

УДК 523.98

## Предсказанные и наблюдаемые параметры 23-го цикла солнечной активности

Ц.С. Хецуриани, М.Ш. Гиголашвили, Н.Б. Ограпишвили

e-mail: [Natelaograp@yahoo.com](mailto:Natelaograp@yahoo.com)

Поступила в редакцию 31 января 2007 г.

FORECASTED AND OBSERVED PARAMETERS OF SOLAR CYCLE 23, by Ts.S. Khetsuriani, M.Sh. Gigolashvili, N.B. Ograpishvili. Observational data on changes in the sunspot number and the geomagnetic index are used to forecast the parameters of solar cycle 23. Cycles from 2 to 22 are studied by statistical methods.

Our forecast of solar cycle 23 is as follows: the minimum occurs in May 1996, the maximum occurs in June 2000,  $W_{\max} = 150 \pm 35$  (April 2000); the cycle ends in 2007.

The minimum and maximum of solar cycle 23 were observed in May 1996 and April 2000, respectively.

---

### 1 Введение

Прогнозирование параметров, характеризующих солнечную активность, по существу, является их экстраполяцией на определенный период. Обычно применяют линейные формы экстраполяции, так как такое приближение считается вполне достаточным применительно к относительным числам солнечных пятен (Вальдмайер, 1936). Наиболее интенсивная разработка методов прогнозирования относится еще к началу минувшего столетия. Основой этих методов послужили: гипотеза суперпозиции и так называемая эруптивная гипотеза. Согласно первой гипотезе, циклическая кривая относительных чисел солнечных пятен возникает в результате наложения многих периодических составляющих. Эта гипотеза стимулировала поиски всевозможных периодов в изменениях циклической кривой солнечной активности, но претерпела неудачу при прогнозировании относительных чисел солнечных пятен. Поэтому (Вальдмайер, 1935) была предложена гипотеза, рассматривающая каждый 11-летний цикл солнечных пятен как независимый взрыв. “Эруптивная” гипотеза сыграла большую роль в выявлении основных внутренних закономерностей 11-летних циклов, но она тоже не совершенна, так как не учитывает связь с другими циклами. Дальнейшее развитие существующих методов на основе использования математической статистики и внедрения вычислительной техники способствовало возрождению гипотезы суперпозиции с использованием также внутренних закономерностей 11-летних циклов.

В зависимости от характера задачи прогнозы солнечной активности делятся на три типа: кратковременные – порядка нескольких дней (но менее одного оборота Солнца); долгосрочные – все прогнозы внутри данного цикла (месячные и квартальные прогнозы называются прогнозами средней заблаговременности, прогнозы за год и несколько лет – длительной заблаговременности); сверхдолгосрочные прогнозы – на следующий 11-летний солнечный цикл или несколько циклов вперед (Витинский, 1973).

Оправдываемость краткосрочных и долгосрочных прогнозов средней заблаговременности недостаточно высока, так как в этом случае мы имеем дело с флуктуационными процессами, а предвычисление их появления пока практически невозможно. Прогнозы на год и на несколько лет характеризуются довольно высокой точностью благодаря детальным исследованиям внутрицикловых закономерностей, проведенным после отказа от гипотезы суперпозиции. Что касается сверхдолгосрочных прогнозов, оправдываемость далека от желаемой. Причиной является то обстоятельство, что используемые при прогнозировании регулярные телескопические наблюдательные данные охватывают лишь около 300 лет, а это недостаточно ни для выявления закономерностей циклических процессов высокого порядка, ни для достаточно полного изучения всех особенностей солнечной цикличности.

## 2 Постановка задачи. Наблюдательный материал

Находясь на ветви спада солнечной активности цикла № 22, естественен огромный интерес к предсказанию параметров грядущего, 23-го, цикла. (Нумерация производится по Цюриху, где первым является цикл, начатый в 1755 году.). Многие публикуемые сверхдолгосрочные прогнозы параметров 23-го цикла солнечной активности предвещали очень высокий уровень активности. Во-первых, 23-й цикл будет находиться на ветви подъема векового цикла; во-вторых, завершённый цикл № 22 (являясь первой половиной 22-летнего магнитного цикла, или циклом с четным номером) имеет максимум выше, чем все остальные четные циклы; в-третьих, четные циклы почти всегда ниже, чем высота последующих нечетных циклов. Отсюда и ожидаемое высокое значение максимума. Так как такой прогноз казался созвучным с пророчеством о конце света на рубеже двух тысячелетий, мы сочли интересным провести прогнозирование различными методами, чтобы выявить все возможные варианты. До начала цикла мы предвычислили характеристики 23-го цикла солнечной активности различными методами, результаты которых представлены в (Хецуриани и др., 1977; Хецуриани, Гиголашвили, 1998). В частности, определили высоту максимума цикла и эпохи максимума предшествующего и последующего минимумов (работа выполнена при поддержке гранта Академии Наук Грузии № 1996-2-32). В данной работе предвычисленные разными методами величины параметров сравниваются с ныне уже известными параметрами 23-го цикла из прогнозов других авторов. Они сопоставляются также с уже известными параметрами, полученными в результате обработки данных наблюдений последних лет, в предположении, что хотя 23-й цикл не окончен, но ветвь подъема и максимум цикла пройдены.

При прогнозировании использовались данные об относительных числах солнечных пятен, в частности, среднемесячные числа  $W$  и  $aa$ -индексы геомагнитной возмущенности, взятые из (Вальдмайер, 1961; Solar Geophysical Data). Сглаживание среднемесячных чисел солнечных пятен происходило по методу скользящих средних по 12 точкам. Такое сглаживание исключает вариации пятнообразовательной деятельности Солнца в пределах осреднения и является наиболее общей характеристикой уровня солнечной активности ( $W_{n,m}$  и  $W_{n,m}$ ).

Известно, что качество данных о солнечных пятнах, наблюдаемых ранее 1849 года, неудовлетворительное (Вальдмайер, 1961), но для увеличения количества данных о различных признаках переменной мы рискнули воспользоваться и менее надежными данными, ухудшая этим точность определения, но, получая возможность выявить альтернативные признаки.

## 3 Прогнозирование характеристик солнечного цикла

а) В разработке методов сверхдолгосрочного прогноза параметров солнечного цикла важную роль сыграли работы Глайцберга (Глайцберг, 1939; Глайцберг, 1951), основанные на идее существования векового цикла солнечной активности. Метод, предложенный Олем (Оль, 1949), кроме векового, учитывает сверхвековые изменения уровня солнечной активности. Следуя

этим методам, мы построили кривую изменения максимумов 11-летних циклов  $W_{n,m}$ , определенных по сглаженным среднемесячным значениям относительных чисел солнечных пятен  $W$  (рис. 1 в (Хецуриани и др., 1998)). Тонкая ломаная кривая соответствует изменению максимумов циклов). Для исключения 11- и 22-летних и, возможно, более длительных вариаций солнечной активности мы применили метод сглаживания по четырем точкам (44-летнее осреднение). Полученная сглаженная кривая (жирная линия на рис. 1 в (Хецуриани и др., 1998)) показывает ход вековой вариации солнечной активности. Каждый максимум векового цикла сопровождается двумя максимумами 11-летних циклов. Последний вековой цикл (максимумы циклов 14–22) имеет длинную ветвь подъема. Поэтому можно предположить, что ветвь спуска будет более короткой и, следовательно, более крутой. Тенденция развития этой кривой (особенно значения максимумов циклов 21 и 22) показывает, что она опустится вниз. Максимум цикла 23 окажется на спуске векового цикла и примет значение  $<W_{22,m} = 158$ . Иначе на кривой векового хода появится второй, более высокий максимум, а на ломаной кривой хода максимумов 11-летних циклов появится третий пик над одним вековым максимумом, что не имело места за всю историю телескопического наблюдения Солнца; т. е. можно было ожидать нарушение правила чередования высот и принимать  $W_{22,m} \geq W_{23,m}$ . Экстраполяция вековой кривой на 1985 год (по циклам 14–22) дает  $W_4 = 147$ . Так как  $W_{20,m} + W_{21,m} + W_{22,m} = 434$ , для максимума 23-го цикла солнечной активности получаем  $W_{23,m} = 154 \pm 48$ . Это означает, что имеется 90 %-й шанс того, что значение максимума 23-го цикла попадает в интервал 106–202, но по причинам, отмеченным выше, для данного случая более вероятно попадание в первую половину интервала (106–154).

б) Для прогнозирования высоты цикла активности было использовано правило чередования высот четно-нечетных циклов (по цюрихской нумерации), в частности, правило Гневывшева-Оля (Гнедышев, Оля, 1948), которое предполагает, что хейловские 22-летние циклы начинаются с 11-летних циклов с четными номерами и высоты нечетных циклов больше, чем высоты четных. Нами была исследована зависимость высот нечетных циклов  $W_{2n+1,m}$  от четных  $W_{2n,m}$  для циклов от  $-2$  до 22 (в отличие от многих авторов, использующих лишь данные о надежно наблюдаемых циклах 10–22). Циклы 2, 10, 14, 16, 18, 20 образовали основную корреляционную последовательность (коэффициент корреляции  $r = 0.993$ ), а циклы  $-2, 0, 6, 8, 12$ , находящиеся в экстремумах вековой кривой и имеющие альтернативный ход максимумов ( $-2, 0, 8$ ) или малые различия максимумов (6, 12), создают отличную от основной корреляционную последовательность ( $r = 0.982$ ). Соответственно получены два регрессионных уравнения. Первое из них для значения максимума 23-го цикла дает  $W_{23,m} = 209,2 \pm 10$ , а второе –  $W_{23,m} = 137,9 \pm 15$ . Учитывая вышеприведенное утверждение  $W_{22,m} \geq W_{23,m}$ , мы предпочли принять второе (меньшее) значение для максимума 23-го цикла ( $W_{23,m} = 138$ ).

в) Следующий метод определения параметров цикла, использованный нами, опирается на связь максимумов трех последовательных 11-летних циклов (Бонов, 1970). В результате получено  $W_{23,m} = 156,7 \pm 28$ .

г) Прогнозирование параметров 23-го цикла проведено также по методу “предвестников”. В частности, были использованы опубликованные в (Solar Geophysical Data) данные об аа-индексах геомагнитной возмущенности. Нами были построены кривые изменения среднемесячных значений индексов  $W$  и аа и их 12-месячные скользящие средние. Среднемесячные кривые показали, что последний минимум относительных чисел солнечных пятен был в мае 1996 года ( $W_{\min} = 8,2$ ), а минимум аа-индексов – в августе 1997 года ( $aa_{\min} = 15,9$ ). Максимальные значения 11-летних солнечных циклов оказались коррелированы ( $r = 0.905$ ) с минимальными значениями аа-индексов, наблюдаемыми перед данным максимумом. Эта зависимость позволила нам предопределить высоту 23-го цикла:  $W_{23,m} = 147 \pm 35$ . Кроме этого, временные интервалы от минимума аа-индексов до  $W_m$  оказались коррелированными со значениями  $aa_{\min}$  ( $r = 0.841$ ), что дало возможность оценить фазу максимума: должен был наступить в июле 2000 года.

д) Вальдмайер показал (Вальдмайер, 1968), что с ростом высоты максимумов циклов  $W_m$  продолжительность ветви роста  $T_A$  убывает. Анализ данных, проведенный нами в (Хецуриани и др., 1998) для соотношения  $T_A(W_m)$ , показал, что оно разное для циклов с четными и нечетными номерами. Кроме того, каждое соотношение распадается еще на два, создавая различные типы зависимости (четные – А и В, нечетные – С и D). Обычно хейловские пары (четный – нечетный) бывают трех типов: ВС, ВD и АС. Все пары типов ВС и ВD удовлетворяют правилу чередования высот максимумов циклов, а пары типа АС в большинстве случаев не удовлетворяют отмеченному правилу. Соотношение  $T_A(W_m)$ , найденное для цикла 22, несомненно, точно можно отнести к типу А. Следовательно, должна создаваться хейловская пара (22–23) типа АС, и высота максимума цикла 23 вполне может быть не больше, чем у цикла 22 (еще одно подтверждение правильности нашего выбора меньшего значения для максимума 23-го цикла). Если примем, что высота 23-го цикла  $W_{23,m} = 150$ , то для восходящей ветви в (Хецуриани и др., 1998)  $T_A = 4,45 \pm 0,7$ , что для эпохи максимума дает ноябрь 2000 года.

Для оценки продолжительности ветви спада  $T_D$  мы воспользовались слабой положительной связью между  $T_D$  и  $W_m$ . Для того же значения  $W_{23,m} = 150$  получили  $T_D = 6,95 \pm 1,9$  (Хецуриани и др., 1998). В таком случае  $T_{23} = 11,40$ . Естественно, для другого значения  $W_m$  будет другим и  $T_{23}$ .

Для предвычисления продолжительности 23-го цикла  $T_{23}$  мы пользовались положительной корреляцией между продолжительностью 22-летнего цикла (от минимума до минимума) и продолжительностью первого (четного) 11-летнего цикла. Так как  $T_{22} = 9,67$ , то для продолжительности 23-го цикла получили  $T_{23} = 10,76 \pm 1,3$ . Таким образом, наступление минимума после завершения 23-го цикла можно ожидать в 2007 году.

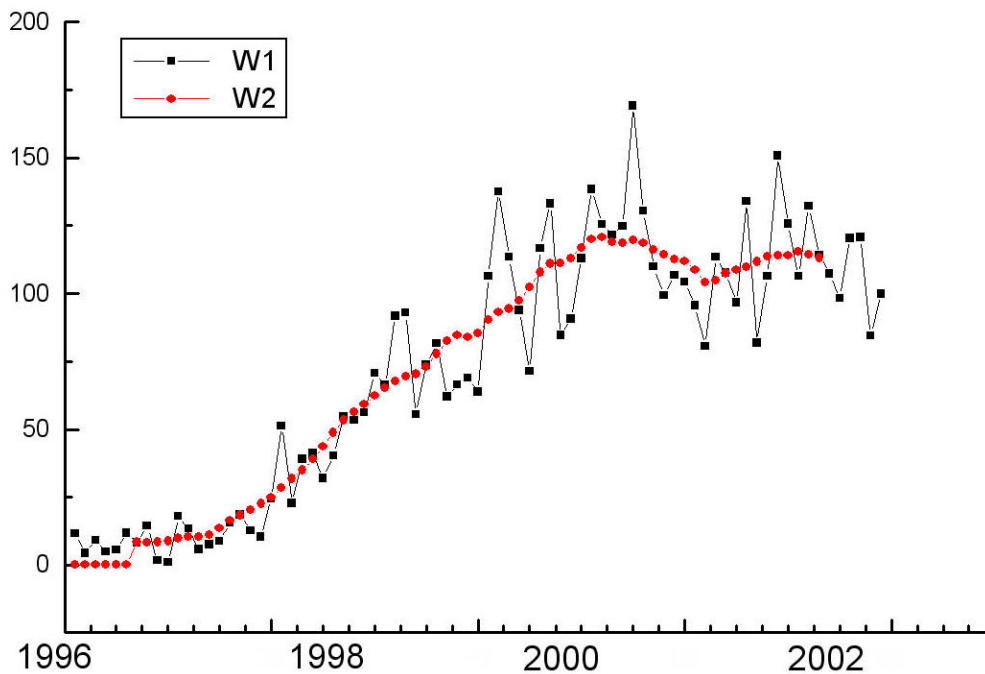


Рис. 1.

#### 4 Наблюденные параметры 23-го цикла

С помощью наблюдательного материала из (Solar Geophysical Data) мы построили рис. 1. Тонкой линией представлены среднемесячные значения относительных чисел солнечных пятен, а их сглаженные 12-ти месячные скользящие средние – толстой кривой. Минимум сглаженной кривой со значением  $W_{\min} = 8,2$ , принятый нами условно за конец 22-го и начало 23-го цикла (май 1996 г.), действительно оказался математическим минимумом. Следующий за ним длительный, стабильный минимум, длившийся 5 месяцев, имел чуть большее значение ( $W_{\min} = 8,8$ ). Как показывает рис. 1, после минимума солнечная активность возрастает и через 3 года и 11 месяцев, т. е. в апреле 2000 г., достигает максимума  $W_{23,м} = 120,8$ . За ним (в июле 2000 г.) последовало значение  $W = 119,7$ , а затем начался медленный спуск. В феврале 2001 г. спуск прекратился и начался пологий подъем, который достиг максимума в ноябре 2001 г. со значением  $W = 115,5$ . Далее продолжается спуск. Как показывают прогноз и результаты наблюдений последних лет, наступление еще одного максимума с большим значением маловероятно. Что касается изменений среднемесячных значений относительных чисел пятен, то самый высокий пик наблюдался в июле 2000 года ( $W_m = 169,1$ ). Таким образом, наблюдаемые параметры 23-го цикла солнечной активности таковы: минимум цикла (начало) приходится на май 1996 года ( $W_{23,\min} = 8,2$ ), максимум цикла ( $W_{23,м} = 121$ ) осуществился в апреле 2000 года, вторичный максимум ( $W_m = 115,5$ ) наблюдался в ноябре 2001 года.

Наступление минимума после завершения 23-го цикла можно ожидать в 2007 году.

#### 5 Обсуждение результатов и заключение

Наше предположение относительно минимума 23-го цикла ( $W_{\min} = 8,2$  в мае 1996 г.) оказалось верным. Наш прогноз значения максимума цикла, полученный различными методами, гласит:  $W_{23,м} = 119 \pm 30, 154 \pm 48, 209 \pm 10, 137,9 \pm 15, 157 \pm 28, 147 \pm 35$ . Временные характеристики:  $T_A = 4.45 \pm 0.7, 4.31 \pm 0,9, T_{23,D} = 6.95 \pm 1.9, T_{23} = 10.76 \pm 13$ . В действительности максимальная высота цикла, наблюдаемая в апреле 2000 года ( $T_A = 3.9$ ),  $W_{23,м} = 121$ .

Рассмотрение результатов показывает, что точность определения параметров низка, в частности, стандартная ошибка определения максимума цикла заключена в пределах 10–48 единиц, а ошибки временных характеристик – 0,5–1,9 года. Нужно отметить, что среди результатов прогноза величины максимумов выделяется одно очень высокое значение ( $209 \pm 10$ ) с наименьшей ошибкой определения. Все остальные значения разные, но все они не больше  $W_{22,м} = 158$ . Эти величины получены разными методами, поэтому их осреднение неправомерно, как и их представление единичными цифрами. Поэтому мы взяли округленное среднее значение  $W_{23,м} = 150 \pm 35$ . Это означает, что имеется 90 %-й шанс того, что величина максимума 23-го цикла окажется в пределах  $W_{23,м} = 115–185$ . Точнее, учитывая вышеприведенное утверждение, что  $W_{22,м} \geq W_{23,м}$ , величина максимума должна находиться в пределах  $W_{23,м} = 115 – 158$ , что оказалось действительно так. Таким образом, наше предпочтение низкого значения максимума блестяще оправдалось. Высокие значения максимума 23-го цикла получены многими авторами, особенно в ранних прогнозах. Копецкий получил  $W_{23,м} = 214$  (Копецкий, 1991), Обридко и др. – 203 (Обридко и др., 1994). Куклин дал две версии: 41 и 206 (Куклин, 1993; Куклин, 1996). Джоселин и др., суммируя 28 различных прогнозов от разных авторов (среди них и наш самый предварительный прогноз:  $W_{23,м} = 119 \pm 30$ , июль 2001 г.), определили пределы возможных значений максимума 23-го цикла от 130 до 190 (Джоселин и др.). Вилсон предсказал 175–213,9 (Вилсон, 1988; Вилсон, 1992). Он считает, что 23-й цикл будет, если не самым высоким, то одним из самых высоких.

Вилсон, бывший референтом нашей статьи о прогнозе для Solar Physics, ссылаясь на более десятка своих работ о прогнозе параметров солнечного 23-го цикла, упрекал нас в игнори-

ровании точно определенного высокого значения максимума цикла и в предпочтении низкого значения.

Нужно отметить, что за весь период телескопического наблюдения Солнца самым высоким является цикл 19, для которого  $W_{19,m} = 201.3$ , (1958 г.), а самый высокий среднемесячный максимум  $W_{19,m} = 253$ .

Сравнение с наблюдаемыми параметрами ( $W_{23,m} = 121$  в апреле 2000 г., самый высокий среднемесячный пик  $W_{23,m} = 169.1$ ) показывает, что текущий 23-й цикл по мощности является средним, обыкновенным циклом, ибо среднее значение сглаженных максимумов циклов 10–22 составляет 119,6. Солнечная активность средней мощности не может быть причиной многих бедствий, разразившихся в последние годы в обширных регионах Земли: необыкновенно низкая температура зимой и высокая – летом, засуха и сильные пожары, продолжительные ливни, невиданные наводнения и обширные оползни, разрушительные ураганы, катастрофические землетрясения и извержения вулканов.

Более поздние прогнозы сравнительно лучше, но они все-таки не удовлетворительны. Кейн рассмотрел около 20 различных прогнозов, среди них лишь 8 оказались в пределах  $122 \pm 20$  (Кейн, 2001). Очевидно, что для улучшения результатов прогнозирования параметров цикла солнечной активности потребуется разработка альтернативных методов.

## Литература

- Вальдмайер (Waldmeier M.) // Astr. Nachr. 1936. V. 259. P. 267.  
Вальдмайер (Waldmeier M.) // Astr. Mitt. Zurich. 1935. №. 133.  
Вальдмайер (Waldmeier M.) // Sunspot Activity in the Iqars 1610–1960. Zurich. 1961.  
Вальдмайер (Waldmeier M.) // Astron. J. 1968. №. 285. P. 286.  
Вилсон (Wilson R.M.) // Solar Phys. 1988. V. 117. P. 269.  
Вилсон (Wilson R.M.) // Solar Phys. 1992. V. 140. P. 181.  
Витинский Ю.И. // Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука. 1973.  
Глайцберг (Gleizberg W.) // Astron. Nachr. 1939. V. 268. P. 81.  
Глайцберг (Gleizberg W.) // Zs. Ap. 1951. V. 29. P. 1.  
Гневывшев М.Н., Оль А.И. // Астрон. журн. 1948. №. 38. С. 18.  
Джоселин и др. (Joselin J.F., Aderson J., Coffey H., Harvey K., Hathaway G., Heckman G., Hilder G., Mende W., Schatten K., Thompson R., Tompson A.W.R., White O.R.) // EOS. Trans. AGU. 78. V. 205. P. 21.  
Кейн (Kane R.P.) // Solar Phys. 2001. V. 202. P. 395.  
Копецкий (Kopecky M.) // Bull. Astron. Inst. 1991. V. 42. P. 157.  
Куклин Г.В. // Солнечные данные. 1993. №. 6. С. 61.  
Куклин Г.В. // Исследование по геомагн. и аэрономии. 1996. 104. С. 7.  
Обридко и др. (Obridko V.N., Oraevsky V.N., Allen J.H.) // International Solar Cycle Studies. Kosmosinform. Moscow. 1994. P. 94.  
Оль А.И. // Бюлл. КИСО 1949. № 1. (15). №. 2. (16).  
Хецуриани Ц.С., Гиголашвили М.Ш., Гоголадзе Н.А. // Труды Съезда “Астрономического общества Евр. – Азии”. 12–29 ноября 1977 г. Москва. 1998. С. 274.  
Хецуриани Ц.С., Гиголашвили М.Ш. // Труды конференции “Новый цикл активности Солнца. Наблюденные и теоретические аспекты”. С.- П.: ПИЯФ. Гатчино. 1998. С. 385.  
Solar Geophysical Data.