

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.01.048>

УДК 523.98

М. І. Пішкало

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного, 27, Київ, Україна, 03143
pish@mao.kiev.ua

Прогноз 25-го циклу сонячної активності: максимум у N- і S-півкулях

*Сонячна активність змінюється з приблизно 11-річною періодичністю, а два 11-річних цикли утворюють повний 22-річний магнітний цикл Сонця. Недавно розпочався 25-цикл сонячної активності, і важливо знати наперед, яким і коли буде його максимум. У роботі зроблено прогноз максимального числа Вольфа у 25-му циклі окремо у північній і південній півкулях. Як передвісник максимуму циклу використано абсолютну величину полярного магнітного поля поблизу мінімуму циклу. Аналізуються величини полярного магнітного поля Сонця, виміряні на Сонячній обсерваторії імені Джона Вілкокка Стенфордського університету з 1976 р., і числа Вольфа у N- і S-півкулях за 1975—2020 рр. (у 21...24-му циклах сонячної активності), причому для 1992—2020 рр. використано числа Вольфа по півкулях за даними SILSO (<http://sidc.oma.be/SISLO>, Версія 2.0), а для 1975—1992 рр. — числа Вольфа по півкулях з роботи (Temmer et al., 2006, *Astron. Astrophys.* 2006, 447, 735), зведені до сучасної шкали SILSO. Визначено числа Вольфа у мінімумах і максимумах активності і епохи екстремумів у 21...24-му циклах по півкулях. Досліджено коефіцієнт кореляції між згладженими місячним числом Вольфа і абсолютною величиною полярного магнітного поля Сонця у північній і південній півкулях, при різних часових зсувах між рядами. Отримано, що максимальні коефіцієнти кореляції між указаними параметрами становлять 0.587 при часовому зсуві 4.76 року в N-півкулі і 0.680 — при часовому зсуві 5.45 року в S-півкулі. Якісний прогноз про величини максимумів 25-го циклу в N- і S-півкулях отримуємо, коли графіки величин полярного поля змістити вперед по часу відносно графіків чисел Вольфа на 4.76 і 5.45 року відповідно. Це вказує на те, що 25-й цикл сонячної активності буде децю сильнішим від попереднього 24-го. За абсолютними значеннями середньої величини полярного магнітного поля*

протягом двохрічного інтервалу безпосередньо перед мінімумом циклу в *N*- і *S*-півкулях отримано прогнозовані максимальні числа Вольфа: 66 ± 17 в *N*-півкулі і 83 ± 21 в *S*-півкулі. Це кількісно підтверджує, що 25-й цикл буде трохи активнішим (на 4...10 %) від попереднього.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, сонячний цикл, прогнозування сонячної активності.

Вступ. Число Вольфа, або відносне число сонячних плям, є найвідомішим індексом сонячної активності, яке змінюється з періодом близько 11 років. Наразі сонячна активність поволі зростає на початку 25-го циклу, після мінімуму в грудні 2019 року. Яким же буде за потужністю 25-й цикл сонячної активності? Коли він досягне свого максимуму? Яким буде цей максимум? Відповіді на ці запитання є цікавими і важливими для фізики Сонця і геофізики.

Зміни сонячної активності призводять до змін у міжпланетному і навколоземному космічному просторі, у магнітосфері та іоносфері Землі, що впливає на функціонування різних космічних і наземних технологічних систем (трубопроводи, лінії електропередач, залізниця, телекомунікація, радіозв'язок та ін.), а також певним чином на клімат і життєдіяльність живих організмів, зокрема й людини. Тому важливо знати наперед, якою може бути сонячна активність. Знання про величину і час максимуму сонячної активності є особливо важливими для космічної галузі, для планування і виконання космічних пілотованих і непілотованих місій, для навігації у приполярних широтах.

Динамо-механізм Беккока — Лейтона, запропонований Горесом Беккоком у 1961 р. [1] і розвинений Робертом Лейтоном у 1969 р. [9], досить непогано в загальних рисах описує еволюцію магнітного поля Сонця, головним видимим проявом якої і є 11-річна періодичність кількості сонячних плям. Згідно з сучасними уявленнями механізм

-динамо «працює» у нижній частині конвективної зони. Диференціальне обертання Сонця генерує тороїдальне поле із полоїдального поля (α -ефект), а турбулентна спіральна конвекція «перетворює» тороїдальне поле сонячних плям у нове полоїдальне поле, протилежне попередньому (β -ефект). Два 11-річних цикли утворюють повний 22-річний магнітний цикл Сонця (детальніше див. огляди [4, 11]).

Наразі є багато методів прогнозування максимуму сонячного циклу [7, 13]. Одним із передвісників величини сонячної активності у максимумі циклу є величина полярного магнітного поля Сонця поблизу мінімуму циклу [16]. Згідно з динамо теорією саме ця величина є фізично обґрунтованим передвісником.

У даній роботі досліджується кореляція між місячними згладженими числами Вольфа і згладженими величинами полярного магнітного поля у північній і південній півкулях Сонця у травні 1976 р. — січні 2020 р. і робиться прогноз максимуму 25-го циклу по півкулях. Основою такого дослідження є той факт, що сонячні плями не перетинають лінії екватора (про що відомо ще з робіт Хейла [6]), тобто північна і південна півкулі поводяться автономно, майже незалежно

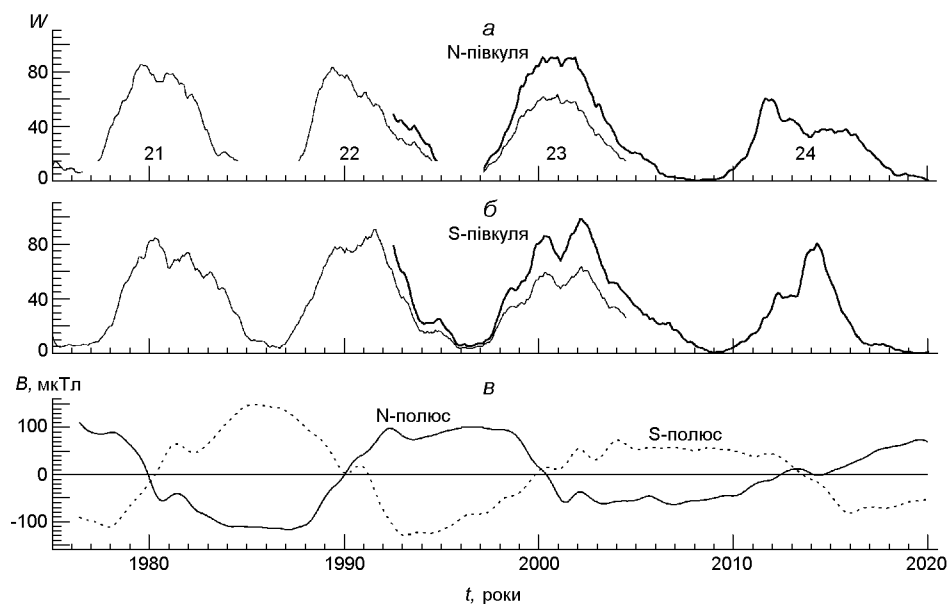


Рис. 1. Згладжені числа Вольфа W (а, б; тонка лінія — дані [17], до ревізії 2015 р.; жирна лінія — дані SILSO); і полярне магнітне поле B (в, Обсерваторія імені Джона Вілкокса) у циклах 21—24 сонячної активності у північній і південній півкулях. Номери циклів указані на панелі а

одна від іншої. Схема розрахунків схожа на ту, що була використана нами у роботі [14] для прогнозу 24-го циклу сонячної активності.

Спостережені дані. Для аналізу використано дані про величину полярного магнітного поля Сонця з Сонячної обсерваторії імені Джона Вілкокса (WSO, <http://wso.stanford.edu>) і місячні згладжені числа Вольфа (як сумарні, так і по півкулях) за даними SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations, <http://sidc.oma.be/SISLO>, Version 2.0). Оскільки число Вольфа по півкулях на сайті SILSO наведене лише з 1992 р., ми доповнили його даними з роботи [17], де вміщено каталог чисел Вольфа по півкулях за 1945—2004 роки. Варто нагадати, що у липні 2015 р. було проведено ревізію [5] відносного числа сонячних плям (числа Вольфа), тому сучасні дані SILSO і дані з роботи [17] для одного й того ж проміжку часу не просто різняться, а й мають різний масштаб. Так, у 1975—2004 рр. у середньому відношення згладжених сумарних чисел Вольфа за даними SILSO і з роботи [17] становить 1.401, а для періоду 1992_07 — 2004_06 рр. відповідні відношення чисел Вольфа за даними SILSO і з роботи [17] становлять: 1.609 — для N-півкулі, 1.587 — для S-півкулі, 1.574 — для N+S.

Залежності використаних у роботі даних від часу приведено на рис. 1. Тут на верхній і середній панелях показано числа Вольфа за даними SILSO з 1992 р. і з каталогу [17] для періоду 1975—2004 рр., а на нижній панелі — еволюція з часом полярного магнітного поля за даними Сонячної обсерваторії імені Джона Вілкокса. Бачимо, що полярне поле максимальне поблизу мінімуму циклу і навпаки.

Числа Вольфа у північній і південній півкулях $W_{N,S}$ у діапазоні 1975—1992 рр. було знайдено за співвідношеннями

Таблиця 1. Мінімуми і максимуми числа Вольфа у циклах 21...25 сонячної активності по півкулях (у дужках — прогнозовані нами значення)

Номер циклу	Екстремум	N-півкуля		S-півкуля	
		W	Час	W	Час
21	Min	9.0	1976_06	7.0	1975_05
	Max	121.3	1979_10	106.7	1981_12
22	Min	7.3	1985_12	4.4	1986_09
	Max	111.4	1989_05	126.9	1991_07
23	Min	5.1	1996_09	5.4	1996_05
	Max	90.7	2000_12	98.5	2002_03
24	Min	0.6	2008_01	0.8	2008_12
	Max	60.1	2011_08	80.4	2014_04
25	Min	0.9	2019_12	0.3	2019_06
	Max	(66±17)		(83±21)	

$$W_{N,S} = W_{N,S} \frac{W^{SILSO}}{W^T},$$

де W^{SILSO} — сумарне місячне згладжене число Вольфа за даними SILSO, $W_{N,S}^T$ і W^T — числа Вольфа (по півкулях і сумарне) за даними роботи [17]. Отримані таким чином компільовані значення чисел Вольфа по півкулях для періоду 1975—2020 рр. показані на рис. 3 суцільними лініями.

У табл. 1 наведено епохи мінімуму і максимуму сонячної активності у 21...25-му циклах, окремо у північній і південній півкулях, отримані з аналізу побудованого нами компільованого ряду чисел Вольфа по півкулях з 1975 року. Цікавим є той факт, що першим мінімум активності настає почергово то у північній, то у південній півкулі, а максимум за вказаний період — весь час першим лише у північній півкулі.

Кореляція між числом Вольфа і полярним полем. Для дослідження коефіцієнта кореляції між згладженими числами Вольфа і згладженими величинами полярного поля вони були попередньо зведені до одних моментів часу (у нашому випадку — числа Вольфа інтерпольовані на час визначення величини полярного поля). Отримані значення коефіцієнта кореляції при різних часових зсувах між рядами даних для північної і південної півкуль показано на рис. 2. Максимальний позитивний коефіцієнт кореляції у північній півкулі становить 0.587 ($P < 0.001$) при часовому зсуві 4.764 р., у південній — 0.680 ($P < 0.001$) при часовому зсуві 5.448 р. Максимальний негативний коефіцієнт кореляції становить -0.415 ($P < 0.001$) у північній півкулі при нульовому часовому зсуві між рядами даних і -0.485 ($P < 0.001$) — у південній півкулі при часовому зсуві 0.438 р.

Прогноз максимуму 25-го циклу. Величина полярного магнітного поля поблизу мінімуму циклу є передвісником активності у максимумі циклу. На рис. 3 показано місячні згладжені значення числа Вольфа з 1975 р. і величини полярного поля, зсунуті вперед на величини

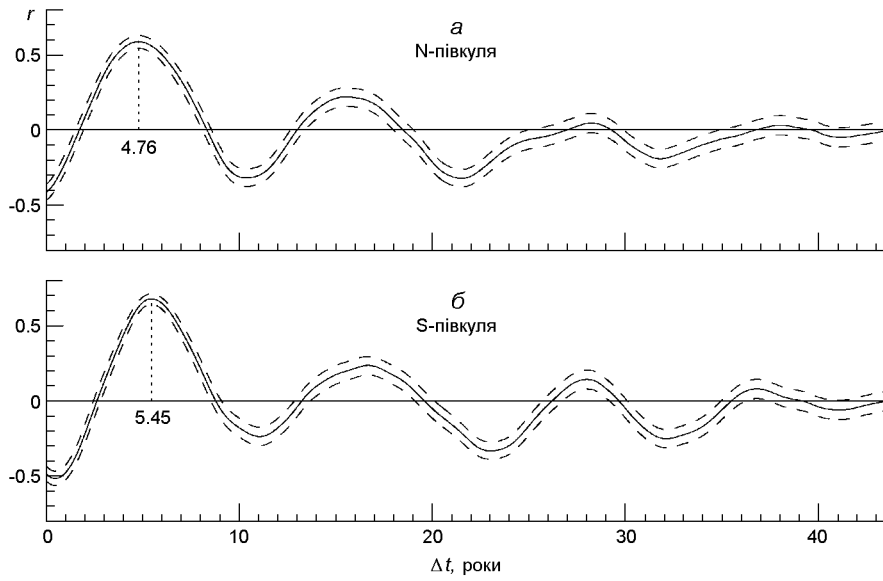


Рис. 2. Коефіцієнт кореляції r між числами Вольфа W і величиною полярного магнітного поля B для північної і південної півкуль залежно від зсуву по часу. Штрихові лінії — довірчі границі 99 % коефіцієнта кореляції, отримані за допомогою стандартного перетворення Фішера $r \rightarrow z$

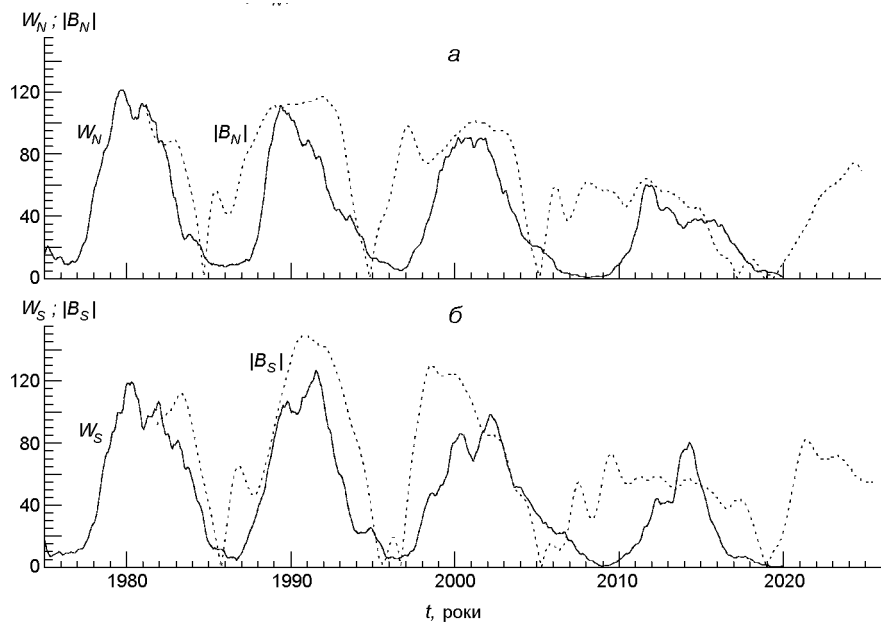


Рис. 3. Місячні згладжені числа Вольфа (W_N та W_S , компільовані за рис. 1, суцільні лінії) і згладжені абсолютні величини полярного магнітного поля у північній і південній півкулях ($|B_N|$, $|B_S|$), зсунуті вперед по часу на 4.76 і 5.45 років відповідно (пунктир)

ну, що відповідає часовому зсуву, при якому значення коефіцієнта кореляції між рядами є найвищим (див. рис. 2). З цього рисунка можна принаймні якісно зробити висновок, що активність у максимумі 25-го циклу буде не меншою, а, швидше за все, дещо вищою, ніж у максимумі 24-го циклу.

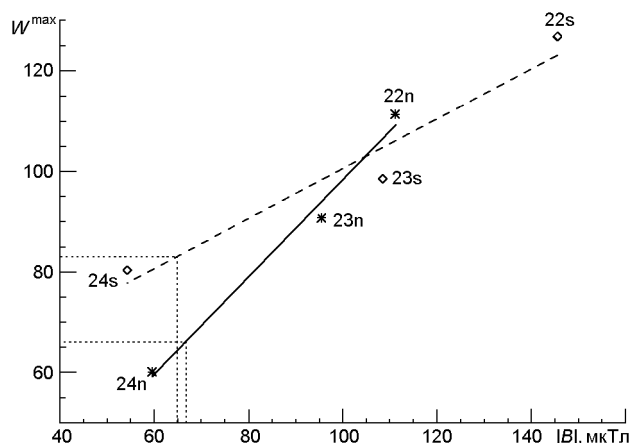


Рис. 4. Максимальне число Вольфа W у північній (суцільна лінія) і південній (штрихова лінія) півкулі залежно від середньої величини модуля полярного магнітного поля $|B|$ за два роки перед мінімумом циклу у відповідній півкулі

Кількісно оціночний прогноз максимуму 25-го циклу сонячної активності для різних півкуль зробимо на основі кореляції між величиною полярного поля поблизу мінімуму циклу і максимальним числом Вольфа у відповідній півкулі. Наразі ми маємо дані лише для трьох циклів, отже про серйозне статистичне дослідження не йдеться. На рис. 4 показано залежності максимального числа Вольфа W у північній і південній півкулі від середнього абсолютного значення величини полярного поля $|B|$ протягом двох років перед мінімумом активності у відповідній півкулі.

Лінійні залежності між указаними параметрами описуються виразами

$$W_N^{\max} = 1.289 + 0.970 |B_N|,$$

$$W_S^{\max} = 50.896 + 0.496 |B_S|,$$

де W_N^{\max} і W_S^{\max} — значення максимального числа Вольфа в N- і S-півкулях, а $|B_N|$ і $|B_S|$ — відповідні значення абсолютної величини полярного поля. Ці вирази дають величини 66 ± 17 і 83 ± 21 для прогнозованого максимального числа Вольфа у північній і південній півкулях. Це трохи вище від відповідних значень у 24-му циклі (60.1 і 80.4, див. табл. 1). Отже, південна півкуля Сонця у 25-му циклі і надалі буде дещо активнішою від північної. Такий же результат можна отримати і тоді, коли як передвісник використовувати деякі інші значення величини полярного поля поблизу мінімуму — безпосередньо у мінімумі, середнє за рік до мінімуму чи максимальне у попередньому циклі (див. табл. 2).

Прогноз максимального сумарного числа Вольфа у 25-му циклі, зроблений нами у попередній роботі [15] за величиною середнього полярного магнітного поля поблизу мінімуму циклу, вказує на те, що сонячна активність у поточному циклі буде трохи вищою, ніж у попе-

Таблиця 2. Прогнозовані значення максимального числа Вольфа у 25-му циклі сонячної активності у північній і південній півкулях залежно від вибраного значення модуля полярного поля $|B|$

Параметр (передвісник)	W_N	W_S
Середнє значення $ B $ за 2 роки до мінімуму	66.1±17.2	83.2±20.7
Середнє значення $ B $ за 1 рік до мінімуму	70.5±28.2	81.7± 9.2
Максимальне значення $ B $ у попередньому циклі	69.9±19.5	77.7±40.1
Значення $ B $ у мінімумі циклу	70.7±27.0	81.1± 3.5

редньому 24-му циклі. У роботах [2, 3, 8, 10, 12] також прогнозується, що 25-й цикл сонячної активності буде трохи активнішим від 24-го.

Про час максимуму активності в кожній з півкуль сказати наразі важко. Ймовірно, знову максимум буде досягнуто спочатку у північній півкулі, проте різниця між часом максимуму в N-півкулі і S-півкулі буде, скоріш за все, меншою, ніж у попередньому циклі.

Висновки. Проведене у роботі дослідження дозволяє зробити такі висновки.

1. Згладжені числа Вольфа і абсолютні значення величини полярного магнітного поля Сонця у 21...24-му циклах активності антикорелюють між собою. Максимальний коефіцієнт кореляції в N-півкулі становить 0.587 при часовому зсуві 4.76 року, а в S-півкулі — 0.680 при часовому зсуві 5.45 року.

2. Значення величини полярного поля, зсунуті вперед по часу на 4.76 р. в N-півкулі і на 5.45 р. в S-півкулі вказують якісно на те, що 25-й цикл сонячної активності буде дещо сильнішим від попереднього.

3. Якщо як передвісник сонячної активності для максимуму циклу використати середні абсолютні значення величини полярного поля за два роки до мінімуму, то прогнозовані максимальні величини числа Вольфа у 25-му циклі становлять 66 ± 17 в N-півкулі і 83 ± 21 — в S-півкулі.

Подяки. Автор вдячний команді SILSO із Королівської обсерваторії Бельгії за масиви чисел Вольфа і професору Тодду Гуксема (Todd Hoeksema) із Сонячної обсерваторії ім. Джона Вілкокса за значення величини полярного магнітного поля.

REFERENCES

1. Babcock H. W. (1961) The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle. *Astrophys. J.* 133. 572—587.
2. Bhowmik P., Nandy D. (2018) Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions. *Nature Comm.* 9. id. 5209.
3. Cameron R. H., Jiang J., Schüssler M. (2016) Solar cycle 25: Another moderate cycle? *Astrophys. J. Lett.* 823(2). L22.
4. Charbonneau P. (2010) Dynamo models of the solar cycle. *Living Rev. Solar Phys.* 7. id. 3.
5. Clette F., Svalgaard L., Vaquero J. M., Cliver E. W. (2014) Revisiting the sunspot number. A 400-year perspective on the solar cycle. *Space Sci. Rev.* 186. 35—103.

6. Hale G. E., Ellerman F., Nicholson S. B., Joy A. H. (1919) The magnetic polarity of sun-spots. *Astrophys. J.* 49. 153—178.
7. Hathaway D. H. (2009) Solar cycle forecasting. *Space Sci. Rev.* 144(1-4). 401—412.
8. Jiang J., Wang J.-X., Jiao Q.-R., Cao J.-B. (2018) Predictability of the solar cycle over one cycle. *Astrophys. J.* 863. id. 159. 15 p.
9. Leighton R. B. (1969) A magneto-kinematic model of the solar cycle. *Astrophys. J.* 156. 1—26.
10. Okoh D. I., Seemala G. K., Rabi A. B., Uwamahoro J. B., Habarulema J. B., Aggarwal M. (2018) A hybrid regression-neural network (HR-NN) method for forecasting the solar activity. *Space Weather.* 16(9). 1424—1436.
11. Ossendrijver M. (2003) The solar dynamo. *Astron. and Astrophys. Rev.* 11. 287—367.
12. Pesnell W. D., Schatten K. H. (2018) An early prediction of amplitude of solar cycle 25. *Solar Phys.* 293. id. 112.
13. Petrovay K. (2020) Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 17. id. 2.
14. Pishkalo M. I. (2010) Prediction of amplitude of solar cycle 24 based on polar magnetic field of the sun at cycle minimum. *Sun and Geosphere.* 5(2). 47—51.
15. Pishkalo M. I. (2019) On polar magnetic field reversal in solar cycles 21, 22, 23, and 24. *Solar Phys.* 294. id. 137.
16. Schatten K. H., Scherrer P. H., Svalgaard L., Wilcox J. M. (1978) Using dynamo theory to predict the sunspot number during solar cycle 21. *Geophys. Res. Lett.* 5(5). 411—414.
17. Temmer M., Rybák J., Bendík P., Veronig A., Vogler F., Otruba W., Pötzi W., Hanslmeier A. (2006) Hemispheric sunspot numbers R_n and R_s from 1945—2004: catalogue and N-S asymmetry analysis for solar cycles 18—23. *Astron. and Astrophys.* 447(2). 735—743.

Н. И. Пишкало

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
Киев, Украина

ПРОГНОЗ 25-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: МАКСИМУМ В N- И S-ПОЛУШАРИЯХ

Солнечная активность изменяется с приблизительно 11-летней периодичностью, а два 11-летних цикла образуют полный 22-летний магнитный цикл Солнца. Недавно начался 25-й цикл солнечной активности, и важно знать наперёд, каким и когда будет его максимум. В работе сделан прогноз максимального числа Вольфа в 25-м цикле отдельно в северном и южном полушариях. В качестве предвестника максимума цикла использовано абсолютную величину полярного магнитного поля вблизи минимума цикла. Анализируются величины полярного магнитного поля Солнца, определяемые на Солнечной обсерватории имени Джона Вилкокса Стенфордского университета с 1976 г., и числа Вольфа в N- и S-полушариях в 1975—2020 гг. (в 21...24-м циклах солнечной активности), причём для 1992—2020 гг. использованы числа Вольфа по полушариям по данным SILSO (<http://sidc.oma.be/SISLO>, Версия 2.0), а для 1975—1992 гг. — числа Вольфа по полушариям из работы (Temmer et al., 2006, *Astron. Astrophys.* 2006, 447, 735), приведенные к современной шкале SILSO. Определены числа Вольфа в минимумах и максимумах активности и эпохи экстремумов в 21...24-м циклах по полушариям. Исследован коэффициент корреляции между сглаженными месячным числом Вольфа и абсолютной величиной полярного магнитного поля Солнца в северном и южном полушариях, при разных временных сдвигах между рядами. Получено, что максимальные коэффициенты корреляции между указанными параметрами составляют 0.587 при сдвиге по времени 4.76 года в N-полушарии и 0.680 при сдвиге 5.45 года в S-полушарии. Качественный прогноз величины максимума 25-го цикла в N- и S-полушариях получаем, когда графики величин полярного поля сдвинуть вперёд по времени относительно графиков чисел Вольфа на

4.76 и 5.45 года соответственно. Это указывает на то, что 25-й цикл солнечной активности будет немного сильнее предыдущего 24-го. По абсолютным значениям средней величины полярного магнитного поля в течение 2-летнего промежутка времени непосредственно перед минимумом цикла в N- и S-полушариях получены прогнозированные максимальные числа Вольфа: 66 ± 17 в N-полушарии и 83 ± 21 в S-полушарии. Это количественно подтверждает, что 25-й цикл будет немного активнее (на 4...10 %) нежели предыдущий.

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, солнечный цикл, прогнозирование солнечной активности.

M. I. Pishkalo

Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

PREDICTION OF SOLAR CYCLE 25: MAXIMUM IN THE N- AND S-HEMISPHERES

Solar activity changes with about 11-year periodicity, two 11-year cycles form a complete 22-year magnetic cycle of the Sun. Solar cycle 25 has recently begun, and it is important to know in advance what and when it will be at its maximum. The paper predicts the maximal Wolf number in solar cycle 25 separately in the northern and southern hemispheres. The absolute value of the polar magnetic field near the cycle minimum was used as a precursor of the cycle maximum. The values of solar polar magnetic field measured at the John Wilcox Solar Observatory of Stanford University since 1976 and Wolf numbers in the N- and S-hemispheres in 1975—2020 (in solar cycles 21—24) are analyzed. For the time interval of 1992—2020, Wolf numbers in the N- and S-hemispheres were used according to SILSO (<http://sidc.oma.be/SISLO>, Version 2.0), and for the time interval of 1975—1992, Wolf numbers were taken from the paper (Temmer et al., 2006, *Astron. Astrophys.* 2006, 447, 735) and reduced to the modern SILSO scale. Wolf numbers in minima and maxima and corresponding times in 21—24 cycles in the N- and S-hemispheres were found. The correlation coefficient at different time lags between the smoothed monthly Wolf number and the modulus of the Sun's polar magnetic field in the northern and southern hemispheres has been studied. It was found that maximal correlation coefficients between these parameters are 0.587 at a time lag of 4.76 years in the N-hemisphere and 0.680 at a time lag of 5.45 years in the S-hemisphere. A qualitative forecast of maximal Wolf numbers in solar cycle 25 in the N- and S-hemispheres was obtained when the graphs of the polar fields were shifted forward in time relative to the Wolf numbers graphs by 4.76 and 5.45 years, respectively. This indicates that solar cycle 25 will be slightly stronger than the previous cycle. Using the absolute values of the average polar magnetic fields during the 2 years interval just before the cycle minimum in the N- and S-hemispheres as precursors we found that predicted maximal Wolf numbers in the N- and S-hemisphere are 66 ± 17 and 83 ± 21 , respectively. This quantitatively confirms that solar cycle 25 will be slightly (4—10%) more active than the previous one.

Keywords: Sun, solar activity, solar cycle, prediction of solar activity.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2020

Після доопрацювання 19.10.2020

Прийнята до друку 19.10.2020