

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.03.069>

УДК 523.985.3

С. М. Чорногор, Н. М. Кондрашова

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Зabolотного 27, Київ, Україна, 03143
chornog@mao.kiev.ua

Морфологія спалахопродуктивної активної області NOAA 9087

Еволюція та морфологічні властивості активної області NOAA 9087 були проаналізовані на основі даних космічних та наземних обсерваторій. Дані про жорстке (HXR) та м'яке рентгенівське випромінювання (SXR) отримані на телескопах супутника *Yohkoh* (HXT та SXT) і геостаціонарному супутнику *GOES*. Магнітограми та зображення вдалекому ультрафіолеті отримані на телескопах MDI та EIT сонячної обсерваторії *SOHO*. Використано зображення у білому світлі з обсерваторії *Big Bear* (BBSO) та Н -фільтрограми з Медонської обсерваторії. Дані про потік радіовипромінювання на частоті 2.69 ГГц були взяті з бази Всесвітнього центру даних обсерваторії в Лермонті (Австралія). Досліджувана активна область спостерігалася на сонячному диску з 15 по 27 липня 2000 року і показала складну конфігурацію мультипольного магнітного поля. Сильна спалахова активність і викиди спостерігалися в цій активній області. Згідно з даними *Solar Geophysical Data* (SGD) двострічковий спалах 3N/M6.4 відбувся 19 липня 2000 р. і тривав 2.5 години. Енергія спалаху виділялася поступово в різних місяцях активної області. Всі спостережені дані свідчать про постійну зміну структури та потужності спалаху в різних довжинах хвиль. У початковій фазі спалаху спостерігалися радіосплески III типу і сплески жорсткого рентгенівського випромінювання. Корональне джерело HXR розташувалося над лінією інверсії магнітної полярності активної області. На основі аналізу поступових зображень петель в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль отримано спостережні докази магнітних перез'єдань у головній фазі спалаху. На стадії загасання спалаху в діапазоні 19.5 нм спостерігалися післяспалахові петлі, що є проявом пізньої фази у далекій ультрафіолетовій області спектру. Ці протяжні петлі з'єднують місця

первинного та повторного виділення енергії спалаху. В головній фазі спалаху діяв додатковий механізм переносу енергії та нагрівання.

Ключові слова: Сонце, активні області, сонячні спалахи, магнітні через'єднання, багатохвильові спостереження.

ВСТУП

Питання про те, які активні області (АО) на Сонці є спалахопродуктивними, в яких місцях відбувається виділення енергії спалахів, як і коли ця енергія проявляється в різних діапазонах довжин хвиль, постійно актуальні та обговорювані. Відомо, що джерелом спалахів є магнітне поле [43]. Еволюція фотосферного магнітного поля відіграє важливу роль у накопиченні вільної енергії для сонячних спалахів. У процесі спалахів магнітна енергія перетворюється в кінетичну енергію прискорених частинок і теплову енергію за допомогою магнітного через'єднання. У роботі [32] на основі спектроскопічних спостережень на SDO/AIA і Hinode/EIS отримано докази наявності струмового шару у спалаху балу X8.2 і визначено його товщину, яка дорівнює 7...11 Мм. У струмовому шарі виявлено великі нетеплові швидкості до 200 км/с, що дозволяє припустити турбулентні рухи в ньому.

В огляді [50] зазначено, що потужні спалахи і викиди відбуваються в активних областях з сильною магнітною непотенціальністю. В роботі [49] досліджено магнітні властивості двострічкових сонячних спалахів. Виявлено, що тривалість спалаху приблизно пропорційна відстані між двома спалаховими стрічками, загальному магнітному потоку всередині стрічок і площі стрічок. Пропорційність між тривалістю спалахів і магнітною енергією властива як сонячним, так і зоряним спалахам. Двострічкові спалахи часто розпочинаються з ерупції волокна, яке може швидко прискорюватися протягом імпульсної фази [14]. Спалахи супроводжуються квазіперіодичними пульсаціями, які можуть бути їхніми попередниками [8]. Спалахові H -ядра можуть бути викликані потоками прискорених електронів або тепlopровідністю [16]. Червона асиметрія в лінії H у спалаху 1N/C6.5 2 жовтня 1993 року викликана, очевидно, низхідною холодною конденсацією.

Встановлено зв'язок спалахової продуктивності АО з конфігурацією магнітного поля та його еволюцією [28, 35, 45]. Зміна магнітного ширу, великий градієнт магнітного поля, розбаланс магнітного потоку, вихід нових магнітних потоків сприяють створенню магнітної топології, при якій можливе виникнення спалахів. В роботі [15] показано, як зміна конфігурації магнітного поля призводить до ускладнення і накопичення спалахової енергії. Автори інтерпретують зміну конфігурації магнітного поля дією фотосферних потоків, які мають різноспряжені вихори навколо пари плям протилежної полярності. В роботі [36] знайдено, що швидкість зміни магнітного потоку корелює зі зміною інтенсивності жорсткого рентгенівського випромінювання, яка є показником виділення енергії спалахів. В роботах [17, 42]

відзначається важлива роль магнітної спіральності для спалахової продуктивності активних областей. Спалахи можуть відбуватися та-кож у результаті анігіляції магнітного потоку [9]. У ряді робіт розглянуто зміну магнітної топології і магнітних властивостей АО у зв'язку зі спалахами [15, 17, 27, 33, 34, 40, 41, 53]. Результати робіт [25, 26] вказують на те, що висотний розподіл напруженості магнітного поля у спалахах може бути немонотонним — з локальним по висоті піком в області верхньої фотосфери та у зоні температурного мінімуму. Магнітні через'єднання, в результаті яких виникають спалахи, відбуваються в нульових точках, на сепараторах, у квазісепаратрисних шарах [6, 12, 28, 41, 48, 53].

Багатохвильові дослідження спалахів і спалахово-активних областей проводилися неодноразово [4, 7, 14—17, 19, 23, 24, 46, 51]. На основі цих досліджень описано детальні сценарії спалахів. Спалахи бувають двох типів — закриті (обмежені) і еруптивні, що супроводжуються викидом корональної маси. В огляді [4] детально описано спостереження спалахів від декаметрових довжин діапазону радіохвиль до гамма-випромінювання на 100 MeV. Розглядаються нові результати багатохвильових спостережень, а також невирішенні проблем фізики спалахів.

Тригером спалахів часто є вихід нових магнітних потоків [16, 37, 46, 51]. Спостережні дані роботи [51] свідчать про виникнення спалаху в результаті виходу маленьких магнітних силових трубок і через'єднання з уже наявними корональними петлями. У роботі [23] вивчається спалах балу M2.6, який виник в результаті взаємодії петельної системи, що лежить нижче, з петлями над нею. Тригером послужив повільний рух плями і магнітне через'єднання. Спалах супроводжувався хромосферним викидом і сплесками жорсткого рентгенівського випромінювання і радіосплесками III типу. Спалах M8.9/3B, що вивчається в роботі [24], був викликаний активізацією спіральних структур, пов'язаних з швидко еволюціонуючою плямою позитивної полярності всередині області негативної полярності. У процесі спалаху не спостерігалися викиди корональної маси (закритий спалах). В роботі [37] знайдено, що дрібномасштабні магнітні збурення, пов'язані з виходом нових малих магнітних біполів з сильним широм, можуть відігравати важливу роль у виникненні спалахів.

Вивчаючи еволюцію магнітного поля АО 12673, в якій стався найпотужніший спалах за останнє десятиліття 6 вересня 2017 р., автори роботи [54] знайшли, що вихідні магнітні поля спочатку мають відносно низьку спіральність. Ширіві рухи посилюються з появою магнітного потоку і породжують велику спіральність. Потік поперечної спіральності переважає. Фотосферні рухи, які сходяться, а також ширіві рухи постійно генеруються завдяки руху потоку. В роботах [5, 17, 44, 54] також відзначається важлива роль магнітної спіральності в активізації магнітних через'єднань. Спалахи ініціюються переважно в областях з високим градієнтом скручування і відбуваються поруч з лініями інверсії магнітної спіральності. Обертальні рухи фотосфер-

ного магнітного потоку можуть грати важливу роль у перенесенні магнітного закручування між різними шарами сонячної атмосфери [5]. В роботі [44] виділено два типи горизонтальних рухів фотосфери в АО 8210 1998 р., які могли викликати спалахову активність: обертання сонячної плями і швидкий спіральний рух вихідного магнітного потоку. В роботі знайдено, що інжекція магнітної енергії в результаті попечних фотосферних рухів викликає накопичення енергії в короні з подальшою ерупцією.

Аналіз багатохвильових спостережень у роботі [7] показав, що виникнення спалаху рентгенівського балу M2.2 26 листопада 2000 р. в активній області NOAA 9236, який супроводжувався викидом корональної маси, можна описати моделлю «магнітного прориву».

Досліджувана в нашій роботі активна область NOAA 9087 цікава тим, що вона швидко розвивалася, її магнітна конфігурація з кожним днем ускладнювалася. Вона була спалахово-активною, в ній відбувалося багато слабких спалахів. 19 липня в ній виник двострічковий спалах балу 3N/M6.4. В роботах [1, 25] наведено результати вивчення термодинамічних параметрів та параметрів магнітного поля під час розвитку цього сонячного спалаху на основі спостережень, проведених на ешелльному спектрографі. У нашій роботі ми використовуємо спостережні дані, отримані космічними апаратами і наземними обсерваторіями, що дозволяє провести багатохвильове дослідження морфологічних властивостей і особливостей розвитку активної області та спалаху.

МАТЕРІАЛИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Для вивчення активної області NOAA 9087 були використані дані спостережень у білому свіtlі (Big Bear Solar Observatory), в лінії H (спектрограф обсерваторії у Медоні), у м'якому і жорсткому діапазонах рентгенівського випромінювання (космічні прилади HXT (Hard X-ray Telescope) [22] і SXT (Soft X-ray Telescope) на супутнику Yohkoh [39], GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), в далекому ультрафіолеті EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) орбітальної обсерваторії SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) [47]. Магнітограми повного диска Сонця були отримані за допомогою приладу MDI (Michelson Doppler Imager), встановленого в обсерваторії SOHO. Дані про потік радіовипромінювання на частоті 2.69 ГГц взяті з бази Світового центру даних Сонячної обсерваторії в Лермонті (Австралія).

АКТИВНА ОБЛАСТЬ NOAA 9087

Досліджувана активна область NOAA 9087 вийшла з-за краю сонячного диска 15 липня 2000 р. і залишалась видимою на дискі по 27 липня. Okремі її зображення у білому свіtlі наведено на рис. 1. АО

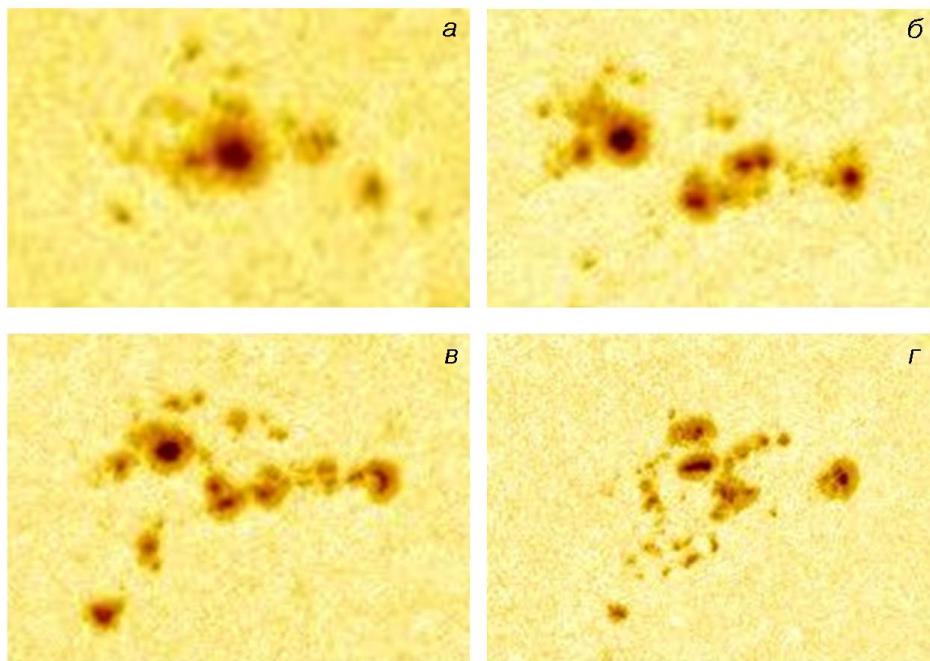


Рис. 1. Зображення активної області NOAA 9087 у білому світлі в різні дні спостережень, отримані в обсерваторії BBSO: а — г — відповідно 17, 18, 19 і 21 липня 2000 р.

швидко розвивалася: змінювалася її структура, з дня у день збільшувалась кількість плям, з'являлися нові плями, тоді як інші зникали. Форма плям була складною і змінювалася з часом.

Область мала мультиполлярну магнітну структуру, яка ускладнювалася у міру її розвитку (рис. 2). В ній спостерігалися вкраплення паразитних полярностей, що свідчить про вихід нових магнітних потоків. Лінія розділу полярностей мала вигнутий вигляд, її довжина і форма сильно змінювалися з часом.

Табл. 1 показує, як у міру ускладнення конфігурації магнітного поля збільшувалася спалахова продуктивність досліджуваної активної області. 15 липня група плям була уніполярною, в ній спостерігалася лише слабкі спалахи балу SF. Кількість спалахів зростала день у

Таблиця 1. Кількість спалахів різних балів в активній області NOAA 9087 і її магнітна конфігурація

Дата, липень 2000 р.	Кількість спалахів	Магнітна конфігурація
15	SF — 9	
16	SF — 10, 1N — 2	
17	SF — 15, 1N, 1F — 2, 2F, 2B	
18	SF — 11, 1F, 1B, 2N — 2	
19	SF — 9, 3N	
20	SF — 7, SN — 2, 1B, 2F	
21	SF — 13, SN, 1N	

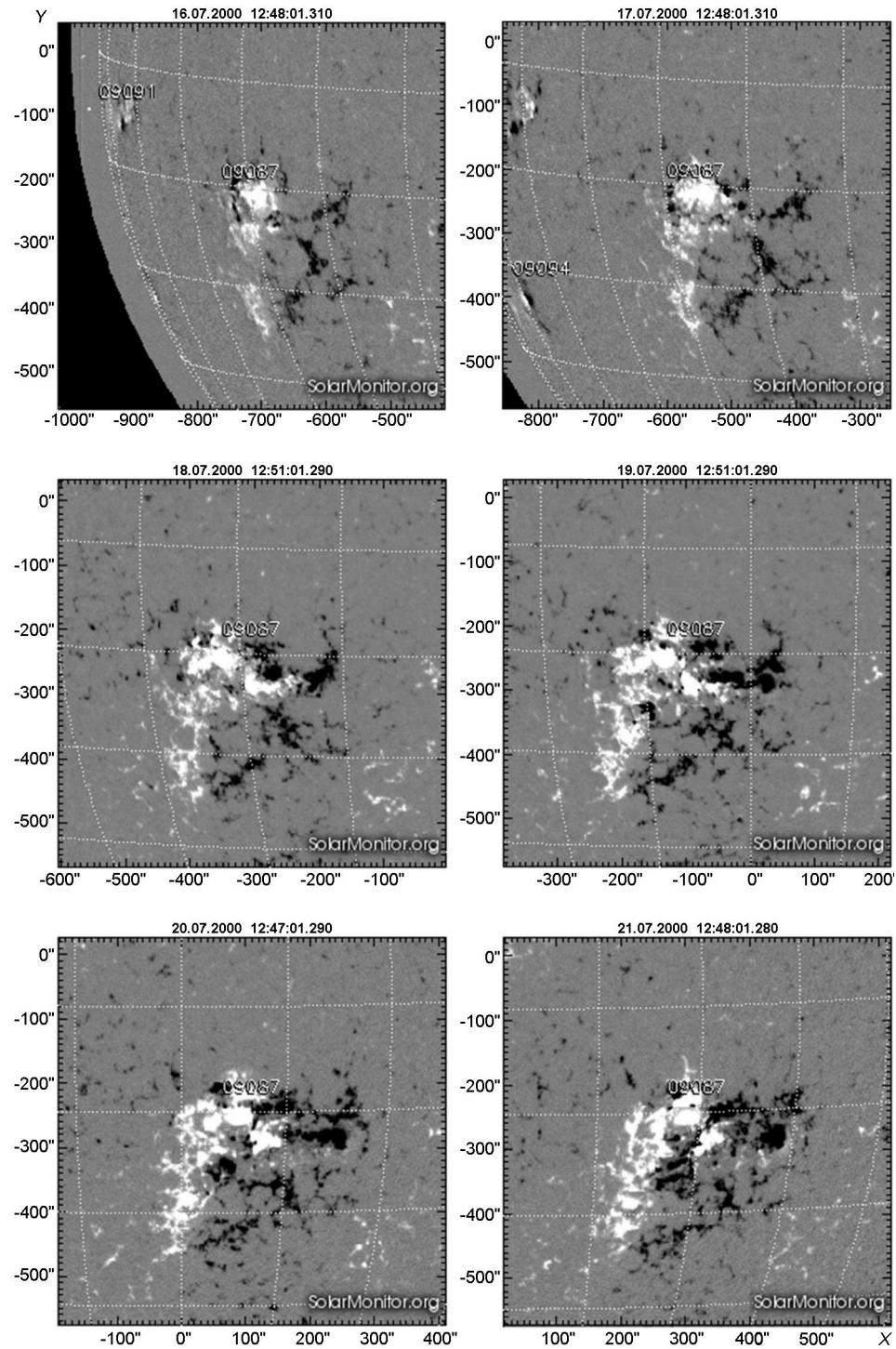


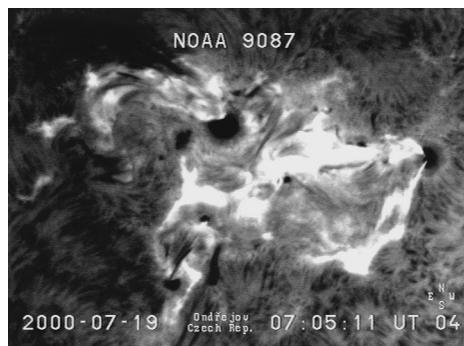
Рис. 2. Магнітограми активної області NOAA 9087 16—21 липня 2000 р., отримані на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою приладу MDI

день. Спалахова активність досягла максимуму 19 липня, коли конфігурація магнітного поля була - -, і виник найпотужніший в цій області двострічковий спалах 3N/M6.4. Його розвиток ми проаналізували в цій роботі.

СПАЛАХ 19 ЛИПНЯ 2000 р. В АКТИВНІЙ ОБЛАСТІ NOAA 9087

Двострічковий спалах балу 3N/M6.4 виник 19 липня, коли АО перебувала недалеко від центра Сонця, координати спалаху — S18E10. Він займав велику площину на диску. Згідно з даними Solar Geophysical Data Н -спалах розпочався в 6^h37^m UT, його основний максимум настав о 7^h23^m UT, а кінець — о 9^h01^m UT. Він тривав майже 2.5 год і належить до класу тривалих подій (LDE — Long Duration Event). На рис. 3

Рис. 3. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в лінії Н, отримане в Ондржейові, Чехія, о $07^h05^m11^s$ UT



приведено його зображення в лінії Н , отримане в Ондржейовській обсерваторії, Чехія. На рис. 4 представлена зображення в різних діапазонах ультрафіолетового спектру ($\lambda = 17.1, 19.5, 28.4, 30.4$ нм) для початкової фази спалаху, отримані на космічному телескопі SOHO.

На рис. 5 наведено дані супутника GOES про зміну м'якого рентгенівського випромінювання (SXR) в діапазонах $\lambda = 0.05...0.4$ нм і $0.1...0.8$ нм, усереднені за 1 хв. Згідно з цими даними приблизно за дві години до досліджуваного спалаху в цій же області спостерігався сплеск балу C6.7, що тривав близько години. Збільшення потоку рентгенівського випромінювання досліджуваного спалаху в діапазоні $\lambda = 0.1...0.8$ нм розпочалося о 6^h45^m , а в діапазоні $0.05...0.4$ нм — о 6^h47^m . Потім спостерігалося різке збільшення потоків з часом. Максимум інтенсивності в діапазоні $0.05...0.4$ нм зареєстрований о 7^h22^m , а в діапазоні $0.1...0.8$ нм — о 7^h26^m . Характер змін потоку рентгенівського випромінювання у процесі спалаху відповідає четвертому типу магнітного через'єднання, описаному в роботі [29]. Як було встановлено, умови виходу магнітного потоку визначають характер подальших через'єднань і всього розвитку спалаху. В даному випадку сценарій для четвертого типу через'єднання передбачає на ранній стадії спалахів дуже швидкий підйом сильного магнітного потоку, його взаємодію з локальним магнітним полем і утворення струмового шару. Поступо-

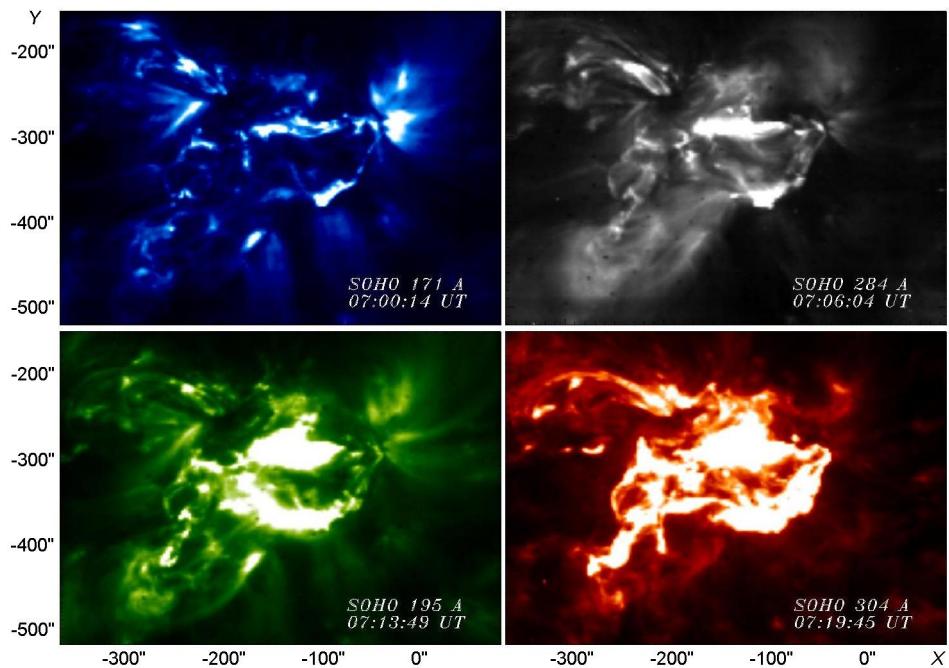


Рис. 4. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в активній області NOAA 9087 в довжинах хвиль $\lambda = 17.1, 19.5, 28.4, 30.4$ нм, отримані на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою телескопа EIT

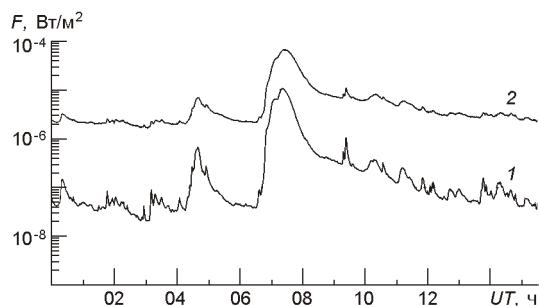


Рис. 5. Зміни з часом інтенсивності рентгенівського випромінювання в діапазонах довжин хвиль $\lambda = 0.05\dots 0.4$ нм (лінія 1) і $0.1\dots 0.8$ нм (лінія 2), отримані на супутнику GOES 19 липня 2000 р. Інтервал усереднення — 1 хв

вого переднагрівання не було. Надалі спалаховий процес розвивався в імпульсному режимі. У головній фазі спалаху спостерігалося повільне зменшення потоку м'якого рентгенівського випромінювання.

Порівняння зображень АО у білому світлі у початковій фазі спалаху о $7^h 10^m$ UT і о $16^h 58^m$ UT, приблизно через 8 год після нього, показує, що після спалаху сильно змінилася конфігурація групи плям та їхня форма (рис. 6). Деякі плями зникли, з'явилися нові. Це свідчить про сильну зміну магнітної топології АО, зникнення і появу нових магнітних полів. Відбулася перебудова фотосферного магнітного поля, викликана досліджуваним спалахом.

В роботах [2, 13, 59, 60] також повідомляється про значні зміни структури і положення плям під дією потужних спалахів. Відгук фотосфери, як зазначено в цих роботах, є результатом корональної перебудови і виділення енергії спалаху в короні. В роботі [55] вперше виявлено швидке (приблизно через 30 хв після початку потужного

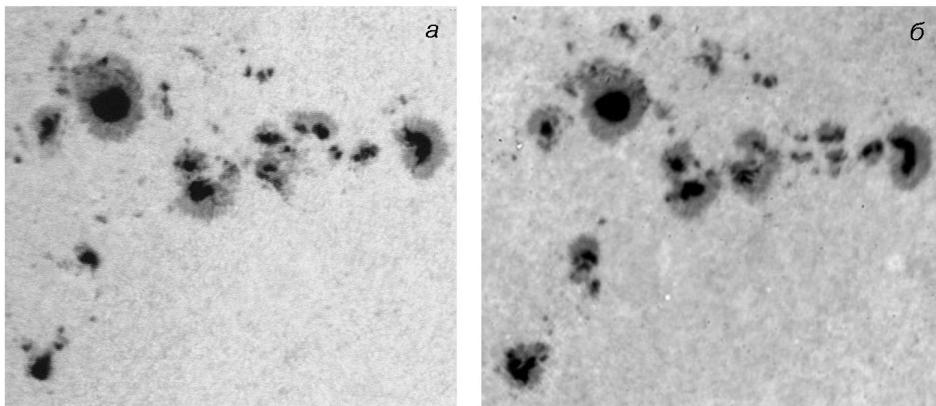


Рис. 6. Зображення активної області NOAA 9087 у білому світлі у початковій фазі спалаху 19 липня 2000 р. о 07^h10^m UT (а) і після спалаху о 16^h58^m UT (б)

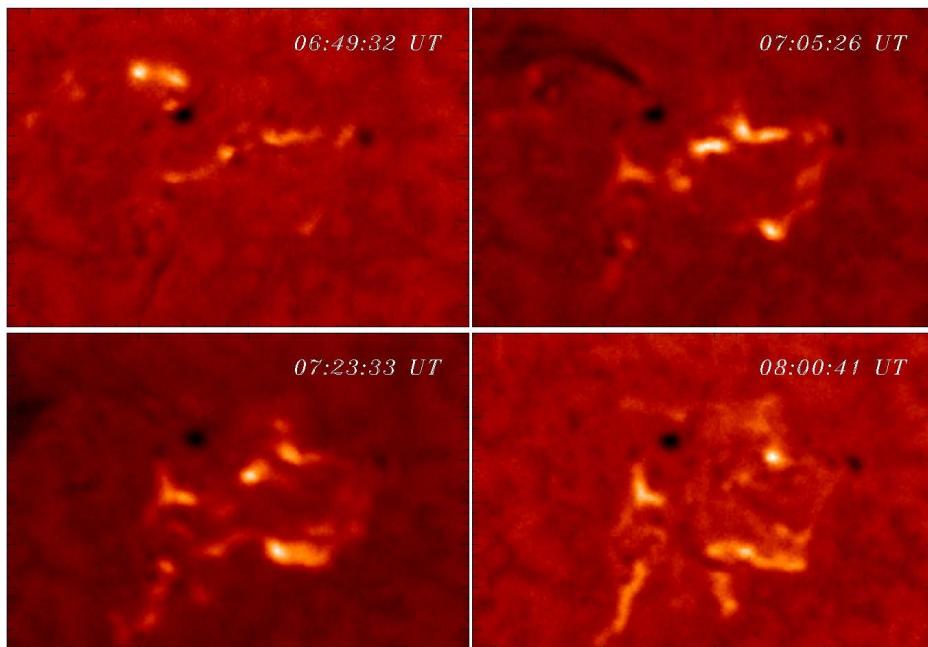


Рис. 7. Н -фільтрами спалаху 19 липня 2000 р., отримані у Медонській обсерваторії у чотири послідовні моменти часу

спалаху балу X2.2 15 лютого 2011 р.) посилення фотосферного горизонтального магнітного поля як відгук на перебудову магнітного поля в короні. З аналізу послідовності магнітограм в роботі [30] виявлено, що фотосферні поля майже миттєво реагують на магнітне перез'єднання у короні.

На рис. 7 показано чотири основні етапи розвитку спалаху на Н - фільтрограмах Медонської обсерваторії. О 6^h49^m біля великої плями, на північ від неї, спостерігалися два яскравих вузли. О 7^h05^m було вид-

но яскраві вузли у центрі групи, поблизу лінії розділу полярностей. Вузли на північ від плями зникли. В області цих вузлів стався хромосферний викид, він був фрагментований на кілька струменів. Внизу на рисунку наведено зображення спалаху в його Н_α-максимумі і у головній фазі. Більш детально розвиток хромосферного спалаху буде розглянуто в наступній статті.

СВІТЛОВІ КРИВІ

Світлові криві у різних довжинах хвиль наведено на рис. 8: потоки радіовипромінювання в дециметровому діапазоні 2.69 ГГц, м'якого рентгенівського випромінювання у смугах $\lambda = 0.05\ldots 0.4\ldots 0.8$ нм та інтенсивність у лінії H_α. На рис. 9 приведено світлові криві для декількох діапазонів жорсткого рентгенівського випромінювання (HXR), отримані на телескопі Yohkoh, починаючи з 6^h52^m. У початковій фазі спалаху спостерігалися сплески жорсткого рентгенівського випромінювання (рис. 9) і радіосплесків III типу (рис. 8). Відомо, що сплески жорсткого рентгенівського випромінювання і мікрохвильові сплески з'являються, коли відбувається значне енерговиділення. Інтенсивність HXR корелює з кількістю прискорених електронів і пропорційна швидкості виділення енергії [18]. Що стосується сплесків дециметрового радіовипромінювання, в роботі [21] запропоновано модель, згідно з якою пульсації радіопотоку викликані квазіперіодичними епізодами прискорення частинок, які є результатом динамічної фази магнітного через'єднання у великомасштабному струмовому шарі. У роботі [20] показано, що максимальний потік м'якого рентгенівського випромінювання спалахів сильно корелює з площею спалахових стрічок і часток потоку активної області, яка піддається магнітному через'єднанню.

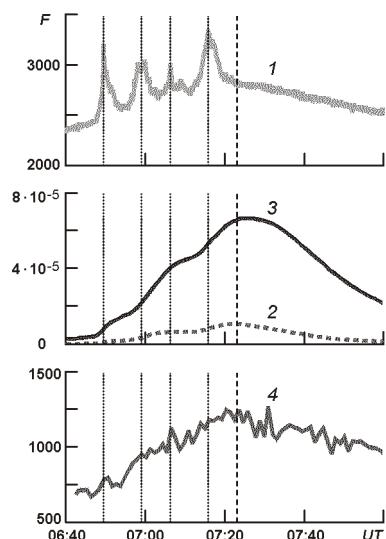


Рис. 8. Світлові криві для радіодіапазону 2.69 ГГц за даними обсерваторії в Лермонті (лінія 1), за даними GOES ($\lambda = 0.05\ldots 0.4$ нм — штрихова лінія 2 і $0.1\ldots 0.8$ нм — суцільна лінія 3), для лінії H_α за даними спостережень в обсерваторії у Медоні (лінія 4)

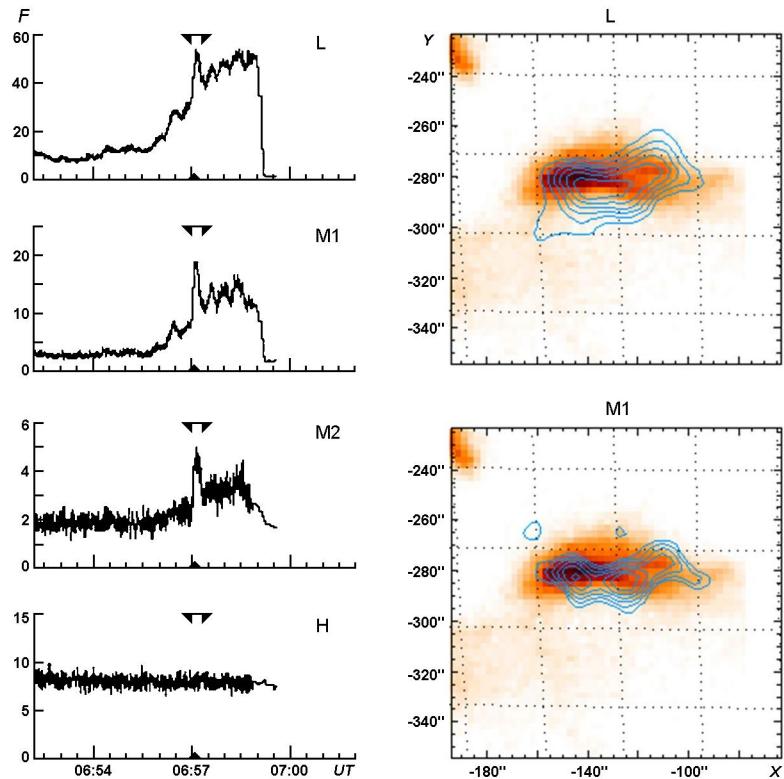


Рис. 9. Зміни з часом інтенсивності жорсткого рентгенівського випромінювання в діапазонах L, M1, M2 і H (ліворуч) та положення джерел жорсткого (сині контури) і м'якого (дифузні зображення в помаранчевому кольорі) рентгенівських випромінювань в активній області (праворуч) за даними з космічного супутника Yohkoh

У табл. 2 приведено моменти максимумів випромінювання спалаху в HXR, радіодіапазоні і в лінії H. В лінії H максимуми спалаху настають пізніше, що свідчить на користь вихідних магнітних перез'єднань у короні. Пучок прискорених електронів викликав перший сплеск радіо- і жорсткого рентгенівського випромінювання з максимумом о 6^h49^m і став причиною появи двох яскравих вузлів на фільтрограмі в лінії H і петель в далекому ультрафіолеті в районі великої плями. Поява хромосферного викиду і H-вузлів у центральній частині активної області пов'язані з другим сплеском радіо- і жорсткого рентгенівського випромінювання з максимумом о 6^h57^m .

У більшості спалахів походить від тимчасового профілю м'якого рентгенівського випромінювання подібна до профілю жорсткого рентгенівського випромінювання (ефект Ньюпорта) [38, 52]. Це свід-

Таблиця 2. Моменти максимумів спалахів у різних діапазонах довжин хвиль

Діапазон	Максимум 1	Максимум 2	Максимум 3	Максимум 4
HXR	$6^h49^m27^s$	$6^h57^m01^s$		
Радіо	6^h49^m	6^h59^m	7^h06^m	7^h16^m
H	$6^h50^m33^s$	$7^h01^m11^s$	$7^h07^m34^s$	$7^h18^m12^s$

чить про те, що енергія спалаху виділяється в основному у потік прискорених електронів, які згодом нагрівають плазму. У випадку дослідженого спалаху максимуми інтенсивності м'якого рентгенівського випромінювання (о 7^h22^m для діапазону 0.05...0.4 нм, о 7^h26^m для діапазону 0.1...0.8 нм) значно запізнюються відносно жорсткого рентгенівського та мікрохвильового випромінювання, дані для максимумів яких наведено на рис. 8 і у табл. 2. Іншими словами, для спалаху умова ефекту Ньюпорта не виконується, що свідчить про наявність додаткового механізму переносу енергії.

МАГНІТНІ ПЕРЕЗ'ЄДНАННЯ ПІД ЧАС СПАЛАХУ

Як відомо, виділення енергії спалаху відбувається внаслідок магнітних перез'єднань, а місця джерел випромінювання вказують, де виділяється енергія. В нашій роботі виділено джерело другого сплеску жорсткого рентгенівського випромінювання, який з'явився в центральній частині АО в 6^h57^m (рис. 9). Часове і просторове розділення даних, отриманих з допомогою жорсткого рентгенівського телескопа HXT на борту Yohkoh, становить 0.5 с і 5 відповідно.

На рис. 10 наведено MDI-магнітограма і зображення АО в Н-лінії, на довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм (SOHO) та у м'яких рентгенівських променях, на які накладено контури джерел в жорсткому рентгенівському випромінюванні у смугах L (13.9...22.7 кeВ) та M1 (22.7...32.7 кeВ). У смугах M2 і N було дуже мало високоенергійних частинок, і джерело неможливо виділити. Видно, що джерело жорсткого рентгенівського випромінювання перебувало над лінією розділу магнітних полярностей. Спалахові стрічки у хромосфері та короні лежать по краях зображення джерела. На більшій частині площини джерела жорсткого рентгенівського випромінювання збігаються з місцями світіння у м'якому рентгенівському випромінюванні.

В роботі [3] досліджено розташування джерел випромінювання HXR спалаху і встановлено, що вони лежать у місцях сильного виділення енергії. Швидкість виділення енергії пропорційна потужності сплеску жорсткого рентгенівського випромінювання.

На рис. 11 наведено послідовність зображень на довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм (корона) від початку спалаху о 6^h37^m до моменту 09^h04^m . О 6^h37^m біля великої плями, на північ від неї, видно яскраві петлі. О 6^h51^m в цьому місці АО спостерігалась аркада петель, яка потім зникла. У цей же час видно яскраві петлі в центральній частині активної області. О 7^h13^m спалах займав усю центральну і південну частини АО. Видно, як послідовно запалювались вузли спалаху, займаючи все більший простір активної області. Цікавим є розвиток східної частини спалаху після основного максимуму. На зображеннях 7^h26^m , 7^h33^m і 7^h40^m видно перетин яскравих петель, що свідчить про магнітне перез'єднання. Таким чином, перез'єднання відбувалися і в головній фазі спалаху. Після 08^h спостерігалися післяспалахові петлі.

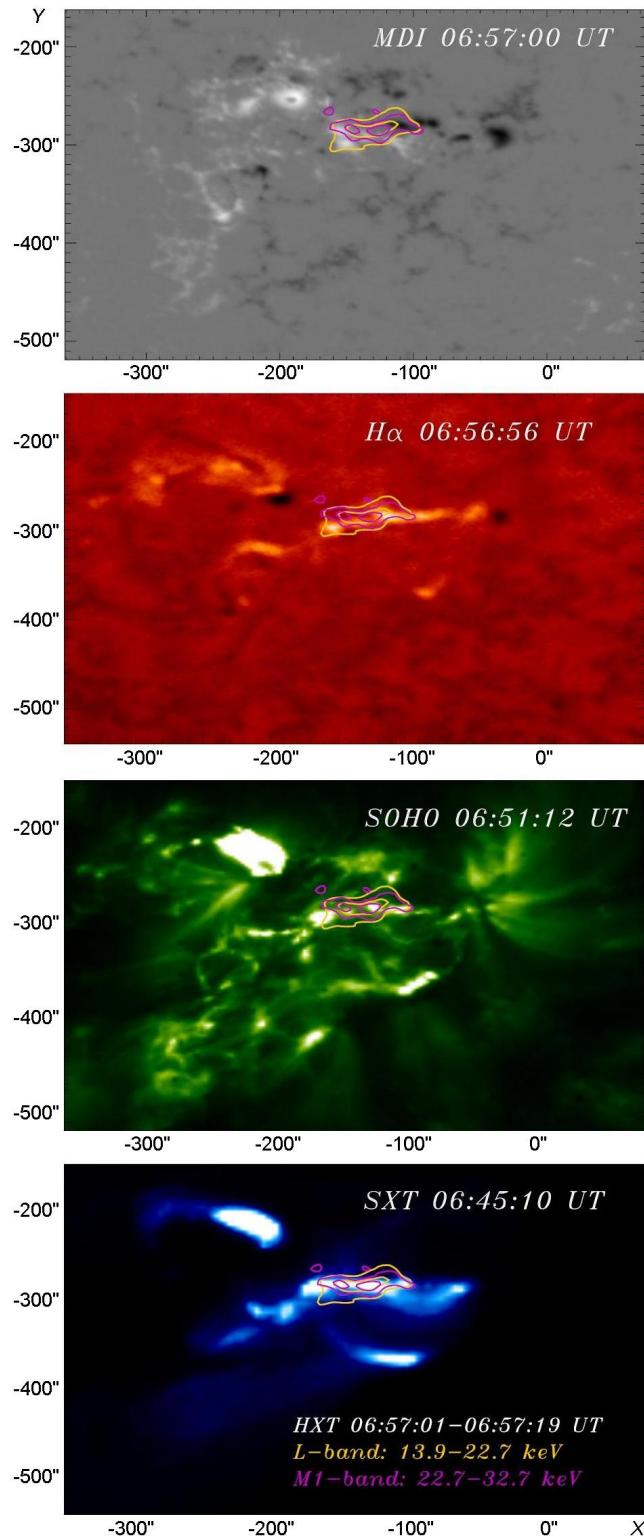


Рис. 10. MDI-магнітограма і зображення активної області в лінії Н α , у довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм (SOHO) та у м'якому рентгенівському випромінюванні, на які накладено контури джерел в жорсткому рентгенівському випромінюванні в двох смугах L (13.9...22.7 кеВ — жовтий контур) та M1 (22.7...32.7 кеВ — фіолетовий контур)

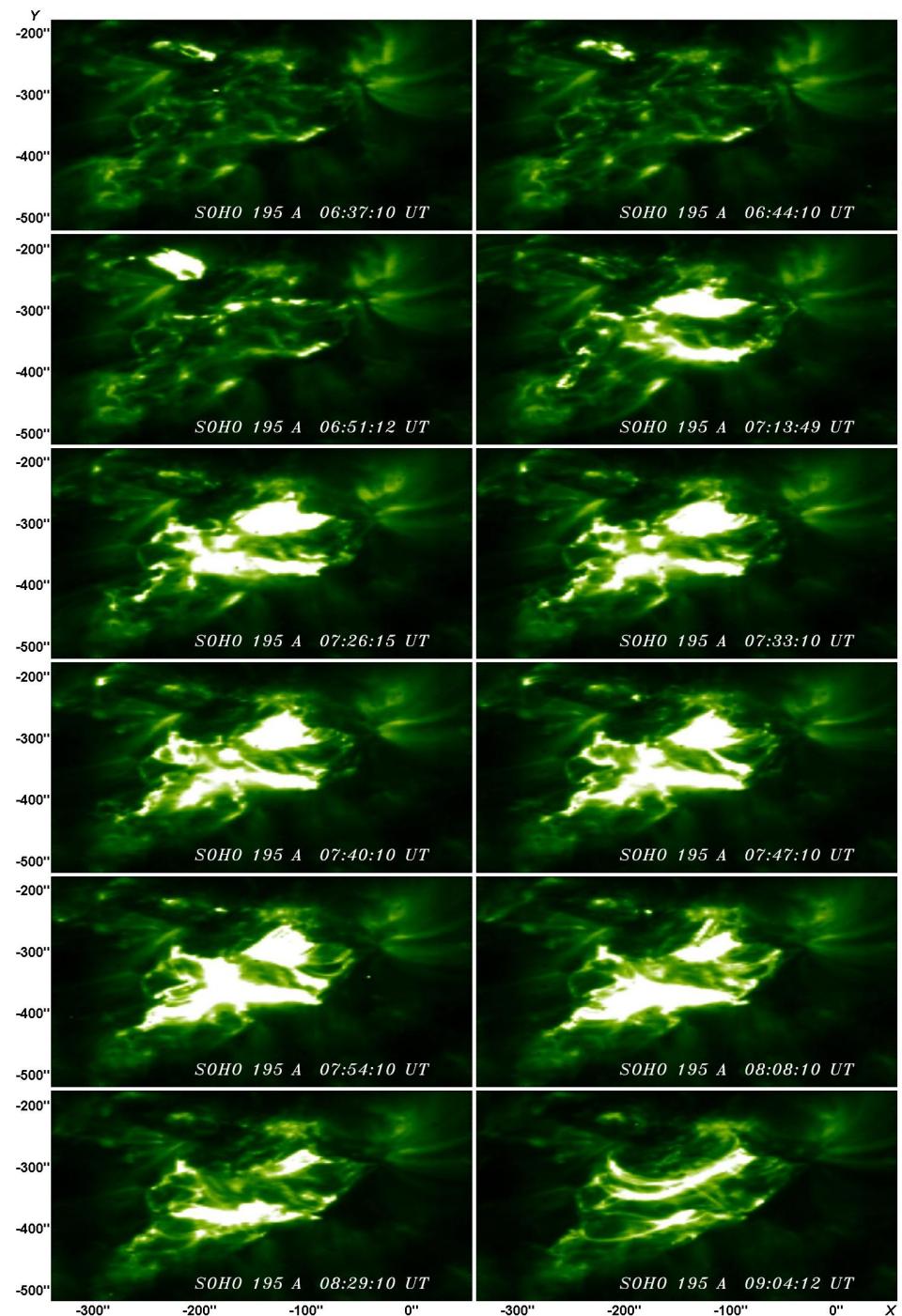


Рис. 11. Зображення активної області NOAA 9087 у довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм, отримані на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою телескопа EIT для різних моментів розвитку спалаху 19 липня 2000 р.

В роботі [57] на основі аналізу великої кількості спалахів виділено ряд подій, під час яких відбувається другий сильний сплеск випромінювання в далекому ультрафіолеті через кілька хвилин або навіть годин після основного максимуму спалаху, — так звана пізня фаза (EUV late phase). Основною особливістю цього етапу є появу набору протяжних і більш високих петель, у порівнянні з основними спалаховими петлями, як прояв більш пізнього магнітного через'єднання після основного через'єднання спалаху [11, 31, 56, 58]. У роботі [10] показано, що EUV-петлі пізньої фази в основному створюються менш енергійним магнітним через'єднанням. В роботі [58] причиною появи пізньої фази сонячного спалаху вважається постійне додаткове нагрівання, а джерелом нагрівання є магнітне через'єднання поля, розташованого вище, у чотириполюсній магнітній конфігурації.

Мабуть, після спалахові EUV-петлі, які спостерігалися приблизно через півтори години (9^h04^m) після максимуму досліджуваного нами спалаху (рис. 11), є проявом такої пізньої фази. Ці довгі петлі з'єднують місця первинного і повторного виділення енергії спалаху.

ВИСНОВКИ

Розглянуто еволюцію активної області NOAA 9087 і спалаху балу 3N/M6.4 на основі багатохвильових спостережень. АО мала складну мультипольну конфігурацію магнітного поля, що швидко розвивалася. Спалахова активність збільшувалася у міру ускладнення магнітної структури та виходу нових магнітних потоків і досягла максимуму 19 липня 2000 р., коли відбувся тривалий двострічковий спалах.

Енергія спалаху звільнялася послідовно в різних місцях АО. Всі спостережні дані свідчать про постійну зміну структури та потужності спалаху в різних довжинах хвиль.

У початковій фазі спалаху спостерігалися сплески жорсткого рентгенівського випромінювання і радіосплески III типу. Виділено джерело жорсткого рентгенівського випромінювання, яке розташувалося над лінією розділу магнітних полярностей.

На основі аналізу послідовних зображень петель в далекому ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль отримано спостережні докази магнітних через'єднань у головній фазі спалаху. На стадії загасання спалаху в діапазоні $\lambda = 19.5$ нм спостерігалися після спалахові петлі, що є проявом пізньої EUV-фази. Ці протяжні петлі з'єднують місця первинного і повторного виділення енергії спалаху.

Для досліджуваного спалаху не виконується умова ефекту Ньюпорта. Це означає, що діяв додатковий механізм переносу енергії і нагрівання.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота фінансувалась у рамках планового фінансування установ Національної академії наук України.

ПОДЯКИ

Автори вдячні групам підтримки телескопів обсерваторій у Медоні і Лермонті та Ондржейові, а також телескопів Yohkoh, GOES, BBSO і SOHO/MDI за вільний доступ до даних спостережень.

1. Лозицький В. Г., Стоділка М. І. Магнітні поля і термодинамічні умови у передмаксимальній фазі сонячного спалаху балу M6.4/3N. *Вісн. Кіїв. нац. ун-ту Астрон.* 2019. 59. С. 22—33.
2. Anwar B., Acton L. W., Hudson H. S., et al. Rapid sunspot motion during a major solar flare. *Solar Phys.* 1993. 147. № 2. P. 287—303.
3. Asai A., Yokoyama T., Shimojo M., et al. Flare ribbon expansion and energy release rate. *Astrophys. J.* 2004. 611. № 1. P. 557—567.
4. Benz A. O. Flare observations. *Living Rev. Sol. Phys.* 2008. 5.1.
5. Bi Y., Yang J., Jiang Y., et al. The photospheric vortex flows during a solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 2017. 849. id. L35. 7 p.
6. Chandra R., Schmieder B., Mandrini C. H., et al. Homologous flares and magnetic field topology in active region NOAA 10501 on 20 November 2003. *Solar Phys.* 2011. 269. № 1. P. 83—104.
7. Chandra R., Verma V. K., Rani S., Maurya R. A. Multi-wavelength view of an M2.2 solar flare on 26 November 2000. *New Astron.* 2017. 51. P. 105—112.
8. Chen X., Yan Y., Tan B., et al. Quasi-periodic pulsations before and during a solar flare in AR 12242. *Astrophys. J.* 2019. 878. № 2. id. 78. 12 p.
9. Chintzoglou G., Zhang J., Cheung M. C. M., Kazachenko M. The origin of major solar activity: collisional shearing between nonconjugated polarities of multiple dipoles emerging within active regions. *Astrophys. J.* 2019. 871. № 1. id. 67. 35 p.
10. Dai Y., Ding M. D., Guo Y. Production of the extreme-ultraviolet late phase of an X class flare in a three-stage magnetic reconnection process. *Astrophys. J. Lett.* 2013. 773. № 2. id. L21. 6 p.
11. Dai Y., Ding M., Zong W., Yang K. E. Extremely large extreme-ultraviolet late phase powered by intense early heating in a non-eruptive solar flare. *Astrophys. J.* 2018. 863. № 2. id. 124. 16 p.
12. Demoulin P. Extending the concept of separatrices to QSLs for magnetic reconnection. *Adv. Space Res.* 2006. 37. № 7. P. 1269—1282.
13. Deng N., Liu C., Yang G., et al. Rapid penumbral decay associated with an X2.3 flare in NOAA active region 9026. *Astrophys. J.* 2005. 623. № 2. P. 1195—1201.
14. Ding M. D., Chen Q. R., Li J. P., Chen, P. F. H-alpha and hard X-Ray observations of a two-ribbon flare associated with a filament eruption. *Astrophys. J.* 2003. 598. № 1. P. 683—688.
15. Dwivedi B. N., Srivastava A. K., Kumar M., Kumar P. A multiwavelength study of an M-class flare and the origin of an associated eruption from NOAA AR 11045. *New Astron.* 2012. 17. № 5. P. 542—551.
16. Fang C., Tang Y. H., Henoux J.-C., et al. Multi-wavelength analysis of the flare on 2 October 1993. *Solar Phys.* 1998. 182. № 1. P. 163—177.
17. Hahn M., Gaard S., Hahn M., et al. Spatial relationship between twist in active region magnetic fields and solar flares. *Astrophys. J.* 2005. 629. № 2. P. 1135—1140.
18. Hudson H. S. Differential emission-measure variations and the “Neupert effect”. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1991. 23. P. 1064.
19. Joshi B., Veronig A., Cho K.-S., et al. Magnetic reconnection during the two-phase evolution of a solar eruptive flare. *Astrophys. J.* 2009. 706. № 2. P. 1438—1450.
20. Kazachenko M. D., Lynch B. J., Welsch B. T., Sun X. A database of flare ribbon properties from the Solar Dynamics Observatory. I. Reconnection flux. *Astrophys. J.* 2017. 845. № 1. id. 49. 13 p.
21. Kliem B., Karlický M., Benz A. O. Solar flare radio pulsations as a signature of dy-

- namic magnetic reconnection. *Astron. and Astrophys.* 2000. 360. P. 715—728.
22. Kosugi T., Makishima K., Murakami T., et al. The Hard X-ray Telescope (HXT) for the SOLAR-A mission. *Solar Phys.* 1991. 136. № 1. P. 17—36.
 23. Kulinová A., Dzifčáková E., Bujňák R., Karlický M. Multi-wavelength analysis of the 29 September 2002 M2.6/2N flare. *Solar Phys.* 2004. 221. № 1. P. 101—119.
 24. Kumar P., Srivastava A. K., Filippov B., Uddin W. Multiwavelength study of the M8.9/3B solar flare from AR NOAA 10960. *Solar Phys.* 2010. 266. № 1. P. 39—58.
 25. Kurochka E. V., Lozitsky V. G. Magnetic fields and thermodynamical conditions in the M6.4/3N solar flare on July 19, 2000. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Suppl.* 2005. 5. P. 143—145.
 26. Kurochka E. V., Lozitsky V. G., Osyka O. B. Temporary changes of physical conditions in photospheric layers of a solar flare. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 2008. 24. № 4. P. 308—320.
 27. Lee J.-Y., Leka K. D., Barnes G., et al. Evolution of magnetic properties for two active regions observed by Hinode/XRT and TRACE. The Second Hinode Science Meeting: Beyond Discovery-Toward Understanding, *ASP Conference Series. 415.* (Proceedings of a meeting held 29 September through 3 October 2008 at the National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA) / Eds B. Lites, M. Cheung, T. Magara, J. Mariska, K. Reeves. — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009. P. 279.
 28. Li H. Magnetic field configurations leading to solar eruptions. *First Asia-Pacific solar physics meeting ASI Conference Series* / Eds A. R. Choudhuri, D. Banerjee. 2011. 2. P. 291—296.
 29. Li H.-W., Pallavicini R., Cheng C.-C. The gradual and impulsive reconnection and the preheating of solar flares. *Solar Phys.* 1987. 107. № 2. P. 271—282.
 30. Liu C., Cao W., Chae J., et al. Evolution of photospheric vector magnetic field associated with moving flare ribbons as seen by GST. *Astrophys. J.* 2018. 869. № 1. id. 21. 13 p.
 31. Li Y., Ding M. D., Guo Y., Dai Y. On the nature of the extreme-ultraviolet late phase of solar flares. *Astrophys. J.* 2014. 793. № 2. id. 85. 11 p.
 32. Li Y., Xue J. C., Ding M. D., et al. Spectroscopic observations of a current sheet in a solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 2018. 853. № 1. id. L15. 9 p.
 33. Luoni M. L., Mandrini C. H., Cristiani G. D., Díymoulin P. The magnetic field topology associated with two M flares. *Adv. Space Res.* 2007. 39. № 9. P. 1382—1388.
 34. Mandrini C. H., Demoulin P., Rovira M. G., et al. Constraints on flare models set by the active region magnetic topology. Magnetic topology of AR 6233. *Astron. and Astrophys.* 1995. 303. P. 927—939.
 35. Mathew S. K., Ambastha A. A. Rapidly evolving active region NOAA 8032 observed on April 15th 1997. *J. Astron. and Astrophys.* 2000. 21. № 3—4. P. 233—236.
 36. Miklenic C. H., Veronig A. M., Vrsnak B. Temporal comparison of nonthermal flare emission and magnetic-flux change rates. *Astron. and Astrophys.* 2009. 499. № 3. P. 893—904.
 37. Muhamad J., Kusano K., Inoue S., Shiota D. Magnetohydrodynamic simulations for studying solar flare trigger mechanism. *Astrophys. J.* 2017. 842. № 2. id. 86. 11 p.
 38. Neupert W. M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares. *Astrophys. J.* 1968. 153. L59—L64.
 39. Ogawara Y., Takano T., Kato T., et al. The Solar-A mission — an overview. *Solar Phys.* 1991. 136. № 1. P. 1—16.
 40. Oreshina I. V., Somov B. V. An indicator of the evolution of solar active regions towards conditions favourable for flare production. *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 2009. 33. P. 155—158.
 41. Oreshina I. V., Somov B. V. Evolution of the photospheric magnetic field and coronal null points before solar flares. *Astron. Letters.* 2009. 35. № 3. P. 207—213.
 42. Park S.-H., Chae J., Wang H. Productivity of solar flares and magnetic helicity injection in active regions. *Astrophys. J.* 2010. 718. № 1. P. 43—51.

43. Priest E. R., Forbes T. G. The magnetic nature of solar flares. *Astron. and Astrophys. Rev.* 2002. 10. № 4. P. 313—377.
44. Regnier S., Canfield R. C. Evolution of magnetic fields and energetics of flares in active region 8210. *Astron. and Astrophys.* 2006. 451. № 1. P. 319—330.
45. Romano P., Zuccarello F. Photospheric magnetic evolution of super active regions. *Astron. and Astrophys.* 2007. 474. № 2. P. 633—637.
46. Rovira M. G., Šimberová S., Karlický M., et al. Multiwavelength study of the May 13, 2005 flare event. *The Physics of Chromospheric Plasmas ASP Conference Series.* 368. (Proceedings of the conference held 9-13 October, 2006 at the University of Coimbra, Portugal). Eds P. Heinzel, I. Dorotovič, R. J. Rutten. — San Francisco: Astron. Soc. Pacif. 2007. P. 461.
47. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I. The solar oscillations investigation — Michelson Doppler Imager. *Solar Phys.* 1995. 162. № 1—2. P. 129—188.
48. Somov B. V., Kosugi T., Hudson H. S., et al. Magnetic reconnection scenario of the Bastille Day 2000 flare. *Astrophys. J.* 2002. 579. N. 2. P. 863—873.
49. Toriumi S., Schrijver C. J., Harra L. K., et al. Magnetic properties of solar active regions that govern large solar flares and eruptions. *Astrophys. J.* 2017. 834. № 1. id. 56. 19 p.
50. Toriumi S., Wang H. Flare-productive active regions. *Living Revs in Solar Phys.* 2019. 16. № 1. id. 3. 128 p.
51. Veronig A. M., Polanec W. Magnetic reconnection rates and energy release in a confined X-class flare. *Solar Phys.* 2015. 290. № 10. P. 2923—2942.
52. Veronig A., Vrsnak B., Dennis B. R., et al. Investigation of the Neupert effect in solar flares. I. Statistical properties and the evaporation model. *Astron. and Astrophys.* 2002. 392. P. 699—712.
53. Wang H., Yan Y., Sakurai T., Zhang M. Topology of magnetic field and coronal heating in solar active regions — II. The role of quasi-separatrix layers. *Solar Phys.* 2000. 197. № 2. P. 263—273.
54. Wang R., Liu Y. D., Hoeksema J. T., et al. Roles of photospheric motions and flux emergence in the major solar eruption on 2017 September 6. *Astrophys. J.* 2018. 869. № 2. id. 90. 11 p.
55. Wang S., Liu C., Liu R., et al. Response of the photospheric magnetic field to the X2.2 Flare on 2011 February 15. *Astrophys. J. Lett.* 2012. 745. № 2. id. L17. 5 p.
56. Woods T. N. Extreme ultraviolet late-phase flares: before and during the Solar Dynamics Observatory mission. *Solar Phys.* 2014. 289. № 9. P. 3391—3401.
57. Woods T. N., Hock R., Eparvier F., et al. New solar extreme ultraviolet irradiance observations during flares. *Astrophys. J.* 2011. 739. № 2. id. 59. 13 p.
58. Zhou Z., Cheng X., Liu L., et al. Extreme-ultraviolet late phase caused by magnetic reconnection over quadrupolar magnetic configuration in a solar flare. *Astrophys. J.* 2019. 878. № 1. id. 46. 11 p.
59. Xu Z., Jiang Y., Yang J., et al. Sudden penumbral reappearance and umbral motion induced by an M7.9 solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 2017. 840. id. L21. 7 p.
60. Xu Z., Yang J., Ji K., et al. Magnetic field rearrangement in the photosphere driven by an M5.0 solar flare. *Astrophys. J.* 2019. 874. № 2. id. 134. 9 p.

REFERENCES

1. Lozitsky V. G., Stodilka M. I. (2019) Magnetic fields and thermodynamic minds of the maximal phase of the sleepy hut to the ball M6.4/3N. *Newslett. Kyiv Nat. Taras Shevchenko Univ. Astron.* 59. 22—33 (in Ukrainian).
2. Anwar B., Acton L. W., Hudson H. S., et al. (1993) Rapid sunspot motion during a major solar flare. *Solar Phys.* 147(2). 287—303.
3. Asai A., Yokoyama T., Shimojo M., et al. (2004) Flare ribbon expansion and energy release rate. *Astrophys. J.* 611(1). 557—567.
4. Benz A. O. (2008) Flare observations. *Living Rev. Sol. Phys.* 5.1.

5. Bi Y., Yang J., Jiang Y., et al. (2017) The photospheric vortex flows during a solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 849. id. L35. 7.
6. Chandra R., Schmieder B., Mandrini C. H., et al. (2011) Homologous flares and magnetic field topology in active region NOAA 10501 on 20 November 2003. *Solar Phys.* 269(1). 83—104.
7. Chandra R., Verma V. K., Rani S., Maurya R. A. (2017) Multi-wavelength view of an M2.2 solar flare on 26 November 2000. *New Astron.* 51. 105—112.
8. Chen X., Yan Y., Tan B., et al. (2019) Quasi-periodic pulsations before and during a solar flare in AR 12242. *Astrophys. J.* 878(2). id. 78. 12.
9. Chintzoglou G., Zhang J., Cheung M. C. M., Kazachenko M. (2019) The origin of major solar activity: collisional shearing between nonconjugated polarities of multiple dipoles emerging within active regions. *Astrophys. J.* 871(1). id. 67. 35 p.
10. Dai Y., Ding M. D., Guo Y. (2013) Production of the extreme-ultraviolet late phase of an X class flare in a three-stage magnetic reconnection process. *Astrophys. J. Lett.* 773(2). id. L21. 6.
11. Dai Y., Ding M., Zong W., Yang K. E. (2018) Extremely large extreme-ultraviolet late phase powered by intense early heating in a non-eruptive solar flare. *Astrophys. J.* 863(2). id. 124. 16.
12. Demoulin P. (2006) Extending the concept of separatrices to QSLs for magnetic reconnection. *Adv. Space Res.* 37(7). 1269—1282.
13. Deng N., Liu C., Yang G., et al. (2005) Rapid penumbral decay associated with an X2.3 flare in NOAA active region 9026. *Astrophys. J.* 623(2). 1195—1201.
14. Ding M. D., Chen Q. R., Li J. P., Chen, P. F. (2003) H-alpha and hard X-ray observations of a two-ribbon flare associated with a filament eruption. *Astrophys. J.* 598(1). 683—688.
15. Dwivedi B. N., Srivastava A. K., Kumar M., Kumar P. (2012) A multiwavelength study of an M-class flare and the origin of an associated eruption from NOAA AR 11045. *New Astron.* 17(5). 542—551.
16. Fang C., Tang Y. H., Henoux J.-C., et al. (1998) Multi-wavelength analysis of the flare on 2 October 1993. *Solar Phys.* 182(1). 163—177.
17. Hahn M., Gaard S., Hahn M., et al. (2005) Spatial relationship between twist in active region magnetic fields and solar flares. *Astrophys. J.* 629(2). 1135—1140.
18. Hudson H. S. (1991) Differential emission-measure variations and the “Neupert effect”. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 23. 1064.
19. Joshi B., Veronig A., Cho K.-S., et al. (2009) Magnetic reconnection during the two-phase evolution of a solar eruptive flare. *Astrophys. J.* 706(2). 1438—1450.
20. Kazachenko M. D., Lynch B. J., Welsch B. T., Sun X. (2017) A database of flare ribbon properties from the Solar Dynamics Observatory. I. Reconnection flux. *Astrophys. J.* 845(1). id. 49. 13.
21. Kliem B., Karlický M., Benz A. O. (2000) Solar flare radio pulsations as a signature of dynamic magnetic reconnection. *Astron. and Astrophys.* 360. 715—728.
22. Kosugi T., Makishima K., Murakami T., et al. (1991) The Hard X-ray Telescope (HXT) for the SOLAR-A mission. *Solar Phys.* 136(1). 17—36.
23. Kulinová A., Dzifčáková E., Bujňák R., Karlický M. (2004) Multi-wavelength analysis of the 29 September 2002 M2.6/2N flare. *Solar Phys.* 221(1). 101—119.
24. Kumar P., Srivastava A. K., Filippov B., Uddin W. (2010) Multiwavelength study of the M8.9/3B solar flare from AR NOAA 10960. *Solar Phys.* 266(1). 39—58.
25. Kurochka E. V., Lozitsky V. G. (2005) Magnetic fields and thermodynamical conditions in the M6.4/3N solar flare on July 19, 2000. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Suppl.* 5. 143—145.
26. Kurochka E. V., Lozitsky V. G., Osyka O. B. (2008) Temporary changes of physical conditions in photospheric layers of a solar flare. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 24(4). 308—320.
27. Lee J.-Y., Leka K. D., Barnes G., et al. (2009) Evolution of magnetic properties for two active regions observed by Hinode/XRT and TRACE. The Second Hinode Science

- Meeting: Beyond Discovery-Toward Understanding, *ASP Conf. Ser. 415*. (Proc. of a meeting held 29 September through 3 October 2008 at the National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA) / Eds B. Lites, M. Cheung, T. Magara, J. Mariska, K. Reeves. — San Francisco: Astron. Soc. Pacif. 279.
- 28. Li H. (2011) Magnetic field configurations leading to solar eruptions. First Asia-Pacific solar physics meeting *ASI Conf. Ser.* Eds A. R. Choudhuri, D. Banerjee. 2. 291—296.
 - 29. Li H.-W., Pallavicini R., Cheng C.-C. (1987) The gradual and impulsive reconnection and the preheating of solar flares. *Solar Phys.* 107(2). 271—282.
 - 30. Liu C., Cao W., Chae J., et al. (2018) Evolution of photospheric vector magnetic field associated with moving flare ribbons as seen by GST. *Astrophys. J.* 869(1). id. 21. 13.
 - 31. Li Y., Ding M. D., Guo Y., Dai Y. (2014) On the nature of the extreme-ultraviolet late phase of solar flares. *Astrophys. J.* 793(2). id. 85. 11.
 - 32. Li Y., Xue J. C., Ding M. D., et al. (2018) Spectroscopic observations of a current sheet in a solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 853(1). id. L15. 9.
 - 33. Luoni M. L., Mandrini C. H., Cristiani G. D., Demoulin P. (2007) The magnetic field topology associated with two M flares. *Adv. Space Res.* 39(9). 1382—1388.
 - 34. Mandrini C. H., Demoulin P., Rovira M. G., et al. (1995) Constraints on flare models set by the active region magnetic topology. Magnetic topology of AR 6233. *Astron. and Astrophys.* 303. 927—939.
 - 35. Mathew S. K., Ambastha A. A. (2000) Rapidly evolving active region NOAA 8032 observed on April 15th 1997. *J. Astron. and Astrophys.* 21(3-4). 233—236.
 - 36. Miklenic C. H., Veronig A. M., Vrsnak B. (2009) Temporal comparison of nonthermal flare emission and magnetic-flux change rates. *Astron. and Astrophys.* 499(3). 893—904.
 - 37. Muhamad J., Kusano K., Inoue S., Shiota D. (2017) Magnetohydrodynamic simulations for studying solar flare trigger mechanism. *Astrophys. J.* 842(2). id. 86. 11.
 - 38. Neupert W. M. (1968) Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares. *Astrophys. J.* 153. L59—L64.
 - 39. Ogawara Y., Takano T., Kato T., et al. (1991) The Solar-A mission — an overview. *Solar Phys.* 136(1). 1—16.
 - 40. Oreshina I. V., Somov B. V. (2009) An indicator of the evolution of solar active regions towards conditions favourable for flare production. *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 33. 155—158.
 - 41. Oreshina I. V., Somov B. V. (2009) Evolution of the photospheric magnetic field and coronal null points before solar flares. *Astron. Letters.* 35(3). 207—213.
 - 42. Park S.-H., Chae J., Wang H. (2010) Productivity of solar flares and magnetic helicity injection in active regions. *Astrophys. J.* 718(1). 43—51.
 - 43. Priest E. R., Forbes T. G. (2002) The magnetic nature of solar flares. *Astron. and Astrophys. Rev.* 10(4). 313—377.
 - 44. Regnier S., Canfield R. C. (2006) Evolution of magnetic fields and energetics of flares in active region 8210. *Astron. and Astrophys.* 451(1). 319—330.
 - 45. Romano P., Zuccarello F. (2007) Photospheric magnetic evolution of super active regions. *Astron. and Astrophys.* 474(2). 633—637.
 - 46. Rovira M. G., Šimberová S., Karlický M., et al. (2007) Multiwavelength study of the May 13, 2005 flare event. The Physics of Chromospheric Plasmas *ASP Conference Series.* 368. (Proceedings of the conference held 9-13 October, 2006 at the University of Coimbra, Portugal). Eds P. Heinzel, I. Dorotovič, R. J. Rutten. — San Francisco: Astron. Soc. Pacif. 461.
 - 47. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I. (1995) The solar oscillations investigation — Michelson Doppler Imager. *Solar Phys.* 162(1-2). 129—188.
 - 48. Somov B. V., Kosugi T., Hudson H. S., et al. (2002) Magnetic reconnection scenario of the Bastille Day 2000 flare. *Astrophys. J.* 579(2). 863—873.
 - 49. Toriumi S., Schrijver C. J., Harra L. K., et al. (2017) Magnetic properties of solar active regions that govern large solar flares and eruptions. *Astrophys. J.* 834(1). id. 56. 19.

50. Toriumi S., Wang H. (2019) Flare-productive active regions. *Living Revs in Solar Phys.* 16(1). id. 3. 128.
51. Veronig A. M., Polanec W. (2015) Magnetic reconnection rates and energy release in a confined X-class flare. *Solar Phys.* 290(10). 2923—2942.
52. Veronig A., Vrsnak B., Dennis B. R., et al. (2002) Investigation of the Neupert effect in solar flares. I. Statistical properties and the evaporation model. *Astron. and Astrophys.* 392. 699—712.
53. Wang H., Yan Y., Sakurai T., Zhang M. (2000) Topology of magnetic field and coronal heating in solar active regions — II. The role of quasi-separatrix layers. *Solar Phys.* 197(2). 263—273.
54. Wang R., Liu Y. D., Hoeksema J. T., et al. (2018) Roles of photospheric motions and flux emergence in the major solar eruption on 2017 September 6. *Astrophys. J.* 869(2). id. 90. 11.
55. Wang S., Liu C., Liu R., et al. (2012) Response of the photospheric magnetic field to the X2.2 Flare on 2011 February 15. *Astrophys. J. Lett.* 745(2). id. L17. 5.
56. Woods T. N. (2014) Extreme ultraviolet late-phase flares: before and during the Solar Dynamics Observatory mission. *Solar Phys.* 289(9). 3391—3401.
57. Woods T. N., Hock R., Eparvier F., et al. (2011) New solar extreme ultraviolet irradiance observations during flares. *Astrophys. J.* 739(2). id. 59. 13.
58. Zhou Z., Cheng X., Liu L., et al. (2019) Extreme-ultraviolet late phase caused by magnetic reconnection over quadrupolar magnetic configuration in a solar flare. *Astrophys. J.* 878(1). id. 46. 11.
59. Xu Z., Jiang Y., Yang J., et al. (2017) Sudden penumbral reappearance and umbral motion induced by an M7.9 solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 840. id. L21. 7.
60. Xu Z., Yang J., Ji K., et al. (2019) Magnetic field rearrangement in the photosphere driven by an M5.0 solar flare. *Astrophys. J.* 874(2). id. 134. 9.

С. Н. Чорногор, Н. Н. Кондрашова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
Киев, Украина

МОРФОЛОГІЯ ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНОЇ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ NOAA 9087

Эволюция и морфологические свойства активной области NOAA 9087 были проанализированы на основе данных космических и наземных обсерваторий. Данные о жестком (HXR) и мягким рентгеновском излучении (SXR) получены на телескопах спутника Yohkoh (HXT и SXT) и геостационарном спутнике GOES. Магнитограммы и изображения в далеком ультрафиолете получены на телескопах MDI и EIT солнечной обсерватории SOHO. Использованы изображения в белом свете из обсерватории Big Bear (BBSO) и Н -фильтрограммы из Медонской обсерватории. Данные о потоке радиоизлучения на частоте 2.69 ГГц были взяты из базы Всемирного центра данных обсерватории в Лермонте (Австралия). Исследуемая активная область наблюдалась на солнечном диске с 15 по 27 июля 2000 г. и показала сложную конфигурацию мультиполлярного магнитного поля. Сильная вспышечная активность и выбросы наблюдались в этой активной области. Согласно данным Solar Geophysical Data (SGD) двухленточная вспышка 3N/M6.4 произошла 19 июля 2000 г. и длилась 2.5 часа. Энергия вспышки выделялась последовательно в разных местах активной области. Все наблюдательные данные свидетельствуют о непрерывном изменении структуры и мощности вспышки в разных длинах волн. В начальной фазе вспышки наблюдались радиовсплески III типа и всплески жесткого рентгеновского излучения. Корональный источник HXR располагался над линией инверсии магнитной полярности активной области. На основе анализа последовательных изображений петель в ультрафиолетовом диапазоне длин волн получены

наблюдательные доказательства магнитных пересоединений в главной фазе вспышки. На стадии затухания вспышки в диапазоне 19.5 нм наблюдались послевспышечные петли, что является проявлением поздней EUV-фазы. Эти протяженные петли соединяют места первичного и повторного выделения энергии вспышки. В главной фазе вспышки действовал дополнительный механизм переноса энергии и нагревания.

Ключевые слова: Солнце, активные области, солнечные вспышки, магнитные пересоединения, многоволновые наблюдения.

S. N. Chornogor, N. N. Kondrashova

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

MORPHOLOGY OF THE FLARE-PRODUCTIVE ACTIVE REGION NOAA 9087

Evolution and morphological properties of the active region NOAA 9087 have been analyzed using combination of data from space and ground-based observatories. The hard X-ray (HXR) and soft X-ray (SXR) data were obtained at the Yohkoh Telescopes (HXT and SXT) and Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). The full-disk magnetograms and EUV-images were provided by the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) Michelson Doppler Imager (MDI) and Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT). We used the H_α-filtergrams from the Meudon spectroheliograph and white light images of Big Bear Solar Observatory (BBSO). Data on the radio emission flux at a frequency of 2.69 GHz was taken from the database of the World Data Center of the Learmonth Observatory (Australia). Active region (AR) studied was observed on the solar disk from 15th to 27th of July, 2000 and showed a complex multipolar magnetic field configuration. The high flare and surge activity was observed in the active region. According to Solar Geophysical Data (SGD) the 3N/M6.4 a long duration two-ribbon flare occurred 19 July 2000 and lasted 2.5 hours. The flare energy was released sequentially in different places of the AR. All the data show continuously evolving SXR, EUV and H_α features during the flare. The HXR and the type III radio bursts were observed at the flare initial phase. A HXR coronal source was located along magnetic polarity inversion line of the active region. EUV loop structures show the observational evidence of a magnetic reconnection during the main phase of the flare. Postflare loops were observed in the 19.5 nm passband at the gradual phase as a manifestation of the EUV late phase. These extended loops connect the sites of primary and secondary of flare energy sources. An additional mechanism of energy transfer and heating existed in the main phase of the flare.

Keywords: Sun, active regions, solar flares, magnetic reconnections, multi-wavelength observations.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2019

Після доопрацювання 30.01.2020

Прийнята до друку 20.02.2020