

## ПОТУЖНИЙ ПРОТОННИЙ СПАЛАХ 4В/Х17.2 НА СОНЦІ 28.Х.2003 І ЙОГО ВПЛИВ НА МАГНЕТОСФЕРУ ЗЕМЛІ

І. С. Лаба

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

(Отримано 23 березня 2007 р.; в остаточному вигляді — 10 липня 2007 р.)

За даними спостережень потужного протонного спалаху 4В/Х17.2 на Сонці 28.Х.03 р., одержаними в астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, Магнетній обсерваторії “Львів” і КА GOES–10, –11, –12, вивчено еволюцію інтенсивності спалаху та вплив спалахового електромагнетного й корпускулярного випромінювання на магнетосферу Землі. Результати дослідження виявили двостадійність в еволюції спалаху. У передспалаховій стадії з’являлися й зникали окремі спалахові вузли і їх інтенсивність змінювалась повільно і незначно (крім одного), досягнувши мінімального значення за 15–20 хвилин до початку другої стадії. Наприкінці першої стадії з впливанням нового магнетного потоку в активній ділянці створилися достатні умови для реалізації другої — спалахової стадії — великого й бурхливого зростання інтенсивності та площі спалахових вузлів. У максимумі випромінювання утворився двострічковий спалах. Винятково потужний протонний спалах 4В/Х17.2 28.Х.2003 р. вивільнив велику енергію ( $\sim 10^{32}$  ерг) у вигляді механічного руху протонів, теплової енергії й енергії випромінювання. Винятково висока геоєфективність цього спалаху визначається як потужністю корпускулярного й електромагнетного випромінювання, так і його локалізацією біля центрального меридіана Сонця. Спалахове випромінювання продукувало раптове йоносферне збурення, дуже велику магнетну бурю (екстрабура), яка супроводжувалася інтенсивним полярним сьйвом на середніх широтах.

**Ключові слова:** сонячний спалах, спалахові вузли, світлова крива, магнетна буря.

PACS number(s): 97.10.Ex

### І. ВСТУП

Три великі і складні активні ділянки (АО 10484, 10486, 10488), проходячи по видимому диску Сонця (Х–ХІ.2003 р.), продукували, “небувалий вияв сонячної активності”, що, своєю чергою, призвело до виникнення “драматичної космічної погоди” (<http://sxi.ngdc.noaa.gov/>).

У цей період в астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка за допомогою хромосферного телескопа проводилися кінематографічні спостереження Сонця. Так, лише за 28.Х.2003 р. одержано 64 кадри повного диска Сонця, на яких добре відображено еволюцію потужного протонного двострічкового (найвищого в оптичному діапазоні бала 4В) спалаху (рис. 1).

Автори [1–16] досліджували потужні двострічкові (бала 3, 3<sup>+</sup>) спалахи на Сонці. Сукупність приведених вище спостережуваних даних свідчить про те, що потужні протонні двострічкові спалахи виникають уздовж і по обидва боки лінії розділу полярностей у великих компактних активних областях або комплексах зі складними  $\beta\gamma\delta$  магнетними конфігураціями. За декілька днів до спалаху формується видовжене (здебільшого S-подібне) основне волокно-протуберанець, яке, як відомо, розміщується над лінією розділу полярностей і підтримується системою магнетних петель (аркадою); воно проявляється в оптиці як темне (через поглинання випромінювання фотосфери), густе й холодне структурне утворення.

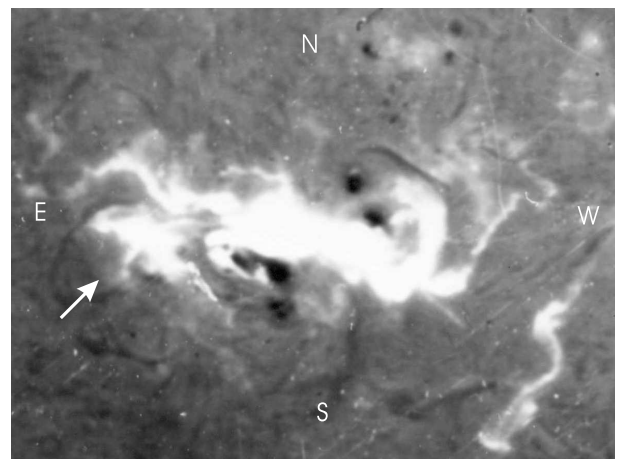


Рис. 1.  $H_{\alpha}$ -фільтрограма потужного протонного спалаху 4В/Х17.2 28.Х.03 р. в максимумі інтенсивності й площі (11:05:25 UT), отримана за допомогою сонячного телескопа астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка. Стрілкою вказано положення вузла № 7.

В еволюції потужних протонних спалахів виявлено характерний передспалаховий період. За  $10^m - 60^m$  до початку потужного спалаху починається передспалахова активізація. Передспалахова активізація структурних утворень, що пов’язана з впливанням із-під фотосфери нового магнетного потоку, спричиняє еволюційні зміни, нагрівання, веде до перебудови магнетного поля активної області, ускладнюючи її структу-

ру й нагромаджуючи енергію у верхніх шарах атмосфери (в петельних системах). Важливими є результати досліджень потужних спалахів, які одержали у Кримській астрофізичній обсерваторії А. Б. Северний і його учні [4–7, 11–17]; їхня достовірність постійно підтверджувалася, і вони актуальні дотепер. Власне науковці Кримської астрофізичної обсерваторії одні з перших дійшли висновку, що, крім магнетного поля, важко знайти джерело енергії, здатне забезпечити спостережуване в спалахах виділення енергії у вигляді механічного руху плазми, теплової енергії й енергії випромінювання (до  $10^{32}$  ерг за весь процес спалаху). Максимальною є енергія магнетного поля активної області безпосередньо перед спалахом. Фактично, як відзначив С. І. Гопасюк [5, 17], джерелом енергії спалаху є загальний енергозапас активної області, який відображається у величині глобального електричного струму (адже ж магнетне поле активної області значною мірою струмове). Під час спалаху відбувається різкий спад потоку магнетного поля [7]  $\Delta\Phi/\Delta t$ , який веде до електрорушійної сили  $\sim 10^9$  В, здатної генерувати сонячні космічні промені та струми в контурі, що охоплюють всю активну область. Для джоульової дисипації струмів необхідно зменшити провідність приблизно в  $10^3$  раз, що досягається за рахунок виникнення ряду нестійкостей [18, 19] або введенням у ділянку енерговиділення холодної, частково йонізованої, плазми протуберанця [20].

Слід відзначити, що цій винятково потужній події на Сонці 28.X.2003 р. присвячено багато наукових досліджень. Так, у [21, 22] вивчали еволюцію магнетного поля АО 10486 до і під час спалаху. Виявлено перед спалахом дві події, пов'язані як з витіканням нового магнетного потоку, так і з великомасштабним квадрупольним перез'єднанням. У праці [23] підтверджено вже відомий факт швидкого розпаду півтінювих сегментів після потужних спалахів. Спектральні дослідження, проведені у [24], дали змогу визначити низхідні швидкості в підніжжях післяспалахових петель ( $> 70$  км/с) та ядрах двострічкового спалаху, а також висхідні швидкості ( $< 60$  км/с) “слабкого хромосферного випаровування”. Автори праці [25] визначили зв'язки між часом початку імпульсної фази та зміною магнетного піра; знайдено значне зменшення завихреності під час спалаху й повне припинення цієї зміни в середині імпульсної фази. Аналіз спостережуваних даних спалаху X17.2 [26] виявив ерупцію S-подібного волокна в південно-західному напрямку з яскравим ударним фронтом, швидкою гало-ерупцією корональної маси, що поширювалася до Землі. У [27], використовуючи спостережувані дані геофізичних супутників двох потужних спалахів (28.X. і 29.X.2003), вивчено їх вплив на магнетосферу Землі; підтверджено тісний зв'язок у ланцюжку подій: сонячний спалах — ерупція волокна — гало-ерупція корональної маси — ударна хвиля — геомагнетна буря. У [28, 29] автори виявили зростання загального (повного) сонячного випромінювання, спричиненого спалахом 4В/X17.2 28.X.2003 р., а також обчислили вивільнену спалахом повну енергію ( $4.6 \cdot 10^{25}$  Дж).

Кожний потужний спалах — це своєрідний індивідуальний процес. Тому необхідні дослідження таких індивідуальних процесів активності Сонця. Вельми важливим є також установлення причинно-наслідкових зв'язків, які ведуть спочатку до виникнення передспалахової ситуації і, відтак, до реалізації спалахового процесу.

## II. СПОСТЕРЕЖЕННЯ Й ОБРОБКА ДАНИХ

Спостереження активних процесів на Сонці в астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка проводять регулярно за допомогою хромосферного телескопа повного диска в центрі бальмерівської лінії  $H_{\alpha}$  ( $6563 \text{ \AA}$ ). Телескоп оснащений кінокамерою з часовою роздільною здатністю 1 кадр/сек. Діаметр зображення Сонця в кадрі 50 мм; кутове роздільня  $\sim 1''$ . Як світлоприймач використовують аерофотоплівку ізопанхром тип 38-ТП на триацентатцелюлозній протиореольній основі з контрастом 2.5 і світлочутливістю 250 од. ГОСТУ (“СВЕМА”). Важливим складником оптичної схеми телескопа є інтерференційно-поляризаційний фільтр (ПФ-4) зі смугою пропускання  $0.5 \text{ \AA}$ , що, власне, і дає змогу проводити спостереження на рівні хромосфери. На кожному кадрі фотоплівки поряд із зображенням Сонця вдруковуються час і дата спостереження, а також ступінчастий послаблювач. Керування роботою телескопа здійснюється пультом управління, у пам'ять якого вводено дані про умови фотографування. Телескоп може працювати в двох режимах: ручному й автоматичному. Режимну стабільну температуру ПФ-4 підтримує термостат.

Спостереження Сонця 28.X.2003 р. почалося о 10:02:07 UT. У великій і дуже складній активній області АО 10486 виявлено окремі спалахові вузли. Згідно з даними (<http://www.sec.noaa.gov/>) спалах почався о 09:30 UT. Фотографування спалахового процесу, який тривав понад чотири години, супроводилося візуальним спостереженням. Чітко проявилася дво-стадійність в еволюції спалаху. Якщо на початковій стадії появлялися і зникали окремі спалахові вузли і їхня інтенсивність змінювалася повільно й незначно (крім одного), то на прикінцевій — навпаки — спалаховий процес був вельми бурхливим. Швидко зростання інтенсивності та площі окремих вузлів спричинило утворення по обидва боки лінії розділу полярностей спалахових стрічок. Завершилося спостереження о 14.00 UT.

Експоновану фотоплівку хемічно обробляли, після чого проводили фотометрію ступінчастого послаблювача з метою побудови характеристичної кривої. Побудовано характеристичну криву.

Для фотометрування (і, відповідно, для побудови світлових кривих) вибрано 39 вузлів, характерних для цього спалаху і локалізованих в різних ділянках активної області. Далі, на кожному кадрі, для кожного із 39 спалахових вузлів фотометрували його максимальну густину почорніння (негатив)  $A_1$ , поряд не-

збурену, спокійну хромосферу  $A_0$  і фон  $A_\Phi$ . Внесок фону виключали таким чином, що спочатку знаходили відношення  $A_1/A_\Phi$  і  $A_0/A_\Phi$  і на характеристичній кривій — відповідно  $lg I_1$  і  $lg I_0$ ; за останніми даними знаходили  $I_1$  і  $I_0$ . Далі обчислювали  $I_1/I_0$  — відносну інтенсивність спалахових вузлів, виражену в одиницях незбуреної хромосфери.

Для визначення бала (потужності) спалаху прийнято відносну інтенсивність спалаху або його вузлів виражати в одиницях локального неперервного спектра, використовуючи вираз:

$$I_1/I_0 \cdot 0.4 \cdot 100\%.$$

Отже, маючи для вибраних вузлів у кожному кадрі розраховану відносну інтенсивність в % (в од. локального неперервного спектра; відносна похибка  $\pm 1\%$ ) і час одержання знімка (кадру) будуємо так звану світлову (фотометричну) криву — зміну відносної інтенсивності кожного спалахового вузла з часом.

На рис. 2 зображено лише дві (характерні для цього спалаху) світлові криві. На осі ординат відкладено відносну інтенсивність, виражену в %, а по осі абсцис — світовий час (UT).

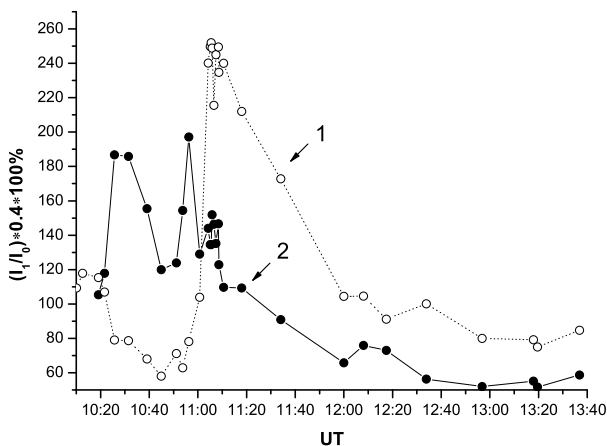


Рис. 2. Світлові (фотометричні) криві: 1 — усереднена для восьми спалахових вузлів; 2 — для одного вузла № 7.

Оцінку бала (потужності) спалаху визначаємо двома параметрами: максимальними величинами інтенсивності та площі. Максимальна площа і, особливо, максимальна інтенсивність, як відзначив автор, не вкладаються в загальноприйняті межі найвищого в оптичному діапазоні бала 4В (є вищими). Так, для декількох спалахових вузлів у максимумі відносна інтенсивність, виражена в одиницях локального неперервного спектра, становила 280% (і більше). Площа спалаху  $S_0 > 25$  кв. град.

Спостереження протонного спалаху 28.Х.03 проводили як наземні, так і космічні обсерваторії (апарати). Так метеорологічні супутники-геостационари США GOES-10, -11, -12, що перебувають на геосинхронній орбіті (у площині екватора на віддалі від поверхні Землі  $\sim 35800$  км), неперервно проводять мо-

ніторинг космічної погоди. Крім прямого моніторингу кліматичної системи (атмосфери і магнетосфери) земного докільця, на цих супутниках встановлено низку приладів для вимірювання й реєстрації жорсткого електромагнетного й корпускулярного випромінювання Сонця, зокрема: магнетометр, X-променевий датчик, детектор високоенергетичних протонів і  $\alpha$ -частинок, датчик енергетичних частинок. Ці прилади дають змогу швидко виявити потужні процеси на Сонці (спалахи, ежекції корональної маси і ін.), що різко впливають на міжпланетний простір і докільця Землі. Супутники GOES-10, -11, -12 28.Х.2003 і 29.Х.2003 зареєстрували прихід до Землі потужного жорсткого електромагнетного (рис. 3) і корпускулярного випромінювання (рис. 4).

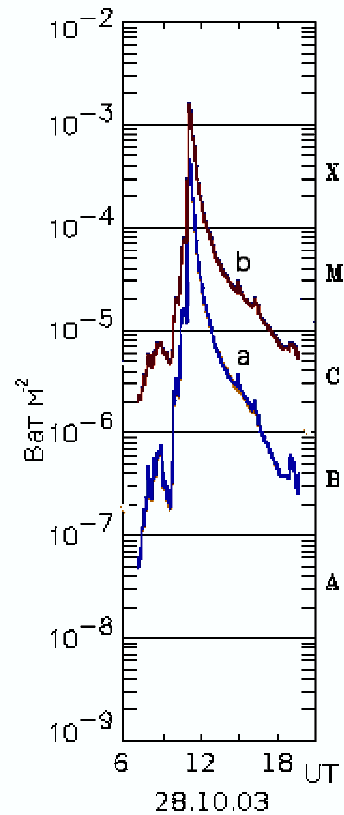


Рис. 3. Потоки рентгеновського випромінювання спалаху X17.2, виміряні й записані супутниками GOES-10, -12 28.Х.03 р. у смугах: а) 0.5–4.0 Å; б) 1.0–8.0 Å.

Магнітна обсерваторія “Львів” неперервно проводить моніторинг компонент напруженості магнетного поля Землі за допомогою магнетографів, які записують у вигляді графіка часові зміни величин компонент (магнетограма, рис. 5). Магнетограми виявляють як регулярні (що залежать від місцевого часу й широти), так і нерегулярні (переважно раптові з значною амплітудою) збурення.

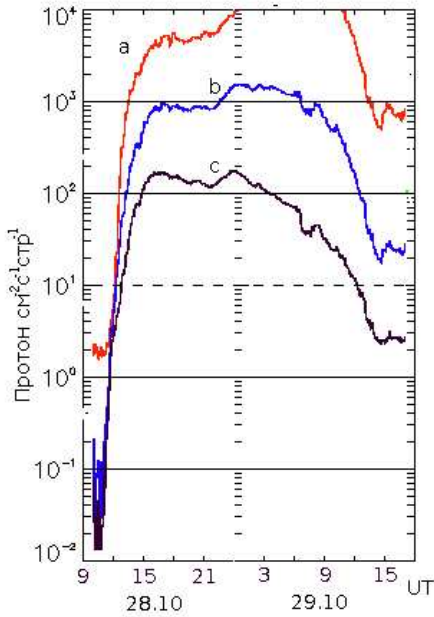


Рис. 4. Потоки протонів, генеровані спалахом 4B/X17.2 28.X.2003р., виміряні й записані супутником GOES-11, з енергією: а)  $\geq 10$  MeV; б)  $\geq 50$  MeV; в)  $\geq 100$  MeV.

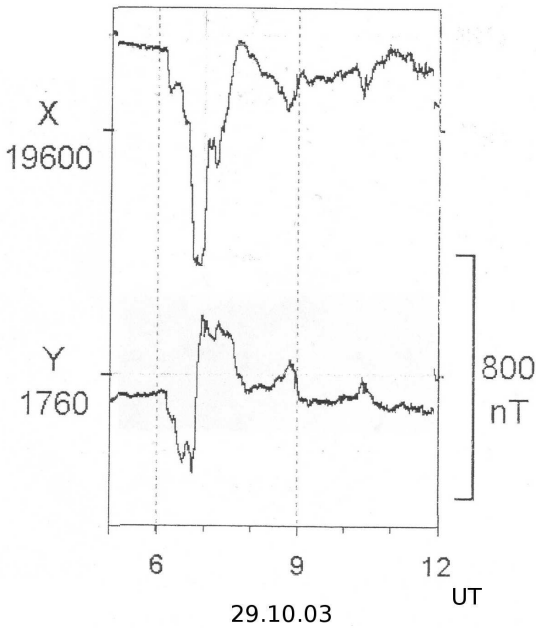


Рис. 5. Магнетограма для горизонтальної (X) і вертикальної (Y) компонент геомагнетного поля під час екстрабури, одержана в магнетній обсерваторії «Львів» ( $\varphi = 49.90^\circ$ ,  $\lambda = 23.75^\circ$ ). По ординаті подано середні значення x- і y- компонент у гамма.

Сильні збурення геомагнетного поля називаються магнетними бурями й прямо залежать від густини потоку високоенергетичних частинок, продукованих потужними нестационарними процесами на Сонці. Максимальний геофект пов'язаний з локалізацією ак-

тивних процесів біля центрального меридіана. Найбільша амплітуда збурення проявляється для горизонтальної компоненти геомагнетного поля й має для обох півкуль один напрям [27, 30–33].

29.X.2003р. виявлено великий спад у горизонтальній компоненті геомагнетного поля (рис. 5).

### III. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Активна область, що продукувала потужний протонний спалах 28.X.2003 (рис. 6) АО 10486, була дуже великою ( $> 15$  земних діаметрів; рекордна в циклі №23) і мала складну  $\beta\gamma\delta$  магнетну конфігурацію; крім цього, вона мала  $S$ -подібне головне волокно-протуберанець, яке розміщене над лінією розділу полярностей.

На рис. 6 подана  $H_\alpha$ -фільтрограма АО 10486 Сонячної обсерваторії США до початку спалахового процесу (<http://bbso.njit.edu/>)

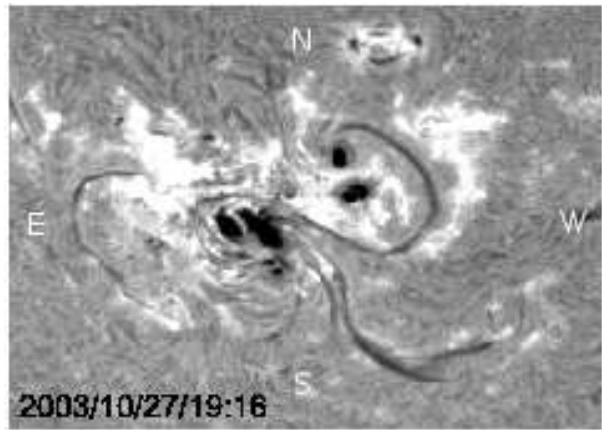


Рис. 6. Активна область АО 10486 на хромосферному рівні;  $H_\alpha$  — фільтрограма до початку спалаху.

У цій активній області спостерігалось постійне витікання нового магнетного потоку, супроводжуване виникненням нових плям і цілих зон сателітів, підсиленням магнетного поля, активізацією структурних утворень, появою яскравих елементів, слабких спалахів, нових магнетних петель та їхніх систем, а також вихрових рухів уздовж лінії розділу полярностей. Спостережуване витікання нового потоку спричинювало еволюційні зміни й нагрівання, вело до перебудови, ускладнення магнетного поля і, врешті, до нагромадження загального енергозапасу активної ділянки.

Отримано  $H_\alpha$ -фільтрограми з еволюцією потужного протонного спалаху в активній ділянці АО 10486 і 39 світлових кривих як результат фотометрії спалахових вузлів. Усі світлові криві явно вказують на два періоди (дві стадії) еволюції спалаху.

Перший період — передспалаховий — порівняно незначна зміна інтенсивності спалахових вузлів (крім одного). Цей період тривав до  $\sim 11:01$  UT. Для 38 (із 39) спалахових вузлів виявлено однаковий хід інтенсивності. Тому вибрано (характерних для цього

спалаху) лише 8, локалізованих у різних частинах активної області і вираховано для них середнє значення інтенсивності (рис. 2, крива 1). Тільки для одного (із 39) спалахового вузла №7 характер зміни інтенсивностей був іншим (рис. 2, крива 2); локалізація вузла показана на рис. 1 стрілкою.

Із світлової кривої (рис. 2, крива 1), усередненої для восьми спалахових вузлів, для першої стадії впливає таке: інтенсивність вузлів, досягнувши деякого (різного для кожного вузла) максимального значення, почала зменшуватися до мінімального ( $\sim 10:45$  UT). На кінець періоду спаду інтенсивності припадає (згідно з фільтрограмами) виникнення в активній області нових волокон й активізація старих; поступово налагоджуються контакти між окремими периферійними волокнами й основним волокном, виникають вихрові рухи біля лінії розділу полярностей. Під кінець першої стадії (10:45–11:01 UT) утворилася й почала взаємодіяти складна система з волокон і петель, яка охопила всю активну область. Спочатку повільна взаємодія системи з впливаючим новим магнетним потоком проявилася на фотометричній кривій (рис. 2, крива 1) невеликим зростанням інтенсивності вузлів; тоді як для вузла №7 — максимальним зростанням інтенсивності (рис. 2, крива 2). По обидва боки S-подібного волокна з'явилися стрічки невеликої інтенсивності. Слід відзначити, що найбільше енерговиділення на першій стадії належить вузлу №7, що спростерігалася біля місця розриву основного волокна у південно-східній його частині з максимумом випромінювання  $\sim 10:56$  UT (другий сплеск інтенсивності). Перший сплеск інтенсивностей вузла №7 припадає на спад яскравості всіх інших вузлів. Спалаховий вузол №7 в передспалаховий період за площею й інтенсивністю відповідав спалахові бала 1В. Наприкінці першої стадії досить зросла інтенсивність спалахових вузлів, а також з'явилися нові вузли.

Через наявність хмари, що закрила Сонце на  $\sim 3^m$ , пропущено важливий момент в еволюції спалаху — початок другої стадії.

Другий спалаховий період почався о  $\sim 11:02$  UT бурхливим і великим зростанням інтенсивності й площі всіх (крім №7) вузлів. Протягом  $\sim 8^m$  велика частина активної області навколо основного волокна покрилася інтенсивною спалаховою емісією (рис. 1). Перший кадр другого періоду отримано лише о 11:04 UT наприкінці т. зв. флеш-фази; на світловій кривій (на рис. 2, крива 1) — це безпосередньо перед максимумом інтенсивності спалаху. Вже на початку другої стадії чітко проявилася важлива роль S-подібного волокна як центру енерговиділення. Оскільки спалахова емісія формується навколо основного волокна, то в цілому вигляд спалаху теж S-подібний. У максимумі інтенсивності спалах проявляє флюктуаційний характер. До речі, флюктуації випромінювання на 38 світлових кривих виявляють синфазність і є реальними. Відповідно, така синфазність підтверджує спряженість спалахових вузлів і їхній зв'язок з єдиним джерелом енергії, що зумовлює їх випромінювання. Проте еволюція випромінювання вузла №7 має

інший характер. Вузол №7 (рис. 2, крива 2) локалізувався в кінці південно-східної частини головного волокна (рис. 1) поруч із місцем контакту (розгалуження) двох волокон. Місце контакту стало місцем розриву головного волокна при його взаємодії з новим магнетним полем, що вийшло з-під фотосфери [34]. Згідно моделі Хейвертса і ін. [35], піднімаючись угору, розірвана частина волокна “висипала” вниз (у хромосферу) високоенергетичні частинки. Випромінювання вузла №7 — своєрідний відгук тої частини хромосфери, куди вривалися високоенергетичні частинки. Згідно з [35], спочатку виникають спалахові вузли на кінцях головного волокна або в місцях його розриву, що й отримано для вузла №7. У післямаксимальний період спостерігається повільний спад інтенсивності всіх вузлів. Фаза загасання спалаху займає більшу частину його тривалості життя.

Зображена на рис. 6  $H_{\alpha}$ -фільтрограма АО 10486 є доказом того, що на хромосферному рівні вона має вихрову структуру. Такі активні області [10] при наявності навіть середньої напруженості (2–2.5 тис. Гс) магнетних полів плям є найбільш спалахово-продуктивними. Їхня вихрова структура здатна нагромаджувати особливо велику енергію, яка при певних умовах може вивільнитися.

З погляду причинно-наслідкових зв'язків, які дають змогу відтворити сценарій зародження й реалізації спалахового процесу, найважливішим є динаміка речовини й магнетного поля (магнетогідродинаміка), яка охоплює структурні утворення різних масштабів і викликає взаємодію між ними. Фактично діє схема, згідно з якою енергія гідродинамічних рухів трансформується в надлишкову (вільну) енергію магнетного поля (енергію електричних струмів у системі, що охоплює всю активну область). Так відбувається [5–7, 12, 16–19, 36] нагромадження енергії й через локальну взаємодію, її перехід у нерівноважний стан. У такому стані можуть продукуватися порівняно невеликої яскравості спалахи (що і спостерігалася в першій стадії). Наприкінці завершення нагромадження енергії система наближається до деякого критичного (порогового) значення і стає дуже нестійкою. Власне на початку другої стадії ( $\sim 11:02$  UT) створилася така (достатня) ситуація, при якій впливаючий з-під фотосфери новий магнетний потік [34, 35] своєю взаємодією з магнетним полем активної ділянки шляхом магнетного перез'єднання спричинив вивільнення нагромадженої енергії. Якщо взяти до уваги факт перекачки енергії активної області в місце енерговиділення, який установив С. І. Гопасюк [6, 17] і центром якого є S-подібне основне волокно, то стане зрозумілою сутність потужного спалахового енерговиділення (як наслідок низки вказаних вище взаємопов'язаних процесів).

Оскільки загальний енергозапас активної ділянки відображається у величині ( $\sim 10^{12}$  А) глобального електричного струму [6], то для джоульової дисипації необхідне зниження електропровідності в  $\sim 10^3$  раз, до чого може спричинитися низка нестійкостей [18, 19] або проникнення в ділянку енерговиділення холодної,

частково йонізованої плазми протуберанця [20].

Отже, внаслідок винятково потужного протонного спалаху 4В/Х17.2 на Сонці 28.X.2003 р. продуковане електромагнетне випромінювання, ежекція корональної маси, сонячні космічні промені, ударні хвилі, магнетоплазмові згустки (плазмоїди) і цілі хмари високоенергетичних частинок, долаючи міжпланетний простір, збурювали кліматичну систему Землі й викликали чимало явищ (полярні сйва, магнетні бурі, раптові йоносферні збурення та ін.), спричиняючи негативну дію ([http://www.sec.noaa.gov/NOAA\\_scales/](http://www.sec.noaa.gov/NOAA_scales/)) як на життєдіяльність людей, так і на космічні апарати. 28.X.2003 р. GOES-10-12 виміряли й записали (у вигляді графіка) еволюцію спалахового процесу в рентгенівському діапазоні (у смугах: а) 0.5–4.0 Å; б) 1.0–8.0 Å; рис. 3) з тривалістю, відповідно, понад 6 і 9 годин. GOES-11 виміряв і зареєстрував 28–29.X.03 р. високоенергетичні потоки протонів від спалаху з енергіями: а)  $\geq 10$  MeV; б)  $\geq 50$  MeV; с)  $\geq 100$  MeV (рис. 4). Дані супутників GOES-10-11-12 узято з INTERNET (<http://sxi.ngdc.noaa.gov/>)

У навколосезному просторі на рівні магнетосфери в максимумі потоку 29.X. (00:00–11:00) UT за одну секунду через  $1\text{см}^2$  проходило  $3 \cdot 10^4$  протонів з  $E \geq 10$  MeV. Це саме стосується і протонів з  $E \geq 50$  MeV і  $E \geq 100$  MeV, яких, правда, було значно менше.

Короткохвильове електромагнетне ( $\text{УФ}$ ,  $\text{X}$ ,  $\gamma$ ) випромінювання сильно йонізує верхні шари атмосфери (100–120 км) і спричиняє виникнення йоносферних струменів в сотні тисяч ампер. Йоносферний струм тече вздовж зони полярних сйів опівночі й уранці на захід, а вдень і ввечері — на схід. Магнетне поле йоносферних струмів, взаємодіючи з магнетним полем Землі, викликає значні зміни його компонент [27, 30–33].

Виявлений у магнетній обсерваторії “Львів” 29.X.2003 о 6:12 UT раптовий спад горизонтальної ( $x$ ) і вертикальної ( $y$ ) компонент геомагнетного поля (рис. 5) відповідає вторгненню максимуму потоку протонів з  $E \geq 100$  MeV в магнетосферу Землі (рис. 4). Характерною особливістю спалаху 28.X. є те, що він продукував протони і релятивістські електрони, які, взаємодіючи з магнетосферою Землі, відхилилися й дрейфували, відповідно, на захід і на схід. Через великий поперечний переріз і малу дрейфову швидкість (поперек силових ліній геомагнетного поля) протонам не зразу вдалося створити магнетосферний кільцевий струм 28.X. (магнетне поле якого протилежне до геомагнетного поля). Цей струм був створений лише 29.X. після 6:00 UT при вторгненні в магнетосферу максимального потоку протонів.

Згідно з магнетограмами (рис. 5), магнетна буря почалася о 06:12 UT. Оскільки зменшення величин горизонтальної ( $x$ ) і вертикальної ( $y$ ) компонент відбувалося не цілком раптово, то на початковій фазі буря була викликана західними йоносферними ( $h \approx 100$ –120 км) авроральними електроструменями, які фактично діяли протягом усього часу зменшення обох компонент. І лише згодом (на головній фазі) почав діяти кільцевий магнетосферний струм, який нада-

лі зменшував горизонтальну і вертикальну компоненти геомагнетного поля до мінімальних значень і відсутність якого спочатку припинила цей спад, а потім призвела до фази відновлення. Зменшення горизонтального складника становило 760 nT. Значно меншою є амплітуда спаду вертикальної компоненти (267 nT). У фазі відновлення (після зникнення кільцевого струму) характеристики поля набувають попереднього значення.

Максимальна геоефективність цього спалаху визначається як потужністю, так і його локалізацією біля центрального меридіана Сонця.

Магнетна буря 29.X.2003 викликана винятково потужним протонним спалахом 28.X.2003, найбільша не тільки у 23 циклі сонячної активності, але є однією з найбільших за останні 50 років. Це дуже велика магнетна буря, або екстрабуря. Полярні сйва, що супроводжували її, спостерігалися на широтах південної Каліфорнії й Середземного моря.

#### IV. ВИСНОВКИ

Для появи потужного протонного спалаху в активній ділянці визначальним є виникнення відповідної ситуації (необхідних і достатніх умов). До необхідних умов належать, насамперед, наявність великої і складної активної області з  $S$ -подібним основним волокном, що підтверджує вихрову структуру магнетного поля. Така активна ділянка здатна нагромаджувати особливо велику енергію. Нагромадження енергії триває 1–2 доби і завершується безпосередньо перед спалаховим енерговиділенням. Для її нагромадження в активній ділянці важливим є динаміка плазми й магнетного поля, яка охоплює структурні утворення різних масштабів та рівнів і викликає взаємодію між ними: енергія гідродинамічних рухів трансформується в надлишкову вільну енергію (енергію електричних струмів системи, що охоплює всю активну область). Далі система завершує нагромадження енергії, що наближається до порогового значення і стає вельми нестійкою. Достатньою умовою є тригерний механізм взаємодії впливаючого магнетного потоку шляхом перетинання протилежно спрямованих магнетних полів з наявною системою, у центрі якої було  $S$ -подібне головне волокно, і перекачки туди нагромадженої енергії з усієї активної області, внаслідок чого утворилося потужне спалахове енерговиділення.

В еволюції інтенсивності спалахових вузлів виявлено два максимуми з мінімумом між ними. Максимальне випромінювання в передспалаховій стадії належить вузлові № 7, тоді як у спалаховій стадії підсилене випромінювання генерувалось всіма спалаховими вузлами, що утворили по обидва боки волокна дві стрічки. Два малі максимуми бачимо і в генерації протонів (рис. 4).

Виявлено зменшення (мінімум) інтенсивності всіх спалахових вузлів за 15–20 хвилин перед початком другої стадії.

Виятково велика геофективність цього спалаху визначається як потужністю корпускулярного й електромагнетного випромінювання, так і його локалізацією біля центрального меридіана Сонця. Спалахове випромінювання продукувало раптове йоносферне збурення, дуже велику магнетну бурю (екстра бурю),

яка супроводжувалася інтенсивним полярним сійвом на середніх широтах.

Автор висловлює щирю подяку старшому науковому співробітникові магнетної обсерваторії “Львів” Петрові Сумарукові за надання магнетограм.

- 
- [1] В. Г. Банин, А. С. Федорова, *Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца*, Вып. 20 (Наука, Москва, 1971), с. 73.
- [2] В. Г. Банин, В. Д. Трифонов, С. Г. Афанасьев, *Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца*, Вып. 31 (Наука, Москва, 1974), с. 33.
- [3] В. Г. Банин, *Солнечные данные* **5**, 80 (1976).
- [4] С. И. Гопасюк, М. Б. Огирь, А. Б. Северный, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **29**, 15 (1963).
- [5] С. И. Гопасюк, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **92**, 15 (1995).
- [6] С. И. Гопасюк, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **94**, 98 (1998).
- [7] А. М. Зверева, А. Б. Северный, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **41–42**, 97 (1970).
- [8] В. Н. Ишков, *Тезисы докладов симпозиума КАИПГ “Прогнозы солнечной активности и наблюдения солнечных активных явлений”* (Ленинград, 1987), с. 59.
- [9] А. Н. Коваль, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **51**, 13 (1974).
- [10] З. Б. Коробова, Э. И. Могилевский, *Астрон. циркуляр* **1543**, 19 (1990).
- [11] М. Б. Огирь, Е. Ф. Шапошникова, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **34**, 272 (1965).
- [12] М. Б. Огирь, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **37**, 94 (1967).
- [13] М. Б. Огирь, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **70**, 25 (1970).
- [14] М. Б. Огирь, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **51**, 19 (1974).
- [15] М. Б. Огирь, Т. Т. Цап, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **63**, 46 (1981).
- [16] А. Б. Северный, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **30**, 161 (1963).
- [17] В. И. Абраменко, С. И. Гопасюк, М. Б. Огирь, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **78**, 151 (1988).
- [18] А. Г. Алтынцев, В. Г. Банин, Г. В. Куклин и др., *Солнечные вспышки* (Наука, Москва, 1982).
- [19] С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер, В. Н. Цытович, *Физика плазмы солнечной атмосферы* (Наука, Москва, 1977).
- [20] В. В. Зайцев, А. В. Степанов, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.* **92**, 25 (1994).
- [21] B. Schmieder *et al.*, *Adv. Space Res.* **37**, 1313 (2006).
- [22] C. Mandrini *et al.*, *Solar Phys.* **238**, N2, 293 (2006).
- [23] H. Wang *et al.*, *Astron. J.* **601**, 195 (2004).
- [24] G. D. Zanna *et al.*, *Solar Phys.* **239**, N 1-2, 173 (2006).
- [25] Y. N. Su *et al.*, *Solar Phys.* **236**, N 2, 235 (2006).
- [26] W. Uddin, R. Chandra, S. S. Ali, in *Indian Institute of Astrophys. Bangalore. Abstract Book* (Conference 27 November — 1 December, 2006), p. 150.
- [27] C. Wu *et al.*, *J. Geophys. Res.* **110**, 17 (2005).
- [28] T. Woods *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **31** 10802 (2004).
- [29] G. Kopp *et al.*, *Bull. America. Astron. Soc.* **36**, 669 (2004).
- [30] С. И. Акасофу, С. Чепмен *Солнечно-земная физика* (Мир, Москва, 1974–1975).
- [31] В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский *Происхождение космических лучей* (АН СССР, Москва, 1963).
- [32] Л. И. Мирошниченко *Солнечная активность и Земля* (Наука, Москва, 1981).
- [33] М. А. Эллисон *Солнце и его влияние на Землю* (Наука, Москва, 1959).
- [34] V. Archontnis *et al.*, *Astron. Astrophys.* **426**, 1047 (2004).
- [35] I. Heyvaerts, E. R. Priest, D. M. Rust, *Astroph. J.* **216**, 123 (1977).
- [36] Г. Ю. Матюхин, В. М. Томазов, *Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца* Вып. 87 (Наука, Москва, 1989), с. 36.

I. C. ЛАБА

**POWERFUL PROTON SOLAR FLARE 4B/X17.2 ON OCT.28.2003 AND ITS INFLUENCE  
ON THE MAGNETOSPHERE OF THE EARTH**

I. S. Laba

*Ivan Franko National University of Lviv, Astronomical Observatory,  
8, Kyryla i Mefodija St., Lviv, 79005, Ukraine*

Using observational data obtained from the astronomic observatory of Lviv Ivan Franko National University, magnetic observatory "Lviv", and GOES-10, -11, -12 satellites about the power proton 4B/X 17.2 flare from Oct. 28 2003, the evolution of flare, electromagnetic and corpuscular radiation has been studied. This flare was found to have had a two-stage evolution. Separate flare knots would appear and disappear with slow and slight changes in their intensity (except one knot), reaching minimal values 15–20 minutes prior to second stage. The emerging of a new magnetic flux at the active region created sufficient conditions towards the end of the first stage for carrying out the second flare stage—strong and rapid growth of intensity and area of all flare knots. The two-ribbon flare was created in the maximum of radiation. The exceptionally powerful proton flare 4B/X17.2 at Oct. 28 2003 has released great energy ( $\approx 10^{32}$  erg) as proton motion, thermal energy and the energy of radiation. One may define that either the power of (corpuscular and electromagnetic) radiation, or its localization near the central solar meridian made this flare exceptionally highly geoeffective. Flare radiation produced a sudden ionospheric disturbance accompanied by intensive and reaching middle latitudes Polar lights.