

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.041>

УДК 523.985.3

С. М. Чорногор, Н. М. Кондрашова

Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
вул. Академіка Заболотного, 27, Київ, Україна, 03143
chornog@mao.kiev.ua

Розвиток кругового сонячного спалаху M6.4 за спостереженнями в лінії H

Вивчено розвиток спалаху 3N/M6.4 19 липня 2000 року в активній області NOAA 9087 на основі аналізу його зображень в лінії H. Використано H-фільтрограми, отримані у Медонській обсерваторії. Спалахово-активна область NOAA 9087 мала складну мультиполярну структуру магнітного поля. Спалах бала 3N/M6.4 почався з появи двох яскравих ядер поблизу великої плями. Через кілька хвилин з'явилися спалахові ядра в центральній частині активної області, де було виявлено корональне джерело жорсткого рентгенівського випромінювання. Спалах тривав 2.5 год. Його енергія вивільнялася послідовно в різних місцях активної області. Ядра спалаху розташовувалися уздовж лінії розділу полярностей на межах хромосферних комірок. Спалахові стрічки мали кругову форму. Зроблено припущення про магнітну топологію типу віяло-шип, що містить нульову точку. В такому випадку спалахові стрічки — це місця перетину віялового квазісепаратрисного шару з нижньою атмосферою. Послідовна поява спалахових ядер може вказувати на ковзне магнітне перез'єднання в досліджуваному спалаху. На H-зображеннях у головній фазі спалаху є петлі, що перез'єднуються у східній частині активної області, які добре видно в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль.

Ключові слова: Сонце, активність, хромосфера, сонячні спалахи, магнітні перез'єднання.

ВСТУП

Відповідно до сучасних уявлень сонячні спалахи відбуваються в результаті магнітних перез'єднань, при яких змінюється зв'язність сило-

вих ліній магнітного поля [10, 36]. У процесі спалахів магнітна енергія перетворюється в теплову енергію і кінетичну енергію прискорених частинок. Потoki енергійних частинок або нагрівання нижньої атмосфери викликають появу спалахових ядер і стрічок. Магнітні перез'єднання можуть ініціюватися в нульових точках, на сепараторах, у квазісепаратрисних шарах [5, 7, 22, 29—31, 35, 46].

Важлива роль магнітної топології для виникнення та розвитку спалахів відзначається у багатьох роботах, наприклад [5, 14, 22, 29, 31, 33, 37]. Магнітну топологію, що сприяє появі спалахів, створюють зміни магнітного шира, великий градієнт магнітного поля, розбаланс магнітного потоку, вихід нових магнітних потоків у вигляді скручених поточкових мотузок.

В роботі [22] підкреслюється значення виходу скручених поточкових мотузок для виникнення ерупцій. Зроблено висновок про те, що нульові точки сприяють ерупціям, але не є необхідною для них умовою. В активній області може бути багато поточкових мотузок [16]. Як показано в роботі [33], поточкові мотузки наявні в топології з нульовою точкою не тільки для еруптивних подій, але також і для обмежених спалахів. Магнітне перез'єднання у досліджуваному авторами спалаху відбувалося в два етапи. Спочатку нижче поточної мотузки, а потім у нульовій точці між поточною мотузкою і магнітним полем, що розміщувалося вище. У роботах [7, 14, 35, 37] отримало розвиток дослідження тривимірної магнітної топології, а у роботах [1, 3, 18] розроблено стандартну тривимірну модель сонячного спалаху, яка дозволяє пояснити багато особливостей спостережуваних спалахів [17]. Передбачається, що у тривимірних магнітних конфігураціях магнітне перез'єднання відбувається переважно у квазісепаратрисному шарі [7, 46]. В роботі [14] показано, що скелет магнітної топології в активній області визначає геометрію післяспалахових петель і спалахових стрічок.

В роботах [5, 9, 10, 30, 31] встановлено зв'язок між топологією магнітного поля і H -ядрами спалахів. Спалахові стрічки можуть утворюватися у місцях перетину квазісепаратрисних шарів з нижньою атмосферою [8, 9, 30]. Вони з'являються в результаті нагрівання або потоку частинок, що рухається по квазісепаратрисному шару з джерела в короні. Вивчення яскравих особливостей спалахів у різних діапазонах довжин хвиль може дати відомості про топологію магнітного поля і про процес магнітного перез'єднання.

У нашій попередній роботі [6] розглядалися деякі особливості морфології та еволюції активної області NOAA 9087 і спалаху бала 3N/M6.4 19 липня 2000 року на основі багатохвильових спостережень. У ній використано дані спостережень у білому світлі (Big Bear Solar Observatory), в лінії H (спектрогеліограф обсерваторії у Медоні), у м'якому і жорсткому діапазонах рентгенівського випромінювання (космічні прилади HXT (Hard X-ray Telescope) [20] і SXT (Soft X-ray Telescope) на супутнику Yohkoh [34]). Наведено дані супутника GOES

(Geostationary Operational Environmental Satellite) про зміну м'якого рентгенівського випромінювання (SXR) в діапазонах 0.05...0.4 нм і 0.1...0.8 нм, усереднені по 1 хв, надано зображення в різних діапазонах ультрафіолетового спектру (17.1, 19.5, 28.4, 30.4 нм), отримані на орбітальній обсерваторії SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) [40], а також магнітограми повного диска Сонця, отримані за допомогою приладу MDI (Michelson Doppler Imager) обсерваторії SOHO, і дані про потік радіовипромінювання на частоті 2.695 ГГц з бази Світового Центру Даних обсерваторії в Лермонті (Learmonth, Австралія).

Досліджувана активна область NOAA 9087 спостерігалася на сонячному диску з 15 по 27 липня 2000 р. Встановлено, що вона мала мультиполярну конфігурацію магнітного поля, яка з кожним днем ускладнювалася. У ній спостерігалися вкраплення паразитних полярностей, що свідчить про вихід нових магнітних потоків. По мірі ускладнення магнітної структури збільшувалася спалахова активність області. 19 липня 2000 року в ній стався найпотужніший за період її проходження по диску тривалий двострічковий спалах бала 3N/M6.4. У початковій фазі спалаху відбулися сплески жорсткого рентгенівського випромінювання та радіосплески III типу. Жорстке рентгенівське випромінювання генерувалось у центральній частині області над лінією розділу магнітних полярностей. Згідно з даними GOES інтенсивність м'якого рентгенівського випромінювання різко збільшувалася на початку спалаху, а потім відбувався дуже повільний її спад. У головній фазі спалаху відбувалися магнітні перез'єднання, про що свідчать зображення в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль. В кінці спалаху спостерігалися гігантські післяспалахові петлі. Раніше в роботах [21, 28] були вивчені термодинамічні умови і параметри магнітного поля у фотосферних шарах цього спалаху.

У даній роботі детально аналізуються зображення спалаху в лінії H α , отримані на спектрогеліографі Медонської обсерваторії.

ЕВОЛЮЦІЯ СПАЛАХУ В ХРОМОСФЕРІ

Спалах бала 3N/M6.4 виник 19 липня 2000 р., його координати — S18E10. Він займав велику площу на диску. Згідно з даними Solar Geophysical Data H α -спалах розпочався о 06^h37^m UT, його основний максимум зафіксовано о 07^h23^m UT, а кінець — о 09^h01^m UT. Він тривав майже 2.5 год і належить до класу тривалих подій (LDE — Long Duration Event). Для вивчення цього спалаху в даній роботі використано дані спостережень в лінії H α , отримані на спектрогеліографі обсерваторії у Медоні.

На рис. 1—8 показано основні етапи розвитку спалаху на H α -фільтрограмах Медонської обсерваторії. На рис. 1 наведено H α -зображення для моментів 6^h42^m і 6^h44^m, а також магнітограма MDI і зобра-

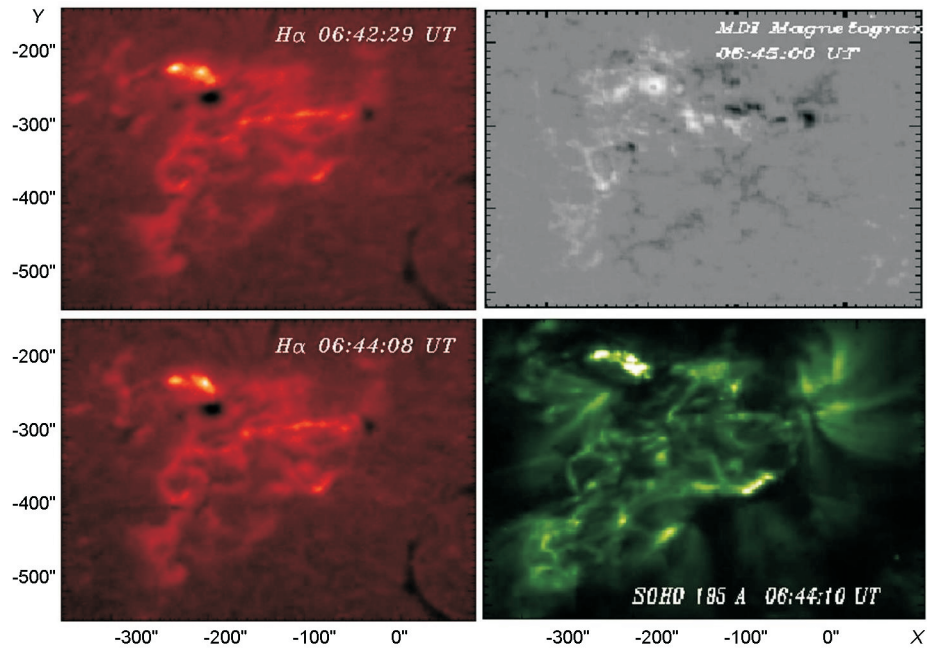


Рис. 1. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в лінії $H\alpha$, отримані у Медонській обсерваторії: $06^h42^m29^s$, $06^h44^m08^s$ UT. Магнітограма активної області NOAA 9087 19 липня 2000 р., отримана на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою приладу MDI, і зображення спалаху 19 липня 2000 р. в довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм у $06^h44^m10^s$ UT, отримане на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою телескопа EIT

ження в лінії 19.5 нм, отримані на SOHO. На $H\alpha$ -зображеннях добре видно чарункову структуру хромосфери активної області. Спалах розпочався з появи двох яскравих ядер біля великої плями позитивної полярності. У цій області виходив новий магнітний потік негативної полярності, який, мабуть, став тригером спалаху.

До 6^h44^m значно підвищилася яскравість ближнього до плями вузла спалаху як у лінії $H\alpha$, так і в лінії Fe XII 19.5 нм. Яскраві $H\alpha$ -ядра є основами петель, що формуються в короні.

О 6^h48^m виникли яскраві $H\alpha$ -ядра в центрі групи, поблизу лінії розділу полярностей (рис. 2). Для виділення спалахових ядер і зміни їхньої інтенсивності протягом спалаху на рис. 3 побудовано зображення різниці вигляду активної області в лінії $H\alpha$ -ядра. Добре видно, що яскравість у цих місцях сильно збільшилась. Мабуть, поява цих ядер була пов'язана з першими сплесками радіо- та жорсткого рентгенівського випромінювання, максимума яких спостерігались о 6^h49^m . Інтенсивність цих спалахових ядер продовжувала збільшуватися і досягла максимуму о 6^h50^m . Як видно з рис. 2, до моменту 6^h51^m на місці перших спалахових ядер біля великої плями утворилася аркада корональних спалахових петель.

У 6^h56^m (рис. 4) в цьому місці стався викид хромосферної речовини, який потім розділювався на кілька струменів. У центральній частині активної області підвищилася інтенсивність $H\alpha$ -ядер. Це було викли-

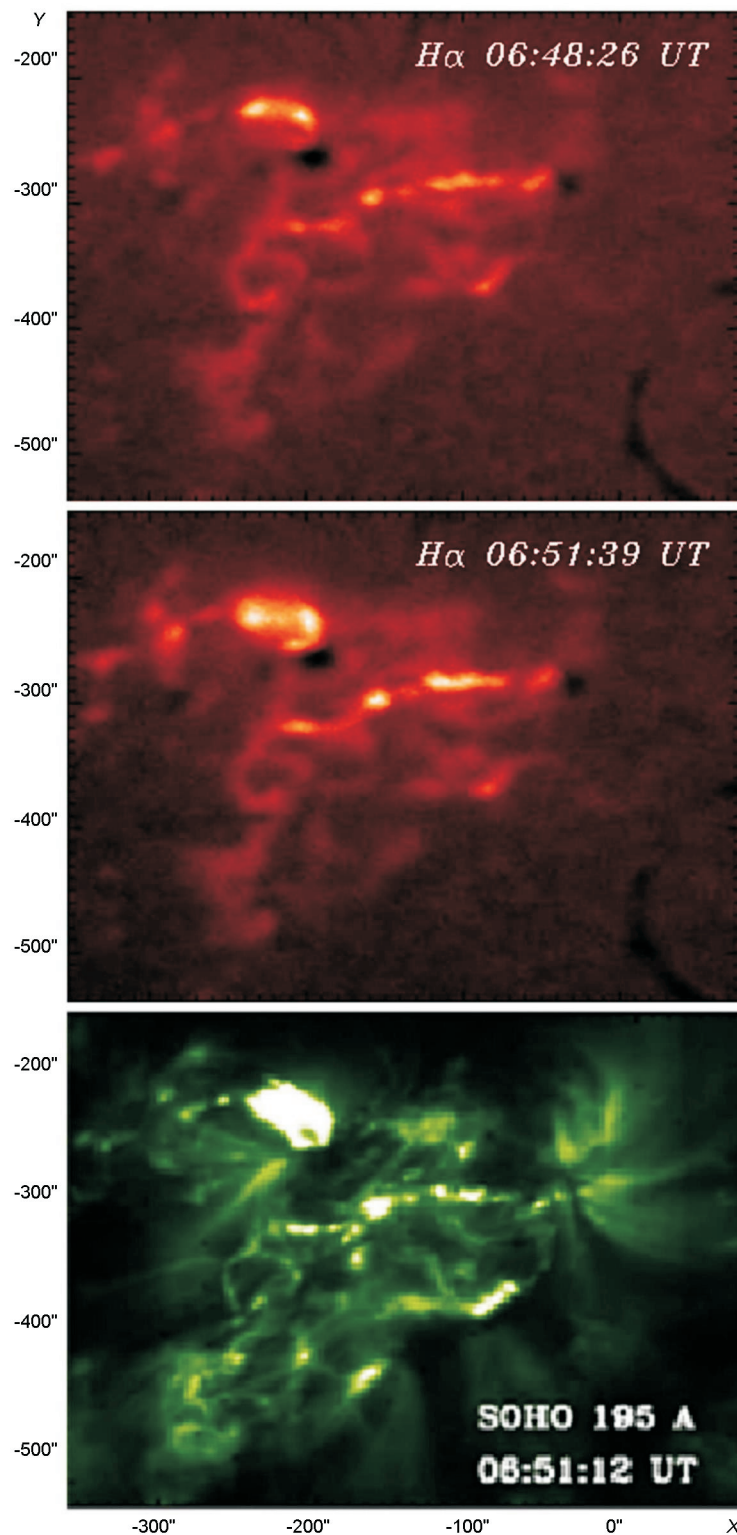


Рис. 2. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в лінії H , отримані у Медонській обсерваторії о $06^h48^m26^s$, $06^h51^m39^s$ UT, і зображення в довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм о $06^h51^m12^s$ UT, отримане на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою телескопа EIT

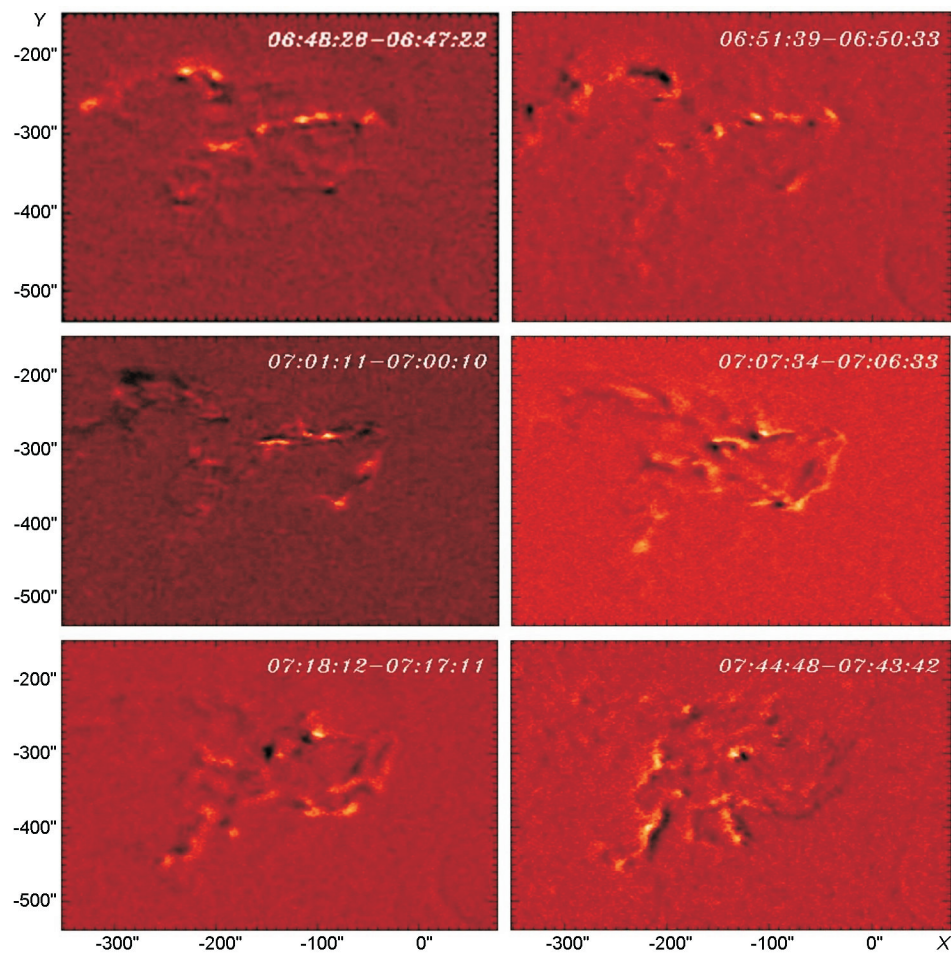


Рис. 3. Різниця зображень спалаху 19 липня 2000 р. в лінії H, отриманих у Медонській обсерваторії, для кількох моментів часу

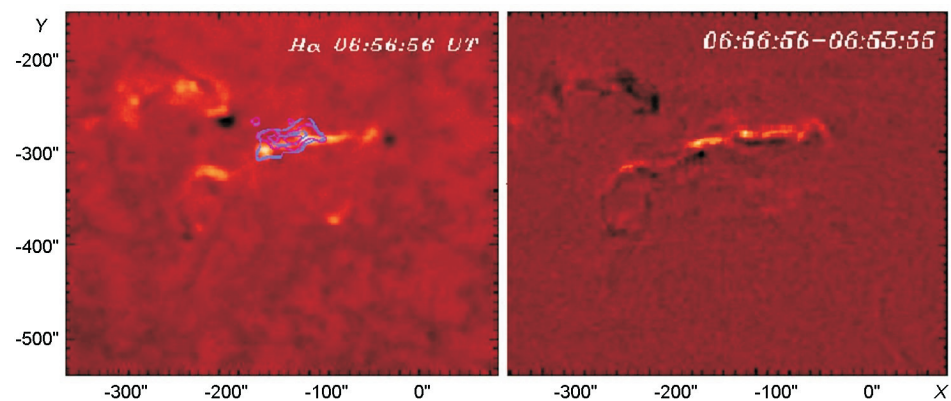


Рис. 4. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в активній області NOAA 9087 в лінії H, отримане у Медонській обсерваторії о $06^h56^m56^s$ UT, і різниця зображень о $06^h56^m56^s$ та $06^h55^m55^s$ UT

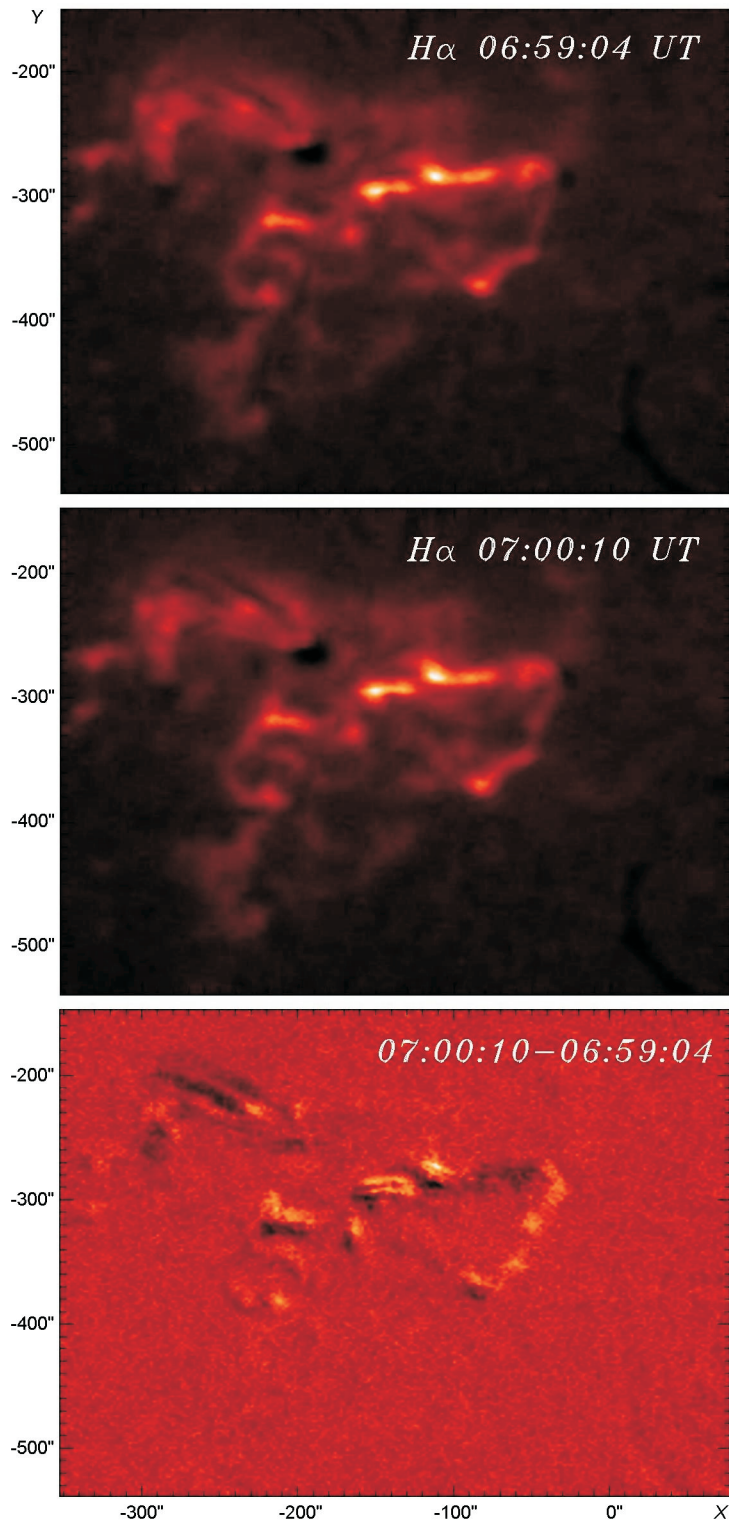


Рис. 5. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в активній області NOAA 9087 в лінії H , отримані у Медонській обсерваторії о $06^h59^m04^s$, $07^h00^m10^s$ UT, та різниця зображень о $07^h00^m10^s$ і $06^h59^m04^s$ UT

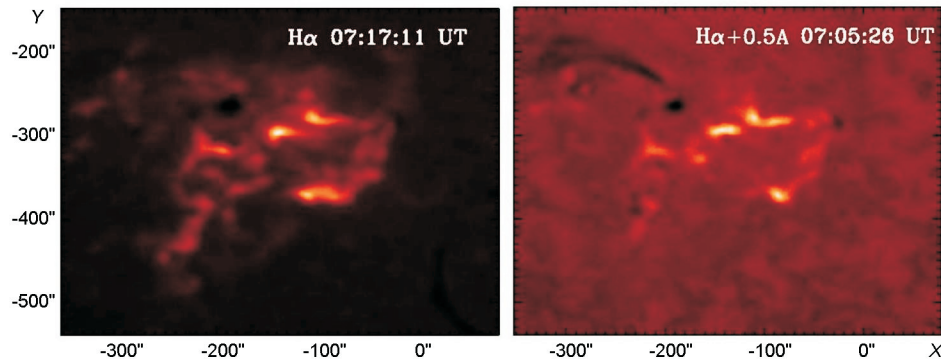


Рис. 6. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в активній області NOAA 9087 в лінії H , отримані у Медонській обсерваторії о 07^h05^m26^s, 07^h17^m11^s UT

кано сплеском жорсткого рентгенівського випромінювання, який з'явився в центральній частині активної області о 6^h57^m. Як встановлено в роботі [6], згідно з даними рентгенівського телескопа НХТ на борту «Yohkoh» корональне джерело жорсткого рентгенівського випромінювання у смугах L (13.9...22.7 кеВ) і M1 (22.7...32.7 кеВ) лежало над лінією інверсії полярностей (на рис. 4 відзначено синім і фіолетовим контуром відповідно). Положення джерела жорсткого рентгенівського випромінювання в цілому збігається з місцем світіння у м'якому рентгенівському випромінюванні.

О 6^h58^m на північний захід від цієї області на місці флоклула з'явився спалаховий вузол. Утворився тунель з яскравих петель, що з'єднує новий вузол з ядрами в центральній частині активної області. Через 2 хв петлі цього тунелю і деякі вузли пояскравішали, що викликало сплеск інтенсивності в лінії H (рис. 5). На рис. 4 в роботі [6] наведено зображення спалаху в довжині хвилі $\lambda = 17.1$ нм, де видно, що в короні цього тунелю не було, тобто це суто хромосферне явище.

До 7^h05^m сформувалися спалахові стрічки, які мали круглу форму (рис. 6). Можна припустити, що досліджуваний спалах був круговим. Дослідження спалахів подібного типу розпочалися близько десяти років тому. Відомо, що кругові спалахи виникають, коли має місце магнітна топологія типу віяло-шип, яка містить нульову точку. Далі ми детальніше обговоримо це питання. О 7^h12^m з'явилися нові вузли у південній стрічці та в східній частині активної області, яскравість вже наявних вузлів продовжувала збільшуватися.

О 7^h23^m спостерігався максимум випромінювання в лінії H . До цього часу посилилася яскравість східних країв стрічок, і на схід від них з'явилися нові ядра (рис. 7). На зображенні 19.5 нм о 7^h26^m видно перетин яскравих петель, що свідчить про магнітне перез'єднання. У цьому місці на H -зображенні і зображенні в лінії He II 30.4 нм (рис. 4 в роботі [6]) видно таку ж петельну структуру. Мабуть, на хромосферному рівні відбувається відгук на процеси, що відбуваються на корональному рівні. Це узгоджується з результатами робіт [21, 28], які

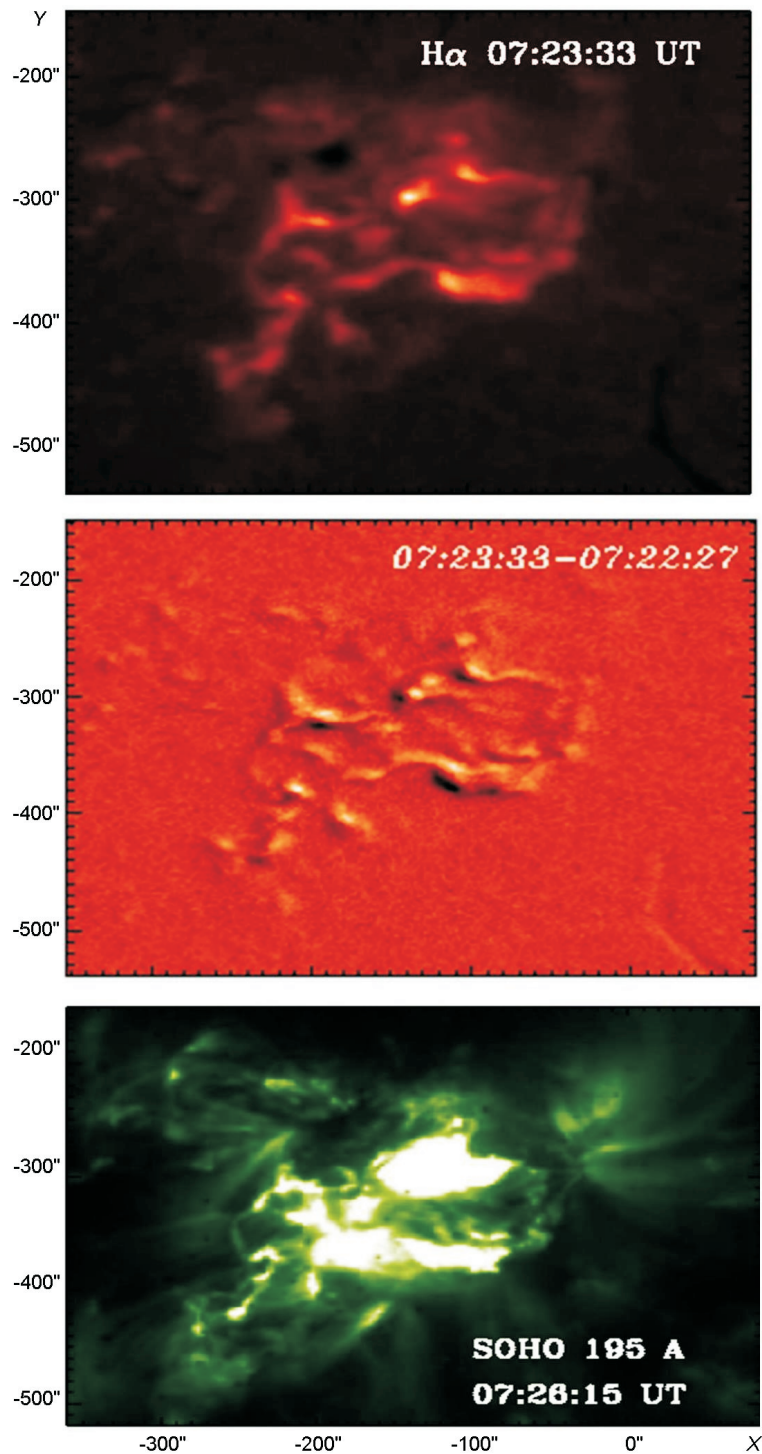


Рис. 7. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в активній області NOAA 9087 в лінії H , отримане у Медонській обсерваторії о $07^h23^m33^s$ UT, різниця зображень о $07^h23^m33^s$ та $07^h22^m27^s$ UT і зображення в довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм, отримане на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою телескопа EIT в $07^h26^m15^s$ UT

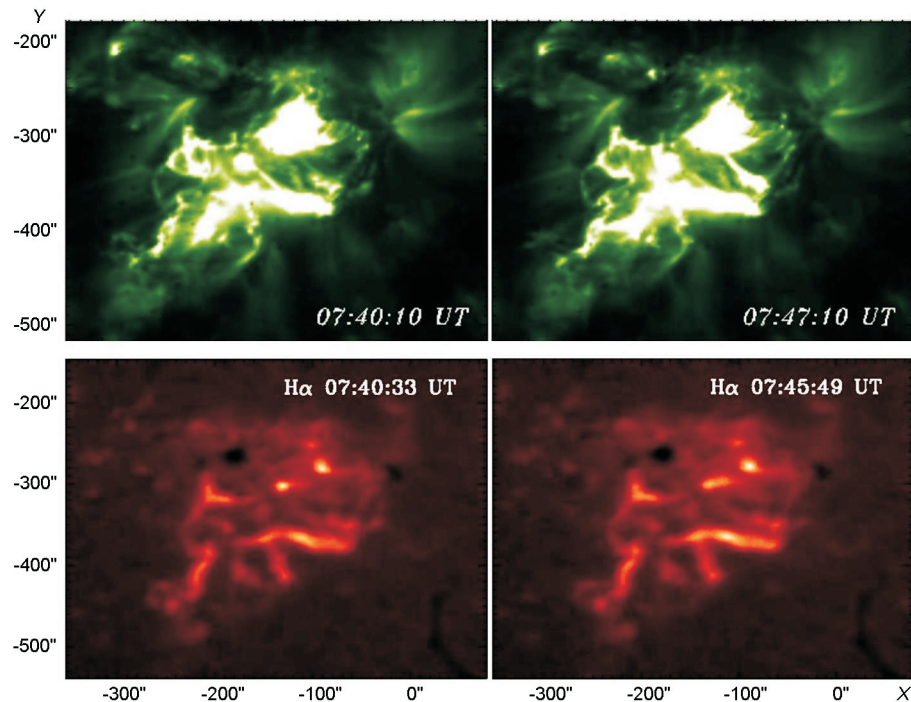


Рис. 8. Зображення спалаху 19 липня 2000 р. в активній області NOAA 9087 в довжині хвилі $\lambda = 19.5$ нм, отримані на орбітальній обсерваторії SOHO за допомогою телескопа EIT о $07^h40^m10^s$ і $07^h47^m10^s$ UT, і в лінії H, отримані у Медонській обсерваторії, о $07^h40^m33^s$ та $07^h45^m49^s$ UT

вказують на те, що верхня фотосфера і нижня хромосфера істотно збуджуються під час цього спалаху. Зображення на $\lambda = 30.4$ нм показує, що до моменту 7^h19^m еруптувало волокно у південно-східній частині активної області. Подібний випадок ерупції волокна у процесі розвитку спалаху 31 серпня 2012 р. описано в роботі [27]. Волокно еруптувало, і на його місці утворилися спалахові петлі. Всі підніжжя еруптованого волокна стали основами спалахових петель. Цей процес автори роботи [27] пояснюють тривимірним магнітним перез'єднанням, яке описується у стандартній тривимірній моделі.

Зображення в ультрафіолетовому діапазоні в лінії Fe XII 19.5 нм, отримані на SOHO у моменти 7^h40^m і 7^h47^m , наведено на рис. 8. Вони показують, як розвивалися перез'єднання в головній фазі спалаху. На H-зображеннях ми бачимо, що яскравішими були вузли, розташовані у південній та східній частині активної області (рис. 3, 8). У цей час відбувався спад інтенсивності H-випромінювання. Після 8^h в діапазоні $\lambda = 19.5$ нм спостерігалися корональні післяспалахові петлі.

Підсумовуючи результати нашого аналізу, можна зробити висновок про те, що енергія спалаху звільнялася послідовно в різних місцях. Вузли займалися послідовно і з'являлися уздовж лінії інверсії полярностей на межах хромосферних осередків.

ОБГОВОРЕННЯ

Як показують Н -зображення, стрічки розглянутого спалаху були круглої форми. Спалахи з круглою стрічкою зазвичай пов'язані з магнітною топологією типу «віяло-шип», що містить нульові точки [48]. Вони виникають в активних областях зі складними магнітними конфігураціями. Складна конфігурація магнітного поля і те, що спалахові стрічки мали круглу форму, дозволяє припустити, що в активній області NOAA 9087 мала місце магнітна топологія типу віяло-шип (fan-spine), що містить тривимірну нульову 3D-точку, в якій всі три компоненти вектора магнітного поля дорівнюють нулю [15, 32, 39]. Нульові точки можуть сформуватися в короні при виході нового магнітного потоку [44]. Скелет корональної нульової точки складається з віялової площини та шипів [37]. Круглі спалахові стрічки, пов'язані з нульовими 3D-точками, розташовуються на перетині віяла з фотосферою [26, 32, 38, 43, 45]. Може спостерігатися віддалене збільшення яскравості, яке відповідає підніжжям шипів. У роботах [15, 23, 38, 43, 45, 48] вивчалися спалахи з подібною топологією магнітного поля. В роботі [44] описаний двоетапний процес перез'єднання в нульовій точці, в результаті якого формується тривимірна конфігурація віяло-шип.

Особливості та характеристики випромінювання кругового стрічкового спалаху бала X 23 жовтня 2012 року докладно вивчено в роботі [48]. Для вивчення спалаху використано дані Solar Dynamical Observatory (SDO), «Hinode» і RHESSI. На зображеннях спалаху в ультрафіолетовому випромінюванні з довжиною хвилі $\lambda = 9.4$ нм було виявлено гарячий канал, що вказує на наявність мотузки з магнітним потоком. В області цього каналу були два джерела жорсткого рентгенівського випромінювання (HXR) в енергетичному діапазоні 12...25 кеВ. Нелінійна екстраполяція безсилового магнітного поля дозволила знайти розташування тривимірної нульової точки, мотузки потоку під віялом нульової точки та великомасштабний квазісепаратрисний шар. Виявлено, що нульова точка «вбудована» у квазісепаратрисний шар. У роботі [39] повідомляється про спостереження з високою роздільною здатністю спалаху рентгенівського В-класу, в якому була кругла стрічка на рівні хромосфери. Автори роботи припускають, що спалах стався внаслідок магнітного перез'єднання у тривимірній (3D) корональній нульовій точці, розташованій над супергранульною коміркою. Ототожене положення тривимірної нульової точки, віяла та шипів. Кругова хромосферна стрічка була утворена кількома суміжними компактними ядрами, які спалахували послідовно за годинниковою стрілкою. Стрічки шипів також складалися з компактних ядер. Топологію магнітного поля віяло-шип виявлено також у спалаху 16 листопада 2002 р. при спостереженнях на RHESSI і TRACE рентгенівського (12...25 і 25...50 кеВ) та ультрафіолетового (160 нм) випромінювань [38]. Автори припустили, що властивості цих випромі-

нювань можна пояснити комбінацією Perez'єднання в квазісепаратрисному шарі та в нульовій точці.

У роботі [11] вивчено круговий спалах бала M1.1, який стався 26 січня 2015 р. в активній області NOAA 12268 та спостерігався на SDO (Solar Dynamical Observatory). Виявлено, що в цій області перед спалахом сформувалася магнітна конфігурація віяло-шип з корональною нульовою точкою, в якій почалося магнітне Perez'єднання. У максимумі спалаху на краю круглої стрічки спостерігався корональний викид, що вказує на Perez'єднання між великомасштабними та нижче розташованими замкнутими силовими лініями. В результаті цих процесів утворилися паралельні стрічки всередині основної круглої стрічки та аркада післяспалахових петель. У роботах [43, 47] досліджувані спалахи починаються з Perez'єднання типу прориву, яке згодом переходить у більш сильне Perez'єднання з полем, що розташоване вище.

Енергія досліджуваного в даній роботі спалаху вивільнялася послідовно в різних місцях, що може вказувати на ковзне магнітне Perez'єднання (slipping reconnection) [2, 4, 17, 18]. Подібний тип магнітного Perez'єднання може зустрічатися, коли силові лінії проходять через квазісепаратрисний шар і піддаються безперервним послідовним Perez'єднанням. Вони ніби ковзають уздовж квазісепаратрисного шару. Спалахування ядер досліджуваного нами спалаху відбувалося в основному за годинниковою стрілкою. Про спостереження спалахів, в яких наявні ковзні магнітні Perez'єднання, повідомляється в роботах [12, 13, 19, 23, 24, 25, 32, 42, 43, 49]. Про перші спостереження магнітного Perez'єднання такого типу в корональних петлях за допомогою «Hinode» повідомляється в роботі [2].

В роботі [32] знайдено, що у спалаху 16 листопада 2002 р. перед та після Perez'єднання в нульовій точці всі силові лінії піддавалися ковзному Perez'єднанню всередині квазісепаратрисного шару. Спалахова стрічка, яка відповідає положенню віяла, яскравішала послідовно проти годинникової стрілки. Perez'єднання в нульовій точці сталося в результаті виходу магнітного потоку, що викликав вихровий рух і розрив шипів. В роботі [13] встановлено, що ковзне Perez'єднання відбувалось у спалаху X-класу 10 вересня 2014 року, починаючи з його ранньої фази. Спалахові петлі ковзають у протилежних напрямках до кінців стрічок. Цікавий факт ковзання у стрічці спалаху бала C1.3 31 липня 2014 року спочатку на північ, а потім на південь виявлено в роботі [41]. У роботі [19] повідомляється про спостереження тривалого великомасштабного ковзного Perez'єднання у спалаху M6.5 в активній області NOAA 12371. У роботі [49] за допомогою спостережень на SDO/AIA було виявлено ковзні магнітні Perez'єднання в декількох стрічках під час спалаху X1.2 7 січня 2014 року. Результати їхнього аналізу узгоджуються з режимом ковзного магнітного Perez'єднання у стандартній тривимірній моделі спалахів. Виконані в роботі [18] фільтрові спостереження в лінії Ca II H з високим просторовим та часовим розділенням за допомогою телескопа GREGOR спалахової

стрічки над тінню плями в активній області 12205 дозволили виміряти горизонтальні швидкості невеликих яскравих вузлів стрічок.

Знайдено, що в хромосферному випромінюванні також відбувається ковзний рух вузлів. Показано, що силові лінії, пов'язані з потоком та спалаховими петлями, піддаються безперервній серії магнітних перез'єднань, а ковзне перез'єднання може відбуватися в невеликих просторових і часових масштабах.

Проблема більш детального вивчення спалахів та їхньої топології залишається актуальною. Багатохвильові спостереження з високим просторовим і часовим розділенням будуть затребувані і в новому 25-му циклі сонячної активності.

ВИСНОВКИ

У даній роботі проаналізовано Н -зображення спалаху бала 3N/M6.4 в активній області NOAA 9087 19 липня 2000 року, отримані на спектрогеліографі Медонської обсерваторії. Аналіз показав, що стан хромосфери під час спалаху постійно змінювався. Спалахові вузли з'являлися уздовж лінії інверсії полярностей магнітного поля на межах хромосферних комірок. Енергія спалаху звільнялася послідовно в різних місцях, що може вказувати на ковзне перез'єднання.

Стрічки спалаху мали круглу форму. Складна магнітна конфігурація досліджуваної активної області дає підстави припустити наявність у ній магнітної топології типу віяло-шип (fan-spine) з нульовими точками. Спалахи такої магнітної топології активно вивчаються останнім часом.

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

REFERENCES

1. Aulanier G., Demoulin P., Schrijver C. J., et al. (2013) The standard flare model in three dimensions. II. Upper limit on solar flare energy. *Astron. and Astrophys.* 549. id. A66, 7.
2. Aulanier G., Golub L., DeLuca E. E., et al. (2007) Slipping magnetic reconnection in coronal loops. *Science*. 318 (5856). 1588—1591.
3. Aulanier G., Janvier M., Schmieder B. (2012) The standard flare model in three dimensions. I. Strong-to-weak shear transition in post-flare loops. *Astron. and Astrophys.* 543. id.A110, 14.
4. Aulanier G., Parlat E., Demoulin P., DeVore C. R. (2006) Slip-running reconnection in quasi-separatrix layers. *Solar Phys.* 238 (2). 347—376.
5. 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.

6. Chornogor S. N., Kondrashova N. N. (2020) Morphology of the flare-productive active region NOAA 9087. *Kinematics and Phys. of Celestial Bodies*. 36 (3). 140–152.
7. Demoulin P. (2006) Extending the concept of separatrices to QSLs for magnetic reconnection. *Adv. Space Res.* 37 (7). 1269–1282.
8. Demoulin P., Bagala L. G., Mandrini C. H., et al. (1997) Quasi-separatrix layers in solar flares. II. Observed magnetic configurations. *Astron. and Astrophys.* 325. 305–317.
9. Demoulin P., Mandrini C. H., Rovira M. G., et al. (1994) Interpretation of multiwavelength observations of November 5, 1980 solar flares by the magnetic topology of AR 2766. *Solar Phys.* 150 (1-2). 221–243.
10. Demoulin P., van Driel-Gesztelyi L., Schmieder B., et al. (1993) Evidence for magnetic reconnection in solar flares. *Astron. and Astrophys.* 271. 292–307.
11. Devi P., Joshi B., Chandra R., et al. (2020) Development of a confined circular-cum-parallel ribbon flare and associated pre-flare activity. *Solar Phys.* 295 (6). id.75.
12. Dudík J., Janvier M., Aulanier G., et al. (2014) Slipping magnetic reconnection during an X-class solar flare observed by SDO/AIA. *Astrophys. J.* 784 (2). id. 144. 21.
13. Dudík J., Polito V., Janvier M., et al. (2016) Slipping magnetic reconnection, chromospheric evaporation, implosion, and precursors in the 2014 September 10 X1.6-class solar flare. *Astrophys. J.* 823. 41. 21.
14. Guo J., Wang H., Wang J., et al. (2019) The role of a magnetic topology skeleton in a solar active region. *Astrophys. J.* 874 (2). id. 181. 10.
15. Hernandez-Perez A., Thalmann J. K., Veronig A., et al. (2017) Generation mechanisms of quasi-parallel and quasi-circular flare ribbons in a confined flare. *Astrophys. J.* 847 (2). id. 124. 14.
16. Hou Y. J., Li T., Zhang J. (2016) Flux rope proxies and fan-spine structures in active region NOAA 11897. *Astron. and Astrophys.* 592. id. A138. 8.
17. Janvier M. (2017) Three-dimensional magnetic reconnection and its application to solar flares. *J. Plasma Phys.* 83 (1). id. 535830101. 49.
18. Janvier M., Aulanier G., Pariat E., Demoulin P. (2013) The standard flare model in three dimensions. III. Slip-running reconnection properties. *Astron. and Astrophys.* 555. id. A77, 14.
19. Jing J., Liu R., Cheung M. C. M., et al. (2017) Witnessing a large-scale slipping magnetic reconnection along a dimming channel during a solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 842 (2). id. L18. 7.
20. Kosugi T., Makishima K., Murakami T., et al. (1991) The Hard X-ray Telescope (HXT) for the SOLAR-A mission. *Sol. Phys.* 136 (1). 17–36.
21. Kurochka E. V., Lozitsky V. G. (2005) Magnetic fields and thermodynamical conditions in the M6.4/3N solar flare on July 19, 2000. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, Suppl.* 5. 143–145.
22. Li H. (2011) Magnetic field configurations leading to solar eruptions. First Asia-Pacific solar physics meeting ASI Conference Series. 2. 291–296. / Eds A. R. Choudhuri, D. Banerjee. 2011.
23. Li T., Yang S., Zhang Q., et al. (2018) Two episodes of magnetic reconnections during a confined circular-ribbon flare. *Astrophys. J.* 859 (2). id. 122. 9.
24. Li T., Zhang J. (2014) Slipping magnetic reconnection triggering a solar eruption of a triangle-shaped flux rope. *Astrophys. J. Lett.* 791 (1). id. L13. 6.
25. Li T., Zhang J. (2015) Quasi-periodic slipping magnetic reconnection during an X-class solar flare observed by the Solar Dynamics Observatory and Interface Region Imaging Spectrograph. *Astrophys. J. Lett.* 804 (1). id. L8. 7.

26. Liu C., Lee J., Deng N., et al. (2006) Large-scale activities associated with the 2003 October 29 X10 flare. *Astrophys. J.* 642 (2). 1205—1215.
27. Lorincik J., Dudik J., Aulanier G. (2019) Manifestations of three-dimensional magnetic reconnection in an eruption of a quiescent filament: filament strands turning to flare loops. *Astrophys. J.* 885 (1). id. 83, 11.
28. Lozitsky V., Stodilka M. (2019) Magnetic fields and thermodynamic conditions in the pre-peak phase of M6.4/3N solar flare. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv.*, № 59. 22—33.
29. Luoni M. L., Mandrini C. H., Cristiani G. D., Démoulin P. (2007) The magnetic field topology associated with two M flares. *Adv. Space Res.* 39 (9). 1382—1388.
30. Mandrini C. H., Demoulin P., Henoux J. C., Machado M. E. (1991) Evidence for the interaction of large scale magnetic structures in solar flares. *Astron. and Astrophys.* 250. 541—547.
31. 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.
32. Masson S., Pariat E., Aulanier G., Schrijver C. J. (2009) The nature of flare ribbons in coronal null-point topology. *Astrophys. J.* 700 (1). 559—578.
33. Masson S., Pariat E., Valori G., et al. (2017) Flux rope, hyperbolic flux tube, and late extreme ultraviolet phases in a non-eruptive circular-ribbon flare. *Astron. and Astrophys.* 604. id.A76, 16.
34. Ogawara Y., Takano T., Kato T., et al. (1991) The Solar-A mission — an overview. *Sol. Phys.* 136 (1). 1—16.
35. Priest E. R., Démoulin P. (1995) Three-dimensional magnetic reconnection without null points. 1. Basic theory of magnetic flipping. *J. Geophys. Res.* 100 (A12). 23443—23464.
36. Priest E. R., Forbes T. G. (2002) The magnetic nature of solar flares. *Astron. and Astrophys. Rev.* 10 (4). 313—377.
37. Priest E. R., Titov V. S. (1996) Magnetic reconnection at three-dimensional null points. *Phil. Trans. Math., Phys. and Eng. Sci.* 354 (1721). 2951—2992.
38. Reid H. A. S., Vilmer N., Aulanier G., Pariat E. (2012) X-ray and ultraviolet investigation into the magnetic connectivity of a solar flare. *Astron. and Astrophys.* 547. id. A52. 8.
39. Romano P., Falco M., Guglielmino S. L., Murabito M. (2017) Observation of a 3D magnetic null point. *Astrophys. J.* 837(2). id. 173. 8.
40. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I., et al. (1995) The solar oscillations investigation — Michelson Doppler Imager. *Solar Phys.* 162 (1-2). 129—188.
41. Shen Y., Qu Z., Zhou C., et al. (2019) Round-trip slipping motion of the circular flare ribbon evidenced in a fan-spine jet. *Astrophys. J. Lett.* 885 (1). id. L11. 8.
42. Sobotka M., Dudik J., Denker C., et al. (2016) Slipping reconnection in a solar flare observed in high resolution with the GREGOR solar telescope. *Astron. and Astrophys.* 596. id. A1. 6.
43. Sun X., Hoeksema J. T., Liu Y., et al. (2013) Hot spine loops and the nature of a late-phase solar flare. *Astrophys. J.* 778 (2). id. 139. 17.
44. Török T., Aulanier G., Schmieder B., et al. (2009) Fan-spine topology formation through two-step reconnection driven by twisted flux emergence. *Astrophys. J.* 704 (1). 485—495.
45. Wang H., Liu C. (2012) Circular ribbon flares and homologous jets. *Astrophys. J.* 760 (2). id. 101. 9.

46. 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.
47. Xu Z., Yang K., Guo Y., et al. (2017) Homologous flares driven by twisted flux emergence. *Astrophys. J.* 851 (1). id. 30. 11.
48. Yang K., Guo Y., Ding M. D. (2015) On the 2012 October 23 circular ribbon flare: emission features and magnetic topology. *Astrophys. J.* 806 (2). id. 171. 13.
49. Zheng R., Chen Y., Wang B. (2016) Slipping magnetic reconnections with multiple flare ribbons during an X-class solar flare. *Astrophys. J.* 823 (2). id. 136. 7.

S. N. Chornogor, N. N. Kondrashova

Main Astronomical Observatory of National Academy of Science of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF A SOLAR CIRCULAR FLARE M6.4 ACCORDING TO OBSERVATIONS IN THE H α LINE

The development of the 3N / M6.4 flare on July 19, 2000 in the active region of NOAA 9087 was studied based on the analysis of its images in the H α line. H α -filtergrams obtained at the Medon Observatory were used. The flare-active region NOAA 9087 had a complex multipolar magnetic field structure. The flare 3N/M6.4 class began with the appearance of two bright kernels near a large spot. A few minutes later flare kernels appeared in the central part of the active region, where a coronal source of hard X-ray radiation was identified. The flare lasted 2.5 hours. Its energy was released sequentially in different places of the active region. The flare kernels were located along the polarity inversion line at the boundaries of the chromospheric cells. Flare ribbons had a circular shape. An assumption is made about a magnetic topology of the spine-fan type containing null point. In this case, flare ribbons are the intersections of the fan quasi-separatrix layer with the lower atmosphere. The successive appearance of flare kernels may indicate slipping magnetic reconnection in the flare under study. In the H α -images in the main phase of the flare, there are reconnecting loops in the eastern part of the active region, which are clearly visible in the ultraviolet wavelength range.

Keywords: Sun, activity, chromosphere, solar flares, magnetic reconnections.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2020

Після доопрацювання 12.12.2020

Прийнята до друку 21.12.2020