

УДК 521.937
PACS 96-60 Tf

МОЖЛИВІСТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ

Ковальчук М.¹, Гірняк М.¹, Стоділка М.¹,
Білінський А.¹, Вовчик Є.¹, Благодир Я.¹,
Вірун Н.¹

¹ *Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна*

На основі обширного спостережуваного матеріалу про спалахову діяльність Сонця у 23-у циклі сонячної активності та з залученням математично-статистичних положень із теорії екстремальних значень розглянута можливість прогнозування сонячних спалахів. Проведені розрахунки показали: 1) в статистиці спалахів спостерігається проста лінійна залежність між числом спалахів, їхнім балом і енергією; 2) розподіл спалахів за балами описується експоненціальним виразом, близьким до релеевського; 3) частота появи спалахів відповідає випадковому розподілу, який описується законом С.-Д. Пуассона; 4) при релеевському розподілі можлива енергетична інтерпретація шкали балів; 5) статистична теорія екстремальних значень по відношенню до спалахів передбачає появу спалахів таких балів, які можуть бути виявлені в наступних спостереженнях. Пропонована методика дослідження може використовуватися в практиці оперативних прогнозів спалахів.

Ключові слова: сонячно-земні зв'язки, оперативний прогноз космічної погоди, цикл сонячної активності

1 Вступ

Особливе місце в проявах активності Сонця, або як тепер називають космічної погоди, належить сонячним спалахам. Під час спалахів хромосфера і корона над активною областю раптово і сильно збуджуються, при цьому змінюється випромінювання Сонця. Випромінювання сонячних спалахів відбувається практично у всьому діапазоні електромагнітного спектра: від кілометрових радіохвиль до жорстких гамма-променів. Одночасно здійснюється безпосереднє детектування прискорених

під час спалаху високоенергетичних частинок, а також спостерігаються вторинні іоносферні і геомагнітні збурення. Таким чином, сонячні спалахи впливають на ряд важливих сторін практичної діяльності людини - як на соціальні процеси, так і на функціонування техніки. Як приклад, можна навести відмову апаратури на штучних супутниках Землі, варіації їхньої швидкості і періоду власного обертання, зміну орбіти на десятки метрів за добу [1, 2].

У зв'язку з цим прогноз спалахової активності набуває щораз більшого практичного значення. Продовжуються спроби створення математичних методів прогнозу [3, 4]. Більше того, прогнозування спалахів є частиною глобальної проблеми сонячно-земної фізики - прогнозу розвитку активних областей на Сонці. Це дуже складна задача, яку умовно можна розділити на два послідовні етапи - передбачення моменту появи спалаху з якнайбільшою точністю та завчасністю прогнозування відносної сили спалаху в балах. Вирішенню цих питань і присвячена дана робота.

2 Постановка задачі і методика розрахунку

Використавши обширний спостережуваний матеріал та математично-статистичні положення з теорії екстремальних значень, якими можна описати хід процесів на Сонці, ми зробили спробу прогнозування сонячних спалахів. При такому підході виключена залежність поведінки активної області на Сонці від фізичної сутності процесів, що визначають її розвиток. Це виправдано суттєвим рівнем випадкових процесів в явищі спалахової активності.

Методика розрахунку передбачає аналіз спалахів у кілька етапів:

- 1) Уточнення аналітичних виразів, що описують статистичні залежності між числом спалахів, їхнім балом та енергією.
- 2) Верифікація положення про випадковість часового розподілу спалахів: порівняння з законом С.-Д. Пуассона.
- 3) Застосування функції розподілу з теорії екстремальних подій до прогнозу балу спалаху.
- 4) Енергетична інтерпретація шкали балів спалахів згідно з розподілом Дж.У.Релея.

3 Спостережуваний матеріал.

сновою для дослідження слугували щоденні дані про спалахову діяльність Сонця на різних фазах 23-го циклу сонячної активності (1997 - 2007рр.). Ці матеріали отримані в реальному часі супутниками типу GEOS та опубліковані на сайті [5].

4 Уточнення аналітичних виразів, що описують статистичні залежності між числом, балом і енергією спалаху.

У роботі використано інформацію зі статистики землетрусів, наведену в роботі [6]. Конкретний вигляд залежностей між числом N і балом x спалахів і його енергією E запропоновано В.Касинським у роботі [7]. Ми провели уточнення цих аналітичних виразів, скориставшись наявністю повнішої бази вхідних даних.

В таблицях 1-3 представлені дані про число зареєстрованих спалахів різних балів (S - субспалахи, бали 1, 2 і 3) для трьох фаз сонячної активності (гілка росту, роки подвійного максимуму, гілка спаду) у 23-у циклі. Очевидно, що часові відрізки неоднакові для кожної фази циклу.

Табл. 1: Число спалахів різних балів на фазі росту 23-го циклу (1003 дні).

Бал	Роки і місяці			Загальна сума
	1997 1-12	1998 1-12	1999 1-9	
S	539	1959	2250	4748
1	27	119	147	293
2	5	17	22	44
3	1	6	0	7

Табл. 2: Число спалахів різних балів на фазі подвійного максимуму 23-го циклу (1005 днів).

Бал	Роки і місяці				Загальна сума
	1999 10-12	2000 1-12	2001 1-12	2002 1-6	
S	1137	3507	2558	1078	8280
1	68	230	210	61	569
2	14	53	52	12	131
3	1	8	4	0	13

Як видно з таблиць 1-3, число спалахів швидко зменшується з підвищенням балу, що характерно для всіх фаз сонячного циклу. Це дозволяє використати для апроксимації логарифмічну формулу [7]:

$$\log N = A - B \cdot x. \quad (1)$$

Тут N - число спалахів балу x за певний час, A і B - сталі. Ця залежність зображена на рис.1.

Ми отримали сімейство прямих, що відповідають трьом фазам 23-го циклу; причому прямі майже паралельні між собою, за винятком останньої точки на гілці спаду,

Табл. 3: Число спалахів різних балів на фазі спаду 23-го циклу (1644 дні).

Бал	Роки і місяці					Загальна сума
	2002 7-12	2003 1-12	2004 1-12	2005 1-12	2006 1-12	
S	1435	1152	555	463	127	3732
1	99	110	71	69	8	357
2	23	25	17	25	5	95
3	2	3	4	3	1	13

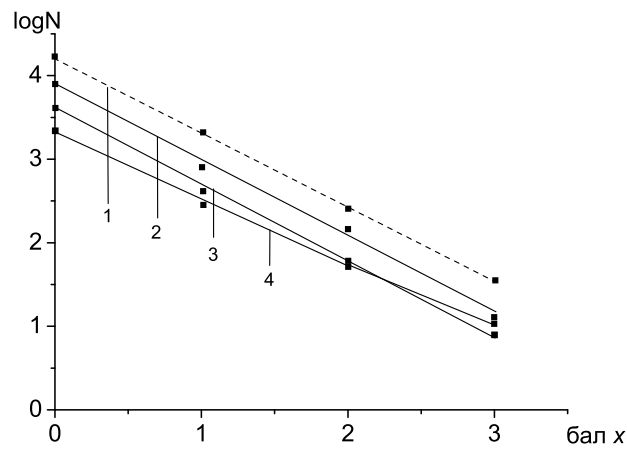


Рис. 1: Залежність між числом спалахів і їхнім балом для трьох фаз сонячного циклу: 1) загальне число спалахів певного балу, 2) гілка подвійного максимуму, 3) гілка росту, 4) гілка спаду.

де в кінці циклу з'явилися потужні спалахи балу 3. Визначаючи з рисунка 1 сталі A і B , отримуємо таку лінійну залежність між числом $\log N$ і балом x спалаху:

$$\log N = 4.26 - 1.16 \cdot x. \quad (2)$$

Стала A визначає число субспалахів. Нахили прямих на рис.1 не змінюються від фази до фази циклу, що свідчить про стійкий характер залежності (2) для спалахів.

Відомо [8], що зміни енергії спалахів охоплюють широкий діапазон ($10^{28} - 10^{32}$ ерг), тоді як бали змінюються у малих межах (від 0 до 3). Це дозволяє допустити, що зв'язок між енергією і балом спалаху повинен мати степеневу залежність

$$E \sim x^\alpha \quad \text{або} \quad \log E \sim x, \quad (3)$$

що несе інформацію про енергетику сонячних спалахів.

5 Верифікація положення про випадковість часового розподілу спалахів: порівняння з законом С.-Д.Пуассона

Як показав у свій час Р.Річардсон [9], частота появи спалахів відповідає випадковому розподілу числа спалахів, яким керує закон С.-Д.Пуассона. Саме тому спалахова активність у першому наближенні може бути описана нестационарним пуассонівським процесом для субспалахів і спалахів балу 1.

Для виявлення закономірностей часових послідовностей появи спалахів ми розраховували частоти появи слабких спалахів (субспалахів і спалахів балу 1) на різних фазах сонячної активності і порівняли їх із нестационарним пуассонівським розподілом.

Для цього весь спостережуваний матеріал в межах трьох фаз сонячної активності ми розбили на ряд зростаючих в геометричній прогресії часових інтервалів: $\Delta t_i = 1, 2, 4, \dots$ діб. Для кількох інтервалів у межах фази подвійного максимуму були побудовані гістограми, абсцисами яких були число спалахів в інтервалі Δt_i , а ординатами - частоти спалахів. Якщо λ - середнє число спалахів за одиницю часу, то середнє число спалахів у проміжку $\Delta t_i \in \bar{N} = \lambda \cdot \Delta t_i$. Тоді при пуассонівському розподілі спалахів імовірність знайти те або інше число спалахів всередині проміжку часу Δt_i при заданому \bar{N} дається формулою:

$$P(N) = \frac{(\lambda \cdot \Delta t_i)^N e^{-\bar{N}}}{N!}. \quad (4)$$

На рис.2 наведені гістограми й імовірності, розраховані за формулою (4). Плавна крива на всіх графіках відповідає розподілу С.-Д.Пуассона.

З рис.2 видно, що гістограми узгоджуються з теоретичним пуассонівським розподілом. Підраховуючи число спалахів у кожному інтервалі, ми отримали числовий ряд, що відображає основні закономірності часової послідовності спалахів. Інтенсивність процесу, що служить параметром пуассонівського розподілу, варіює в межах від 2.27 до 8.24 спалахів/добу для субспалахів і від 0.22 до 0.57 спалахів/добу для

спалахів балу 1. На різних фазах сонячної активності інтенсивність процесу появи спалахів зазнає значних змін. Проте отримані результати свідчать, що часові закономірності спалахової активності таки описуються нестационарним пуассонівським процесом. Однак закон С.-Д.Пуассона не вказує на величину (потужність) подій, встановлюючи лише їх число.

6 Застосування функції розподілу з теорії екстремальних подій до прогнозу балу спалахів.

Появи спалахів балу 2 і вище спричиняють сильніші наслідки на Землі, ніж субспалахи і спалахи балу 1. Тому прогноз спалахів має вартість лише тоді, коли поряд з місцем і часом спалаху вказується його потужність або бал. Отже, знання закону розподілу спалахів по балах є обов'язковим для повноцінного прогнозу.

Величину (потужність) події розглядають у розділі математичної статистики, що має назву статистика екстремальних значень [10]. У цьому розділі можна знайти відповідь на питання як часто максимальне значення в послідовності спостережень може перевищити той чи інший заданий рівень. У нашому випадку роль такого рівня для спалаху відіграє його узагальнена характеристика потужності - бал. При оцінці балу спалаху береться до уваги його площа, яскравість випромінювання в лінії H_α і час життя. Отже, статистична теорія екстремальних значень по відношенню до спалахів повинна передбачати бали тих спалахів, які можуть бути виявлені в подальших спостереженнях.

Наведемо в табл.4 сумарне число спалахів балів S,1,2,3 у трьох фазах циклу сонячної активності

Табл. 4: Сумарне число спалахів різних балів у трьох фазах циклу

Бали	Фаза росту	Фаза максимуму	Фаза спаду
S	4748	8280	3732
1	293	569	357
2	44	131	95
3	7	13	13

Ще раз звертаємо увагу на те, що частка спалахів з ростом балу суттєво зменшується, що вказує на експоненційний вигляд функції розподілу [7, 10],

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{a}\right)^m, \quad (5)$$

де x - варіанта розподілу спалахів за балами, що приймає невід'ємні значення, a і m - параметри. Експоненційний тип розподілу (5) приводить до ряду асимптотичних виразів, які можна використати для передбачення найвищих балів в n спостереженнях. Так, найімовірніший найвищий бал спалаху x_n при великому n визначається співвідношенням $x_n = \sqrt{\ln n}$.

У таблиці 5 наведено розраховані значення екстремальних величин x_n для трьох фаз сонячної активності.

Табл. 5: Значення екстремальних величин x_n для трьох фаз сонячної активності

	Фаза росту	Фаза максимуму	Фаза спаду
Найімовірніший бал x_n	2.92	3.02	2.89
Число спалахів	5092	8993	4197

Параметри розподілу (5) ми визначали з розв'язку рівняння, отриманого з (5) подвійним логарифмуванням:

$$m(\ln x - \ln a) = \ln[-\ln[1 - F(x)]] \quad (6)$$

Для визначення двох параметрів m і a використаємо систему двох рівнянь, що отримується при підстановці в (6) $F(x = 2)$ і $F(x = 3)$ для найбільш надійно фіксованих спалахів балів 2 і 3. Отримаємо набір параметрів m і a , наведений в таблиці 6. У третьому стовпчику приведені значення параметра a , розраховані в допущенні $m = 2$, оскільки показник розподілу m найближчий до 2.

Табл. 6: Набір параметрів m і a

Фаза сонячної активності	m	a	$m = 2$ a
Фаза росту	1.82	1.34	1.35
Фаза максим.	1.87	1.36	1.39
Фаза спаду	1.80	1.30	1.32

7 Енергетична інтерпретація шкали балів спалахів згідно з розподілом Релея.

Для подій, які повторюються, вводиться період повторюваності $T(x)$, зв'язаний з функцією розподілу,

$$T(x) = [1 - F(x)]^{-1} \quad (7)$$

Величина $T(x)$ отримується із спостережень за формулою

$$T(x) = [N(x)/\Sigma N]^{-1},$$

де $N(x)$ - число спалахів даного балу x . На рисунку 3 наведено графік, де по осі X відкладено логарифм повторюваності $T(x)$, а по осі Y - квадрат балу спалаху x^2 . Дані спостережень представляються прямими лініями. Таким чином, можна записати емпіричну залежність

$$x^2 = k \cdot \ln T(x), \quad (8)$$

де $k = \text{const}$. Далі, диференціюючи (5) за x при $m = 2$, отримуємо густину розподілу або так званий розподіл Релея:

$$\frac{dF(x)}{dx} = \frac{2x}{a^2} \exp\left[-\frac{x^2}{a^2}\right]. \quad (9)$$

Підставляючи (5) в (7) і логарифмуючи, отримуємо:

$$T(x) = \exp\left(\frac{x^2}{a^2}\right); \quad x^2 = a^2 \ln T(x). \quad (10)$$

Звідси видно, що в координатах $\ln T(x)$ і x^2 нахил прямих визначає параметр a . Беручи середнє із значень a для трьох фаз сонячної активності, отримуємо $\bar{a} = 1.34$. Це збігається із значенням a , отриманим із рис.3.

Фізична інтерпретація розподілу Дж.У.Релея дозволяє перейти від балів до енергій спалахів, що описується приведеною вище формулою (3), яка служить досить надійним першим наближенням до більш складного виразу, що зв'яже енергію і бал спалаху. Остаточний вигляд цієї залежності встановлюється на основі аналізу доступних даних про площі і енергії спалахів.

8 Висновки

На основі великого спостережуваного матеріалу стосовно спалахової діяльності Сонця в 23-у циклі сонячної активності та із залученням математично-статистичних положень з теорії екстремальних значень розглянута можливість прогнозування сонячних спалахів. Проведені розрахунки показали, що

1. У статистиці спалахів спостерігається проста лінійна залежність між числом спалахів x , їхнім балом M і енергією E спалахів.

2. Розподіл спалахів за балами описується експоненціальним виразом типу $F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{a}\right)^m$ з показником експоненти $m \approx 2$.

3. Частота появи спалахів відповідає випадковому розподілу числа спалахів, яким керує закон С.-Д.Пуассона.

4. Поблизу максимуму сонячної активності потужні спалахи з'являються рідше, наприклад, число спалахів у 2002 р. у 2 рази менше, ніж на вітці спаду в 2004, 2005 роках. Можлива причина: в максимумі циклу густина активних областей на Сонці зростає настільки, що магнітне поле розподіляється між ними (активними областями) і рідко досягає рівня, достатнього для виникнення потужного спалаху.

5. При релеєвському розподілі в першому наближенні можлива енергетична інтерпретація шкали балів: $\log E \sim x$. Складніший вираз цієї залежності встановлюється на основі аналізу спостережуваних даних про площі і енергії спалахів.

6. Статистична теорія екстремальних значень по відношенню до спалахів передбачає бали тих спалахів, які можуть мати місце в наступних спостереженнях.

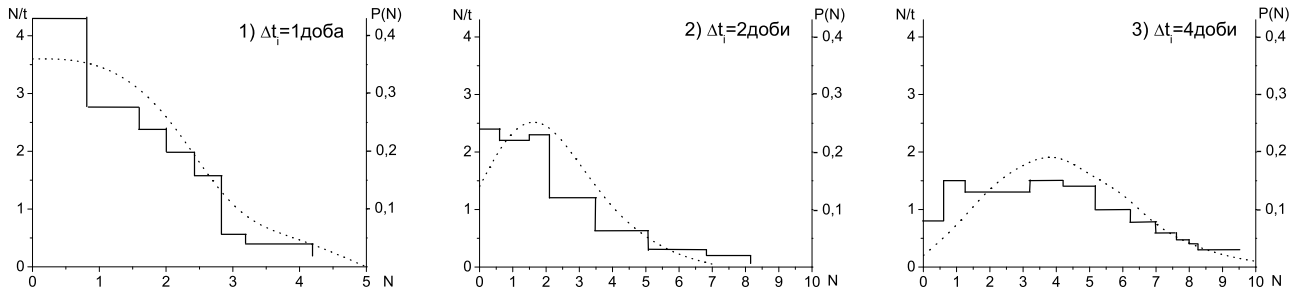


Рис. 2: Гістограми поінтервального розподілу субспалахів і спалахів балу 1 в межах фази подвійного максимуму: 1) $\Delta t = 1$ доба; 2) $\Delta t = 2$ доби; 3) $\Delta t = 4$ доби.

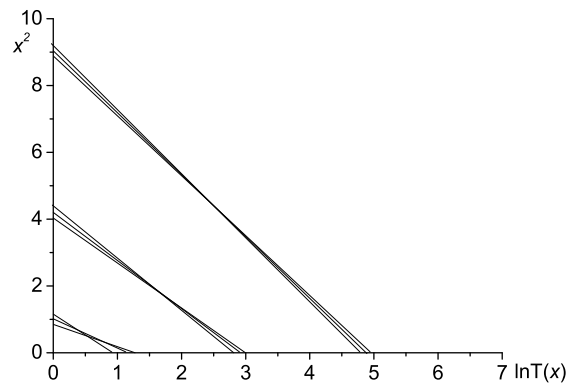


Рис. 3: Залежність між періодом повторюваності $T(x)$ спалахів і їхнім балом

Отже, запропонована методика дослідження може використовуватись в практиці оперативних прогнозів спалахів, це у свою чергу дуже важливе для передбачення змін у поведінці та роботі штучних супутників Землі.

Список використаної літератури

1. *Епишев В.* / В. Епишев, А. Билинский, К. Мартынюк-Лотоцкий и др. // Космічна наука і технологія. – 2012. – V. 18. – № 1. – P. 60.
2. *Komendant V.* / V. Komendant // Odessa Astron. Pubs. – 2014. – V. 27. – P. 89.
3. *Parnowski A.* / A. Parnowski // Astrophysics and Space Science. – 2009. – V. 323. – Is. 2. – P. 169.
4. *Стоділка М.* / М. Стоділка // Вісник Львів. ун-ту. Серія фізична. – 2011. – № 46. – P. 123.
5. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>
6. *Буллен К.* Введение в теоретическую сейсмологию / К. Буллен // М.: Мир, 1966.
7. *Касинский В.* / В. Касинский // Исслед. по геомагнетике, аэрономии и физике Солнца. – 1971. – Вип. 20. – С. 63.
8. *Смит Г.* / Г. Смит, Э. Смит // Солнечные вспышки (М.: Мир, 1966).
9. *Richardson R.S.* / R. S. Richardson // Astrophys. J. – 1951. – V. 114. – P. 366.
10. *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель // М.: Мир, 1965.

Стаття надійшла до редакції 12.08.2015
прийнята до друку 15.09.2015

**POSSIBILITY OF PROGNOSTICATION OF SOLAR FLARES
ON THE BASIC OF EXTREME VALUES THEORY**

**Koval'chuk M. ¹, Hirnyak M. ¹, Stodilka M. ¹, Bilinskiy A. ¹,
Vovchuk E. ¹, Blagodyr Ya. ¹, Virun N. ¹**

¹ *Astronomical observatory Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Mefodiy St., 8, 79005 Lviv, Ukraine*

We considered possibility of prognostication of solar flares on the basis of the vast observational data about flare activity of the Sun in the 23-th cycle of solar activity and with use mathematically-statistical positions of extreme values theory. The calculations showed: 1) simple linear dependence between the number of flares by their mark and energy takes place in statistics of flares; 2) distribution of flares on marks is described by exponential expression near to Relay law; 3) frequencies of appearance of flares answer casual distribution of number of flares, that is managed by the Poisson law; 4) power interpretation of scale of mark is possible at Relay distribution; 5) Statistical theory of extreme values in relation to flares, predicts appearance of flares of such marks, that can take place in next observations. Thus, the offered methodology of research can be used in practice of operative prognoses of flares.

Key words: solar-earth connections, operative space weather forecast, cycle of solar activity

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ОСНОВАНИИ ТЕОРИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Ковальчук М. ¹, Гирняк М. ¹, Стодилка М. ¹, Билинский
А. ¹, Вовчик Е. ¹, Благодыр Я. ¹, Вирун Н. ¹

¹ *Астрономическая обсерватория Львовского национального
университета имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия 8, 79005 Львов, Украина*

На основании обширного наблюдательного материала о вспышечной деятельности Солнца в 23-м цикле солнечной активности и с привлечением математически-статистических положений теории экстремальных значений рассмотрена возможность прогнозирования солнечных вспышек. Выполненные расчеты показали, что 1) в статистике вспышек наблюдается простая линейная зависимость между числом вспышек, их баллом и энергией; 2) распределение вспышек по баллам описывается экспоненциальным выражением, близким к релеевскому; 3) частота появления вспышек соответствует случайному распределению числа вспышек, которые подлежат закону С.-Д.Пуассона; 4) при релеевском распределении возможна энергетическая интерпретация шкалы баллов; 5) статистическая теория экстремальных значений по отношению к вспышкам предсказывает появление вспышек таких баллов, которые могут иметь место в последующих наблюдениях. Итак, предлагаемая методика исследования может использоваться в практике оперативных прогнозов вспышек.

Ключевые слова: солнечно-земные связи, оперативный прогноз космической погоды, фраунгоферовы линии, цикл солнечной активности