

УДК 523.98
PACS 95.85 Bn

ДОВГОХВИЛЬОВІ СОНЯЧНІ РАДІОСПЛЕСКИ ЯК ІНДИКАТОРИ АКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ НА СОНЦІ

М. Ковальчук¹, М. Стоділка¹, М. Гірняк¹,
В. Кошовий², О. Івантишин², А. Лозинський²

¹ *Астрономічна обсерваторія ЛНУ імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua*

² *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ
вул. Наукова, 5, 79601 Львів, Україна*

У дослідженні комплексу явищ, що відбуваються на Сонці, ми надали увагу зв'язку між довгохвильовим ($\lambda > 1$ м) радіовипромінюванням Сонця та сонячною активністю в оптичному діапазоні. Використано матеріали спостережень, що належать вітці максимуму 22-го циклу сонячної активності. Для досліджень застосовано метод лінійного регресивного аналізу. Аналіз даних розрахунків показав, що розподіл ймовірності появи довгохвильових сплесків радіовипромінювання залежить від площі спалаху за експоненціальним законом; максимум кількості спалахів, що супроводжуються декаметровими радіосплесками, переважно припадає на центральну частину диску, а на коротких хвилях цей "ефект направленості" практично відсутній.

Ключові слова: радіовипромінювання Сонця, сонячна активність, статистичні методи.

Радіовипромінювання активного Сонця, особливо на довгих хвилях, характеризується великою різноманітністю явищ, які є складовими сонячної активності. Це радіовипромінювання дуже неоднорідне, воно складається з декількох компонент, що відрізняються величиною інтенсивності, характером поляризації, профілем направленості, а головне, своїм динамічним спектром, тобто залежністю частотного спектра від часу. Ця залежність полягає в умовному розділенні випромінювання на дві складові — на випромінювання підвищеного рівня з характерним часом зміни порядку годин, днів і місяців та на сплески з часом життя, що визначається хвилинами і секундами. Вигляд частотного спектра і його поведінка в часі дають важливу інформацію про механізм генерації радіовипромінювання.

Початок класифікації радіовипромінювання за характером динамічних спектрів був покладений Уайльдом і Мак-Кріді [1]. Вони розділили сплески в метровому діапазоні на три типи. У даний час до сплесків I, II і III типів додані ще дві складові IV і V типів. Разом із згаданим раніше підвищеним радіовипромінюванням, зв'язаним із сонячними плямами, ці п'ять компонент становлять основну групу явищ, що спостерігаються в метровому діапазоні. Спостережувані дані свідчать про те, що довгі радіохвилі є найкращими індикаторами сонячних активних процесів.

При дослідженні комплексу явищ, що відбуваються на Сонці, ми приділили увагу визначенню залежності між довгохвильовим ($\lambda > 1$ м) радіовипромінюванням Сонця і сонячною активністю в оптичному діапазоні. У зв'язку з цим вважаємо корисним викласти результати зіставлення даних по сплесках радіовипромінювання Сонця в метровому ($\lambda > 1$ м) і декаметровому ($\lambda > 10$ м) діапазонах хвиль з параметрами хромосферних спалахів.

Спостережуваний матеріал стосовно спалахів в оптичному діапазоні в лінії H_{α} отримано нами на хромосферно-фотосферному телескопі АФР-2 Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка і доповнено даними з мережі INTERNET [2]. Частина даних радіоспостережень на декаметрових хвилях (частота $\approx 8 - 32$ МГц) отримана працівниками Фізико-механічного інституту імені Г. В. Карпенка НАН України на радіотелескопі "УРАН-3"; решту матеріалу (на метрових хвилях частота ≤ 400 МГц) ми запозичили із бази даних про сплески радіовипромінювання, що є у вільному доступі в мережі INTERNET [3].

Використано матеріали спостережень, що належать до вітки максимуму 22-го циклу сонячної активності.

Загальна кількість зареєстрованих за цей час спалахів становить 1844, сплесків у метровому і декаметровому діапазонах — 6960. Більшість сплесків (біля 85 %) у цих діапазонах — це поодинокі викиди тривалістю 1–5 хв.

Для дослідження зв'язку між радіовипромінюванням Сонця в метровому і декаметровому діапазонах довжин хвиль із хромосферними спалахами застосований лінійний регресивний аналіз [4]. Вважається, що найпростішою формою зв'язку між кількома параметрами є зв'язок, при якому один з параметрів із достатньою точністю представляється як деяка функція решти параметрів. У цьому випадку задача аналізу матриці даних може вважатися задачею виявлення тої конкретної функціональної залежності, яка найкраще описує спостережуваний матеріал.

Позначимо параметр, який виражений як функція всіх решти параметрів, через y . Тоді задача полягає в аналізі співвідношення

$$y = f(x^1, \dots, x^n) + \xi, \quad (1)$$

де $x^1, x^2 \dots x^n$ — решта параметрів, а f — невідома функція, яку треба визначити на основі інформації, що містяться в матриці даних, а ξ — деяка похибка. У цьому співвідношенні функція $f(x^1, \dots, x^n)$ у відповідності з загальним характером задачі повинна підбиратися так, щоб похибка ξ була мінімальною або

хоча б досить малою. Якщо вибрати клас лінійних функцій, то співвідношення (1) перепишемо у вигляді:

$$y = \sum_{j=1}^n \alpha_j x^j + \xi. \quad (2)$$

У цьому випадку задача вибору функції зводиться до задачі вибору досі невідомих коефіцієнтів $\alpha_1, \dots, \alpha_n$. Це векторне рівняння, що містить N скалярних рівнянь відносно n невідомих коефіцієнтів $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ і N компонент похибки $\xi = \{\xi_1, \dots, \xi_N\}$. Ці рівняння мають вигляд:

$$y_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{ij} + \xi_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де N — число об'єктів у матриці даних, y_i — значення, яке приймає параметр y на i -му об'єкті, тобто число, яке стоїть у матриці даних в i -му рядку і в стовпчику, що відповідає параметру y .

Безпосередньо рівняння лінійної регресії (2) однозначно розв'язати не можна, оскільки воно містить всього N скалярних рівнянь і $n + N$ невідомих (n невідомих коефіцієнтів і N значень похибки $\xi = \{\xi_1, \dots, \xi_N\}$).

Тому для розв'язку цього рівняння повинні бути залучені додаткові міркування. У даному випадку може бути залучено міркування про вибір таких коефіцієнтів $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, які забезпечують мінімальну похибку. Ми мінімізуватимемо вибірку дисперсію похибки ξ :

$$\bar{\delta}^2(\xi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \min. \quad (4)$$

Коефіцієнти $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ знаходять шляхом розв'язку системи рівнянь (3) за додатковою умовою (4).

Виразимо з рівняння (3) величини ξ_i^2 і підставимо їх у рівняння (4):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{ij})^2 = \min. \quad (5)$$

Отже, визначення коефіцієнтів $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ полягає у тому, щоб забезпечити безумовний мінімум виразу

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{ij})^2.$$

Цей мінімум легко знаходиться прирівнюванням до нуля всіх частинних похідних цього виразу:

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha_k} = -\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{ij}) x_{ik} = 0, \quad (6)$$

або

$$\bar{\rho}_{y,x^k} - \sum_{j=1}^n \alpha_j \bar{\rho}_{x_j x^k} = 0, k = \overline{1, n}.$$

Отже, отримуємо n рівнянь відносно n невідомих $\alpha_1, \dots, \alpha_n$.

Введемо такі позначення: набір $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ позначимо вектором $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$, сукупність коефіцієнтів кореляції виду $\bar{\rho}_{y,x^k}$ — вектором $r_y = \{\bar{\rho}_{yx^1}, \dots, \bar{\rho}_{yx^n}\}$, а матрицю коефіцієнтів кореляції виду $\{\bar{\rho}_{x_j x^k}\}$ — матрицею R . У цих позначеннях система рівнянь (6) записується як одне векторне рівняння:

$$R\alpha = r_y, \quad (7)$$

яке має розв'язок і при цьому єдиний:

$$\alpha = R^{-1}r_y. \quad (8)$$

Нарешті, вектори α, r_y центруємо (тобто приводимо до нульового середнього значення) і нормуємо (тобто приводимо до одиничної дисперсії).

Наявність обширного спостережуваного матеріалу, що був у нашому розпорядженні, вимагає обов'язкового проведення його попередньої класифікації, тобто розділення цього розмаїття даних по якихось чітко виражених ознаках. Тому, для початку, всі радіосплески були розділені на дві групи. У I групу ввійшли ті сплески, які співпали по часу (в межах ± 15 хв) з присутністю на Сонці хромосферних спалахів. У II групу були включені ті сплески, коли хромосферні спалахи не спостерігались. Критерій розділення, як видно, вибраний дещо умовно. За параметри хромосферних спалахів брались: часи початку, максимуму інтенсивності і кінця спалаху, його бал, площа і геліографічна довгота. Питання про те, які параметри несуть найбільш корисну інформацію зовсім не очевидне і вимагає спеціального розгляду. Тому наступним кроком було застосування лінійного регресивного аналізу, після чого були вибрані найбільш інформативні параметри. Ними виявились: миттєве значення максимального потоку радіосплеску в одиницях $10^{-22} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$, площа спалаху в максимумі яскравості в мільйонних долях диску та найбільша яскравість у відносних одиницях (по відношенню до яскравості незбуреної хромосфери). Дані центровані і нормовані на середньоквадратичні відхилення. Додатковим параметром досліджень було місцезнаходження спалаху відносно центрального меридіану (геліографічна довгота). Тому ми намагались знайти "ефект направленості" радіовипромінювання, підраховуючи реєстрації їх сплесків на різних довготах від центрального меридіану. В межах тих статистичних даних, які були в нашому розпорядженні нами було знайдене цілком певне співвідношення між імовірністю появи сплесків радіовипромінювання на декаметрових хвилях і площею спалаху в максимумі яскравості. Імовірність появи сплесків $W_{\text{Дк}}$ визначалась як відношення числа хромосферних спалахів,

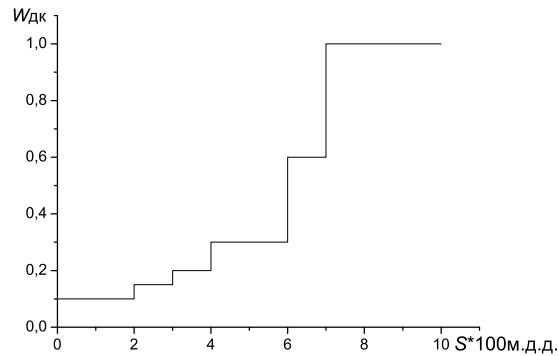


Рис. 1. Імовірність появи сплесків декаметрового радіовипромінювання як функція площі спалахів

що супроводжуються радіовипромінюванням у декаметровому діапазоні, до загального числа усіх спалахів (рис. 1). Аналогічно визначалась імовірність появи сплесків W_m у метровому діапазоні — як відношення числа хромосферних спалахів, що супроводжуються метровим радіовипромінюванням, до загального числа усіх спалахів (рис. 2).

Як видно з рис. 1, хід кривої W_{dk} в залежності від площі спалаху S підлягає експоненціальному закону. Цей розподіл $W_{dk}(S)$ відрізняється від розподілу імовірності появи сплесків випромінювання на метрових хвилях $W_m(S)$ (рис. 2).

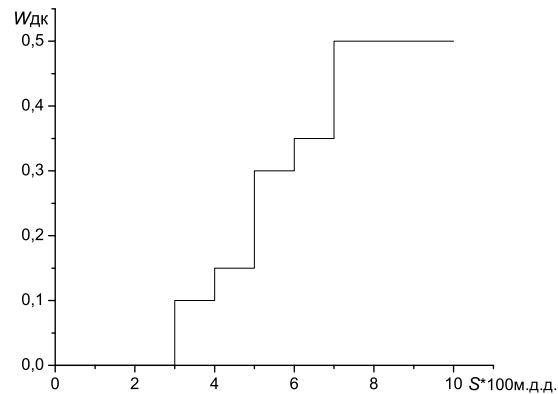


Рис. 2. Імовірність появи сплесків метрового радіовипромінювання як функція площі спалахів

Також було побудовано розподіл хромосферних спалахів по диску Сонця, під час яких були зареєстровані сплески радіовипромінювання в декаметровому та метровому діапазонах (рис. 3).

Із рис. 3 видно, що максимум числа спалахів, що супроводжуються декаметровими радіосплесками, переважно припадає на центральну частину сонячного диску, тоді як на коротших хвилях (напр., метрових) цей “ефект направленості” практично відсутній.

Строгий аналіз проведених розрахунків показав, що статистично обґрунтованими і достовірними можна вважати такі висновки:

1. Існує тісний зв'язок між сплесками радіовипромінювання на декаметрових хвилях із хромосферними спалахами; цей зв'язок дещо слабшає із зменшенням довжини хвилі. Дійсно, з 6960 радіосплесків, які збігалися за часом з хромосферними спалахами, 4520 сплесків ($\sim 65\%$) відбулися в декаметровому діапазоні.

2. Між початком спалаху і часом виникнення радіосплеску існує запізнення, що часто триває декілька хвилин. Цей факт пояснюють тим, що, очевидно, для генерування радіохвиль спалах має досягнути певної інтенсивності; зазначимо, що інтервал між спалахом і сплеском тим значніший, чим вища частота радіосплеску.

3. На декаметрових хвилях розповсюджуються сплески переважно в перпендикулярному до сонячної поверхні напрямку, тобто для цих хвиль властивий ефект направленості — це означає підвищення кількості радіосплесків під час проходження області хромосферного спалаху через центральний меридіан на коротших хвилях, цей ефект значно менший, тобто інтенсивність і кількість таких сплесків не дуже залежить від того, де знаходиться спалах — в центрі диску

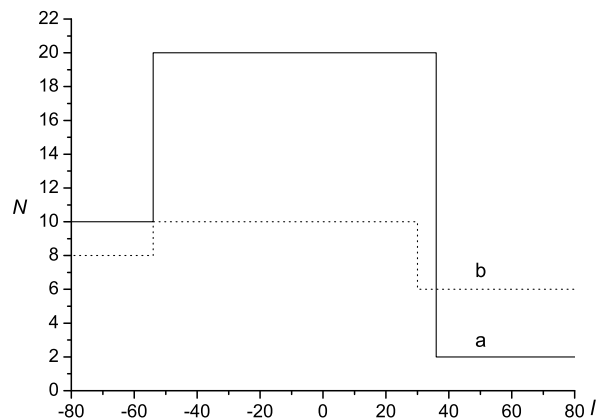


Рис. 3. Розподіл хромосферних спалахів по диску Сонця, що супроводжуються а) декаметровими; б) метровими радіосплесками.

чи поблизу краю. Однак, цей результат потребує додаткової перевірки на більшому статистичному матеріалі, хоча би в межах одного повного циклу сонячної активності.

Отже, отримані результати вказують на те, що радіовипромінювання сонячних спалахів на довгих хвилях може служити ефективним кількісним індикатором активних процесів на Сонці.

1. *Wild J. P.* Observations of the Spectrum of High-Intensity Solar Radiation at Metre Wavelengths. I. The Apparatus and Special Types of Solar Burst Observed / J.P. Wild and L.L. McCready // Austral. J. Sci. Res. – 1950. – Vol. A3, № 09. – P. 387.
2. <http://www.swpc.noaa.gov/ftplib/indices/SPE.txt>
3. <http://www.ngdc.noaa.gov/STP/Solar data/ solar radio>
4. *Крамер Г.* Математические методы статистики / Г. Крамер. – Москва : Мир, 1975. – 648 с.

LONGWAVE RADIO-FREQUENCY SOLAR BURSTS AS INDICATORS OF ACTIVE PROCESSES ON THE SUN

M. Koval'chuk¹, M. Stodilka¹, M. Hirnyak¹,
V. Koshovyy², O. Ivantyshyn², A. Lozynskyy²

¹ *Astronomical Observatory
of the Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Methodiy str., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua*

² *Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU
Naukova str., 5, 79601 Lviv, Ukraine*

While investigating the complex of phenomena occurring on the Sun, we have paid attention to connection between the long-wave ($\lambda > 1$ m) radio-frequency emission of the Sun and solar activity in the optical range. The observational materials used by us belong to the branch of maximum of the 22nd solar activity cycle. A method of linear regression analysis is applied. The analysis of the calculation data shows that the probability distribution for the appearance of long-wavelength radio-frequency bursts depends upon the flare area according to the exponential law; the maximum of the number of flares accompanied with decametric radiobursts is mainly associated with the disk centre, whereas in the short-wavelength range this "directivity effect" is practically absent.

Key words: radio-frequency emission of Sun, solar activity, statistical methods.

**ДЛИННОВОЛНОВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ
РАДИОВСПЛЕСКИ КАК ИНДИКАТОРЫ
АКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ****М. Ковальчук¹, М. Стодилка¹, М. Гирняк¹,
В. Кошевой², О. Ивантишин², А. Лозинский²**

¹ *Астрономическая обсерватория ЛНУ имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua*

² *Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАНУ
ул. Научная, 5, 79601 Львов, Украина*

При исследовании комплекса явлений, происходящих на Солнце, мы уделили внимание изучению зависимости между длинноволновым ($\lambda > 1$ м) радиоизлучением Солнца и солнечной активностью в оптическом диапазоне. Используются материалы наблюдений, принадлежащих ветке максимума 22-го цикла солнечной активности. Для исследований применен метод линейного регрессионного анализа. Анализ данных расчетов показал, что распределение вероятности появления длинноволновых всплесков радиоизлучения зависит от площади вспышки по экспоненциальному закону; максимум числа вспышек, сопровождаемых декаметровыми радиосплесками, преимущественно приходится на центральную часть диска, тогда как на коротких волнах этот “эффект направленности” практически отсутствует.

Ключевые слова: радиоизлучение Солнца, солнечная активность, статистические методы.

Статтю отримано: 27.10.2010
Прийнято до друку: 14.07.2011