

ОПТИМАЛЬНИЙ ІНТЕРВАЛ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗРОСТАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ ДЛЯ ПРОГНОЗУ 25-ГО ЦИКЛУ

В. М. Єфіменко^{ORCID}, В. Г. Лозицький^{ORCID}

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
e-mails: efim@knu.ua, vsevolod.lozitsky@knu.ua

(Отримано 24 липня 2023 р.; в остаточному вигляді — 12 серпня 2023 р.; прийнято до друку — 18 серпня 2023 р.;
опубліковано онлайн — 04 вересня 2023 р.)

На основі даних про 24 попередні сонячні цикли розглянуто статистичний зв'язок між швидкістю збільшення кількості сонячних плям на початковій фазі кривої зростання (до 35-го місяця від початку циклу) і амплітудою циклу. Знайдено, що максимальна згладжена кількість сонячних плям для 25-го циклу залежить від інтервалу, який використовують для визначення швидкості збільшення кількості сонячних плям на фазі зростання циклу, і є в межах $W_{\max}(25) \approx 140 - 170$ одиниць. При цьому статистична оцінка відхилення точок від лінійної залежності (коефіцієнт Пірсона) становить $r = 0.35 - 0.91$ (максимальне значення $r = 0.91$ для інтервалу 11–35 місяців). Також оцінено амплітуду 25 циклу активності з урахуванням швидкості спаду активності попереднього циклу; вона дорівнює ≈ 150 одиниць ($r = 0.73$) і є в межах отриманої амплітуди для фази наростання циклу. Отримано статистичну залежність тривалості фази зростання циклу від швидкості збільшення кількості сонячних плям. Максимум циклу очікується в інтервалі листопад 2024 р.–січень 2025 р.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, кількість сонячних плям, прогнози, максимум 25-го циклу.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.27.3901>

I. ВСТУП

Сонячна активність — складне явище в атмосфері Сонця, яке має магнітну й детерміновано-стохастичну природу. На сьогодні надійних методів прогнозування сонячної активності ще не створено, хоча наукових праць на цю тему є досить багато. Порівняння останніх прогнозів сонячної активності в новому 25-му циклі, який розпочався в грудні 2019 року, наведено в роботі [1]. Із цього порівняння випливає, що навіть найсучасніші методи прогнозування дають істотно різні результати. Наприклад, метод нейронної мережі [2] дає амплітуду 25-го циклу на рівні 57–91 одиниць, а атракторний аналіз — близько 154 одиниці [3]. Для порівняння нагадаємо, що в попередньому 24-му циклі сонячна активність досягла 116 одиниць (у 2014 році). Отже, загалом ситуація з максимумом цього циклу, який очікується в 2024–2026 роках, неоднозначна. Зазначимо, що подібне становище виникало під час наближення до майже кожного наступного максимуму сонячного циклу [4, 5, 7, 8, 11–16].

Можна припустити, що ця відмінність прогнозів не вказує на якісь недоліки методів, які використали різні автори. Імовірніше, вона свідчить про досить складну природу сонячної активності — їй властиві доволі часті й несподівані т.зв. “фазові катастрофи” [15], за яких суттєво змінюються актуальні параметри коливних процесів сонячної активності (їхні періоди, амплітуди й фази). Із цього погляду, поточний 25-й цикл повертає до себе увагу тим, що саме з нього деякі дослідники прогнозують настання мінімуму вікового циклу сонячної активності, який випадає приблизно на середину 21-го століття. Автори щойно опублікованої роботи [16] зазначають, що великий сонячний мінімум має бути в циклах №№ 25–27.

Як відомо, фазу зростання циклу сонячної активності та його амплітуду описують ефектом Вальдмайера [6], суть якого полягає в тому, що амплітуда циклу лінійно залежить від середньої швидкості зростання його активності на цій фазі. При цьому знайдено, що прогнозована амплітуда циклу залежить від інтервалу передісторії, який враховують для обчислення середньої швидкості зростання циклу [12].

Метою цієї роботи є визначити оптимальний інтервал під час обчислення середньої швидкості зростання сонячної активності в 11-річному циклі для уточнення прогнозованої оцінки амплітуди 25-го циклу.

II. СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Цикл №25 розпочався в грудні 2019 р. (рис. 1). На червень 2023 р. минуло вже 42 місяці від початку циклу, що становить приблизно 70% тривалості кривої зростання більшості сонячних циклів.

На рис. 1 наведено дані для нового, ревізованого ряду відносної кількості сонячних плям. Результати такої ревізії опубліковані в 2014 р. [9] за даними Міжнародного Центру Даних при Бельгійській Королівській Обсерваторії. Основні зміни полягають у тому, що взято за основу 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. Вальдмайер, визначаючи відносну кількість сонячних плям, увів 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 з часом кількості сонячних плям відбуваються значно швидше, ніж за прогнозом. Такий сценарій означає, що кількість плям у максимумі має бути більшою від прогнозованої. Цю кількість можна оцінити на основі швидкості зростання кількості сонячних плям із часом, як це було зроблено в роботі [4]. У ній автори використовували як вхідний параметр приріст кількості сонячних плям від 20-го до 32-го місяця циклу й на основі побудованої кореляційної залежності для попередніх 23 циклів прогнозували максимум 24-го циклу.

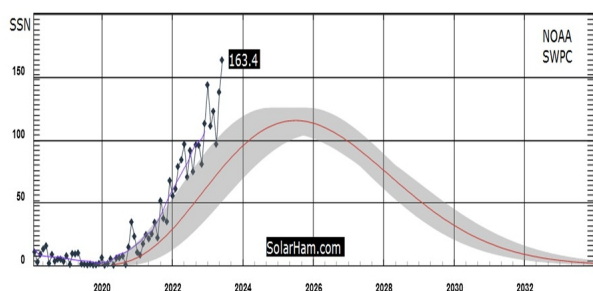


Рис. 1. Порівняння прогнозу кількості сонячних плям у 25-му циклі згідно з NOAA / Space Weather Prediction Center (плавна червона крива й сіра смуга, яка відображає межі похибок) з фактичними змінами середньомісячних значень (ромби), а також згладжених значень, які показані пивною кривою, проведеною по середньомісячних значеннях. Вісь ординат підписана як SSN і означає кількість плям (sunspot number). Цифра 163.4 означає середньомісячну кількість сонячних плям за червень 2023 р.
 Fig. 1. Comparison of the NOAA / Space Weather Prediction Center sunspot number forecast in the 25th cycle (smooth red curve and gray bar showing error limits) with actual changes in monthly mean values (diamonds) as well as smoothed values, which are shown by the smooth curve drawn on average monthly values. The ordinate axis is labeled as SSN, which stands for sunspot number indicating the number of spots. The number 163.4 means the average monthly number of sunspots for June 2023

Для пошуку оптимального інтервалу передісторії (який дає змогу отримати кращий прогноз наступного циклу) були побудовані емпіричні залежності на основі даних сайту <http://www.solen.info/solar/> (рис. 2–6).

На рис. 2, за даними для 24 попередніх циклів, показано емпіричну залежність між параметрами $\Delta W/\Delta T$ та W_{\max} , де перший параметр — це середньомісячний приріст кількості сонячних плям в інтервалі від 1 до 10-го місяця циклу, а другий — це згладжена кількість сонячних плям у максимумі циклу. Із рисунка видно, що отримана таким способом залежність досить неоднозначна, розсіяна. Ці дані були апроксимовані лінійною залежністю:

$$W_{\max} = 142.04 + 28.39 \times (\Delta W/\Delta T). \quad (1)$$

Згідно з даними для 25-го циклу, розрахованими на

основі показників наведеного вище сайту, середнє значення в інтервалі 1–10 місяців таке: $\Delta W/\Delta T = 1.01$. Відповідно до формули (1), за $\Delta W/\Delta T = 1.01$ маємо $W_{\max}(25) \approx 170.7$ за ймовірної похибки цього значення ± 38.8 одиниць.

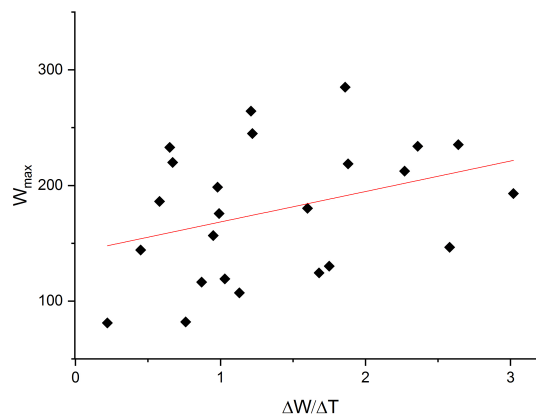


Рис. 2. Емпірична залежність між параметрами $\Delta W/\Delta T$ (середньомісячний приріст кількості сонячних плям) та W_{\max} (амплітуда циклу) за даними для 24 попередніх циклів; ΔT — інтервал часу. Параметр $\Delta W/\Delta T$ розраховано як середній в інтервалі від 1-го до 10-го місяця від початку циклу

Fig. 2. Empirical dependence between parameters $\Delta W/\Delta T$ (monthly average increase in the number of sunspots) and W_{\max} (cycle amplitude) based on the data for 24 previous cycles; ΔT — time interval. The parameter $\Delta W/\Delta T$ is calculated as the average in the interval from the 1st to the 10th month from the beginning of the cycle

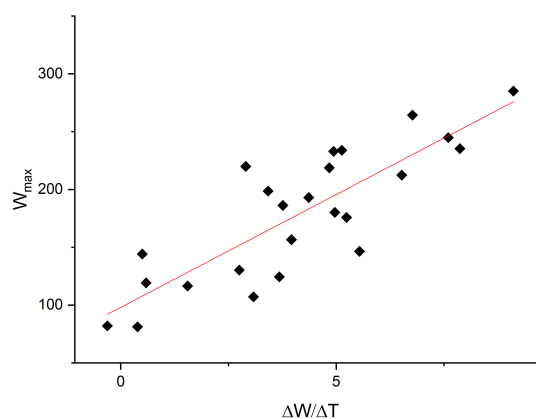


Рис. 3. Те саме, що й на рис. 2, але для інтервалу 11–20 місяців від початку циклу

Fig. 3. The same as in fig. 2, but for an interval of 11–20 months from the beginning of the cycle

Якщо розглянути приріст кількості сонячних плям за 11–20 місяців від початку циклу, то кореляційна залежність стає тіснішою (рис. 3). Її лінійну апроксимацію можна записати формулою

$$W_{\max} = 96.31 + 19.82 \times (\Delta W/\Delta T). \quad (2)$$

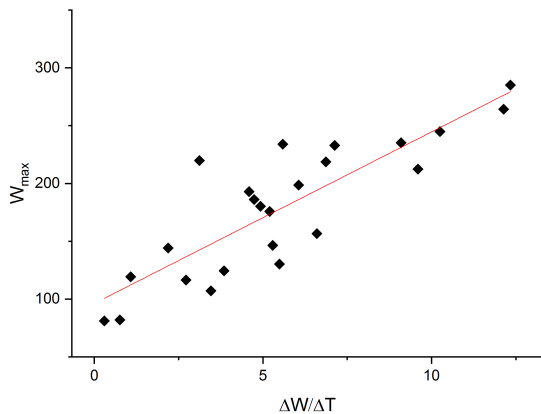


Рис. 4. Те саме, що й на рис. 2 і 3, але для інтервалу 16–25 місяців від початку циклу
 Fig. 4. The same as in fig. 2 and 3, but for an interval of 16–25 months from the beginning of the cycle

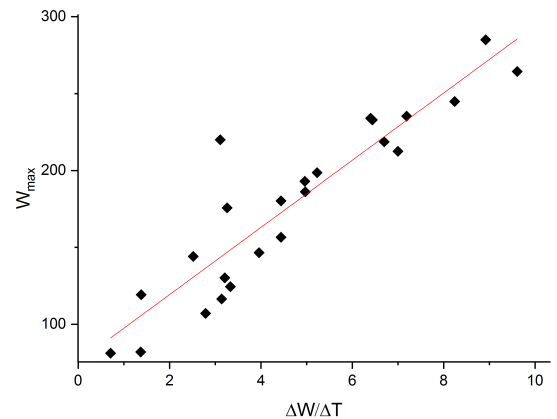


Рис. 5. Те саме, що й на рис. 2–4, але для інтервалу 11–35 місяців від початку циклу
 Fig. 5. The same as in fig. 2–4, but for the interval 11–35 months from the beginning of the cycle

Відповідно до формули (2), за $\Delta W/\Delta T = 2.35$ маємо $W_{\max}(25) \approx 142.9$ за ймовірної похибки цього значення ± 25.9 одиниць.

Подібною за виглядом є також залежність, побудована під час розгляду інтервалу 16–25 місяців від початку циклу (рис. 4). Ця формула описується таким рівнянням лінійної регресії:

$$W_{\max} = 96.23 + 14.62 \times (\Delta W/\Delta T). \quad (3)$$

Під час визначення швидкості збільшення кількості сонячних плям за період від 16 до 25 місяців від початку циклу для 25-го циклу маємо $\Delta W/\Delta T = 3.84$. За такого значення, згідно з формулою (3), отримуємо $W_{\max}(25) \approx 152.4$ за ймовірної похибки цього значення ± 21.6 одиниць.

Найтісніша залежність між параметрами W_{\max} та $\Delta W/\Delta T$ за тестового інтервалу 11–35 місяців від початку циклу (рис. 5). Для цієї залежності коефіцієнт кореляції Пірсона r є максимальним і дорівнює 0.91. На сьогодні цей період становить усю відому нам фазу зростання 25 циклу. Ця залежність апроксимується формулою:

$$W_{\max} = 75.54 + 21.85 \times (\Delta W/\Delta T). \quad (4)$$

На основі опублікованих даних була розрахована величина $\Delta W/\Delta T = 3.54$ для 25-го циклу. Підставляючи цю величину у формулу (4), маємо $W_{\max}(25) \approx 152.9$ за ймовірної похибки цього значення ± 19.1 одиниць. Як видно з порівняння наведених значень $W_{\max}(25)$, усі розглянуті вище тестові інтервали параметра $\Delta W/\Delta T$ дають у межах похибок приблизно однакові значення амплітуди циклу, які попадають в інтервал 143–171 одиниць.

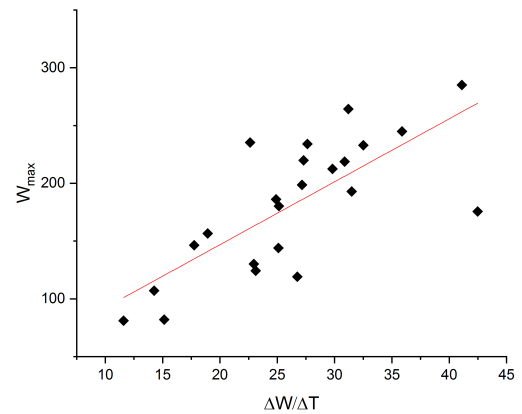


Рис. 6. Залежність амплітуди в циклах сонячної активності 1–24 (W_{\max} , вісь ординат) від швидкості спаду активності $\Delta W/\Delta T$ (вісь абсцис), розрахованої як середньорічне значення в усьому інтервалі від максимуму попереднього циклу до мінімуму поточного циклу
 Fig. 6. Dependence of the amplitude in cycles of solar activity 1–24 (W_{\max} , ordinate axis) on the rate of decline in activity $\Delta W/\Delta T$ (abscissa axis), calculated as the average annual value in the entire interval from the maximum of the previous cycle to the minimum of the current cycle

Також була виконана оцінка амплітуди 25-го циклу активності на основі врахування швидкості спаду активності попереднього циклу (рис. 6). Відповідна залежність описується формулою:

$$W_{\max} = 37.97 + 5.45 \times (\Delta W/\Delta T). \quad (5)$$

У формулі (5) параметр $\Delta W/\Delta T$ означає модуль середньої швидкості зменшення кількості плям, визначеної для всієї фази спаду циклу. На основі даних наведеного вище сайту розраховано, що для фази спаду 24-го циклу $\Delta W/\Delta T = 5.45$. Підставляючи це

значення у формулу (5), маємо $W_{\max}(25) \approx 149.5$ за ймовірної похибки цього значення ± 50.6 одиниць.

Для оцінки якості отриманих залежностей для прогнозу циклу використано обраховані статистичні оцінки, зокрема коефіцієнт кореляції Пірсона r , коефіцієнт детермінації COD та її модифікована версія Adj. R^2 [17].

У таблиці 1 наведено результати обчислень амплітуди 25-го циклу з урахуванням коефіцієнтів лінійної залежності для різних інтервалів від початку циклу (в межах 1–35 місяців). У другому стовпчику наведено використаний інтервал від початку циклу, у третьому — отримана амплітуда 25-го циклу, у четвертому — коефіцієнт кореляції Пірсона, у п'ятому — коефіцієнт детермінації (COD), у шостому — модифікована версія Adj. R^2 — квадрат коефіцієнта детермінації.

Із таблиці 1 видно, що за критерієм величини коефіцієнта кореляції лішими є результати для інтер-

валів 11–20, 16–25 і 11–35 місяців від початку циклу, причому останній інтервал найкращий для прогнозування амплітуди 25 циклу. Аналогічні результати показують і інші статистичні оцінки — на основі величини коефіцієнта детермінації COD та її модифікованої версії Adj. R^2 . Звідси можна зробити висновок, що оптимальним інтервалом під час визначення швидкості зростання кількості сонячних плям для прогнозування амплітуди циклу є фаза його зростання (у 25-му циклі — 11–35 місяців від початку циклу). Можна використовувати й менші інтервали, а саме: 16–25 місяців і 11–20 місяців від початку циклу, однак якість прогнозу за таких умов погіршується.

Як видно з таблиці 1, найменш переконливими є результати прогнозування на основі розгляду фази зростання в перші 1–10 місяців від початку циклу. На рис. 2 бачимо значне розсіяння від лінійної залежності для цього випадку.

№ п/п	Використаний інтервал	W_{\max}	Коефіцієнт кореляції	R^2 (COD)	Adj. R^2
1	1–10 місяців поточного циклу	170.7±38.7	0.35	0.12	0.08
2	11–20 місяців поточного циклу	142.9±25.9	<u>0.83</u>	0.70	0.69
3	16–25 місяців поточного циклу	152.4±21.6	<u>0.85</u>	0.72	0.71
4	11–35 місяців поточного циклу	152.9±19.1	<u>0.91</u>	0.84	0.83
5	Фаза спаду попереднього циклу	149.5±50.6	0.74	0.55	0.53

Табл. 1. Порівняння прогнозів амплітуди 25-го циклу для різних тестових інтервалів фази зростання, а також всієї фази спаду попереднього циклу

Table 1. Comparison of predictions for the amplitude of the 25th cycle for different test intervals of the growth phase, as well as the entire decline phase of the previous cycle

Отже, найімовірніше, що поточний цикл №25 буде середнім за потужністю, з максимальною згладженою кількістю сонячних плям у межах 140 - 170 одиниць (у новій системі). Це означає, що цикл №25 не показує жодних ознак наближення глибокого вікового циклу (типу мінімуму Маундера), який, за деякими прогнозами, має бути в середині XXI ст. [16].

Для визначення часу настання максимуму циклу були побудовані залежності тривалості фази зростання циклу від швидкості збільшення кількості сонячних плям для трьох варіантів використаних інтервалів (11-20, 16-25 і 11-35 місяців) від початку циклу.

Отримані залежності були апроксимовані лінійними виразами:

$$L_{(11-20)} = 5.92 - 0.36 \times (\Delta W/\Delta T), \quad (6)$$

$$L_{(16-25)} = 5.93 - 0.27 \times (\Delta W/\Delta T), \quad (7)$$

$$L_{(11-35)} = 5.92 - 0.36 \times (\Delta W/\Delta T), \quad (8)$$

де $L_{(11-20)}$, $L_{(16-25)}$, $L_{(11-35)}$, відповідно, тривалість фази зростання циклу за різних тестових інтервалів збільшення активності (11–20, 16–25 і 11–35 місяців) від початку циклу. Значення $\Delta W/\Delta T$ для цих варіантів становлять 2.35, 3.84 і 3.54, відповідно, а тривалість фази зростання циклу 5.07 ± 0.34 , 4.89 ± 0.33 і 4.88 ± 0.36 років.

Із достатньо високими значеннями статистичних оцінок (коефіцієнт кореляції Пірсона $r = 0.79 - 0.83$) тривалість фази зростання 25-го циклу є в межах 4 роки 11 місяців–5 років 1 місяць). Це значить, що максимум 25 циклу сонячної активності очікується в інтервалі листопад 2024 р.–січень 2025 р.

III. ВИСНОВКИ

На основі даних про 24 попередні сонячні цикли розглянуто статистичний зв'язок між швидкістю збільшення кількості сонячних плям на початковій

фазі кривої зростання (до 35-го місяця від початку циклу) й амплітудою циклу. Побудовано відповідні залежності за 1–10, 11–20, 16–25, 11–35 місяців від початку циклу, а також для фази спаду попереднього циклу. Встановлено, що оптимальним інтервалом передісторії для прогнозування амплітуди циклу є період від 11 до 35 місяця від початку циклу ($r = 0.91$); цілком задовільні результати можна отримати, враховуючи період від 11 до 20 місяця ($r = 0.83$) та від 16 до 25 місяця ($r = 0.85$) від початку циклу. Виконане дослідження дає підстави зробити висновок, що максимальна згладжена кількість сонячних плям у 25-му циклі $W_{\max}(25)$ має бути в межах $\approx 140 - 170$

одиниць за найімовірнішого значення 140–150 одиниць (Табл. 1). Якщо ж узяти за основу для прогнозування швидкості спаду кількості плям у попередніх циклах, то тоді $W_{\max}(25) \approx 150$ одиниць. З високою ймовірністю максимум 25-го циклу сонячної активності можна очікувати в інтервалі листопад 2024 р. – січень 2025 р.

Подяки. Автори вдячні рецензентам за низку слушних зауважень. Це дослідження профінансувало Міністерство освіти і науки в Україні, проєкт №22БФ023-03.

-
- [1] K. Petrovay, *Living Rev. Sol. Phys.* **17**, 2 (2020); <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>.
- [2] A. F. Attia, H. A. Ismail, H. M. Basurah, *Astrophys. Space Sci.* **344**, 5 (2013); <https://doi.org/10.1007/s10509-012-1300-6>.
- [3] V. Sarp *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **481**, 2981 (2018); <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2470>.
- [4] В. Лозицький, В. Єфіменко, *Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія*, 49, 47 (2012).
- [5] V. G. Lozitsky, V. M. Efimenko, *Kinemat. Phys. Celest. Bodies* **39**, 45 (2023); <https://doi.org/10.3103/S088459132301004X>.
- [6] M. Waldmeier, *Astron. Mitt. Eidgen. Sternw. Zürich.* **14**, 105 (1935).
- [7] Yu. A. Nagovitsyn, A. I. Kuleshova, *Astron. Rep.* **56**, 800 (2012); <https://doi.org/10.1134/S1063772912090065>.
- [8] М. І. Пішкало, *Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія* **51**, 36 (2014).
- [9] F. Clette, L. Svalgaard, J. M. Vaquero, E. W. Cliver, *Space Sci. Rev.* **186**, 35 (2014); <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2>.
- [10] M. N. Gnevyshev, *Solar Phys* **51**, 175 (1977).
- [11] K. J. Li, W. Feng, F. Y Li, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **135**, 72 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.010>.
- [12] V. M. Efimenko, V. G. Lozitsky, *Adv. Space Res.* **72**, 1448 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.006>.
- [13] M. I. Pishkalo, *Solar Phys.* **289**, 1815, (2014); <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0398-1>.
- [14] N. R. Rigozo *et al.*, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **73**, 1294 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.005>.
- [15] L. B. Tsirulnik, T. V. Kuznetsova, V. N. Oraevsky, *Adv. Space Res.* **20**, 2369 (1997).
- [16] V. V. Zharkova, S. I. Shepherd, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **512**, 5085 (2022); <https://doi.org/10.1093/mnras/stac781>.
- [17] D. A. Ratkowsky, *Handbook of Nonlinear Regression Models* (Dekker, Marcel, 1990).

THE OPTIMAL INTERVAL FOR DETERMINING THE GROWTH RATE OF SOLAR ACTIVITY FOR THE PREDICTION OF THE 25th CYCLE

V. M. Efimenko, V. G. Lozitsky

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

Based on the data on 24 previous solar cycles, the statistical relationship between the rate of increase in the number of sunspots in the initial phase of the growth curve (up to the 35th month from the beginning of the cycle) and the amplitude of the cycle was analyzed. It was found that the maximum smoothed number of sunspots for the 25th cycle depends on the interval used to determine the rate of increase in the sunspot number during the growth phase of the cycle. From our analysis it follows that the amplitude of the 25th cycle will be in the range $W_{\max}(25) \approx 140 - 170$ units. At the same time, the statistical estimate of the deviation of the points from the linear dependence (Pearson's test) is $r = 0.35 - 0.91$; the maximum value, $r = 0.91$, was found for the interval of 11 to 35 months. The amplitude of the 25th cycle was also evaluated taking into account the rate of decline in the activity of the previous cycle; this method gives $W_{\max}(25) \approx 150$ units ($r = 0.73$), which is in good agreement with the forecast based on the growing phase of the cycles. The statistical dependence of the duration of the growth phase of the cycle on the rate of increase in the number of sunspots was analyzed. From this dependence we can conclude that the maximum of the 25th cycle is expected between November 2024 and January 2025.

Key words: Sun, solar activity, number of sunspots, forecasts, maximum of the 25th cycle.