

УДК 523.9

**Н. И. Пишкало**

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

## **ПРОГНОЗ МАКСИМУМА 24-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

---

*Дано прогноз максимального числа Вольфа і епохи максимуму для 24-го циклу сонячної активності. Прогноз зроблено як на основі середніх характеристик сонячних циклів 1—23, так і на основі спостережених сонячних полярних магнітних полів та індексу стиснутості сонячної корони під час затемнень в епоху мінімуму активності. Очікується, що 24-й сонячний цикл досягне максимальної амплітуди  $88 \pm 17$  на початку 2014 р., а наступний мінімум припадатиме на першу половину 2020 р. Тривалість 24-го циклу становитиме приблизно 11,3 р.*

---

Наше Сонце являється типичною спокійною звездой; его светимость и размер не претерпевают существенных изменений со временем. В то же время магнитные свойства Солнца изменяются существенно, полярность его полярного магнитного поля изменяется с периодом 22 года, а многие явления в солнечной атмосфере имеют периодичность примерно 11 лет (половину магнитного периода). В этом смысле Солнце можно считать магнитопеременной звездой.

В 1843 г. Швабе на основании анализа 17-летних наблюдений обнаружил, что количество солнечных пятен изменяется с периодом около 10 лет. Чуть позже Вольф на более обширном материале установил, что этот период составляет 11 лет. Данная закономерность получила название закона Швабе — Вольфа, а само явление было названо 11-летним циклом солнечной активности. Впоследствии было установлено, что большинство явлений в солнечной атмосфере имеют 11-летнюю периодичность. Такая периодичность была обнаружена не только в характеристиках солнечных пятен, но и в характеристиках протуберанцев, вспышек, корональных выбросов массы, корональных дыр, солнечного ветра, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца и т. п. В частности, солнечная постоянная также оказывается не совсем постоянной, а изменяется с амплитудой около 0.1 % и

периодом 11 лет. В настоящее время под солнечной активностью подразумевают совокупность явлений, связанных с магнитными свойствами солнечной плазмы и периодически возникающих в солнечной атмосфере.

Изменения солнечной активности вызывают изменения в межпланетном и околоземном космическом пространстве, которые, в свою очередь, влияют на функционирование космических и наземных технологических систем, а также определенным образом на климат и жизнедеятельность живых организмов на Земле. Земля имеет атмосферу и собственное магнитное поле, которые защищают ее от губительного для живых организмов влияния потоков солнечной ультрафиолетовой и рентгеновской радиации и солнечной плазмы. Только очень энергичные солнечные космические лучи, возникающие при т. н. протонных вспышках, могут достигать земной поверхности. Большинство же изменений космической погоды возле Земли вызывают возмущения земного магнитного поля, в том числе и т. н. магнитные бури. Именно во время мощных геомагнитных бурь, количество которых коррелирует с уровнем солнечной активности, существенно увеличивается радиационный фон в верхних слоях земной атмосферы, происходит ухудшение или потеря связи со спутниками, самолётами и наземными станциями, и даже катастрофические аварии на линиях связи и электропередач. Особенно ощутимо это влияние в приполярных широтах.

В настоящее время на орбитах вокруг Земли вращается большое количество низкоорбитальных спутников: спутники связи, навигационные, дистанционного зондирования и картографирования, научные, военные и др. В среднем срок эксплуатации низкоорбитального спутника составляет 5—7.5 лет. При увеличении уровня солнечной активности увеличивается поток ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, вследствие чего увеличивается плотность и температура верхних слоев земной атмосферы, увеличивается трение о воздух низкоорбитальных спутников и космических станций, что может привести к их «неожиданному» торможению и уменьшению высоты их орбиты или даже к резкому торможению и последующему сгоранию в более плотных слоях атмосферы. Именно такое произошло в июле 1979 г. вблизи максимума 21-го цикла солнечной активности с американской космической станцией «Скайлэб» после крупной солнечной вспышки. Внезапное увеличение солнечной активности может привести не только к быстрому торможению спутника и его гибели, но и к выходу из строя электронного оборудования на спутнике. Увеличение уровня солнечной активности сопровождается увеличением радиационного фона, что может быть очень опасным для космонавтов, работающих на орбите, и даже для пилотов и пассажиров самолетов (особенно в приполярных районах). Поэтому знание предстоящего уровня солнечной активности является очень важным для космической отрасли.

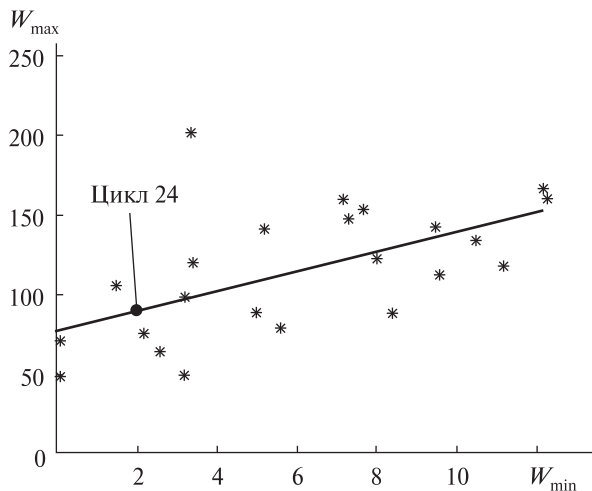
Наиболее известной характеристикой солнечной активности является число Вольфа, характеризующее количество пятен на видимой поверхности Солнца. На сегодня предложено много методов прогнозирования солнечной активности, которые базируются как на анализе наблюдаемых закономерностей между различными характеристиками солнечных, геофизических, климатологических явлений, так и на теоретических моделях солнечной активности, на компьютерном моделировании числовых рядов или искусственных нейронных сетях (см., например, работы [2, 11, 18, 22, 26] и ссылки в них). Большинство методов прогнозирования солнечной

активности дают только прогноз максимального значения числа Вольфа в цикле, часто эти прогнозы довольно существенно отличаются друг от друга.

К настоящему времени опубликовано более полусотни прогнозов 24-го цикла солнечной активности, они предсказывают для 24-го цикла значение максимального числа Вольфа от 42 [9] до примерно 190 [14]. Многие прогнозы собраны и проанализированы в работе [19] и на сайте Янссена (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24.html>).

В нашей предыдущей работе [3] был дан предварительный прогноз величины и эпохи максимума для 24-го цикла солнечной активности на основании изучения корреляционных связей между характеристиками солнечных циклов. Было получено, что максимальная амплитуда 24-го цикла по числам Вольфа будет составлять  $110 \pm 33$  в апреле — июне 2012 г. Тогда мы ещё не могли точно указать эпоху минимума цикла и значение числа Вольфа в эпоху минимума. Теперь же, когда 24-й цикл набирает силу, мы можем дать для него более точный прогноз.

В данной работе речь будет идти о прогнозе максимума текущего 24-го цикла солнечной активности, т. е. о долгосрочном прогнозе. Как известно, первые солнечные пятна с полярностью 24-го цикла наблюдались на Солнце в начале января 2008 г. Как правило, период времени в минимуме солнечной активности, когда одновременно наблюдаются солнечные пятна с полярностью предыдущего и последующего циклов, составляет год-полтора. Большинство прогнозов предсказывали минимум солнечной активности на 2006—2007 гг. и максимум 24-го цикла на 2011—2013 гг. Однако 23-й цикл оказался более глубоким и продолжительным, чем ожидалось. Проведенный нами анализ данных SIDC (<http://sidc.oma.be>) показал, что минимум сглаженного по 13 точкам среднемесячного числа Вольфа составляет около 1.8 в начале 2009 г. (примерно момент времени 2009.1). Таким образом, минимум солнечной активности между 23-м и 24-м циклами является самым глубоким за последние примерно 100 лет (после минимума между 14-м и 15-м циклами).



**Рис. 1.** Зависимость числа Вольфа  $W_{\max}$  в максимуме цикла от числа Вольфа  $W_{\min}$  в минимуме цикла и прогноз для 24-го цикла

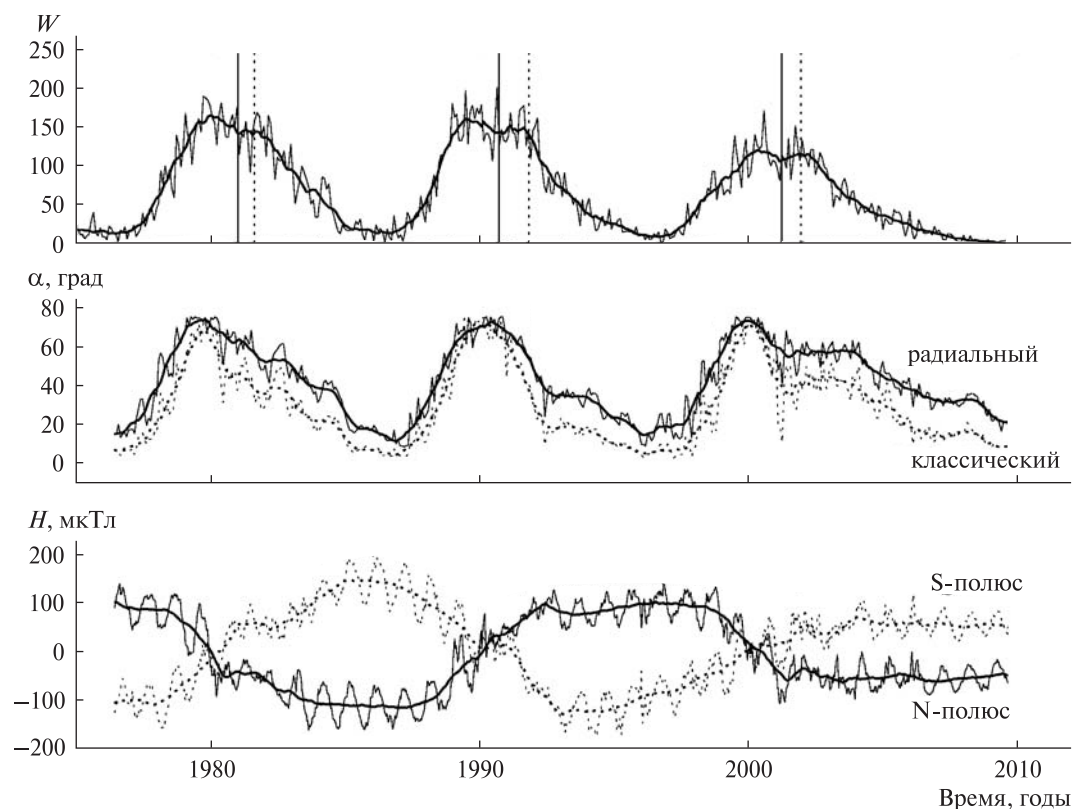
Это значение сглаженного среднемесячного числа Вольфа в эпоху минимума можно использовать для уточненного прогноза 24-го цикла солнечной активности по схеме, предложенной нами в работе [3]. Если это значение подставить в уравнение (1) работы [3], то для максимума 24-го цикла получится сглаженное среднемесячное значение числа Вольфа  $88 \pm 17$  (рис. 1). Таким же образом из уравнения (3) получаем, что длительность фазы роста 24-го цикла составит примерно 5 лет, т. е. максимум цикла ожидается в эпоху 2014.1. Далее, из уравнения (5) работы [3] следует, что длительность фазы спада цикла составит примерно 6.3 года. Отсюда получаем, что длительность цикла составит примерно 11.3 года, т. е. следующий минимум солнечной активности ожидается в мае — июне 2020 г.

Таким образом, 24-й цикл солнечной активности ожидается сравнительно невысоким, с максимальной амплитудой  $88 \pm 17$  по среднемесячным значениям числа Вольфа. Это составит чуть более 70 % от максимальной амплитуды 23-го цикла и почти 44 % от максимальной амплитуды 19-го цикла — самого высокого из наблюдавшихся циклов. Величина 24-го цикла будет почти точно соответствовать величинам 1-го и 13-го циклов (86.5 и 87.9 соответственно). Очень близкие прогнозы максимальной амплитуды 24-

го цикла солнечной активности были получены ранее в работах [7] и [10] ( $88$  и  $87.5 \pm 23.5$ ).

Природа солнечной активности ещё не до конца понятна. Вероятно, решающую роль в возникновении этого явления играет дифференциальное вращение Солнца. Согласно динамо-модели солнечных циклов Бэбкока — Лейтона [8, 13], силовые линии полярного магнитного поля Солнца (полоидальное поле) в эпоху минимума активности закручиваются дифференциальным вращением Солнца так, что формируют тороидальное поле. Это тороидальное поле далее в цикле солнечной активности всплывает к поверхности и прорывается над фотосферой, образуя активные области и солнечные пятна. В последующем постепенный распад этих активных областей и диффузия их к полюсам приводит к образованию солнечных полярных магнитных (полоидальных) полей с противоположным направлением вектора магнитного поля. Весь процесс повторяется через 11 лет асимметрично, и через 22 года полностью симметрично.

На рис. 2 показаны изменения со временем среднемесячного относительного числа  $W$  солнечных пятен (числа Вольфа), наклона  $\alpha$  гелиосферного токового слоя (ГТС) и величины  $H$  полярного магнитного поля Солнца в 21—23-м циклах солнечной активности. Числа Вольфа взяты на сайте <http://sidc.oma.be>, а полярные поля и наклоны ГТС — на сайте <http://wso.stanford.edu>. Жирными линиями показаны данные, усредненные по 13 точкам. Сплошные и пунктирные вертикальные линии соответствуют моментам переполусовок (смены знака) магнитного поля на северном и южном полюсах соответственно согласно данным работы [4]. Видно, что максимальная величина полярного магнитного поля наблюдается в периоды минимумов солнечной активности. Смены знака полярного магнитного поля происходят вблизи максимумов солнечной активности и не совпадают во времени в северном и южном полушариях. Наклон ГТС характеризует угол между солнечным экватором и солнечным магнитным экватором и имеет максимальное значение в максимуме солнечной активности. Гелиосферный токовый слой является отобра-



**Рис. 2.** Изменение со временем (сверху вниз): среднемесячного числа Вольфа  $W$ , наклона  $\alpha$  гелиосферного токового слоя и полярного магнитного поля  $H$  Солнца в 21–23-м циклах солнечной активности. Сплошная и пунктирная вертикальные линии соответствуют моментам переполюсовок магнитного поля на северном и южном полюсах соответственно (согласно данным [4])

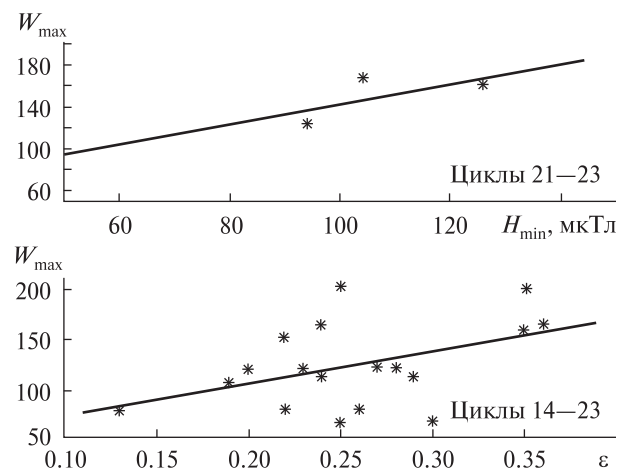
жением положения магнитной нулевой (нейтральной) линии магнитного поля Солнца на поверхности источника и определяет структуру всего глобального гелиосферного магнитного поля, и в частности, структуру межпланетного магнитного поля вблизи Земли. Гелиосферный токовый слой разделяет межпланетное пространство на две части с противоположно направленными открытыми линиями магнитного поля и является как бы каркасом всей гелиосферы. Отметим, что эволюция со временем наклона ГТС и полярного магнитного поля Солнца хорошо описывается в рамках модели вращения с 22-летним периодом внутри Солнца некоего магнитного ротатора [6].

Из динамо-модели солнечных циклов следует, что характеристики полярного магнитного поля Солнца в минимуме солнечной активности оп-

ределяют то, каким будет последующий максимум активности. Такие параметры, как величина полярного поля, количество полярных факелов, площадь корональных дыр, различные характеристики солнечной короны в минимуме цикла можно использовать в качестве предвестников величины солнечной активности в последующем максимуме цикла. Впервые это было сделано в работе [24] для прогнозирования величины максимальной амплитуды 21-го цикла. Позже в работе [12] был более подробно рассмотрен данный метод прогнозирования солнечной активности и сделан прогноз для 22-го цикла.

В таблице нами собраны значения индекса фотометрического сжатия  $\varepsilon = a + b$  солнечной короны во время полных солнечных затмений вблизи минимума активности, усредненного полярного магнитного поля Солнца в миниму-

ме активности ( $H_{\min}$ ) и максимальные значения  $W_{\max}$  числа Вольфа в 14–24-м циклах активности. Значения  $\epsilon$  взяты из различных литератур-



**Рис. 3.** Зависимость среднемесячного числа Вольфа  $W_{\max}$  в максимуме цикла от величины полярного поля  $H_{\min}$  и индекса  $\epsilon$  сжатия солнечной короны в минимуме цикла

ных источников, величины полярного магнитного поля Солнца получены усреднением по 13 точкам данных из <http://wso.stanford.edu>. К сожалению, в настоящее время имеются измерения полярного магнитного поля только для последних четырех циклов солнечной активности. В среднем чем выше значение величин, характеризующих полярное поле в минимуме, тем выше последующий максимум солнечной активности. Более отчетливо это заметно на рис. 3, где приведены также линейные аппроксимации зависимостей среднемесячного числа Вольфа в максимуме цикла от величины полярного поля и индекса сжатия солнечной короны в минимуме цикла. Если в линейные зависимости подставить значения  $H_{\min} = 51$  мкТл и индекса  $\epsilon = 0.21$  в минимуме 24-го цикла (см. таблицу), то получим, что максимальная амплитуда 24-го цикла по числам Вольфа составит примерно 94 и 104, что согласуется с прогнозом, полученным выше на основе средних параметров солнечных цик-

**Сравнение индекса сжатия солнечной короны  $\epsilon$  и величины полярного магнитного поля в минимуме цикла и числа Вольфа в максимуме цикла**

Затмение	$\epsilon$	Номер цикла	Эпоха минимума	$H_{\min}$ , мкТл	Эпоха максимума	$W_{\max}$
28.05.1900	0.30 [16]	14	1901.7	—	1907.0	64.2
17.05.1901	0.25 [16]	14	1901.7	—	1907.0	64.2
21.08.1914	0.19 [16]	15	1913.6	—	1917.6	105.4
20.09.1922	0.26 [16]	16	1923.6	—	1928.4	78.1
10.09.1923	0.22 [16]	16	1923.6	—	1928.4	78.1
25.01.1925	0.13 [16]	16	1923.6	—	1928.4	78.1
31.08.1932	0.20 [16]	17	1933.8	—	1937.4	119.2
14.02.1934	0.23 [1]	17	1933.8	—	1937.4	119.2
09.06.1945	0.32 [1]	18	1944.2	—	1947.5	151.8
30.06.1954	0.35 [31]	19	1954.3	—	1957.9	201.3
20.06.1955	0.25 [21]	19	1954.3	—	1957.9	201.3
20.07.1963	0.29 [27]	20	1964.9	—	1968.9	110.6
30.05.1965	0.24 [28]	20	1964.9	—	1968.9	110.6
23.10.1976	0.36 [29]	21	1976.5	104	1979.9	164.5
13.10.1977	0.24 [30]	21	1976.5	104	1979.9	164.5
22.11.1984	0.35 [15]	22	1986.8	126	1989.6	158.5
24.10.1995	0.28 [20]	23	1996.4	94	2000.4	120.8
09.03.1997	0.27 [17]	23	1996.4	94	2000.4	120.8
01.08.2008	0.21 [5]	24	2009.1	51	2014.1*	88*

\* — прогноз



лов. Прогноз по индексу  $\epsilon$  несколько выше, чем прогноз по величине полярного поля, вероятно, вследствие того, что затмение 2008 г. произошло не точно в минимуме цикла. Оба эти прогноза имеют скорее оценочный характер.

Прогноз максимума 24-го цикла на основе значений величины полярного поля за несколько лет до эпохи минимума был сделан в работах [23] и [25], где были получены прогнозируемые максимальные значения числа Вольфа в 24-м цикле соответственно  $80 \pm 30$  и  $75 \pm 8$ . Эти значения несколько ниже полученного нами прогноза.

Таким образом, прогноз солнечной активности в максимуме 24-го цикла, основанный на предвестниках, вытекающих из динамо-модели солнечных циклов, как и прогноз, основанный на взаимосвязях между различными параметрами циклов 1–23, указывает на то, что 24-й цикл будет относительно слабым солнечным циклом. Максимальная амплитуда 24-го цикла по числам Вольфа будет составлять  $88 \pm 17$  (от 71 до 105).

*Работа частично выполнена в рамках проекта № Ф25.2/094 Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.*

1. Ван де Хюлст Х. К. Хромосфера и корона // Солнце / Под ред. Дж. Койпера. — М., 1957. — С. 184–281.
2. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. — Л.: Наука, 1973. — 257 с.
3. Пішкало М. І. Попередній прогноз 24-го і 25-го циклів сонячної активності на основі кореляції між характеристиками циклів // Кинематика и физика небес. тел. — 2008. — 24, № 5. — С. 370–378.
4. Пішкало М. І., Бабій В. П., Іванчук В. Г. Північно-південна асиметрія сонячної активності та переполюсовки глобального магнітного поля Сонця у 21–23 циклах активності // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. — 2005. — Вип. 41–42. — С. 86–90.
5. Пішкало М. І., Баранський О. Р. Сонячна корона під час повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. // Кинематика и физика небес. тел. — 2009. — 25, № 6. — С. 474–481.
6. Старкова Л. И., Соловьев Л. С. О прецессии магнитной оси Солнца // Письма в Астрон. журн. — 1997. — 23, № 3. — С. 236–240.
7. Чистяков В. Ф. Прогноз солнечной активности до 2030 года // Солнеч. данные. — 1983. — № 1. — С. 97–100.
8. Babcock H. W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // Astrophys. J. — 1961. — 133. — P. 572–587.
9. Clilverd M. A., Clarke E., Ulich T., et al. Predicting solar cycle 24 and beyond // Space weather. — 2006. — 4. — S09005.—DOI:10.1029/2005SW000207
10. Duhau S. An early prediction of maximum sunspot number in solar cycle 24 // Solar Phys. — 2003. — 213, N 1. — P. 203–212.
11. Lantos P., Richard O. On the prediction of maximum amplitude for solar cycles using geomagnetic precursors // Solar Phys. — 1998. — 182, N 1. — P. 231–246.
12. Layden A. C., Fox P. A., Howard J. M., et al. Dynamo-based scheme for forecasting the magnitude of solar activity cycles // Solar Phys. — 1991. — 132, N 1. — P. 1–40.
13. Leighton R. B. A magneto-kinematic model of the solar cycle // Astrophys. J. — 1969. — 156. — P. 1–26.
14. Li K.-J., Gao P.-X., Su T.-W. Estimating the size and timing of the maximum amplitude of solar cycle 24 // Chin. J. Astron. and Astrophys. — 2005. — 5, N 5. — P. 539–545.—DOI:10.1088/1009-9271/5/5/011.
15. Loucif M. L., Koutchmy S. Solar cycle variations of coronal structures // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1989. — 77. — P. 45–66.
16. Ludendorff H. Weitere untersuchungen über die änderungen der form der sonnenkorona // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse. — 1934. — 16. — P. 200–220.
17. Marková E., Bělík M., Rušín V., Kotrč P. Structure and shape of the white-light corona during March 9, 1997 and February 26, 1998 eclipses // Contribs Astron. Observ. Scalnate Pleso. — 1999. — 28, N 3. — P. 210–215.
18. Obridko V. N., Shelting B. D. On prediction of the strength of the 11-year solar cycle N 24 // Solar Phys. — 2008. — 248, N 1. — P. 191–202.—DOI:10.1007/s11207-008-9138-3.
19. Pesnell W. D. Predictions of solar cycle 24 // Solar Phys. — 2008. — 252. — P. 209–220. — DOI:10.1007/s11207-008-9252-2.
20. Rušín V., Klocok L., Minarovjeh M., Rybanský M. The solar corona during the total solar eclipse of October 24, 1995 // Contribs Astron. Observ. Scalnate Pleso. — 1996. — 26, N 1. — P. 37–45.
21. Saito K. Photometry of the solar corona at the total eclipse on June 20, 1955 // Publ. Astron. Soc. Jap. — 1956. — 8, N 3-4. — P. 126–141.
22. Schatten K. Solar activity prediction: Timing predictors and cycle 24 // J. Geophys. Res. — 2002. — 107. — SSH 15-1.—ID 1377.—DOI:10.1029/2002JA009404.
23. Schatten K. Fair space weather for solar cycle 24 // Geophys. Res. Lett. — 2005. — 32. — L21106.—DOI:10.1029/2005GL024363.
24. Schatten K. H., Scherrer P. H., Svalgaard L., Wilcox J. M. Using dynamo theory to predict the sunspot number during solar cycle 21 // Geophys. Res. Lett. — 1978. — 5. — P. 411–414.

25. *Svalgaard L., Cliver E. W., Kamide Y.* Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? // *Geophys. Res. Lett.* — 2005. — **32**. — L01104.—DOI:10.1029/2004GL021664.
26. *Thompson R. J.* A technique for predicting the amplitude of the solar cycle // *Solar Phys.* — 1993. — **148**, N 2. — P. 383—388.
27. *Waldmeier M.* Die Helligkeitsverteilung in der Korona bei der Sonnenfinsternis vom 20. Juli 1963 // *Z. Astrophys.* — 1964. — **60**. — P. 28—42.
28. *Waldmeier M.* Die Helligkeitsverteilung in der Korona bei der Sonnenfinsternis vom 30. Mai 1965 // *Z. Astrophys.* — 1966. — **63**. — P. 242—266.
29. *Waldmeier M., Weber S. E.* Shape and structure of the corona at the solar eclipse of October 23, 1976 // *Astron. Mitt. Eidgen. Sternwarte Zürich.* — 1977. — N 353.
30. *Waldmeier M., Weber S.E.* The solar eclipse of October 12, 1977 // *Astron. Mitt. Eidgen. Sternwarte Zürich.* — 1978. — N 369.
31. *Wallenquist A.* On the distribution of light in the solar corona of June 30, 1954 // *Uppsala Astron. Obs. Ann.* — 1957. — **4**, N 4. — P. 3—36.

Надійшла до редакції 18.02.10

*M. I. Pishkalo*

PREDICTION OF THE MAXIMUM  
OF SOLAR CYCLE 24

Our prediction of the maximal Wolf number and of the maximum epoch for the solar cycle 24 is presented. The prediction is developed using both mean characteristics of solar cycles 1—23 and observed magnitudes of solar polar magnetic fields and values for the flattening index of the solar corona at the minimum epoch. Solar cycle 24 is expected to amount up to a maximal amplitude of  $88 \pm 17$  at the beginning of 2014. The next minimum is anticipated to be in the first half of 2020. The duration of solar cycle 24 will be about 11.3 years.