

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ МЕТОДОМ ФАЗОВЫХ СРЕДНИХ

М.Н. Храмова (kh_mari@aport.ru) (1), С.А. Красоткин (2), Э.В. Кононович (3)

(1) Дальневосточный государственный университет, Владивосток

(2) НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

(3) Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Центральной проблемой современной физики Солнца является выяснение природы солнечной активности и механизмов солнечно-земных связей, а также, прогнозирование всей системы этих явлений.

Методам долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза солнечной активности посвящено множество работ, обзор которых можно найти в монографии [1]. Многие методы прогноза, как правило, основаны не на физических соображениях, а на вероятностных оценках. В лучшем случае эти прогнозы удовлетворительно оправдываются только для текущего цикла. Применение тех же методов для других циклов бывает сопряжено с большими ошибками.

Сопоставление различных прогнозов текущего цикла активности 23 с данными наблюдений обнаружило несостоятельность многих прогнозов и показало недостаточность существующих представлений о механизмах солнечной активности. В таблице 1 представлены прогнозы максимальных среднегодовых чисел Вольфа для цикла 23. Как видно, большинство прогнозов основных характеристик текущего цикла солнечной активности можно условно разделить на две группы: 1) предсказывающие очень высокие значения W в максимуме; 2) с низкими или умеренными значениями W в максимуме. При этом низкие значения, как правило, получаются при использовании косвенных данных о солнечной активности, а высокие и умеренные – при использовании правила Гневышева-Оля [17] и связей чисел Вольфа с различными геомагнитными индексами. Наиболее близок к данным наблюдений прогноз, приведенный Нусиновым в работе [4]: $W_M = 117 \pm 23$. В этой работе автор использовал уравнение регрессии, связывающее значения среднегодовых чисел солнечных пятен в минимуме W_m и в максимуме W_M активности для циклов с 1-го по 22-ой за исключением цикла 19, для которого W_M отклоняется от зависимости

$$W_M = (58,1 \pm 11,0) + (6,66 \pm 1,37)W_m. \quad (1)$$

Соответствующий коэффициент линейной корреляции между величинами составляет $r = 0,73$, так что эта зависимость может быть использована только для прогнозирования циклов средней мощности.

Среди прогнозов чисел Вольфа на несколько циклов вперед следует отметить работу Чистякова [5], содержащую ряд ценных указаний на свойства векового цикла солнечной активности.

Из приведенного обзора можно заключить, что пока еще не существует общепринятого метода прогноза, удовлетворительно объясняющего данные наблюдений. В данной работе предпринята попытка обобщить результаты, полученные другими авторами и разработать метод сверхдолгосрочного прогноза солнечной активности на

основании одношаговой экстраполяции значений чисел Вольфа, соответствующих одинаковым фазам цикла.

Таблица 1.

Прогнозы цикла активности 23

Автор	Максимальное среднегодовое число Вольфа
Высокие значения	
Цирульник и др. (1999), [2]	250
Макаров, Михайлуца (1992), [28]	210
Вилсон (1992), [22]	214
Витинский (1997), [6]	182
Кононович и др. (1997), [7]	210
Куклин (1993), [16]	206
Умеренные и низкие значения	
Витинский (1997), [6]	143÷164
Кулкарни и др. (1998), [25]	144
Мендоза и Рамирес (1999), [19]	140
Шаттен и Хойт (1998), [18]	153
Шаттен и Майерс (1996), [24]	138
Контор (1983), [27]	110
Вилсон (1988), [21]	109
Прогноз NASA (1995), [23]	107
Нусинов (1999), [4]	117
Шове (1983), [26]	85 – 120
Обридко (1995), [3]	75
Куклин (1993), [16]	41
Чистяков (1983), [5]	75

Следует отметить, что в дальнейшем речь будет идти о прогнозе относительных чисел солнечных пятен – чисел Вольфа (см., например, [20]). Несмотря на внутреннюю неоднородность ряда чисел Вольфа, отмечаемую разными авторами [8, 9], а также чисто наблюдательный характер самих чисел Вольфа, этот ряд остается самым длинным на данный момент наблюдательным рядом, среднемесячные значения которого имеются с 1745 г., а среднегодовые (надежность которых ниже [9]) – с 1700 г. Кроме того, как показано, например, в работе [10], числа Вольфа имеют очень высокую корреляцию с индексом солнечной активности $F_{10,7}$ – плотностью потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см. Поэтому разработка методов прогноза и вообще исследование ряда чисел Вольфа крайне важно для того, чтобы в дальнейшем осуществить переход к ряду $F_{10,7}$ как физически более обоснованному. Оба эти ряда могут использоваться не только для изучения явлений солнечной активности, но и для получения прогнозов космической погоды, и, наиболее важного ее фактора – потоков заряженных частиц, – определяющего радиационную обстановку на Земле и в ее окрестностях.

МЕТОД ФАЗОВЫХ СРЕДНИХ (ФС)

В качестве исходных данных для построения прогноза были использованы среднемесячные несглаженные значения чисел Вольфа (цюрихский ряд) W за период с 1755 до середины 1996 года (то есть для получения прогноза на цикл 23 использовались числа Вольфа только за циклы 1 – 22). Цикл выделялся как интервал между двумя последовательными абсолютными минимумами.

Каждый цикл делился последовательно на $k=1, 2, 3 \dots 16$ равных промежутков, в пределах которых значения чисел Вольфа усреднялись. Таким образом получались **фазовые средние** (ФС) значения W_{nk}^i , где $n=1, 22$; $k=1, 16$, $i=1, k$, причем k – номер разбиения, i – номер ФС значения внутри данного разбиения, n – номер цикла. Затем рассчитывалась корреляционная матрица K_{nk}^i размерности 22×136 . Для элементов этой матрицы была обнаружена высокая корреляция между многими коэффициентами (около 70 % коэффициентов корреляции превышают значение 0,85). Поэтому для получения предварительного прогноза достаточно использовать только последние шестнадцать ФС для каждого цикла $W_{n,16}^i$ (то есть значения, полученные при делении каждого цикла на шестнадцать равных промежутков). Разбиение циклов на меньшее число частей необходимо для уточнения прогноза и проверки его самосогласованности. Для этого в исходную матрицу ФС W_{nk}^i добавляется строка, соответствующая ФС значениям для прогнозируемого цикла, и вновь вычисляются коэффициенты корреляции между элементами новой матрицы $W_{(n+1)k}^i$, которые сравниваются с исходными.

Предлагаемый метод прогноза основан на использовании зависимости ФС от номера цикла $W_{16}^i(n)$. Значение для цикла $(n+1)$ находится экстраполяцией соответствующих зависимостей на одно значение вперед. Принципы, на основании которых можно сделать такую экстраполяцию, будут изложены ниже. Таким образом, несомненным преимуществом данного метода сверхдолгосрочного прогноза является то, что прогноз получается на основе одношаговой экстраполяции, что позволяет избежать накопления ошибки к концу прогнозируемого интервала. Другим преимуществом является возможность выявления свойств циклов в зависимости от фазы цикла, то есть более уверенное выделение критических точек [1, 8], а также простота получения прогноза [12].

Временная привязка полученного прогноза осуществлялась при помощи уравнений регрессии между длиной ветви роста T_r и максимальным фазовым средним значением за цикл W_{16}^{\max} , а также между длиной ветви роста T_r и асимметрией A по Чистякову [11]. Асимметрия определяется как $A = (T - T_r) / T_r$, где T – длина цикла. В результате получены следующие уравнения регрессии

$$T_r = 7,366 - 0,027W_{16}^{\max}, \quad (r = -0,84), \quad (2)$$

$$A = 3,324 - 0,398T_r, \quad (r = -0,88). \quad (3)$$

Эти связи изменяются со временем, в частности, с вековым циклом [11].

Средняя погрешность составляет $\pm 0,3$ года в определении T_r и $\pm 0,7$ года в определении T , что сопоставимо с погрешностями определения этих параметров другими методами.

ПРОГНОЗ ЦИКЛОВ 23 И 24

На рис. 1 показан прогноз чисел Вольфа на циклы 23 и 24, а также для сравнения циклы 19 – 22. Для уже истекшей части цикла 23 приведены международные среднемесячные значения W . Как видно из приведенного рисунка, максимальное фазовое среднее значение для цикла 23 равно $W_{16}^{\max}(23)=126$ с эпохой главного максимума, приходящейся на апрель – октябрь 2000 г.; значение на цикл 24 – $W_{16}^{\max}(24)=127$, с максимумом в первой половине 2011 г. На рис. 2 отдельно выделен цикл 23 с сопоставлением теоретических и наблюдаемых ФС значений. В таблице 2 представлен прогноз циклов 23 и 24 с учетом разбиения на фазы.

На первом шаге получения прогноза из исходных рядов ФС значений выделяется тренд. Выделение тренда из исходного ряда весьма сложная операция, так как она значительно влияет на получаемый результат. При этом нужно отметить, что для резкого возрастания уровня солнечной активности в будущем вряд ли существуют серьезные основания, поэтому на тренд налагается несколько условий, которые должны быть обязательно учтены. Функция тренда должны быть гладкой, без резких скачков, отражать

сверхвековой ход уровня солнечной активности (в том числе и его повышение в XX столетии). В работе [2] выбирается тренд, похожий на кубическую параболу, что не является физически обоснованным. В результате, при такой форме тренда для максимума цикла 23 получен прогноз $W \geq 250$, что в два раза выше наблюдаемых значений.

Таблица 2.

Прогноз циклов 23 и 24, выполненный методом ФС

№№ фазы	Цикл 23		Цикл 24	
	год	ФС значение числа Вольфа	год	ФС значение числа Вольфа
1	1996,8	12,1	2007,6	9,7
2	1997,5	25,5	2008,3	23,9
3	1998,2	59,7	2008,9	52,0
4	1998,8	94,9	2009,6	87,5
5	1999,5	108,4	2010,3	102,5
6	2000,2	126,0	2010,9	127,4
7	2000,8	105,0	2011,6	121,3
8	2001,5	110,0	2012,3	123,0
9	2002,2	105,0	2012,9	117,6
10	2002,8	86,9	2013,6	86,0
11	2003,5	64,8	2014,3	64,9
12	2004,2	40,3	2014,9	46,4
13	2004,8	26,7	2015,6	29,0
14	2005,5	16,7	2016,3	13,4
15	2006,2	12,5	2016,9	12,6
16	2006,8	10,6	2017,6	10,3

Использованная в настоящей работе форма тренда имеет вид

$$W_{k\ tr}^i(n) = A_k^i + B_k^i \ln\left((n - C_k^i) + \sqrt{1 + (n - C_k^i)^2}\right) \quad (4)$$

и удовлетворяет указанным выше условиям.

Коэффициенты в формуле (4) могут иметь следующий смысл. Коэффициент C_k^i определяет номер цикла, начиная с которого возрос уровень солнечной активности. B_k^i есть среднее значение числа Вольфа с точностью до A_k^i . Аналитическая функция для выделения тренда из исходных рядов фазовых средних выбиралась на основании исследования рядов с помощью алгоритма «Гусеница» [13].

Такое задание тренда отражает долговременные изменения уровня солнечной активности (в частности, его увеличение в XX столетии, ряд высоких циклов, начиная с цикла 18), но при этом мало возрастает при увеличении номера цикла.

На следующем этапе производится вычитание тренда из исходного ряда, после чего выделяется вековой цикл в форме

$$W_{k\ cent}^i(n) = D_k^i \cos\left(\frac{2\pi n}{T_k^i}\right) + E_k^i \sin\left(\frac{2\pi n}{T_k^i}\right), \quad (5)$$

причем $D_k^{i2} + E_k^{i2} = M_k^{i2}$, а $\arctg(E_k^i / D_k^i) = \varphi_k^i$, где M_k^i – амплитуда вековых изменений, φ_k^i – фаза, T_k^i – период векового цикла, выраженный количеством 11-летних циклов.

Амплитуды, соответствующие более коротким циклам солнечной активности (кроме, разумеется, 11-летнего, исключенного благодаря разбиению циклов на фазы) значительно меньше амплитуды, соответствующей вековому циклу. Поэтому на фоне вековых изменений солнечной активности эти циклы выделяются неуверенно. Исключение составляет 22-х летний цикл, об особенностях которого будет сказано ниже.

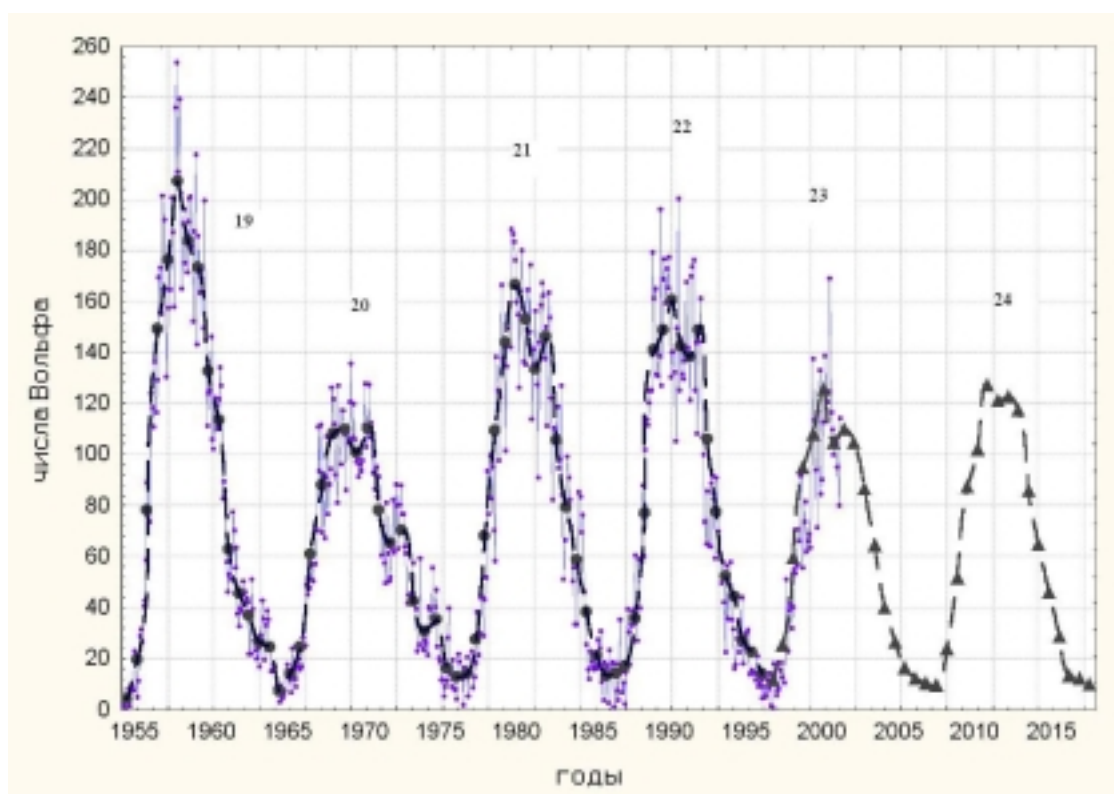


Рис. 1. Прогноз солнечных циклов 23 и 24 (треугольники). Для сравнения на рисунке приведены также ФС для циклов 19 – 22 (кружки). Тонкая линия с точками – среднемесячные значения чисел Вольфа.

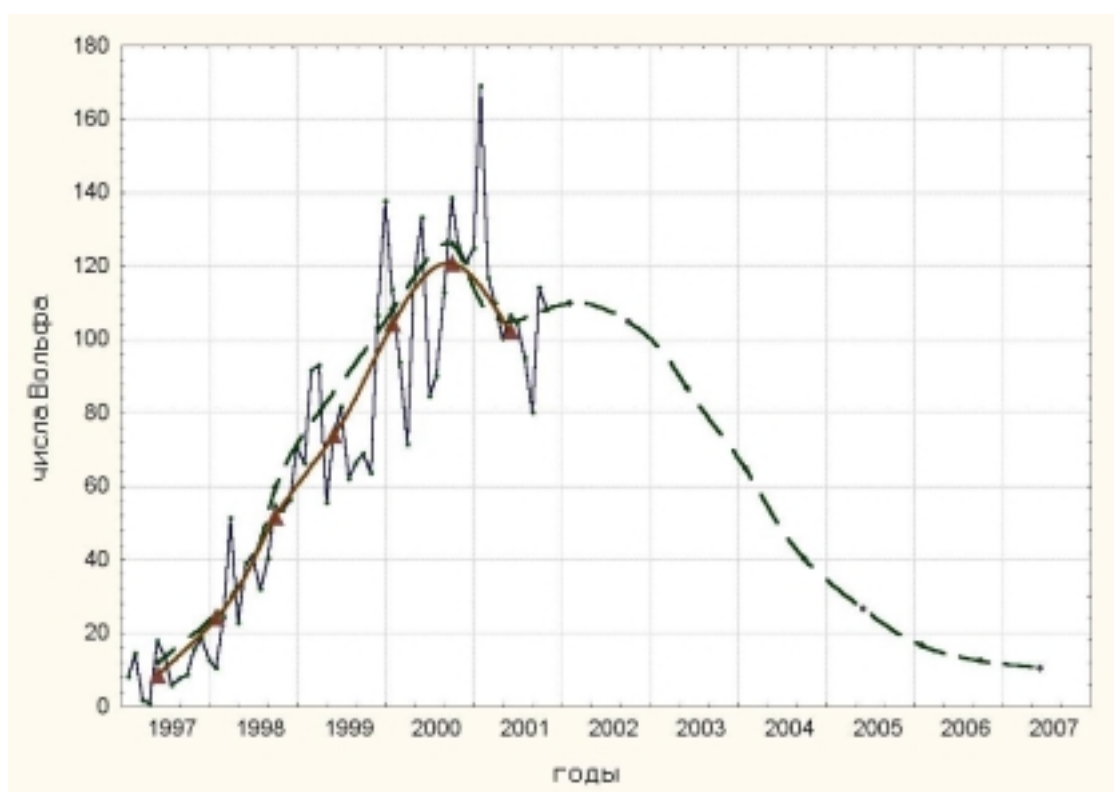


Рис. 2. Цикл 23 солнечной активности. Треугольниками обозначены наблюдаемые ФС значения на ветви роста текущего цикла. Тонкая линия – среднемесячные значения за уже истекшую часть цикла. Пунктир – прогноз.

После исключения векового цикла необходимо выполнить проверку рядов остатков на нормальность распределения. Заметим, что реально не удастся получить строгое нормальное распределение. Поэтому мы ограничились «почти нормальным» распределением остатков.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Из анализа рядов данных видно, что вековые изменения проявляются на любой фазе 11-летнего цикла, а не только в его максимуме. Кроме того, по-видимому, корректнее говорить не о точной продолжительности векового цикла, исчисляемой в годах, а о представлении длины векового цикла числом 11-летних циклов ($N \approx 9$). Часть ФС значений прогнозируется не очень уверенно, например, W_{16}^{2} , W_{16}^{13} , W_{16}^{14} . Объяснить это можно следующим образом. Как известно, новый солнечный цикл зарождается в недрах старого, приблизительно за 1,5 – 2 года до его окончания, когда начинают появляться высокоширотные группы солнечных пятен, принадлежащие новому циклу. Точно также и старый цикл заканчивается уже после начала нового. Все это приводит к «сбою» в поведении фазовых средних значений. В то же время это позволяет установить моменты реальных начала и окончания 11-летнего цикла. Также анализ поведения перечисленных ФС помогает определять критические точки циклических кривых.

Наиболее подробно следует остановиться на выполнении правила Гневышева-Оля [17] при анализе ФС. Отмечается ряд особенностей. Правило Гневышева-Оля как чередование высот соседних циклов в паре четный – нечетный выполняется на фазе роста и на фазе максимума векового цикла. На фазе спада векового цикла могут происходить «сбои», которые можно объяснить механизмом генерации векового цикла. Из четырех 11-летних циклов, образующих ветвь роста векового цикла, каждый последующий оказывается выше предшествующего. Фаза максимума охватывает один бицикл (например, циклы 8 – 9, 19 – 20). И, как отмечалось выше, на фазе спада векового цикла могут наблюдаться «сбои» в правиле Гневышева-Оля, например, пары циклов 4 – 5, 22 – 23.

При анализе вековых циклов использование общепринятой временной шкалы (в годах), вообще говоря, некорректно, так как в этом случае приходится анализировать неравномерные по времени ряды. В связи с этим можно напомнить о работах А.И. Оля [14, 15], в которых предлагается для выделения векового цикла использовать скользящее сглаживание по четырем соседним циклам для максимальных среднегодовых значений чисел Вольфа за цикл. При этом не только укорачивается исходный и без того короткий ряд, но и возникает неоднозначность в определении эпох экстремумов вековых циклов. Однако этот метод позволяет удивительно просто и быстро получить оценку высоты прогнозируемого цикла (с достаточно широким коридором, соответствующим заданному доверительному интервалу) и оценить моменты наступления эпох его экстремумов, но точность полученных значений оказывается невысокой. Для устранения неравномерности рядов по времени гораздо эффективнее оказывается разбиение циклов на фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый метод сверхдолгосрочного прогноза солнечной активности для ряда чисел Вольфа, который был применен для получения прогноза циклов активности 23 и 24. Прогнозируемое максимальное ФС значение числа Вольфа в цикле 23 $W^{max}(23) = 126 \pm 30$ с эпохой главного максимума, приходящейся на вторую половину 2000 г. Предварительный прогноз на цикл 24: $W^{max}(24) = 127 \pm 30$, эпоха экстремума – первая половина 2011 г., общая продолжительность цикла – $10,8 \pm 0,7$ г. Будущий цикл активности 24 ожидается на уровне нынешнего и, по-видимому, завершит текущий

вековой цикл активности Солнца. Эпигноз ветви роста текущего цикла 23 хорошо согласуется с данными наблюдений.

2. Этот метод также может быть использован и для других индексов солнечной активности (в частности, для суммарных площадей солнечных пятен, плотности потока радиоизлучения на частоте 2800 МГц, ряда геомагнитных индексов).

3. Метод ФС включает в себя анализ свойств 11-летних циклов (в зависимости от их фазы) и поведения отдельных 11-летних циклов в бициклах, выделение тренда и векового цикла солнечной активности.

4. Пренебрежение сверхвековым и вековым ходом солнечной активности приводит к большим ошибкам получаемых прогнозов.

5. Предложенный метод не опровергает, а дополняет и уточняет результаты, полученные другими авторами, и с этой точки зрения может быть применен для уточнения долгосрочных прогнозов солнечной активности на основе полученных уравнений регрессии между отдельными фазовыми средними (ФС).

6. Метод позволяет получать не только значение числа Вольфа в максимуме цикла, но и всю кривую солнечного цикла в шестнадцати равномерно удаленных точках, выделять критические точки циклов, оценивать моменты наступления начала и конца реальных солнечных циклов с учетом эффекта перекрытия соседних циклов по анализу поведения некоторых фазовых средних.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. – Л.: Наука, 1973. – 258 с.
2. Цирульник Л.Б., Кузнецова Т.В., Ораевский В.Н. Математическая модель солнечной активности с нестационарными гармониками и нелинейными эффектами. // В сб.: Солнечно-земная физика. Труды VII Симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ. – Троицк, 1999. – С. 162 – 167
3. Obridko V.N. Some comments the problem of solar cycle prediction. // Solar Physics. V. 156. 1995. – P. 179 – 190
4. Нусинов А.А., Аргументы в пользу большой амплитуды 23-го солнечного цикла. Частное сообщение
5. Чистяков В.Ф. Прогноз солнечной активности до 2030 года. // Солнечные данные. 1983. №1. – С. 97-100
6. Витинский Ю.И. Прогноз главных параметров 23-го цикла солнечных пятен. // Солнечные данные. Статьи и сообщения 1995-1996. – СПб., 1997. – С. 25-32
7. Кононович Э.В., Красоткин С.А., Чумак О.В. Прогноз предстоящих циклов солнечной активности 23 – 24. – Там же. – С. 33 – 37
8. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. – М., 1986. 286 с.
9. Витинский Ю.И. Предцюрихская наблюдательная основа для изучения солнечной цикличности. // В сб.: Проблемы солнечной активности (сб. научных трудов). – Л., 1991. – С. 29 – 42
10. Куклин Г.В., О связи чисел Вольфа и потока радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц. // Солнечные данные. 1984. №1. – С. 87-95
11. Чистяков В.Ф. Солнечные циклы и колебания климата. – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с. (Сер. «Труды УАФО; Вып. 1»)
12. Храмова М.Н., Красоткин С.А., Кононович Э.В. Метод фазовых средних для сверхдолгосрочного прогноза солнечной активности на примере цикла 23. // В сб.: Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. 22 – 24 ноября 2000 г. Тезисы докладов. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного государственного университета. 2000. – С. 29 – 31

13. Храмова М.Н., Кононович Э.В. О возможности применения метода «Гусеница» для прогноза солнечной активности. – Там же. – С. 26 – 28
14. Оль А.И. О долгосрочном прогнозе солнечной активности. // Бюлл. КИСО. №1(15). 1949
15. Оль А.И. О долгосрочном прогнозе солнечной активности на конец текущего и на следующий 11-летний цикл. // Бюлл. КИСО. №2(16). 1949
16. Куклин Г.В. Отображение Пуанкаре и солнечные циклы. // Солнечные данные. 1993. № 6. – С. 61 – 66
17. Гневышев М.Н., Оль А.И. О 22-летнем цикле солнечной активности. // Астрон. журнал. 1948. Т. 25. – С. 18 – 20
18. Schatten K., Hoyt D. Solar cycle 23 forecast update. // Geophys. Res. Let. V. 25. No.5. 1998. – P. 599 – 601
19. Mendoza B., Ramirez J. A straightforward estimation of the maximum sunspot number for cycle 23. // Ann. Geophysicae. V. 17. No. 5. 1999. – P. 639 – 641
20. Wolf R. Mitt. über die Sonnenflecken. Zürich, 1856 – 1866. No. 1 – 20. – 305 s.
21. Wilson R. On the long-term secular increase in sunspot number. // Solar Physics. V. 115. 1988. – P. 397 – 408
22. Wilson R. An early estimate for the size of cycle 23. // Solar Physics. V. 140. 1992. – P. 181 – 193
23. Solar activity inputs for upper atmospheric models used in programs to estimate spacecraft orbital lifetimes // NASA/MSFC memorandum EL23(04 – 96). 1995
24. Schatten K., Myers D.J. Solar activity forecast for cycle 23. // Geophys. Res. Letters. V. 23. No. 6. 1996. – P. 605 – 608
25. Kulkarni D.R., Pandya A.S., Parikh J.C. Modeling and predicting sunspot activity – state space reconstruction + artificial neural network methods. // Geophys. Res. Let., v. 25, no.4, 1998. – P. 457-460
26. Shove D.J. // Ann. Geophys. No. 1. 1983. – P. 391
27. Контор Н.Н., Любимов Г.П., Переслегина Н.В., Хотилова Т.Г. Прогноз максимального числа солнечных пятен в 11-летних циклах 22 – 44. // Солнечные данные. 1983. № 11. – С. 74 – 79
28. Makarov V.I., Mikhailutsa V.P. The latitude of filament bands at the sunspot minimum and the activity level in the following 11-year solar cycles. // Solar Phys. V. 137. 1992. – P. 385