясь на монографии Обридко и Наговицына [2017]. Одна группа методов проистекает из самого утверждения о существовании солнечной цикличности. Предполагая, что все циклы однотипны, находят длину цикла и прогнозируются основные даты цикла. Связь периода солнечного цикла и его амплитуды представляет собой сложную проблему, поскольку между этими двумя величинами нет прямой корреляции. Поскольку ряд чисел Вольфа является временным рядом, вполне естественно, что методы анализа временных рядов широко применяются для прогнозирования его будущих изменений, включая амплитуду предстоящего цикла. К работам этого типа относятся публикации [Бондарь и др., 1996; Dmitrieva et al., 2000]. Все эти методы, по существу, являются методами статистической экстраполяции и широко используются в практическом прогнозировании. Однако в целом методами ана-

лиза временных рядов не удалось добиться особого успеха в достижении этой цели. Кроме того, анализ временных рядов — это чисто математический инструмент, дающий мало физического понимания процессов, вызывающих изменения от цикла к циклу.

Используемой в этой работе разновидностью таких методов является аппроксимация на основе среднего цикла. При этом опять-таки предполагается, что все циклы одинаковы, находится средний цикл и используется для прогноза. В чистом виде этот метод сейчас уже не употребляется, поскольку дает большие ошибки. Наша модификация его состоит в том, что по начальной фазе развития цикла проводится нормирование среднего цикла по амплитуде и временному масштабу, и уже этот нормированный цикл используется для прогноза.

В методах, в которых для прогноза используются только сами числа Вольфа, для прогноза амплитуды предстоящего максимума обычно учитывается правило Гневывшева—Оля [Гневывшев и Оля, 1948], которое гласит, что сумма чисел Вольфа четного цикла всегда меньше, чем аналогичная сумма следующего за ним нечетного цикла. Однако оно ничего не говорит о соотношении высот циклов в паре нечетный—четный. Таким образом, циклы объединяются в пары (что, в общем, неудивительно, поскольку на Солнце физическим является не 11-летний, а 22-летний магнитный цикл), причем первым в паре является четный. Самым значительным исключением является 23-й цикл, который оказался ниже 22-го, а среди условно достоверных циклов пара 8—9, где за четным 8-м циклом следует более низкий нечетный 9-й цикл.

Вторая группа прогностических методов подразумевает использование других гелиофизических данных для вычисления характеристик цикла чисел Вольфа. Эту группу принято называть методами предвестников. Метод предвестников является классическим методом прогнозирования пиковой амплитуды следующей солнечной активности и основан на наблюдаемых значениях солнечной активности или магнитного поля в выбранный период.

В принципе, два типа прогнозов могут быть объединены. После того как определены некоторые опорные точки тем или иным методом либо спрогнозирована высота цикла в какой-либо фиксированной фазе цикла методом предвестников, можно далее применить метод статистической экстраполяции или использовать нормированный среднестатистический цикл. Близкий к этому “синтетический” метод был использован

в работах [Hathaway et al., 1999; Ожередов и др., 2011]. Тем не менее, все предвестники эффективно работают только после начала цикла на фазе минимума или еще лучше — на фазе роста. В этом отношении статистические и спектральные методы оказываются более эффективными. Они недостаточно точны, чтобы предсказать высоту каждого отдельного цикла, но способны указать долговременные тенденции к возникновению групп высоких или низких циклов [Наговицын и Огурцов, 2003; Petrovay, 2020]. А согласно заключению Nandy [2021], сделанному на основе сравнительного анализа многочисленных исследований работ по предсказанию 24–25-го циклов солнечных пятен, выполненных разными группами на основе различных методов, действительно возможен лишь краткосрочный прогноз в пределах одного цикла.

В последние десятилетия, когда амплитуда и время цикла солнечных пятен приобрели большую социальную значимость, были созданы специальные группы, которым было поручено выработать консенсусное мнение о предстоящем цикле солнечных пятен за несколько лет до предстоящего пика. Организованная международная группа экспертов “Группа прогнозирования 25-го солнечного цикла NOAA/NASA” (SC25PP) пришла к выводу, что 25-й цикл (SC-25 - в общепринятой международной аббревиатуре) будет по амплитуде аналогичен 24-му циклу; максимум произойдет не ранее 2023 и не позднее 2026 г. с максимальным количеством солнечных пятен от 95 до 130 [McIntosh et al., 2020]. Однако, согласно их новому прогнозу [Leamon et al., 2021], максимум 25-го цикла будет около 190 (140 – 240), т.е. близок по амплитуде к довольно большому 23-му циклу. В отличие от этого прогноза, некоторые авторы предсказывали, что 25-й цикл будет чрезвычайно малым [Hathaway and Wilson, 2006; Abdusamatov, 2007; Обридко и Шельтинг, 2016]. Например, Abdusamatov [2007] проанализировал долгосрочные циклические изменения солнечной активности, радиуса и солнечной постоянной, утверждая, что они коррелируют как по фазе, так и по амплитуде. На основании этого автор предсказал очень низкий пик 25-го солнечного цикла -50 ± 15 .

Список прогнозов в диапазоне $SNM = 80 \pm 145$ приведен Zhu et al. [2022]. По расчетам самих же авторов [Zhu et al., 2022] прогнозируемое максимальное значение SN составит 147.9, причем SC-25 достигнет своего пика в июле 2025 г. С другой стороны, Brajša et al. [2022] предсказали, что максимум для 25-го цикла составит 121 ± 33 .

По прогнозу [Nagovitsyn and Ivanov, 2023] текущий 25-й солнечный цикл достигнет максимума на рубеже 2023 и 2024 гг.; среднегодовое значение чисел Вольфа (SN — в международной терминологии) в 2023 г. составит 132 ± 27 , а в 2024 г. $SN = 136 \pm 25$. Максимальное сплаженное среднемесячное значение SN за 13 месяцев составит 149 ± 28 .

Pishkalo [2008] исследовал коэффициенты корреляции между различными параметрами солнечных циклов 1–23, и дал прогноз солнечной активности в циклах 24 и 25. Максимальная амплитуда в солнечном цикле 25 составит 112.3 ± 33.4 в апреле — июне 2023 г.; минимум следующего солнечного цикла 26 произойдет в конце 2029 г. — в 2030 г. Продолжительность солнечного цикла 25 будет примерно 11.0 лет, продолжительность ветви роста составит 4.4 г., а продолжительность ветви спада составит 6.6 лет.

Nandy [2021] классифицировал и обобщил прогнозы для солнечного цикла 25 по 7 типам используемых методов и оценил среднюю прогнозируемую пиковую амплитуду как 136.2 ± 41.6 .

Таким образом, на данный момент уже очевидно, что нарушения статистических закономерностей не произошло, и амплитуда 25-го цикла превысит амплитуду 24-го цикла, хотя еще существует некоторая неопределенность относительно величины будущего максимума и его временного местоположения.

2. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА И ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Суть разработанного нами метода прогностической автокорреляции заключается в том, чтобы сравнить выбранный с целью прогноза фрагмент ряда чисел Вольфа с некоторыми (подходящими по определенным критериям) фрагментами в прошлом и найти пары с наибольшим коэффициентом корреляции. Коэффициент линейной парной корреляции r далее рассчитывается по стандартной формуле:

$$r = \frac{(K+1)^{-2} \sum_{k=0}^{K+1} W_{i+k} W_{j+k} - (K+1)^{-2} \sum_{k=0}^{K+1} W_{i+k} \sum_{k=0}^{K+1} W_{j+k}}{\sigma_i \sigma_j}. \quad (1)$$

Здесь индексы i и j определяют начала двух сравниваемых фрагментов чисел Вольфа W длиной $K+1$ каждый, а через σ обозначены соответствующие среднеквадратичные отклонения. Область допустимых значений линейного коэффициента парной корреляции от -1 до $+1$. Знак коэффициента корреляции (1) указывает направ-

ление связи. Если $r > 0$, то связь прямая; если $r < 0$, то связь обратная.

Выбор длины фрагментов представляет собой отдельную задачу. Как уже было сказано во ВВЕДЕНИИ, физически обоснованным является использование наряду с 11-летним солнечным циклом 22-летнего магнитного цикла. Этими временными рамками и был ограничен выбор длины фрагментов. Было проведено сравнение на предмет взаимной парной корреляции всех фрагментов 200-летнего временного ряда W , состоящих из пары циклов: четный — нечетный. А, следовательно, прежде чем приступить к следующему этапу, необходимо исследовать подробнее зависимости величины корреляции от выбранной длины фрагментов. Кроме того, несмотря на высокий уровень корреляции, выбранные пары фрагментов могли сильно отличаться по амплитуде. Поэтому на следующем этапе необходимо было провести некоторую нормализацию выбранного в прошлом фрагмента W_j до уровня изучаемого W_i . Для этого для каждого из фрагментов было рассчитано превышение над средними значениями как положительное, так и отрицательное, затем было найдено отношение соответствующих средних превышений, которое и использовалось для расчета нормализованного ряда F_i . После нормирования стало возможным оценить качество аппроксимации и посчитать коэффициент детерминации между парами фрагментов. Как известно, коэффициент детерминации (или детерминированности) характеризует связь между значениями зависимой переменной и одной или нескольких независимых переменных.

Для оценки качества аппроксимации между значениями зависимой переменной и одной или нескольких независимых переменных рассчитывают теоретический коэффициент детерминации — R^2 , который определяет формула

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (W_i - F_i)^2}{\sum_i (W_i - \bar{W})^2}, \quad (2)$$

где W_i — наблюдаемое значение зависимой переменной, а F_i — значение зависимой переменной, предсказанное по уравнению регрессии, \bar{W} — среднее арифметическое зависимой переменной.

При анализе модели парной линейной регрессии по значению коэффициента детерминации (2) можно сделать следующие предварительные выводы о качестве модели. Идеальная модель имеет коэффициент детерминированности 1. Обычно, в физических науках, хорошие модели имеют коэффициент детерминированности больше 0.9.

Для апробации авторской методики были проведены тестовые расчеты, для которых были выбраны три пары фрагментов с коэффициентами корреляции, превышающими 0.9. Это пары фрагментов:

1964.5–1978.5 и 1878.5–1893.5 (Тест 1),

1964.5–1978.5 и 1901.5–1916.5 (Тест 2),

1942.5–1957.5 и 1855.5–1870.5 (Тест 3).

Длительность интервалов при этом менялась от 12 до 22 лет. В табл. 1 приведены получившиеся коэффициенты корреляции r из (1). Как видно из таблицы, наиболее оптимальной длиной сравниваемых фрагментов является 16 лет. Именно эта длительность фрагментов и была выбрана для дальнейших расчетов. Методика нормировки позволила довести точность аппроксимации до приемлемых пределов. Характеристики проведенных тестов для 16-летних интервалов приведены в табл. 2.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции пар фрагментов различной длительности

	Тест1	Тест2	Тест3
22 года	0.926	0.853	0.866
20 лет	0.914	0.885	0.897
18 лет	0.935	0.931	0.900
16 лет	0.934	0.928	0.908
14 лет	0.918	0.910	0.909
12 лет	0.916	0.909	0.925

На следующем этапе рассчитывался собственно прогнозируемый участок исследуемого интервала на основе построенного ранее нормализованного временного ряда. Графики всех рядов — исследуемого, корреляционного и нормализованного —

Таблица 2. Характеристики проведенных тестов для 16-летних интервалов

	Исследуемый интервал W_i	Корреляционный Интервал W_j	Коэффициент корреляции r	Точность аппроксимации R^2	Точность прогноза R^2
Тест1	1964.5–1978.5	1878.5–1893.5	0.93	0.86	0.75
Тест2	1964.5–1978.5	1901.5–1916.5	0.93	0.80	0.96
Тест3	1942.5–1957.5	1855.5–1870.5	0.91	0.74	0.97

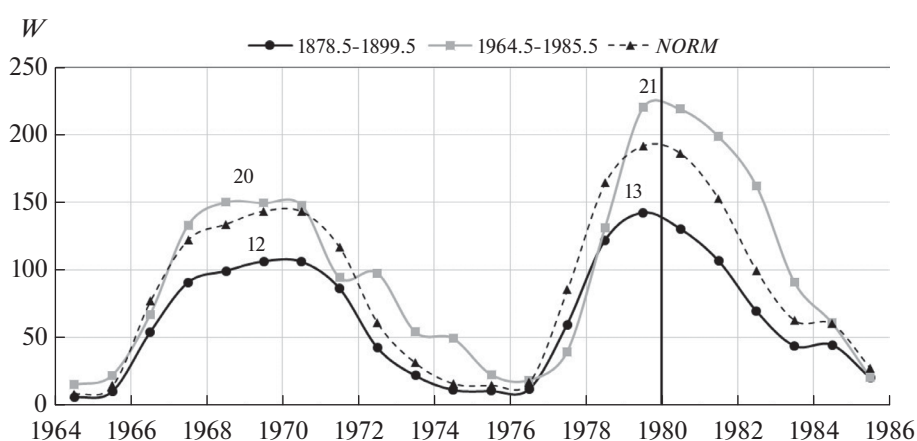


Рис. 2. Результат Теста 1. Черным цветом показан ряд значений W_i исследуемого интервала. Серым цветом показан ряд значений W_j некоторого интервала в прошлом с высоким коэффициентом парной корреляции $r=0.93$. Этот интервал сдвинут до совмещения с исследуемым интервалом. Штриховой линией и подписью *NORM* обозначен нормализованный ряд F_r . Цифры обозначены максимумы рассматриваемых циклов. Коэффициент детерминации составляет соответственно: 0.86 (слева) и 0.75 (справа), см. табл. 2 выше.

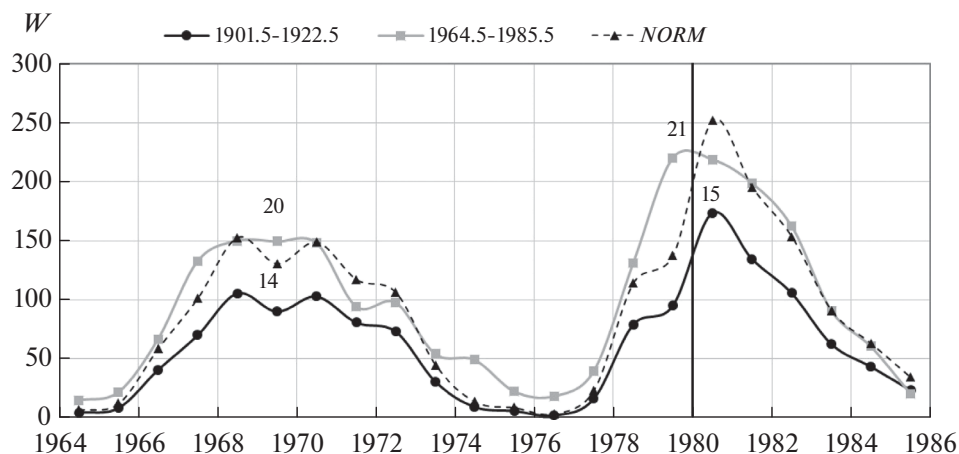


Рис. 3. Результат Теста 2. Черным цветом показан ряд значений W_i исследуемого интервала. Серым цветом показан ряд значений W_j некоторого интервала в прошлом с высоким коэффициентом парной корреляции $r=0.93$. Этот интервал сдвинут до совмещения с исследуемым интервалом. Штриховой линией и подписью *NORM* обозначен нормализованный ряд F_r . Цифрами обозначены максимумы рассматриваемых циклов. Коэффициент детерминации составляет соответственно: 0.80 и 0.96 (см. табл. 2 выше).

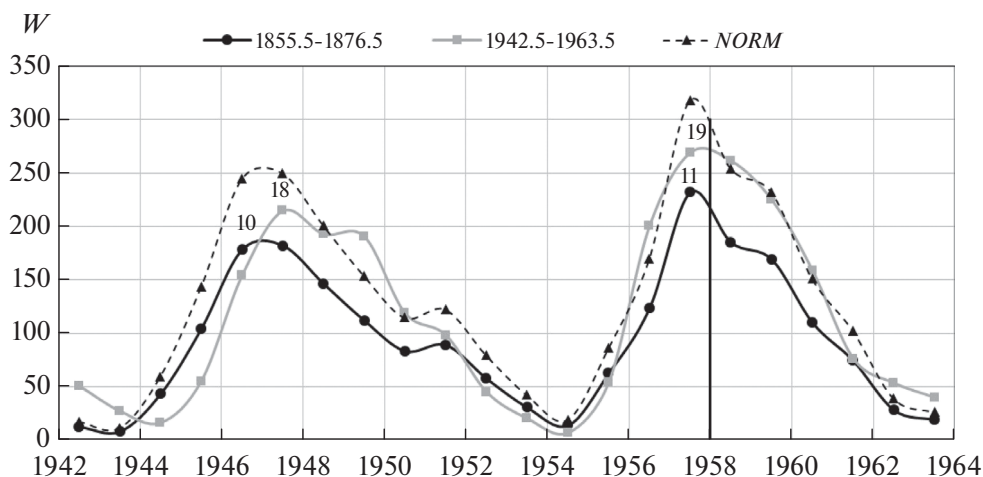


Рис. 4. Результат Теста 3. Черным цветом показан ряд значений W_i исследуемого интервала. Серым цветом показан ряд значений W_j некоторого интервала в прошлом с высоким коэффициентом парной корреляции $r=0.93$. Этот интервал сдвинут до совмещения с исследуемым интервалом. Штриховой линией и подписью *NORM* обозначен нормализованный ряд F_r . Цифрами обозначены максимумы рассматриваемых циклов. Коэффициент детерминации составляет соответственно: 0.74 и 0.97 (см. табл. 2 выше).

приведены на рисунках 2–4. Толстая вертикальная линия разделяет график на область моделирования слева и область прогнозирования справа. Соответственно участок нормализованного ряда на интервале слева от вертикальной линии следует рассматривать как аппроксимацию, а справа — как прогноз на 6-летнем интервале. При этом коэффициент детерминации (2) соответствует точности аппроксимации для 16 значений слева и точности прогноза для 6 значений справа.

3. ПРОГНОЗ 25-ГО ЦИКЛА

Интересующий нас фрагмент современного 22-летнего цикла включает полностью 24-й цикл и начало 25-го, что составляет на данный момент 16 лет. Продолжительности данного фрагмента вполне достаточно для исследования, учитывая результат, полученный в тестовых расчетах (см. табл.1). Целью поиска являлись аналогичные 16-летние фрагменты пар циклов “четный — нечетный” на временном интервале 1830–2010 гг.

Таблица 3. Обзор вариантов сравнения пар фрагментов в поисках корреляции

	Исследуемый интервал W_i 2008.5–2023.5 (16 лет)		
Варианты сравнения	Коррелируемый интервал W_j	r	R^2
$V1$	1833.5–1848.5	0.89	
$V2$	1856.5–1871.5	0.81	
$V3$ ($Fit1$)	1878.5–1892.5	0.96	0.89
$V4$ ($Fit2$)	1901.5–1916.5	0.93	0.78
$V5$ ($Fit3$)	1922.5–1937.5	0.96	0.83
$V6$	1843.5–1858.5	0.88	
$V7$ ($Fit4$)	1964.5–1979.5	0.96	0.61
$V8$ ($Fit5$)	1985.5–2000.5	0.96	0.87

Искомый 16-летний фрагмент 2008.5–2023.5 сравнивался с восемью подходящими фрагментами в прошлом. Результаты такого сравнения с полученными коэффициентами парной корреляции r приведены в табл. 3.

На следующем этапе были выбраны пары для расчета аппроксимации и дальнейшего прогноза для интересующего нас участка ряда 2008.5–2023.5. С учетом критерия $r > 0.9$ были выбраны пять пар фрагментов: $V3$, $V4$, $V5$, $V7$, $V8$. Нормализованные ряды для них, а также прогнозные кривые были обозначены соответственно $Fit1$, $Fit2$, $Fit3$, $Fit4$, $Fit5$ и приведены на рис. 5. Коэффициенты детерминации этих фрагментов со сдвигаемым фрагментом (2008.5–2022.5) составляют 0.8 ± 0.1 (подробнее см. табл. 3). Точность же прогнозируемых 6-летних участков оценивалась как среднеквадратичное отклонение относительно некоторого среднего (штриховая кривая на рис. 5). Таким образом, максимальное значение числа Вольфа ожидается в середине 2024 г. и составляет 161 ± 30 .

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наше исследование исходит из простой идеи — использовать для прогноза такие фрагменты временного ряда в прошлом, которые наиболее похожи на современный фрагмент, для которого и делается прогноз. Эта идея не нова — см., например, [Pishkalo, 2008], но, насколько нам известно, ничего похожего на предлагаемый здесь

нами непосредственный подход ранее реализовано не было. Наш подход — выделить, начиная от современности в прошлое, фрагмент ряда определенной длительности, который затем исследовать на наличие подобных ему фрагментов в прошлом. Нами в небольшом объеме были исследованы (здесь эти исследования не приведены) различные длительности, и мы пришли к выводу, что оптимальной с точки зрения наибольшей корреляции является длительность около 16 лет, или полтора полных цикла. Физически такую длительность можно обосновать тем, что полный магнитный цикл — это два (четный-нечетный) цикла активности, и для прогноза естественно использовать $\frac{3}{4}$ полного цикла, чтобы сделать прогноз на оставшуюся четверть. К тому же нами недавно [Старченко и Яковлева, 2022] было показано, что подобные $\frac{3}{4}$ и четверть цикла явно выделяются при базирующемся на магнитной энергии анализе сдвиговой (по времени) корреляции чисел Вольфа с их производными.

К сожалению, наши тестовые расчеты (см. соответствующий раздел выше) не выявили зависимости между изначальной корреляцией и прогностической оценкой. Оказалось, что даже фрагменты с пониженной корреляцией или аппроксимацией могут давать лучший прогноз, чем фрагменты с повышенной корреляцией или аппроксимацией, см. табл. 2. Поэтому нами планируются дальнейшие исследования по выявлению основных факторов, влияющих на точность прогноза по нашей оригинальной методике. Эта методика заключается в том, что мы продлеваем прогностический ряд (фрагмент) с учетом его сдвига и амплитуд (раздельно для превышающих среднее и ниже среднего) относительно фрагментов рядов, на которых мы базируемся. При этом получается достаточно уверенный прогноз по нашим тестовым примерам, которых пока всего три, и сейчас у нас в работе еще несколько. Оказалось, что необходимых (с достаточно высокой корреляцией) тестовых пар нами обнаружено не так уж и много.

Напротив, для непосредственного прогноза нами уже выявлено 8 фрагментов рядов в прошлом, которые очень хорошо коррелируют с современным фрагментом, см. табл. 3. Для пяти из них (с коэффициентами корреляции 0.95–0.96) сделан прогноз, представленный на рис. 5. Виден довольно большой разброс, который потенциально может быть значительно нивелирован при выявлении важнейших факторов, влияющих на точность прогноза (то есть фактически мы сможем отдать предпочтение некоторым кривым на рис. 5). Пока же мы констатируем, что за последние 16 лет динамика солнечной активности име-

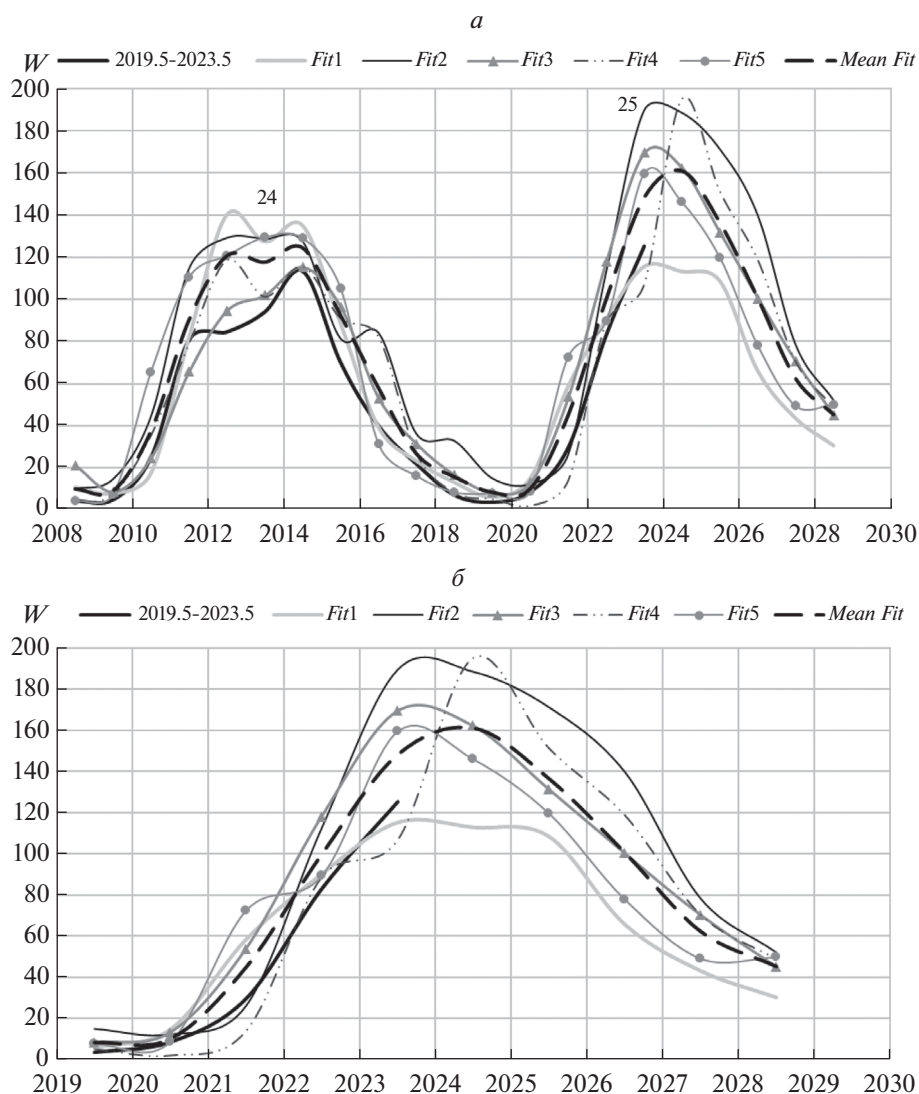


Рис. 5. Результаты аппроксимации 16-летнего интервала (2008.5–2022.5) через нормировку коррелируемых фрагментов: *Fit1* (1878.5–1892.5), *Fit2* (1901.5–1916.5), *Fit3* (1922.5–1937.5), *Fit4* (1964.5–1979.5), *Fit5* (1985.5–2000.5) и соответствующие прогнозы до 2029.5. На рисунке (а) с 2008.5, а на укрупненном рисунке (б) с 2019.5. *Mean Fit* – осредненное значение нормализованной кривой F_r . Среднеквадратичное отклонение $\sigma = \pm 29.75$. Осредненный коэффициент детерминации R^2 коррелируемых фрагментов со сдвигаемым фрагментом (2008.5–2022.5) составляет 0.8 ± 0.1 (подробнее см. табл. 3).

ет настолько много аналогов в прошлом, что мы, возможно, можем ожидать некоторой переломной ситуации в этой динамике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны Виталию Никитичу Ишкову за положительную оценку нашей работы и за весьма содержательные указания на ее недостатки, корректирование которых привело к значительному улучшению как научной значимости, так и представления этой работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджета Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН в рамках государственного финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондарь Т.Н., Ротанова Н.М., Обридко В.Н. Прогнозирование временного ряда чисел Вольфа для 23-го солнечного цикла // Письма в Астрон. журн. Т. 22. № 8. С. 628–630. 1996.

- Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 258 с. 1973.
- Ишков В.Н. Периоды “пониженной” и “повышенной” солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты / Сб. “Солнечная и солнечно-земная физика — 2013”. Ред. А.В. Степанов и Ю.А. Наговицын. СПб.: Изд. ВВМ. С. 111–114. 2013.
- Ишков В.Н., Шибяев И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. Сер. физическая. Т. 70. № 10. С. 1439–1442. 2006.
- Гневышев М.Н., Оль А.И. О 22-летнем цикле солнечной активности // Астрон. журн. Т. 25. № 1. С. 18–20. 1948.
- Наговицын Ю.А., Огурцов М.Г. Грандиозные минимумы и максимумы солнечной активности и климата Земли: последнее тысячелетие и картина будущего “в общих чертах” / Тр. 7-й Международной Пулковской конференции “Климатические и экологические аспекты солнечной активности”. Пулково, 7–11 июля 2003 г. СПб.: ГАО РАН. С. 321–326. 2003.
- Обридко В. Н., Наговицын Ю. А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. СПб.: Изд. ВВМ, 466 с. 2017.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Об отрицательной корреляции между солнечной активностью и скоростью вращения Солнца // Письма в Астрон. журн. Т. 42. № 9. С. 694–700. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0320010816080040>
- Ожередов В.А., Бреус Т.К., Обридко В.Н. Прогнозирование полного 24-го цикла солнечной активности несколькими вариантами авторегрессии и методом предвестника // Геофизические процессы и биосфера. Т. 10. № 3. С. 51–65. 2011.
- Старченко С.В., Яковлева С.В. Корреляция временных рядов чисел Вольфа и их производных // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 2. С. 144–154. 2022. <https://doi.org/10.31857/S001679402202016X>
- Abdel-Rahman H.I., Marzouk B.A. Statistical method to predict the sunspots number // NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. V. 7. N 2. P. 175–179. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.08.001>
- Abdusamatov K.I. Optimal prediction of the peak of the next 11-year activity cycle and of the peaks of several succeeding cycles on the basis of long-term variations in the solar radius or solar constant // Kinemat. Phys. Celest. V. 23. N 3. P. 97–100. 2007. <https://doi.org/10.3103/S0884591307030026>
- Brajša R., Verbanac G., Bandić M., Hanslmeier A., Skokić I., Sudar D. A prediction for the 25th solar cycle maximum amplitude // Astron. Nachr. V. 343. N 3. ID e13960. 2022. <https://doi.org/10.1002/asna.202113960>
- Dmitrieva I.V., Kuzanyan K.M., Obridko V.N. Amplitude and period of the dynamo wave and prediction of the solar cycle // Sol. Phys. V. 195. N 1. P. 209–218. 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1005207828577>
- Hathaway D.H. The solar cycle // Living Rev. Sol. Phys. V. 12. N 1. ID 4. 2015. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Hathaway D.H., Wilson R.M. Geomagnetic activity indicates large amplitude for sunspot cycle 24 // Geophys. Res. Lett. V. 33. N 18 ID L18101. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL027053>
- Hathaway D.H., Wilson R.M., Reichmann E.J. A synthesis of solar cycle prediction techniques // J. Geophys. Res. — Space. V. 104. N. 10. P. 22375–22388. 1999. <https://doi.org/10.1029/1999JA900313>
- Leamon R.J., McIntosh S.W., Chapman S.C., Watkins N.W. Response to “Limitations in the Hilbert transform approach to locating solar cycle terminators” by R. Booth // Sol. Phys. V. 296. N 10. ID 151. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01897-z>
- McIntosh S.W., Chapman S., Leamon R.J., Egeland R., Watkins N.W. Overlapping magnetic activity cycles and the sunspot number: Forecasting sunspot cycle 25 amplitude // Sol. Phys. V. 295. N 12. ID 163. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01723-y>
- Nagovitsyn Y.A., Ivanov V.G. Solar cycle pairing and prediction of cycle 25 // Sol. Phys. V. 298. N 3. ID 37. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02121-w>
- Nandy D. Progress in solar cycle predictions: Sunspot cycles 24–25 in perspective // Sol. Phys. V. 296. N 3. ID 54. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01797-2>
- Pesnell W.D. Solar cycle predictions (invited review) // Sol. Phys. V. 281. N 1. P. 507–532. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-9997-5>
- Petrovay K. Solar cycle prediction // Living Rev. Sol. Phys. V. 17. N 1. ID 2. 2020. <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>
- Pishkalo M.I. Preliminary prediction of solar cycles 24 and 25 based on the correlation between cycle parameters // Kinemat. Phys. Celest. V. 24. N 5. P. 242–247. 2008. <https://doi.org/10.3103/S0884591308050036>
- Zhu H., Zhu W., He M. Solar cycle 25 prediction using an optimized long short-term memory mode with F10.7 // Sol. Phys. V. 297. N 12. ID 157. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-02091-5>

Autocorrelation of Wolf Number Cycle Fragments and Solar Activity Half-Cycle Forecast

S. V. Yakovleva¹, S. V. Starchenko^{1, **}

*¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences
(IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

**e-mail: svyakov@inbox.ru*

***e-mail: sstarchenko@mail.ru*

Autocorrelations of fragments of a series of Wolf numbers (Version 2) are considered for the purpose of forecasting for 6 years (half a solar activity cycle). Fragments similar to one and a half cycles were used for physical and optimal reasons. Testing was successfully carried out on fairly reliable pairs of series fragments, consisting of a fixed and a time-shifted fragment. Pairs were selected for testing if the correlation coefficient of their superposition was 0.91 or more. An original modification of the fixed fragment and the following segments of the series was used. Similarly, forecasts were made for 6 years after 2023, based on the fragment (2008.5–2023.5), which has correlation coefficients from 0.81 to 0.96 with fragments (1978.5–1993.5), (1901.5–1916.5), (1922.5–1937.5), (1964.5–1979.5), (1985.5–2000.5). The maximum value of the Wolf number (161 ± 30) is expected in mid-2024.

Keywords: solar activity cycles, Wolf numbers, correlations, forecast.