

УДК 523.98

Н. И. Пишкало

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053
E-mail: pish@observ.univ.kiev.ua

Прогноз амплитуды 24-го солнечного цикла по динамике активности вблизи минимума цикла

Исследованы корреляционные связи между динамикой солнечной активности, выраженной сглаженными месячными значениями относительного числа солнечных пятен (чисел Вольфа) вблизи минимума цикла, и амплитудой цикла. Получено, что лучше всего с амплитудой цикла коррелирует сумма падения активности за два года перед минимумом и прироста активности за два года после минимума цикла (коэффициент корреляции 0.92). Данный параметр в качестве предвестника использован для прогноза амплитуды 24-го цикла. Ожидается, что 24-й солнечный цикл достигнет максимальной амплитуды 85 ± 12 в феврале 2014 г. Исходя из взаимосвязи средних характеристик солнечных циклов, получено, что длительность цикла составит 11.3 года, минимум следующего 25-го цикла наступит в мае 2020 г.

ПРОГНОЗ АМПЛІТУДИ 24-ГО СОНЯЧНОГО ЦИКЛУ ЗА ДИНАМІКОЮ АКТИВНОСТІ ПОБЛИЗУ МІНІМУМУ ЦИКЛУ, Пішкало М. І. — Досліджено кореляційні зв'язки між динамікою сонячної активності, вираженою згладженими місячними значеннями відносного числа сонячних плям (чисел Вольфа) поблизу мінімуму циклу, і амплітудою циклу. Отримано, що краще всього з амплітудою циклу корелює сума падіння активності за два роки перед мінімумом і приросту активності за два роки після мінімуму циклу (коефіцієнт кореляції 0.92). Цей параметр як передвісник використано для прогнозу амплітуди 24-го циклу. Очікується, що 24-й сонячний цикл досягне максимальної амплітуди 85 ± 12 у лютому 2014 р. На основі взаємозв'язку середніх характеристик сонячних циклів отримано, що тривалість циклу становитиме 11.3 р., мінімум наступного 25-го циклу настане у травні 2020 р.

A PREDICTION OF AMPLITUDE FOR SOLAR CYCLE 24 USING DYNAMICS OF ACTIVITY NEAR THE CYCLE MINIMUM, by Pishkalo M. I. — We investigated correlations between dynamics of solar activity (presented by smoothed monthly relative sunspot numbers — the Wolf numbers) near the cycle minimum and the cycle amplitude. The closest correlation is revealed between the cycle amplitude and the sum of activity drop during two years before the minimum and the activity rise during two years after the minimum; the correlation coefficient between these parameters is 0.92. This parameter was used as a precursor to predict the amplitude of solar cycle 24. The cycle 24 is expected to reach its maximal amplitude 85 ± 12 in February 2014. It is found from correlations between mean parameters of solar cycles that the solar cycle duration will be about 11.3 years and the next minimum will come in May 2020.

ВСТУПЛЕНИЕ

Общеизвестно, что солнечная активность изменяется с периодом около 11 лет. Разные солнечные циклы имеют различную амплитуду и длительность. В данное время набирает силу 24-й цикл солнечной активности. Для многих процессов и технологических систем, зависящих от космической погоды, важно знать заранее, какой будет солнечная активность, в частности когда и какой величины будет максимум текущего цикла активности.

В настоящее время имеется более полусотни прогнозов величины максимума активности в 24-м солнечном цикле. Многие прогнозы собраны и проанализированы, например, в работах [21, 22] и на сайте Янссена (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24.htm>). Для величины месячного числа Вольфа в максимуме цикла прогнозы дают значения в широком диапазоне величин — от 42 [10] до 190 [20].

На сегодня предложено множество методов прогнозирования солнечной активности, которые базируются на анализе взаимосвязи различных наблюдаемых явлений на Солнце, в межпланетном и околоземном космическом пространстве, на изучении периодичностей в различных часовых рядах, на компьютерном моделировании числовых рядов и искусственных нейронных сетях [14, 22, 28]. Метод предвестников, когда одна из характеристик или величин активности в какое-то определенное время (чаще всего — вблизи минимума цикла) служит индикатором активности в максимуме цикла, давно и широко используется при прогнозировании солнечной активности. Этот метод основывается на корреляционных связях «индикатора» активности и амплитуды цикла. Так, например, исходя из корреляции между значениями сглаженного месячного числа Вольфа в минимуме и максимуме цикла солнечной активности и из известного его значения в минимуме 24-го цикла, в нашей предыдущей работе [4] мы получили, что прогнозируемая амплитуда цикла составит 88 ± 17 .

Ниже будет рассмотрена возможность прогнозирования амплитуды цикла по динамике активности вблизи минимума цикла как непосредственно перед минимумом на ветви спада предыдущего цикла, так и на начальной ветви роста цикла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве исходных данных для анализа использованы месячные значения относительного числа солнечных пятен (числа Вольфа) с 1749 г., расположенные на сайте Бельгийской Королевской обсерватории (<http://sidc.oma.be>). Значения были сглажены при помощи скользящего усреднения по 13 точкам, в дальнейшем анализировались эти сглаженные месячные значения. Для солнечных циклов 1—23 были рассчитаны такие параметры циклов, как значения сглаженного числа Вольфа в минимуме (W_{\min}) и максимуме (W_{\max}), время минимума T_{\min} и максимума цикла T_{\max} , длительность цикла, длительность фазы роста и спада цикла. Полученные значения T_{\min} , T_{\max} , W_{\min} и W_{\max} близки к общепринятым характеристикам циклов 1—23, которые можно найти, например, на сайте Национального геофизического центра данных США (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/maxmin.new), но не всегда совпадают с ними. Лучшее согласие наблюдается после проведения двукратного сглаживания исходных данных.

Кроме того, были рассчитаны значения спада и прироста активности для различных промежутков времени в интервале от двух лет до минимума до трех лет после минимума цикла. После исследования попарной корреляции между W_{\max} и приростом/падением активности на протяжении различных интервалов времени вблизи минимума цикла получено, что W_{\max} лучше всего коррелирует с приростом активности за два года после минимума цикла (далее $W1$). Коэффициент корреляции между W_{\max} и $W1$ составляет 0.89, что существенно выше коэффициента корреляции между W_{\min} и W_{\max} (0.57). Наибольший коэффициент корреляции (0.92) обнаружен между W_{\max} и суммой падения активности за два года перед минимумом цикла и прироста активности за два года после минимума (далее $W2$).

Рис. 1 иллюстрирует динамику активности вблизи минимума в 1—24-м солнечных циклах. Для всех циклов выбран один и тот же промежуток времени — от 10 мес перед минимумом цикла до 30 мес после минимума. Легко видеть, что динамика активности вблизи минимума в 24-м цикле близка к динамике в 10-м, 12-м, 15-м и 16-м циклах.

На рис. 2 показаны значения W_{\min} и W_{\max} , $W1$ и $W2$ для циклов 1—24. Можно видеть, что действительно W_{\max} сильнее коррелирует с $W1$ или $W2$, чем с W_{\min} .

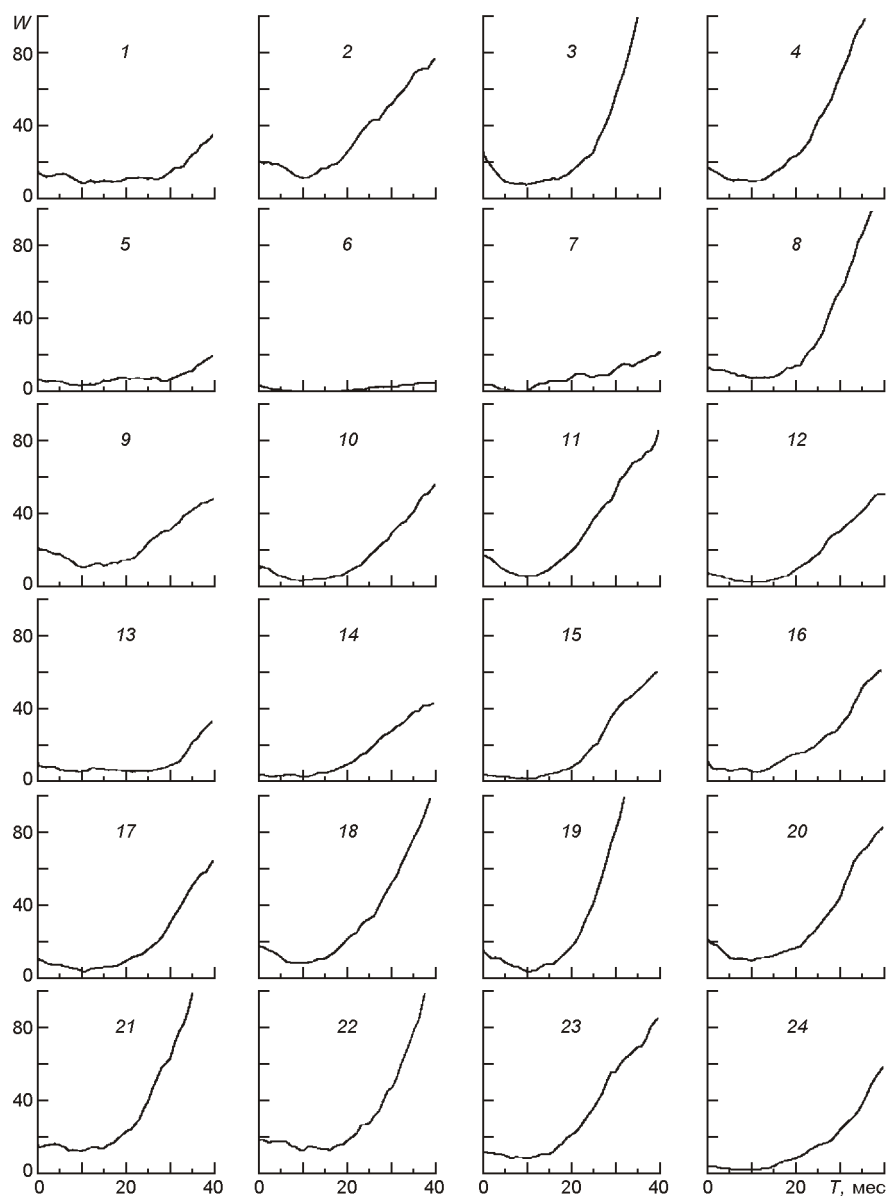


Рис. 1. Зависимость сглаженного месячного числа Вольфа W вблизи минимума цикла от времени T (в промежутке от 10 мес до минимума до 30 мес после минимума) для циклов 1—24

Зависимости W_{\max} от $W1$ и $W2$ приведены на рис. 3. Здесь пунктиром показана линейная аппроксимация всех точек, номер цикла указан возле каждой точки. Уравнения регрессии имеют вид

$$\begin{aligned}
 W_{\max} &= (52.72 \quad 7.82) \quad (128 \quad 0.14) \quad W1, \\
 W_{\max} &= (41.99 \quad 7.56) \quad (1204 \quad 0.10) \quad W2.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Уравнения почти не изменяются, если убрать из рассмотрения значения для цикла 19; соответствующие зависимости на рис. 3 показаны сплошными прямыми линиями.

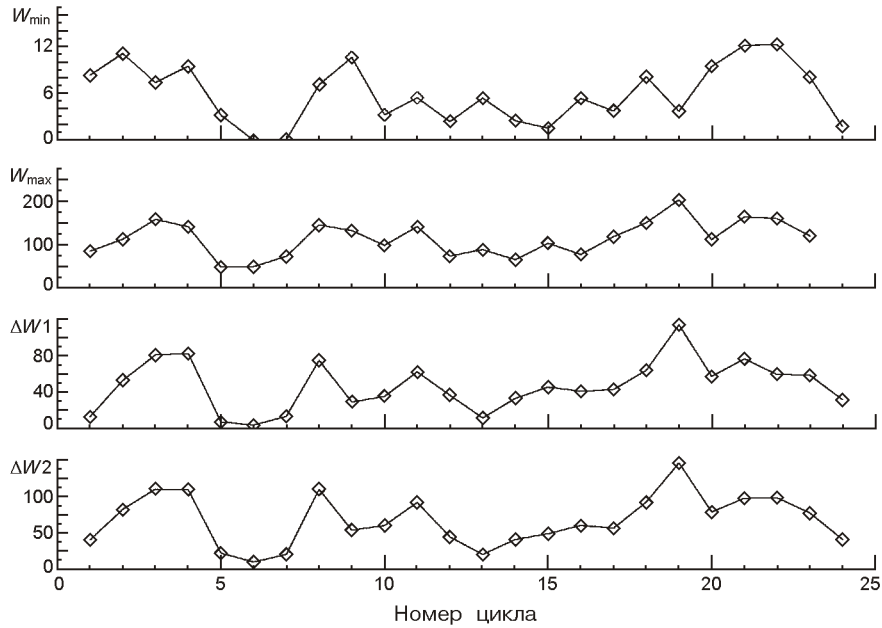
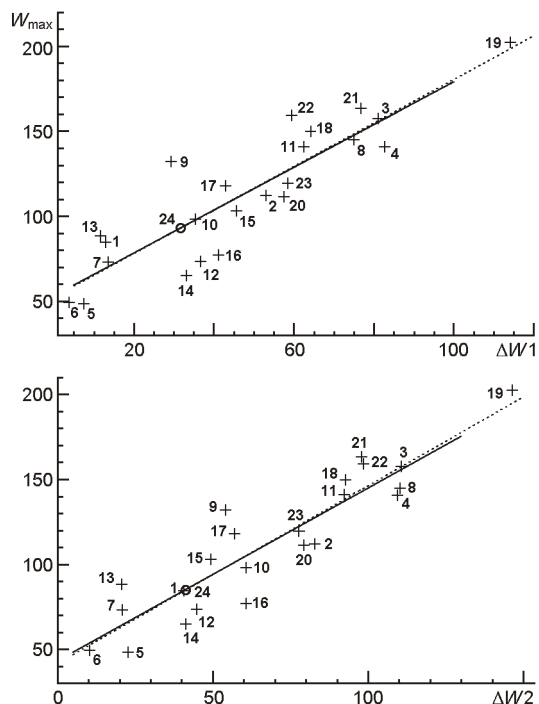


Рис. 2. Зависимость от номера цикла (сверху вниз) числа Вольфа в минимуме цикла W_{\min} , числа Вольфа в максимуме цикла W_{\max} , прироста активности за два года после минимума $W1$, суммы падения активности за два года перед минимумом и прироста активности за два года после минимума $W2$

Наличие корреляции между W_{\max} и $W1$ ($W2$), причем более существенной, нежели между W_{\max} и W_{\min} , позволяет рассматривать параметры $W1$ и $W2$ в качестве предвестников амплитуды солнечного цикла. Если на основании данных о циклах 1—21 и 1—22 составить уравнения регрессии, аналогичные уравнениям (1), то по значениям $W1$ и $W2$ для циклов 22 и 23 можно определить прогнозируемые амплитуды циклов. Для 22-го цикла получаем значения W_{\max}^{22} ($W1 = 59.4$) = 127.3 15.9, W_{\max}^{22} ($W2 = 98.7$) = 144.1 17.7, для 23-го цикла — W_{\max}^{23} ($W1 = 58.6$) = 128.4 16.8, W_{\max}^{23} ($W2 = 77.8$) = 123.4 15.5. Если сравнить эти эпигностические значения с наблюдаемыми амплитудами циклов 22 и 23 (159.4 и 119.8 соответственно), то легко прийти к заключению о том, что параметр $W2$, т. е. сумма падения активности за два года перед минимумом и прироста активности за два года после минимума цикла, более пригоден для прогнозирования амплитуды цикла.

Подставив значения $W1$ и $W2$ для 24-го цикла в уравнения (1), получим прогнозируемую амплитуду цикла: W_{\max}^{24} ($W1$) = 93.4 12.3, W_{\max}^{24} ($W2$) = 85.2 11.9 (кружки на рис. 3). Очевидно, из двух этих близких значений более предпочтительным является прогноз по параметру $W2$. Таким образом, приходим к заключению, что прогнозируемая амплитуда 24-го цикла солнечной активности, когда предвест-

Рис. 3. Зависимость числа Вольфа в максимуме цикла W_{\max} : *a* — от прироста активности $W1$ за два года после минимума, *b* — от суммы $W2$ падения активности за два года перед минимумом и прироста активности за два года после минимума. Пунктирная линия — линейная аппроксимация всех точек (указаны номера циклов), сплошная линия — то же самое, но без цикла 19, кружок — прогноз амплитуды 24-го цикла



ником служит динамика активности вблизи минимума цикла, составит 85 ± 12 . В таблице собраны прогнозируемые значения амплитуды 24-го цикла солнечной активности, близкие к нашему прогнозу; даны только прогнозы с амплитудой не более 100 и не менее 65 ед. в сглаженных месячных числах Вольфа. Как видим, большинство свежих публикаций указывают на то, что 24-й цикл будет слабее предыдущего 23-го цикла. Прогнозы, представленные в сети интернет (см., например, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtm> или <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/SC24/index.html>), также указывают на то, что амплитуда 24-го цикла не превысит 100.

Воспользовавшись полученным здесь прогнозом W_{\max} для 24-го цикла и уравнениями (4) и (5) из работы [3], которые связывают длительность фазы роста активности с W_{\max} и длительностью фазы спада активности, находим, что длительность фазы роста и фазы спада активности в 24-м цикле составит соответственно примерно 5.0 и 6.3 лет. Отсюда, учитывая, что минимум цикла приходился на эпоху 2009.1, получаем, что максимум цикла ожидается в феврале 2014 г., длительность цикла составит 11.3 года. Минимум следующего, 25-го цикла солнечной активности ожидается в мае 2020 г.

Наблюдаемый и прогнозируемый нами ход активности в 24-м цикле показаны на рис. 4 соответственно жирной сплошной и пунктирной линиями. Прогнозируемое значение $W_{\min} = 5.5$ в 25-м цикле получено при помощи уравнения (6) из работы [3], которое связывает W_{\min} с длительностью предыдущего цикла активности. На этом рисунке также показаны зависимости числа Вольфа от времени для некоторых цик-

Прогнозы амплитуды 24-го цикла солнечной активности, близкие по величине прогнозу, сделанному в данном исследовании

Литературный источник	Амплитуда 24-го цикла	Метод или предвестник
Данная работа	85±12	Динамика активности до и после минимума
2007 [1]	70±10	W и солнечная постоянная
2009 [2]	84.5±16.5	Анализ активности за 10000 лет по углероду ^{14}C
2010 [4]	88±17	W в минимуме
1983 [5]	88±10	Закономерности вековых циклов
2008 [6]	65±16	Трансформация и анализ рядов W
	87±13	Нелинейная динамо-модель
2009 [7]	92.8±19.6	aa -индекс
2009 [8]	74±7	W в минимуме
2009 [9]	95±7	Анализ асимметрии активности
	90±27	Авторегрессивная модель ARMA
2009 [11]	68±17	Динамо-модель и анализ рядов
2011 [12]	72±11	Моделирование формы цикла
2003 [13]	87.5±23.5	Анализ амплитудной модуляции W и aa -индекса
2007 [15]	74±10	Асимметрия активности в широтной зоне ±10
2008 [16]	87±7	Асимметрия активности в широтной зоне ±10
2011 [17]	74±10	Анализ параметров цикличности
2007 [18]	92±10	Спектральный анализ
2008 [19]	94±44	Длительность цикла 23
2010 [23]	67±8	Полярное поле в минимуме
2011 [24]	95±65	Форма короны в минимуме
2011 [25]	85±17	W в минимуме
2005 [26]	80±30	Полярное поле перед минимумом
2005 [27]	75±8	Полярное поле перед минимумом
2009 [29]	97±25	aa -индекс
2010 [30]	84.5±23.9	W перед минимумом

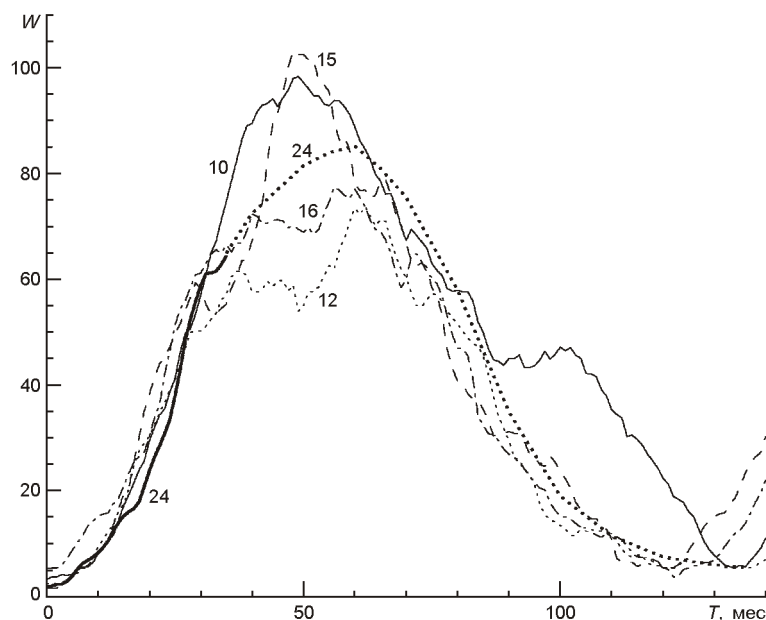


Рис. 4. Зависимость сглаженного месячного числа Вольфа W от времени T (в месяцах) для цикла 24 (сплошная жирная линия — наблюдения, пунктирная — прогноз) и для циклов с похожей динамикой активности вблизи минимума цикла. Цифрами у кривых указаны номера циклов

лов с похожей динамикой активности вблизи минимума цикла. По-видимому, амплитуда 24-го цикла будет ближе всего к значениям, которые наблюдались в циклах 10 и 16.

В настоящее время трудно детально спрогнозировать, как будет вести себя активность в 24-м цикле: будет ли дальнейшее изменение активности плавным или скачкообразным, максимум будет одно- или двухвершинным. Вероятно, как и в предыдущих циклах 20—23 (см. <http://sidc.oma.be/html/wnosuf.html>), в первой половине цикла будет преобладать активность в северном полушарии, во второй — в южном. Поэтому также весьма вероятно, что цикл будет иметь двухвершинную (или даже мультивершинную) форму.

ВЫВОДЫ

Для многих процессов и технологических систем, зависящих от космической погоды, важно знать заранее, какой будет солнечная активность (в частности, её амплитуда) в текущем 24-м цикле солнечной активности. В данной работе проведено исследование корреляционных связей между уровнем солнечной активности, выраженной сглаженными месячными значениями относительного числа солнечных пятен (числа Вольфа), вблизи минимума цикла и амплитудой активности в максимуме цикла. Амплитуда цикла коррелирует с величиной падения (прироста) активности за два года до (после) минимума цикла даже лучше, чем с уровнем активности в минимуме цикла. Наивысшее значение коэффициента корреляции (0.92) получено при исследовании взаимосвязи суммы падения активности за два года перед минимумом и прироста активности за два года после минимума цикла с амплитудой цикла. Поэтому данный параметр может быть использован в качестве предвестника при прогнозировании амплитуды цикла. На основании данных о величине активности вблизи минимума 24-го цикла получено, что данный солнечный цикл достигнет максимальной амплитуды 85 ± 12 в феврале 2014 г., т. е. он будет примерно на 25—30 % слабее предыдущего 23-го цикла. Амплитуда 24-го цикла, по-видимому, будет ближе всего к значениям, которые наблюдались в 10-м и 16-м циклах. Исходя из взаимосвязи средних характеристик солнечных циклов, получено, что длительность 24-го цикла составит 11.3 года, минимум следующего 25-го цикла наступит примерно в мае 2020 г.

1. Абдусаматов Х. И. Об оптимальном прогнозировании высоты следующего 11-летнего цикла активности и нескольких последующих циклов на основе долговременных вариаций радиуса Солнца или солнечной постоянной // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—23, № 3.—С. 141—147.
2. Огурцов М. Г. Прогноз 24-го цикла солнечной активности на основе информации о солнечной активности за последние 10 000 лет // Геомагнетизм и аэрономия.—2009.—49, № 3.—С. 427—430.

3. *Пишкало 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. *Пишкало Н. И.* Прогноз максимума 24-го цикла солнечной активности // Космична наука і технологія.—2010.—**16**, № 3.—С. 32—38.
5. *Чистяков В. Ф.* Прогноз солнечной активности до 2030 года // Солнеч. данные.—1983.—№ 1.—С. 97—100.
6. *Aguirre L. A., Letellier C., Maquet J.* Forecasting the time series of sunspot numbers // Solar Phys.—2008.—**249**, N 2.—P. 103—120.—DOI: 10.1007/s11207-008-9160-5.
7. *Bhatt N. J., Jain R., Aggarwal M.* Prediction of the maximum amplitude and timing of sunspot cycle 24 // Solar Phys.—2009.—**260**, N 1.—P. 225—232.—DOI: 10.1007/s11207-009-9439-1.
8. *Brajsa R., Wöhl H., Hanslmeier A., et al.* A prediction for the 24th solar cycle // Cent. Eur. Astrophys. Bull.—2009.—**1**.—P. 1—4.
9. *Brajsa R., Wöhl H., Hanslmeier A., et al.* On solar cycle predictions and reconstructions // Astron. and Astrophys.—2009.—**496**, N 3.—P. 855—861.—DOI: 10.1051/0004-6361:200810862.
10. *Clilverd M. A., Clarke E., Ulich T., et al.* Predicting solar cycle 24 and beyond // Space weather.—2006.—**4**.—S09005.—DOI: 10.1029/2005SW000207.
11. *De Jager C., Duhau S.* Forecasting the parameters of sunspot cycle 24 and beyond // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.—2009.—**71**.—P. 239—245.—DOI: 10.1016/j.jastp.2008.11.006.
12. *Du Z.* The shape of solar cycle described by a modified Gaussian function // Solar Phys.—2011.—**273**, N 1.—P. 231—253.—DOI: 10.1007/s11207-011-9849-8.
13. *Duhau S.* An early prediction of maximum sunspot number in solar cycle 24 // Solar Phys.—2003.—**213**, N 1.—P. 203—212.
14. *Hathaway D. H.* Solar cycle forecasting // Space Sci. Rev.—2009.—**144**, N 1 4.—P. 401—412.—DOI: 10.1007/s11214-008-9430-4.
15. *Javaraiah J.* North-south asymmetry in solar activity: predicting the amplitude of the next solar cycle // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2007.—**377**, N 1.—P. L34—L38.
16. *Javaraiah J.* Predicting the amplitude of a solar cycle using the north-south asymmetry in the previous cycle: II. An improved prediction for solar cycle 24 // Solar Phys.—2008.—**252**, N 2.—P. 419—439.—DOI: 10.1007/s11207-008-9269-6.
17. *Kakad B.* A new method for prediction of peak sunspot number and ascent time of the solar cycle // Solar Phys.—2011.—**270**, N 1.—P. 393—406.—DOI: 10.1007/s11207-011-9726-5.
18. *Kane R. P.* Solar cycle predictions based on extrapolation of spectral components: An update // Solar Phys.—2007.—**246**, N 2.—P. 487—493.—DOI: 10.1007/s11207-007-9059-6.
19. *Kane R. P.* Prediction of solar cycle maximum using solar cycle lengths // Solar Phys.—2008.—**248**, N 1.—P. 203—209.—DOI:10.1007/s11207-008-9125-8
20. *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.
21. *Pesnell W. D.* Predictions of solar cycle 24 // Solar Phys.—2008.—**252**, N 1.—P. 209—220.—DOI: 10.1007/s11207-008-9252-2.
22. *Petrovay K.* Solar cycle prediction // Living Rev. Solar Phys.—2010.—**7**, N 6.—59 p.
23. *Pishkalo M. I.* Prediction of amplitude of solar cycle 24 based on polar magnetic field of the Sun at cycle minimum // Sun and Geosphere.—2010.—**5**, N 2.—P. 47—51.

24. *Pishkalo M. I.* Flattening index of the solar corona and the solar cycle // *Solar Phys.*—2011.—**270**, N 1.—P. 347—362.—DOI: 10.1007/s11207-011-9749-y.
25. *Ramesh K. B., Lakshmi N. B.* The amplitude of sunspot minimum as a favorable precursor for the prediction of the amplitude of the next solar maximum and the limit of the Waldmeier effect // *Solar Phys.*—2011.—**276**, N 2.—P. 395—406.—DOI: 10.1007/s11207-011-9866-7.
26. *Schatten K.* Fair space weather for solar cycle 24 // *Geophys. Res. Lett.*—2005.—**32**.—L21106.—DOI: 10.1029/2005GL024363.
27. *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.
28. *Thompson R. J.* A technique for predicting the amplitude of the solar cycle // *Solar Phys.*—1993.—**148**, N 2.—P. 383—388.
29. *Wang Y. M., Sheeley N. R.* Understanding the geomagnetic precursor of the solar cycle // *Astrophys. J.*—2009.—**694**, N 1.—P. L11—L15.—DOI: 10.1088/0004-637X/694/1/L11.
30. *Yoshida A., Yamagishi H.* Predicting amplitude of solar cycle 24 based on a new precursor method // *Ann. geophys.*—2010.—**28**, N 2.—P. 417—425.—DOI:10.5194/angeo-28-417-2010.

Статья поступила в редакцию 15.03.12