

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.04.068>

УДК 523.9

М. І. Пішкало, І. Е. Васильєва

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

Прогноз максимуму 25-го сонячного циклу: сумарна потужність на початку циклу і в попередньому циклі як передвісник максимуму

Сонячна активність, найвідомішим проявом якої є сонячні плями, змінюється з періодом близько 11 років. Два 11-річні цикли формують 22-річний магнітний цикл Сонця. Зміни сонячної активності викликають зміни у міжпланетному й навколоземному космічному просторі, впливають на Землю, на середовище існування людини. Вміння наперед прогнозувати сонячну активність є важливим як для деяких практичних задач космонавтики, так і для кращого розуміння суті тих фізичних процесів на Сонці, що викликають ці зміни. У роботі досліджено взаємозв'язок сумарних потужностей (суми місячних чисел сонячних плям за цикл) пар циклів «парні — непарні» і «непарні — парні» і зроблено спробу прогнозування максимуму поточного 25-го сонячного циклу, що почався у грудні 2019 р., за величиною сумарної потужності попереднього 24-го циклу. Знайдено, що між потужністю і амплітудою непарного циклу та потужністю попереднього парного циклу є суттєва кореляція: $r = 0.897$, $p = 0.00043$ і $r = 0.785$, $p = 0.00715$ відповідно (при неврахуванні пари циклів 4—5). Деяко слабша кореляція спостерігається між амплітудою непарного циклу і амплітудою попереднього парного циклу ($r = 0.712$, $p = 0.0209$). Знайдено рівняння регресії для відповідних параметрів. Розрахована прогнозована амплітуда 25-го сонячного циклу становить $W_{\max} = 155.6 \pm 42.4$ (за потужністю 24-го циклу) і 172.1 ± 46.5 (за його максимумом) відповідно у серпні і червні 2024 р. Для сонячних циклів 12—24 досліджено зв'язок тих же параметрів окремо в N- і S-півкулях. Знайдено також, що в 25-му циклі південна півкуля буде децю активнішою

від північної; прогнозовані максимуми в N - і S -півкулях становлять $W_{\max} = 86.9 \pm 41.1$ і 91.7 ± 29.7 відповідно. Знайдено, що потужність сонячного циклу за перші 30 місяців від його початку тісно корелює ($r = 0.83$, $p = 5 \cdot 10^{-7}$) як із величиною максимуму наступного циклу, так і з тривалістю фази росту циклу. Це дозволяє отримати найвірогідніший, на нашу думку, прогноз максимуму 25-го циклу $W_{\max} = 136 \pm$

36 у лютому 2025 р. Всі отримані в даній роботі прогнози вказують на те, що 25-й сонячний цикл буде вищим від попереднього 24-го.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, сонячний цикл, прогнозування сонячного циклу

ВСТУП

Сонячна активність змінюється з періодом близько 11 років. Найочевидніше це проявляється в 11-річній зміні кількості сонячних плям. У роки мінімуму активності плями можуть взагалі не спостерігатися декілька місяців підряд, а в роки максимуму деякі великі плями можна бачити при певних умовах навіть неозброєним оком. Разом зі зміною кількості плям з періодом 11 років змінюється й переважна більшість інших спостережних характеристик Сонця: сонячна стала, ультрафіолетове, рентгенівське й радіовипромінювання, форма і яскравість корони, кількість і характеристики протуберанців і волокон, сонячних спалахів, корональних дір, характеристики магнітного поля, сонячного вітру тощо. Цикли сонячної активності суттєво відрізняються один від одного своїми параметрами, зокрема амплітудою і тривалістю. Два 11-річних цикли формують 22-річний магнітний цикл Сонця (цикл Гейла). В сонячній активності виділяються також інші періоди, як коротші (27-денний, 160-денний, річний, дворічний), так і довші (віковий 80...100-річний цикл Гляйсберга, 210-річний цикл Суесса, 400-річний цикл та ін.) від найбільш вираженого 11-річного циклу. Наразі встановлено, що саме змінне магнітне поле Сонця є джерелом всіх цих змін сонячної активності.

Зміни сонячної активності викликають зміни у міжпланетному та навколоземному космічному просторі, які вже безпосередньо впливають на роботу багатьох космічних і наземних технологічних систем (космічні апарати, зв'язок, космічна та аеронавігація, лінії електропередач, трубопроводи, залізниця), а також певним чином на клімат і життєдіяльність живих організмів, зокрема й людини. Саме тому важливо вивчати сонячну активність і вміти її прогнозувати. Наприклад, для планування космічних місій, особливо пілотованих, важливо на декілька років наперед знати рівень сонячної активності.

Найвідомішою і найбільш уживаною характеристикою сонячної активності є відносне число W сонячних плям (число Вольфа). Наразі ця характеристика сонячної активності досить добре відома з середини XVIII століття. Проводяться нові спостереження і дослідження,

вивчаються архіви. Нещодавно міжнародна група вчених виконала глибокий аналіз всіх відомих спостережень сонячних плям і зробила перегляд шкали числа плям [12, 13]. Наразі ми користуємося Версією 2.0 відносних чисел сонячних плям, яка підтримується Королівською обсерваторією Бельгії (<https://www.sidc.be/silso/datafiles>).

У роботах з прогнозування сонячної активності зазвичай використовують щомісячні значення, рідше — річні. На сьогодні запропоновано багато методів прогнозування сонячної активності на основі спостережних взаємозв'язків між різними параметрами сонячних циклів, між різними сонячними, геофізичними та космічними явищами, на основі теоретичних моделей сонячної активності, з використанням методів комп'ютерного аналізу і моделювання числових рядів, штучних нейронних мереж, машинного навчання [4, 23, 35, 37—39, 41—43, 46].

25-й сонячний цикл розпочався у грудні 2019 р. і наближається до свого максимуму. Яким і коли буде цей максимум? Чи перевищить він максимум попереднього невисокого 24-го циклу? Чи й надалі рівень сонячної активності буде зменшуватися? Через 2...3 роки ми вже точно будемо знати відповіді на ці запитання. А зараз поки що можемо лише прогнозувати величину і час максимуму.

Наразі зроблено вже кілька десятків прогнозів величини максимуму 25-го сонячного циклу. Вони різняться у досить широкому діапазоні від дуже низьких значень 50 [30] чи 57 ± 17 [15] — до дуже високих 233 [34]. Більшість прогнозів (як ранніх, так і зовсім недавніх) вказують на те, що 25-й цикл буде вищим від попереднього 24-го циклу [1, 3, 7, 8, 10, 16—18, 20, 22, 25—29, 32, 33, 36, 39, 40, 45, 50, 51].

У 1948 р. Гневишев і Оль у короткій роботі [2] знайшли, що сума річних чисел Вольфа у парному сонячному циклі тісно корелює із відповідною величиною наступного непарного циклу, якщо не брати до розгляду нетипову пару циклів 4—5. (Цю величину, суму чисел Вольфа за цикл чи за певний проміжок часу, надалі будемо умовно називати сумарною потужністю.) Пізніше отриману закономірність («непарний цикл є вищим від попереднього парного») було названо правилом Гневишева — Оля, і вона неодноразово використовувалась, зокрема, для прогнозування максимуму циклу.

У даній роботі ми дослідимо зв'язок між потужностями і максимальними амплітудами у сусідніх парах циклів «парний — непарний» і «непарний — парний» з використанням сучасних даних про згладжені місячні відносні числа сонячних плям і спробуємо на основі цього дати прогноз максимуму 25-го сонячного циклу.

ВХІДНІ ДАНІ

У роботі використано згладжені місячні відносні числа сонячних плям (Версія 2.0; сумарні — з 1749 р., цикли 1—24; по півкулях — з 1874 р., цикли 12—24 [47], заданими сайту <https://www.sidc.be/silso/datafiles>

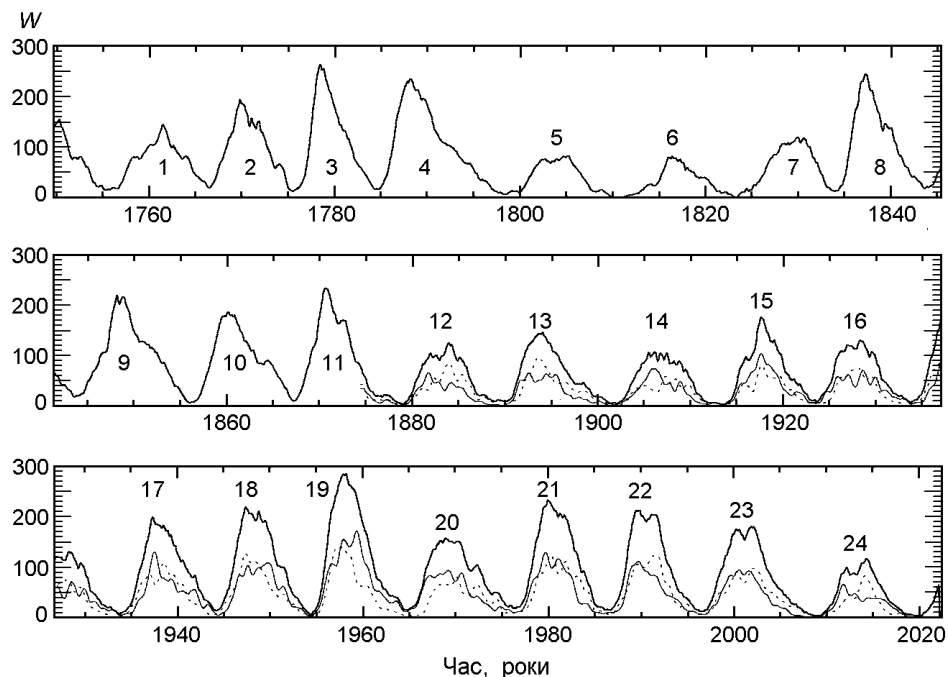


Рис. 1. Згладжені місячні відносні значення числа W сонячних плям: суцільна жирна лінія — сумарні в обох півкулях (цикли 1—24); тонка суцільна і штрихова лінії відповідно — окремо в N - і S -півкулях (цикли 12—24)

Королівської обсерваторії Бельгії). На рис. 1 показано часові залежності вказаних чисел. З усіх циклів найвищим був 19-й сонячний цикл з амплітудою 285.0, а найнижчим — 6-й цикл з амплітудою 81.2. Найдовшим був 4-й сонячний цикл, що тривав 13.58 р., а найкоротшим — 2-й цикл тривалістю 9 років.

Для подальших розрахунків ми використовували параметри сонячних циклів згідно з табл. 1 у нашій попередній роботі [1].

Потужності циклів. Спочатку ми обчислили для кожного сонячного циклу суми згладжених місячних відносних чисел сонячних плям за цикл, тобто потужності P циклів (рис. 2). Найпотужнішим з усіх сонячних циклів був найдовший 4-й цикл, а найвищий 19-й цикл був тільки другим за потужністю. Найменшу потужність мав 6-й цикл.

Серед циклів 12—24 N -півкуля була найпотужнішою у 19-му сонячному циклі, а S -півкуля — у 21-му циклі. У циклах 14, 17 і 18 потужності обох півкуль були майже однаковими.

Потужність сонячного циклу тісно корелює із максимальною амплітудою циклу. На рис. 3 показано залежність максимальної амплітуди $W_{\max}$ сонячного циклу від його потужності P для всіх циклів 1—24. Коефіцієнт кореляції становить 0.916 ($p < 10^{-9}$), а зв'язок параметрів у прямолінійному наближенні описується рівнянням

$$W_{\max} = (2.442 \pm 17.099) + (0.0162 \pm 0.0015) P. \quad (1)$$

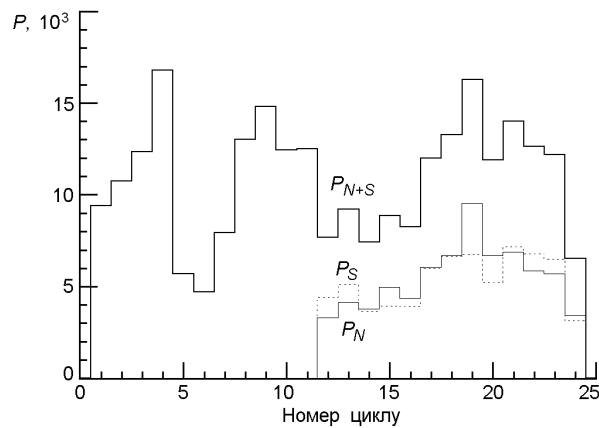


Рис. 2. Гістограма розподілу сумарних потужностей P сонячних циклів: жирна лінія — для обох півкуль (цикли 1—24); тонка і пунктирна лінії — відповідно для N - і S -півкуль (цикли 12—24)

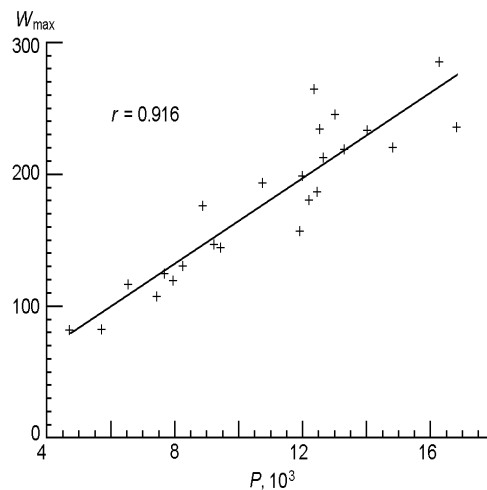


Рис. 3. Залежність максимального значення згладженого місячного відносного числа $W_{\max}$ сонячних плям від потужності P циклу (цикли 1—24)

Це дозволяє нам переходити від потужності циклу до його амплітуди, тобто будувати залежності максимальної амплітуди сонячного циклу як від сумарної потужності попереднього циклу, так і від амплітуди попереднього циклу.

Прогноз максимуму циклу за величиною потужності попереднього циклу. Далі окремо для пар циклів ми побудували залежність сумарних потужностей непарних циклів (P_{2n-1}) від потужностей попередніх парних циклів (P_{2n}), а також залежність сумарних потужностей парних циклів (P_{2n}) від потужностей попередніх непарних циклів (P_{2n-1}). Вони показані на рис. 4.

Із рис. 4а видно, що величина потужності непарного циклу практично не корелює із величиною потужності попереднього парного циклу ($r = 0.241$, $p = 0.4753$), якщо брати до уваги всі такі пари циклів.

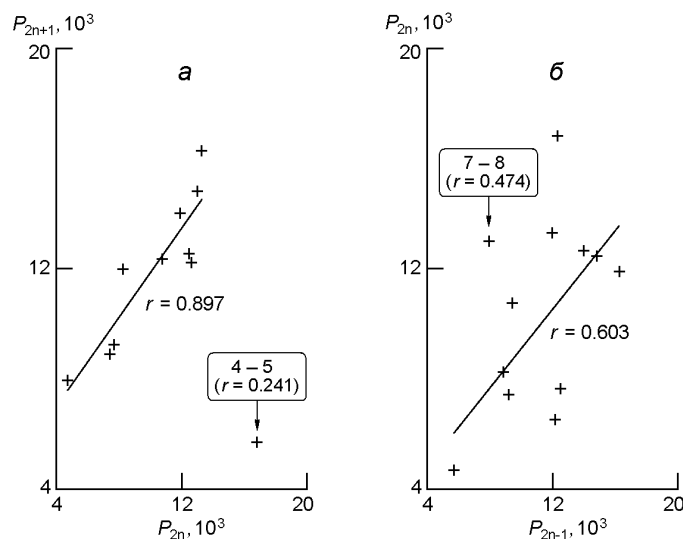


Рис. 4. Залежності сум згладжених місячних відносних чисел сонячних плям: а — для пар циклів «парний — непарний» (лінійна апроксимація (2)), б — «непарний — парний» (лінійна апроксимація (3)). У дужках наведено значення коефіцієнтів кореляції при врахуванні всіх відповідних пар циклів

Якщо ж не брати до розгляду лише одну точку, що відповідає парі циклів 4—5, то коефіцієнт кореляції збільшується відразу до 0.897 ($p = 0.00043$), що може свідчити про певну залежність потужності непарного циклу від потужності попереднього парного циклу. Відповідна лінійна апроксимація залежності описується рівнянням

$$P_{2n+1} = (3782.2 \pm 1486.2) + (0.807 \pm 0.140) P_{2n}. \quad (2)$$

Показану на рис. 4а залежність вперше було отримано по річних значеннях і описано у роботі [2]. Як бачимо з рис. 2, це «правило Гневишева — Оля» порушувалося не тільки в парі циклів 4—5, а й у парі циклів 22—23. По максимумах циклів правило Гневишева — Оля порушувалося у трьох парах циклів: 4—5, 8—9, 22—23.

Якщо ми викидаємо одну точку в залежності «парні — непарні» і отримуємо «правило Гневишева — Оля», яке дозволяє прогнозувати амплітуду непарного циклу по величині попереднього парного циклу, то, вірогідно, можемо так само зробити й для пар циклів «непарні — парні» (рис. 4б).

Залежність потужності парного циклу від потужності попереднього непарного циклу для всіх пар циклів «непарні — парні» (рис. 4б) також вказує на слабкий кореляційний зв'язок між відповідними величинами ($r = 0.474$, $p = 0.1195$). Якщо ж ми викинемо із розгляду також лише одну точку, що відповідає парі циклів 7—8, то коефіцієнт кореляції вже становитиме 0.603 ($p = 0.04953$), що теж може свідчити про певну залежність потужності парного циклу від потужності попереднього непарного циклу (хоча цей зв'язок не такий тісний, як у випадку

«парні — непарні» цикли). Відповідна пряма лінія на рис. 4б описується рівнянням

$$P_{2n} = (1976.4 \pm 3750.8) + (0.712 \pm 0.314) P_{2n-1}. \quad (3)$$

Тобто, виходить, що викидання лише однієї точки на рис. 4а і 4б суттєво змінює характер відповідних залежностей. Не будемо заглиблюватися у спекулювання щодо правомірності викидання точок «4—5» і «7—8», а подальші розрахунки зробимо також для циклів 9—24, де немає необхідності щось «викидати».

На рис. 5 показано залежності максимальної амплітуди сонячного циклу від потужності попереднього парного чи непарного циклу. Для випадку «парні — непарні» із викинутою точкою «4—5» (рис. 5а) ця залежність характеризується коефіцієнтом кореляції 0.785 ($p = 0.00715$) і описується рівнянням

$$(W_{\max})_{2n-1} = (66.545 \pm 40.263) + (0.0136 \pm 0.0038) P_{2n}. \quad (4)$$

Це рівняння дозволяє отримати прогнозовану максимальну амплітуду сонячного циклу 25 за відомою потужністю 24-го циклу. Прогнозована амплітуда становить 155.6 ± 42.4 (тут і надалі — 70 % довірчий інтервал).

Для циклів 9—24 коефіцієнт кореляції між тими ж параметрами становить 0.740 ($p = 0.0572$), відповідне рівняння регресії (штрихова лінія) має вигляд

$$(W_{\max})_{2n-1} = (68.929 \pm 57.838) + (0.0132 \pm 0.0054) P_{2n}, \quad (5)$$

а прогнозована амплітуда 25-го циклу становить 155.0 ± 48.9 .

Для випадку «непарні — парні» (рис. 5б) для всіх циклів (без точки «7—8») коефіцієнт кореляції між величинами $(W_{\max})_{2n}$ і P_{2n-1} становить 0.518 ($p = 0.1026$), а відповідне рівняння регресії має вигляд

$$(W_{\max})_{2n} = (58.134 \pm 57.835) + (0.0088 \pm 0.0048) P_{2n-1}. \quad (6)$$

Для циклів 9...24 коефіцієнт кореляції між відповідними величинами становить 0.492 ($p = 0.2156$), а прямій штриховій лінії відповідає рівняння

$$(W_{\max})_{2n} = (50.722 \pm 77.809) + (0.0085 \pm 0.0061) P_{2n-1}. \quad (7)$$

На рис. 6 показано залежності максимальної амплітуди сонячного циклу від максимальної амплітуди попереднього парного чи непарного циклу. У цьому випадку для всіх циклів «парні — непарні» відповідні залежності описуються рівнянням (без точки «4—5», рис. 6а)

$$(W_{\max})_{2n-1} = (92.386 \pm 41.271) + (0.6844 \pm 0.2383) (W_{\max})_{2n}, \quad (8)$$

з коефіцієнтом кореляції 0.712 ($p = 0.0209$). Для циклів 9—24 коефіцієнт кореляції становить 0.635 ($p = 0.1255$), а рівняння регресії має вигляд

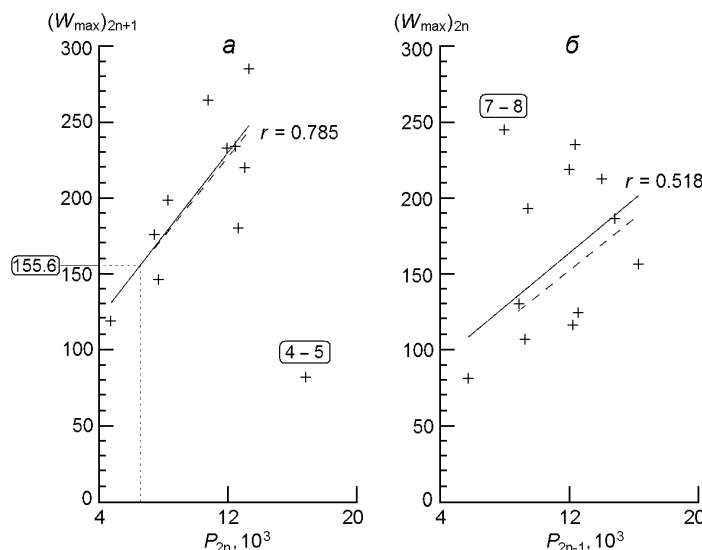


Рис. 5. Залежність максимального значення згладженого місячного відносного числа сонячних плям $W_{\max}$ від потужності попереднього циклу: а — числа $(W_{\max})_{2n+1}$ для непарного циклу від потужності P_{2n} попереднього парного циклу («парні — непарні» цикли), суцільна пряма лінія — для циклів 2—23 з виключенням точки «4—5», штрихова лінія — для циклів 10—23, пунктир — прогноз максимуму для 25-го циклу; б — числа $(W_{\max})_{2n}$ для парного циклу від потужності P_{2n-1} попереднього непарного циклу («непарні — парні» цикли), суцільна пряма лінія — для циклів 1...24 з виключенням точки «7—8», штрихова лінія — для циклів 9...24

$$(W_{\max})_{2n+1} = (99.847 \pm 60.394) + (0.6640 \pm 0.3609) (W_{\max})_{2n}. \quad (9)$$

Відповідні прогнозовані максимальні амплітуди 25-го циклу становлять 172.1 ± 46.5 і 177.1 ± 52.1 .

Для циклів «непарні — парні» відповідні коефіцієнти кореляції (без точки «7—8») становлять 0.570 ($p = 0.0671$) і 0.400 ($p = 0.3262$), а рівняння регресії мають вигляд

$$(W_{\max})_{2n} = (61.816 \pm 49.105) + (0.5000 \pm 0.2401) (W_{\max})_{2n+1} \quad (10)$$

$$(W_{\max})_{2n} = (70.954 \pm 81.568) + (0.4092 \pm 0.3830) (W_{\max})_{2n-1}. \quad (11)$$

Якщо ми ці залежності використаємо для визначення епігнозу 24-го циклу (потрібно «оновити» рівняння регресії, викинувши з розгляду ще й точку, що відповідає парі циклів «23—24»), то отримаємо, наприклад, що прогнозований максимум 24-го циклу, визначений за величиною максимуму 23-го циклу, становить 152 ± 55 . Цей прогноз є на 30 % вищим від реального максимуму 24-го циклу (116.4). Щоб порівняти це прогнозоване значення 24-го циклу з іншими прогнозами, потрібно перевести його у масштаб Версії 1.0 числа сонячних плям, яка діяла до 2015 р., розділивши приблизно на 1.4. Тоді цей прогноз 24-го циклу становитиме 109 ± 39 , що є далеко не «найгіршим» із багатьох прогнозів максимуму 24-го циклу (див., наприклад, табл. 2 у роботі [37]).

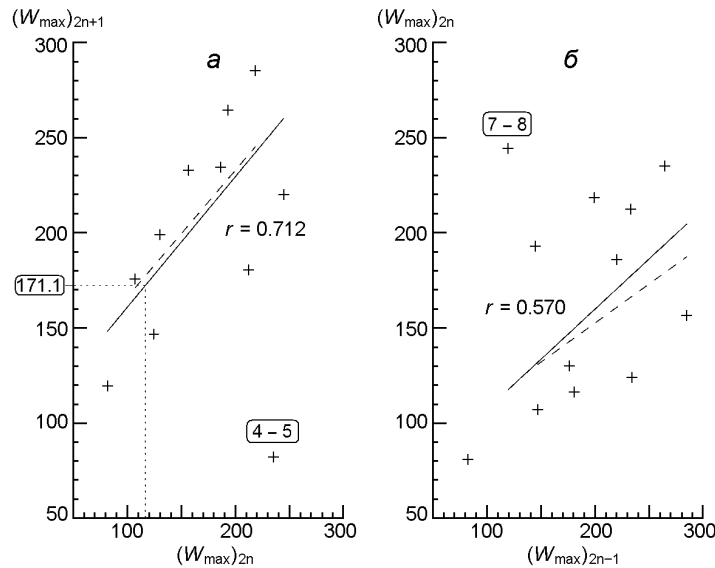


Рис. 6. Залежність максимального значення згладженого місячного відносного числа сонячних плям від максимального значення у попередньому циклі: *а* — залежність $(W_{\max})_{2n+1}$ від $(W_{\max})_{2n}$ (парні — непарні цикли), суцільна пряма лінія — апроксимація для циклів 2...23 з виключенням точки «4—5», штрихова лінія — для циклів 10...23, пунктир — прогноз максимуму для 25-го циклу; *б* — залежність $(W_{\max})_{2n+1}$ від $(W_{\max})_{2n-1}$ (непарні — парні цикли), суцільна пряма лінія — для циклів 1...24 з виключенням точки «7—8», штрихова лінія — для циклів 9...24

Час максимуму 25-го циклу. Між максимальною амплітудою сонячного циклу і тривалістю фази росту (часом від мінімуму до максимуму циклу) спостерігається досить тісна обернена залежність (рис. 7), що, описується виразом

$$T_{\text{rise}} = (7.0030 \pm 0.5239) + (-0.0148 \pm 0.0028) W_{\max} \quad (12)$$

$$(r = -0.748, p = 2.64 \cdot 10^{-5}).$$

(Це відоме співвідношення називають «ефектом Вальдмаєра» — на-ростання активності у потужнішому циклі йде швидше [48]).

Вираз (12) дозволяє за відомою амплітудою циклу знайти час його максимуму. Наприклад, амплітуді 155.6 відповідає тривалість фази росту циклу 4.703 ± 0.839 р., що вказує на те, що максимум 25-го циклу, прогнозований по величині потужності 24-го циклу, припадатиме на серпень 2024 р. Прогнозований величині максимуму 25-го циклу 172.1, отриманий по величині максимуму 24-го циклу, відповідає тривалість фази росту 4.460 ± 0.836 р. і максимум циклу у червні 2024 р.

Між величиною максимальної амплітуди $(W_{\max})_n$ циклу і тривалістю T_{n-1} попереднього циклу також є досить суттєва обернена залежність, показана на рис. 8. Коефіцієнт кореляції між відповідними величинами для циклів 1—24 становить -0.703 ($p = 0.00018$), а рівняння регресії описується виразом

$$(W_{\max})_n = (567.33 \pm 85.83) + (-35.08 \pm 7.73) T_{n-1}. \quad (13)$$

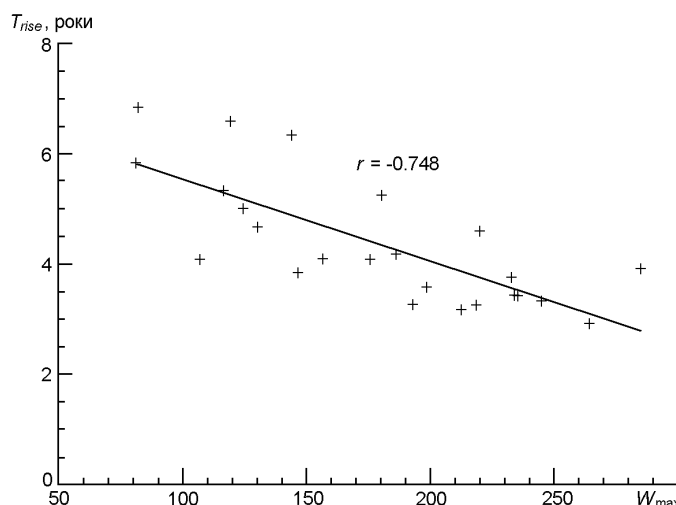


Рис. 7. Залежність тривалості фази росту сонячного циклу (T_{rise}) від максимального значення згладженого місячного відносного числа сонячних плям (W_{max}) у тому ж циклі

Звідси отримуємо ще один прогнозований максимум 25-го циклу — 181.5 ± 46.3 , який очікується у квітні 2024 р.

Прогноз максимуму циклу в N - і S -півкулях. Прогнозовані величини максимальної амплітуди 25-го сонячного циклу окремо в N - і S -півкулях також можна знайти за відомою потужністю відповідної півкулі у попередньому 24-му циклі. На рис. 9 окремо для північної і південної півкуль побудовано залежності максимальних значень згладженого місячного відносного числа $(W_{max})_{2n-1}$ сонячних плям у непарному циклі від потужності P_{2n} попереднього парного циклу для циклів 12—24. Для північної і південної півкуль коефіцієнт кореляції між амплітудою і потужністю попереднього парного циклу становить 0.699 ($p = 0.122$) і 0.534 ($p = 0.275$). Відповідні рівняння регресії мають такий вигляд:

$$(W_{max})_{2n-1}^N = (29.4 \pm 45.5) + (0.01686 \pm 0.00862) P_{2n}^N, \quad (14)$$

$$(W_{max})_{2n-1}^S = (66.0 \pm 34.2) + (0.00823 \pm 0.00652) P_{2n}^S. \quad (15)$$

Це дозволяє отримати, хоч і досить грубі, оцінки прогнозованих максимальних амплітуд в N - і S -півкулях: $(W_{max})_{25}^N = 86.9 \pm 41.1$ і $(W_{max})_{25}^S = 91.7 \pm 29.7$ відповідно. Тобто, прогноз показує, що південна півкуля буде активнішою від північної.

Прогноз максимуму 25-го циклу за його початковою потужністю. Оскільки 25-й цикл уже триває близько трьох років, ми можемо для прогнозу його максимуму використати також певні параметри безпосередньо цього ж циклу. Ми знайшли, що потужність сонячного циклу за декілька перших місяців від його початку досить добре корелює із величиною наступного максимуму. Так, коефіцієнт кореляції

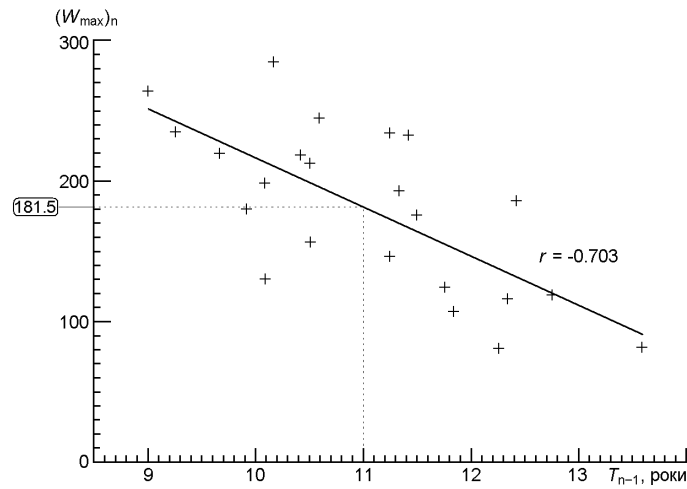


Рис. 8. Залежність максимального значення згладженого місячного відносного числа $(W_{\max})_n$ сонячних плям від тривалості T_{n-1} попереднього циклу. Пунктиром показано прогнозований максимум 25-го циклу

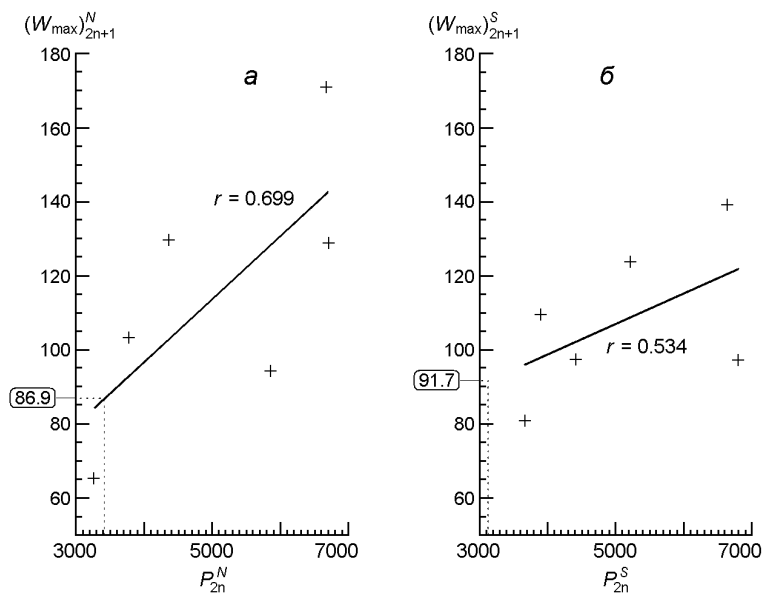


Рис. 9. Залежності максимальних значень згладженого місячного відносного числа сонячних плям у непарному циклі від потужності попереднього парного циклу для циклів 12...24 (а — N -півкуля, б — S -півкуля). Прямі лінії — апроксимації залежностями (14) і (15) відповідно. Пунктири — прогнозовані значення максимуму 25-го циклу у відповідній півкулі

між сумарною потужністю на початку сонячного циклу за 12, 18, 24 і 30 місяців від мінімуму ($P_{12}, P_{18}, P_{24}, P_{30}$) і величиною наступного максимуму $W_{\max}$ становить 0.578 ($p = 0.0031$), 0.660 ($p = 4.5 \cdot 10^{-4}$), 0.768 ($p = 1.2 \cdot 10^{-5}$) і 0.830 ($p = 5.3 \cdot 10^{-7}$) відповідно. Залежності максимального згладженого місячного відносного числа сонячних плям від суми зна-

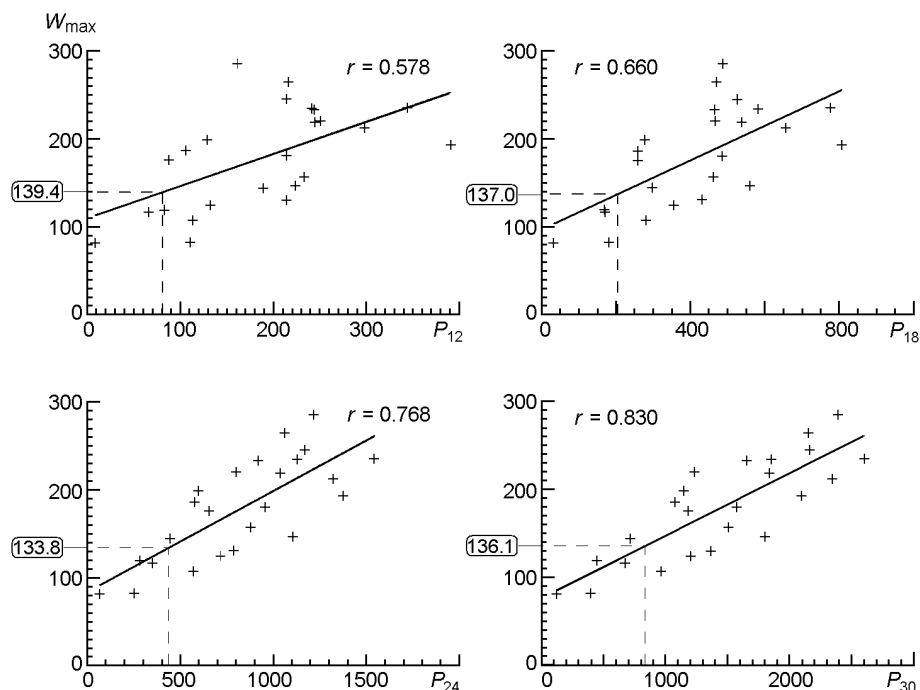


Рис. 10. Залежності максимальних згладжених місячних відносних значень $W_{\max}$ числа сонячних плям від потужностей за 12, 18, 24 і 30 місяців від мінімуму ($P_{12}, P_{18}, P_{24}, P_{30}$). Штрихові лінії показують прогнозовані значення максимуму 25-го циклу

чень за 12, 18, 24 і 30 місяців на початку того ж циклу показано на рис. 10. Рівняння регресії мають такий вигляд:

$$W_{\max} = (109.63 \pm 22.99) + (0.367 \pm 0.110) P_{12}, \quad (16)$$

$$W_{\max} = (96.66 \pm 21.90) + (0.197 \pm 0.048) P_{18}, \quad (17)$$

$$W_{\max} = (83.63 \pm 18.58) + (0.115 \pm 0.020) P_{24}, \quad (18)$$

$$W_{\max} = (77.13 \pm 16.03) + (0.071 \pm 0.010) P_{30}. \quad (19)$$

Відповідно прогнозовані величини максимуму 25-го циклу становлять $W_{\max} = 139.4 \pm 53.5$, 137.0 ± 49.1 , 133.8 ± 41.7 і 136.1 ± 36.1 . Потужність циклу за 30 місяців від мінімуму найкраще корелює із величиною максимуму циклу. Це дозволяє зробити, ймовірно, найкращий на сьогодні прогноз максимуму поточного 25-го циклу — $W_{\max} = 136 \pm 36$.

Потужність сонячного циклу протягом перших декількох місяців від початку циклу також добре корелює із тривалістю фази росту циклу. На рис. 11 показано залежності тривалості фази росту циклу від потужностей сонячного циклу за перші 12, 18, 24 і 30 місяців. Відповідні коефіцієнти кореляції становлять -0.596 ($p = 0.0021$), -0.708 ($p =$

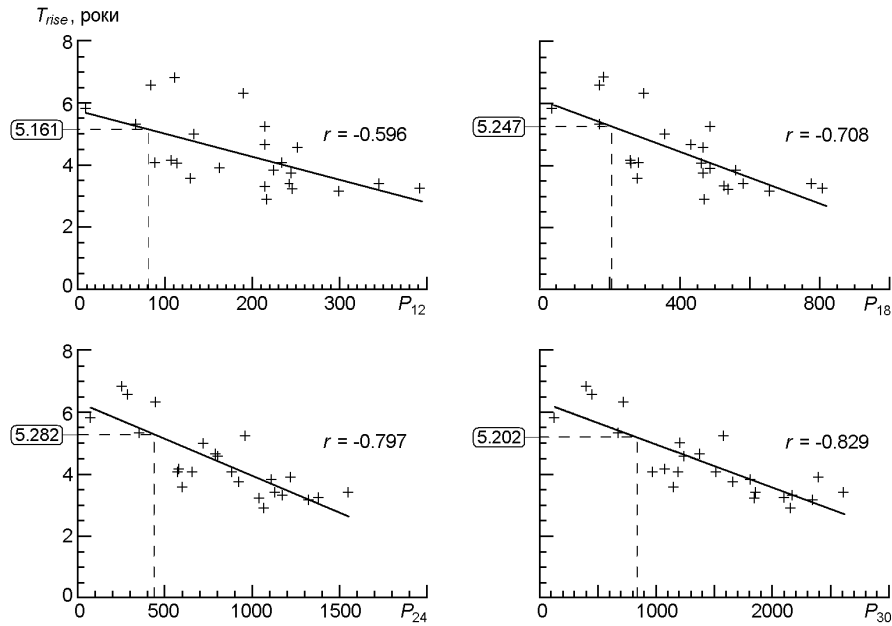


Рис. 11. Тривалість фази росту циклу (T_{rise}) від потужностей за 12, 18, 24 і 30 місяців від мінімуму ($P_{12}, P_{18}, P_{24}, P_{30}$). Штрихові лінії показують прогнозовані значення тривалості фази росту 25-го циклу

$= 1.1 \cdot 10^{-4}$), -0.797 ($p = 3.1 \cdot 10^{-6}$) і -0.829 ($p = 5.6 \cdot 10^{-7}$). Рівняння регресії мають такий вигляд:

$$T_{rise} = (5.7677 \pm 0.4471) + (-0.0075 \pm 0.0021) P_{12}, \quad (20)$$

$$T_{rise} = (6.1028 \pm 0.4063) + (-0.0042 \pm 0.0009) P_{18}, \quad (21)$$

$$T_{rise} = (6.3099 \pm 0.3464) + (-0.0024 \pm 0.0004) P_{24}, \quad (22)$$

$$T_{rise} = (6.3664 \pm 0.3174) + (-0.0014 \pm 0.0002) P_{30}. \quad (23)$$

Відповідні прогнозовані тривалості фази росту 25-го циклу становлять 5.161 ± 1.044 , 5.247 ± 0.914 , 5.282 ± 0.780 і 5.202 ± 0.718 . Останнє із цих прогнозованих значень вказує на те, що максимум 25-го циклу буде, найімовірніше, у лютому 2025 р.

Сумарна потужність за 36 місяців від початку циклу ще тісніше корелює із максимальною амплітудою і тривалістю фази росту циклу (відповідні коефіцієнти кореляції становлять 0.865 , $p = 5 \cdot 10^{-8}$ і -0.839 , $p = 3 \cdot 10^{-7}$), проте прогноз по потужності за 36 місяців можна буде зробити дещо пізніше, через кілька місяців.

Порівняння з іншими результатами. Розраховані у даній роботі прогнози максимуму 25-го сонячного циклу зібрано у табл. 1. Отримані нами прогнози вказують на те, що 25-й сонячний цикл буде активнішим від попереднього 24-го і слабшим від 23-го, що якісно

Таблиця 1. Прогнозовані максимуми 25-го циклу

Передвісник максимуму	Амплітуда максимуму	Час максимуму
Потужність попереднього циклу	155.6 ± 42.4	Серпень 2024 р.
Максимум попереднього циклу	172.1 ± 46.5	Червень 2024 р.
Тривалість попереднього циклу	181.5 ± 46.3	Квітень 2024 р.
Потужність за перші 12 місяців	139.4 ± 53.5	Лютий 2025 р.
Потужність за перші 18 місяців	137.0 ± 49.1	Березень 2025 р.
Потужність за перші 24 місяці	133.8 ± 41.7	Березень 2025 р.
Потужність за перші 30 місяців	136.1 ± 36.1	Лютий 2025 р.

узгоджується із переважною більшістю зроблених прогнозів [1, 3, 7, 8, 10, 16—18, 20, 22, 24—29, 32—34, 36, 39, 40, 45, 50, 51].

Зокрема, прогноз $W_{\max} = 155.6 \pm 42.4$ і 155.0 ± 48.9 (рівняння регресії (4) і (5)), зроблений за потужністю 24-го циклу, кількісно є близьким до прогнозів $W_{\max} = 147 \pm 30$ [29], 154 ± 12 [45], 143.6 ± 8.7 [51], а прогноз за максимальною амплітудою 24-го циклу (172.1 ± 46.5 і 177.1 ± 52.1 , рівняння регресії (8) і (9)) — близьким до величин 168.5 ± 16.3 і 185 ± 18 , отриманих відповідно у роботах [3] і [32]. До цих двох останніх прогнозів близьким також є прогноз максимуму 25-го циклу (181.5 ± 46.3 , рівняння регресії (13)) по тривалості 24-го циклу, зроблений на основі кореляції між максимумами циклів 2—24 і тривалістю попередніх циклів 1—23. (У нашій попередній роботі [1] було використано інше рівняння регресії, по тривалості циклів 0—23 і по максимумах циклів 1—24, і тому було отримано інше прогнозоване значення максимуму $W_{\max} = 179.4 \pm 18.2$).

Прогноз максимуму 25-го циклу по сумарній потужності за перші 30 місяців циклу $W_{\max} = 136 \pm 36$ (рівняння регресії (19)) є близьким до таких прогнозів: $W_{\max} = 137.8 \pm 31.3$ [16], 130 ± 31.9 [17], 135.5 ± 33.2 [18], 131 ± 14 і 137 ± 2 [20], $138...143$ [24], 130 ± 12 [26], 125 ± 32 [27], 136.9 ± 24 [28], 135 ± 25 [40].

Водночас у деяких недавніх роботах прогнозується, що 25-й сонячний цикл буде трохи слабшим від попереднього 24-го: $W_{\max} = 106 \pm 19.75$ [6], 99.13 ± 14.97 і 104.23 ± 17.35 [9], 100 ± 15 [11], 97.6 ± 7.8 [14], $89: 75...118$ [31], 110 ± 26 [44], 114.3 [49].

Прогноз максимальної амплітуди по різних півкулях, зроблений за величинами потужності для попереднього 24-го циклу, вказує на те, що південна півкуля буде дещо активнішою від північної; їхні прогнозовані максимуми становлять $W_{\max} = 91.7 \pm 29.7$ і 86.9 ± 41.1 відповідно (рівняння регресії (14) і (15)). Ці величини якісно узгоджуються з іншими прогнозами, хоча кількісно є трохи вищими від прогнозів, отриманих у роботах [5] (максимуми в N - і S -півкулях, N : 66 ± 17 , S : 83 ± 21), [19] (N : 84.0 ± 26.7 , S : 88.3 ± 16.8), [21] (N : 59 , S : 89), [26] (N : 57 ± 4.4 , S : 79 ± 6.8), [50] (N : $49: 31...71$, S : $72: 47...101$).

ВИСНОВКИ

Виконаний у даній роботі аналіз показав, що для прогнозування максимальної амплітуди згладженого місячного відносного числа сонячних плям у непарному циклі можна використовувати величини сумарної потужності і максимуму попереднього парного циклу. Отримані таким чином прогнози вказують на те, що максимальна амплітуда 25-го сонячного циклу в одиницях згладжених місячних значень становитиме $W_{\max} = 155.6 \pm 42.4$ (за потужністю 24-го циклу) і 172.1 ± 46.5 (за його максимумом) відповідно у серпні і червні 2024 р. Південна півкуля у 25-му циклі буде дещо активнішою від північної; прогнозовані максимуми в *N*- і *S*-півкулях становлять $W_{\max} = 86.9 \pm 41.1$ і 91.7 ± 29.7 відповідно.

Потужність і максимальну амплітуду парного циклу також можна оцінити за відповідними параметрами попереднього непарного циклу, хоча й з меншою ймовірністю.

У випадку, коли передвісником максимуму слугує тривалість попереднього циклу ($r = -0.703$, $p = 0.00018$), прогнозована амплітуда 25-го циклу становить $W_{\max} = 181.5 \pm 46.3$, а його максимум очікується у квітні 2024 р.

Знайдено, що потужність сонячного циклу за перші 30 місяців від його початку тісно корелює як із величиною наступного максимуму циклу ($r = 0.83$), так і з тривалістю фази росту циклу. Це дозволяє отримати найвірогідніший, на нашу думку, на сьогодні прогноз максимуму 25-го циклу — згладжене місячне число сонячних плям становитиме $W_{\max} = 136 \pm 36$ у лютому 2025 р.

Всі отримані в даній роботі прогнози вказують на те, що 25-й сонячний цикл буде вищим від попереднього 24-го циклу.

1. Васильєва І. Е., Пішкало М. І. Історія дослідження сонячних плям і прогноз максимуму 25-го циклу. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. 37, № 4. С. 60—78. doi:10.15407/kfnt2021.04.060
2. Гневышев М. Н., Оль А. И. О 22-летнем цикле солнечной активности. *Астрон. журн.* 1948. 25, № 1. С. 18—20.
3. Єфіменко В., Лозицький В. Прогноз максимуму 25-го циклу сонячної активності на основі даних про швидкість наростання кількості сонячних плям. *Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія.* 2022. 65, № 1. С. 35—39.
4. Пішкало М. І. Попередній прогноз 24-го і 25-го циклів сонячної активності на основі кореляції між характеристиками циклів. *Кінематика і фізика небес. тел.* 2008. 24, № 5. С. 370—378.
5. Пішкало М. І. Прогноз 25-го циклу сонячної активності: максимум у *N*- і *S*-півкулях. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. 37, № 1. С. 48—56. doi:10.15407/kfnt2021.01.048
6. Benson B., Pan W. D., Prasad A., Gary G. A., Hu Q. Forecasting solar cycle 25 using deep neural networks. *Solar Phys.* 2020. 295, № 5. Р. 65. doi:10.1007/s11207-020-01634-y
7. Bhowmik P., Nandy D. Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions. *Nature Comm.* 2018. 9, № 1. Р. 5209.

- doi:10.1038/s41467-018-07690-0
8. Brajša R., Verbanac G., Bandić M., Hanslmeier A., Skokić I., Sudar D. A prediction for the 25th solar cycle maximum amplitude. *Astron. Nachr.* 2022. 343, № 3. e13960. doi:10.1002/asna.202113960
 9. Burud D. S., Jain R., Awasthi A. K., Chaudhari S., Tripathy S. C., Gopalswamy N., Chamadia P., Kaushik S. C., Vhatkar R. Spotless days and geomagnetic index as the predictors of solar cycle 25. *Res. Astron. and Astrophys.* 2021. 21, № 9. P. 215. doi:10.1088/1674-4527/21/9/215
 10. Cameron R. H., Jiang J., Schüssler M. Solar cycle 25: Another moderate cycle? *Astrophys. J. Lett.* 2016. 823, № 2. P. L22. doi:10.3847/2041-8205/823/2/L22
 11. Chowdhury P., Jain R., Ray P. C., Burud D., Chakrabarti A. Prediction of amplitude and timing of solar cycle 25. *Solar Phys.* 2021. 296, № 4. P. 69. doi:10.1007/s11207-021-01791-8
 12. Clette F., Lefevre L. The new sunspot number: Assembling all corrections. *Solar Phys.* 2016. 291, № 9-10. P. 2629—2651. doi:10.1007/s11207-016-1014-y.
 13. 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, № 1-4. P. 35—103. doi:10.1007/s11214-014-0074-2
 14. Courtillot V., Lopes F., Le Mouél J. L. On the prediction of solar cycles. *Solar Phys.* 2021. 296, № 1. P. 21. doi:10.1007/s11207-020-01760-7
 15. Covas E., Peixinho N., Fernandes J. Neural network forecast of the sunspot butterfly diagram. *Solar Phys.* 2019. 294, № 3. P. 24. doi:10.1007/s11207-019-1412-z.
 16. Du Z. Predicting the shape of solar cycle 25 using a similar-cycle method. *Solar Phys.* 2020. 295, № 10. P. 134. doi:10.1007/s11207-020-01701-4
 17. Du Z. Predicting the amplitude of solar cycle 25 using the value 39 months before the solar minimum. *Solar Phys.* 2020. 295, № 10. P. 147. doi:10.1007/s11207-020-01720-1
 18. Du Z. Predicting the maximum amplitude of solar cycle 25 using the early value of the rising phase. *Solar Phys.* 2022. 297, № 5. P. 61. doi:10.1007/s11207-022-01991-w
 19. Du Z. Evolution of the correlation between the amplitude of the solar cycle and the sunspot number since the previous declining phase in both hemispheres. *Solar Phys.* 2022. 297, № 9. P. 117. doi:10.1007/s11207-022-02051-z
 20. Espuña Fontcuberta A., Ghosh A., Chatterjee S., Mitra D., Nandy D. Forecasting solar cycle 25 with physical model-validated recurrent neural networks. *Solar Phys.* 2023. 298, № 1. P. 8. doi:10.1007/s11207-022-02104-3
 21. Gopalswamy N., Mäkelä P., Yashiro S., Akiyama S. Long-term solar activity studies using microwave imaging observations and prediction for cycle 25. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. 176. 26—33. doi:10.1016/j.jastp.2018.04.005`
 22. Guo W., Jiang J., Wang J. X. A dynamo-based prediction of solar cycle 25. *Solar Phys.* 2021. 296, № 9. P. 136. doi:10.1007/s11207-021-01878-2
 23. Hathaway D. H. Solar cycle forecasting. *Space Sci. Rev.* 2009. 144, № 1-4. P. 401—412. doi:10.1007/s11214-008-9430-4
 24. Hazra G., Choudhuri A. R. A new formula for predicting solar cycles. *Astrophys. J.* 2020. 880, № 2. P. 113. doi:10.3847/1538-4357/ab2718
 25. Janssens J. Prediction of the amplitude of solar cycle 25 using polar faculae observations. *J. Space Weather Space Clim.* 2021. 11. 3. doi:10.1051/swsc/2020081
 26. Javaraiah J. Long-term variations in solar activity: Predictions for amplitude and north-south asymmetry of solar cycle 25. *Solar Phys.* 2022. 297, № 3. P. 33. doi:10.1007/s11207-022-01956-z

27. Jiang J., Wang J.-X., Jiao Q.-R., Cao J.-B. Predictability of the solar cycle over one cycle. *Astrophys. J.* 2018. 863, № 2. P. 159. doi:10.3847/1538-4357/aad197
28. Kakad B., Kumar R., Kakad A. Randomness in sunspot number: A clue to predict solar cycle 25. *Solar Phys.* 2020. 295, № 6. P. 88. doi:10.1007/s11207-020-01655-7
29. Kim Kwee Ng. Coronal mass ejections, solar cycles and magnetic poles reversal. *Amer. J. Astron. and Astrophys.* 2019. 7, № 1. P. 10—17. doi:10.11648/j.ajaa.20190701.12
30. Kitiashvili I. N. Application of synoptic magnetograms to global solar activity forecast. *Astrophys. J.* 2020. 890, № 1. P. 36. doi:10.3847/1538-4357/ab64e7
31. Labonville F., Charbonneau P., Lemerle A. A dynamo-based forecast of solar cycle 25. *Solar Phys.* 2019. 94, № 6. P. 82. doi:10.1007/s11207-019-1480-0.
32. Li F. Y., Kong D. F., Xie J. L., Xiang N. B., Xu J. C. Solar cycle characteristics and their application in the prediction of cycle 25. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. 181. 110—115.
doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682617306612.
33. Miao J., Wang X., Ren T.-L., Li Zh.-T. Prediction verification of solar cycles 18—24 and a preliminary prediction of the maximum amplitude of solar cycle 25 based on the precursor method. *Res. Astron. Astrophys.* 2020. 20, № 1. P. 4.
doi:10.1088/1674-4527/20/1/4
34. McIntosh S. W., Chapman S., Leamon R. J., Egeland R., Watkins N. W. Overlapping magnetic activity cycles and the sunspot number: forecasting sunspot cycle 25 amplitude. *Solar Phys.* 2020. 295, № 12. P. 163. doi:10.1007/s11207-020-01723-y
35. Nandy D. Progress in solar cycle predictions: sunspot cycles 24—25 in perspective. *Solar Phys.* 2021. 296, № 3. P. 54. doi:10.1007/s11207-021-01797-2
36. Okoh D. I., Seemala G. K., Rabi A. B., Uwamahoro J., Habarulema J. B., Aggarwal M. A hybrid regression-neural network (HR-NN) method for forecasting the solar activity. *Space Weather.* 2018. 16, № 9. P. 1424—1436.
doi:10.1029/2018SW001907
37. Pesnell W. D. Solar cycle predictions (Invited review). *Solar Phys.* 2012. 281, № 1. P. 507—532. doi:10.1007/s11207-012-9997-5.
38. Pesnell W. D. Predictions of solar cycle 24: How are we doing? *Space Weather.* 2016. 14, № 1. P. 10. doi:10.1002/2015SW001304
39. Pesnell W. D. Lessons learned from predictions of Solar Cycle 24. *J. Space Weather Space Clim.* 2020. 10. 60. doi:10.1051/swsc/2020060
40. Pesnell W. D., Schatten K. H. An early prediction of the amplitude of solar cycle 25. *Solar Phys.* 2018. 293, № 7. P. 112. doi:10.1007/s11207-018-1330-5
41. Petrovay K. Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 2010. 7, № 6. P. 59.
doi:10.12942/lrsp-2010-6.
42. Petrovay K. Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 2020. 17, № 1. P. 2.
doi:10.1007/s41116-020-0022-z.
43. Pishkalo M. I. Prediction of solar cycle 24 using sunspot number near the cycle minimum. *Solar Phys.* 2014. 289, № 5. P. 1815—1829. doi:10.1007/s11207-013-0398-1
44. Podladchikova T., Jain Sh., Veronig A. M., Sutyrina O., Dumbovič M., Clette F., Potzi W. Maximal growth rate of the ascending phase of a sunspot cycle for predicting its amplitude. *Astron. and Astrophys.* 2022. 663. A88.
doi:10.1051/0004-6361/202243509
45. Sarp V., Kilcik A., Yurchyshyn V., Rozelot J. P., Özgüc A. Prediction of solar cycle 25: a non-linear approach. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. 481, № 3. P. 2981—2985. doi:10.1093/mnras/sty2470
46. Thompson R. J. A technique for predicting the amplitude of the solar cycle. *Solar Phys.* 1993. 148, № 2. P. 383—388. doi:10.1007/BF00645097

47. Veronig A. M., Jain S., Podladchikova T., Potzi W., Clette F. Hemispheric sunspot numbers 1874—2020. *Astron. and Astrophys.* 2021. 652. A56. doi:10.1051/0004-6361/202141195
48. Waldmeier M. Neue Eigenschaften der Sonnenfleckenkurve. *Astron. Mitt. Zurich.* 1935. 14, № 133. P. 105—130.
49. Wang Q.-J., Li J.-C., Guo L.-Q. Solar cycle prediction using a long short-term memory deep learning model. *Res. Astron. and Astrophys.* 2021. 21, № 1. P. 12. doi:10.1088/1674-4527/21/1/12
50. Werner R., Guineva V. Forecasting sunspot numbers for solar cycle 25 using autoregressive models for both hemispheres of the Sun. *C. R. Acad. Bulg. Sci.* 2020. 73, № 1. P. 82—89. doi:10.7546/CRABS.2020.01.10
51. Zhu H., Zhu W., He M. Solar cycle 25 prediction using an optimized long short-term memory mode with F10.7. *Solar Phys.* 2022. 297, № 12. P. 157. doi:10.1007/s11207-022-02091-5

REFERENCES

1. Vasiljeva I. E., Pishkalo M. I. (2021) History of sunspot research and forecast of the maximum of solar cycle 25. *Kinemat. fiz. nebesnyh tel.* 37(4). 60—78. doi:10.15407/kfnt2021.04.060 [In Ukrainian].
2. Gnevyshev M. N., Ohl A. I. (1948) On the 22-year cycle of solar activity. *Astron. Zhurn.*, 25(1), 18—20 [in Russian].
3. Yefimenko V., Lozytskyi V. (2022) Prediction of the maximum of the 25th cycle of solar activity based on data on the rate of growth of the number of sunspots. *Visn. Kyiv. Univ. Astron.* 65(1). 35—39. [In Ukrainian].
4. Pishkalo M. I. (2008) Preliminary prediction of solar cycles 24 and 25 based on the correlation between cycle parameters. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 24(5). 242—247. doi:10.3103/S0884591308050036.
5. Pishkalo M. I. (2021) Prediction of solar cycle 25: maximum in the N- and S-hemispheres. *Kinemat. fiz. nebesnyh tel.* 37(1). 48—56. doi:10.15407/kfnt2021.01.048 [In Ukrainian].
6. Benson B., Pan W. D., Prasad A., Gary G. A., Hu Q. (2020) Forecasting solar cycle 25 using deep neural networks. *Solar Phys.* 295(5). 65. doi:10.1007/s11207-020-01634-y
7. Bhowmik P., Nandy D. (2018) Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions. *Nature Comm.* 9(1). 5209. doi:10.1038/s41467-018-07690-0
8. Brajša R., Verbanac G., Bandić M., Hanslmeier A., Skokić I., Sudar D. (2022) A prediction for the 25th solar cycle maximum amplitude. *Astron. Nachr.* 343(3). e13960. doi:10.1002/asna.202113960
9. Burud D. S., Jain R., Awasthi A. K., Chaudhari S., Tripathy S. C., Gopalswamy N., Chamadia P., Kaushik S. C., Vhatkar R. (2021) Spotless days and geomagnetic index as the predictors of solar cycle 25. *Res. Astron. and Astrophys.* 21(9). 215. doi:10.1088/1674-4527/21/9/215
10. Cameron R. H., Jiang J., Schüssler M. (2016) Solar cycle 25: Another moderate cycle? *Astrophys. J. Lett.* 823(2). L22. doi:10.3847/2041-8205/823/2/L22
11. Chowdhury P., Jain R., Ray P. C., Burud D., Chakrabarti A. (2021) Prediction of amplitude and timing of solar cycle 25. *Solar Phys.* 296(4). 69. doi:10.1007/s11207-021-01791-8

12. Clette F., Lefevre L. (2016) The new sunspot number: Assembling all corrections. *Solar Phys.* 291(9-10). 2629—2651. doi:10.1007/s11207-016-1014-y.
13. 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. doi:10.1007/s11214-014-0074-2
14. Courtillot V., Lopes F., Le Mouél J. L. (2021) On the prediction of solar cycles. *Solar Phys.* 296(1). 21. doi:10.1007/s11207-020-01760-7
15. Covas E., Peixinho N., Fernandes J. (2019) Neural network forecast of the sunspot butterfly diagram. *Solar Phys.* 294(3). 24. doi:10.1007/s11207-019-1412-z.
16. Du Z. (2020) Predicting the shape of solar cycle 25 using a similar-cycle method. *Solar Phys.* 295(10). 134. doi:10.1007/s11207-020-01701-4
17. Du Z. (2020) Predicting the amplitude of solar cycle 25 using the value 39 months before the solar minimum. *Solar Phys.* 295(10). 147. doi:10.1007/s11207-020-01720-1
18. Du Z. (2022) Predicting the maximum amplitude of solar cycle 25 using the early value of the rising phase. *Solar Phys.* 297(5). 61. doi:10.1007/s11207-022-01991-w
19. Du Z. (2022) Evolution of the correlation between the amplitude of the solar cycle and the sunspot number since the previous declining phase in both hemispheres. *Solar Phys.* 297(9). 117. doi:10.1007/s11207-022-02051-z
20. Espuña Fontcuberta A., Ghosh A., Chatterjee S., Mitra D., Nandy D. (2023) Forecasting solar cycle 25 with physical model-validated recurrent neural networks. *Solar Phys.* 298(1). 8. doi:10.1007/s11207-022-02104-3
21. Gopalswamy N., Mäkelä P., Yashiro S., Akiyama S. (2018) Long-term solar activity studies using microwave imaging observations and prediction for cycle 25. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 176. 26—33. doi:10.1016/j.jastp. 2018. 04. 005
22. Guo W., Jiang J., Wang J. X. (2021) A dynamo-based prediction of solar cycle 25. *Solar Phys.* 296(9). 136. doi:10.1007/s11207-021-01878-2
23. Hathaway D. H. (2009) Solar cycle forecasting. *Space Sci. Rev.* 2009. 144(1-4). 401—412. doi:10.1007/s11214-008-9430-4
24. Hazra G., Choudhuri A. R. (2020) A new formula for predicting solar cycles. *Astrophys. J.* 880(2). 113. doi:10.3847/1538-4357/ab2718
25. Janssens J. (2021) Prediction of the amplitude of solar cycle 25 using polar faculae observations. *J. Space Weather Space Clim.* 11. 3. doi:10.1051/swsc/2020081
26. Javaraiah J. (2022) Long-term variations in solar activity: Predictions for amplitude and north-south asymmetry of solar cycle 25. *Solar Phys.* 297(3). 33. doi:10.1007/s11207-022-01956-z
27. Jiang J., Wang J.-X., Jiao Q.-R., Cao J.-B. (2018) Predictability of the solar cycle over one cycle. *Astrophys. J.* 863(2). 159. doi:10.3847/1538-4357/aad197
28. Kakad B., Kumar R., Kakad A. (2020) Randomness in sunspot number: A clue to predict solar cycle 25. *Solar Phys.* 295(6). 88. doi:10.1007/s11207-020-01655-7
29. Kim Kwee Ng. (2019) Coronal mass ejections, solar cycles and magnetic poles reversal. *Amer. J. Astron. and Astrophys.* 7(1). 10—17. doi:10.11648/j.ajaa.20190701.12
30. Kitiashvili I. N. (2020) Application of synoptic magnetograms to global solar activity forecast. *Astrophys. J.* 890(1). 36. doi:10.3847/1538-4357/ab64e7
31. Labonville F., Charbonneau P., Lemerle A. (2019) A dynamo-based forecast of solar cycle 25. *Solar Phys.* 294(6). 82. doi:10.1007/s11207-019-1480-0.
32. Li F. Y., Kong D. F., Xie J. L., Xiang N. B., Xu J. C. (2018) Solar cycle characteristics and their application in the prediction of cycle 25. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 181. 110—115. doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682617306612.

33. Miao J., Wang X., Ren T.-L., Li Zh.-T. (2020) Prediction verification of solar cycles 18—24 and a preliminary prediction of the maximum amplitude of solar cycle 25 based on the precursor method. *Res. Astron. Astrophys.* 20(1). 4. doi:10.1088/1674-4527/20/1/4
34. McIntosh S. W., Chapman S., Leamon R. J., Egeland R., Watkins N. W. (2020) Overlapping magnetic activity cycles and the sunspot number: forecasting sunspot cycle 25 amplitude. *Solar Phys.* 295(12). 163. doi:10.1007/s11207-020-01723-y
35. Nandy D. (2021) Progress in solar cycle predictions: sunspot cycles 24—25 in perspective. *Solar Phys.* 296(3). 54. doi:10.1007/s11207-021-01797-2
36. Okoh D. I., Seemala G. K., Rabi A. B., Uwamahoro J., 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. doi:10.1029/2018SW001907
37. Pesnell W. D. (2012) Solar cycle predictions (Invited review). *Solar Phys.* 281(1). 507—532. doi:10.1007/s11207-012-9997-5.
38. Pesnell W. D. (2016) Predictions of solar cycle 24: How are we doing? *Space Weather.* 14(1). 10. doi:10.1002/2015SW001304
39. Pesnell W. D. (2020) Lessons learned from predictions of Solar Cycle 24. *J. Space Weather Space Clim.* 10. 60. doi:10.1051/swsc/2020060
40. Pesnell W. D., Schatten K. H. (2018) An early prediction of the amplitude of solar cycle 25. *Solar Phys.* 293(7). 112. doi:10.1007/s11207-018-1330-5
41. Petrovay K. (2010) Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 7(6). 59. doi:10.12942/lrsp-2010-6.
42. Petrovay K. (2020) Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 17(1). 2. doi:10.1007/s41116-020-0022-z.
43. Pishkalo M. I. (2014) Prediction of solar cycle 24 using sunspot number near the cycle minimum. *Solar Phys.* 289(5). 1815—1829. doi:10.1007/s11207-013-0398-1
44. Podladchikova T., Jain Sh., Veronig A. M., Sutyryna O., Dumbovič M., Clette F., Potzi W. (2022) Maximal growth rate of the ascending phase of a sunspot cycle for predicting its amplitude. *Astron. and Astrophys.* 663. A88. doi:10.1051/0004-6361/202243509
45. Sarp V., Kilcik A., Yurchyshyn V., Rozelot J. P., Özgöç A. (2018) Prediction of solar cycle 25: a non-linear approach. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 481(3). 2981—2985. doi:10.1093/mnras/sty2470
46. Thompson R. J. (1993) A technique for predicting the amplitude of the solar cycle. *Solar Phys.* 148(2). 383—388. doi:10.1007/BF00645097
47. Veronig A. M., Jain S., Podladchikova T., Potzi W., Clette F. (2021) Hemispheric sunspot numbers 1874—2020. *Astron. and Astrophys.* 652. A56. doi:10.1051/0004-6361/202141195
48. Waldmeier M. (1935) Neue Eigenschaften der Sonnenfleckenkurve. *Astron. Mitt. Zurich.* 14(133). 105—130.
49. Wang Q.-J., Li J.-C., Guo L.-Q. (2021) Solar cycle prediction using a long short-term memory deep learning model. *Res. Astron. and Astrophys.* 21(1). 12. doi:10.1088/1674-4527/21/1/12
50. Werner R., Guineva V. (2020) Forecasting sunspot numbers for solar cycle 25 using autoregressive models for both hemispheres of the Sun. *C. R. Acad. Bulg. Sci.* 73(1). 82—89. doi:10.7546/CRABS. 2020.01.10
51. Zhu H., Zhu W., He M. (2022) Solar cycle 25 prediction using an optimized long short-term memory mode with F10.7. *Solar Phys.* 297(12). 157. doi:10.1007/s11207-022-02091-5

M. I. Pishkalo, I. E. Vasiljeva

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

PREDICTION OF MAXIMUM OF SOLAR CYCLE 25: TOTAL POWER AT THE CYCLE BEGINNING AND IN THE PREVIOUS CYCLE AS PRECURSOR

Solar activity, the most famous manifestation of which is sunspots, varies with a period of about 11 years. Two 11-year cycles form the 22-year magnetic cycle of the Sun. Changes in solar activity cause changes in the interplanetary and near-Earth space, affect the Earth and the human environment. The ability to predict solar activity in advance is important both for some practical tasks of cosmonautics and for a better understanding of the nature of those physical processes at the Sun which are responsible for the solar activity. In the work, the interrelationship of the powers (sum of the monthly sunspot numbers in the cycle) of pairs of «even-numbered to odd-numbered» and «odd-numbered to even-numbered» cycles was investigated, and an attempt was made to forecast the maximum of the current solar cycle 25, which began in December 2019, using the value of the total power of the previous solar cycle 24. It was found that there is a significant correlation between the power and amplitude of the odd-numbered cycle and the power of the previous even-numbered cycle ($r = 0.897$, $p = 0.00043$ and $r = 0.785$, $p = 0.00715$, respectively; if excluding the pair of cycles 4—5). A slightly smaller correlation is observed between the amplitude of the odd-numbered cycle and the amplitude of the previous even-numbered cycle ($r = 0.712$, $p = 0.0209$). Regression equations between the relevant parameters were found. The calculated predicted amplitude of the solar cycle 25 is 155.6 ± 42.4 (according to the power of solar cycle 24) and 172.1 ± 46.5 (according to its maximum) in August 2024 and June 2024, respectively. For solar cycles 12 to 24, the relationship of the same parameters was investigated separately in the *N*- and *S*-hemispheres. It was also found that in the solar cycle 25 the southern hemisphere will be somewhat more active than the northern one; the predicted maxima in the *N*- and *S*-hemispheres are 86.9 ± 41.1 and 91.7 ± 29.7 , respectively. The power of the solar cycle in the first 30 months from its beginning is closely correlated ($r = 0.83$, $p = 5 \cdot 10^{-7}$) both with the amplitude of the next maximum of the cycle and with the duration of the rising phase of the cycle. This makes it possible to obtain, in our opinion, the most probable forecast of the maximum of the solar cycle 25 for today, i. e. 136 ± 36 in February 2025. All predictions obtained in this work indicate that the solar cycle 25 will be higher than the previous solar cycle 24.

Key words: Sun, solar activity, solar cycle, prediction of solar cycle

Стаття надійшла до редакції 18.03.2023

Після доопрацювання 08.04.2023

Прийнята до друку 12.04.2023