

УДК 523.9

М. Пішало, канд. фіз.-мат. наук
КНУ імені Тараса Шевченка, КиївРЕВІЗОВАНЕ ВІДНОСНЕ ЧИСЛО СОНЯЧНИХ ПЛЯМ
І ПРОГНОЗ 25-го ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Знайдено параметри сонячних циклів після ревізії чисел Вольфа 2015 р. Досліджено кореляційні зв'язки між різними параметрами сонячного циклу. На основі отриманих рівнянь регресії зроблено прогноз 25-го циклу сонячної активності. Прогнозується, що мінімум циклу становитиме 8.3 у травні 2020 р., а максимум – 166.7 у листопаді 2024 р. – лютому 2025 р.

Вступ. Відомо, що сонячна активність змінюється з періодом близько 11 років. Сонячні цикли суттєво різняться своєю амплітудою і тривалістю. Зміни сонячної активності викликають зміни в міжпланетному та навколоземному просторі, які, у свою чергу, певним чином впливають на функціонування космічних та наземних технологічних систем, на життєдіяльність живих організмів на Землі, на клімат. Найчастіше сонячну активність характеризують відносним числом сонячних плям або числом Вольфа. Спостережний ряд відносного числа сонячних плям є на даний час чи не найдовшим спостережним рядом, що характеризує сонячну активність і дозволяє досліджувати довготривалий вплив сонячної активності на клімат та інші процеси на Землі.

3 липня 2015 р. Міжнародний Центр Даних при Бельгійській Королівській Обсерваторії підтримує новий, ревізований ряд відносного числа сонячних плям. Детальну інформацію про необхідність такої ревізії і про те, як вона була зроблена, можна знайти у роботі [2]. Основні зміни полягають у наступному:

- за основу взято спостережний ряд Альфреда Вольфера, а не Рудольфа Вольфа, це приблизно в $\frac{1}{0.6}$ разів збільшує більш ранні значення, роблячи їх співмірними із сучасними оцінками;
- значення після 1947 р., коли Максом Вальдмайєром при визначенні відносного числа сонячних плям були введені "ваги" відповідно до розміру плям, виправлені;
- знайдено змінний тренд у спостереженнях обсерваторії Локарно, яка була реперною обсерваторією після 1980 р., і усунуто його.

У даній роботі ми досліджуємо відмінності, що існують між попереднім і ревізованим рядами чисел Вольфа і кореляційні зв'язки між параметрами сонячного циклу, що випливають із ревізованого ряду. За знайденими кореляційними зв'язками зроблено попередній прогноз 25-го циклу сонячної активності.

Спостережені дані. Ряди місячних значень відносного числа сонячних плям взяті на сайті Бельгійській Королівській Обсерваторії (<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>). Вони містять інформацію про час на середину місяця і величину відносного числа плям. На рис. 1 подано хід місячного згладженого відносного числа сонячних плям від часу після 1749 р. Тонші і товщі лінії зображають попередню і новішу, ревізовану версію відносного числа сонячних плям W.

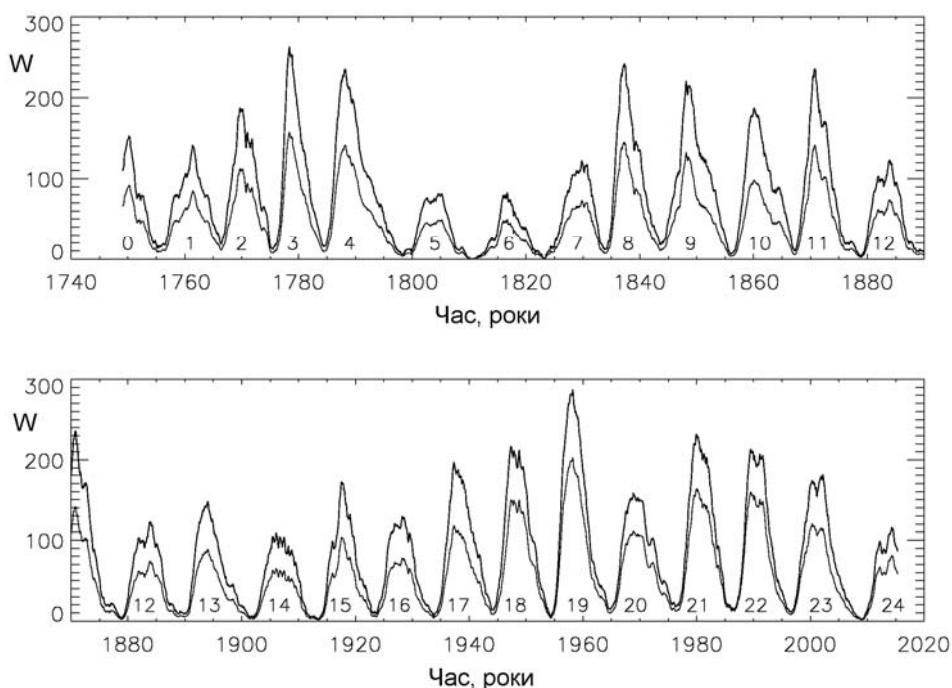


Рис. 1. Зміна з часом місячного згладженого відносного числа сонячних плям W. Товща лінія, що лежить вище, характеризує ревізований ряд. Вказані номери циклів сонячної активності.

Результати. У таблиці 1 наведені час та значення мінімумів (T_{min} , R_{min}) і максимумів (T_{max} , R_{max}) сонячної активності, що випливають із аналізу ревізованого ряду, а також тривалості фази росту (T_{rise}) та спаду (T_{fall}) циклу і повної тривалості циклу (T_{cycle}). Середнє значення числа Вольфа у мінімумі та максимумі циклу становить відповідно 9.3 і 177.7, середня тривалість фази росту, фази спаду і повної тривалості циклу – 4.471, 6.625 та 11.019 року відповідно.

© Пішало М., 2016

но. У порівнянні із попереднім рядом чисел Вольфа моменти мінімуму та максимуму циклу часто зміщуються назад чи вперед на один-два місяці. У 23-му циклі сонячної активності вищим стає другий, а не перший максимум (рис. 2).

Відношення "нових" і "старих" місячних і місячних згладжених значень наведено на рис. 3 відповідно тонкою і жирною лініями. На верхній панелі – за весь час з 1749 р., на нижній панелі – з 1980 р., коли реперною у визначенні міжнародного відносного числа сонячних плям була спостережна сонячна станція в Локарно. На нижній панелі рис. 3 видно, що розкид відношення між "новими" і "старими" значеннями зростає біля мінімуму циклу (1986, 1996 і 2009 pp).

Таблиця 1. Характеристики сонячних циклів після ревізії у липні 2015 р.

Номер циклу	T_{min}	R_{min}	T_{max}	R_{max}	T_{rise}	T_{fall}	T_{cycle}
0	1744.500	8.3	1750.288	154.3	5.788	4.835	10.623
1	1755.123	14.0	1761.455	144.1	6.332	5.000	11.332
2	1766.455	18.6	1769.707	193.0	3.252	5.748	9.000
3	1775.455	12.0	1778.371	264.3	2.916	6.337	9.253
4	1784.708	15.9	1788.124	235.3	3.416	10.164	13.580
5	1798.288	5.3	1805.123	82.0	6.835	5.415	12.250
6	1810.538	0.0	1816.373	81.2	5.835	6.998	12.833
7	1823.371	0.1	1829.874	119.2	6.503	4.000	10.503
8	1833.874	12.2	1837.204	244.9	3.330	6.334	9.664
9	1843.538	17.6	1848.124	219.9	4.586	7.834	12.420
10	1855.958	6.0	1860.124	186.2	4.166	7.080	11.246
11	1867.204	9.9	1870.623	234.0	3.419	8.335	11.754
12	1878.958	3.7	1883.958	124.4	5.000	5.000	10.000
13	1888.958	8.8	1894.042	146.5	5.084	8.000	13.084
14	1902.042	4.5	1906.204	106.4	4.162	7.334	11.496
15	1913.538	2.5	1917.623	175.7	4.085	5.915	10.000
16	1923.538	9.4	1928.290	130.2	4.752	5.417	10.169
17	1933.707	5.8	1937.288	198.6	3.581	6.836	10.417
18	1944.124	12.9	1947.371	218.7	3.247	6.917	10.164
19	1954.288	5.1	1958.204	285.0	3.816	6.587	10.503
20	1964.791	14.3	1968.874	156.6	4.083	7.332	11.415
21	1976.206	17.8	1979.958	232.9	3.752	6.749	10.501
22	1986.707	13.5	1989.874	212.5	3.1667	6.750	9.917
23	1996.624	11.2	2001.874	180.3	5.250	7.084	12.334
24	2008.958	2.2	2014.288	116.4	5.330		
Середнє		9.3		177.7	4.471	6.625	11.019

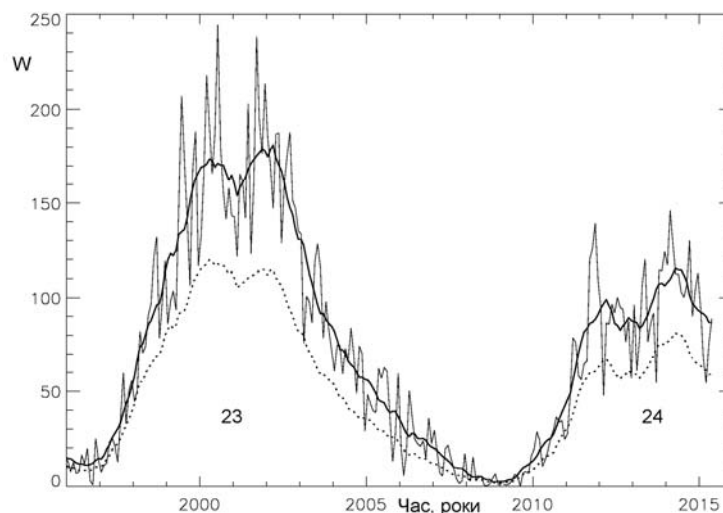


Рис. 2. Відносне число сонячних плям у 23-му і 24-му циклах. Місячні і місячні згладжені "нові" значення показані суцільними лініями, "старі" згладжені значення – лінією крапками

Нами також було проаналізовано кореляційні зв'язки між параметрами сонячного циклу ревізованого ряду чисел Вольфа. Коефіцієнти кореляції між різними характеристиками циклу наведено у табл. 2. У цій же таблиці у дужках наведено значення відповідних коефіцієнтів кореляції для "старих" чисел Вольфа згідно із роботою [1]. Детальніше інформація про коефіцієнти кореляції між параметрами циклів і відповідні рівняння регресії (з похибками $\pm 1\sigma$) наведена у таблиці 3. Третя і четверта колонки у цій таблиці містять значення статистики $t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2}$, де r – значення коефіцієнта кореляції, n – кількість значень у дослідженій сукупності, та ймовірності помилкової кореляції P , розраховані на основі даної статистики.

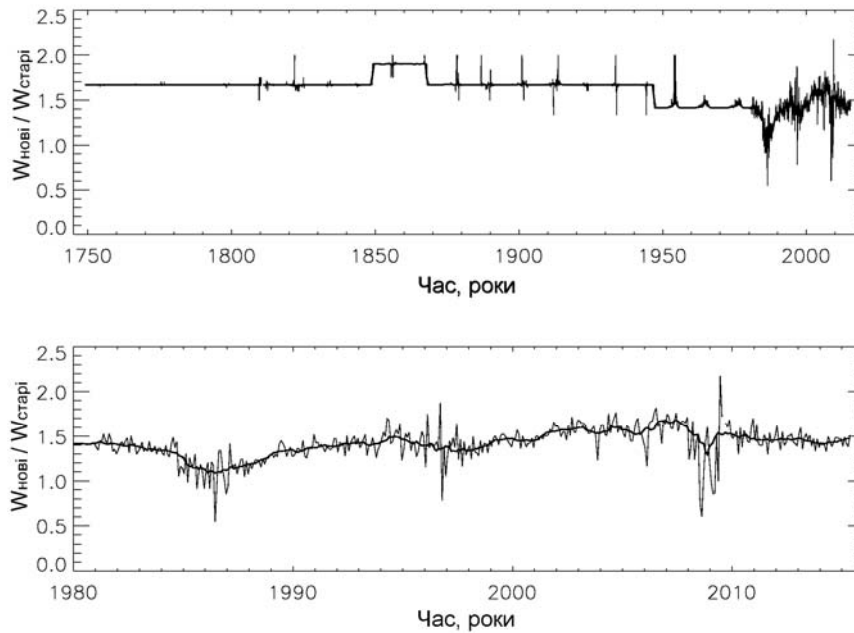


Рис. 3. Відношення між "новими" і "старими" значеннями чисел Вольфа

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції між параметрами циклів

	W_{min}	W_{max}	T_{rise}	T_{fall}	T_{cycle}	$T_{cycle}(-1)$
W_{min}	1	0.555 (0.56)	-0.488 (-0.55)	0.373 (0.35)	-0.058 (-0.17)	-0.595 (-0.56)
W_{max}	0.555	1	-0.779 (-0.82)	0.414 (0.43)	-0.297 (-0.35)	-0.670 (-0.62)
T_{rise}	-0.488	-0.779	1	-0.532 (-0.52)	0.426 (0.41)	0.573 (-0.19)
T_{fall}	0.373	0.414	-0.532	1	0.561 (0.55)	-0.455 (0.27)
T_{cycle}	-0.058	-0.297	0.426	0.561	1	0.024 (0.10)
$T_{cycle}(-1)$	-0.595	-0.670	0.573	-0.455	0.024	1

Таблиця 3. Деякі кореляційні зв'язки між параметрами циклів

Параметри	Коефіцієнт кореляції	Параметр t	P	Рівняння регресії	Номер рівняння
$W_{min}(0:23) \rightarrow W_{max}(0:23)$	0.528	2.92	<0.01	$Y=(128.42 \pm 20.40) + (5.42 \pm 1.86) \times X$	1
$W_{min}(1:23) \rightarrow W_{max}(1:23)$	0.526	2.83	<0.01	$Y=(129.60 \pm 21.03) + (5.39 \pm 1.90) \times X$	2
$W_{min}(0:24) \rightarrow W_{max}(0:24)$	0.556	3.21	<0.005	$Y=(125.37 \pm 18.97) + (5.65 \pm 1.76) \times X$	3
$W_{min}(1:24) \rightarrow W_{max}(1:24)$	0.555	3.13	<0.005	$Y=(126.34 \pm 19.51) + (5.63 \pm 1.80) \times X$	4
$W_{max}(0:23) \rightarrow T_{rise}(0:23)$	-0.768	5.63	<0.001	$Y=(7.272 \pm 0.527) + (-0.016 \pm 0.003) \times X$	5
$W_{max}(1:23) \rightarrow T_{rise}(1:23)$	-0.772	5.57	<0.001	$Y=(7.168 \pm 0.525) + (-0.015 \pm 0.003) \times X$	6
$W_{max}(0:24) \rightarrow T_{rise}(0:24)$	-0.775	5.88	<0.001	$Y=(7.252 \pm 0.496) + (-0.016 \pm 0.003) \times X$	7
$W_{max}(1:24) \rightarrow T_{rise}(1:24)$	-0.780	5.85	<0.001	$Y=(7.159 \pm 0.493) + (-0.015 \pm 0.003) \times X$	8
$T_{rise}(0:23) \rightarrow T_{fall}(0:23)$	-0.533	2.96	<0.01	$Y=(9.366 \pm 0.959) + (-0.618 \pm 0.209) \times X$	9
$T_{rise}(1:23) \rightarrow T_{fall}(1:23)$	-0.497	2.63	<0.02	$Y=(9.203 \pm 0.983) + (-0.571 \pm 0.217) \times X$	10
$T_{fall}(0:23) \rightarrow T_{cycle}(0:23)$	0.556	3.14	<0.005	$Y=(7.614 \pm 1.107) + (0.514 \pm 0.164) \times X$	11
$T_{fall}(1:23) \rightarrow T_{cycle}(1:23)$	0.561	3.11	<0.01	$Y=(7.419 \pm 1.186) + (0.540 \pm 0.174) \times X$	12
$T_{cycle}(-1)(0:22) \rightarrow W_{min}(1:23)$	-0.570	3.18	<0.005	$Y=(37.991 \pm 8.983) + (-2.589 \pm 0.815) \times X$	13
$T_{cycle}(-1)(0:23) \rightarrow W_{min}(1:24)$	-0.595	3.47	<0.005	$Y=(39.406 \pm 8.718) + (-2.732 \pm 0.786) \times X$	14
$T_{cycle}(-1)(1:22) \rightarrow W_{min}(2:23)$	-0.569	3.09	<0.01	$Y=(37.424 \pm 9.109) + (-2.552 \pm 0.825) \times X$	15
$T_{cycle}(-1)(1:23) \rightarrow W_{min}(2:24)$	-0.594	3.38	<0.005	$Y=(38.782 \pm 8.832) + (-2.690 \pm 0.795) \times X$	16
$T_{cycle}(-1)(0:22) \rightarrow W_{max}(1:23)$	-0.652	3.94	<0.001	$Y=(513.40 \pm 84.87) + (-30.29 \pm 7.70) \times X$	17
$T_{cycle}(-1)(0:23) \rightarrow W_{max}(1:24)$	-0.670	4.23	<0.001	$Y=(521.99 \pm 81.69) + (-31.16 \pm 7.37) \times X$	18
$T_{cycle}(-1)(1:22) \rightarrow W_{max}(2:23)$	-0.669	4.03	<0.001	$Y=(521.07 \pm 84.76) + (-30.79 \pm 7.67) \times X$	19
$T_{cycle}(-1)(1:23) \rightarrow W_{max}(2:24)$	-0.685	4.31	<0.001	$Y=(530.09 \pm 81.34) + (-31.71 \pm 7.35) \times X$	20
$T_{cycle}(-1)(0:22) \rightarrow T_{rise}(1:23)$	0.490	2.58	<0.02	$Y=(-0.603 \pm 1.944) + (0.454 \pm 0.176) \times X$	21
$T_{cycle}(-1)(0:23) \rightarrow T_{rise}(1:24)$	0.509	2.78	<0.02	$Y=(-0.724 \pm 1.864) + (0.466 \pm 0.168) \times X$	22
$T_{cycle}(-1)(1:22) \rightarrow T_{rise}(2:23)$	0.553	2.97	<0.01	$Y=(-0.943 \pm 1.774) + (0.477 \pm 0.161) \times X$	23
$T_{cycle}(-1)(1:23) \rightarrow T_{rise}(2:24)$	0.573	3.20	<0.005	$Y=(-1.086 \pm 1.703) + (0.71 \pm 0.173) \times X$	24

Використовуючи знайдені кореляційні зв'язки між параметрами сонячних циклів, можна спрогнозувати, яким і коли буде максимум наступного, 25-го сонячного циклу.

Спершу користавшись тим, що коефіцієнт кореляції між тривалістю фази росту і фази спаду циклу становить – 0.532, і взявши відповідне рівняння регресії (9) із таблиці 3 та знаючи тривалість фази росту 24-го циклу, яка стано-

вить 5.330 р., отримуємо, що тривалість фази спаду 24-го циклу становитиме (6.072 ± 2.073) р., і тоді повна тривалість 24-го циклу становитиме 11.402 р. Отже, мінімум наступного, 25-го циклу сонячної активності відбудеться у 2020.360 р., тобто у травні 2020 р.

Величину сонячної активності у мінімумі можна знайти із кореляційного зв'язку між тривалістю сонячного циклу і числом Вольфа у мінімумі наступного циклу (коефіцієнт кореляції становить -0.595). Підставивши у відповідне рівняння регресії (14) тримане нами значення тривалості 24-го циклу, маємо $W_{min}(25) = 8.3 \pm 0.3$.

З рівняння регресії (18) між W_{max} і $T_{cycle}(-1)$, коефіцієнт кореляції між якими становить -0.670), отримуємо, що $W_{max}(25) = 166.7 \pm 2.4$.

Далі з рівняння регресії (24) між тривалістю фази росту циклу T_{rise} і тривалістю попереднього циклу $T_{cycle}(-1)$ (коефіцієнт кореляції становить -0.573) випливає, що тривалість фази росту 25-го циклу становитиме $T_{rise}(25) = 4.512 \pm 3.447$ р. Тобто, максимум 25-го циклу сонячної активності величиною біля 166.7 одиниць у числах Вольфа очікується у листопаді 2024 р. (2024.872 р.).

Тривалість фази росту 25-го циклу можна оцінити інакше. Із рівняння регресії (8) між T_{rise} і W_{max} , коефіцієнт кореляції між якими становить -0.780 , отримуємо, що $T_{rise}(25) = 4.659 \pm 0.993$. Взявши час мінімуму циклу 2020.360, матимемо, що час максимуму циклу становитиме 2025.019. Тобто, максимум 25-го циклу настане у січні-лютому 2025 р.

Отже, 25-й цикл сонячної активності розпочнеться у травні 2020 р. і досягне максимуму у листопаді 2024 р. – лютому 2025 р. Величина числа Вольфа у мінімумі і максимумі циклу становитиме 8.3 і 166.7 відповідно. Ці величини, поділені на 1.5, становлять 5.5 і 111.1 відповідно і є прогнозованими значеннями у старій, неревізованій системі. Отримане значення прогнозу максимуму 25-го циклу узгоджується із більш раннім нашим прогнозом [3].

Список використаних джерел

1. Пішкало М.І. Попередній прогноз 24-го і 25-го циклів сонячної активності на основі кореляції між характеристиками циклів // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – Т. 24, № 5. – С. 370–378.
2. 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.
3. 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.

Надійшла до редколегії 06.11.15

М. Пішкало, канд. физ.-мат. наук,
Астрономическая обсерватория Киевского университета имени Тараса Шевченко

РЕВИЗОВАННОЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ЧИСЛО СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И ПРОГНОЗ 25-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Найденны параметры солнечных циклов после ревизии чисел Вольфа 2015 г. Исследовано корреляционные связи между разными параметрами солнечного цикла. На основе полученных уравнений регрессии сделан прогноз 25-го цикла солнечной активности. Прогнозируется, что минимум цикла будет составлять 8.3 в мае 2020 г., а максимум – 166.7 в ноябре 2024 г. – феврале 2025 г.

M. Pishkalo, Ph.D.
Astronomical observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv

REVISITED SUNSPOT NUMBERS AND PREDICTION OF SOLAR CYCLE 25

Parameteres of solar cycles are found usind revisited sunspot numbers in 2015. Correlations between cycle parameters were studied. Solar cycle 25 was predicted using regression equations obtained. I was predicted that minimum and maximum of the cycle (8.3 and 166.7) will occur in May of 2020 and November 2024 to February 2025 respectively.

УДК 523.98

В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук,
В. Лоцицький, д-р фіз.-мат. наук

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

СТАТИСТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ 24-ГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Поточний цикл сонячної активності № 24 є аномальним у таких відношеннях: 1) він має немонотонну фазу росту і на різних ділянках цієї фази проявляє себе то як середній, то як слабкий цикл, 2) вершина циклу виявилась "двогорбою", причому другий максимум був вищим, ніж перший, на 15 одиниць згладжених чисел Вольфа (у старій системі), що є рекордно великим значенням для усіх попередніх циклів і 3) часовий інтервал між першим і другим максимумами циклу (26 місяців) є другим по величині з усіх 24 останніх циклів. Щодо показника інтегрального розподілу для діаметрів сонячних плям, то раніш було встановлено, що для 7 останніх циклів цей показник α в діапазоні діаметрів 50–90 Мм дорівнює, в середньому, $\alpha \approx 6.0$. Статистичний аналіз діаметрів сонячних плям за 2010–2015 рр. показав, що для поточного циклу $\alpha \approx 5.8$. Таким чином, дисперсія діаметрів сонячних плям у 24-му циклі є типовою для більшості сонячних циклів.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, сонячні плями, інтегральний розподіл діаметрів сонячних плям, статистичні особливості 24-го циклу.

Вступ. Сонячна активність є дуже складним явищем в атмосфері Сонця, пов'язаним з впливанням на його поверхню концентрованих магнітних полів, з магнітним потоком типowo 10^{22} Мкс для однієї активної області. Активним областям на фотосферному рівні відповідають сонячні плями і факели, на хромосферному – хромосферні факели (флюкули), а на корональному – корональні конденсації й петельні або шоломовидні структури, що містять підсилене магнітне поле, а також ущільнену й більш гарячу плазму [5]. Саме в активних областях найчастіше виникають сонячні спалахи – вибухоподібні спорадичні процеси в його атмосфері, пов'язані з раптовим перетворенням магнітної енергії в енергію інших форм (електромагнітного випромінювання, нагріву плазми, прискорення часток до високих енергій, ударних хвиль, корональних викидів маси в міжпланетний простір).

© Єфіменко В., Лоцицький В., 2016