

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.01.065>

УДК 523.98

В. Г. Лозицький, В. М. Єфіменко

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
вул. Обсерваторна, 3, м. Київ, 04053
e-mail: lozitsky_v@ukr.net

Ранній прогноз максимуму 25-го циклу сонячної активності

На основі даних про 24 попередні сонячні цикли розглянуто статистичний зв'язок між швидкістю наростання числа сонячних плям на початковій фазі кривої росту (від 20-го до 29-го місяця циклу) і амплітудою циклу. Зроблено висновок, що максимальне згладжене число сонячних плям для 25-го циклу має дорівнювати $W_{max}(25) \approx 206$ одиниць у випадку, коли фаза росту буде монотонною, і $W_{max}(25) \approx 160$, якщо фаза росту буде немонотонною, з роздвоєною вершиною (як у 24-го циклу). Обидва випадки відповідають середньому по потужності сонячному циклу з виконанням правила Гнєвишева — Оля. При таких параметрах поточного циклу немає ознак наближення глибокого мінімуму вікового циклу в середині XXI ст.

ВСТУП

Сонячна активність — досить складне явище в атмосфері Сонця, яке має магнітну і детерміновано-стохастичну природу. На даний час надійних методів прогнозування сонячної активності ще не створено, хоча наукових праць на цю тему є досить багато. Із порівняння останніх прогнозів сонячної активності у новому, 25-му циклі, який розпочався у грудні 2019 року, впливає [9], що навіть найсучасніші методи прогнозування дають істотно різні результати. Наприклад, метод нейронної мережі [4] дає амплітуду 25-го циклу на рівні 57...91 одиниць, а атракторний аналіз — близько 103 одиниць. Для порівняння варто нагадати, що у попередньому 24-му циклі сонячна активність досягла 116 одиниць (у 2014 р.). При цьому вейвлет-аналіз [11]

прогнозує висоту максимуму 25-го циклу на рівні 132 одиниці, а метод внутрішніх передвісників [7] — 175 одиниць. Таким чином, в цілому ситуація з максимумом цього циклу, який очікується у 2024—2026 рр., залишається неясною. Однак точно такою ж була ситуація і раніше, коли прогнозувався попередній 24-й цикл сонячної активності [1, 2, 4, 8, 10—12].

Можна припустити, що ця відмінність прогнозів навряд чи свідчить про якісь недоліки методів, які були використані різними дослідниками. Скоріш за все вона свідчить про досить складну природу сонячної активності — їй властиві досить часті і несподівані т. зв. «фазові катастрофи» [12], при яких суттєво змінюються актуальні параметри коливних процесів сонячної активності (їхні періоди, амплітуди і фази). З огляду на це поточний 25-й цикл цікавий тим, що саме по ньому можна зробити висновок про наближення довгоочікуваного мінімуму вікового циклу сонячної активності, який випадає приблизно на середину 21-го століття. Автори щойно опублікованої роботи [13] зазначають, що великий сонячний мінімум має бути у циклах №№ 25...27.

Метою даної роботи є отримання прогнозованої оцінки висоти (максимуму) 25-го циклу, виходячи з швидкості наростання активності в кінці другого і на початку третього років цього циклу.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ ТА ЇХНІЙ АНАЛІЗ

Цикл № 25 почався у грудні 2019 р. (рис. 1). На травень 2022 р. пройшло уже 29 місяців від початку циклу, що становить приблизно 50 % тривалості кривої росту більшості сонячних циклів.

На рис. 1 представлено дані для нового, ревізованого ряду відносних чисел сонячних плям. Результати такої ревізії опубліковано у 2014 р. [5] за даними Міжнародного центру даних при Бельгійській королівській обсерваторії. Основні зміни полягають у тому, що за

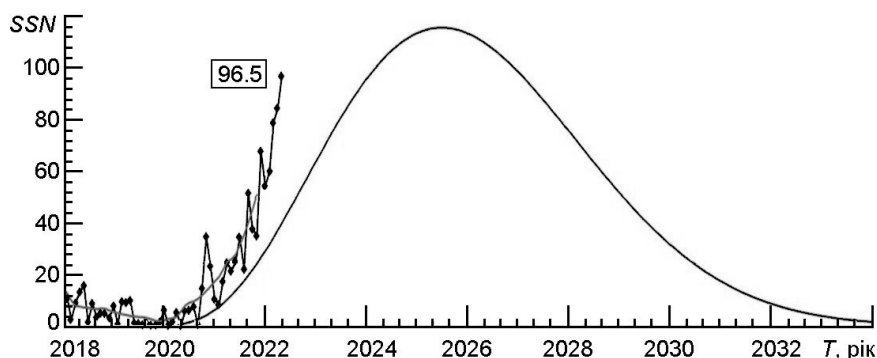


Рис. 1. Порівняння прогнозу числа SSN сонячних плям у 25-му циклі згідно з NOAA / Space Weather Prediction Center (суцільна плавна крива) з фактичними змінами середньомісячних значень (ромбики та плавна крива згладжених середньомісячних значень). Середньомісячне число сонячних плям за травень 2022 р. дорівнює 96.5

основу було взято спостережний ряд Альфреда Вольфера, а не Рудольфа Вольфа, що приблизно в 1.67 раза збільшує більш ранні значення, роблячи їх сумірними із сучасними оцінками. Крім того, були виправлені значення після 1947 р., коли М. Вальдмайєром 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.

З рис. 1 випливає, що фактичне наростання з часом числа сонячних плям відбувається значно швидше, ніж згідно з прогнозом. Такий сценарій означає, що число плям у максимумі має бути більшим від прогнозованого. Це число можна оцінити, виходячи з швидкості наростання числа плям з часом, як це було зроблено у нашій роботі [1]. У цій роботі ми використали 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.

Однак на травень 2022 р. вивпнилось лише 29 місяців 25-го циклу. Тому отримані в роботі [1] залежності не можуть бути використані для прогнозу максимуму 25-го циклу. У зв'язку з цим було побудовано нову залежність на основі даних сайту <http://www.solen.info/solar/>, у якій розглянуто вужчий часовий інтервал фази росту циклу — від 20-го до 29-го місяця. На рис. 2 за даними для 24 попередніх циклів представлено цю емпіричну залежність між параметрами $W = W_{29} - W_{20}$ та W_{\max} , де перший параметр — це приріст числа сонячних плям між 20-м і 29-м місяцями циклу, а другий — це згладжене число сонячних плям у максимумі циклу. Видно, що отримана таким чином залежність є досить неоднозначною, розсіяною, однак також очевидно, що вона є нелінійною і апроксимується поліномом 2-го степеня:

$$W_{\max} = 73.76 + 2.78 W - 0.01(W)^2 \quad (1)$$

Згідно з даними названого сайту $W = 61.2$. Слід зауважити, що на червень 2022 р. ще не було опубліковано згладжених чисел сонячних плям, тому використано середньомісячне значення на цей час. Це зроблено на тій підставі, що згідно з рис. 1 крива наростання серед-

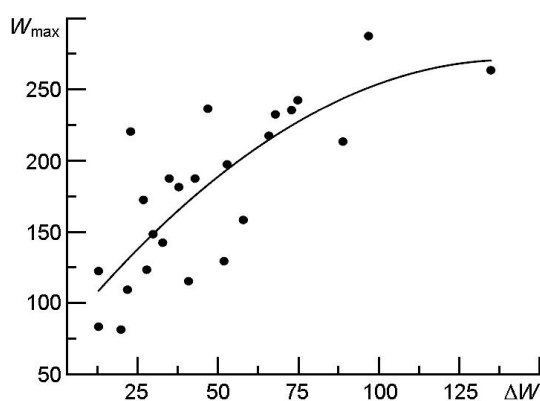


Рис. 2. Емпірична залежність між параметрами $W = W_{29} - W_{20}$ та W_{\max} (див. текст)

ньомісячних значень є дуже стрімкою і гладкою. У такому випадку згладжені значення мають бути близькими до середньомісячних.

Відповідно до формули (1) при $W = 61.2$ маємо $W_{\max}(25) = 206$ при ймовірній похибці цього значення ± 30 одиниць. Незважаючи на велику похибку, можна зробити такі висновки.

Очевидно, що у циклах №№ 24...25 має виконатись правило Гневишева — Оля [6], згідно з яким непарний цикл має бути на 10...50 % потужнішим, ніж попередній парний цикл (рис. 3). Найсуттєвіше відхилення від цього правила спостерігалось у циклах №№ 4 і 5, а менш значне — у парі циклів №№ 22 і 23. Якби правило Гневишева — Оля порушилось також у циклах №№ 24 і 25, то це було б подвійне (двічі підряд) порушення цього правила, чого досі не спостерігалось.

Слід, однак, врахувати, що наведений прогноз 25-го циклу базується на початковій кривій фази росту циклу, яка, як видно з рис. 1, є монотонною, гладкою. Водночас в останніх трьох циклах максимуми були двогорбими, особливо у попередньому 24-му циклі. Чого можна очікувати, якщо і в 25-му циклі фаза росту буде немонотонною, подібно до циклу № 24?

Нагадаємо, що перші 20 місяців розвитку 24-го циклу активність не перевищувала 20 одиниць (у старій системі), що обіцяло досить слабкий цикл. Однак починаючи з 24-го місяця циклу загальна картина розвитку активності помітно змінилась: кількість плям почала швидко наростати, і такий ріст активності продовжувався до 32-го місяця. Після цього активність зростала повільніше і досягла максимуму близько 67 одиниць на 38-му місяці циклу (у березні 2012 р.). Після цього число плям дещо зменшилось і надалі впродовж 43...52

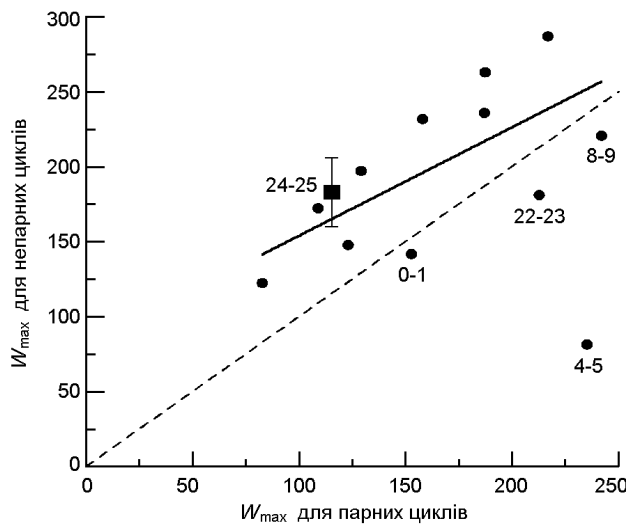


Рис. 3. Зіставлення фактичних амплітуд W_{\max} для парних і непарних циклів (точки). Суцільна пряма — лінія регресії, проведена по всіх парах циклів, за винятком циклів №№ 4...5. Штрихова пряма — лінія рівних значень W_{\max} для парних і непарних циклів. Квадратик — найімовірніший прогноз для циклів 24-25 та його межі при переході від випадку монотонної кривої фази росту до немонотонної. Цифри 0-1, 4-5, 8-9, 22-23 і 24-25 — номери пар сонячних циклів

місяців циклу майже не змінювалось, перебуваючи у межах 58...60 одиниць.

В роботі [1] було показано, що якщо виходити з найкрутішої ділянки росту активності у попередніх циклах, яка в середньому відповідає проміжку часу між 20-м і 32-м місяцями циклу, то прогнозоване згладжене число плям у максимумі циклу № 24 має бути 105...120 одиниць. На основі аналізу саме максимальної середньорічної швидкості зростання активності на фазі росту циклу у роботі [2] у 2012 р. отримано оцінку $W_{\max}(24) = 104 \pm 12$, що чудово узгоджується з нашим прогнозом у роботі [1] ($W_{\max}(24) = 105 \pm 11$), опублікованим також у 2012 р.

Пізніше, врахувавши немонотонність кривої росту 24-го циклу, ми уточнили оцінку до $W_{\max}(24) = 73 \pm 10$ [8]. Остаточний результат для цього циклу згідно з спостереженнями становить $W_{\max}(24) = 82$. Таким чином, ранній прогноз на основі початкової (монотонної) ділянки фази росту був завищений майже на третину.

Якщо цей критерій застосувати до поточного циклу № 25, то виходить, що при умові немонотонності його фази росту (тобто, при роздвоєній вершині) він повинен досягти $W_{\max}(25) \approx 160$ одиниць (у новій системі). Це значення ще краще узгоджується з правилом Гневишева — Оля (рис. 3) і дуже добре узгоджується з прогнозом М. І. Пішкало, запропонованим ще у 2014 р., згідно з яким $W_{\max}(25) \approx 167$ [3]; близький прогноз опублікований також і в його роботі [10].

Таким чином, найімовірніше, що поточний цикл № 25 буде середнім за потужністю циклом, з максимальним згладженим числом сонячних плям у межах 160...206 одиниць (у новій системі). Це означає, що цикл № 25 не показує ніяких ознак наближення глибокого вікового циклу (типу мінімуму Маундера), який за деякими прогнозами має бути в середині XXI ст.

ВИСНОВКИ

На основі розгляду початкової монотонної ділянки фази росту 25-го циклу, яка відповідає проміжку часу від 20-го до 29-го місяця циклу, можна зробити висновок, що максимальне згладжене число сонячних плям має бути $W_{\max}(25) \approx 206$ одиниць у випадку, коли фаза росту буде монотонною, чи $W_{\max}(25) \approx 160$, якщо фаза росту буде немонотонною, з роздвоєною вершиною (як у 24-го циклу). Обидва випадки відповідають середньому по потужності сонячному циклу, з виконанням правила Гневишева — Оля. При таких параметрах поточного циклу немає ознак наближення глибокого мінімуму вікового циклу в середині XXI ст.

ПОДЯКИ

Автори вдячні рецензентам за низку слушних зауважень. Це дослідження було профінансоване Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, тема №22БФ023-03.

1. Лоziцький 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.
2. Наговицын Ю. А., Кулешова А. И. Соотношение Вальдмайера и ранняя диагностика величины максимума текущего цикла солнечной активности. *Астрон. журн.* 2012. 89, № 10. С. 883—887.
3. Пішкало М. І. Попередній прогноз максимуму 25-го циклу сонячної активності. *Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія*. 2014. Вип. 51. С. 36—38.
4. Attia A. F., Ismail H. A., Basurah H. M. A neuro-fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25. *Astrophys. and Space Sci.* 2013. 344. P. 5—11. <https://doi.org/10.1007/s10509-012-1300-6>
5. 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. 186, Iss. 1-4. P. 35—103.
6. Gnevyshev M. N. Essential features of the 11-year solar cycle. *Solar Phys.* 1977. 51. P. 175—183.
7. Li K. J., Feng W., Li F. Y. Predicting the maximum amplitude of solar cycle 25 and its timing. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2015. 135. P. 72—76. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.010>
8. Lozitsky V. G., Efimenko V. M. Prognoses and anomaly of 24th cycle of solar activity. *Odessa Astron. Publs.* 2014. № 2. P. 90—91.
9. Petrovay K. Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 2020. 17, art. 2. <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>.
10. Pishkalo M. I. Prediction of solar cycle 24 using sunspot number near the cycle minimum. *Solar Phys.* 2014. 289. Iss. 5. P. 1815—1829.
11. 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. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2011. 73(11-12). P. 1294—1299. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.005>
12. Tsurulnik L. B., Kuznetsova T. V., Oraevsky V. N. Forecasting the 23rd and 24th solar cycles on the basis of MGM spectrum. *Adv. Space Res.* 1997. 20. P. 2369—2372.
13. Zharkova V. V., Shepherd S. J. Eigenvectors of solar magnetic field in cycles 21-24 and their links to solar activity indices. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. 512. Iss. 4. P. 5085—5099.

REFERENCES

1. Lozitsky V., Efimenko V. (2012) Development of solar activity in the 24th cycle: a scenario of the 15th cycle? *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univer. Kyiv. Astron.* 49. 47—50.
2. Nagovitsyn Yu. A., Kuleshova A. I. (2012) The Waldmeier relation and early diagnostics of the magnitude of the maximum of the current cycle of solar activity. *Astronomy Reports*. 89(10). 883—887.
3. Pishkalo M. I. (2014) Preliminary forecast of maximum of 25th cycle of solar activity. *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univer. Kyiv. Astron.* 2014. 51. 36—38.

4. Attia A. F., Ismail H. A., Basurah H. M. (2013) A neuro-fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25. *Astrophys. and Space Sci.* 344. 5—11.
<https://doi.org/10.1007/s10509-012-1300-6>
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(1-4). 35—103.
6. Gnevyshev M. N. (1977) Essential features of the 11-year solar cycle. *Solar Phys.* 51. 175—183.
7. Li K. J., Feng W., Li F. Y. (2015) Predicting the maximum amplitude of solar cycle 25 and its timing. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 135. 72—76.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.010>
8. Lozitsky V. G., Efimenko V. M. (2014) Prognoses and anomaly of 24th cycle of solar activity. *Odessa Astron. Publs.* 2. 90—91.
9. Petrovay K. (2020) Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 17(2).
<https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>.
10. Pishkalo M. I. (2014) Prediction of solar cycle 24 using sunspot number near the cycle minimum. *Solar Phys.* 289(5). 1815—1829.
11. Rigozo N. R., Souza Echer M. P., Evangelista H., Nordemann D. J. R., Echer E. (2011) Prediction of sunspot number amplitude and solar cycle length for cycles 24 and 25. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 73(11-12). 1294—1299.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.005>
12. Tsurulnik L. B., Kuznetsova T. V., Oraevsky V. N. (1997) Forecasting the 23rd and 24th solar cycles on the basis of MGM spectrum. *Adv. Space Res.* 20. 2369—2372.
13. Zharkova V. V., Shepherd S. J. (2022) Eigenvectors of solar magnetic field in cycles 21-24 and their links to solar activity indices. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 512(4). 5085—5099.

Lozitsky V. G., Efimenko V. M.

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine

EARLY FORECAST OF MAXIMUM OF 25th CYCLE OF SOLAR ACTIVITY

On a base of data for 24 previous cycles of solar activity, statistical connection was considered between sunspot number on grown phase of solar cycle (from 20 to 29 months of cycle) and its amplitude. It was concluded, that amplitude of 25th cycle should be $W_{\max}(25) = 206$ units in case when whole grown phase of cycle will be monotonous and $W_{\max}(25) = 160$, if grown phase will non-monotonous, with splitted top similar to 24th cycle. Both cases correspond to a moderate cycle, in good accordance with Gnevyshev-Ohl rule. Taking into account such parameters of current 25th cycle, we can conclude that no evidences are about deep coming minimum of solar activity in secular cycle in middle part of 21st century.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2022

Після доопрацювання 19.07.2022

Прийнята до друку 12.10.2022