

УДК 523.94
PACS number(s): 96-60 FS

СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ОБЛАСТЕЙ НА СОНЦІ В ОПТИЧНОМУ, РАДІО- ТА РЕНТГЕНІВСЬКОМУ ДІАПАЗОНАХ

М. Ковальчук, М. Гірняк, М. Стоділка, І. Лаба

*Астрономічна обсерваторія
Львівського національного університету ім. І.Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

У статті статистично досліджували зв'язок між сонячними спалахами, плямами та радіо- і рентгенівськими сплесками. Матеріалом для досліджень стала спостережувана база даних про стан хромосфери і фотосфери, отримана на Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету ім. Івана Франка, доповнена даними з INTERNET'у про радіо-і рентгенівське випромінювання. Для обробки були відібрані спостереження 23-го циклу сонячної активності (липень–жовтень 2002 р.). Вхідними параметрами активних процесів були – тривалість спалахів, їх відносні інтенсивності і площі, кількість і площі плям, часові профілі рентгенівських і радіосплесків у межах наявності спалахів. Синхронний аналіз оптичних, рентгенівських і радіоспостережень спалахів, плям та сплесків зробив можливим виокремити характерні риси їх поведінки в деякі періоди розвитку цих явищ: 1) фаза швидкої зміни інтенсивності спалаху супроводжується сильними сплесками радіо- і рентгенівського випромінювання; у високочастотному радіодіапазоні та в м'якому рентгені (1–8 Å) сильні спалахи супроводжуються сплесками в переважній частині випадків (70–80%); 2) зв'язок спалахів із радіосплесками у низькочастотному діапазоні значно слабший (28%), ніж у високочастотному; крім того, зі зменшенням потужності спалаху ступінь зв'язку із сплесками теж зменшується; 3) є статистична кореляція між потужними спалахами, групами плямами, а саме – між відношенням D/d , де D – діаметр плями і d – відстань між плямами; це відношення характеризує середнє значення градієнтів напруженості магнітного поля всередині групи; найпотужніші спалахи виникають у місцях високого D/d , тобто в місцях дуже сильного градієнта магнітного поля; 4) радіосплески починаються трохи згодом (на 1–4 хв) порівняно з рентгенівськими, але досягають максимуму раніше; 5) розподіл радіо- та рентгенівських сплесків за диском Сонця мало залежить від геліографічної довготи зв'язаного з ними оптичного спалаху: у разі збільшення відстані спалаху від центрального меридіану незначно зменшується кількість сплесків. Отже, комплексні синхронні спостереження в різних діапазонах сонячного випромінювання ще раз свідчать про те, що активні області на Сонці – це складні збурення, що охоплюють як процеси, що відбуваються в густих шарах сонячної атмосфери (у фотосфері та нижній хромосфері) і

призводять до оптичного висвічування, так і процеси, що відбуваються в більш розріджених шарах (у хромосфері та короні) та призводять до генерації радіо- та рентгенівського випромінювання.

Ключові слова: активні області на Сонці; статистичний аналіз; оптичне, радіо- та рентгенівське випромінювання.

Дослідження випромінювання Сонця у різних спектральних діапазонах дає змогу визначити взаємозв'язки між активними областями на різних висотах в атмосфері Сонця та діагностувати фізичні умови і процеси у сонячній атмосфері.

Такі дослідження є складовими фундаментальних проблем фізики Сонця. Вони використовуються у разі створення банку даних про сонячну активність, під час прогнозування активних процесів на Сонці, у час відтворення фізичних умов у реальній сонячній атмосфері, у разі тестування теоретичних моделей сонячної та зоряних атмосфер.

Для розв'язку цього завдання ми використовували сучасні спостережувані дані з високим розділенням та спостережувані дані, отримані на хромосферно-фотосферному телескопі АФР-2. За останні роки у вільному доступі з'явилися дані ракетних та супутникових вимірювань абсолютних величин потоків випромінювання в рентгенівському, радіо- та ультрафіолетовому діапазонах. З огляду на це відкрились нові можливості визначення певних закономірностей розвитку активних процесів у високих шарах сонячної атмосфери, які недоступні для традиційного оптичного діапазону.

У статті статистично досліджено зв'язок між сонячними спалахами, плямами та радіо- і рентгенівськими сплесками. З метою отримання кількісних оцінок взаємозв'язку між цими явищами ми комплексно проаналізували спостережувані дані про плями, потоки випромінювання від хромосферних спалахів в оптичній та сплесків у рентгенівській і радіо-областях сонячного спектра.

Для обробки були відібрані спостереження 23-го циклу сонячної активності (липень–жовтень 2002 р.) [1]. Вхідними параметрами активних процесів були – тривалість спалахів, їх відносні інтенсивності та площі, кількість і площі плям, часові профілі рентгенівських і радіосплесків. Під окремими сплесками мається на увазі зростання інтенсивності випромінювання, протягом якого перевищення інтенсивності не спадає до 0. Сплески можуть мати один або кілька максимумів – це так звані прості або складні сплески, відповідно. Залежно від інтенсивності часу вони умовно поділені на три типи:

- а) до типу I належать прості сплески імпульсного характеру;
- б) тип II – простий сплеск з поступовим підйомом і спадом;
- в) тип III – складні сплески великої інтенсивності.

Схематичні часові профілі рентгенівських і радіосплесків трьох типів зображені на рис. 1.

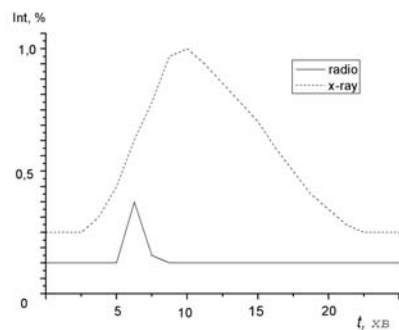
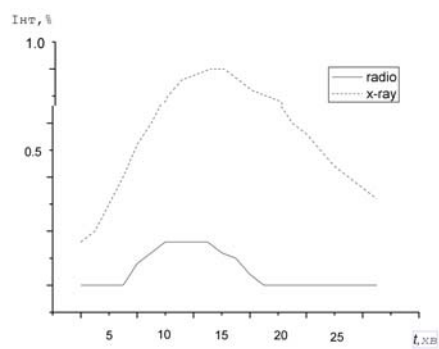
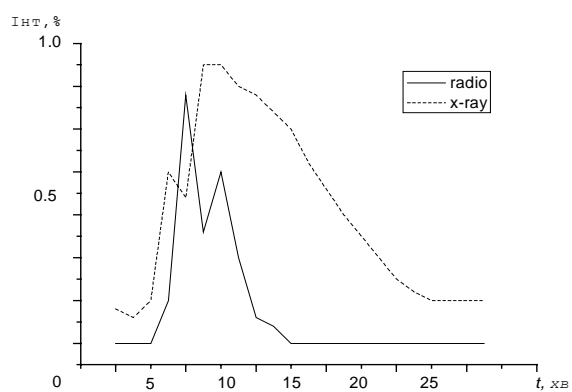
*a**б**в*

Рис. 1. Схематичні часові профілі рентгенівських і радіосплесків: *a* – I тип ; *б* – II тип ; *в* – III тип

Для реалізації поставленого завдання ми зіставили оптичні спостереження із сукупністю рентгенівських і радіоспостережень, близьких за часовим інтервалом до тривалості спалаху [2]. Щоб забезпечити статистичну обробку ми створили нові масиви даних, зведених до однієї часової шкали. Це масиви абсолютних значень інтенсивностей спалахів у лінії H_{α} , абсолютних значень потоків густин рентгенівських та радіосплесків. Для порівняння потоків, отриманих у різних спектральних діапазонах, проводили їхнє нормування (до відповідного максимального значення).

Додатковою складовою досліджень було вивчення динаміки передспалахових явищ у дещо більшому інтервалі часу, ніж той, що безпосередньо прилягає до імпульсної фази подальшого сплеску. Для цього використовувались фотогеліограми сонячної фотосфери. Звичайно, зв'язок сонячних плям зі спалахами не викликає ніякого сумніву. Тим не менше цей зв'язок значно підсилюється у випадку появи великої групи плям.

Просторова структура групи плям, її геометрія, суттєво впливає на імовірність появи спалаху, що своєю чергою, зумовлює появу рентгенівських та радіосплесків. Проекція області спалаху здебільшого не покриває всю групу сонячних плям, окрім дуже сильних спалахів. З іншого боку відомо, що площа плями пропорційна до величини потоку магнітного поля певної полярності, а сума всіх площ плям у групі – повному магнітному потоку активної області. Відношення D/d , де D – діаметр плями і d – відстань між плямами, характеризує середнє значення градієнтів напруженості магнітного поля всередині групи. Коли відстань між плямами є малою, а діаметри плям – великі, то виникають потужні спалахи. Саме такі спалахи відбулися 16.08.2002, 23.08.2002, 29.10.02 в активних регіонах місцезнаходження плям AR 10069, AR 10087, AR 10176.

Крім того, ми намагались знайти ефект направленості рентгенівського і радіовипромінювання, підраховуючи реєстрації їхніх сплесків на різних довготах від центрального меридіана. Ми не отримали статистично значимої довготної варіації сонячного випромінювання.

Під час аналізу кількісних розрахунків взаємозв'язку спостережуваних даних про плями і потоки випромінювання від спалахів в оптичній області та сплесків у рентгенівському та радіодіапазонах сонячного спектра ми отримали такі результати:

1. Зв'язок сплесків рентгенівського та радіовипромінювання із появою хромосферних спалахів не викликає ніякого сумніву і вважається, що явище спалаху в оптичному діапазоні і радіо- або рентгенівські сплески пов'язані лише у тому випадку, якщо одночасно зі сплесками або поблизу цього часового проміжку відбувався спалах в одному і тому ж центрі активності.
2. Фаза швидкої зміни інтенсивного спалаху супроводжується сильними сплесками радіо- та рентгенівського випромінювання, причому у високочастотному радіодіапазоні та в м'якому рентгені (1–8 Å) сильні спалахи (балу ≥ 2) супроводжуються сплесками у переважній частині випадків (70–80%). У решті випадків не кожному рентгенівському чи низькочастотному радіосплескові відповідає повідомлення про спалах або субспалах.
3. Число H_{α} – спалахів, для яких було зареєстровано рентгенівське випромінювання з енергіями $> 2,5$ keV становить $\sim 62\%$, з енергіями > 5 keV $\sim 25\%$ від загальної кількості спалахів різного балу.

4. Існує статистична додатна кореляція між потужними спалахами і градієнтом напруженості магнітного поля всередині групи плям, який вважається пропорційним до відношення D/d , де D – діаметр плями, d – відстань між плямами.

5. Для слабких спалахів балу S і 1 зв'язок із рентгенівськими та радіоспесками значно слабший (~ 28%), особливо у низькочастотному діапазоні.

6. Порівняння тривалості оптичного спалаху і радіо- та рентгенівських сплесків засвідчує, що час життя спалаху переважно менший від тривалості сплесків.

7. Радіоспески починаються трохи пізніше (на 1–4 хв) від рентгенівських (рис. 2).

8. Порівняно з рентгенівськими сплесками, радіоспески досягають максимуму раніше (рис. 3).

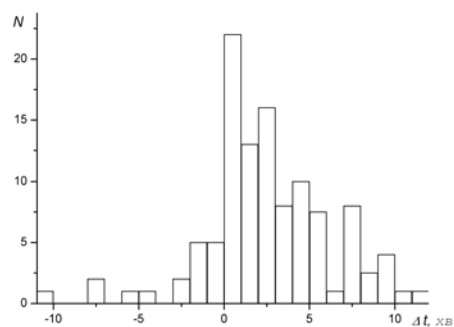
9. Максимуми інтенсивності потоків інтенсивності оптичного і радіо- та рентгенівського випромінювання настають в межах часового розділення (2–5 хв).

10. Розподіл радіо- та рентгенівських сплесків за диском Сонця незначно залежить від геліографічної довготи зв'язаного з ними оптичного спалаху: у разі збільшення відстані спалаху від центрального меридіана майже не зменшується кількість зв'язаних із ним сплесків.

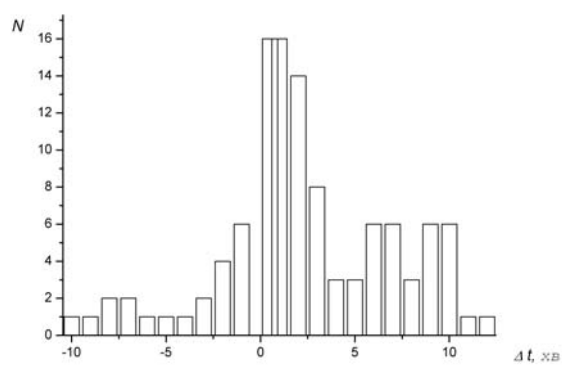
1. Комплексні спостереження свідчать про те, що оптичні спалахи – це лише один бік складного збурення, що охоплює як процеси, які відбуваються в густіших шарах сонячної атмосфери і призводять до оптичного висвічування, так і процеси, що відбуваються в більш розріджених шарах і призводять до генерації радіо- і рентгенівського випромінювання.

2. Спалахи низької інтенсивності (балу < 2) відповідають тій частині оптичного випромінювання, яка складається переважно із випромінювання ліній водню (головно H_{α}) і, отже, обмежуються температурами, які не перевищують температуру іонізації водню, тобто близько 10^4 К. Тим не менше, ці низькотемпературні спалахи тісно пов'язані з високотемпературними і високоенергетичними частинами спалаху.

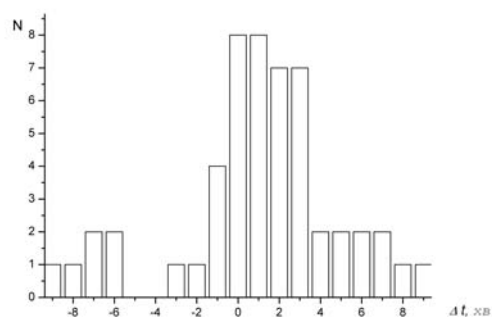
3. Використання регулярних спостережень Сонця на хромосферно-фотосферному телескопі АФР-2 із залученням синхронних спостережень у радіо- і рентгенівському діапазонах з метою дослідження взаємозв'язків і механізмів взаємодії між різними областями у сонячній атмосфері дає змогу діагностувати фізичні умови у реальній атмосфері Сонця з її неоднорідною структурою.



a



б



в

Рис. 2. Розподіл числа подій на момент початку радіо- і рентгенівських сплесків: *a* – I тип; *б* – II тип; *в* – III тип

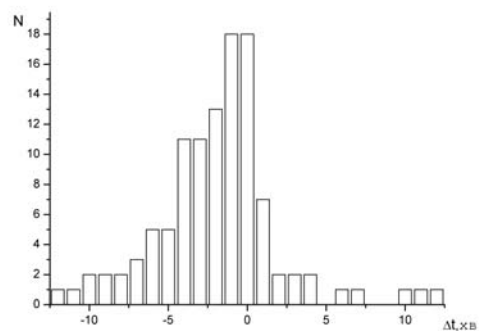
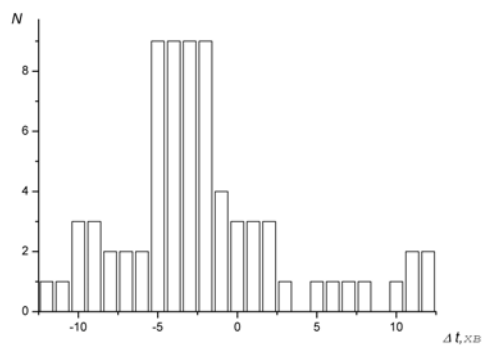
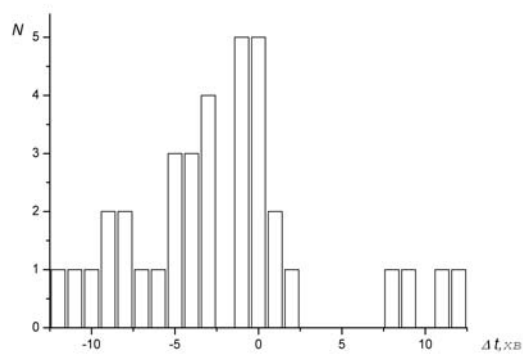
*a**б**в*

Рис. 3. Розподіл числа подій на момент максимуму радіо- і рентгенівських сплесків: *a* – I тип; *б* – II тип; *в* – III тип

1. [http // sxi.ngdc.noaa.gov./](http://sxi.ngdc.noaa.gov/)
2. Мюстеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. 1982. Вып. 1, 2. С. 319, 239.

STATISTICAL INVESTIGATION ACTIVE REGIONS ON SUN IN OPTICAL, X-RAY AND RADIO-RANGES

M. Koval'chuk, M. Hirnyak, M. Stodilka, I. Laba

*Astronomical observatory
of the Ivan Franko Lviv National University
Kyrylo i Mephodii Str., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

In present article the connection between solar flares, spots and radio- and X-rays splashes was investigated statistically. The material for investigations was employed observational data base about situate of chromosphere and photosphere, which was received in Lviv astronomical observatory and was supplemented INTERNET's data about radio- and X-rays. The observations of 23 solar activity cycle (july-october 2002 year) were selected for treatment. Entrance parameters of active regions were – duration of flares, their relational intensities and areas, quantities and areas of spots, temporal profiles of X-ray and radio bursts within flare existence. Synchronous analysis of optical, X-ray and radio observations of flares, spots and splashes gave a chance to apportion of typical features of their behaviour in some periods development of these phenomena:

- phase of quick change of flare intensity is accompanied strong splashes of radio- and X-ray radiation;

- In high-frequency radio-diapason and in soft-X ray (1–8Å) strong flares are accompanied splashes in predominant parts of cases (70–80%);

- connection flares with radio splashes in low-frequency diapason is considerably weak (28%) than in high-frequency; besides with decrease of flare power the degree of connection with splashes drops too;

- statistical correlation exists between powerful flares, groups of spots namely between ratio D/d where D -diameter of spot and d -distance between spots ; this ratio characterizes average mean of gradients tension of magnetic field inside group; most high- power flares appear in point with very strong magnetic gradient;

- radio splashes begins rather later (upon 1–4 min) from X-ray but amount to maximum previously comparatively with X-ray splashes;

- distribution of radio-and X-ray splashes per disk of Sun little depends on heliographic longitude of connected with them of the optical flare: by increase distance of flare from central meridian insignificantly decreases of number of splashes pikes;

- thus complex synchronous observations of solar emission in different spectral bands once more indicate about it that active ranges on the Sun – are complicated perturbations that include such as processes that pass in dense layers of solar atmosphere (in photosphere and lower chromosphere) and lead to optical de-excitation as and processes that occure in more rare layers (in chromosphere and corona) and reduce to generation radio- and X-ray emissions.

Key words: active regions on the Sun, statistical analysis, optical, radio- and X-ray emissions.

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ
В ОПТИЧЕСКОМ, РАДИО- И РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНАХ****М. Ковальчук, М. Гірняк, М. Стоділка, И. Лаба**

*Астрономическая обсерватория
Львовского национального университета им. И.Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 г. Львов, Украина
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

В данной работе статистически исследовалась связь между солнечными вспышками и радио- и рентгеновскими всплесками. Материалом для исследований послужила наблюдательная база данных о состоянии хромосферы и фотосферы, полученная на Астрономической обсерватории Львовского национального университета им. Ивана Франко, дополненная данными с INTERNET'а о радио- и рентгеновском излучении. Для обработки были отобраны наблюдения 23-го цикла солнечной активности (июль-октябрь 2002 года). Входными параметрами активных процессов были: продолжительность вспышек, их относительные интенсивности и площади, количество и площади пятен, временные профили рентгеновских и радиовсплесков в пределах существования вспышек. Синхронный анализ оптических, рентгеновских и радионаблюдений вспышек, пятен и всплесков сделал возможным выделить характерные черты их поведения в некоторые периоды развития этих явлений: 1) Фаза быстрого изменения интенсивности вспышки сопровождается сильными всплесками радио- и рентгеновского излучения; в высокочастотном диапазоне и в мягком рентгене (1–8 Å) сильные вспышки сопровождаются всплесками в преимущественной части случаев (70–80%); 2) связь вспышек с радиовсплесками в низкочастотном диапазоне значительно слабее (28%), нежели в высокочастотном; кроме того, при уменьшении мощности вспышки степень связи с вспышками также падает; 3) существует статистическая корреляция между мощными вспышками, группами пятен, а именно между отношением D/d , D – диаметр пятна и d – расстояние между пятнами; это отношение характеризует среднее значение градиентов напряженности магнитного поля внутри группы; наиболее мощные вспышки возникают в местах высокого D/d , то-есть в местах очень сильного градиента магнитного поля; 4) радиовсплески начинаются несколько позже (на 1–4 мин) от рентгеновских, но достигают максимума раньше сравнительно с рентгеновскими всплесками; 5) распределение радио- и рентгеновских вспышек по диску Солнца мало зависит от гелиографической долготы связанной с ними оптической вспышки: при увеличении расстояния вспышки от центрального меридиана незначительно уменьшается число всплесков. Итак, комплексные синхронные наблюдения в разных диапазонах солнечного излучения еще раз свидетельствуют о том, что активные области на Солнце – это сложные возмущения, которые включают в себя как процессы, происходящие в густых слоях солнечной атмосферы (в фотосфере и нижней хромосфере) и приводят к оптическому высвечиванию, так и процессы, происходящие в более разреженных слоях (в хромосфере и короне) и приводят к генерации радио- и рентгеновского излучения.

Ключевые слова: активные области на Солнце; статистический анализ; оптическое, радио- и рентгеновское излучение.

Стаття надійшла до редколегії 26.03.2009
Прийнята до друку 20.07.2009