

# СТАН СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОСМОСУ

## ПРО МАКСИМУМ 25 ЦИКЛУ І МОЖЛИВИЙ ПОДАЛЬШИЙ ТРЕНД СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

**Володимир Єфіменко** – канд. фіз.-мат. наук, директор Астрономічної обсерваторії  
**Всеволод Лозицький** - д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник

*Розглядається прогноз амплітуди 25-го циклу сонячної активності, на основі аналізу даних про 24 попередні сонячні цикли. Вивчається статистичний зв'язок між швидкістю збільшення числа сонячних плям на фазі кривої росту і амплітудою в максимумі циклу. Виявилось, що результат прогнозу залежить від кількох початкових припущень, зокрема від того, яка ділянка кривої росту враховується для прогнозування, а також чи враховуються всі 24 цикли, або тільки непарні. Припущення монотонної або немонотонної кривої зростання також відіграє важливу роль. Щодо останнього кластерний аналіз показав, що до 32-го місяця циклу, видимих ознак немонотонності в кривій зростання не спостерігається, схожою на ту, що була в 24 циклі. Робимо висновок, що максимальна згладжена кількість сонячних плям у 25-му циклі  $W_{\text{max}}$  (25), швидше за все, має дорівнювати  $185 \pm 18$  одиниць у новій системі, що відповідає середній потужності сонячного циклу, з виконанням правила Гневишева-Оля. При таких параметрах цього циклу ознак наближення до глибокого мінімум вікового циклу в середині 21 ст. немає. Це не виключає факту що цей глибокий віковий мінімум може наступити раптово і різко відразу після 25 числа циклу, як це було, наприклад, у мінімумі Дальтона.*

**Ключові слова:** Сонце, сонячна активність, число сонячних плям, прогноз амплітуди 25-го циклу, правило Гневишева-Оля, мінімум вікового циклу.

**Вступ.** Сонячна активність – досить складне явище в атмосфері Сонця, яке має магнітну природу та циклічні зміни у часі. Найвідомішим є 11-річний цикл сонячної активності, хоча існують і інші цикли, включаючи 22-річний, 44-річний і віковий цикл тривалістю близько 100 років.

Серед спеціалістів найбільша увага приділяється прогнозуванню 11-річного циклу, оскільки цей цикл пов'язаний з найбільш суттєвими змінами в навколоземному космічному просторі і геосфері. В даний час надійних методів прогнозу сонячної активності ще не створено, хоча наукових праць на цю тему досить багато. Фахівці [1] виділяють три основні групи методів: методи зовнішнього впливу, побудови моделей і екстраполяції (врахування статистичних зв'язків в межах одного циклу).

Метод зовнішнього впливу базується на величині сонячної активності в даний час, для прогнозу висоти наступного сонячного максимуму. Застосування цього методу передбачає знання моделі чи фізичного механізму активності. При цьому приймається, що кожен сонячний цикл сам по собі є узгодженим процесом, тоді як тривалі ряди сонячної активності складаються з серії набагато менш пов'язаних між собою окремих циклів. Найбільш вживаною моделлю, яка використовується для прогнозування сонячної активності, є сонячне динамо. Методи екстраполяції застосовуються при умові, що фізичний процес розвитку циклу є статистично однорідним, тобто математичні закономірності, що лежать в основі його змін, однакові в будь-який момент часу, і тому він піддається аналізу та прогнозуванню методами часових рядів.

Порівняння останніх прогнозів сонячної активності в новому 25-му циклі, який розпочався в грудні 2019 року, наведено в роботі [1]. З цього порівняння випливає, що навіть найсучасніші методи прогнозування дають істотно різні результати. Наприклад, метод нейронної мережі дає амплітуду 25-го циклу на рівні 57-91 одиниць [2], атракторний аналіз - близько 103 од. Для порівняння варто нагадати, що в попередньому

24-му циклі, сонячна активність досягла 116 одиниць (у 2014 році). У той же час вейвлет-аналіз передбачає висота максимуму 25-го циклу на рівні 132 одиниць [3], а метод внутрішніх прекурсорів – в діапазоні 154-202 одиниць [4]. Таким чином, загалом, неясною залишається ситуація з максимумом цього циклу, який очікується у 2024-2026 роках. Однак ситуація була точно такою ж раніше, коли робились прогнози попереднього 24-го циклу сонячної активності (див., наприклад, [5, 9]).

Поточний 25-й цикл також привертає значну увагу, оскільки частина дослідників робить висновок про настання мінімуму вікового циклу сонячної активності, який припадає приблизно на середину 21 століття. Жаркова та Шеперд [10] зазначають у нещодавно опублікованій статті, що великий сонячний мінімум повинен відбуватися в циклах № 25-27.

Метою цієї роботи є отримання прогнозової оцінки амплітуди 25-го циклу на основі швидкості росту чисел Вольфа (число Вольфа це індекс сонячної активності, який відповідає кількості сонячних плям на видимій поверхні Сонця) на фазі росту цього циклу.

**Дані спостережень та їх аналіз.** Для аналізу ми використали дані про хід сонячного циклу, розміщені на сайті <http://www.solen.info/solar/>. Тут представлено дані про кількість плям на Сонці за результатами проведеного перегляду Міжнародним центром даних у Королівській бельгійській обсерваторії [11].

На рис. 1 представлено дані для нового, ревізованого ряду відносних чисел сонячних плям. Результати такої ревізії опубліковані у 2014 р. [11] за даними Міжнародного Центру Даних при Бельгійській Королівській Обсерваторії. Основні зміни полягають у тому, що взято за основу спостережний ряд Альфреда Вольфера, що приблизно в 1.67 раза збільшує більш ранні значення, роблячи їх співмірними із сучасними оцінками. Крім того, були виправлені значення після 1947 р., коли М. Вальдмайером при визначенні відносного числа сонячних плям були введені вагові коефіцієнти відповідно до розміру плям. Також було знайдено і усунуто змінний тренд у спостереженнях обсерваторії Локарно, яка була реперною обсерваторією після 1980 р.

Цикл № 25 розпочався у грудні 2019 року (див. рис. 1). Для отримання прогнозних оцінок нами обчислювалась швидкість збільшення кількості сонячних плям ( $\Delta W/\Delta T$ ) для різних циклів і ставилась у відповідність максимальна амплітуда сонячних плям  $W_{\max}$  у максимумі кожного циклу. Подібний підхід був застосований В.Лозицьким та В.Сфіменком [6], але для кількості сонячних плям у старій системі. Ми виявили, що результат прогнозування циклу істотно залежить від ділянки кривої росту, що використовувалась для прогнозування циклу.

З рис. 1 випливає, що фактичне наростання з часом числа сонячних плям відбуваються значно швидше, ніж по прогнозу. Такий сценарій означає, що число плям в максимумі має бути більшим прогнозованого. Це число можна оцінити, виходячи з швидкості наростання числа плям з часом, як це було зроблено в роботі [6]. У цій роботі автори використовували як вхідний параметр приріст числа сонячних плям з 20-го по 32-й місяці циклу, і на основі побудованої кореляційної залежності для попередніх 23 циклів прогнозували максимум 24-го циклу.

Залежність між середньомісячною швидкістю наростання числа сонячних плям в інтервалі місяців 15-32 від початку циклу, яка позначена нижче як  $(\Delta W/\Delta T)_{15-32}$ , та максимальним згладженим числом сонячних плям  $W_{\max}$  (на основі даних про 24 попередні сонячні цикли), можна апроксимувати лінійним виразом:

$$W_{\max} = 17.9 (\Delta W/\Delta T)_{15-32} + 86.17. \quad (1)$$

Для поточного 25-го циклу  $(\Delta W/\Delta T)_{15-32} = 4.5$ . Тоді, згідно (1),  $W_{\max}(25) = 166.7$ , що значно вище, ніж по деяких прогнозах [1].

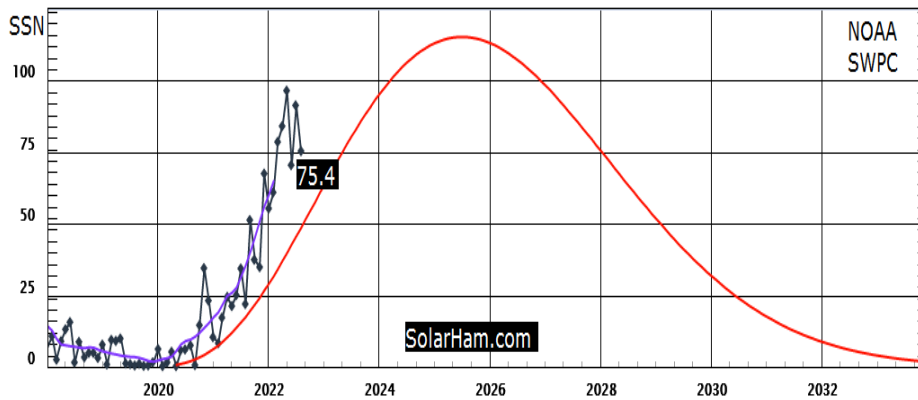


Рис. 1. Порівняння прогнозу числа сонячних плям у 25-му циклі згідно з NOAA / Space Weather Prediction Center (суцільна плавна крива) з фактичними змінами середньомісячних значень (ромби) а також згладжених значень, які представлені плавною кривою, проведеною по середньомісячних значеннях. Вісь ординат підписана як SSN і означає число плям (sunspot number). Цифра 75.4 означає середньомісячне згладжене число сонячних плям за серпень 2022 р.

Автори провели дослідження тривалості вибраного тестового інтервалу на прогнозування амплітуди 25 циклу. Виявилось, що при звуженні тестового інтервалу (число місяців від початку циклу) величина  $W_{\max}$  суттєво змінюється. Так, якщо замість інтервалу 15-32 місяці взяти інтервал 27-32 місяці від початку циклу, то маємо значно більш розсіяну залежність, яка апроксимується виразом

$$W_{\max} = 15.81 (\Delta W / \Delta T)_{27-32} + 103.55. \quad (2)$$

Оскільки для 25-го циклу  $(\Delta W / \Delta T)_{27-32} = 5.87$ , то згідно (2) маємо  $W_{\max}(25) = 196.4$ . Таким чином, прогнозоване значення  $W_{\max}(25)$  у цьому випадку на 20 одиниць більше, ніж для інтервалу 15-32.

Оскільки 25-й цикл є непарним, цікаво розглянути лише непарні цикли. Відповідний розгляд показує, що тоді рівняння регресії є таким

$$W_{\max} = 13.85 (\Delta W / \Delta T)_{27-32} + 122.88. \quad (3)$$

З цього рівняння випливає, що при  $(\Delta W / \Delta T)_{27-32} = 5.87$  маємо  $W_{\max}(25) = 204.2$ . Таким чином, прогноз стає ще більш високим, наближаючись по величині до класу потужних сонячних циклів.

На основі цього розгляду можна зробити висновок, що активність в сонячному циклі № 25 поступово «розганяється» - з наближенням до максимуму циклу (тобто в період 27-32 місяці циклу) її зростання відповідає більш потужному циклу, ніж на більш початковій фазі кривої росту, що відповідає розширеному інтервалу у 15-32 місяці. Основне питання, яке при цьому виникає, є таким: такий прискорений ріст активності і надалі зберігатиметься, чи він, подібно до попереднього 24-го циклу, зміниться сповільненим ростом ?

Для пошуку відповіді на це питання був розглянутий розподіл сонячних циклів по середньомісячній швидкості росту для інтервалів 15-32, 21-32, 27-32 місяців передісторії (Табл. 1). З цієї таблиці випливає, що цикл № 25 попадає у найчисленнішу групу циклів ( $\approx 50\%$ ), в якій середньомісячна швидкість росту числа сонячних плям знаходиться в межах 3-6 одиниць щомісяця у всіх вказаних інтервалах передісторії. Причому цікаво, що в інтервалах передісторії 15-32 та 21-32 цикли №№ 24 і 25 є «близнюками», тобто попадають в однакові кластери, тоді як в інтервалі 27-32 місяців цикл № 24 вже «випадає», а цикл № 25 – залишається. Тобто це означає, що цей останній період розвитку активності у 25-му циклі вже відбувається по іншому сценарію, ніж у 24-му циклі.

Можливо, це вказує на те, що подальший розвиток активності у поточному 25-му циклі і надалі буде йти по сценарію, відмінного від попереднього 24-го циклу.

Таблиця 1. Розподіл циклів по середньомісячній швидкості росту для інтервалів передісторії 15-32, 21-32, 27-32 місяців

Інтервал швидкостей (одиниць чисел Вольфа)	Інтервал передісторії (місяців)	15-32	21-32	27-32
0-3	п кількість	4	5	7
	№ циклів	1, 5, 6, 7	5, 6, 7, 12, 15	6, 7, 12, 13, 14, 15, 16
3-6	п кількість	13	11	10
	№ циклів	2, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25	1, 2, 9, 10, 13, 14, 16, 17, 23, 24, 25	1, 2, 4, 5, 9, 10, 17, 20, 23, 25
6-9	п кількість	5	5	7
	№ циклів	4, 11, 18, 21, 22	4, 11, 18, 20, 21	8, 11, 18, 19, 21, 22, 24
9-12	п кількість	3	4	1
	№ циклів	3, 8, 19	3, 8, 19, 22	3

З наведеного вище розгляду випливає, що ймовірна амплітуда активності у 25-му циклі має знаходитись у межах приблизно 167-204 одиниці, що можна записати так:  $W_{\max}(25) = 185 \pm 18$  од. Таким чином, у циклах №№ 24-25 має виконатись правило Гневишева-Оля [12], згідно з яким непарний цикл має бути на  $\sim 10-50\%$  потужніший, ніж попередній парний цикл (рис. 2).

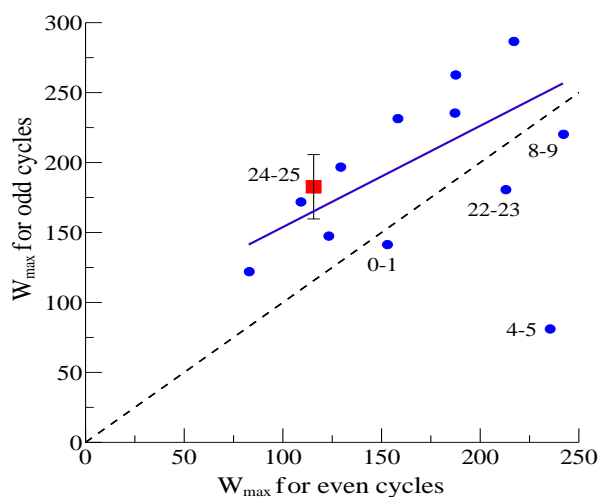


Рис. 2. Співставлення фактичних амплітуд  $W_{\max}$  для парних (even) і непарних (odd) циклів, яке показано заповненими кружечками (див. текст)

**Висновки.** Згідно з даними про 24 попередні сонячні цикли, які стосуються статистичного зв'язку між швидкістю наростання числа сонячних плям  $\Delta W/\Delta T$  на фазі кривої росту і амплітудою циклу  $W_{\max}$ , максимальне згладжене число сонячних плям у 25-му циклі  $W_{\max}(25)$  очікується на рівні  $185 \pm 18$  у новій системі, що відповідає середньому по потужності сонячному циклу, з виконанням правила Гневишева-Оля. Оцінка

$W_{\max}(25)$  залежить від того, яку ділянку кривої фази росту циклу взяти за основу для прогнозування, а також від того, приймати до уваги всі 24 цикли, чи лише непарні. На результат прогнозування впливає також вихідне припущення про монотонність чи немонотонність фази росту. Порівняння швидкостей наростання числа сонячних плям на різних ділянках фази росту різних циклів (Табл. 1) показує, що поточний цикл № 25 не виявляє ранніх ознак немонотонності росту, подібних до спостережених у 24-му циклі. Якщо ця тенденція збережеться, фактичне значення  $W_{\max}(25)$  буде на верхній межі зазначеного інтервалу вірогідних значень. При таких параметрах 25-го циклу, немає ознак наближення глибокого мінімуму вікового циклу в середині ХХІ ст.

#### Список використаних джерел:

1. Petrovay K. Solar cycle prediction // Living Review Sol. Phys. 2020, Vol.17, art. No.2. URL: <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>.
2. Attia A.F., Ismail H.A., Basurah H.M. (2013) A neuro-fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25 // Astrophysics and Space Science. – 2013. – Vol. 344. – P. 5–11. URL: <https://doi.org/10.1007/s10509-012-1300-6>
3. Rigozo N.R., Souza Echer M.P., Evangelista H., Nordemann D.J.R., Echer E. Prediction of sunspot number amplitude and solar cycle length for cycles 24 and 25 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2011. – Vol. 73(11–12). P. 1294–1299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.005>
4. Li K.J., Feng W., Li F.Y. Predicting the maximum amplitude of solar cycle 25 and its timing // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2015. Vol. 135. – P. 72–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.010>
5. Tsirulnik L.B., Kuznetsova T.V., Oraevsky V.N. Forecasting the 23rd and 24th solar cycles on the basis of MGM spectrum // Advance in Space Research. –1997. – Vol. 20. – P. 2369–2372.
6. Лозицький В., Єфіменко В. Розвиток сонячної активності у 24-му циклі: сценарій 15-го циклу? // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2012. – Вип. 49. – С. 47–50.
7. Наговицын Ю.А., Кулешова А.И. Соотношение Вальдмайера и ранняя диагностика величины максимума текущего цикла солнечной активности // Астрон. ж-л. – 2012. – Т. 89, № 10. – С. 883–887.
8. Pishkalo M.I. Prediction of solar cycle 24 using sunspot number near the cycle minimum // Solar Phys. – 2014. – Vol. 289, Iss. 5. – P. 1815–1829.
9. Lozitsky V.G., Efimenko V.M. Prognoses and anomaly of 24th cycle of solar activity // Odessa Astronomical Publications. – 2014. – Vol. 27, No.2. – P. 90–91.
10. Zharkova, V. V., Shepherd, S. J. Eigenvectors of solar magnetic field in cycles 21-24 and their links to solar activity indices // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Vol. 512, Iss. 4, pp. 5085 – 5099.
11. Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W. Revisiting the sunspot number. A 400-year perspective on the solar cycle. // Space Sci. Rev. – 2014. – Vol. 186, Iss. 1-4. – P. 35-103.
12. Gnevyshev M.N. Essential features of the 11-year solar cycle // Solar Physics. – 1977. – Vol.51. – P. 175-183.

### ABOUT A MAXIMUM OF 25 CYCLES AND A FURTHER TREND OF SOLAR ACTIVITY IS POSSIBLE

**Volodymyr Efimenko** – PhD, director of the Astronomical Observatory  
**Vsevolod Lozitskyi** – D.Sc., Senior Research Fellow

*The forecast of the amplitude of the 25th cycle of solar activity is considered, based on the analysis of data on the previous 24 solar cycles. The statistical relationship between the rate of increase in the number of sunspots in the phase of the growth curve and the amplitude at the maximum of the cycle is studied. It turns out that the outcome of the prediction depends on several initial assumptions, including which part of the growth curve is taken into account for the prediction, and whether all 24 cycles are taken into account or only the odd ones. The assumption of a monotonic or non-monotonic growth curve also plays an important role. Regarding the latter, the cluster analysis showed that until the 32nd month of the cycle, there are no visible signs of non-monotonicity in the growth curve, similar to the one in the*

24th cycle. We conclude that the maximum smoothed number of sunspots in the 25th cycle  $W_{max}(25)$ , most likely, should be equal to  $185 \pm 18$  units in the new system, which corresponds to the average power of the solar cycle, with the fulfillment of the Gnievyshev-Olya rule. With such parameters of this cycle, there are signs of approaching the deep minimum of the age cycle in the middle of the 21st century. This does not exclude the fact that this deep age minimum can occur suddenly and sharply immediately after the 25th day of the cycle, as it was, for example, in the Dalton minimum.

**Key words:** Sun, solar activity, number of sunspots, amplitude forecast of the 25th cycle, Gnievyshev-Olya rule, minimum of the age cycle.

## LONG-TERM VARIATIONS OF MAGNETIC ACTIVITY OF THE SUN DURING THE HOLOCENE

Valery Krivodubskij – D. Sc., Senior Research Fellow

*The main law of the evolution of the Earth's climate is the cyclical nature of global changes in the latter. One of the possible explanations for the cyclical nature of global climate changes is provided by the astrophysical model of fluctuations in the insolation of the Earth's surface by solar radiation. Modern climate change is mainly associated with variations in the magnetic activity of the Sun, one of the main proxies of which are sunspots. The decrease in the number of sunspots coincides with the epochs of cooling on the Earth, while during the maximum number of sunspots warming is observed. The paper reviews cosmogenic reconstructions of long-term variations in the Sun's magnetic activity (large minima and large maxima) during the Holocene (last 12,000 years). The accidental appearance of large minima and maxima can to some extent be reproduced by modern models of a turbulent dynamo with a stochastic drive.*

*An important key to studying the impact of solar activity variations on the Earth's climate is the Maunder minimum (late 17th century), during which extremely little sunspots were observed. Applying the method of analysis of rare events to these observations led researchers to conclude that the appearance of sunspots at the Maunder minimum was characterized by a weak amplitude of 22 years. The concept of continuity of magnetic cycles at this time is also confirmed by measurements of cosmogenic radionuclides in natural terrestrial archives. Therefore, today it is believed that during the Maunder minimum, the cyclic magnetic activity of the Sun did not stop, although the amplitude of the cycles was quite low.*

*In the  $\alpha\Omega$ -dynamo model, this may be due to the fact that the magnitude of the magnetic induction of the toroidal field excited by radial differential rotation in the SCZ at this time did not reach the threshold value required for lifting magnetic power tubes on the solar surface (nonlinear dynamo mode).*

*A scenario for explaining the north-south asymmetry of magnetic activity during the Maunder minimum is proposed. A key role in the proposed scenario is played by the special nature of the internal rotation of the Sun, revealed as a result of helioseismological experiments.*

*The modern grand maximum of solar activity, which began in the 1940s, has ceased after solar cycle 23, and activity of the Sun seems to be returning to its normal moderate level.*

**Key words:** global climate changes of the Earth, sunspot cycles, magnetic fields of the Sun, cosmogenic proxies of solar activity, Maunder minimum, modern grand maximum, solar dynamo.

Science now has at its disposal reliable facts that the Earth's climate has repeatedly undergone radical global changes over different periods of time. The main regularity of the evolution of the Earth's climate is the cyclical nature of its global changes. The most important element of the climate that affects its other characteristics, primarily the temperature, is the radiant energy of the Sun. One of the possible explanations for the cyclicity of global climate