

ЗВ'ЯЗОК МІЖ СПАЛАХОВОЮ АКТИВНІСТЮ Й МАГНІТНОЮ СКЛАДНІСТЮ АКТИВНИХ ДІЛЯНОК НА СОНЦІ

А. І. Присяжний^{ORCID}, О. А. Баран^{ORCID}

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна,
e-mails: andrii.prysiaznyi@lnu.edu.ua; oleksandra.baran@lnu.edu.ua

(Отримано 06 вересня 2022 р.; в остаточному вигляді — 27 вересня 2022 р.; прийнято до друку — 14 жовтня 2023 р.; опубліковано онлайн — 07 лютого 2023 р.)

У статті на основі об'єднаного масиву даних із SolarMonitor та GOES/XRS проведено статистичний аналіз вибраних параметрів активних ділянок (АД), які спостерігали протягом 23–24-го циклів сонячної активності (СА). Виявлено кореляцію між площею АД та інтегральним потоком м'якого рентгенівського випромінювання від спалахів у цій ділянці. Підтверджено, що інтенсивність спалахоутворення залежить від класу магнітної складності АД: виникнення спалахів більшої величини корелює з утворенням магнітно складніших АД. Знайдено, що кількість спалахів класів С, М, Х збільшується в околі максимальної фази сонячного циклу, а найбільша кількість спалахів класу В виявлена на фазах зростання й спадання СА. У роки максимуму СА принаймні для класів В та С збільшується відносна кількість спалахів, що виникають в АД з комплексною магнітною конфігурацією; відносна кількість спалахів класу Х суттєво переважає в ділянках із магнітною складністю $\beta\gamma\delta$.

Ключові слова: активні ділянки, магнітні конфігурації, гейлівські класи, спалахи на Сонці, цикли сонячної активності.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.27.1901>

ВСТУП

На Сонці спалахи можуть виникати всюди — в активних ділянках, у тіні та півтіні сонячних плям, у магнітній сітці спокійного Сонця та в міжсіткових ділянках [1–4]. Однак потужні спалахи виникають переважно в активних ділянках зі складною 3D-геометрією магнітного поля [5].

Тривалі спостереження активних ділянок на Сонці дають важливу інформацію про фізичні процеси генерації та зміни структури магнітних полів. Щоб охарактеризувати розподіл магнітного поля в АД, групи сонячних плям поділяють на класи різної магнітної складності згідно з гейлівською класифікацією [6, 7]: до класу α відносять ділянки, що містять одиночну пляму чи групу плям однієї полярності, β — ділянки з двох плям чи групи плям протилежної полярності, γ — складні ділянки з плямами змішаної полярності, δ — ділянки, у яких принаймні одна пляма містить протилежні полярності в тіні в межах однієї півтіні. Кожну окрему АД можна віднести до конкретного класу або комбінації класів: α , $\alpha\gamma$, $\alpha\delta$, $\alpha\gamma\delta$, $\alpha\delta$ (уніполярна група); β , $\beta\gamma$, $\beta\gamma\delta$, $\beta\delta$ (біполярна група); γ , $\gamma\delta$ (мультиполярна група).

Властивості АД різних класів магнітної складності широко обговорено в попередніх дослідженнях (наприклад, [8–12]). Зазвичай вважають, що у великих групах сонячних плям із сильними магнітними полями та складними конфігураціями магнітного поля виникають інтенсивні спалахи. Зокрема, виявлено, що магнітна конфігурація типу δ є ефективним осередком спалахоутворення [10, 13–18].

В оглядовій праці [19] автори систематизували умови для утворення сильного спалаху — це велика пло-

ща АД, її морфологічна та магнітна складність і, на додачу, зворотне (антигейлівське) розміщення полярностей ведучої та хвостової плям, тобто порушення правила Гейла–Нікольсона [20]. Проте також зазначено, що для створення сильних спалахів недостатньо задовольнити одну з цих умов. Наприклад, одна з найбільших АД в історії спостережень — RGO 14886 з максимальною площею 6132 м. ч. п., виявлена в квітні 1947 р., — мала просту біполярну магнітну конфігурацію і спалахи в ній не відбувались [21]. Тому, провівши подальші високоточні спостереження й теоретичні дослідження магнітного поля в АД, зокрема детально вивчивши їхні субтелескопічні структури (наприклад, [22]), важливо з'ясувати, чи є критичні умови для виникнення сильних спалахів.

У нашій праці, що є продовженням статті [23], подано результати статистичного аналізу спостережуваних даних протягом 23–24-го циклів СА щодо вибраних параметрів АД. У [23] ми проаналізували циклічні зміни кількості, сумарної площі та тривалості різних за магнітною складністю АД. Мета цього дослідження — уточнити зв'язки між магнітною складністю цих ділянок та спалахами в них, а також проаналізувати зміни спалахової активності АД протягом сонячного циклу.

1. СПОСТЕРЕЖУВАНИЙ МАТЕРІАЛ

У нашій роботі як основу ми використали дані про АД проекту SolarMonitor (www.solarmonitor.org), який підтримують Триніті Коледж Дубліна та Дублінський інститут передових досліджень. Головною метою цього проекту є надання інформації про соня-



чну активність у режимі реального часу. SolarMonitor об'єднує дані, отримані за допомогою різних інструментів наземних та космічних телескопів в оптичному, ультрavioletовому та рентгенівському діапазонах.

Ми розглянули 4806 АД протягом 23–24-го циклів СА з 1996 до 2019 рр. Для аналізу ми використовували такі їхні характеристики: 1) кількість днів, протягом яких спостерігали конкретну АД; 2) клас магнітної складності, до якого, згідно з гейлівською класифікацією, віднесли ділянку в конкретний день; 3) щоденні площі АД; 4) дані щодо спалахів класів С (піковий потік м'якого рентгенівського випромінювання $F = 10^{-6}$ – 10^{-5} Вт/м²), М ($F = 10^{-5}$ – 10^{-4} Вт/м²), Х ($F > 10^{-4}$ Вт/м²) у цій ділянці. Щоб урахувати складність магнітної конфігурації окремих АД, ми розглядали належність їх до окремих класів, а також груп класів — уніполярної чи біполярної. Під час подальшого аналізу не враховували класів мультиполярної групи через незначну відносну кількість таких магнітних конфігурацій (0.04%). Окрім поділу на уніполярну та біполярну групи класів магнітної складності, окремо ми розглядали також просту (α , β) і комплексну ($\beta\gamma$, $\beta\gamma\delta$, $\beta\delta$) групи.

У масиві даних із SolarMonitor для певних АД відсутня інформація стосовно їхнього гейлівського класу чи некоректно зазначена площа в окремі дні (див. [23]), такі АД виключено з подальшого аналізу. Також у цьому масиві є некоректні дані про деякі спалахи. Дивною особливістю даних із SolarMonitor є повна відсутність інформації про спалахи в 2001 р. (максимальна фаза 23-го циклу) та 2005 р. (фаза спадання 23-го циклу). Тому ми вирішили доповнити цей масив даних інформацією про сонячні спалахи зі списку, сформованого Центром прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних й атмосферних досліджень США (NOAA-SWPC) на основі спостережень на довжинах хвиль 0.1–0.8 нм, отриманих за допомогою приладу XRS супутника GOES. Ці дані доступні на сайті Heliophysics Event Catalogue (http://hec.helio-vo.eu/hec/hec_gui.php, список “GOES Soft X-ray Flare List”). Цей каталог додатково включає інформацію про спалахи класу В ($F = 10^{-7}$ – 10^{-6} Вт/м²).

Ми об'єднали ці два масиви даних про сонячні спалахи, порівнявши їх за часом початку спалаху й за величиною пікового потоку випромінювання в рентгенівському діапазоні, на основі якого визначають клас спалаху. У таблиці 1 подано статистику цієї процедури. Відповідником певного спалаху з бази SolarMonitor вважали той спалах із бази GOES, який був найбільш подібним до нього за часом початку й за величиною пікового потоку:

1) за умови однакового часу початку спалаху ми вважали, що спалах із бази даних GOES відповідає спалаху із SolarMonitor, якщо його потік відрізняється не більш ніж на 20%; до об'єданого масиву ми не включали спалахи, у яких різниця потоків за даними з двох баз даних перевищує цей відсоток.

2) за умови різного часу початку спалаху ми використовували таке саме порогове значення для потоку

випромінювання — 20%; ми шукали відповідника до цього спалаху з бази SolarMonitor серед тих спалахів GOES, які відрізняються за часом не більш ніж на 10 хвилин.

Кількість спалахів	$N_{\text{SolarMonitor}}$	N_{GOES}
всього	13434	23050
співпадають по часу, різниця потоків $\leq 20\%$	10313	
співпадають по часу, різниця потоків $> 20\%$	30	
різниця у часі ≤ 10 хв, різниця потоків $\leq 20\%$	45	
не мають відповідника	3046	12662

Табл. 1. Порівняння спостережуваних даних із бази SolarMonitor та каталогу, складеного на основі спостережень за допомогою супутника GOES, за період 01.01.1996 р.–31.12.2019 р.

Table 1. Comparison of observed data from the SolarMonitor database and the catalog compiled on the basis of observations by the GOES satellite for the period 01.01.1996–31.12.2019

Згадані вище порогові значення для різниці між потоками й різниці між моментами часу початку спалаху ми вважаємо оптимальними, оскільки навіть за суттєвої їх зміни загальна кількість спалахів в об'єданому масиві зміниться не більше ніж на 0.5%, що суттєво не вплине на результати розрахунків.

Отже, об'єданий масив даних містить інформацію про 26066 спалахів, із яких 7543 (28.94%) належать до класу В, 16504 (63.32%) — до класу С, 1865 (7.15%) — до класу М, 154 (0.59%) — до класу Х.

II. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Ми побудували діаграму розсіювання для пікового потоку м'якого рентгенівського випромінювання спалаху та площі АД, у якій він виникає (рис. 1). Кольори на рисунку відповідають АД різної магнітної складності.

Бачимо, що найслабші з розглянутих — спалахи класу В — відбувались в АД з площею приблизно до 1000 м. ч. п. в усіх групах. Сильніші спалахи класів С і М були в АД всіх розмірів і класів магнітної складності. Спалахи класу Х переважно виникали в АД комплексної групи з площею понад 200 м. ч. п.; значно менше таких спалахів спостерігалось в АД, магнітність яких відповідала класам простої групи.

Ми також обчислили сумарні значення максимальних потоків випромінювання в рентгенівському діапазоні для всіх спалахів кожної АД та проаналізували залежність цих значень від максимальної площі АД (рис. 2). На цьому рисунку різні групи класів магнітної складності показані кольорами аналогічно до рис. 1.

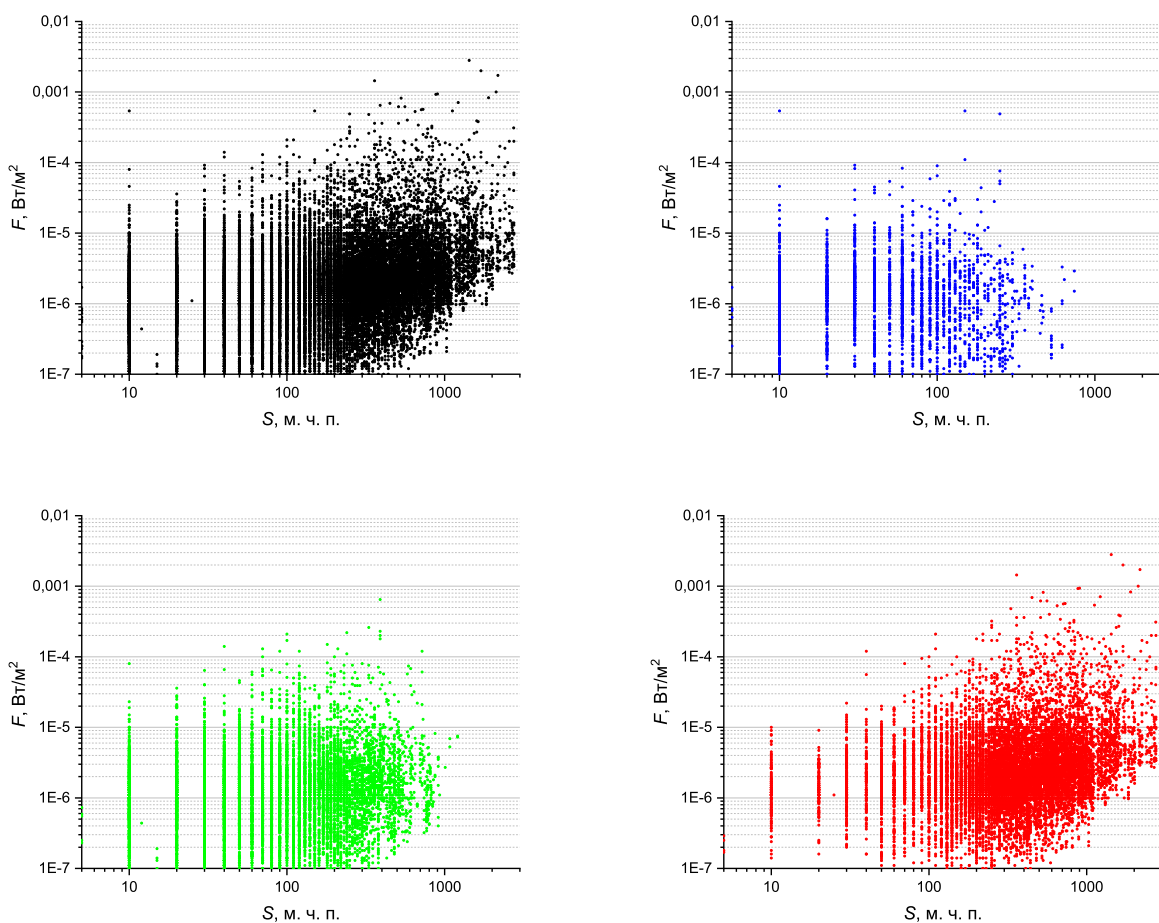


Рис. 1. Діаграми розсіювання для пікового потоку F ($\text{Вт}/\text{м}^2$) м'якого рентгенівського випромінювання спалаху та площі S (у мільйонних частках півсфери, м. ч. п.) АД, у якій він виникає: чорний колір — усі АД; синій колір — ділянки простої уніполярної групи, зелений — проста біполярна група; червоний — комплексна група. Площу по осі абсцис і потік по осі ординат показано в логарифмічній шкалі. Сірі горизонтальні лінії на цих діаграмах дають змогу розмежувати різні класи спалахів: В ($F = 10^{-7}$ – 10^{-6} $\text{Вт}/\text{м}^2$), С ($F = 10^{-6}$ – 10^{-5} $\text{Вт}/\text{м}^2$), М ($F = 10^{-5}$ – 10^{-4} $\text{Вт}/\text{м}^2$) та Х ($F > 10^{-4}$ $\text{Вт}/\text{м}^2$).
 Fig. 1. Scatter plots of the SXR peak flux F (W/m^2) of a flare versus the area S (millionths of solar hemisphere) of the AR in which it occurs: black color — all ARs; blue color — regions of the simple unipolar group, green — the simple bipolar group; red — the complex group. The area (X-axis) and the flux (Y-axis) are shown in a logarithmic scale. The gray horizontal lines on these diagrams help to distinguish different classes of flares: B ($F = 10^{-7}$ – 10^{-6} W/m^2), C ($F = 10^{-6}$ – 10^{-5} W/m^2), M ($F = 10^{-5}$ – 10^{-4} W/m^2) and X ($F > 10^{-4}$ W/m^2)

Як бачимо, простежується кореляція між площею АД й величиною спалахів, які в ній відбуваються: що більша площа, то більший інтегральний потік м'якого рентгенівського випромінювання від спалахів у цій ділянці. Зміна кольорів на рисунку демонструє також, що інтенсивність спалахоутворення залежить від класу АД: виникнення спалахів більшої величини корелює з утворенням магнітно складніших АД. Наші результати узгоджуються з результатами інших авторів [10, 24]. Обсяг нашого масиву даних перевищує кількість спалахів у згаданих працях, оскільки в них розглянуті дані в межах одного конкретного циклу СА (22 та 24 цикли відповідно).

Ми проаналізували розподіл спалахів в АД різних класів за роками протягом 23–24-го циклів СА згідно з об'єднаним масивом даних із SolarMonitor та

GOES/XRS. Чотири панелі на рис. 3 відображають циклічні зміни кількості спалахів класів В, С, М та Х, пов'язаних з АД. Кольоровими вертикальними стовпцями показано кількість спалахів, що виникали в АД з різною магнітною конфігурацією протягом певного року. Кольори відповідають різним класам магнітної складності, що показано на рисунку справа. Для спалахів класу Х ми скоротили діапазон значень по осі ординат, оскільки таких спалахів є значно менше, ніж спалахів інших класів. Для того, щоб було видно окремі фази циклу, ми наклали на ці розподіли графік зміни сумарної місячної площі всіх АД.

Бачимо, що спостерігаються циклічні зміни кількості спалахів, які належать до класів С, М та Х: спалахова активність АД посилюється в околі максимальної фази сонячного циклу, суттєво знижується в міні-

мумі СА. Найслабші з розглянутих — спалахи класу В — протягом спостережуваного періоду проявляють інший тип циклічності: найбільша їх кількість виявлена на фазі зростання до максимуму й на фазі спадання СА; у мінімумі СА їх мало, але порівняно така ж їх кількість виявлена у 2002 р. і 2014 р. — у максимумі СА. У роки мінімуму відбувалися лише спалахи класів В та С, і тільки в 1996 р. також спостерігалася відносно невелика кількість спалахів класів М та Х.

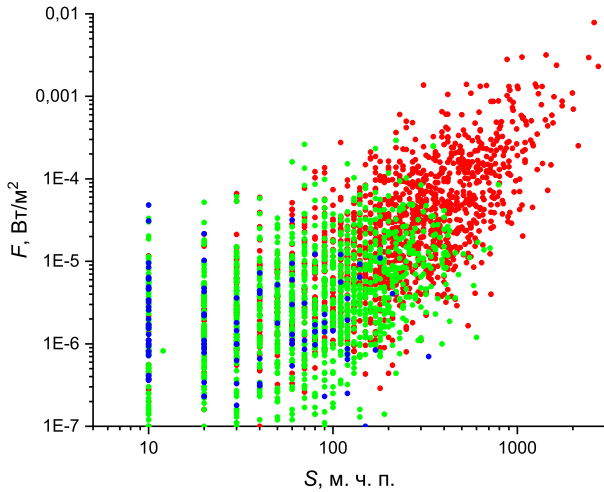


Рис. 2. Залежність сумарних значень максимальних потоків F ($\text{Вт}/\text{м}^2$) випромінювання в рентгеновському діапазоні для всіх спалахів окремих АД від максимальної площі S (м. ч. п.) цих ділянок. Різні групи класів магнітної складності показані кольорами аналогічно до рис. 1. Площу по осі абсцис і потік по осі ординат показано в логарифмічній шкалі

Fig. 2. Dependence of the total values of the maximum fluxes F (W/m^2) of radiation in the X-ray range for all flares of particular ARs in the maximum area S (millionths) of these regions. Different groups of magnetic complexity classes are shown in colors similarly to fig. 1. The area (X-axis) and the flux (Y-axis) are shown in a logarithmic scale

На рис. 4, аналогічно до рис. 3, показано відносну кількість спалахів в АД різних класів для кожного року протягом 23–24-го циклів СА згідно з об'єднаним масивом даних із SolarMonitor та GOES/XRS. За зміною кольорів на цьому рисунку бачимо, що чим потужніші спалахи, тим менший відсоток із них відбувається в АД простої групи (α , β), а більший відсоток — в АД комплексної групи ($\beta\gamma$, $\beta\gamma\delta$, $\beta\delta$): для спалахів класу В — 65 і 35% відповідно, для класу С — 40 і 60%, для класу М — 27 і 73%, для класу Х — 14 і 86%. У роки максимуму СА принаймні для класів В та С збільшується відносна кількість спалахів, які виникають в АД з комплексною магнітною конфігурацією. Це частково пов'язане саме зі збільшенням відносної кількості АД комплексної групи, які виникають у цей період [23].

Для того, щоб проаналізувати детальніше зміну відносної кількості спалахів, які виникали в АД комплексної групи в максимальних фазах СА, ми розглянули по 4 роки: 2000–2003 рр. — для 23-го циклу і 2012–2015 рр. — для 24-го циклу. У таблиці 2 показано у відсотках, скільки спалахів відбулося в АД різних класів магнітної складності в ці роки.

Спалахи класу В					
період/класи АД	α	β	$\beta\gamma$	$\beta\gamma\delta$	$\beta\delta$
2000–2003 (23 цикл)	13	49	26	11	1
2012–2015 (24 цикл)	17	53	21	7	2
Спалахи класу С					
період/класи АД	α	β	$\beta\gamma$	$\beta\gamma\delta$	$\beta\delta$
2000–2003 (23 цикл)	8	31	30	29	2
2012–2015 (24 цикл)	10	29	32	27	2
Спалахи класу М					
період/класи АД	α	β	$\beta\gamma$	$\beta\gamma\delta$	$\beta\delta$
2000–2003 (23 цикл)	5	20	24	49	2
2012–2015 (24 цикл)	6	19	28	45	2
Спалахи класу Х					
період/класи АД	α	β	$\beta\gamma$	$\beta\gamma\delta$	$\beta\delta$
2000–2003 (23 цикл)	3	11	17	64	5
2012–2015 (24 цикл)	2	8	18	65	7

Табл. 2. Відносна кількість спалахів (у %) в АД різних класів магнітної складності в максимальних фазах 23-го та 24-го циклів СА

Table 2. The relative number of flares (in %) in ARs of different magnetic complexity classes in the maximal phases of solar cycles 23 and 24

Найбільша відносна кількість спалахів класу В виникає в АД класу магнітної складності β і значно менше — в АД з іншими магнітними конфігураціями. Для потужніших спалахів це співвідношення змінюється. Максимальна відносна кількість спалахів класу С приблизно однакова для ділянок класів β , $\beta\gamma$ і $\beta\gamma\delta$. Спалахи класів М та Х найчастіше відбуваються в АД класів $\beta\gamma$ і $\beta\gamma\delta$, тобто в комплексній групі. Для спалахів класу Х суттєво переважає їх відносна кількість у ділянках класу $\beta\gamma\delta$ — до 65%. Наші висновки узгоджуються з висновками, отриманими в праці [16] на основі даних про 22–23 цикли СА. Отже, основні закономірності спалахової активності АД окремих класів магнітної складності зберігаються принаймні у 22–24 сонячних циклах.

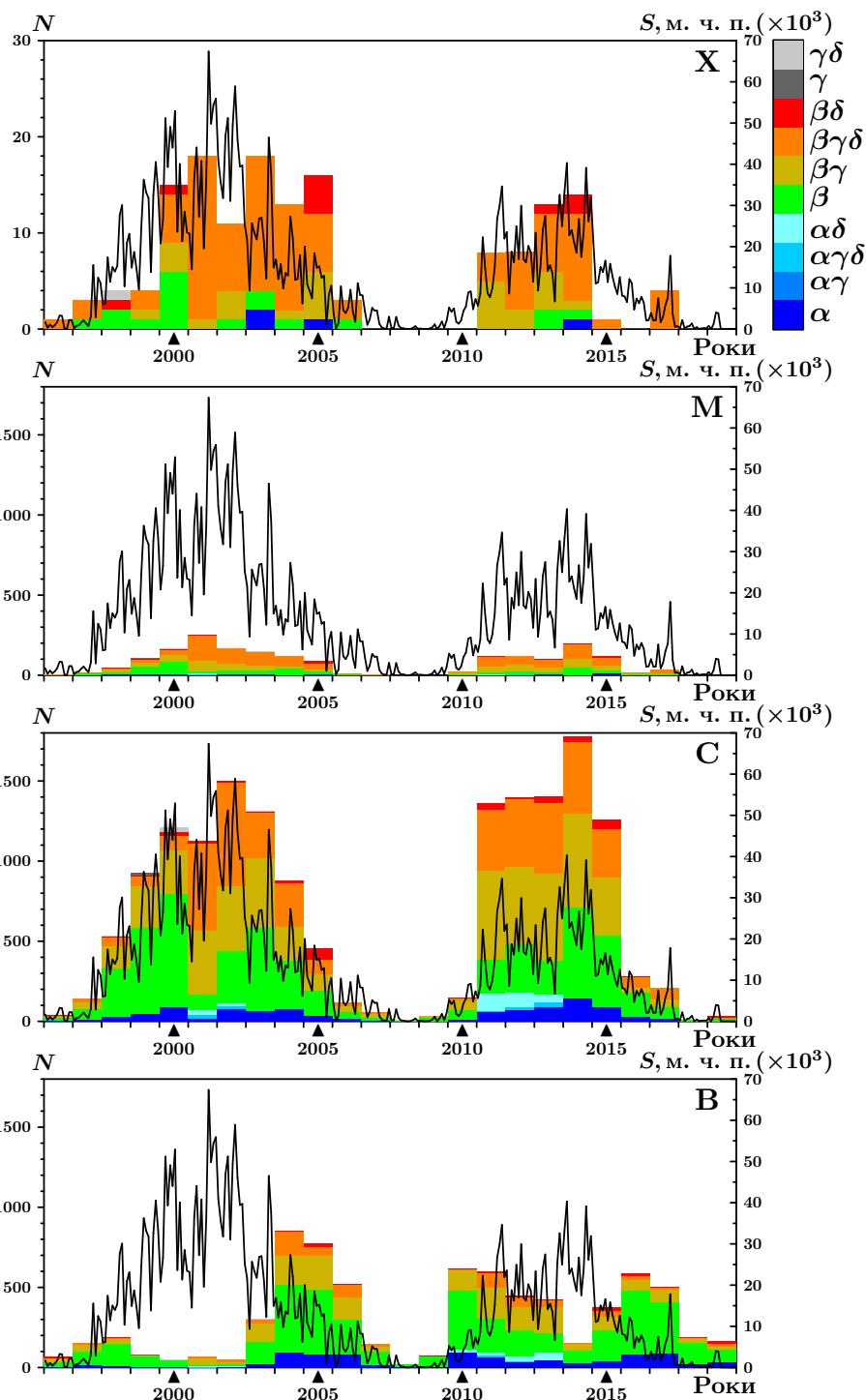


Рис. 3. Розподіл спалахів в АД різних класів за роками протягом 23–24-го циклів СА згідно з об'єднаним масивом даних із SolarMonitor та GOES/XRS. Чотири панелі відповідають спалахам класів В, С, М та Х: кольоровими вертикальними стовпцями показано кількість спалахів N , які виникали в АД з різною магнітною конфігурацією протягом певного року (шкала зліва). Кольори відповідають різним класам магнітної складності (показано на рисунку справа). Суцільною чорною лінією на кожній панелі показано графік зміни сумарної місячної площі S всіх АД (шкала справа)

Fig. 3. Distribution of flares in ARs of different classes by year during cycles 23–24 according to the combined data from SolarMonitor and GOES/XRS databases. The four panels correspond to the flares of classes B, C, M, and X: the colored vertical columns show the number N of flares that occurred in ARs with different magnetic configurations during a particular year (scale on the left). The colors correspond to different classes of magnetic complexity (shown on the right). The solid black line in each panel shows the graph of changes in the total monthly area S of all ARs (scale on the right)

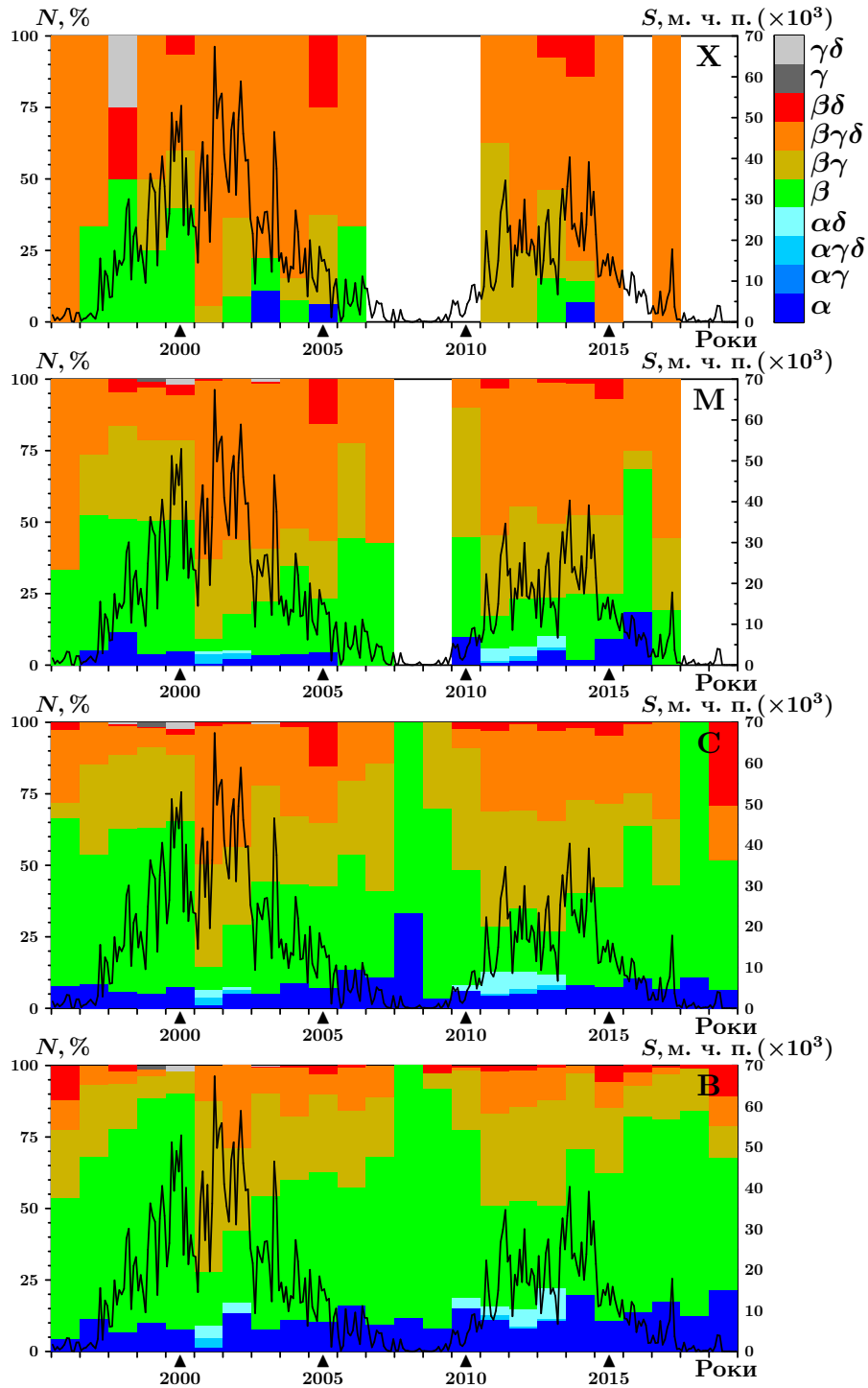


Рис. 4. Відносна кількість спалахів в АД різних класів для кожного року протягом 23-24-го циклів СА згідно з об'єднаним масивом даних із SolarMonitor та GOES/XRS. Чотири панелі відповідають спалахам класів В, С, М та Х: кольоровими вертикальними стовпцями показано відносну кількість спалахів (у відсотках), які виникали в АД з різною магнітною конфігурацією протягом певного року (шкала зліва). Кольори відповідають різним класам магнітної складності (показано на рисунку справа). Суцільною чорною лінією на кожній панелі показано графік зміни сумарної місячної площі S усіх АД (шкала справа)

Fig. 4. The relative number of flares in ARs of different classes for each year during cycles 23–24 according to the combined data from SolarMonitor and GOES/XRS databases. The four panels correspond to the flares of classes B, C, M, and X: the colored vertical columns show the relative number N of flares (in percentage points) that occurred in ARs with different magnetic configurations during a particular year (scale on the left). The colors correspond to different classes of magnetic complexity (shown on the right). The solid black line in each panel shows the graph of changes in the total monthly area S of all ARs (scale on the right)

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто особливості спалахової активності ділянок окремих класів магнітної складності. Це дослідження базується на об'єднаному масиві даних із SolarMonitor та GOES/XRS, що містить інформацію про вибрані параметри АД протягом 23–24-го циклів СА. Унаслідок розширеного аналізу даних виявлено, що:

1. Інтенсивність спалахоутворення залежить від площі АД та її класу магнітної складності: що більша площа й складніша конфігурація магнітного поля, то більший інтегральний потік м'якого рентгенівського випромінювання від спалахів у цій ділянці.
2. Спалахи класу В відбуваються в АД з площею приблизно до 1000 м. ч. п. в усіх групах. Спалахи класів С і М виникають в АД усіх розмірів і класів магнітної складності. Спалахи класу Х переважно виникають в АД комплексної групи з площею понад 200 м. ч. п.
3. Спалахова активність АД посилюється в околі максимальної фази сонячного циклу й суттєво знижується в мінімумі СА. Спалахи класу В, на відміну від спалахів класів С, М, Х, протягом спостережуваного періоду проявляють інший тип циклічності: найбільша їх кількість виявлена на фазах зростання й спадання СА.
4. У середньому протягом циклу СА спостерігає-

ться така тенденція: що потужніші спалахи, то менший відсоток із них відбувається в АД простої групи, а більший відсоток — в АД комплексної групи.

5. У роки максимуму СА принаймні для класів В та С збільшується відносна кількість спалахів, які виникають в АД з комплексною магнітною конфігурацією; відносна кількість спалахів класу Х суттєво переважає в ділянках класу магнітної складності $\beta\gamma\delta$.

Наші результати стосовно спалахової активності АД різних класів магнітної складності узгоджуються з результатами інших авторів [10, 16, 24]. Зазначимо, що ми не розглядали широтного розподілу СА, як, наприклад, у працях [25, 26], що може бути предметом подальшого вивчення. Також варто дослідити, чи є прояви північно-південної асиметрії спалахоутворення [27, 28].

ПОДЯКИ

Автори висловлюють щирю вдячність усім Героям, які зі зброєю в руках захищають свободу, незалежність та територіальну цілісність нашої держави, усім тим, завдяки відвазі, мужності та самопожертві яких українські вчені можуть продовжувати займатись науковими дослідженнями.

-
- [1] S. Krucker, A. O. Benz, T. S. Bastian, L. W. Acton, *Astrophys. J.* **488**, 499 (1997); <https://doi.org/10.1086/304686>.
 - [2] A. O. Benz, S. Krucker, *Solar Phys.* **182**, 349 (1998); <https://doi.org/10.1023/A:1005046620684>.
 - [3] D. Berghmans, F. Clette, D. Moses, *Astron. Astrophys.* **336**, 1039 (1998).
 - [4] A. O. Benz, *Liv. Rev. Solar Phys.* **14**, 1 (2017); <https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3>.
 - [5] S. Régnier, R. C. Canfield, *Astron. Astrophys.* **451**, 319 (2006); <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054171>.
 - [6] G. E. Hale, F. Ellerman, S. B. Nicholson, A. H. Joy, *Astrophys. J.* **49**, 153 (1919); <https://doi.org/10.1086/142452>.
 - [7] L. van Driel-Gesztelyi, L. M. Green, *Liv. Rev. Solar Phys.* **12**, 1 (2015); <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-1>.
 - [8] R. G. Giovanelli, *Astrophys. J.* **89**, 555 (1939); <https://doi.org/10.1086/144081>.
 - [9] G. R. Greatrix, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **126**, 123 (1963); <https://doi.org/10.1093/mnras/126.2.123>.
 - [10] I. Sammis, F. Tang, H. Zirin, *Astrophys. J.* **540**, 583 (2000); <https://doi.org/10.1086/309303>.
 - [11] K. Lee, Y.-J. Moon, J.-Y. Lee, K.-S. Lee, H. Na, *Solar Phys.* **281**, 639 (2012); <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0091-9>.
 - [12] H. He, H. Wang, Y. Yan, P. F. Chen, C. Fang, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119**, 3286 (2014); <https://doi.org/10.1002/2013JA019157>.
 - [13] E. B. Mayfield, J. K. Lawrence, *Solar Phys.* **96**, 293 (1985); <https://doi.org/10.1007/BF00149685>.
 - [14] L. Tian, Y. Liu, J. Wang, *Solar Phys.* **209**, 361 (2002); <https://doi.org/10.1023/A:1021270202680>.
 - [15] M. Ternullo, L. Contarino, P. Romano, F. Zuccarello, *Astron. Nachr.* **327**, 36 (2006); <https://doi.org/10.1002/asna.200510485>.
 - [16] J. Guo, J. Lin, Y. Deng, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441**, 2208 (2014); <https://doi.org/10.1093/mnras/stu695>.
 - [17] S. Toriumi, C. J. Schrijver, L. K. Harra, H. Hudson, K. Nagashima, *Astrophys. J.* **834**, 56 (2017); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/1/56>.
 - [18] Y.-H. Yang, *Astrophys. J.* **834**, 150 (2017); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/2/150>.
 - [19] S. Toriumi, H. Wang, *Liv. Rev. Solar Phys.* **16**, 3 (2019); <https://doi.org/10.1007/s41116-019-0019-7>.
 - [20] G. E. Hale, S. B. Nicholson, *Astrophys. J.* **62**, 270 (1925); <https://doi.org/10.1086/142933>.
 - [21] G. Aulanier *et al.*, *Astron. Astrophys.* **549**, A66 (2013); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220406>.
 - [22] V. G. Lozitsky, E. A. Baranovsky, N. I. Lozitska, V. P. Tarashchuk, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **477**, 2796

- (2018); <https://doi.org/10.1093/mnras/sty738>.
- [23] O. A. Baran, A. I. Prysiazhnyi, M. M. Koval'chuk, J. Phys. Stud. **26**, 1901 (2022); <https://doi.org/10.30970/jps.26.1901>.
- [24] L. Will, E. A. Avallone, X. Sun, Res. Not. AAS. **6**, 37 (2022); <https://doi.org/10.3847/2515-5172/ac573b>.
- [25] S. A. Jaeggli, A. A. Norton, Astrophys. J. Lett. **820**, L11 (2016); <https://doi.org/10.3847/2041-8205/820/1/L11>.
- [26] S. Nikbakhsh, E. I. Tanskanen, M. J. Käpylä, T. Hackman, Astron. Astrophys. **629**, A45 (2019); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935486>.
- [27] T. Ataç, A. Özgüç, Solar Phys. **166**, 201 (1996); <https://doi.org/10.1007/BF00179363>.
- [28] B. Joshi, A. Joshi, Solar Phys. **219**, 343 (2004); <https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000022977.95023.a7>.

RELATION BETWEEN FLARE ACTIVITY AND MAGNETIC COMPLEXITY OF ACTIVE REGIONS ON THE SUN

A. I. Prysiazhnyi, O. A. Baran

*Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv,
8, Kyrylo & Mefodiy St., Lviv, UA-79005, Ukraine,
e-mails: andrii.prysiashnyi@lnu.edu.ua; oleksandra.baran@lnu.edu.ua*

We performed a statistical analysis of selected active regions' (ARs) parameters during solar cycles 23–24 in order to investigate their flare activity. We used data on active regions, including their magnetic complexity, and flares in them from the SolarMonitor database. We supplemented this dataset with information about solar flares obtained using the XRS instrument of the GOES satellite.

It is found that the solar flare occurrence rate depends on the area of the AR and its class of magnetic complexity: the larger the area and the more complex the configuration of the magnetic field, the greater is the integral flux of soft X-ray radiation from flares in this region. Class B flares occur in ARs with an area of approximately 1000 millionths in all groups. C- and M-class flares are found in ARs of all sizes and magnetic complexities. Class X flares mainly occur in ARs of the complex group with an area of more than 200 millionths; far fewer of such flares are observed in ARs of the simple group.

It is shown that the flare activity of ARs (flares of classes C, M, X) increases around the maximum phase of the solar cycle and significantly decreases during the solar activity minimum. Class B flares show a different type of cyclicity: the largest number of them were detected during the ascending and descending phases of the solar cycle. On average, during the solar activity cycle, the following tendency is observed: the stronger the flares, the smaller percentage of them occur in ARs of the simple group, and the higher percentage — in ARs of the complex group.

In the solar activity maximum, at least for classes B and C, the relative number of flares that occur in ARs with a complex magnetic configuration increases. During this period, the relative number of X-class flares significantly prevails in the regions of the $\beta\gamma\delta$ magnetic complexity class.

Key words: active regions, magnetic configurations, Hale classes, solar flares, cycles of solar activity.