

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.003>

УДК 551.510; 533.93

**Л. В. Козак^{1,2}, Б. А. Петренко^{1,2},
О. Є. Григоренко³, О. О. Кронберг^{4,5}**

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська 64/13, Київ, Україна, 01601

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України
Просп. Академіка Глушкова, 40, к. 4/1, м. Київ-187, 03187

³Федеральна державна бюджетна установа науки Інститут космічних досліджень
Російської академії наук, вул. Профспілкува 84/32, м. Москва, 117997, Росія

⁴Інститут Макса Планка із досліджень Сонячної системи,
Юстус фон-Лібіг-Вег 3, Геттінген, Німеччина, 37077

⁵Університет Людвіга-Максиміліана,
Гешвістер-Шолль-Платц 180539, Мюнхен, Німеччина
E-mails: gutovska@ukr.net, bogdanart96@gmail.com,
elenagrigorenko2003@yandex.ru, kronberg@mps.mpg.de

Порівняння наземних та супутникових геомагнітних пульсацій під час суббур

Проведено порівняння між пульсаціями магнітного поля на висотах магнітосфери із початком реєстрації та локалізацією збурення на поверхні планети. Для аналізу було використано виміри флуктуацій магнітного поля з ферозондових магнітометрів космічних апаратів місії «Кластер-2» та виміри із наземних магнітометрів в області аврорального овалу. В ході досліджень розглянуто суббурі, які відбулися 13 серпня 2019 року. Зокрема, проаналізовано дві суббурі та коливання струмового шару (flapping motions of magnetotail current sheet). Наземні обсерваторії, виміри яких було відібрано для розгляду, визначалися через програму візуалізації локалізації космічних апаратів з асоційованими силовими лініями геомагнітного хвоста (програма 3DView). Для визначення геомагнітних пульсацій використано неперервне вейвлет-перетворення, а для оцінки типу пульсацій і спостережуваних зсувів між зареєстрованими у хвості магнітосфери Землі та в області аврорального овалу пульсаціями було розглянуто інтегроване представлення у двох частотних діапазонах: 45...150 с (Pc4/Pi2) та 150...600 с (Pc5/Pi3). Зафіксовано скорельовані Pi2- і

Рс5-пульсації в авроральній області та у хвості магнітосфери. Величина зафіксованих збурень залежить від взаємної локації наземних магнітометрів та проєкції силової лінії, на якій перебувають космічні апарати. Із затримки в часі між максимумами геомагнітних пульсацій на поверхні Землі по відношенню до збурень на магнітосферних висотах оцінено швидкість поширення збурення вздовж силової лінії магнітного поля.

Ключові слова: геомагнітні пульсації, хвіст магнітосфери Землі, суббурі, коливання струмового шару, пульсації в області аврорального овалу.

ВСТУП

Одним із проявів складного ланцюга процесів, що відбуваються в результаті взаємодії міжпланетного магнітного поля із магнітосферою Землі, є різкі зміни магнітного поля. Магнітна буря зазвичай спостерігається одночасно по всій земній кулі, але її прояви в різних місцях земної поверхні можуть бути неоднаковими. На низьких та середніх широтах перед головною фазою магнітної бурі (раптове зменшення горизонтальної складової геомагнітного поля) інколи спостерігається короткочасне зростання горизонтальної складової (раптовий початок). В області ж аврорального овалу зменшення горизонтальної складової майже не спостерігається. На високоширотних магнітограмах прослідковуються високоамплітудні та швидкі коливання, що накладаються на повільні зміни магнітного поля — бухти. При цьому коливання у межах бухти можуть бути як додатними, так і від’ємними. Збурення магнітного поля Землі відбуваються за рахунок замкнутої системи електричних полів (струми в іоносфері та магнітосфері — струмовий клин).

У послідовності процесів, що супроводжують суббурю, можна виділити:

- неоднорідність сонячного вітру призводить до генерації суббурі;
- у початковій фазі суббурі відбувається витягування хвоста і накопичення енергії магнітного поля;
- магнітний потік переноситься із денного боку у долі хвоста, призводячи до зростання тиску, потоншення нейтрального шару і зменшення в ньому струму;
- наступним етапом є розрив струмового шару хвоста (модель CD — current disruption), або перез’єднання магнітного поля при «взаємодії» протилежно напрямлених силових ліній магнітного поля двох долей хвоста (модель NENL — near-Earth neutral line);
- струми у хвості магнітосфери поєднуються зі струмами, напрямленими вздовж магнітного поля;
- утворюється плазмод, що рухається в антисонячному напрямку;
- довжина хвоста відновлюється у фазі відновлення суббурі.

Таблиця 1. Тип геомагнітних пульсацій

Клас	Період, с	Механізм генерації
Pc1	0.2...5	Іонно-циклотронна нестійкість у магнітосфері
Pc2	5...10	
Pc3	10...45	Протонно-циклотронна нестійкість в сонячному вітрі, нестійкість Кельвіна — Гельмгольца
Pc4	45...150	Нестійкість Кельвіна — Гельмгольца, дрейфово-дзеркальна нестійкість і баунс-резонанс
Pc5	150...600	
Pc6	> 600	
Pi1	1...40	Потокова нестійкість
Pi2	40...150	Різкі зміни конвекції у хвості магнітосфери та зміни потоку
Pi3	> 150	

Основною відмінністю згаданих моделей CD [3, 7] та NENL [10] є маломасштабні розриви у ближньому і замкнутому хвості для першого випадку і великомасштабні процеси в середньому хвості для другого.

В атмосфері Землі під час суббур спостерігається генерація ультранизкочастотних (УНЧ) хвиль (діапазон 1 мГц до 5 Гц). Дані геомагнітні пульсації є гідромагнітними коливаннями магнітосферної плазми з характерним масштабом порядку розміру магнітосфери. Верхня частота пульсацій визначається гірчастотою протонів у магнітосфері. Для поверхні Землі вона дорівнює 3...5 Гц. Геомагнітні пульсації поділяють на два великі класи: неперервні (квазісинусоїдальні) пульсації Pc (pulsations continuous) тривалістю декілька годин і нерегулярні пульсації Pi (pulsations irregular) тривалістю декілька хвилин. Зазвичай Pi-пульсації фіксуються в нічний час, а Pc — вдень [1, 2]. Пульсації розділяються і за періодами (табл. 1).

У середині частотних діапазонів різні типи пульсацій розділяють саме за їхніми морфологічними ознаками [8]. Важливо, що за генерацію кожного типу пульсацій відповідальний той чи інший фізичний механізм [5, 11].

У роботі порівнюється тип пульсацій у хвості магнітосфери Землі за даними вимірювань космічних апаратів (КА) місії «Кластер-2» та тип пульсацій найбільш збуреної складової магнітного поля за даними вимірювань наземних магнітометрів (www.intermagnet.org, supermag.jhuapl.edu/info/).

ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Оскільки причиною збурень магнітного поля, які фіксуються на поверхні Землі, є процеси у хвості магнітосфери, було проведено порівняння пульсацій магнітного поля на висотах магнітосфери із початком реєстрації та локалізацією збурення на поверхні планети. Для

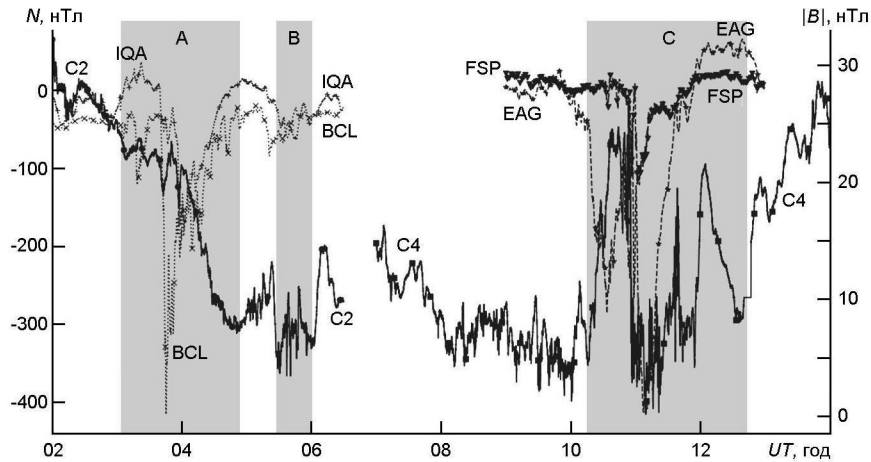


Рис. 1. Значення магнітного поля за наземними спостереженнями на станціях FSP, EAG, BCL і IQA (N , шкала зліва) та супутниковими спостереженнями КА C2 і C4 ($|B|$, шкала справа) для суббур 13 серпня 2019 року. Інтервали, позначені сірим кольором, відповідають суббурям (А та С) та коливанню струмового шару (інтервал В)

аналізу було використано виміри флуктуацій магнітного поля з ферозондових магнітометрів КА місії «Кластер-2» (архів даних <https://csa.esac.esa.int/csa-web/>) з частотою опитування 5 Гц та виміри із наземних станцій в області аврорального овалу з дискретністю 1 с.

Пошук скорельованих/синхронізованих збурень в різних областях накладає певні обмеження на локалізацію наземних станцій та КА: локація наземних станцій повинна збігатися з точками основ силових ліній магнітного поля Землі, на яких фіксуються збурення на КА. Для пошуку суббурі було використано ряди узагальненого аврорального індексу (SML). Характеристики і особливості SML детально описано в роботі [9].

В ході досліджень розглянуто суббурі, які мали місце протягом 13 серпня 2019 року. Флуктуації магнітного поля із двох космічних апаратів та чотирьох наземних станцій зібрано на рис. 1. Для наземних спостережень приведено зміни з часом північної складової магнітного поля (N -складової), а для супутникових спостережень абсолютне значення $|B|$ магнітного поля.

Наземні обсерваторії, виміри яких було відібрано для розгляду, визначалися через програму візуалізації локалізації КА з асоційованими силовими лініями геомагнітного хвоста (програма 3DView [4]).

Локацію КА C2, а також зміну напрямку B_x при проходженні космічного апарата через нейтральний шар для інтервалу В подано на рис. 2. Треки для північної півкулі проєкцій силових ліній магнітного поля, за якими провадився відбір наземних станцій, подано на рис. 3. Географічні координати даних обсерваторій вказано у табл. 2, а їхню локацію нанесено на карту (рис. 4).

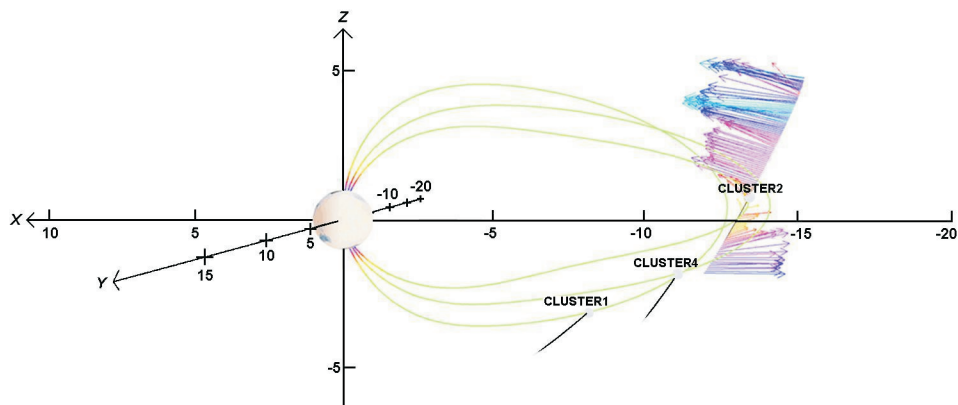


Рис. 2. Локація космічного апарата та зміна напрямку і значення складової B_z магнітного поля при проходженні космічного апарата через нейтральний шар (інтервал В). Згенеровано за допомогою програми 3DView

Рис. 3. Треки проєкцій силових ліній магнітного поля для північної півкулі. Згенеровано за допомогою програми 3DView

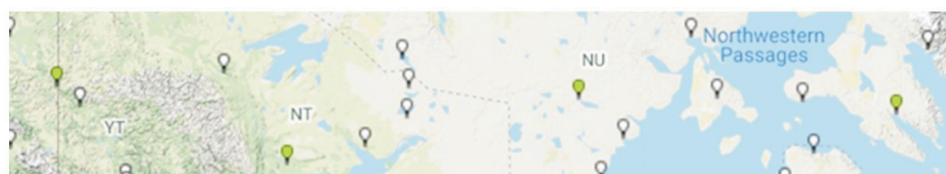
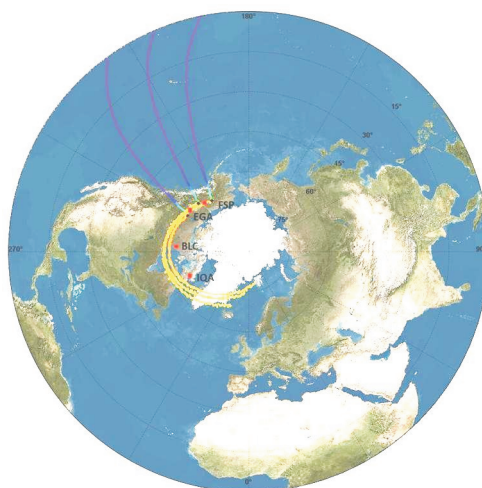


Рис. 4. Локація наземних магнітометрів (відмічено зеленим), які лежать поблизу треків силових ліній вимірювань космічних апаратів C2 і C4 для події 13 серпня 2019 року (IQA, BLC, FSP, EAG — в напрямку зі сходу на захід)

Таблиця 2. Локація геомагнітних обсерваторій

Назва обсерваторії	Скорочена назва	Довгота (географічна)	Широта (географічна)
Iqaluit	IQA	291.48	63.75
Baker Lake	BLC	263.99	64.32
Fort Simpson	FSP	238.77	61.76
Eagle	EAG	218.84	64.78

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Цікаво, що протягом першої половини дня 13 серпня 2019 р. космічні апарати і наземні станції зафіксували дві суббури (інтервали А та С) та коливання струмового шару на космічних апаратах (інтервал В).

Різкі зменшення північної складової магнітного поля (N) до -400 нТл зафіксовано о 03:41 станціями VLC, IQA (рис. 1). Тривалість цієї ізольованої магнітної суббури за даними наземних магнетометрів — близько 2 год. Супутникові виміри при цьому (КА С2) показують зменшення магнітного поля на 15 нТл. В цей час КА С2 перебував у точках $[-12.7...-13.8, -8.3...-8.2, -2.8...-0.8]R_3$ в системі координат GSM.

Починаючи з 10:18 (інтервал С) і супутникові, і наземні вимірювання вказують на послідовність двох суббур (з мінімумами північної складової о 10:34 та 11:07). Суббури фіксувалися станціями FSP, EGA та космічним апаратом С4. Тривалість головної фази суббур становить 2 год.

Інтервал В (05:20...06:10 UT) цікавий тим, що космічний апарат С2 протягом даного часу перетинав струмовий шар з південної до північної півкулі. При цьому фіксувалася зміна знаку складової B_x у системі координат GSM (рис. 2), та зменшення абсолютного значення магнітного поля (рис. 1). Важливо, що спостерігались коливання складової B_x поблизу нуля, з амплітудою понад 5 нТл, які вказують, що КА С2 перетинає струмовий шар декілька разів. Це явище називають коливанням струмового шару (flapping motions of magnetotail current sheet) [12]. Джерелом таких коливань можуть бути імпульсні процеси, а причиною — рух «магнітного джгута» у віддалені частини хвоста магнітосфери Землі на фазі відновлення конфігурації магнітного поля.

Для визначення геомагнітних пульсацій було використано непевне вейвлет-перетворення [6, 13]:

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k^* \exp(i k n t),$$

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left(\frac{2 i n k}{N}\right),$$

де W_n — амплітуда, k — кутова частота, \hat{x}_k^* — комплексно-спряжена материнська функція, що визначається співвідношенням

$$\hat{x}_k = \frac{t^{1/4}}{s} h\left(\frac{k}{s}\right) \exp\left(\frac{(s - k_0)^2}{2}\right),$$

де h — функція Гевісайда, $k_0 = 6$, s — параметр, обернено пропорційний до частоти f .

Для того щоб мінімізувати крайові ефекти, було розглянуто більш тривалі інтервали, ніж зафіксовані суббури (виділені на рис.1).

На рис. 5 показано результати вейвлет-перетворення ($I = \text{Re}(W_n)$) для інтервалу А. Для вимірів наземних магнетометрів результати пре-

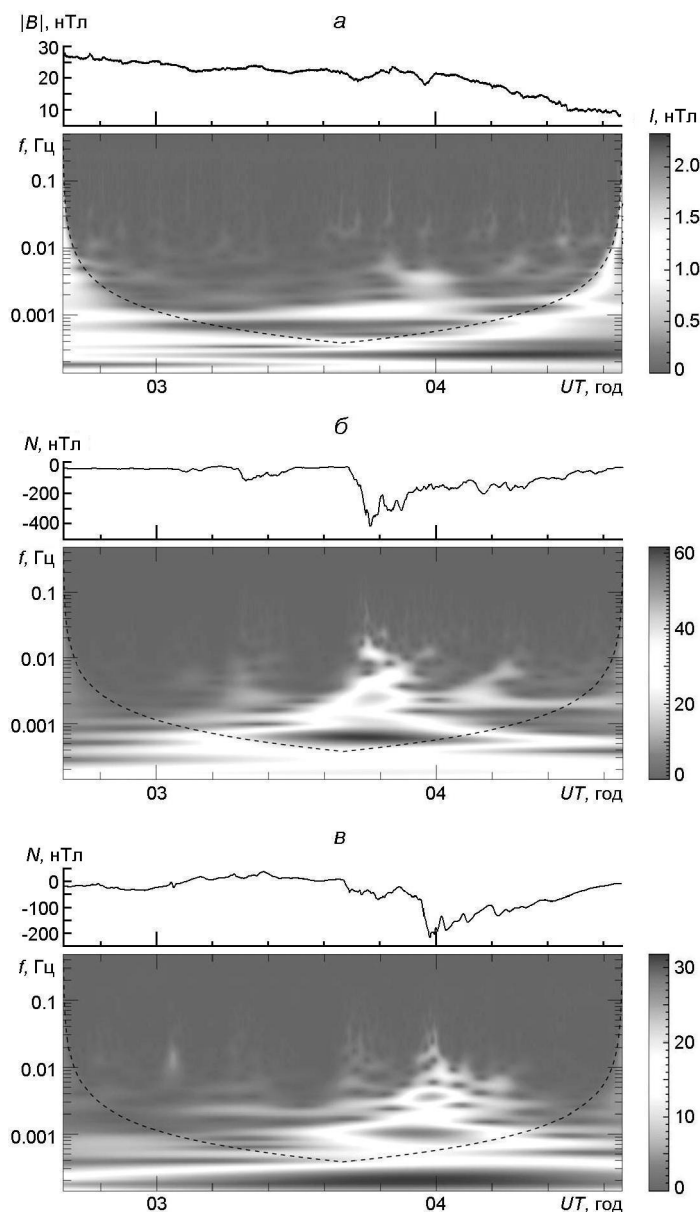


Рис. 5. Вейвлет-спектри для інтервалу А: а — для величини $|B|$ за даними космічного апарата С2; б, в — для N за даними станцій BLC та IQA відповідно

дставлено для найбільш збуреної складової (для наших вимірів це північна складова (N) магнітного поля, а для супутникових вимірів С2 — для модуля магнітного поля $|B|$).

Із графіків прослідковується наявність пульсацій на частотах 0.001, 0.002, 0.003 Гц для вимірів з наземних обсерваторій і дещо слабші пульсації для вимірів із магнітометрів, встановлених на космічних апаратах. Окрім того, інтенсивні максимуми у спектрі на станції BLC випереджають аналогічні дані IQA, С2. На С2 та станції IQA, яка є найближчою по довготі до точки проєкції силової лінії від С2, одно-

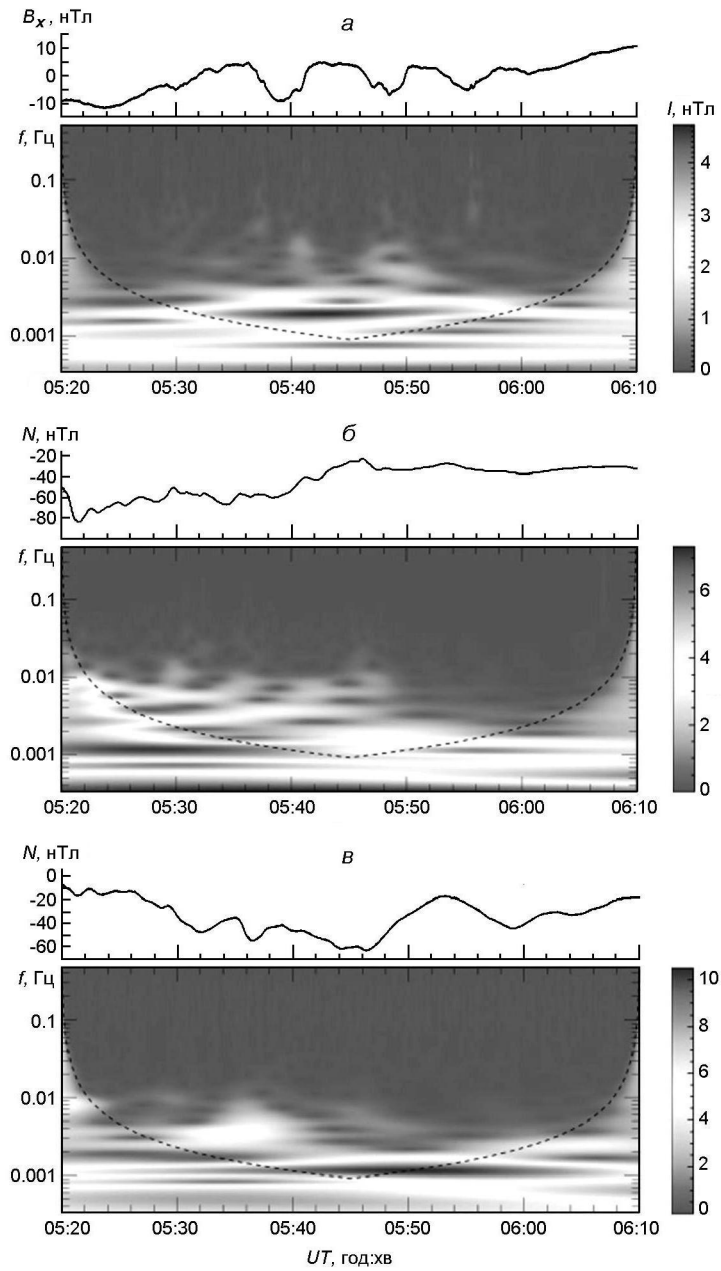


Рис. 6. Вейвлет-спектри для інтервалу В: а — для величини B_x за даними космічного апарата С2, б, в — для N за даними станцій BLC та IQA відповідно

часно спостерігаються максимуми, хоча слабкі прояви початку суббурі є і о 03:40. Це може означати, що розташування КА і локалізація розриву струмового шару рознесені в азимутальному напрямку. Отже, маємо тісний зв'язок між фіксацією збурень в області проєкцій силових ліній магнітного поля та магнітометрами на поверхні планети.

Оскільки найбільш цікавими змінами магнітного поля для інтервалу В були зміни саме B_x -складової (КА С2), то на рис. 6 порівню-

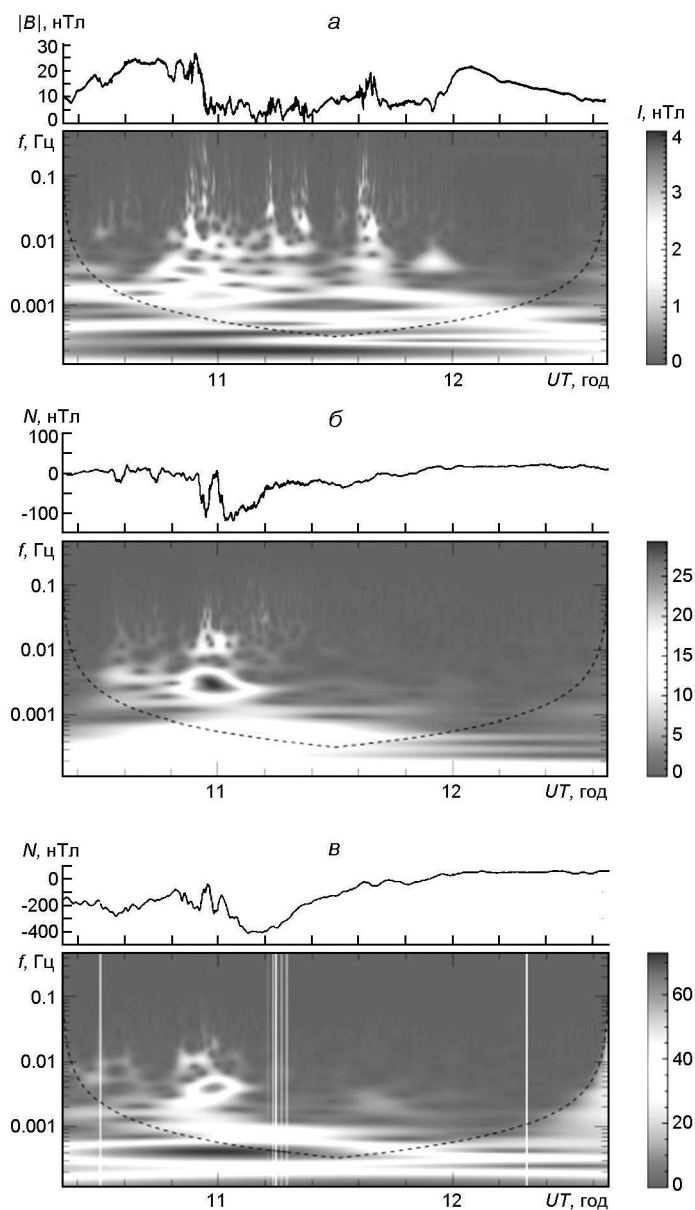


Рис. 7. Вейвлет-спектри для інтервалу С: *а* — для величини $|B|$ за даними космічного апарата С4; *б, в* — для N за даними станцій FSP та EAG відповідно. Білі вертикальні смуги — відсутність вимірів

ються дана складова магнітного поля та, аналогічно до попереднього випадку, — найбільш збурена складова із наземних вимірів. Можна відмітити, що для складової B_x магнітного поля чітко прослідковується максимум поблизу 0.002 Гц (значення періоду — 500 с) (рис. 6а). Даний період може відповідати періоду коливань струмового шару (!). На наземних станціях VLC (рис.6б), IQA (рис.6в) спостерігається стадія відновлення першої суббури з добре вираженим дискретним набором частот пульсацій 0.0025...0.009 Гц з інтенсивністю близько 2 нТл.

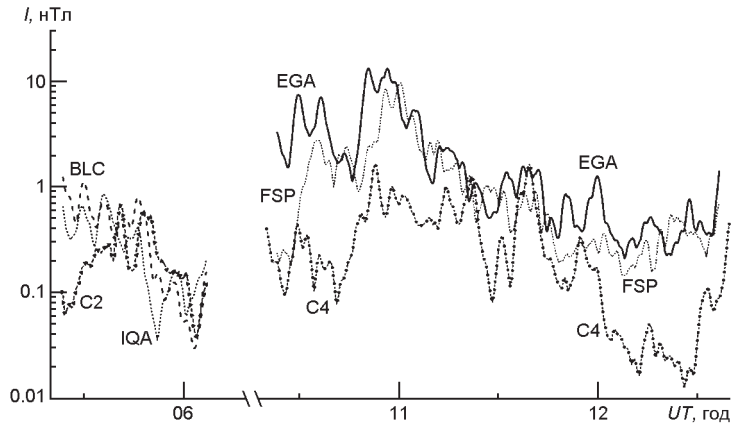


Рис. 8. Інтенсивність геомагнітних пульсацій в діапазоні 45...150 с

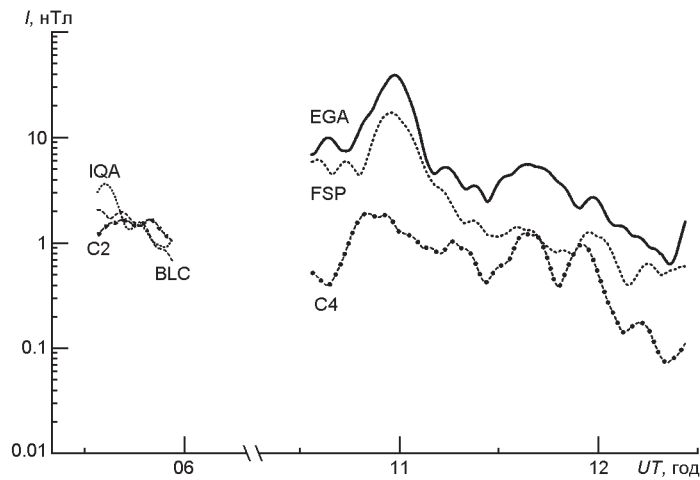


Рис. 9. Інтенсивність геомагнітних пульсацій в діапазоні 150...600 с

Результати вейвлет-аналізу для інтервалу С подано на рис. 7. Для суббури з початком о 10:50 UT рівень флуктуацій магнітного поля значно збільшується. Це є свідченням того, що місця розриву струмового шару близькі до розташування С4, на відміну від інтервалу А. Флуктуації магнітного поля в геомагнітному хвості лежать в широкому інтервалі частот. Найбільший максимум спостерігається на частоті 0.0035 Гц. Наземні магнітометри також фіксують даний максимум, але він зміщений на 10 хв від часу реєстрації на космічному апараті С2. Починаючи з 10:50 UT в частотному діапазоні 0.005...0.02 Гц спостерігається набір пульсацій, що мають вигляд цугів довжиною до 5 хв з загальною тривалістю до 40 хв. Вони модулюють пульсації, що збільшують свій період з 80 до 160 с під час фази розширення суббури, тобто ці пульсації мають квазіперіодичний характер.

Для оцінки типу пульсацій і точнішого визначення спостережуваних зсувів між пульсаціями, зареєстрованими у хвості магнітосфери

Землі та в області аврорального овалу, було розглянуто інтегроване представлення в двох частотних діапазонах: 45...150 с (рис. 8) та 150...600 с (рис. 9). Дані частотні інтервали відповідають відповідно геомагнітним пульсаціям Pc4/Pi2 та Pc5/Pi3.

Для інтервалу В немає кореляції між супутниковими та наземними пульсаціями. Це можна пояснити тим, що основи силових ліній від космічного апарата С2 та розташування станцій ВLС, IQA відрізняються до 5° по широті. Натомість для інтервалу С чітко простежується затримка максимумів наземних пульсації до 8 хв. Інтенсивність пульсацій в області аврорального овалу на порядок перевищує їхню інтенсивність в геомагнітному хвості. Вигляд пульсацій на рис. 8 вказує на нерегулярний характер пульсацій (пульсації Pi2). В діапазоні 150...600 с пульсації мають квазісинусоїдальний характер (Pc5).

ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Використовуючи дані вимірювань космічних апаратів місії «Кластер-2» та наземних магнітометрів мереж Intermagnet та SuperMag для аналізу суббур, що мали місце 13 серпня 2019 р., зафіксовано скорельовані Pi2- і Pc5-пульсації в авроральній області і у хвості магнітосфери. При цьому для наземних вимірювань інтенсивність даних пульсацій більша, ніж на відстанях (14...16) R_3 .

Можна стверджувати, що геомагнітні пульсації, які реєструються на поверхні Землі в області аврорального овалу, є проявом хвильових процесів у хвості магнітосфери Землі.

Спостерігається залежність величини зафіксованих збурень і взаємної локації наземних магнітометрів та проєкції силової лінії.

Реєстрація пульсацій і у магнітосфері Землі і у полярних областях вказує на те, що передача збурення відбувається через зміни струму у струмовому клині (інтенсифікації магнітосферних струмів вздовж силових ліній та іоносферних струмів).

Затримка в часі між максимумами геомагнітних пульсацій на поверхні Землі по відношенню до збурень на магнітосферних висотах дозволяє оцінити швидкість поширення збурення вздовж силової лінії магнітного поля. Довжина силової лінії в дипольному наближенні задається співвідношенням

$$S = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{r^2 - (dr/d\theta)^2} d\theta = L \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \sqrt{1 - 3 \sin^2 \theta} d\theta,$$

де $r = L \cos^2 \theta$ (рівняння силової лінії), L — відстань від центра Землі до перетину силової лінії геомагнітного екватора, θ — магнітна широта, θ_1, θ_2 — межі інтегрування, що визначаються значеннями інваріантних широт $\arccos(\sqrt{1/L})$, де силова лінія входить в іоносферу. На момент початку суббурі на Землі о 10:18 КА С4 перебував у точці

$[-13.986, -7.418, 1.000]R_3$ в системі координат GSM на геоцентричній віддалі $15R_3$, що відповідає $L = 16.5$ та інваріантній широті 75.75 (1.322 рад). Довжина дуги силової лінії при даних значеннях параметрів дорівнює $21.76R_3$. Зважаючи, що час затримки між супутниковими та наземними вимірюваннями становить 8 хв, оціночне значення швидкості дорівнюватиме 290 км/с. Це дещо перевищує величину альвенівської швидкості у струмовому шарі (при концентрації іонів 0.4 см⁻³ та магнітному полі 8 нТл, значення альвенівської швидкості дорівнюватиме 275 км/с).

Оскільки за генерацію різних видів пульсацій відповідальні різні фізичні механізми, то при побудові теоретичних або числових моделей розвитку суббури потрібно враховувати нестійкість Кельвіна — Гельмгольца, дрейфово-дзеркальну нестійкість та баунс-резонанс.

Ми вдячні геологічній службі Канади і Лабораторії Прикладної фізики університету імені Джона Гопкінса за підтримку діяльності мереж INTERMAGNET (www.intermagnet.org) і SuperMag (supermag.jhuapl.edu/info) та надані дані вимірювань наземних магнітометрів.

Роботу виконано в рамках програми з фізики плазми Національної академії наук України та при підтримці гранту 97 742 фонду «Фольксваген» (VW-Stiftung).

REFERENCES

1. Kleimenova N. G. (2007) Geomagnetic pulsations. *Space Models*. Ed. M. I. Panasyuk. Moscow: Moscow State Univ. Publ. House. T. 1. P. 511—627.
2. Troitskaya V. A., Guglielmi A. V. (1969) Geomagnetic pulsations and diagnostics of the magnetosphere. *Uspekhi fiz. sci.* 97, P. 453—494.
3. Erickson G. M., Maynard N. C., Burke W. J., Wilson G. R., Heinemann M. A. (2000) Electromagnetics of substorm onsets in the near-geosynchronous plasma sheet. *J. Geophys. Res.* 105. A11. P. 25265—25290.
4. Génot V., Beigbeder L., Popescu D., et al. (2018) Science data visualization in planetary and heliospheric contexts with 3DView. *Planet. and Space Sci.* 2018. 150. 111—130, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.07.007>
5. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. (2007) Eds Kamide Y., Chian A. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 539.
6. Lau K.-M., Weng H.-Y. (1995) Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 76, 2391—2402.
7. Lui A. T. Y. (2001) Current controversies in magnetospheric physics. *Rev. Geophys.* 39. 535—563.
8. Lui A. T. Y. (2004) Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets. *Space Sci. Rev.* 113(1-2). 127—206.
9. Newell P. T., Gjerloev J. W. (2011) Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power. *J. Geophys. Res.* 116. A12211. doi:10.1029/2011JA016779
10. Russell C. T., McPherron R. L. (1973) The magnetotail and substorms. *Space Sci. Rev.* 15. 205—266.
11. Samson J. C., Harrold B. G., Ruohoniemi J. M., Greenwald R. A., Walker A. D. M.

- (1992) Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 19, 441—456.
12. Speiser T. W., Ness N. F. (1967) The neutral sheet in the geomagnetic tail: Its motion, equivalent currents, and field-line reconnection through it. *J. Geophys. Res.* 1967. 72(1). P. 131—141, doi:10.1029/JZ072i001p00131
13. Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. 79, 61—78.

L. V. Kozak^{1,2}, B. A. Petrenko^{1,2}, E. E. Grigorenko³, E. A. Kronberg^{4,5}

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Space Research Institute of Russian Academy of Science (IKI), Moscow, Russia

⁴Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany

⁵Ludvig-Maximilian Universität, München, Germany

COMPARISON OF GROUND-BASED AND SATELLITE GEOMAGNETIC PULSATIONS DURING SUBSTORMS

A comparison was conducted between magnetic field pulsations in the magnetosphere and its time of detection and location on Earth's surface. For analysis we used measurements of magnetic field fluctuations from Cluster 2 mission feroprobe magnetometers, as well as ground-based magnetometers data in the auroral oval. We analyzed events during at the 13th of August 2019. In particular, two substorms and flapping motions of the magnetotail current sheet were analyzed. Ground-based facilities, from which data was collected, were selected using a visual location of spacecraft and related geomagnetic tail field lines (3DView). Continuous wavelet transform was used in order to distinguish geomagnetic pulsations. For estimation of pulsation type and observable contrast between magnetotail and auroral oval detected fluctuations, an integrated consideration was used in two frequency ranges: 45...150 seconds (Pc4/Pi2) and 150...600 seconds (Pc5/Pi3). Correlated Pi2 and Pc5 pulsations were detected in the aurora region and in the magnetotail. The magnitude of detected pulsations depends on the relative location of the surface magnetometers and spacecraft magnetic field line projection. Analyzing the delays between the detection of peak geomagnetic fluctuations by surface magnetometers and their detection by spacecraft in the magnetosphere allowed us to determine the velocity of the perturbations along the magnetic field line.

Keywords: geomagnetic pulsations, Earth magnetotail, substorms, current sheet fluctuations, pulsations in the aurora region.

Стаття надійшла до редакції 25.07.2021

Після доопрацювання 26.07.2021

Прийнята до друку 13.10.2021