

УДК 523.98

В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук,
В. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРОГНОЗ МАКСИМУМУ 25-ГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ ДАНИХ ПРО ШВИДКІСТЬ НАРОСТАННЯ КІЛЬКОСТІ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ

На основі даних про 24 попередні сонячні цикли, розглянуто статистичний зв'язок між швидкістю наростання кількості сонячних плям на фазі кривої зростання й амплітудою циклу. Виявилось, що результат прогнозування амплітуди циклу залежить від того, яку ділянку кривої зростання циклу взяти за основу для прогнозування, а також від того, брати до уваги всі 24 цикли чи лише непарні. На результат прогнозування впливає також початкове припущення про монотонність чи немонотонність фази зростання активності. Зроблено висновок, що, найімовірніше, максимальна згладжена кількість сонячних плям у 25-му циклі має дорівнювати 185 ± 18 одиниць у новій системі, що відповідає середньому за потужністю сонячному циклу, з виконанням правила Гнєвишева – Оля. За таких параметрів цього циклу, немає ознак наближення глибокого мінімуму вікового циклу в середині XXI ст.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, кількість сонячних плям, прогноз амплітуди 25-го циклу, правило Гнєвишева – Оля, мінімум вікового циклу.

Вступ. Сонячна активність – досить складне явище в атмосфері Сонця, яке має магнітну природу і циклічний характер змін із часом. Найбільш відомим і помітним є 11-річний цикл сонячної активності, хоча існують також інші цикли, зокрема 22-річний, 44-річний, а також віковий цикл тривалістю 70–100 років. Серед фахівців найбільшу увагу приділяють прогнозуванню 11-річного циклу, оскільки саме із цим циклом пов'язано найбільш значні зміни в навколоземному космічному просторі й геосфері. Нині надійних методів прогнозування сонячної активності ще не створено, хоча наукових праць на цю тему досить багато. Порівняння останніх прогнозів сонячної активності у новому 25-му циклі, який розпочався у грудні 2019 року, наведено в роботі Petrovay [9]. Із цього порівняння випливає, що навіть найсучасніші методи прогнозування дають істотно відмінні 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 в попередньому 24-му циклі сонячна активність досягла 116 одиниць (у 2014 р.). Причому вейвлет-аналіз [11] прогнозує висоту максимуму 25-го циклу на рівні 132 одиниць, а метод внутрішніх передвісників [7] – на рівні 175 одиниць. Отже, в цілому ситуація з максимумом цього циклу, який очікується у 2024–2026 рр., залишається незрозумілою. Однак точно такою ж була ситуація і раніше, коли прогнозувався попередній 24-й цикл сонячної активності [1, 4, 8, 10–12].

Поточний 25-й цикл повертає до себе увагу тим, що саме по ньому можна дійти висновку про наближення довгоочікуваного мінімуму вікового циклу сонячної активності, який випадає приблизно на середину XXI ст. Автори щойно опублікованої роботи [13] зазначають, що віковий сонячний мінімум має бути у циклах № 25–27.

Метою цієї роботи є отримання прогнозованої оцінки амплітуди 25-го циклу з урахуванням швидкості наростання кількості сонячних плям на фазі зростання цього циклу.

Спостережені дані та їхній аналіз. Цикл № 25 розпочався у грудні 2019 р. (рис. 1). На цьому рисунку зображено дані для нового, ревізованого ряду відносних чисел сонячних плям. Результати такої ревізії опубліковано 2014 р. [5] за даними Міжнародного центру даних при Бельгійській королівській обсерваторії. Основні зміни полягають у тому, що взято за основу спостережний ряд А. Вольфера, а не Р. Вольфа, що приблизно в 1,67 рази збільшує більш ранні значення, роблячи їх сумірними із сучасними оцінками. Крім того, були виправлені значення після 1947 р., коли М. Вальдмаєром для визначення відносної кількості сонячних плям було введено вагові коефіцієнти відповідно до розміру плям. Також знайдено й усунуто змінний тренд у спостереженнях обсерваторії Локарно, яка була реперною обсерваторією після 1980 р.

З рис. 1 випливає, що фактичне збільшення із часом кількості сонячних плям відбувається помітно швидше, ніж за прогнозом NOAA / Space Weather Prediction Center. Такий сценарій означає, що кількість плям у максимумі має бути більшою за прогнозовану. Це число можна оцінити, враховуючи швидкість наростання числа плям із часом, як це зроблено в [1]. У цій роботі використано як вхідний параметр приріст числа сонячних плям з 20-го по 32-й місяці циклу, і на основі побудованої кореляційної залежності для попередніх 23-х циклів був розрахований прогноз максимуму 24-го циклу. Оскільки весь аналіз у цій роботі зроблено на основі даних про число сонячних плям у старій системі, необхідно було перевірити ці результати за новими даними. Крім того, важливо встановити, чи змінюється прогноз за зміни ширини базового інтервалу вхідних даних, а також у разі розміщенні його на різних ділянках кривої фази зростання циклу. Тому побудовано нові кореляційні залежності на основі даних сайту <http://www.solen.info/solar/>.

Залежність між середньомісячною швидкістю наростання кількості 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} зображено на рис. 2, побудованому на основі даних за 24 попередні сонячні цикли. Тут заповненими кружечками подано емпіричні дані, а прямою – апроксимуючу залежність, яка представляє усереднений хід спостережних даних (знайдена методом найменших квадратів) і описується формулою

$$W_{\max} = 17,9 (\Delta W/\Delta T)_{15-32} + 86,17. \quad (1)$$

Для поточного 25-го циклу $(\Delta W/\Delta T)_{15-32} = 4,5$. Тоді, згідно з (1), $W_{\max}(25) = 166,7$, що значно вище, ніж за деякими прогнозами [9]. На рис. 2 емпіричне значення, позначене цифрою 9, означає відповідну величину для 9-го циклу, яка найбільше відхиляється від апроксимації (1).

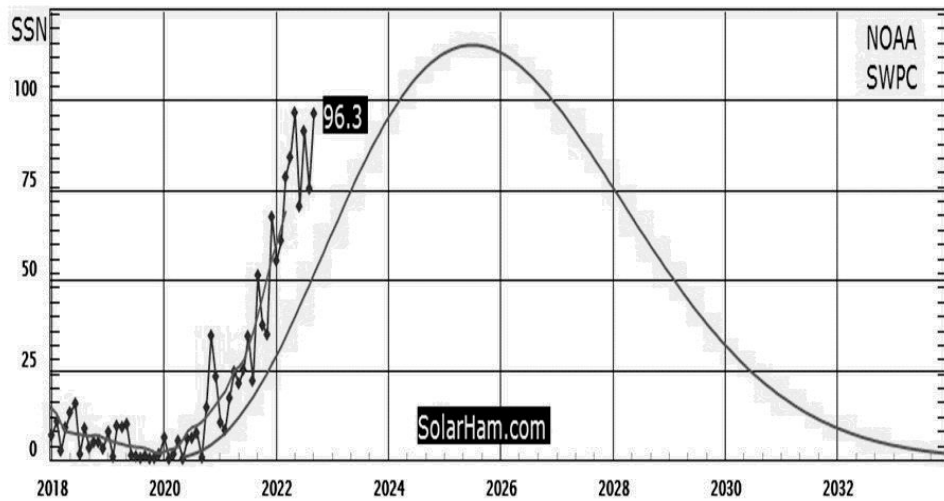


Рис. 1. Порівняння прогнозу кількості сонячних плям у 25-му циклі згідно з NOAA / Space Weather Prediction Center (суцільна плавна крива) з фактичними змінами середньомісячних значень (ромби), а також згладжених значень, які представлені пивною кривою, побудованою по середньомісячних значеннях. На осі ординат SSN показано кількість плям (sunspot number). Цифра 96,3 означає середньомісячну кількість сонячних плям за серпень 2022 р.

Виявилось, що під час звуження тестового інтервалу величина W_{max} суттєво змінюється (рис. 3). Так, якщо замість інтервалу 15–32 місяці взяти інтервал 27–32 місяці від початку циклу, то матимемо значно більш розсіяну залежність, яка апроксимується виразом

$$W_{max} = 15.81 (\Delta W/\Delta T)_{27-32} + 103,55. \tag{2}$$

Оскільки для 25-го циклу $(\Delta W/\Delta T)_{27-32} = 5,87$, то згідно з (2) маємо $W_{max}(25) = 196,4$. Отже, прогнозоване значення $W_{max}(25)$ у цьому випадку на 20 одиниць більше, ніж для інтервалу 15–32. Крім того, з рис. 3 видно, що емпіричне значення для 24-го циклу найбільше відхиляється від лінійної залежності (2). Це відображає "аномальний" тип 24-го циклу – те, що він мав немонотонну фазу росту і роздвоєну вершину, унаслідок чого його амплітуда $W_{max}(24)$ виявилась значно меншою, ніж це впливало із швидкості наростання сонячної активності у проміжку 27–32 місяців від початку циклу.

Оскільки 25-й цикл є непарним, цікаво розглянути лише непарні цикли. Відповідний розгляд (рис. 4) показує, що тоді рівняння регресії таке:

$$W_{max} = 13,85 (\Delta W/\Delta T)_{27-32} + 122,88. \tag{3}$$

Із цього рівняння випливає, що для $(\Delta W/\Delta T)_{27-32} = 5,87$ маємо $W_{max}(25) = 204,2$. Таким чином, прогноз стає ще вищим, наближаючись за величиною до класу потужних сонячних циклів.

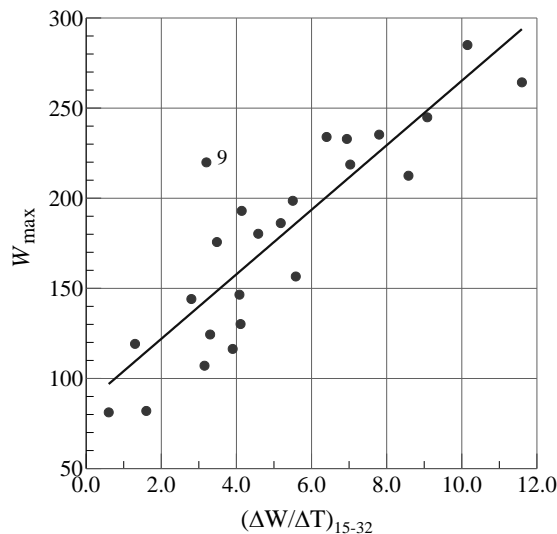


Рис. 2. Емпірична залежність між параметрами W_{max} та $(\Delta W/\Delta T)_{15-32}$. Із цієї залежності випливає, що $W_{max}(25) = 166,7$

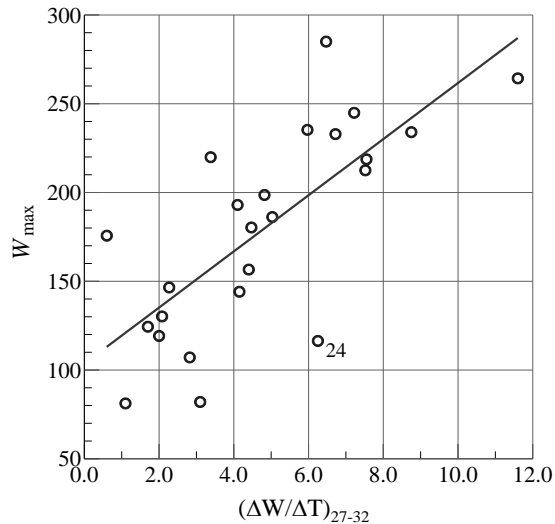


Рис. 3. Емпіричну залежність між параметрами W_{\max} та $(\Delta W/\Delta T)_{27-32}$, зображено на рисунку чорними кільцями. Прямою лінією представлено регресійну залежність (2), яка показує усереднений хід спостережних даних, знайдений методом найменших квадратів. Із цієї залежності випливає, що оскільки для 25-го циклу $(\Delta W/\Delta T)_{27-32} = 5,87$, то прогнозне значення $W_{\max}(25) = 196,4$

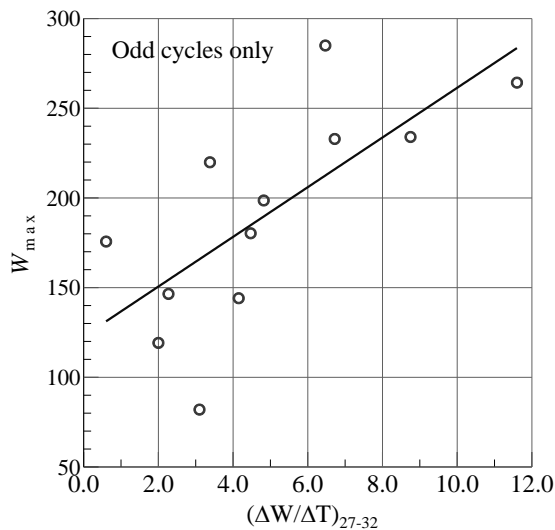


Рис. 4. Те саме, що і на рис. 3, але лише для непарних циклів. З регресійної залежності (3), зображеної на цьому рисунку прямою лінією, випливає, що прогнозне значення $W_{\max}(25) = 204,2$

На основі цього розгляду можна дійти висновку, що активність у сонячному циклі № 25 поступово "розганяється" – з наближенням до максимуму циклу (тобто в період 27–32 місяців циклу) її зростання відповідає потужнішому циклу, ніж на більш ранній фазі кривої зростання, що відповідає розширеному інтервалу у 15–32 місяці. Основне питання, яке у цьому випадку виникає, таке: вказане прискорене зростання активності й надалі зберігатиметься, чи він, подібно до попереднього 24-го циклу, зміниться сповільненим ростом?

Для пошуку відповіді на це питання розглянуто розподіл сонячних циклів за середньомісячною швидкістю зростання для інтервалів 15–32, 21–32, 27–32 місяців передісторії (табл. 1). Із цієї таблиці випливає, що цикл № 25 потрапляє у найчисленнішу групу циклів ($\approx 50\%$), в якій середньомісячна швидкість зростання кількості сонячних плям перебуває в межах 3–6 одиниць щомісяця в усіх 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 зазначимо, що цей останній період розвитку активності у 25-му циклі вже відбувається за іншим сценарієм, ніж у 24-му циклі. Можливо, це вказує на те, що подальший розвиток активності у поточному 25-му циклі і надалі буде йти за сценарієм, відмінним від попереднього 24-го циклу.

З наведеного вище розгляду випливає, що ймовірна амплітуда активності у 25-му циклі має перебувати у межах приблизно 167–204 одиниці, що можна записати так: $W_{\max}(25) = 185 \pm 18$ од. Отже, у циклах № 24–25 має виконатись правило Гневишева – Оля [6], згідно з яким непарний цикл має бути приблизно на 10–50 % потужніший, ніж попередній парний цикл (рис. 5). На цьому рисунку суцільною прямою подано лінію регресії, проведена по всіх парах циклів, за винятком циклів № 4–5. Штрихова пряма – лінія рівних значень W_{\max} для парних і непарних циклів. Чорний квадратик і вертикальний інтервал показують найімовірніший прогноз за даними представленої роботи, а

також межі прогнозу у процесі переходу від випадку монотонної кривої фази зростання до немонотонної. Цифрами 0–1, 4–5, 8–9, 22–23 і 24–25 позначено ті номери пар сонячних циклів, яких стосується спостережене або прогнозоване значення на рисунку. Видно, що найсуттєвіше відхилення від названого правила – у циклах № 4–5, а менш значне – у попередній парі циклів № 22–23. Якби правило Гнєвишева – Оля порушилося також у циклах № 24–25, то це було б подвійне (двічі підряд) порушення цього правила, що досі не спостерігалось.

Таблиця 1

Розподіл циклів за середньомісячною швидкістю зростання для інтервалів передісторії 15–32, 21–32, 27–32 місяців

Інтервал швидкостей (одиниці чисел Вольфа)		Інтервал передісторії (місяці)		
		15–32	21–32	27–32
0–3	Кількість n	4	5	7
	Номери циклів	1, 5, 6, 7	5, 6, 7, 12, 15	6, 7, 12, 13, 14, 15, 16
3–6	Кількість n	13	11	10
	Номери 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	Кількість n	5	5	7
	Номери циклів	4, 11, 18, 21, 22	4, 11, 18, 20, 21	8, 11, 18, 19, 21, 22, 24
9–12	Кількість n	3	4	1
	Номери циклів	3, 8, 19	3, 8, 19, 22	3

Хоча на основі розгляду табл. 1 уявляється більш імовірним, що подальший розвиток активності у поточному 25-му циклі не відбуватиметься за сценарієм 24-го циклу, варто розглянути наслідки також цього менш імовірного сценарію. 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 таке зростання активності продовжувалося 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 кількість плям дещо зменшилась і надалі впродовж 43–52 місяців циклу майже не змінювалось, перебуваючи в межах 58–60 одиниць.

У роботі [1] показано таке: якщо виходити з найбільш крутої ділянки зростання активності в попередніх циклах, яка, у середньому, відповідає проміжку часу між 20 і 32 місяцями циклу, то прогнозована згладжена кількість плям у максимумі циклу № 24 має бути 105–120 одиниць. З урахуванням саме максимальної середньорічної швидкості зростання активності на фазі зростання циклу, Наговіцин і Кулешова [2] зробили 2012 р. висновок, що $W_{\max}(24) = 104 \pm 12$, що чудово узгоджується з прогнозом авторів у роботі [1] ($W_{\max}(24) = 105 \pm 11$), опублікованим також у 2012 р.

Пізніше, з урахуванням немонотонності кривої зростання 24-го циклу, автори роботи [8] дійшли висновку, що має бути $W_{\max}(24) = 73 \pm 10$. Остаточний результат щодо цього циклу згідно із спостереженнями $W_{\max}(24) = 82$. Отже, ранній прогноз на основі початкової (монотонної) ділянки фази зростання був завищений на $\approx 30\%$.

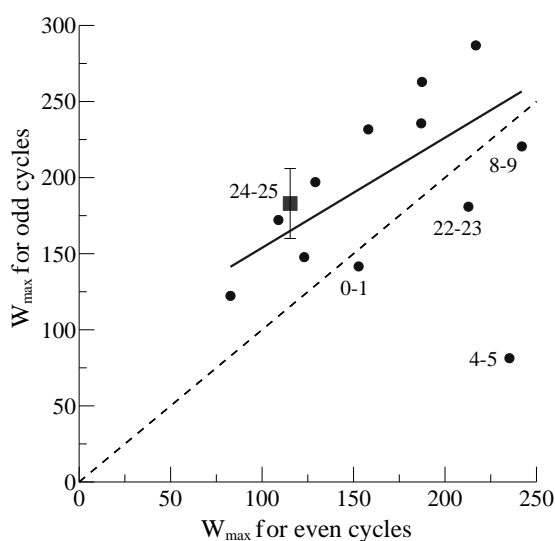


Рис. 5. Зіставлення фактичних амплітуд W_{\max} для парних (even) і непарних (odd) циклів (показано заповненими кружками)

Якщо цей критерій застосувати до поточного циклу № 25, то бачимо, що за умови немонотонності його фази зростання (тобто при роздвоєній вершині – як у 24-му циклі), він повинен мати $W_{\max}(25) \approx 130$ одиниць у новій системі. Це значення дещо гірше узгоджується з правилом Гневишева – Оля (рис. 5), а також із прогнозом М. І. Пішкало, згідно з яким $W_{\max}(25) \approx 167$ [3]; близький прогноз цього автора опубліковано і в роботі [10]. Однак варто ще раз зазначити, що цей прогноз ($W_{\max}(25) \approx 130$) уявляється менш надійним – це випливає, як показано вище, з аналізу даних табл. 1. Отже, імовіріше, що поточний цикл № 25 буде середнім за потужністю циклом, для якого $W_{\max}(25) = 185 \pm 18$.

Висновки. Згідно з даними про 24 попередні сонячні цикли, які стосуються статистичного зв'язку між швидкістю наростання кількості сонячних плям $\Delta W/\Delta T$ на фазі кривої зростання й амплітудою циклу W_{\max} , максимальна згладжена кількість сонячних плям у 25-му циклі $W_{\max}(25)$ очікується на рівні 185 ± 18 у новій системі, що відповідає середньому за потужністю сонячному циклу, з виконанням правила Гневишева – Оля. Оцінка $W_{\max}(25)$ залежить від того, яку ділянку кривої фази зростання циклу взяти за основу для прогнозування, а також від того, чи брати до уваги всі 24 цикли, чи лише непарні. На результат прогнозування впливає також початкове припущення про монотонність чи немонотонність фази росту. Порівняння швидкостей наростання кількості сонячних плям на різних ділянках фази зростання різних циклів (табл. 1) показує, що поточний цикл № 25 не виявляє ранніх ознак немонотонності зростання, подібних до спостережених у 24-му циклі. Якщо ця тенденція збережеться, фактичне значення $W_{\max}(25)$ буде на верхній межі зазначеного інтервалу вірогідних значень. За таких параметрів 25-го циклу немає ознак наближення глибокого мінімуму вікового циклу в середині XXI ст.

Подяка. Це дослідження профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, тема № 22БФ023-03.

Список використаних джерел

1. 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.
2. 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.
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. (2013) A neuro-fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25 // Astrophysics and Space Science. – 2013. – Vol. 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. – Vol. 186, Iss. 1-4. – P. 35–103.
6. Gnevyshev M. N. Essential features of the 11-year solar cycle // Solar Physics. – 1977. – Vol. 51. – P. 175–183.
7. 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. <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 Astronomical Publications. – 2014. – Vol. 27, No.2. – P. 90–91.
9. Petrovay K. Solar cycle prediction // Living Review Sol. Phys. 2020, Vol. 17, art. No.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. – Vol. 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 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2011. – Vol. 73(11–12). P. 1294–1299. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.005>
12. Tsiirulnik 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.
13. 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.

Надійшла до редколегії 04.10.2022

V. Efimenko, PhD,
V. Lozitsky, Dr Hab.,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

FORECAST OF THE MAXIMUM 25TH CYCLE OF SOLAR ACTIVITY BASED ON DATA ON THE RATE OF INCREASE IN THE NUMBER OF SUNSPOTS

Based on data on 24 previous 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 of the cycle was considered. It turned out that the result of forecast of cycle amplitude depends on which section of the growth curve is taken as a basis for forecasting, as well as whether all 24 cycles are taken into account, or only the odd ones. The prediction result is also affected by the initial assumption about monotonicity or non-monotonicity of the growth phase. It was concluded that, most likely, the maximum smoothed number of sunspots in the 25th cycle should be equal to 185 ± 18 units in the new system, which corresponds to the average power of the solar cycle, with the implementation of the Gnevyshev-Ohl rule. With such parameters of this cycle, there are no signs of approaching the deep minimum of the age cycle in the middle of the 21st century.

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