

А.П. Крамынин, Ф.А. Михалина

О ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОДИННАДЦАТИЛЕТНИХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ЕЕ ПРОГНОЗЕ

Обсуждаются особенности динамики и взаимосвязи параметров одиннадцатилетних циклов, определенных по различным характерным точкам 11-летнего цикла. Особое внимание уделяется динамике и взаимосвязям параметров «физического» цикла: его продолжительности и другим характеристикам, в которых учитывается эффект наложения циклов. Определен период следования 11-летних циклов друг за другом по моментам появления первого пятна нового цикла. Такая методика позволила исключить вклад в изменения периода следования циклов эффектов наложения и асимметрии циклов. Это позволило установить, что продолжительность периода следования 11-летних циклов зависит от векового цикла, а продолжительность четного цикла больше, чем нечетного. Среднее же значение периода следования совпадает с аналогичными значениями, определенными по точкам экстремумов. Изменение продолжительности 22-летнего цикла, определенное по данной методике, свидетельствует о наличии разрывов вблизи минимумов векового цикла. Выявлена тесная связь между продолжительностью ветви спада физического цикла и расстоянием между соседними циклами, измеренным между их максимумами. На основе этой связи сделан прогноз 24-го цикла солнечной активности.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании временных последовательностей индексов солнечной активности выявлен ряд взаимосвязей между различными параметрами 11-летних циклов, которые активно используются для прогноза активности Солнца и оценки ее уровня в прошлом на основе анализа солнечно обусловленных природных явлений. Исторически сложилось так, что первыми такими параметрами стали значение ин-

декса в момент максимума цикла, продолжительность ветвей роста, спада и цикла в целом. Продолжительность ветви роста определяется как промежуток времени от минимума до следующего за ним максимума, а ветви спада – от максимума до следующего за ним минимума. Продолжительность же цикла можно определить двумя способами: либо как промежуток времени между соседними минимумами (изменяется в пределах от 8,3 до 14,6 года), либо как промежуток времени между соседними максимумами (изменяется от 7,3 до 17,1 года). Как видим, во втором случае продолжительность цикла варьирует в более широких пределах [9].

Хорошо известно, что соседние 11-летние циклы налагаются друг на друга: пятна нового цикла появляются на высоких широтах ($\varphi \geq 30^\circ$) за 1–2 года до минимума, а пятна старого цикла продолжают появляться 1–2 года после минимума на низких широтах с центром тяжести по $\varphi \approx 7-8^\circ$. В дальнейшем было установлено, что группы пятен соседних циклов отличаются магнитными характеристиками (закон Хейла). Все это приводит к тому, что в эпоху минимума положение минимального значения индекса на временной шкале будет зависеть от эффекта наложения циклов. В определение продолжительности циклов по расстоянию между максимумами вносит свой вклад эффект асимметрии циклической кривой. Для исключения влияния этих факторов В.Ф. Чистяков [8] предложил определять продолжительность цикла как интервал времени между моментами, когда средние широты пятен в соседних циклах равны 12° , 10° , 8° (широтный метод). В дальнейшем этот широтный метод модернизировался по способу выбора момента начала цикла по характерным значениям широты, определенным тем или иным образом [2, 5]. Либо выбирались другие реперные точки, так, например, авторы [10] предложили определять продолжительность циклов по отрезку времени между медианами соседних циклов взамен такого способа, когда этот параметр определяется по расстоянию между максимумами.

Учитывая вышеизложенное, исследователи пришли к выводу, что физически правильнее продолжительность 11-летнего цикла активности Солнца определять как промежуток времени от появления первого пятна нового цикла на высоких широтах до исчезновения последнего пятна этого же цикла на низких широтах. Продолжитель-

ность такого цикла (назовем его «физический») будет, естественно, больше, чем та, которую мы определяем по экстремальным точкам цикла и которая в этом случае характеризует не реальную продолжительность цикла, а частоту следования циклов друг за другом. Хорошо известна модуляция амплитуды 11-летних циклов вековым циклом, а вот изменение их продолжительности лучше проявляется не в 11-летних циклах, а в их объединениях в пары – 22-летних циклах, которые начинаются с четного 11-летнего цикла [4]. На ветви спада векового цикла они идут через 23 года, а на ветви подъема – через 21 год. Этот факт использовался авторами [4] для прогноза момента максимума 24-го цикла солнечной активности (декабрь 2012 г.). Несколько отличный ход изменения длительности 22-летних циклов был получен В.Ф. Чистяковым [9], который выявил разрывы в изменениях продолжительности 22-летних циклов в ходе векового цикла.

С использованием различных характеристик 11-летних циклов и их взаимосвязей было выполнено немало прогнозов параметров циклов солнечной активности, в том числе и текущего цикла № 24 [3, 4, 7, 11, 12]. В работе [1] рассмотрены общие характеристики 11-летних циклов активности и современные границы их прогнозирования. Первые закономерности развития 11-летних циклов получены еще Вальдмайером, при установлении их использовались параметры циклов, определенные по экстремальным точкам циклической кривой. Представляет интерес исследовать динамику и аналогичные взаимосвязи циклических параметров для физических циклов.

ДАННЫЕ, ИХ ОБРАБОТКА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе мы определяли физическую продолжительность 11-летних циклов активности Солнца, используя даты появления групп пятен нового цикла и даты исчезновения групп пятен уходящего цикла. Мы также вычислили длительности ветви роста как отрезок времени от даты наблюдения первого пятна нового цикла до даты его максимума и ветви спада как интервал времени от даты максимума цикла до даты исчезновения последнего пятна этого цикла (соответствующие реперные точки приведены на рис. 1). Мы исследуем

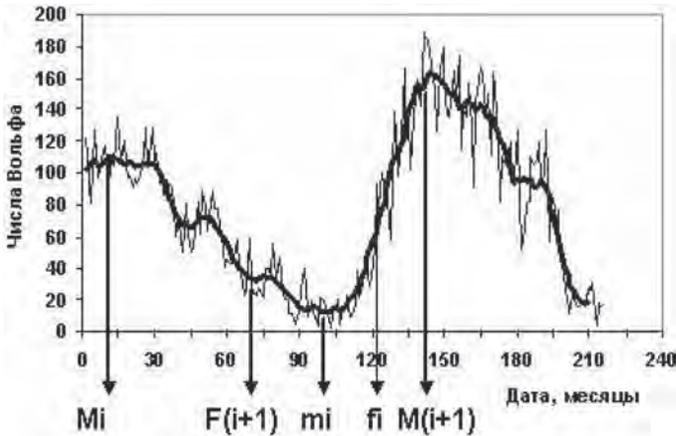


Рис. 1. Реперные точки, используемые в работе, на примере циклов № 20–21. M_i – момент максимума i -того цикла, $F(i+1)$ – момент появления группы пятен нового $(i+1)$ цикла, m_i – дата минимума i -того цикла, f_i – момент исчезновения группы пятен старого i -того цикла, $M(i+1)$ – максимум нового $(i+1)$ цикла

довали динамику этих параметров, их взаимосвязи и прогностические возможности.

Для анализа использовали данные о группах пятен с 1870 по 2012 г., взятые из Гринвичского каталога, данные Службы Солнца СССР, наблюдения Уссурийской астрофизической обсерватории, ГАС ГАО и других Интернет-источников. Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2.

Анализ данных табл. 1 показывает, что наблюдается явная северо-южная асимметрия в появлении первой группы пятен нового цикла и исчезновении последней группы старого цикла. Мы видим, что в северном полушарии пятна нового цикла появляются раньше, чем в южном полушарии (9 из 13 случаев), и исчезают позже также в северном полушарии (10 из 13 случаев).

Наблюдается один случай, когда первое пятно нового цикла появилось в минимуме текущего 11-летнего цикла. Средняя продолжительность интервала наложения циклов около 35,3 месяца. Причем интервал времени от момента появления пятна нового цикла до минимума текущего цикла несколько меньше, чем интервал времени от

Таблица 1

Номер цикла	Дата максимума цикла M_i	Дата минимума цикла m_i	Дата появления пятен нового цикла, (в скобках длительность до минимума $[m_i - F(i+1)]$ в месяцах) и широта группы	Дата исчезновения пятен старого цикла (в скобках длительность после минимума $[F(i+1) - m_i]$ в месяцах) и широта группы	Длительность наложения циклов $[F(i+1)]$ (в месяцах)
11	1870,7	1879.1	1877.04.30 (21) 28,6	1881.06.15 (29) 4,3	50
12	1883.12	1890.2	1888.12.30 (14) -35,5	1891.11.11 (21) 3,8	35
13	1894.1	1902.1	1900.01.24 (24) 38,4	1903.05.25 (16) -2,1	40
14	1906.2	1913.6	1911.12.19 (18) 23,3	1915.01.30 (19) -1,5	37
15	1917.7	1923.6	1921.10.01 (20) 34,0	1924.10.04 (16) 7,2	36
16	1928.3	1933.8	1932.01.03 (19) -34,6	1935.07.04 (23) 6,9	42
17	1937.3	1944.2	1942.04.02 (22) -30,3	1945.08.08 (18) 7,7	40
18	1947.4	1954.3	1953.08.18 (7) 53,0	1955.10.25 (19) 9,1	26
19	1958.2	1964.8	1963.05.08 (15) -33,0	1966.05.30 (21) 4,5	36
20	1968.9	1976.5	1974.11.16 (18) 37,0	1977.12.10 (19) 1,1	37
21	1979.12	1986.9	1985.09.05 (12) 33,0	1987.08.08 (11) 6,1	23
22	1989.6	1996.5	1996.05.10 (0) 35,0	1997.08.02 (15) 4,5	15
23	2000.3	2008.12	2008.01.04 (11) 30,0	2011.07.02 (31) -2,6	42
Среднее			15,5	19,8	35,3

Таблица 2

Номер цикла	Длительность ветви роста $[M(i+1) - F(i+1)]$, в месяцах	Длительность ветви спада $[F(i+1) - m_i]$, в месяцах	Физическая длина 11-го цикла $[F(i+1) - F(i+1)]$, в месяцах	Ветвь спада $[F(i+1) - m_i]$, в годах	Интервал времени между минимумами $[m(i+1) - m_i]$, в месяцах	Интервал времени между максимумами $[M(i+1) - M_i]$, в месяцах
11	-	131	-	-	142	161
12	80	93	173	11,92	143	122
13	59	112	171	14,25	137	145
14	73	107	180	15	122	137
15	67	87	154	12,83	120	128
16	81	88	169	14,08	126	108
17	62	99	161	13,42	121	121

Номер цикла	Длительность ветви роста $(M(i+1)-F(i+1))$, в месяцах	Длительность ветви спада ($f_i - M_i$), в месяцах	Физическая длина 11-го цикла $[f(i+1)-F(i+1)]$, в месяцах	Ветвь спада ($f_i - M_i$), в годах	Интервал времени между минимумами $[m(i+1)-m_i]$, в месяцах	Интервал времени между максимумами $[M(i+1)-M_i]$, в месяцах
18	58	102	160	13,33	125	130
19	54	99	153	12,75	141	127
20	64	111	175	14,58	124	135
21	61	92	153	12,75	116	114
22	45	98	143	11,92	151	129
23	47	136	183	15,25	–	–
Среднее	63,3±10	104±24	164,6±17	13,4±0,8	130,7±10	131,5±14

Примечание. Прочерк (–) – отсутствие данных.

минимума до момента исчезновения пятен этого цикла, их средние значения равны 15,5 и 19,8 месяца соответственно. Наблюдается тенденция к уменьшению интервала наложения циклов на исследуемом отрезке времени (см. рис. 2). Также отметим, что за начало физического цикла № 24 можно принять момент появления высокоширотного пятна (широта 30°) в северном полушарии Солнца 2008.01.04.

В табл. 2 приведены значения различных параметров 11-летних циклов активности Солнца, измеренные в месяцах (соответствующие реперные точки и их обозначения приведены на рис. 1). Продолжительность физического 11-летнего цикла рассчитывалась от даты появления первой группы пятен нового цикла $F(i+1)$ до исчезновения последней группы пятен этого же цикла $f(i+1)$. Ветвь роста мы считали от даты наблюдения первой группы пятен нового цикла $F(i+1)$ до его максимума активности $M(i+1)$. Ветвь спада измерялась от момента максимума 11-го цикла M_i до момента исчезновения последней группы пятен f_i из этого же цикла.

Анализ табл. 2 показывает, что оценки средней продолжительности циклов по точкам между минимумами или максимумами практически совпадают. Они равны $130,7 \pm 10$ и $131,5 \pm 14$ месяцев соответственно. Оценки среднего периода следования циклов друг за

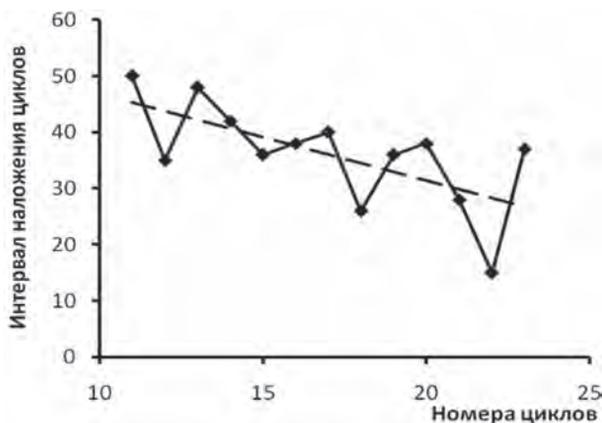


Рис. 2. Интервал наложения соседних физических 11-летних циклов солнечной активности (в месяцах)

другом, полученные по разным точкам экстремумов циклической кривой, равнозначны. То есть влияние факторов (наложение циклов и их асимметрия), влияющих на положение экстремумов, при усреднении исключается, и мы получаем одинаковые средние значения.

Логично определять начало нового цикла по моменту появления первого пятна этого цикла, а не по точкам экстремумов. Это позволит нам исключить влияние факторов наложения циклов и их асимметрии на временные изменения периода следования 11-летних циклов друг за другом. Средняя продолжительность периода следования 11-летних циклов, определенная по этим реперным точкам, также равна 130 месяцев, то есть совпадает со значениями, полученными по экстремальным точкам. Анализируя изменения длительности физических 11-летних циклов, определенных по моментам появления первых пятен, отмечаем (см. рис. 3): 1) циклы короче в максимуме векового цикла и длиннее вблизи минимумов; 2) четные циклы длиннее нечетных, исключение составляет пара циклов 22–23. Второй результат дополняет правило Гневышева–Оля, распространяя его не только на различие высот четного и нечетного циклов, но и на различие их продолжительности. Для исключения вариаций, связанных с различием продолжительности четных и нечетных циклов во внутривеко-

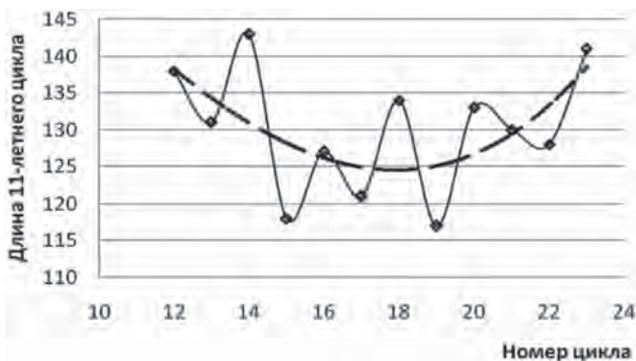


Рис. 3. Изменение продолжительности физических 11-летних циклов, определенной по моментам появления первых пятен (сплошная линия), ее аппроксимация полиномом четвертой степени (штриховая линия)

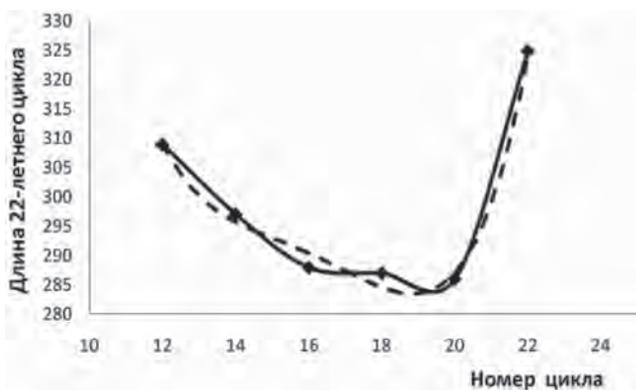


Рис. 4. Изменение продолжительности физических 22-летних циклов, определенной по моментам появления первых пятен (сплошная линия), ее аппроксимация полиномом четвертой степени (штриховая линия)

вых вариациях, объединим их в пары – физические 22-летние циклы, которые начинаются с четного 11-летнего цикла, как это следует из исследований Гневышева–Оля. На рис. 4 видим, что изменения продолжительности физических 22-летних циклов, определенные по данной методике, свидетельствуют о наличии резких скачков вблизи минимумов вековых циклов, как и в [9].

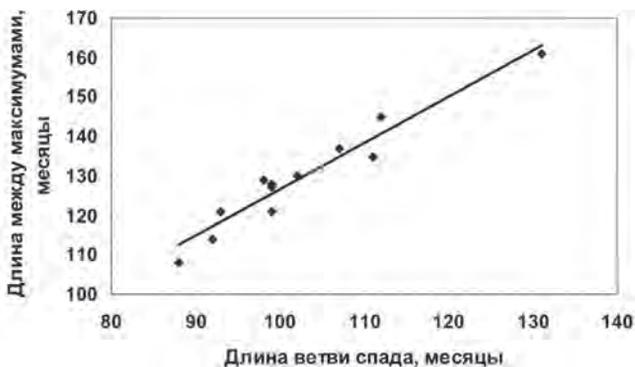


Рис. 5. Связь между продолжительностью ветви спада физического цикла и расстоянием между соседними максимумами циклов

Исследование взаимосвязи между различными характеристиками физических циклов выявило, что наиболее высокий коэффициент корреляции 0,98 наблюдается между длиной ветви спада и расстоянием между максимумами соседних циклов (см. рис. 5). Подобная взаимосвязь исследовалась М.Ю. Слоним [6] для аналогичных параметров цикла, но определенных по экстремальным точкам. Было получено значение коэффициента корреляции 0,86 для циклов № 1–20. Наша подобная оценка для исследуемого периода циклов № 11–23 дает коэффициент корреляции 0,76.

Используя полученное нами уравнение регрессии, можно определить момент максимума цикла № 24, который должен наступить через 169 ± 5 месяцев после максимума цикла № 23, то есть в мае 2014 г. ± 5 месяцев. Оценка максимума среднемесячного сглаженного числа Вольфа по длине ветви роста дает среднегодовое значение 85 ± 50 . Большая ошибка связана с невысоким коэффициентом корреляции между этими параметрами цикла, равным 0,7.

ВЫВОДЫ

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что на исследуемом интервале времени средняя реальная продолжительность

11-летнего цикла с учетом эффекта наложения циклов равна 164 ± 17 месяцев (13,7 года). Наблюдается тенденция к уменьшению интервала наложения циклов на этом временном отрезке 1874–2012 г. Следует различать понятия «физическая» реальная продолжительность цикла, равная в среднем 13,4 года, и «период их следования друг за другом», равный в среднем ≈ 11 годам, и под этим различием заложена разная физика. Средние периоды следования 11-летних циклов друг за другом, определенные по экстремальным точкам минимумов и максимумов, а также по моментам появления первого пятна нового цикла, совпадают в пределах погрешностей и равны соответственно $130,7 \pm 10$, $131,5 \pm 14$, $130,1 \pm 8$ месяцев. Метод определения периода циклов по моментам появления первых пятен позволяет исключить вклад в изменения периода следования циклов эффектов наложения и асимметрии циклов. Это позволило установить, что длительность периода следования 11-летних циклов зависит от векового цикла (в максимуме – меньше, а в минимуме – больше). Продолжительность четного цикла больше, чем нечетного. В изменениях продолжительности физических 22-летних циклов, определенных по данной методике, выявляются разрывы вблизи минимумов векового цикла, как и в [9]. Выявлена тесная связь между продолжительностью ветви спада физического цикла и расстоянием между соседними циклами, коэффициент корреляции 0,98. На основе этой связи сделан прогноз 24-го цикла солнечной активности, максимум которого ожидается в мае 2014 г. ± 5 месяцев, максимальное значение сглаженного среднемесячного числа Вольфа 85 ± 50 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишков В.Н., Шибачев И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. Сер. физическая, 2006. Т. 70, № 10. С. 1439–1442.
2. Милецкий Е.В., Иванов В.Г. Широкие моменты отсчета фазы и длина 11-летнего цикла солнечных пятен // Солнечно-земная физика. 2013. Труды Пулковской международной конференции по физике Солнца. Санкт-Петербург, 2013. С. 145–148.
3. Наговицин Ю.А., Кулешова А.И. Соотношение Вальдмайера и ранняя диагностика величины максимума текущего цикла СА // АЖ. 2012. Т. 89, № 10. С. 883–887.

4. *Рощина Е.М., Сарычев А.П.* Ритм физических циклов пятнообразования на Солнце // *Астрономический вестник*. 2010. Т. 44, № 1. С. 88–92.
5. *Рощина Е.М., Сарычев А.П.* Закон Шперера и ритм пятнообразования на Солнце // *Астрономический вестник* 2011. Т. 45, № 4. С. 376–382.
6. *Слоним Ю.М.* Некоторые статистические связи и прогноз одиннадцатилетнего цикла // *Солнечные данные*. 1984. № 5. С. 78–82.
7. *Тлатов А.Г.* О возможности прогноза амплитуды солнечной активности на два 11-их цикла // *Труды Пулковской международной конференции по физике Солнца*. Санкт-Петербург, 2007. РАН ГАО. С. 337–340.
8. *Чистяков В.Ф.* Эффект наложения циклов солнечной активности и их продолжительность // *Солнечные данные*. 1961. № 7. С. 78–83.
9. *Чистяков В.Ф.* Солнечные циклы и колебания климата // *Труды УАФО*. В. 1. Владивосток: Дальнаука, 1997. 155 с.
10. *Mursula K., Ulich T.* A new method to determine the solar cycle length // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, № 11. P. 1837–1840.
11. *Hathaway D.H., Wilson R.M., Reichmann E.J.* The shape of the sunspot cycle // *Sol. Phys.* 1998. Vol. 181, № 2. P. 491–512.
12. *Uzal L.C.* et al. Prediction of the maximum amplitude, time of occurrence and total length of solar cycle 24 // *Sol. Phys.* 2012. Vol. 279. P. 551–560.