

НАДЗВИЧАЙНА СОНЯЧНА Й ГЕОМАГНІТНА АКТИВНІСТЬ У ЖОВТНІ–ЛИСТОПАДІ 2003 р.

І. С. Лаба¹, І. Я. Підстригач¹, Ю. П. Сумарук², Т. П. Сумарук², П. В. Сумарук², О. А. Баран¹

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
79005, Львів, Кирила і Мефодія, 8

²Магнітна обсерваторія “Львів” Інституту геофізики НАН України
81070, Львівська обл., смт Івано-Франкове, вул. Залісся

(Отримано 17 квітня 2009 р.; в остаточному вигляді — 15 березня 2010 р.)

За даними спостережень Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, Магнітної обсерваторії “Львів” Інституту геофізики НАН України, КА GOES-10, -11, -12, космічної сонячної і геліосферної обсерваторії SOHO вивчено вплив інтенсивного спалахового енерговиділення на магнітосферу Землі. Протягом двох “проходжень” по видимому диску Сонця три активні області продукували 191 рентгенівський спалах, включаючи потужні протонні події, зокрема 28.X.(4В/X17.2), 29.X.(2В/X10) і особливо 4.XI.2003 (3В/X28), що є найбільшою від початку позаатмосферних спостережень.

Перебуваючи біля центрального меридіана, АО10486 продукувала 28.X. і 29.X. два надзвичайно потужні спалахи і спрямовані до Землі ежекції корональної маси. Ці дві події мали надзвичайний вплив на магнітосферу й атмосферу Землі та викликали дуже велику магнітну бурю 29.X.–31.X.2003.

Друга дуже велика магнітна буря (20.XI.–21.XI.2003) спричинена високим рівнем спалахової активності АО10501 (10484, II оборот) під час проходження через центральний меридіан.

Ежекції корональної маси 28.X., 29.X. і 18.XI.2003, щодо їх енергетики і впливу на магнітосферу Землі, були винятково сильними.

Ключові слова: активність Сонця, магнітна буря.

PACS number(s): 97.10.Ex

І. ВСТУП

Спалахові події в жовтні–листопаді 2003 р. викликали значний інтерес учених у всьому світі, оскільки вони характеризувались екстремальними значеннями параметрів на Сонці, у магнітосфері та йоносфері Землі. Ці події викликані “проходженням” по видимому диску Сонця трьох дуже великих активних областей (NOAA АО10484, 10486, 10488) з вельми складною $\beta\gamma\delta$ магнітною конфігурацією (рис. 1–3). Усі ці активні області — довгоживучі комплекси активності, які існували в попередньому і в наступному оборотах. Найбільшою серед них була АО10486 із сильно розвинутою вихровою структурою магнітного поля й S-подібним головним волокном (протуберанцем) [1]. Такі активні області здатні нагромаджувати особливо велику енергію, яка за певних умов може вивільнятися. Власне, спалахові енерговиділення в активних областях й ежекції корональної маси (Coronal Mass Ejection) — найпотужніші прояви сонячної активності; вони визначають рівень активності Сонця. Слід відзначити, що рівень активності визначається всіма активними ділянками (їхнім енергетичним внеском), що є на видимому диску Сонця. А внесок цей характеризується спалаховими потенціалом та індексом, а також ерупціями корональної маси. Власне, спалаховий потенціал, тобто кількість спалахів рентгенівських класів X, M, C (де X1.0 = 10M1.0 = 100C1.0 і X = 10⁻⁴ Вт/м²), — це розподіл певного числа спала-

хів за енергіями, а спалаховий індекс — сума спалахів X- і M-класів (де X — ціле число, а M — десята доля цілого числа) — енергетична характеристика АО в рентгенівському діапазоні.

Період 19.X.–5.XI.2003 надзвичайно високої активності Сонця характеризувався багатьма високоенергетичними спалахами та ерупціями корональної плазми. Двічі активні області створювали триденний дуже високий рівень активності Сонця: 28.X.–30.X.2003 і 3.XI.–5.XI.2003. В обох випадках основний внесок в екстремальні події дала АО10486. Цьому періоду надзвичайної сонячної й геомагнітної активності присвячено низку праць. Так, Barbier та ін. [2] одними з перших описали космічну погоду X–XI.2003, викликану спалахами гігантської інтенсивності й пов’язаної з ними ерупціями корональної плазми та їхнім впливом на кліматичну систему Землі.

Проводячи спектрально-поляризаційні спостереження спалаху X17.2/4В 28.X.2003 за допомогою ешелюного спектрографа, автори [3,4] зосередилися на яскравому спалаховому вузлі й виміряли напруженість магнітного поля в семи спектральних лініях (за глибиною). Метод “відношення ліній” дав різні значення для різних пар ліній, що вказує на різкі зміни магнітного поля по вертикалі. Крім того, аномальна форма Стокс-ліній свідчить про наявність просторово нероздільних полярно перемішаних структур магнітного поля дуже великої напруженості.

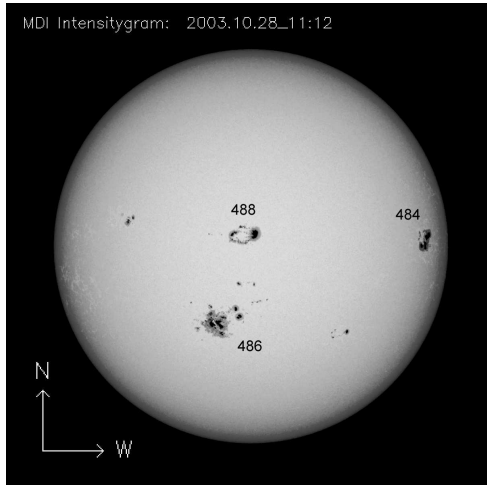


Рис. 1. Зображення Сонця 28.X.2003 в білому світлі (MDI/SOHO) із трьома спалахово-активними областями.

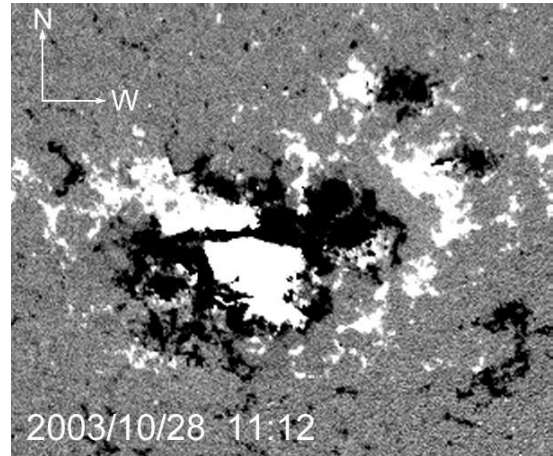


Рис. 2. Магнітограма MDI/SOHO 28.X.2003 найбільшої в циклі № 23 групи плям 10486, яка підтверджує складну магнітну конфігурацію перемішаних полярностей: світлий колір — N-полярність, темний — S-полярність.

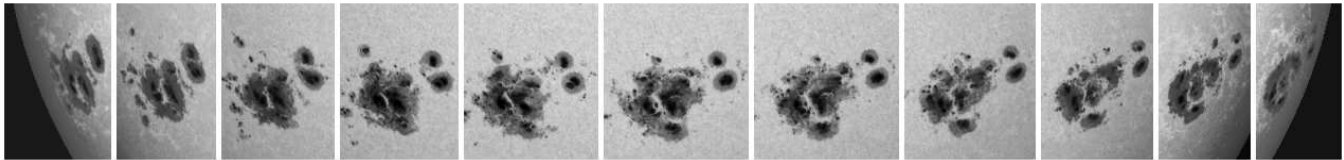


Рис. 3. Проходження по видимому диску Сонця найбільшої в циклі № 23 групи плям 10486 з 24.X.2003 до 03.XI.2003 (MDI/SOHO).

Автори [5, 6], досліджуючи геомагнітні бурі, знайшли прямий зв'язок між величиною B_z -компоненти міжпланетного магнітного поля (ММП) та швидкістю магнітних хмар, що виходили з центральної частини диска Сонця. Було встановлено, що дуже швидкі (> 1000 км/с) корональні викиди здатні постачати сонячному вітру (с.в.) негативні (спрямовані на південь) магнітні поля високих інтенсивностей ($B_z > |20|$ нТл), спричиняючи бурі з індексом $D_{st} < -200$ нТл, що є мірою інтенсивності магнітної бурі. Для подій 28.X.–29.X.2003 автори праці [7] спостерігали наближення фронтальної магнітопаузи до ~ 6.6 радіусів Землі і три послідовні інжекції енергетичних частинок у зону кільцевих струмів та викликані ними три послідовні великі бурі, що частково перекривалися. Під час першої бурі участь струмових шарів переважала, тоді як дві наступні магнітні бурі пов'язані з розривом кільцевого струму. У працях [8, 9] підтверджено прямий зв'язок між величиною B_z -компоненти й мірою інтенсивності D_{st} магнітної бурі. У статті [10] визначено величину та напрям B_z -компоненти магнітної хмари на віддалі 1 а.о. і порівняно одержані дані з напрямком магнітного поля в АО, що продукувала викид. У праці [11] автори, вивчаючи сонячно-земні події X–XI.2003, дійшли висновку, що 29.X.–31.X.2003 після взаємодії сильної негативної B_z -компоненти ММП з магнітосферою спостерігалися дві надзвичайні суббуреподібні події, викликані пульсаціями тиску у с.в. У працях [12] і [13]

вивчено вплив спалахового короткохвильового (0.1–194.0 нм і 26.0–34.0 нм) випромінювання на йоносферу: виявлено для спалахів 28.X.2003 і 4.XI.2003 раптово йоносферну бурю — швидке зростання повного електронного вмісту $\sim 25 \cdot 10^{12}$ ел/см², яка почалася на денному боці о 10:00гбгод. і тривала понад три години.

У роботі [14] автори представили комплексні орбітальні дослідження активності Сонця КОРОНАС-Ф у навколосезному просторі для подій 28.X. і 4.XI.2003.

Автори праці [15] виявили, що надзвичайно швидкі викиди, в т.ч. і від АО10486, виникають у довгоживучих активних комплексах і мають тристадійну еволюцію. У роботі [16] обговорено результати спостережень релятивістських частинок від спалаху X17.2/4В в порівнянні даних наземних нейтронних моніторів (приєкваторіального Tshubeb, а також Московського і Апатити) з даними космічних апаратів. Подія, як виявляється, має багато особливих ознак, причому жодної з них не вдається пояснити. Автор праці [17], вивчаючи вплив спалахового випромінювання на магнітосферу Землі, відзначає, що винятково висока геоактивність спалаху 4В/X17.2 28.X.03 р. визначається як його потужністю, так і локалізацією біля центрального меридіана, а також тривалістю взаємодії негативної B_z -компоненти ММП з магнітосферою Землі. У роботі [18] автор указує на різницю в геоєфективності високошвидкісних потоків с.в., пов'язаних як із сонячними спалахами, так і з корональними діра-

ми; магнітні бурі, викликані спалахами, інтенсивніші (втричі) і менш тривалі, тоді як бурі, генеровані корональними дірами, триваліші й менш інтенсивні. Далі автор відзначає, що дві найсильніші магнітні бурі 23 циклу сонячної (ц. с. а.) активності (29.X.–31.X.2003 і 18.XI.–21.XI.2003) спостерігалися при великих позитивних значеннях компоненти B_z ММП; це суперечить загальноприйнятій думці, що геомагнітна активність завжди пов'язана з негативною B_z .

Отже, результати наведених досліджень, що стосуються взаємодії B_z -компоненти ММП з магнітосферою Землі для періоду X–XI.2003 винятково високої активності Сонця, не цілком зрозумілі [16] і навіть суперечливі [18]. Тому проблема ця передбачає необхідність подальших досліджень.

Виходячи з наявності повних даних спостережень як сонячної, так і геомагнітної активності в жовтні–листопаді 2003 р., автори вивчають вплив інтенсивного спалахового енерговиділення на магнітосферу Землі; дослідження стосується трьох різних випадків: а) локалізація великих ($\geq M5.0$) спалахів біля центрального меридіана; б) локалізація великих ($\geq M5.0$) спалахів на краю диска Сонця; в) локалізація середніх (клас від $M1.0$ до $M4.9$ включно) спалахів біля центрального меридіана.

II. СПОСТЕРЕЖЕННЯ І ОБРОБКА ДАНИХ

Спостереження активних процесів на Сонці в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка проводять за допомогою хромосферного телескопа повного диска в центрі бальмерівської лінії H_α ($\lambda 6563 \text{ \AA}$). За період 19.X.–5.XI.2003 одержано H_α -фільтрограми двох потужних спалахів найвищого рентгенівського X-класу: це потужний протонний спалах 4B/X17.2 28.X.2003 [1, 17] в АО10486 і спалах 2F/X3.9 3.XI.03р. в АО10488.

Магнітна обсерваторія “Львів” безперервно проводить моніторинг компонент напруженості магнітного поля Землі за допомогою магнітографів, які записують часові зміни їхніх величин. Сильні збурення геомагнітного поля називаються магнітними бурями, міра інтенсивності і тривалість яких визначається рядом параметрів магнітної хмари високоенергетичних частинок, продукованих потужними нестационарними процесами на Сонці.

Перша активна область АО10484 (з координатами N03L354; спалаховим потенціалом $X_2^{1.2} + M_{16} + C_{32}$; спалаховим індексом 5.64) вийшла з-за східного лімба на видимий диск Сонця 18.X. і того ж дня заявила про себе активними процесами (9 рентгенівських спалахів С-класу), спричинивши зростання рівня активності з дуже низького до низького. Спалахові процеси супроводилися викидами корональної плазми (7 ерупцій середньої маси $2.5 \cdot 10^{15} \text{ г}$ із середньою кінетичною енергією $E_k = 3.8 \cdot 10^{30} \text{ ерг}$). Характерною ознакою для цієї області було випливання нового магнітного потоку, що вело до перебудови й ускладнення магнітного поля, підсилювалася його напруженість і бурхливо зростала площа групи плям. Уже на другий

день свого існування 19.X. АО дала спалах X1.1/1N. Цей великий рентгенівський спалах (разом із двома спалахами М-класу, трьома — С-класу, а також спалахами за попередній день) спричинився до зростання рівня активності з низького до високого. Спалахи супроводжувалися викидами (5 ерупцій із середньою $E_k \approx 3.4 \cdot 10^{30} \text{ ерг}$). 20.X. зберігся високий рівень активності через спалахи попереднього дня; цього дня в АО відбувся 1 спалах М-класу і 8 — С-класу. 21.X. рівень активності трохи знизився — став помірним.

Друга активна область АО10486 (із координатами S17L283; спалаховим потенціалом $X_7^{28} + M_{21} + C_{12}$; спалаховим індексом 77.93) виникла, розвинулась і стала великою групою плям на невидимому боці Сонця. Вона вийшла на видимий диск Сонця 22.X. і зразу ж заявила про себе п'ятьма великими рентгенівськими спалахами М-класу і високошвидкісними викидами корональної маси із середньою енергією $\sim 2.2 \cdot 10^{31} \text{ ерг}$. У цей день рівень активності знову став високим. У цій області 23.X. виникли два великі рентгенівські спалахи X5.4/1B і X1.1/1N. Рівень активності як 22.X., так і 23.X. створювався двома активними областями (10484 і 10486) і був високим (2 спалахи X-класу, 6 — М-класу, а також 4 ерупції із середньою кінетичною енергією $1.9 \cdot 10^{31} \text{ ерг}$). 24.X. дві АО продукували 4 рентгенівські спалахи М-класу, 3 — С-класу та 4 викиди із середньою енергією $2 \cdot 10^{31} \text{ ерг}$. Рівень активності 24.X. і 25.X. (7 спалахів М-класу, 5 — С-класу, 2 викиди із середньою енергією $\sim 5 \cdot 10^{30} \text{ ерг}$) був високим, а також у ці дні спостерігалось потужне впливання нового магнітного потоку в АО 10486, який удвічі збільшив розміри групи плям (www.spaceweather.com). Після впливання потужного нового магнітного потоку 26.X. в АО10484 значно зросла площа групи плям ($S_p = 1750 \text{ м. д. п.}$) і у ній виникли два великі спалахи X1.2/2N і M7.6/2N. Наслідком впливання нового магнітного потоку в АО10486 було виникнення потужного спалаху 3B/X1.2. Рівень активності в цей день був високим (два спалахи X-класу, 6 — М-класу, 2 — С-класу, потужний спалах 3B в оптичному діапазоні, а також 6 викидів середньої маси $7 \cdot 10^{15} \text{ г}$ і середньої кінетичної енергії $\sim 1.5 \cdot 10^{31} \text{ ерг}$).

Третя АО10488 (з координатами N08L291; спалаховим потенціалом $X_2^{3.9} + M_7 + C_{17}$; спалаховим індексом 7.78) зародилася 26.X. й активізувалася 27.X. у центральній частині диска Сонця; характерним для цієї області був бурхливий розвиток (31.X.–1.XI, $S_p = 1750 \text{ м. д. п.}$), пов'язаний із впливанням магнітного поля. У трьох АО (10484, 10486, 10488) цього дня виявлено 5 спалахів М-класу, 2 — С-класу, а також 4 викиди середньої маси $7 \cdot 10^{15} \text{ г}$ і середньої кінетичної енергії $\sim 2.5 \cdot 10^{31} \text{ ерг}$. Рівень активності був високим. Потужне витікання нового магнітного потоку 27.X.–28.X. спричинило збільшення площі групи плям 10486 до рекордної величини ($S_p = 2610 \text{ м. д. п.}$) і виникнення 28.X. третього за потужністю протонного спалаху X17.2/4B в циклі N23. Цей спалах спричинив дуже високий рівень активності Сонця. Цього ж дня ще відбулися 5 рентгенівських спалахів С-класу.

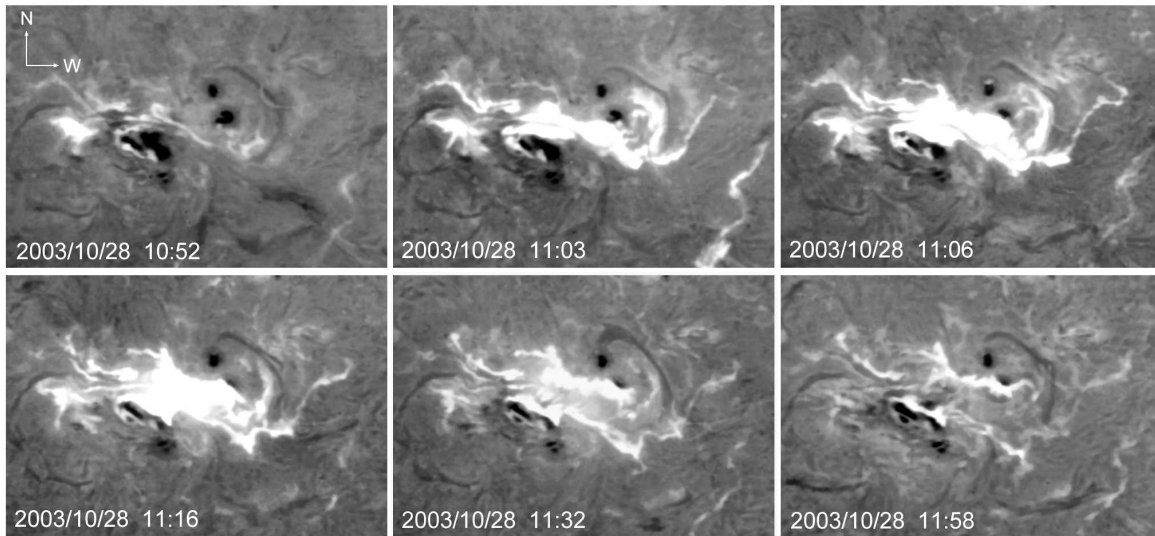


Рис. 4. Еволюція потужного протонного спалаху 4В/Х17.2 28.Х.2003, отримана за допомогою сонячного телескопа АФР-2 Астрономічної обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка.

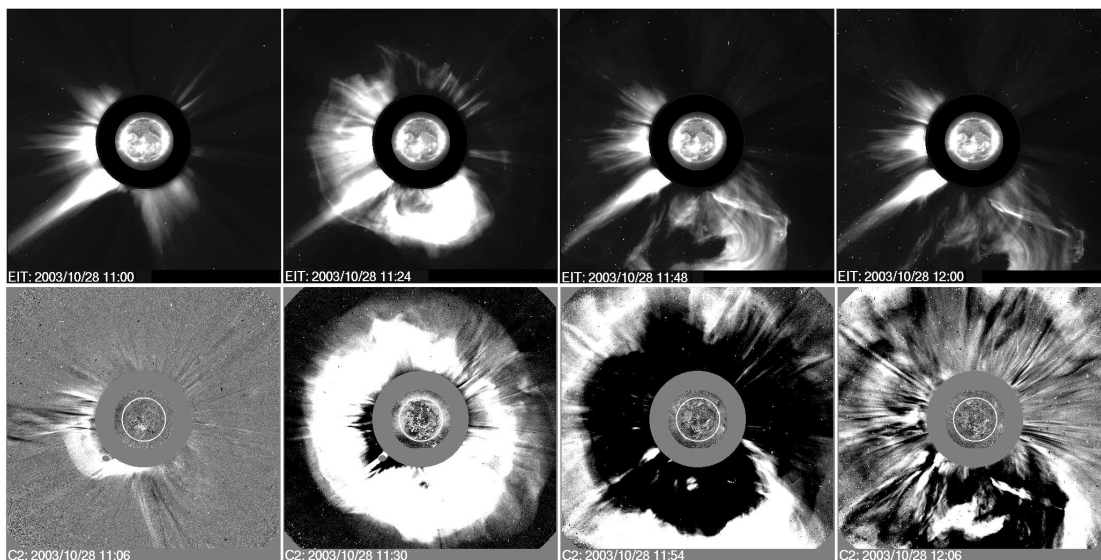


Рис. 5. Ерупції корональної маси та їхній рух під час спалаху 4В/Х17.2 28.Х.2003, які були зареєстровані на EIT (верхній ряд) і LASCO (нижній ряд) SOHO.

Подія 28.Х.2003. Потужний протонний спалах 4В/Х17.2 28.Х.2003. спостерігав один із авторів в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка [1, 17]. Спалаховий процес, який тривав понад 4.5 години, мав чітко виражені дві стадії: передспалахову та спалахову. У спалаховій стадії спостерігався вельми бурхливий розвиток: швидке збільшення площі спалахових ядер та їх інтенсивностей, що спричинило до утворення по обидва боки лінії розділу полярностей двострічкового спалаху з піком в 11:06–11:10 UT (рис. 4).

Цей надзвичайно потужний спалах 4В/Х17.2 спостерігали багато наземних обсерваторій і космічних апаратів (КА). Так, наприклад, прилад TIM (Total Irradiance Monitor) на борту КА SORCE (Solar Radi-

ation and Climate Experiment) зареєстрував зростання TSI (Total Solar Irradiance) — сонячної сталої під час спалахового процесу [19, 20]. Космічна сонячна обсерваторія SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) зареєструвала спалах 4В/Х17.2 та ежекцію корональної маси ($m = 4 \cdot 10^{16}$ г), пов'язану зі спалахом і спрямовану до Землі (рис. 5). На рис. 5 представлено зображення ерупції корональної плазми і її рух під час спалаху 4В/Х17.2 28.Х.2003, одержаної приладами EIT (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope) у лінії FeXII (195 Å) (верхній ряд) і LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) C2 в оптичному діапазоні (нижній ряд). Прилад EIT покриває відстань (від центра Сонця) до $\sim 1.2R_{\odot}$. Прилад LASCO C2 проводить моніторинг корони Сон-

ця (подібно до того, як спостерігається вона під час повного сонячного затемнення) поза лімбом на відстані від $1.1R_{\odot}$ до $6R_{\odot}$. Супутники-геостационари GOES-10,-11,-12 (Geostationary Operational Environment Satellites) 28.X. зареєстрували прихід до Землі потужного жорсткого ($0.5\text{--}4.0 \text{ \AA}$; $1.0\text{--}8.0 \text{ \AA}$) електромагнітного (рис. 6) і корпускулярного (протони: $\geq 10 \text{ MeV}$; $\geq 50 \text{ MeV}$; $\geq 100 \text{ MeV}$) випромінювання (рис. 7). КА XMM-Newton протягом 60 год. з 26.X. до 29.X.2003 спостерігав емісію $0.2\text{--}2.0 \text{ keV}$ в атмосфері Юпітера. Peter Kuklok (Німеччина) за допомогою сонячного фотосферного телескопа спостерігав складову цього спалаху в білому світлі в середині північні плями. SOHO/SEM зареєстрував потужне EUV ($26.0\text{--}34.0 \text{ nm}$) випромінювання, а КА TIMED/SEE (Terrestrial Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics Solar EUV Experiment) спостерігав випромінювання в діапазоні $0.1\text{--}194.0 \text{ nm}$. Російський КА КОРОНАС-Ф (Комплексные Орбитальные Околосолнечные Наблюдения Активности Солнца — Фотон) проводив спостереження активних процесів на Сонці й також вивчав вплив сонячної активності на земне довкілля. Він записав 28.X. довготривалі події витoku протонів із $E > 500 \text{ MeV}$ і γ -емісію з енергією фотонів понад 60 MeV безперервно за весь час спалахового процесу [14], а також — високий ступінь йонізації на висотах 60 km і менше [7]. СОНГ (Солнечные Нейтроны и

Гамма-кванты) на борту КОРОНАС-Ф зареєстрував потоки нейтронів із енергією $E > 20 \text{ MeV}$, рентгєнівську і γ -емісії в континуумі (як результат гальмівного випромінювання нетеплових електронів) від 20 keV до 300 MeV , γ -лінії: 0.511 ; 1.6 ; 2.233 ; 4.4 ; 6.1 MeV . Уже в $11:20 \text{ UT}$ 28.X. вибухова хвиля екстремально енергєтичних протонів ($E > 100 \text{ MeV}$) почала бомбардувати верхні шари атмосфери, а перед тим в $11:12.5 \pm 0.5 \text{ UT}$ наземні нейтронні монітори зареєстрували зростання, що засвідчило прихід до Землі протонів з $E > 1 \text{ GeV}$. Протони від спалаху X17.2/4B з найвищою енергією ($> 9 \text{ GeV}$) зареєстрував приекваторіальний нейтронний монітор ст.Tsumeb [16], а через кілька хвилин — Московський ($\sim 7 \text{ GeV}$) і ст. Апатити.

Подія 29.X.2003. Рівень активності 29.X. був дуже високим і визначався як вельми потужним спалахом попереднього дня X17.2/4B, так і дещо менш потужним спалахом X10/2B, який знову продукувала та ж сама AO10486. Цього дня AO10486 видала ще два спалахи M-класу і 1 — C-класу, тоді як дві інші (AO10484 і AO10488) — лише 3 спалахи C-класу. SOHO/EIT зареєстрував спалах X10/2B та пов'язану з ним ежекцію корональної маси ($m \approx 1.6 \cdot 10^{16} \text{ g}$), спрямовану до Землі, а супутники-геостационари GOES-10,-11,-12 — прихід до Землі потужного жорсткого електромагнітного й корпускулярного випромінювання (рис. 6, 7).

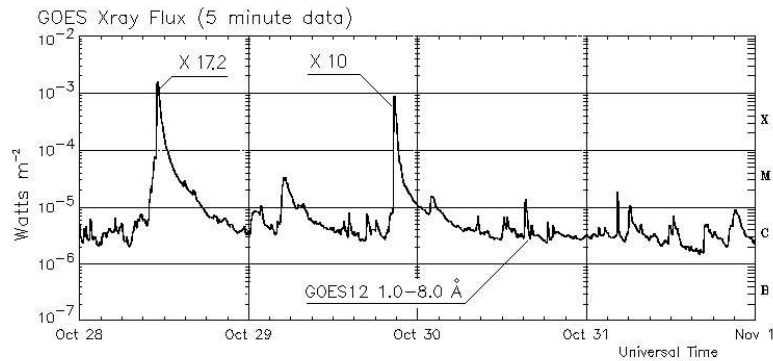


Рис. 6. Потоки рентгєнівського випромінювання спалахів X17.2 28.X.2003 і X10 29.X.2003, виміряні та записані супутниками GOES-10, -12 у смузї $1.0\text{--}8.0 \text{ \AA}$.

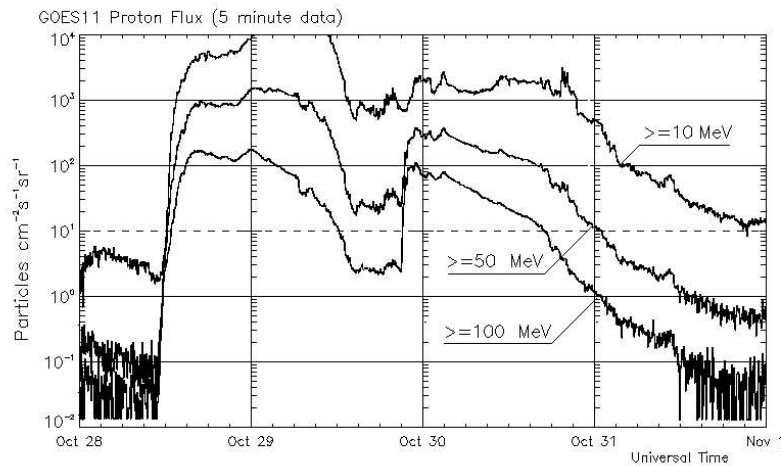


Рис. 7. Потоки протонів, генеровані спалахами 4B/X17.2 28.X.2003 та 2B/X10 29.X.2003, виміряні та записані супутником GOES-11.

30.X. рівень активності зберігся дуже високим, в основному, через надзвичайно потужні події на Сонці за попередні дні. Цього дня дві АО (10486 і 10488) спромоглися продукувати лише два спалахи М-класу і 3 — С-класу. АО10484 зайшла за лімб. Детектори космічних променів — нейтронні монітори — під час надзвичайної активності Сонця 28.X.–30.X.2003 зареєстрували прихід до Землі не тільки високоенергетичних нейтронів і протонів, але й спричинене ними небувале гігантське Форбуш-зниження.

Дві описані потужні події на Сонці 28.X. і 29.X.2003 спричинилися до виникнення надзвичайно великої магнітної бурі 29.X.–31.X.2003. Вона була з раптовим початком й амплітудою 760 нТл на магнітній обсерваторії “Львів”. Дуже інтенсивні корпускулярні потоки призвели до порушення в роботі приладів на космічних апаратах, тому параметри сонячного вітру під час цієї бурі не були виміряні. Індукція ММП становила 40 нТл. Південна компонента ММП досягла –40 нТл. Перез’єднання на денному боці привело до величезного збільшення магнітного потоку у хвості магнітосфери і, відповідно, до появи на нічному та ранковому

боках іоносфери потужного західного аврорального електроструменя і зсуву в субавроральні широти [21].

На рис. 8 показана магнітограма бурі 29.X.–30.X.2003, одержана на магнітній обсерваторії “Львів”.

На рис. 9 подано середньогодинні значення D_{st} — індексу, середнього за довготою значення горизонтальної компоненти геомагнітного поля. D_{st} — індекс досягнув величини –401 нТл. Величина збурення в середніх широтах визначається як $H - S_q$, де H середньогодинне абсолютне значення горизонтальної компоненти повного вектора магнітного поля Землі, а S_q — відповідне значення цієї ж компоненти по п’яти міжнародно-спокійних днях за даний місяць [22].

На рис. 10 показані величини $H - S_q$ на магнітній обсерваторії “Львів” для бурі 29.X.–31.X.2003 та $D_{st} \cdot \cos \phi$, де ϕ — магнітна широта обсерваторії. Величина $D_{st} \cdot \cos \phi$ — це варіація поля від кільцевого магнітосферного струму. Різниця Δ між $H - S_q$ і $D_{st} \cdot \cos \phi$ дає варіацію від авроральних іоносферних електроструменів та їхніх зворотних струмів у середній широті. Ці різниці показано на рис. 11.

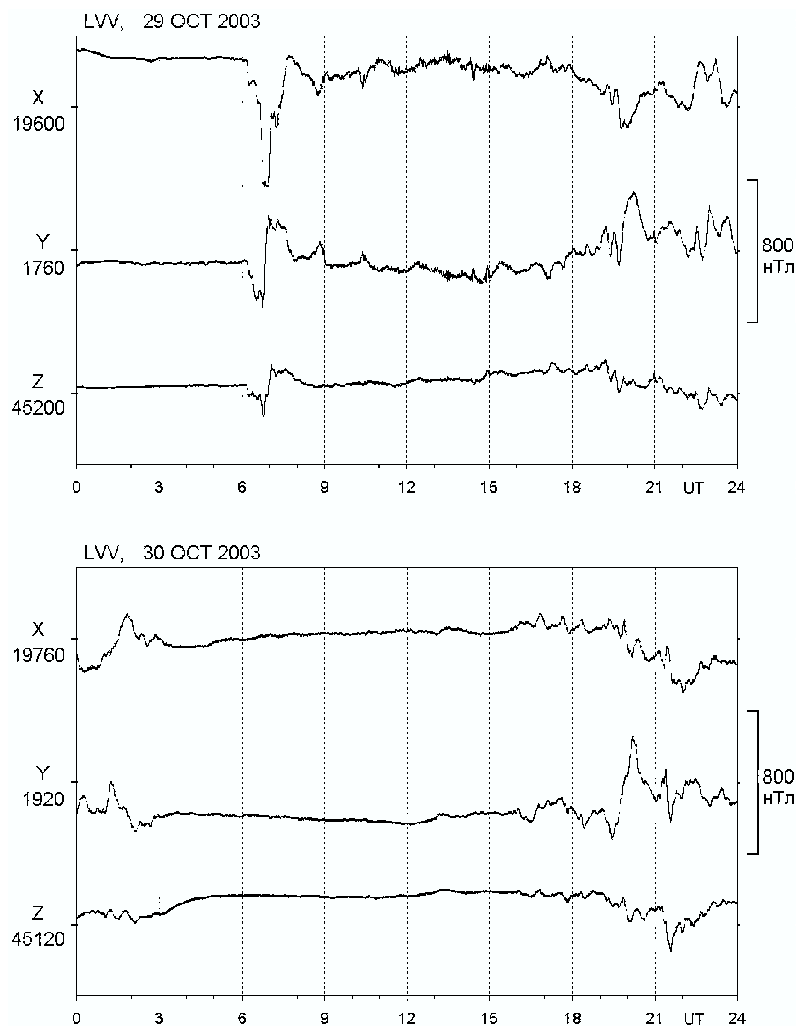


Рис. 8. Магнітограма X-, Y-, Z-компонент геомагнітного поля на магнітній обсерваторії “Львів” за 29.X.–30.X.2003. Біля кожної компоненти — реперні точки, щодо яких визначаються часові зміни в нТл.

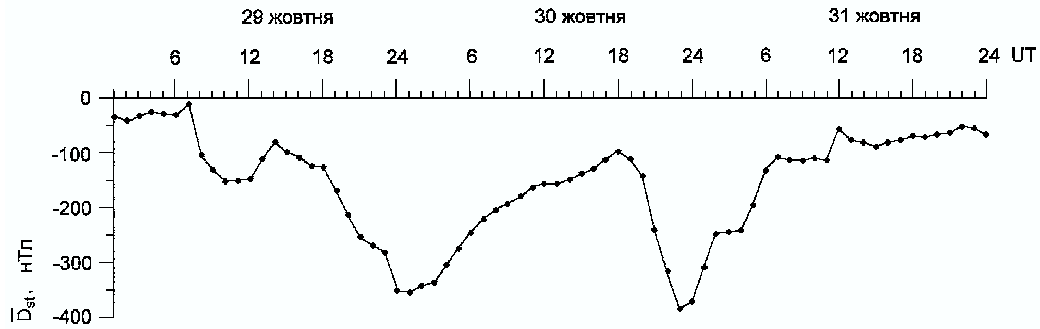


Рис. 9. Середньогодинні значення D_{st} -індексу під час бурі 29.X.–31.X.2003 за даними світового центру WDC-C2.

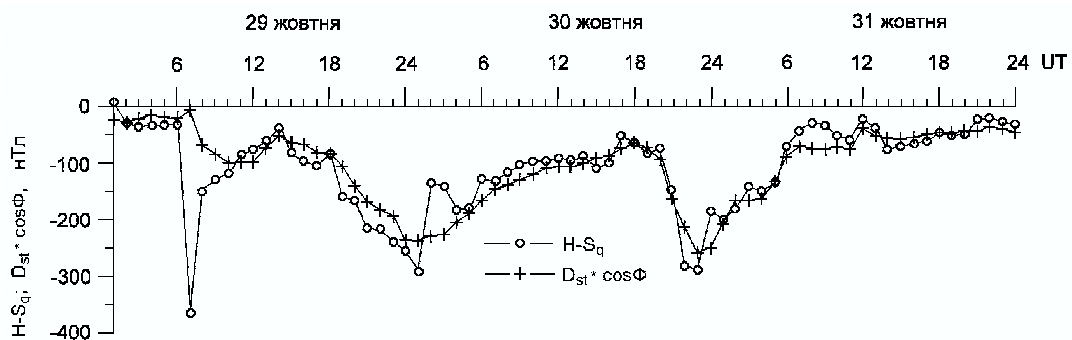


Рис. 10. Варіації $H - S_q$ та $D_{st} \cdot \cos \phi$ на магнітній обсерваторії “Львів” для бурі 29.X.–31.X.2003.

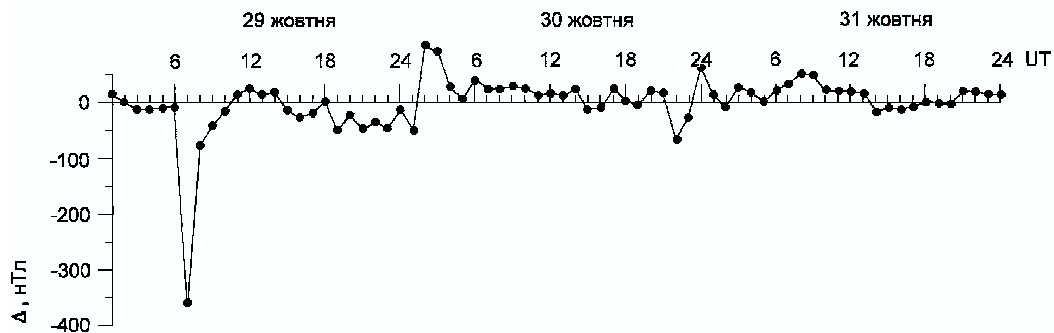


Рис. 11. Різниця $H - S_q$ та $D_{st} \cdot \cos \phi - \Delta$ на магнітній обсерваторії “Львів” для бурі 29.X.–31.X.2003.

31.X.–1.XI. рівень активності трохи знизився, а також зберігся високий фоновий рівень від подій попередніх днів. Великих спалахів не було; відбулося 8 викидів із $m \approx 8 \cdot 10^{14}$ г і $E_k \approx 2.0 \cdot 10^{30}$ ерг. Дві АО дали 4 спалахи М-класу, 13 — С-класу.

Наступний триденний рівень дуже високого спалахового енерговиділення знову започаткувала АО10486, яка під кінець дня 2.XI. генерувала потужний спалах X8.3/2В. Крім того, дві АО дали два спалахи М-класу та один — С-класу. Два потужні спалахи X2.7/2В і X3.9/2F в АО10488 3.XI. разом із потужним спалахом за попередній день X8.3/2В спричинилися до дуже високого рівня активності. Цього дня АО10486 дала 1 рентгенівський спалах М-класу.

Мегаподія 4.XI.2003. Обидві АО достатньо наблизилися до західного лімба, давши два спалахи М-класу і два — С-класу. Під кінець дня о 19:29 UT в активній області АО10486 взяла старт найпотужніша подія в рентгенівському діапазоні від початку позаатмосферних спостережень — рекордний спалах X28/3В, досягнувши пікового значення о 19:50 UT. Х-променеві детектори в максимумі випромінювання “наситились” і перебували в такому стані 11^m. Супутники-геостационари GOES-10, -11, -12 зареєстрували прихід до Землі потужного жорсткого електромагнітного та помірного корпускулярного випромінювання. Спалах супроводжувався потужною ерупцією корональної маси ($m \approx 1.6 \cdot 10^{16}$ г). Рівень

активності був дуже високим.

5.XI. рівень активності Сонця зберігався дуже високим, в основному, через надпотужну подію попереднього дня. АО10486 у цей день продукувала два рентгенівські спалахи М-класу та один високошвидкісний викид корональної плазми, що не був спрямований до Землі. У цей день обидві АО (10486 і 10488) зайшли за лімб.

Після заходу двох АО (10486 і 10488) рівень активності різко зменшився — став низьким. Спокійним Сонце було два тижні, а з виходом з-за Е-лімба АО 10501 (П оборот 10484) і його активізації 17.XI.2003 рівень активності знову став високим. За чотири доби в ньому відбулося 8 спалахів М-класу (у т.ч. три великі) та 34 спалахи С-класу. Під час спостереження з H_{α} -фільтром 18.XI.2003 спалаху бала 2N в АО10501 він дав два рентгенівські спалахи М3.2 і М3.9. Пов'язана з цим спалахом ерупція корональної маси була спрямована до Землі й викликала [23] другу дуже велику магнітну бурю 20.XI.–21.XI.2003. У цей час АО10501 була біля центрального меридіана. На рис. 12 показані зміни D_{st} -індексу за даними світового центру даних WDC-C2 (<http://swdcb.kugi.kyoto-uac.jp>). На рис. 13 показано

зміни АЕ, АL-, АU-індекси магнітної активності для бурі 20.XI.–21.XI.2003. На рис. 14 подано величини $H - S_q$, $D_{st} \cdot \cos \phi$ та різницю Δ для другої бурі згідно з даними обсерваторії “Львів”.

Отже, при першому проходженні по видимому диску Сонця три активні області продукували 149 рентгенівських спалахів: 11 — X-класу, 46 — М-класу і 92 — С-класу. При другому проходженні — активною була лише АО10501/10484, яка дала 42 рентгенівські спалахи: 8 — М-класу (у т.ч. три великі) і 34 — С-класу.

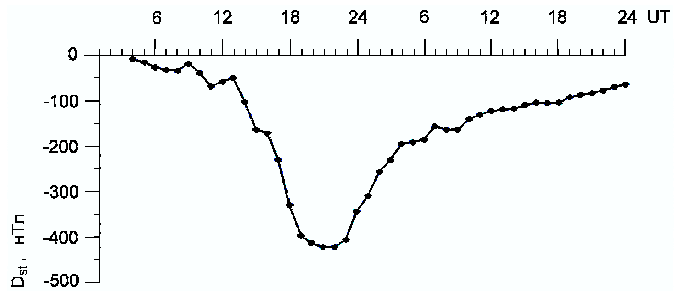


Рис. 12. Середньогодинні значення D_{st} -індексу під час бурі 20.XI.–21.XI.2003 за даними WDC-C2.

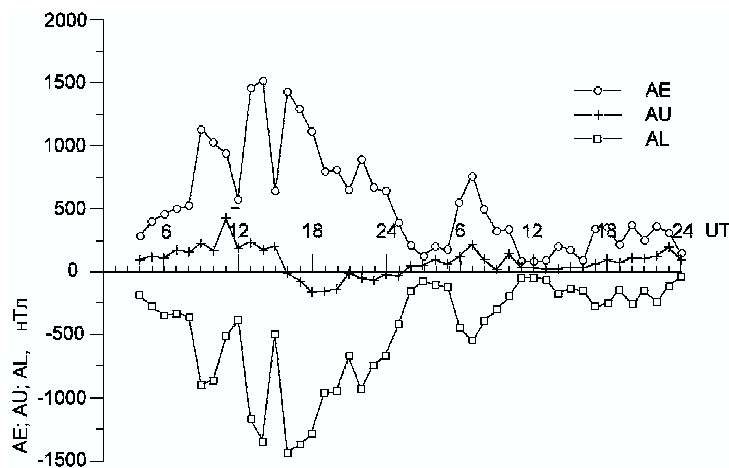


Рис. 13. Зміни АЕ-, АL-, АU-індексів магнітної активності за даними WDC-C2 для бурі 20.XI.–21.XI.2003.

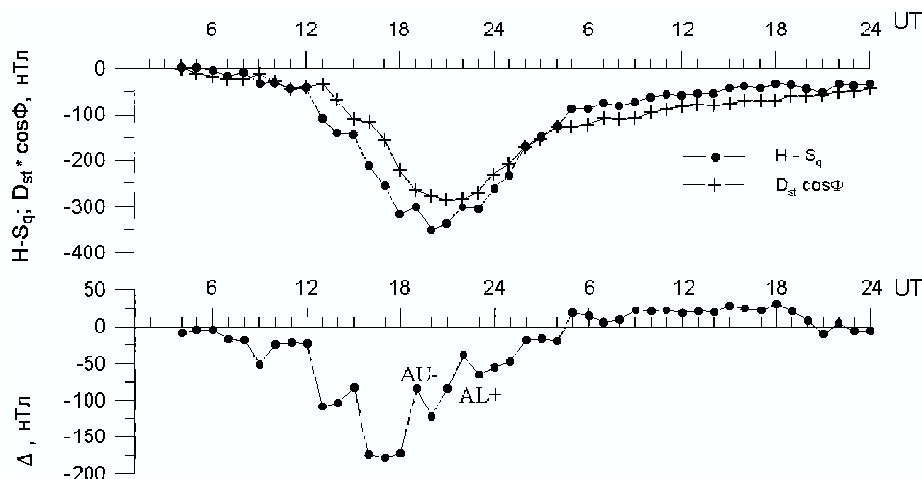


Рис. 14. Варіації $H - S_q$ та $D_{st} \cdot \cos \phi$ на магнітній обсерваторії “Львів” і різниця між ними — Δ для бурі 29.X.–31.X.2003.

III. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Надзвичайно високий рівень активності Сонця визначається винятково потужними подіями в його атмосфері — великими спалахами й пов'язаними з ними ежекціями корональної плазми.

У розділі II подано кількість рентгенівських спалахів, продукованих трьома активними областями при їх двох проходженнях по видимому диску Сонця. Кожний рентгенівський спалах проявляється і в оптичному діапазоні.

У таблиці 1 подано лише 20 великих ($\geq M5.0$ або $\geq 5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² на орбіті Землі) рентгенівських спалахів, продукованих трьома АО(10484, 10486, 10488) протягом двох проходжень по видимому диску Сонця. У стовпчику — координати: φ — геліографічна широта, l — кутова відстань від центрального меридіана. Далі — рентгенівський клас спалаху: X1.1 = $1.1 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²; M-клас на порядок менший. Оптичний бал спалаху: F — слабкий, N — нормальний, B — яскравий, а цифра перед буквою характеризує площу спалаху. Активні області: АО10484 — 1; АО10486 — 2; АО10488 — 3, АО10501 — 4. Шкала космічної погоди центра навколосемного космічного простору (http://www.sec.noaa.gov/NOAA_scales/): R5-R1 — п'ятибальна шкала впливу рентгенівського випромінювання на верхні шари атмосфери Землі; при R5 — надзвичайний вплив на йоносферу — раптове йоносферне збурення й радіоблекаути понад три години. У стовпчику СПП — сонячні протонні події — сонячна радіаційна буря в п'ятибальній шкалі S5-S1; при S5 — потік протонів 10^5 ч/см² · с ср з $E \geq 10$ МеВ. Магнітні бурі теж оцінюються в п'ятибальній шкалі G5-G1; при G5 — дуже велика магнітна буря й дата події.

У передостанньому й останньому стовпчиках подано кінетичну енергію (E_k) ерупції корональної плазми, пов'язану зі спалахом, і рівень активності Сонця (в — високий, д. в. — дуже високий) відповідно.

Період 19.X.–5.XI.2003 — дуже особливий випадок у циклі № 23, під час якого три гігантські активні області здійснювали своє перше проходження по видимому диску Сонця; це період потужних і вражаючих подій як на Сонці, так і в навколосемному космічному просторі. Слід відзначити, що рідкісний випадок одночасного перебування на видимому диску Сонця трьох спалахово-активних областей почався 27.X. і завершився 30.X.; АО10488 активізувалася 27.X., а 30.X. зайшла за лімб АО10484. Із 18.X. до 21.X. на видимому диску була лише АО10484, а з 22.X. до 26.X. — АО10484 і АО10486. Після 30.X. на видимому диску Сонця одночасно були АО10486 і АО 10488. Якщо ці дві активні області локалізувалися майже на одній довготі (активній) і в різних півкулях, то АО10484 випереджувала їх приблизно на 70°, і тому істотного зв'язку між ними не спостерігалось. Відстань (кутова) по широті між АО10486 і АО10488 28.X. становила ~ 15°, а 29.X. ~ 10°. Під час руху до W-лімба корональні петлі постійно пов'язували ці дві великі області.

Виходячи з фактів існування активних довгот і постійного потужного виходу нового магнітного потоку в АО10486, можна сприйняти АО10488 як відгалуження частини магнітного потоку при його витіканні, а саме, відгалуження дещо більшого типу порівняно з областю-сателітом. Будучи пов'язані як внутрішньо, так і зовнішньо, такі області можуть утворювати “скупчення активності” [15]; у таких взаємопов'язаних системах можливе “перекачування енергії”.

| Дата | Поч. UT | Трив. хв. | Коорд. φ° l° | Клас/бал X H_α | АО | Шкала косм. погоди | | | E_k ерг | Рів. акт. |
|-----------|---------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------|----|--------------------|----------|-----------|---------------------|-----------|
| | | | | | | R | S; СПП | G | | |
| 19.10.03. | 16 ^h 29 ^m | 79 | NO6E58 | X1.1/1N | 1 | R3 | | | | в |
| 22. | 19 45 | >41 | S20E90 | M9.9/1N | 2 | R2 | | | | в |
| 23. | 08 17 | 64 | S21E88 | X5.4/1B | 2 | R3 | | | | в |
| 23. | 19 50 | 38 | S17E84 | X1.1/1N | 2 | R3 | | | | в |
| 24. | 02 22 | 66 | S19E72 | M7.6/1N | 2 | R2 | | | | в |
| 26. | 05 17 | 213 | S17E38 | X1.2/3B | 2 | R3 | S2 323; | G1 28.X. | $9.7 \cdot 10^{30}$ | в |
| 26. | 17 17 | 179 | N02W38 | X1.2/1N | 1 | R3 | S2 466 | G1 28.X. | $8.1 \cdot 10^{30}$ | в |
| 26. | 21 26 | 60 | N01W38 | M7.6/2N | 1 | R2 | | | | в |
| 27. | 09 21 | 23 | S16E26 | M5.0/1F | 2 | R2 | | | | в |
| 27. | 12 27 | 37 | S17E25 | M6.7/1F | 2 | R2 | | | | в |
| 28. | 09 51 | >269 | S16E08 | X17.2/4B | 2 | R4 | S4 29500 | G5 29.X. | $1.2 \cdot 10^{33}$ | д.в. |
| 29. | 20 37 | 136 | S15W02 | X10/2B | 2 | R4 | S3 1800 | G5 30.X. | $3.4 \cdot 10^{32}$ | д.в. |
| 02.11.03. | 17 03 | 171 | S14W56 | X8.3/2B | 2 | R3 | S3 1540 | G2 4.XI. | $1.2 \cdot 10^{32}$ | в |
| 03. | 01 06 | 91 | N10W83 | X2.7/2B | 3 | R3 | | | $1.1 \cdot 10^{31}$ | д.в. |
| 03. | 09 43 | >36 | N08W77 | X3.9/2F | 3 | R3 | | | $1.1 \cdot 10^{31}$ | д.в. |
| 04. | 19 29 | 80 | S19W83 | X28/3B | 2 | R5 | S2 353 | | $6.1 \cdot 10^{32}$ | д.в. |
| 05. | 10 46 | >12 | S16W90 | M5.3/SF | 2 | R2 | | | | д.в. |
| 18. | 07 16 | 159 | N00E18 | M3.2-3.9/2N | 4 | R1 | | G5 20.XI. | $1.3 \cdot 10^{32}$ | в |
| 20. | 07 35 | 61 | N01W08 | M9.6/2B | 4 | R2 | S1 10 | G1 22.XI. | $1.3 \cdot 10^{30}$ | в |
| 20. | 23 42 | 16 | N00W17 | M5.8/2N | 4 | R2 | | | | в |

Таблиця 1. Характеристичні дані величин спалахів.

Область 10488 розвивалася досить бурхливо, але фактично до 3.XI. давала лише середні і слабкі спалахи, тоді як АО10486, навпаки, 28.X. і 29.X. продукувала два надзвичайно потужні спалахи. У цій області й після цих спалахів продовжував впливати новий магнітний потік, збільшувалася його площа до максимальних значень (30.X.–31.X. — розміри групи плям = 15 земним діаметрам). Автори не виключають, що одним із способів нагромадження енергії в АО10486 могло бути “перекачування” енергії до області з більшими спалаховими потенціалом та індексом.

У розділі II представлено спалаховий потенціал і спалаховий індекс для всіх АО, що проходили по видимому диску Сонця. Зіставляючи спалахові індекси АО10486 з індексами АО10484 і АО10488, доходимо висновку, що вивільнена спалахова енергія АО10486 на порядок більша від такої ж енергії АО10488, а також у 13.8 разу переважає енергетику АО10484.

Як видно з таблиці 1., започаткувала високу активність перша із трьох активних областей АО 10484, а з виходом на видимий диск Сонця другої АО10486 і до 26.X. обидві активні області підтримували високу активність. Із виникненням третьої АО10488 і її активізацією 27.X. і до 30.X. — на видимому диску Сонця дуже велику спалахову активність генерували одночасно три гігантські активні області (рис. 1). Після 30.X. висока спалахова активність продукувалася двома АО (10486 і 10488).

Короткохвильове спалахове випромінювання мало помірний (22, 24, 27.X; 5, 20 XI; категорії R2) і сильний (19, 23, 26.X; 2, 3.XI; категорії R3) вплив на йоносферу Землі.

Із таблиці 1 впливає, що при першому проходженні по видимому диску Сонця трьох активних областей найбільший внесок у високий і, особливо, дуже високий рівень активності дала АО10486 (12 спалахів з усіх 17). Ця гігантська активна область із найбільшим спалаховим потенціалом і спалаховим індексом у циклі № 23 продукувала потужні події, зокрема 28.X. (4В/Х17.2), 29.X. (2В/Х10), 2.XI. (2В/Х8.3) і особливо 4.XI. (3В/Х28), що є рекордною від початку позаатмосферних спостережень. Дві потужні події в АО10486 28.X. і 29.X. і пов'язані з ними дві надзвичайні ерупції корональної плазми, що були спрямовані до Землі, створили протягом трьох днів 28.X.–30.X. дуже високий рівень активності Сонця.

Слід відзначити, що після виникнення АО10488, її активізації 27.X. й утворення скупчення активності з АО10486 остання, починаючи з 28.X., почала продукувати потужніші спалахи, великі протонні події, викиди величезної маси, що прискорювались до великих швидкостей (> 2000 км/с).

Спалаховий процес — це вивільнення активною областю запасеної енергії у вигляді теплової енергії, енергії випромінювання й механічного руху плазми. Спалах Х17.2/4В 28.X. — один із найбільших за всю історію спостереження Сонця й щодо потужності випромінювання в рентгені займає 4-е місце від початку позаатмосферних спостережень (рис. 4). Його повна енергія випромінювання $\approx 4.6 \cdot 10^{32}$ ерг [19, 20].

Під час спалаху різко зростає жорстка компонента електромагнітного й корпускулярного випромінювання. Короткохвильове (γ , X, УФ) електромагнітне випромінювання, а також екстремально енергетичні протони ($E > 100$ MeV) були настільки інтенсивними, що в 11:30 UT на денному боці Землі утворенні йоносферні струми змусили (по всій Європі) магнітне поле Землі трохи зменшити свою напруженість. Йоносфера денного боку відреагувала [12] раптовим йоносферним збуренням і, відповідно, раптовим зростанням повного електронного вмісту до $25 \cdot 10^{12}$ ел/см² 28.X., яке тривало понад 3 год., тоді як 29.X. — лише $6 \cdot 10^{12}$ ел/см². Потужне рентгенівське випромінювання (рис. 6), яке на орбіті Землі становило $1.72 \cdot 10^{-3}$ Вт/м², збурювало не тільки верхні шари земної атмосфери, але й заявило про себе в атмосфері Юпітера. Пік інтенсивності EUV (26.0–34.0 нм) спалаху Х17.2 28.X. [12] переважав такий же пік рекордного спалаху Х28 4.XI. більше ніж удвічі, що підтверджує наявність спектральної змінності від спалаху до спалаху, і, отже, спричинився до виникнення екстремального йоносферного ефекту. Надзвичайним було розсіювання енергії в йоносфері рекордною потужністю підігріву в декілька сотень мВт/м² [18].

Виятково потужний протонний спалах Х17.2/4В 28.X.2003 викликав дуже велику сонячну радіаційну бурю (більшу за S4 категорію). На рис. 7 зображено генеровані цими спалахами потоки протонів із енергіями ≥ 10 MeV, ≥ 50 MeV, ≥ 100 MeV, різке зростання яких почалося о 11:50 UT. У навколосонячному просторі в максимумі потоку 29.X. (00:00–11:00) UT за 1 сек через 1 см² проходило 29500 протонів з $E \geq 10$ MeV. Протонів з енергіями ≥ 50 MeV і ≥ 100 MeV було значно менше. Вони викликали в земному докільлі протонну подію дуже великої інтенсивності. Короткохвильове спалахове випромінювання мало дуже великий вплив (категорії R4) на верхні шари земної йоносфери і спричинило на денному боці раптово йоносферну бурю, радіоблекаути. Пов'язана зі спалахом ежекція корональної плазми викликала дуже велику геомагнітну бурю (екстрабурю категорії G5) 29.X.–30.X.2003.

Потужний протонний спалах Х10/2В 29.X.2003 спричинив велику сонячну радіаційну бурю (>S3 категорії). Енергетичні протони (рис. 7) зумовили в земному докільлі протонну подію великої інтенсивності, а короткохвильове спалахове випромінювання мало дуже сильний вплив на верхні шари атмосфери Землі (категорії R4). Спрямована до Землі ерупція корональної маси генерувала дуже велику магнітну бурю (категорії G5) 30.X.–31.X.03. Високоенергетичні протони, генеровані спалахами 28.X. і 29.X., майже вільно проникали у внутрішній радіаційний пояс без будь-якого ефекту геомагнітного екранування.

Спалахи 28.X. і 29.X. продукували потужні викиди корональної маси з енергіями $1.2 \cdot 10^{33}$ ерг і $3.4 \cdot 10^{32}$ ерг відповідно. Час старту викиду (магнітоплазмового згустку — “плазмоїда”) збігається з початком імпульсного енерговиділення (флеш-фаза) [14]. Спрямований до Землі “плазмоїд” 28.X. масою 40 млрд. тонн

прискорився в короні до лінійної швидкості 2459 км/с з виникненням на його передньому краї ударної хвилі. Спалахова подія 29.X. спрямувала до Землі “плазмоїд” масою 16 млрд. тонн з лінійною швидкістю 2029 км/с. У своєму русі в МПП магнітоплазмові згустки розширилися, перетворюючись у великомасштабні магнітоплазмові структури — магнітні хмари. Корональні викиди належать до найпотужніших збурень як у сонячній атмосфері, так і в сонячному вітрі.

Виятково високий рівень активності Сонця 28.X.–30.X.2003 спричинився до виникнення екстремально високого рівня радіаційної обстановки в навколоземному доквіллі, глобальних змін в МПП. Жорстке (γ , X, УФ) електромагнітне випромінювання спалаху й пов’язані з ним високоенергетичні заряджені частинки (у т. ч. і нейтрони), потужні магнітні хмари викликали неполадки в технологічних системах як космічних, так і наземних телекомунікаціях, навігації, перевантаження й закриття датчиків X-, EUV-, ВЕЧ-приладів, блекаути. Сильним був вплив і на енергетичні електричні системи, особливо в Пн. Європі і Пн. Америці. Так, у Мальме (Пд. Швеція) через перегрів припинив роботу потужний трансформатор. Близько 70 % космічних апаратів зазнали шкідливого впливу надзвичайно збуреної космічної погоди.

Власне, будучи в ці дні біля центрального меридіана, події 28.X. (X17.2/4B) і 29.X. (X10/2B) мали екстремальний вплив на кліматичну систему Землі (магнітосферу й атмосферу) і спричинилися до виникнення дуже великої магнітної бурі (категорії G5). Міжпланетна ударна хвиля екстремально збуреного сонячного вітру прийшла до Землі за 19 год. о 06:12 UT 29.X. і “вдарилася” фронтальну магнітопаузу, змістивши (притиснувши) її до Землі на віддалі $\sim 6.6R_{\oplus}$. У цей день був ще один “удар”, пов’язаний із поворотом B_z -компоненти ММП до півдня від події 28.X.2003. Третій — останній “удар” був пов’язаний із подією 29.X.2003 (X10/2B). При кожному “ударі” зміщувалася [7] фронтальна магнітопауза і, відповідно, відзначалися три послідовні інжекції в зону магнітосферних кільцевих струмів, що спричинило три послідовні магнітні бурі. Оскільки всі вони перекривають одна одну, їх можна звести до однієї тривалої й дуже великої магнітної бурі 29.X.—31.X.2003 (рис. 8, 9).

Геомагнітна активність спричинена перенесенням енергії й моменту від сонячного вітру до магнітосфери [18].

Представлена на рис. 8 дуже велика магнітна буря (екстрабура) почалась о 6^h12^m UT. Після раптового початку бачимо різке зменшення горизонтальної компоненти геомагнітного поля, викликане прямою дією західного аврорального електроструменя, оскільки магнітосферний кільцевий струм ще не утворився. Характерною особливістю цієї бурі є відсутність DCF-варіацій, пов’язаних зі струмами на магнітопаузі. Оскільки ці варіації в Н-компоненті завжди позитивні й під час великих магнітних бур їхня величина може досягати 50–100 нТл [24], то в різницях $\Delta = (H - S_q) - D_{st} \cdot \cos \phi$ при їх наявності повинні переважати позитивні значення, чого тут не бачимо.

Геомагнітна екстрабура 29.X.–31.X.2003 розвивалась у три етапи. Після раптового початку о 6^h12^m UT був різкий спад Н-компоненти на 360 нТл, який тривав близько двох годин. Кільцевий магнітосферний струм у цей час був слабким і тільки о 10 UT $D_{st} = -180$ нТл. Отже, на першому етапі бурі варіації поля, очевидно, пов’язані з підсиленням йоносферних струмів. У денні години (~ 9 – 15 UT) спостерігалися надзвичайно потужні короткоперіодичні варіації з амплітудою ~ 120 нТл. О 18^h00^m UT 29.X. почався другий етап бурі; активно формувався кільцевий магнітосферний струм та підсилювалась авроральна активність. На цьому етапі максимальне значення $D_{st} = -363$ нТл було о 01 UT 30.X. Надалі кільцевий магнітосферний струм слабне. О 18 UT 30.X. починається третій етап бурі: кільцевий струм посилюється і D_{st} досягає значення -401 нТл о 23 UT. Після цього почався спад магнітної активності і буря закінчилась о 23 UT 31.X. Слід відзначити, що пульсації тиску в сонячному вітрі після взаємодії негативною B_z -компоненти ММП, які викликали надзвичайно потужні короткоперіодичні варіації в денний період 9–15 UT 29.X.2003, спричинилися до сильних суббу-реподібних подій.

Отже, події на Сонці 28.X. і 29.X.2003 щодо їхньої енергетики і впливу на навколоземний космічний простір були надзвичайними.

Другий триденний 3.XI.–5.XI.2003 дуже високий рівень активності Сонця (таблиця 1) був продукований спалахами 2.XI. (X8.3/2B), 3.XI. (X2.7/2B і X3.9/2F), 4.XI. (X28/3B) і мав дуже сильний вплив на йоносферу Землі. Лише спалах 2.XI. ($S14^{\circ}W56^{\circ}$), що дав сильну протонну подію (1540 пр/см²·с·ср), викликав помірну магнітну бурю, тоді як усі інші події не мали істотного впливу на магнітне поле Землі через локалізацію біля W-лімба; викиди корональної плазми не були спрямовані до Землі.

Потужне короткохвильове випромінювання спалаху X28/3B 4.XI.2003 ($2.8 \cdot 10^{-3}$ Вт/м² на орбіті Землі) спричинило виникнення на денному боці раптової йоносферної бурі (категорії R5), екстремальне аномальне поглинання радіохвиль у йоносфері, що тривали > 3 год. Спалах викликав помірну сонячну радіаційну бурю (категорії S2), а високоенергетичні протони зумовили виникнення в земному доквіллі протонної події середньої інтенсивності (353 ч/см²·с·ср). Пов’язана зі спалахом ежекція корональної маси з лінійною швидкістю 2657 км/с й енергією $6.1 \cdot 10^{32}$ ерг не була спрямована до Землі.

При другому проходженні по диску Сонця активувалася лише AO10501, яка створила високий рівень активності під час проходження через центральний меридіан. Пов’язана зі спалахом 18.XI.2003 середньої потужності M3.9 і спрямована до Землі ерупція корональної маси з $E_k = 1.3 \cdot 10^{32}$ ерг викликала дуже велику магнітну бурю (категорії G5) 20.XI.–21.XI.2003 (рис. 12). Вона була генерована нетривалою магнітною хмарою (~ 12 год) з індукцією ММП, більшою за 50 нТл, і вертикальною його компонентою $B_z = -50$ нТл. Швидкість сонячного вітру досягла

1000 км/с. Активний період бурі тривав 9 год.; не було чітко вираженої початкової фази. Кільцевий магнітосферний струм почав розвиватись о 14 год UT і досягнув максимальної величини о 21 UT. Максимальні значення АЕ-індексу спостерігались о 14 UT і на 7 год. випереджали максимум D_{st} . Зміни АU-індексу для цієї бурі незвичайні. Максимальне значення — 424 нТл цей індекс мав о 11 UT; надалі він спадав і з 16 UT 20.XI. до 01 UT 21.XI. був від'ємний. Це означає, що всі авроральні обсерваторії перебували під дією західного аврорального електродржета, який замкнувся, охопивши геомагнітний полюс. Головна фаза бурі (рис. 14) проходила в денній вечірній години місцевого часу; знак варіації Δ на цьому проміжку часу від'ємний. Це означає, що обсерваторії були під дією зворотних струмів східного аврорального електроструменя (рис. 14, AU-). Хоч о 15 UT $D_{st} < -15$ нТл, електрострумені не змістилися в субавроральні широти. У такому випадку різниця Δ була б додатною. Найбільш імовірно, що відбулося розширення електроструменів у полярні широти. Такий хід подій спостерігали під час магнітної екстрабурі 7–8.XI.2004 [25]. О 19 UT 20.XI. AL-індекс різко зменшився, хоч $D_{st} = -396$ нТл. Причиною цього є переміщення авроральних електроструменів у субавроральні широти. Ланцюжок авроральних обсерваторій уже не могли спостерігати максимуму струму тому, що електрострумені були в нижчих широтах. Магнітна обсерваторія “Львів” у цей час реєструвала від'ємні значення Δ ; вони були результатом прямої дії західного аврорального електроструменя (рис. 14, AL+).

Отже, максимальні добові суми індексу $\sum(H - S_q) = 3075$ нТл для першої бурі та $\sum(H - S_q) = 3210$ нТл для другої. Перша буря мала раптовий початок, друга була з поступовим початком. Наведені значення індексу значно більші, ніж під час супербурі 13.III.1989, для якої $D_{st} = -589$ нТл, а $\sum(H - S_q) = 1568$ нТл. Максимальні середньогодинні значення $H - S_q = 254$ нТл спостерігали 29.X. о 24 UT, а для бурі 20.XI. — о 20 UT ($H - S_q) = 352$ нТл.

Слід відзначити, що спільною закономірністю для всіх трьох АО є постійне витікання магнітного поля, яке періодично підсилювалося, що привело до утворення дуже великих областей з вельми складною конфігурацією поля у фотосфері, нагромадження в них магнітної енергії та подальшого її вивільнення у вигляді спалахів та ерупцій.

IV. ВИСНОВКИ

Період 19.X.–5.XI.2003 — унікальний сплеск активності Сонця в циклі № 23, у процесі якого було все: гігантські плями з їхнім рідкісним випадком одночасного проходження по видимому диску, потужні спалахи й пов'язані з ними не менш потужні викиди корональної плазми, потужні протонні події, дуже великі магнітні бурі та інтенсивні полярні сйява, що їх супроводжували (у т. ч. і на середніх широтах), раптові йоносферні збурення.

Утворившись, “скупчення активності” (у складі АО10486 і АО10488) генерувало сім великих спалахів і пов'язаних з ними сім викидів великої маси ($> 10^{16}$ г) з великими швидкостями (> 2000 км/с). Будучи найбільшою в циклі № 23, АО10486 стала джерелом неімовірної активності протягом проходження по диску Сонця з неперевершеним спалаховим потенціалом і спалаховим індексом.

Упродовж 19.X.–5.XI. активні області двічі створювали триденні дуже високі рівні активності Сонця: 28.X.–30.X. і 3.XI.–5.XI. У першому випадку АО були біля центрального меридіана, тоді як у другому — біля W-лімба. В обох випадках вплив короткохвильового спалахового енерговиділення на верхні шари атмосфери Землі був дуже сильним. Однак, незважаючи на те, що енергетика спалахів другого випадку в 1.6 разу переважала енергетику спалахів першого випадку, ефект йонізації був більшим для першого випадку. І якщо винятково висока активність Сонця 28.X.–30.X. спричинилася до виникнення дуже великої магнітної бурі 29.X.–31.X.2003, то дуже висока активність 3.XI.–5.XI.2003 не вплинула істотно на магнітне поле Землі, незважаючи на те, що 4.XI.2003 відбувся спалах рекордної потужності. Проте пов'язана зі спалахом середньої потужності M3.9 (у 2-у обороті біля центрального меридіана) 18.XI.2003 і спрямована до Землі потужна ерупція корональної маси з $E_k = 1.3 \cdot 10^{32}$ ерг викликала дуже велику геомагнітну бурю.

Бурі в магнітосфері і йоносфері, викликані подіями на Сонці 28.X.–31.X.2003, класифікуються як екстремальні явища в циклі №23.

Перша дуже велика геомагнітна буря 29.X.–31.X.03 р. з індексом $D_{st} = -401$ нТл мала раптовий початок і тривала близько 60 год. Максимальні добові суми індексу $\sum(H - S_q) = 3075$ нТл. Максимальне середньогодинне значення $H - S_q = 254$ нТл припадає на 24 UT 29.X.2003.

Друга дуже велика геомагнітна буря 20.XI.–21.XI.2003 з індексом $D_{st} = -472$ нТл була з поступовим початком і тривала близько 30 год. Максимальні добові суми індексу $\sum(H - S_q) = 3210$ нТл, а максимальне середньогодинне значення $H - S_q = 325$ нТл припадає на 20 UT 20.XI.2003.

Наведені максимальні добові суми (3075 нТл і 3210 нТл) більші, ніж під час супербурі 13.03.1989, для якої $D_{st} = -589$ нТл, а $\sum(H - S_q) = 1568$ нТл.

Ерупції корональної плазми 28.X., 29.X. і 18.XI.2003, щодо їхньої енергетики і впливу на магнітосферу Землі були надзвичайними. Обидві геомагнітні бурі супроводжувались інтенсивними полярними сйявами, у тому числі й на середніх широтах.

Головною причиною надзвичайної сонячної активності в жовтні-листопаді 2003 року був постійний вихід потужного вихрового магнітного потоку в АО10486 (і її околицях), що викликало до збільшення площі групи плям до величезних розмірів, виникнення областей-сателітів (в т. ч. і АО10488) і вельми складної топології магнітного поля; АО10486, пов'язана з активними областями, що її оточують, утво-

рила “скупчення активності”, у якому можливе “перекачування” енергії до області з найбільшим спалаховим потенціалом і спалаховим індексом. Потужне витікання магнітного потоку, великі розміри групи

плям і складна еволюційна топологія магнітного поля забезпечили велике й порівняно швидке нагромадження магнітної енергії, яка за певних необхідних і достатніх умов вивільнялася, що і спостерігалось.

-
- [1] I. С. Лаба, Кинем. физ. небес. тел **23**, 51 (2007).
 [2] L. P. Barbieri, R. E. Mahmot, Space Weather **2**, S09002 (2004).
 [3] V. G. Lozitskiy, N. I. Lozitskaya, Известия Крым. астрофиз. обсерв. **104**, №2, 29 (2008).
 [4] V. G. Lozitsky, Astron. Lett. **35**, Issue 2, 136 (2009).
 [5] V. Yurchyshyn, H. Wang, V. Abramenko, Adv. Space res. **32**, 1965 (2003).
 [6] V. Yurchyshyn, H. Wang, V. Abramenko, Space Weather **2**, S02001 (2004).
 [7] М. И. Панасюк *и др.*, Космические исследования, **42**, №5, 509 (2004).
 [8] G. C. Wu, R. L. Lepping, Atm. Sol-Terr. Phys. **67**, 283 (2005).
 [9] V. Yurchyshyn *et al.*, Astropys. J., **619**, 564 (2005).
 [10] V. Yurchyshyn, Q. Hu, V. Abramenko, Space Weather, **3**, No 8 S08c02 (2005).
 [11] L. Rosenqvist *et al.*, Geophys. Res. **110**, A09S23 (2005).
 [12] B. T. Tsuratani *et al.*, Geophys. Res. Lett. **32**, L03S09 (2005).
 [13] A. Krankovsky *et al.*, Geophys. Res. Abstract, **7**, 03011 (2005).
 [14] S. Kuznetsov *et al.*, Inst. S. Norden Phys. A. **20**, 6705 (2005).
 [15] J. Feynman, A. Ruzmaikin, Symposium IAU, No 233, (2006).
 [16] C. Li *et al.*, Astron Astrophys **472**, 283 (2007).
 [17] I. С. Лаба, Журн. фіз. досл., **12**, 1901 (2008).
 [18] Н. О. Vats, J. Astrophys. Astr., **27**, 227 (2006).
 [19] G. Kopp *et al.*, Bull. Am. Astron. Soc. **36**, 669 (2004).
 [20] T. Woods *et al.*, Geophys. Res. Lett., **31**, 10802 (2004).
 [21] Y. I. Feldstein *et al.*, Ann. Geophys., **17**, 497 (1999).
 [22] T. Sumaruk, P. Sumaruk, Pub. Inst. Geophys. Polish. Acad. Sci., **C-99**, 398, 374 (2007).
 [23] Ю. И. Ермолаев *и др.*, Геомагнетизм и аэрономия, **45**, №1, 23 (2005).
 [24] Т. П. Сумарук, Ю. П. Сумарук, Геофизический журнал, **27**, №2, 299 (2005).
 [25] О. В. Козырева *и др.*, Геомагнетизм и аэрономия, **46**, №5, 614 (2006).

THE EXTREME SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY OCTOBER–NOVEMBER 2003

I. S. Laba¹, I. Ya. Pidstryhach¹, Yu. P. Sumaruk², T. P. Sumaruk², P. V. Sumaruk², O. A. Baran¹

¹*Astronomical Observatory of the Ivan Franko National University of Lviv,*

8, Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA-79005, Ukraine, e-mail: laba@astro.franko.lviv.ua

²*Geophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, “Lviv” Magnetic observatory
32, Zalissya St., Ivano-Frankove, Lviv region, 81070, Ukraine*

The influence of intensive flare energetic release on the terrestrial magnetosphere is studied according to the data from Astronomic Observatory of the Ivan Franko National University of Lviv, “Lviv” Magnetic Observatory of the Geophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine as well as GOES-10, -11, -12 and SOHO spaceships. During their two “passages” over visible part of the solar disk, three ARs produced 191 X-ray flares including powerful proton events, in particular the 4B/X17.2 on Oct.28, 2B/X10 on Oct.29 flares, and especially the 3B/X28 flare on Nov.4.2003: the largest event since the beginning of extra-atmospheric observations.

AR 10486, when localized near the central meridian, produced two very powerful flares on 28 and 29 Oct. and coronal mass ejections (CMEs) which were directed of the Earth. These two events had extreme influence upon the terrestrial magnetosphere and atmosphere and caused a very large magnetic storm from 29 to 31 Oct.2003.

The second very large magnetic storm between the 18th and 21st Nov.2003 was caused by a high level of flare activity from AR10501 (the second rotation of AR10484) during its crossing of the central meridian.

The CMEs of Oct.28 and 29th, Nov.18,2003 were extraordinary concerning their energetics and influence upon the terrestrial magnetosphere.