

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.02.082>

УДК 551.510; 533.93

**Л. В. Козак^{1,2}, Б. А. Петренко¹, О. О. Кронберг³,
О. Є. Григоренко⁴, П. М. Козак⁵, К. Д. Река¹**

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

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

⁴Федеральна державна бюджетна установа науки Інститут космічних досліджень
Російської академії наук, вул. Профспілкова 84/32, м. Москва, 117997, Росія

⁵Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
ім. Тараса Шевченка, вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053
gutovska@ukr.net, bogdanart96@gmail.com, kronberg@mps.mpg.de,
elenagrigorenko2003@yandex.ru, kpm_ao@ukr.net, katreka@ukr.net

Зміни параметрів плазми у хвості магнітосфери Землі при ініціації суббурі

Розглянуто послідовність подій, що супроводжує прояв суббурі в іоносфері та магнітосфері Землі. Вказано на особливості геомагнітних пульсацій і механізми їхньої генерації. Проаналізовано вимірювання з чотирьох космічних апаратів місії «Кластер-2». Для дослідження флуктуацій магнітного поля використовувалися дані ферозондових магнітометрів (частота опитування 22.4 Гц), а для аналізу флуктуацій температури, швидкості і концентрації електронів і різних видів іонів — вимірювання з експериментів PEACE і CIS-CODIF (частота опитування 0.125...0.25 Гц). Отримано, що під час ініціації суббурі, яка супроводжувалася диполаризацією (різкою зміною конфігурації магнітного поля від витягнутих у хвіст силових ліній до більш дипольної структури), спостерігається зміна плазмових параметрів. Зокрема зафіксовано зміну концентрації, істотне збільшення температури, а також збільшення флуктуацій складових швидкості зі збільшенням z-складової. При цьому зафіксовано затримку в часі розігріву протонів і іонів кисню, а також затримка зміни концентрації. Під час суббурі концентрація протонів на порядок перевищує концентрацію іонів гелію і майже на два порядки перевищує концентрацію іонів кисню, альвенівська швидкість приблизно дорівнює 470 км/с, а

параметр, який характеризує відношення теплового тиску до магнітного, більший за одиницю. З використанням вейвлет-аналізу проведено порівняння хвильових характеристик для різних тисків. Розглянуто тиск магнітного поля, а також динамічний і тепловий тиск для різного сорту часток. У флуктуаціях тисків магнітного поля, теплового тиску електронів і протонів зафіксовано $Pc5$ -пульсації (150...600 с) і потужні $Pc4$ -пульсації (45...150 с), а також прямі і зворотні каскади. При цьому прямі каскади вказують на розпад великих структур, в результаті якого спостерігатиметься перехід від менших частот до більших, а зворотний каскад, навпаки, характеризується переходом від більшої частоти до меншої і наявністю злиття/самоорганізації малих структур у більші. Отримані результати вказують на суттєву роль кінетичних ефектів у складному ланцюжку процесів у магнітосфері Землі у період вибухової фази суббури.

Ключові слова: суббура, хвіст магнітосфери Землі, Pc -пульсації, магнітний, тепловий і динамічний тиск, тиск електронів.

ВСТУП

Суббурі часто викликають збурення в іоносфері та магнітосфері Землі. Однією з головних ознак магнітосферної суббури є авроральна суббура: спалах і розпад дуги полярного сяйва (брейкап) з наступним швидким розширенням до полюса області яскравих дискретних форм сяйв, які утворюють так звану «авроральну опуклість». У розвитку ізольованої суббури (що відбувається на спокійному тлі) виділяють три фази. Фаза підготовки, або попередня фаза характеризується повільними конфігураційними змінами структури магнітосфери, переходом її у метастабільний стан. Вибухова фаза характеризується різким переходом магнітосфери в новий стан, що супроводжується розігрівом магнітосферної плазми, генерацією швидких потоків плазми, підвищеною хвильовою активністю, скиданням енергійних частинок в іоносферу. Відновлювальна фаза — повільний процес згасання всіх цих процесів, повернення у спокійний стан [2, 3, 7]. Такий ланцюжок процесів дозволяє виділити наявність суббури з таких магнітосферних збурень, як стаціонарна магнітосферна конвекція, бухти, імпульсні потоки плазми і формування тонких струмових шарів [4, 5, 25, 28].

У магнітосфері суббура характеризується витягуванням силових ліній, в результаті якого спостерігається відновлення дипольної конфігурації. При цьому структура магнітосфери зазнає істотних змін під час розвитку попередньої і вибухової фаз суббури [6, 14, 19]. У період попередньої фази суббури геостаціонарні супутники вимірюють поступове (протягом десятків хвилин) зменшення вертикальної складової магнітного поля і збільшення горизонтальної складової, яка зумовлена накопиченням магнітного потоку в долях хвоста магнітосфери. Під час вибухової фази відбувається різка, протягом декількох хви-

лин, диполаризація магнітного поля (зменшення горизонтальної складової магнітного поля в долях хвоста і збільшення вертикальної складової) [8]. Це явище інтерпретується як ознака зменшення струму у плазмовому шарі магнітосфери. У попередній фазі фіксується зменшення потоку частинок, викликане перерозподілом часток при витягуванні силових ліній магнітного поля. У вибуховій фазі спостерігається прискорення частинок в індукційному електричному полі в області різкої зміни магнітного поля при диполаризації [2, 5, 16, 24].

Витягування силових ліній магнітного поля у хвості магнітосфери супроводжується посиленням магнітного поля в долях хвоста і, відповідно, збільшенням щільності магнітної енергії (магнітного тиску), а також збільшенням у 2-3 рази діаметра хвоста магнітосфери [17, 26, 29]. Згідно з оцінками магнітний потік, накопичений у долях хвоста під час попередньої фази, дорівнює потоку через авроральну опуклість у максимумі вибухової фази авроральної суббури [21].

Найбільш дискусійним залишається питання про ініціацію суббури. При цьому розглядаються як зовнішні тригерні механізми, серед яких можуть виступати раптові повороти міжпланетного магнітного поля (ММП) або взаємодія магнітосфери з міжпланетними ударними хвилями, так і нестійкості у хвості магнітосфери. Серед «внутрішніх» тригерних механізмів, які породжують розпад струму, розглядають тірінг-нестійкість, нижньогібридну нестійкість, балонну нестійкість, нестійкість поперечного струму [17, 18, 21]. Хоча є багато експериментальних даних щодо основних явищ, які відбуваються під час вибухової фази суббури, ці дані допускають різну інтерпретацію, і їх явно недостатньо для однозначного визначення ключової плазмової нестійкості (або каскаду нестійкостей), відповідальної за вибухову фазу. До того ж навіть на феноменологічному рівні відомі факти допускають різні сценарії розвитку вибухової фази [2, 12, 13, 15, 17].

Прояви суббури в іоносфері і у магнітосфері супроводжуються генерацією ультранизкочастотних геомагнітних пульсацій (1 мГц ... 5 Гц) хвиль. З фізичної точки зору вони є гідромагнітними коливаннями магнітосферної плазми. Малі значення частот цих хвиль відповідають їхнім великим просторовим масштабам, а характерний масштаб основних геомагнітних пульсацій можна порівняти з розмірами магнітосфери. При цьому структура та глобальні процеси, які відбуваються у магнітосфері, вирішальним чином визначають тип геомагнітних пульсацій. Пульсації поділяють на два великих класи: неперервні P_c (pulsations continuous), які характеризуються квазісинусоїдальними коливаннями; і нерегулярні — P_i (pulsations irregular). Залежно від періоду у класі P_c виділяють пульсації P_{c1} з періодами від 0.2 до 5 с, P_{c2} — 5...10 с, P_{c3} — 10...45 с, P_{c4} — 45...150 с, P_{c5} — 150...600 с, P_{c6} — понад 600 с. У класі P_i виділяють пульсації P_{i1} з періодами, меншими за 40 с, P_{i2} — 40...150 с і P_{i3} — понад 150 с. В середині частотних діапазонів виділяють різні типи пульсацій за їхніми морфологічними ознаками [18].

На земній поверхні під час суббурі магнітометрами фіксуються пульсації $Pi1$ і $Pi2$ [1, 20].

Важливо, що за генерацію кожного типу пульсацій відповідальний той чи інший фізичний механізм [9, 23]: $Pc1$, $Pc2$ генеруються за рахунок іонної циклотронної нестійкості у магнітосфері, $Pc3$ — за рахунок протонно-циклотронної нестійкості в сонячному вітрі, нестійкості Кельвіна — Гельмгольца; $Pc4$, $Pc5$ — за рахунок нестійкості Кельвіна — Гельмгольца, дрейфово-дзеркальної нестійкості і баунс-резонансу; $Pi1$ — за рахунок поточкових нестійкостей; $Pi2$ — в результаті різких змін конвекції у хвості магнітосфери, зміни потоку.

Таким чином, наявність пульсацій можна використовувати для конкретизації фізичних механізмів у різних областях геомагнітного хвоста.

АНАЛІЗ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ

Для визначення зміни параметрів плазми під час ініціації суббурі і особливостей геомагнітних пульсацій у хвості магнітосфери Землі були проаналізовані дані параметрів плазми з вимірювань чотирьох космічних апаратів (КА) місії «Кластер-2» для події 11 серпня 2015 р. Були використані вимірювання флуктуацій магнітного поля з ферозондових магнітометрів (FGM) з частотою опитування 22.5 Гц, а також дані температури, швидкості і концентрації електронів і різних типів іонів з експериментів PEACE [11] і CIS-CODIF [22] з частотою опитування 0.125...0.25 Гц. (Дані взято з архіву даних місії «Кластер» <https://csa.esac.esa.int/csa-web/>). Локалізацію чотирьох космічних апаратів C1, C2, C3, C4 під час ініціації суббурі для проаналізованої події представлено на рис. 1. Космічні апарати перебувають у хвості магнітосфери в антисонячному напрямку, їхні екстремальні координати у GSM-системі координат дорівнюють $X_{GSM} \ 13.84R_3$, $Y_{GSM} \ 2.41R_3$, $Z_{GSM} \ 3.82R_3$. Початок ініціації суббурі, який супроводжувався різ-

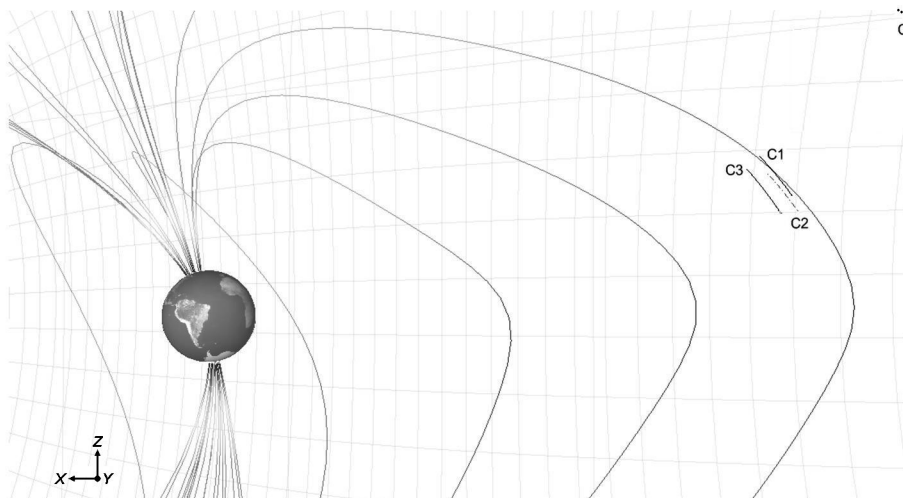


Рис. 1. Положення КА C1, C2, C3, C4 за період з 21:20 до 22:40 UT 11 серпня 2015 р.

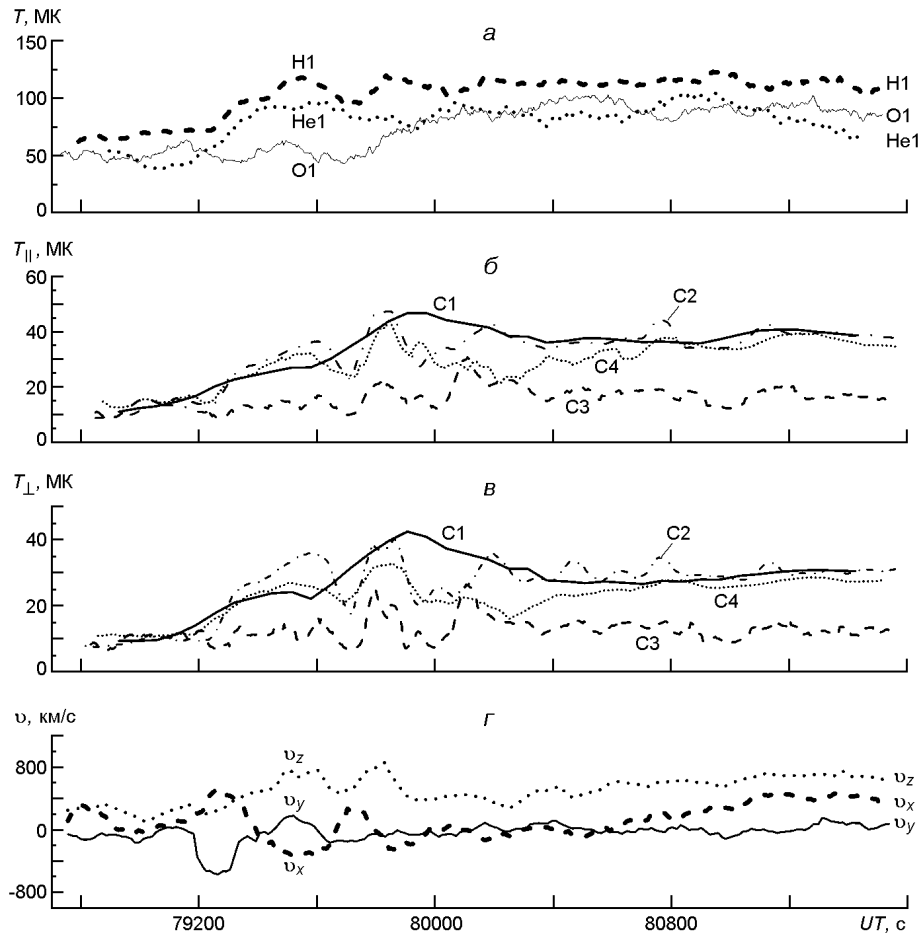


Рис. 2. Зміни температури і швидкості плазми під час ініціювання суббурі (ковзне середнє по дев'яти точках): а — температура іонів O1, He1, H1; б, в — зміни температури відповідно вздовж і уперек вектора магнітного поля для КА C1, C2, C3, C4; г — флуктуації трьох складових швидкості плазми

кою зміною конфігурації магнітного поля від витягнутих у хвіст силових ліній до більш дипольної структури магнітного поля (диполіаризації), зафіксовано о 22:00:19, 22:00:34, 22:00:23 і 22:00:24 UT для першого, другого, третього і четвертого КА відповідно. Тривалість для КА C1 і C2 становила приблизно 12.5 хв, а для КА C3 і C4 — на одну хвилину більше. Відносний рівень флуктуацій магнітного поля (значення магнітного поля, нормоване на поточне середнє значення) варіює від 0.5 до 3.5. Зміни температури, швидкості, параметрів концентрації плазми під час ініціації суббурі для КА з найбільшою репрезентативністю (C4) представлено на рис. 2 і 3. Серед отриманих результатів можна відзначити суттєве збільшення температури (більш ніж удвічі) під час ініціювання суббурі, при цьому найшвидше відбувається нагрівання протонів. Затримка в часі між зростанням температури протонів та іонів кисню становить приблизно 10 хв. Істотне збільшення температури фіксується і у поздовжньому, і у перпенди-

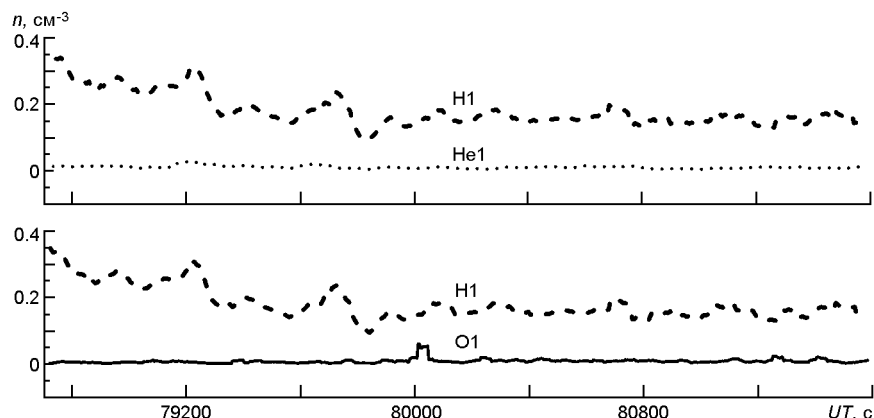


Рис. 3. Зміни концентрації іонів O1, He1, H1 під час ініціювання суббурі за вимірюваннями КА С4 (ковзне середнє по дев'яти точках)

Розраховані характеристики плазми в області диполяризації

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Гірчастота електронів, Гц	333	Щільність кисню O^+ , $10^{28} \text{ г см}^{-3}$	1.33 ± 2.39
Гірчастота протонів, Гц	0.181	Щільність іонів ion^+ , $10^{28} \text{ г см}^{-3}$	5.12 ± 2.73
Плазмова частота електронів, Гц	380	Альвенівська швидкість v_a , км/с	468.8
Плазмова частота іонів, Гц	88.7	Тиск електронів, нПа	0.168 ± 0.019
Електронна інерційна довжина, км	12.6	Тиск протонів, нПа	0.240 ± 0.051
Іонна інерційна довжина, км	538	Тиск іонів гелію, нПа	0.013 ± 0.011
Концентрація електронів, см^{-3}	0.516 ± 0.206	Тиск іонів кисню, нПа	0.004 ± 0.005
Концентрація протонів, см^{-3}	0.179 ± 0.068	Тиск плазми, нПа	0.425 ± 0.293
Концентрація іонів гелію, см^{-3}	0.012 ± 0.010	Тиск магнітного поля, нПа	0.063 ± 0.042
Концентрація іонів кисню, см^{-3}	0.005 ± 0.009	Параметр бета (β)	6.75
Щільність електронів n_e , $10^{31} \text{ г см}^{-3}$	4.70 ± 1.88	Розраховані потокові швидкості v_{GSE} , км/с	$[-28.05, -19.64, 4.11]$
Щільність протонів n_H , $10^{28} \text{ г см}^{-3}$	2.99 ± 1.14	Розраховані потокові швидкості v_{GSM} , км/с	$[-28.05, -18.84, 6.90]$
Щільність гелію n_{He} , $10^{28} \text{ г см}^{-3}$	0.80 ± 0.67		

кулярному напрямку відносно вектора магнітного поля. На тлі зростання, також майже удвічі, z -складової швидкості спостерігається збільшення флуктуацій складових x і y . При цьому $z > 0$. З графіків простежується збільшення рівня флуктуацій концентрації іонів, плавне їхнє зменшення та наявність стрибків для протонів у моменти диполяризації, а для іонів кисню — приблизно через 13 хв після моменту диполяризації.

Оціночні значення характеристик плазми під час суббурі зібрано у табл. 1. Можна відзначити, що концентрація протонів на порядок перевищує концентрацію іонів гелію і майже на два порядки перевищує концентрацію іонів кисню, альвенівська швидкість близька до 470 км/с, а параметр β , який дорівнює відношенню теплового тиску до магнітного, дорівнює 6.75.

У роботі зроблено акцент на порівнянні різних тисків, зокрема магнітного ($P_m = B^2 / 2 \mu_0$), динамічного ($P_d = \rho v^2 / 2$) і теплового ($P_T = n k T$) окремо для кожного сорту частинок. На рис. 4 показано розраховані значення флуктуацій тисків. Видно, що у момент диполяризації спостерігається різкий стрибок динамічного і магнітного тиску і збільшується рівень флуктуацій для різних типів тисків.

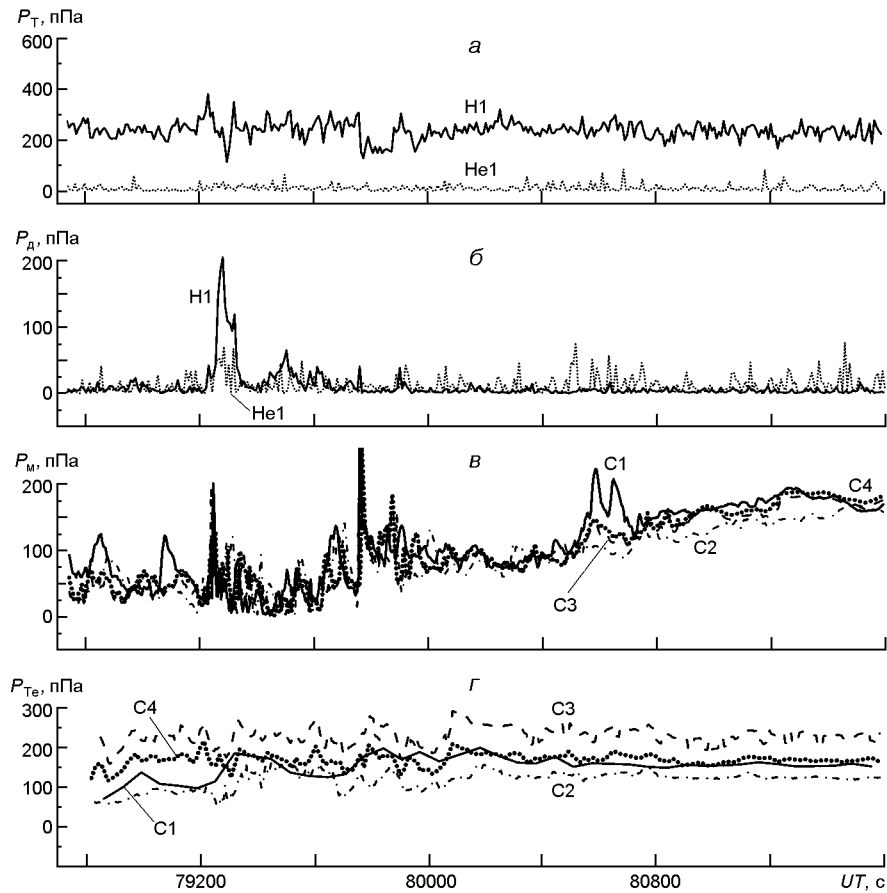


Рис. 4. Зміна тиску в області ініціювання суббури у хвості магнітосфери Землі (ковзне середнє по дев'яти точках): а, б — відповідно тепловий та динамічний тиск іонів He1 і H1 за даними КА С4; в, г — магнітний і електронний тиск за даними КА C1, C2, C3, C4

АНАЛІЗ ХВИЛЬОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для дослідження характеристик плазми у момент ініціювання суббури використано вейвлет-аналіз, який дозволяє проєктувати одновимірний сигнал (який був функцією тільки часу) на площину «час — частота» і таким чином дослідити зміни в часі хвильових пакетів [12, 27].

В ході досліджень використано неперервне перетворення [10, 27]

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

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

де W — амплітуда, k — кутова частота. Воно дозволяє відобразити часовий ряд вимірювань x_n , $n = 0, \dots, N-1$ з однаковою дискретністю t у часовий ряд амплітуд і частот сигналу $W_n(s)$. Як згортка виступає функція \hat{x}_k^* , яка називається комплексно-спряженою материнською

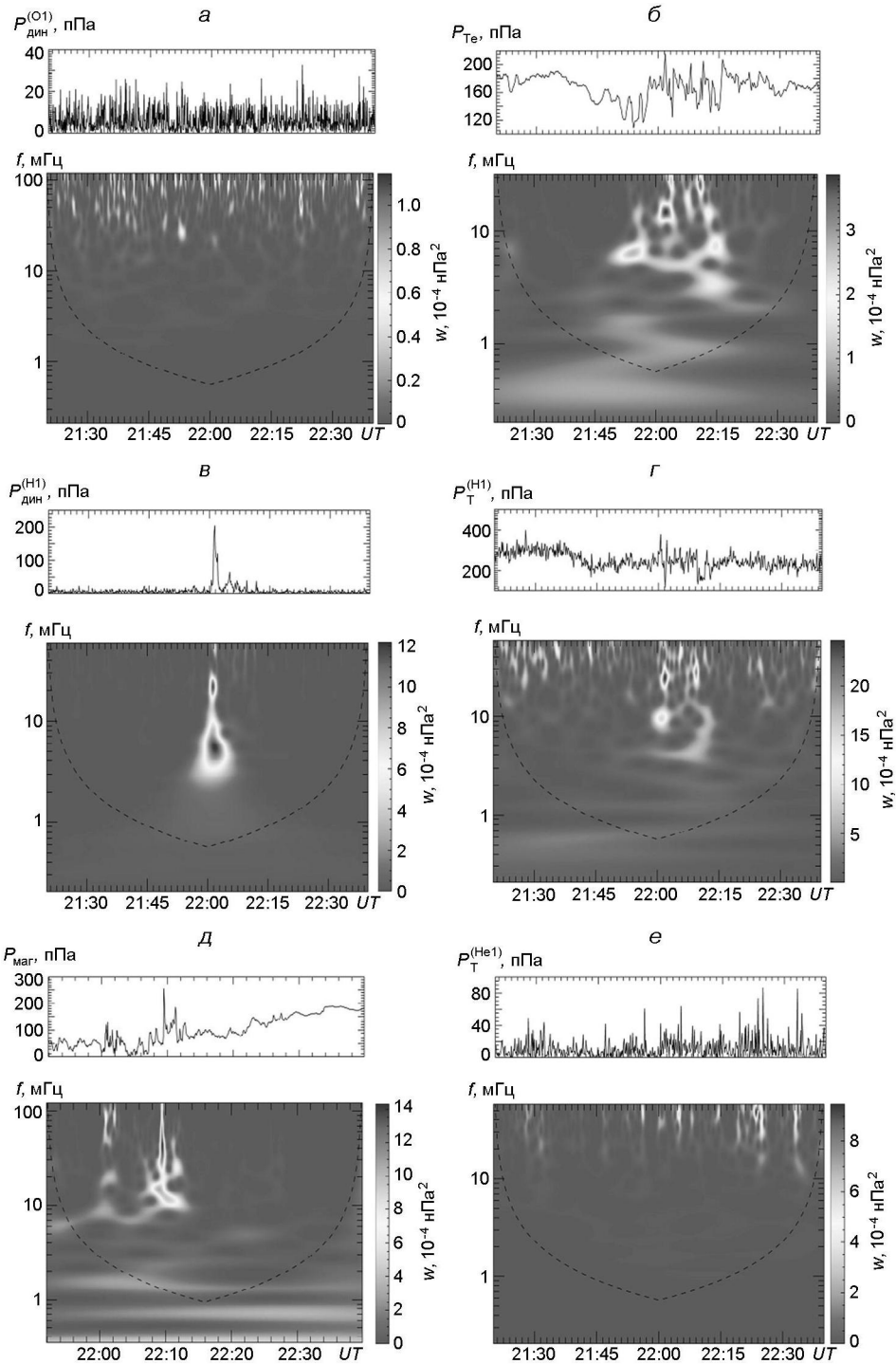


Рис. 5. Результати вейвлет-аналізу за вимірюваннями КА С4 флуктуацій тиску в області диполаризації магнітного поля під час ініціювання суббури: *a* — динамічний тиск для іонізованого кисню; *б* — тепловий тиск для електронів, *в* — динамічний тиск для протонів, *г* — тепловий тиск для протонів; *д* — тиск магнітного поля, *е* — тепловий тиск іонізованого гелію

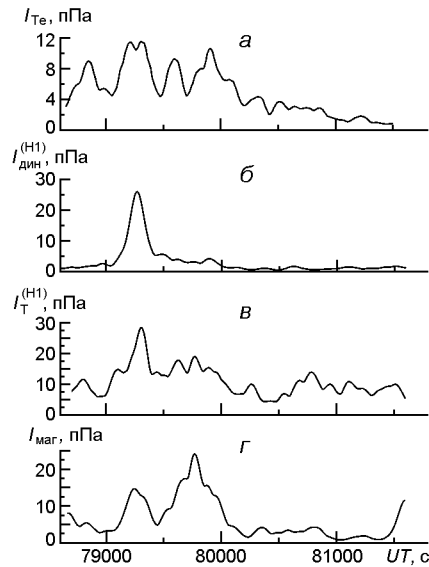


Рис. 6. Зміни інтенсивності геомагнітних пульсацій в діапазоні Pc4-пульсацій (45...150 с): а — тепловий тиск електронів; б, в — динамічний і тепловий тиск протонів; г — тиск магнітного поля

функцією у фур'є-просторі і визначається співвідношенням

$$\hat{h}(s_k) = \frac{t^{1/4}}{s} h(s_k) \exp \left(-\frac{(s_k - s_0)^2}{2} \right),$$

де h — функція Хевісайда, $s_0 = 6$, s — параметр, обернено пропорційний до частоти f .

Результати вейвлет-аналізу для вимірювань КА з найбільшою репрезентативністю (КА С4) представлено на рис. 5. Крайові ефекти вдалося обійти вибором більш тривалого інтервалу. Пульсації в частотно-му діапазоні 0.001...0.02 Гц зафіксовано для теплового тиску електронів (рис. 5б), теплового тиску протонів (рис. 5в), динамічного тиску протонів (рис. 5г) і тиску магнітного поля (рис. 5д). У всіх інших випадках був зафіксований набір збурень у високочастотній області, аналогічний до того, який наведено на рис. 5а і 5е.

Для теплового тиску електронів (рис. 5б) максимум інтенсивності спостерігається на частоті 0.015 Гц безпосередньо у момент дипольризації. Істотним є збурення на частотах 0.003 Гц о 22:45, 0.005 Гц о 21:50 і 0.006 Гц о 22:15 UT. Вейвлет-аналіз збурення динамічного тиску протонів (рис. 5г) вказує на наявність потужного сплеску під час дипольризації магнітного поля з максимумами на частотах 0.005 і 0.025 Гц. Максимальні сплески для теплового тиску протонів (рис. 5в) спостерігаються на частоті 0.01 і 0.025 у момент ініціювання суббури (22:00:24) і на частоті 0.025 Гц через 9 хв після нього. Крім того, спостерігаються також прямі і зворотні каскади. При цьому зворотний каскад характеризується переходом від більшої до меншої частоти (злиттям/самоорганізацією малих структур у більші структури), а прямий каскад виявляється у розпаді великих структур, в результаті якого ми будемо спостерігати перехід від менших частот до більших. Для тиску магнітного поля (рис. 5д), крім збурень на частотах 0.0025, 0.01, 0.02,

0.04 Гц, дуже чітко простежується зворотний каскад з великим рівнем флуктуацій через 10 хв після початку моменту диполяризації.

Для кількісної оцінки інтенсивності геомагнітних пульсацій було використано усереднення вейвлет-перетворення для інтенсивності в частотному діапазоні 0.0067...0.022 Гц (рис. 6). Можна відзначити, що у флуктуаціях теплового тиску електронів, протонів і тиску магнітного поля чітко простежуються Pc4-пульсації, інтенсивність яких суттєво збільшується у момент ініціювання суббури. Найбільша інтенсивність Pc4-пульсацій спостерігається для тиску магнітного поля.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження вказують на наявність складних динамічних процесів у магнітосфері Землі в результаті виникнення суббури.

Зокрема, в ході розгляду збурення плазми у хвості магнітосфери за вимірюваннями місії «Кластер-2» виявлено такі особливості явища:

- збільшення температури іонів у момент диполяризації магнітного поля,
- часова затримка між збільшенням температури протонів та температури іонів кисню (приблизно 10 хв);
- збільшення флуктуацій компонентів швидкості із збільшенням z -ї складової;
- на фоні плавного зменшення концентрації протонів спостерігаються скачки у момент диполяризації;
- наявність стрибка іонів кисню через 13 хв після ініціювання суббури;
- різкі зміни динамічного тиску протонів і тиску магнітного поля;
- наявність Pc5-пульсацій у флуктуаціях тисків магнітного поля, теплового тиску електронів і протонів;
- наявність прямих і зворотних каскадних процесів;
- прояви потужних Pc4-пульсацій, які спостерігаються для теплового тиску електронів, протонів і тиску магнітного поля. Слід додати, що прояви пульсацій у збуреннях електронів вказують на істотну роль кінетичних ефектів у складному ланцюжку процесів у магнітосфері Землі у період вибухової фази суббури.

Робота проводилася в рамках спільних науково-дослідних проєктів учених Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Національної академії наук України на 2019—2020 роки, за підтримки гранту 90312 фонду Фольксваген (VW-Stiftung) та Міжнародного інституту космічних досліджень ISSI-BJ, Пекін, Китай.

1. Акасофу С.-И. *Полярные и магнитосферные суббури*. М.: Мир, 1971. 320 с.
2. *Космическая геогеофизика*. (Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского). М.: Физматлит, 2008. Том 1. 624 с.
3. Нишида А. *Геомагнитный диагноз магнитосферы*. М.: Мир, 1980. 300 с.
4. Birn J. Magnetotail dynamics: survey of recent progress. *The Dynamic Magnetosphere, IAGA special Sopron series*. Vol. 3. Liu W., Fujimoto M. (eds). Springer. 2011. P. 49—63.

5. Birn J., Hesse M., Schindler K. Formation of thin current sheets in space plasmas. *J. Geophys. Res.* 1998. 103(A4). P. 6843—6852.
6. Caan M. N., McPherron R. L., Russell C. T. The statistical magnetic signatures of magnetospheric substorms. *Planet. and Space Sci.* 1978. 26. P. 269—279.
7. Fairfield D. H., Mukai T., Brittnacher M., et al. Earthward flow bursts in the inner magnetosphere and their relation to auroral brightenings, AKR intensifications, geosynchronous particle injections and magnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1999. 104. P. 355—370.
8. Frank L. A., Paterson W. R., Sigwarth J. B., Kokubun S. Observations of magnetic field dipolarization during auroral substorm onset. *J. Geophys. Res.* 2000. 105. P. 15897—15912.
9. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Eds Kamide Y., Chian A. Berlin, Heidelberg: Springer. 2007. 539 p.
10. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003. 108, № D21. P. 4677—4708.
11. Johnstone A. D., Alsop C., Burge S., Carter P. J., Coates A. J., Coker A. J., et al. PEACE: a plasma electron and current experiment. *Space Sci. Revs.* 1997. 79. P. 351—398.
12. Kozak L. V., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Prokhorenkov A. S. Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2017. 154. P. 115—126.
13. Kozak L. V., Petrenko B. A., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Grigorenko E. E., Prokhorenkov A. S. Turbulent processes in the Earth's magnetotail: spectral and statistical research. *Ann. Geophys.* 2018. 36. P. 1303—1318.
14. Lopez R. E. *Magnetospheric substorms*. Johns Hopkins APL Tech. Dig. 1990. 11. P. 264—271.
15. Lui A. T. Y. *Extended consideration of a synthesis model for magnetospheric substorm*. *Magnetospheric substorms. Geophysical monograph*. 64 / Eds. J. Kan et al. Washington: AGU. 1991. P. 43—60.
16. Lui A. T. Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *J. Geophys. Res.* 1996. 101. P. 13067—13088.
17. Lui A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2002. 64, № 2. P. 125—143.
18. Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets. *Space Sci. Rev.* 2004. 113, № 1-2. P. 127—206.
19. McPherron R. Substorm related changes in the geomagnetic tail: the growth phase. *Planet. and Space Sci.* 1972. 20. P. 1521—1539.
20. Pudovkin M. I., Semenov V. S., Starkov G. V., Kornilova T. A. On separation of the potential and vortex parts of the magnetotail electric field. *Planet. and Space Sci.* 1991. 39. P. 563—568.
21. Rae I. J., Mann I. R., Angelopoulos V., Murphy K. R., Milling D. K., Kale A., Frey H. U., Rostoker G., Russell C. T., Watt C. E. J., Engebretson M. J., Moldwin M. B., Mende S. B., Singer H. J., Donovan E. F. Near-Earth initiation of a terrestrial substorm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2009. 114, № 7. P. 2156—2202.
22. Reme H., Aoustin C., Bosqued J. M., Dandouras I., Lavraud B., Sauvaud J. A., et al. First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.* 2001. 19(10). P. 1303—1354.
23. Samson J. C., Harrold B. G., Ruohoniemi J. M., Greenwald R. A., Walker A. D. M. Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1992. 19. P. 441—456.
24. Sarris T., Li X. Evolution of the dispersionless injection boundary associated with substorms. *Ann. Geophys.* 2005. 23. P. 877—884.
25. Sergeev V. A., Mitchell D. G., Russell C. T., Williams D. J. Structure of the tail plasma/

- current sheet at $11R_e$ and its changes in the course of a substorm. *J. Geophys. Res.* 1993. 98. P. 17345—17365.
26. Shukhtina M. A., Dmitrieva N. P., Popova N. G., et al. Observational evidence of the loading-unloading substorm scheme. *Geophys. Res. Lett.* 2005. 32. P. L17107. DOI: 10.1029/2005GL023779.
27. Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. 79, № 1. P. 61—78.
28. Yahnin A. G., Despirak I. V., Lubchich A. A., et al. Indirect mapping of the source of the oppositely directed fast plasma flows in the plasma sheet onto the auroral display. *Ann. Geophys.* 2006. 24. P. 679—687.
29. Yamaguchi R., Kawano H., Ohtani S., et al. Total pressure variations in the magnetotail as a function of the position and the substorm magnitude. *J. Geophys. Res.* 2004. 109. P. A03206. DOI:10.1029/2003JA010196.

REFERENCES

1. Akasofu S.-I. (1971) *Polar and magnetospheric substorms*. M.: Mir, 320. (In Russian).
2. *Space geoheliophysics* (2008) L. M. Zeleny, I. S. Veselovsky (eds). M.: Fizmatlit, 1. 624. (In Russian).
3. Nishida A. (1980) *Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere*. M.: Mir, 300. (In Russian).
4. Birn J. (2011) Magnetotail dynamics: survey of recent progress. *The Dynamic Magnetosphere, IAGA special Sopron series*. Vol. 3. Liu W., Fujimoto M. (eds). Springer. 49—63.
5. Birn J., Hesse M., Schindler K. (1998) Formation of thin current sheets in space plasmas. *J. Geophys. Res.* 103(A4). 6843—6852.
6. Caan M. N., McPherron R. L., Russell C. T. (1978) The statistical magnetic signatures of magnetospheric substorms. *Planet. and Space Sci.* 26. 269—279.
7. Fairfield D. H., Mukai T., Brittnacher M., et al. (1999) Earthward flow bursts in the inner magnetosphere and their relation to auroral brightenings, AKR intensifications, geosynchronous particle injections and magnetic activity. *J. Geophys. Res.* 104. 355—370.
8. Frank L. A., Paterson W. R., Sigwarth J. B., Kokubun S. (2000) Observations of magnetic field dipolarization during auroral substorm onset. *J. Geophys. Res.* 105. 15897—15912.
9. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. (2007) Eds Kamide Y., Chian A. Berlin, Heidelberg: Springer. 539.
10. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. (2003) Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *J. Geophys. Res. Atmos.* 108(D21). 4677—4708.
11. Johnstone A. D., Alsop C., Burge S., Carter P. J., Coates A. J., Coker A. J., et al. (1997) PEACE: a plasma electron and current experiment. *Space Sci. Revs.* 79. 351—398.
12. Kozak L. V., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Prokhorenkov A. S. (2017) Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 154. 115—126.
13. Kozak L. V., Petrenko B. A., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Grigorenko E. E., Prokhorenkov A. S. (2018) Turbulent processes in the Earth's magnetotail: spectral and statistical research. *Ann. Geophys.* 36. 1303—1318.
14. Lopez R. E. (1990) *Magnetospheric substorms*. Johns Hopkins APL Tech. Dig. 11. 264—271.
15. Lui A. T. Y. (1991) *Extended consideration of a synthesis model for magnetospheric substorm*. *Magnetospheric substorms. Geophysical monograph*. 64. Eds. J. Kan et al. Washington: AGU. 43—60.
16. Lui A. T. Y. (1996) Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *J. Geophys. Res.* 101. 13067—13088.

17. Lui A. T. Y. (2002) Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 64(2). 125—143.
18. Lui A. T. Y. (2004) Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets. *Space Sci. Rev.* 113(1-2). 127—206.
19. McPherron R. (1972) Substorm related changes in the geomagnetic tail: the growth phase. *Planet. and Space Sci.* 20. 1521—1539.
20. Pudovkin M. I., Semenov V. S., Starkov G. V., Kornilova T. A. (1991) On separation of the potential and vortex parts of the magnetotail electric field. *Planet. and Space Sci.* 39. 563—568.
21. Rae I. J., Mann I. R., Angelopoulos V., Murphy K. R., Milling D. K., Kale A., Frey H. U., Rostoker G., Russell C. T., Watt C. E. J., Engebretson M. J., Moldwin M. B., Mende S. B., Singer H. J., Donovan E. F. (2009) Near-Earth initiation of a terrestrial substorm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 114(7). 2156—2202.
22. Reme H., Aoustin C., Bosqued J. M., Dandouras I., Lavraud B., Sauvaud J. A., et al. (2001) First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.* 19(10). 1303—1354.
23. 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.
24. Sarris T., Li X. (2005) Evolution of the dispersionless injection boundary associated with substorms. *Ann. Geophys.* 23. 877—884.
25. Sergeev V. A., Mitchell D. G., Russell C. T., Williams D. J. (1993) Structure of the tail plasma/current sheet at $11R_e$ and its changes in the course of a substorm. *J. Geophys. Res.* 98. 17345—17365.
26. Shukhtina M. A., Dmitrieva N. P., Popova N. G., et al. (2005) Observational evidence of the loading-unloading substorm scheme. *Geophys. Res. Lett.* 32. L17107. DOI: 10.1029/2005GL023779.
27. Torrence C., Compo G. P. (1998) A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 79(1). 61—78.
28. Yahnin A. G., Despirak I. V., Lubchich A. A., et al. (2006) Indirect mapping of the source of the oppositely directed fast plasma flows in the plasma sheet onto the auroral display. *Ann. Geophys.* 24. 679—687.
29. Yamaguchi R., Kawano H., Ohtani S., et al. (2004) Total pressure variations in the magnetotail as a function of the position and the substorm magnitude. *J. Geophys. Res.* 109. A03206. DOI:10.1029/2003JA010196.

Л. В. Козак^{1,2}, Б. А. Петренко¹, Е. А. Кронберг³,
Е. Е. Григоренко⁴, П. М. Козак⁵, К. Д. Река¹

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
і Государственного космического агентства Украины, Київ, Україна

³Інститут Макса Планка, Геттінген, Німеччина

⁴Інститут космічних досліджень Російської академії наук

⁵Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ІЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРИ ИНИЦИАЦИИ СУББУРИ

Рассмотрена цепочка событий, которая сопровождает проявление суббури в ионосфере и магнитосфере Земли. Указано на особенности геомагнитных пульсаций и механизмы их генерации. Проанализировано измерения из четырех космических ап-

паратов миссии «Кластер-2». Для исследования флуктуаций магнитного поля использовались данные феррозондовых магнитометров (частота опроса 22.4 Гц), а для анализа флуктуаций температуры, скорости и концентрации электронов и разных видов ионов — измерения из экспериментов PEACE и CIS-CODIF (частота опроса 0.125...0.25 Гц). Получено, что во время инициации суббури, которая сопровождалась диполяризацией (резким изменением конфигурации магнитного поля от вытянутых в хвост силовых линий к более дипольной структуре), наблюдается изменение плазменных параметров. В частности, зафиксировано изменение концентрации, существенное увеличение температуры, а также увеличение флуктуаций составляющих скорости с возрастанием z -составляющей. При этом зафиксирована задержка во времени разогрева протонов и ионов кислорода, а также задержка изменения концентрации. Во время суббури концентрация протонов на порядок превышает концентрацию ионов гелия и почти на два порядка превышает концентрацию ионов кислорода, альвеновская скорость близка к 470 км/с, а параметр β , который характеризует отношение теплового давления к магнитному, больше единицы. С использованием вейвлет-анализа проведено сравнение волновых характеристик для разных давлений. Рассмотрено давление магнитного поля, а также динамическое и тепловое давление для разного сорта частиц. Во флуктуациях давлений магнитного поля, теплового давления электронов и протонов зафиксированы Pc5-пульсации (150...600 с) и мощные Pc4-пульсации (45...150 с), а также прямые и обратные каскады. При этом прямые каскады указывают на распад больших структур, в результате которого будет наблюдаться переход от меньших частот к большим, а обратный каскад, наоборот, характеризуется переходом от большей частоты к меньшей, и наличием слияния/самоорганизацией малых структур в структуры побольше. Полученные результаты указывают на существенную роль кинетических эффектов в сложной цепочке процессов в магнитосфере Земли в период взрывной фазы суббури.

Ключевые слова: суббури, хвост магнитосферы Земли, Pc-пульсации, магнитное, тепловое и динамическое давление, давление электронов.

*L. V. Kozak^{1,2}, B. A. Petrenko¹, E. A. Kronberg³, E. E. Grigorenko⁴,
P. M. Kozak⁵, K. D. Reka¹*

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

³Max Planck Institute for Solar System Research, Gottingen, Germany

⁴Space Research Institute of Russian Academy of Science (IKI), Moscow, Russia

⁵Astronomical Observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine

CHANGES OF PLASMA PARAMETERS IN EARTH MAGNETOSPHERE TAIL DURING SUBSTORM INITIALIZATION

A chain of events accompanying appearance of a substorm in Earth ionosphere and magnetosphere is considered. Features of geomagnetic pulsations and mechanism of their generation are indicated. Measurements of magnetic field fluctuations from ferro-probe magnetometers (sample rate 22.4 Hz), and also the data on temperature, velocity, and density of electrons, and different types of ions from the experiment PEACE and CIS-CODIF (sample rate 0.125...0.25 Hz) of space mission Cluster-2 have been analyzed. It was obtained that during the initiation of substorm, which was accompanied by dipolarization (sharp change of magnetic field configuration from the elongated to the tail force lines to more dipole structure) one can observe changing the plasma parameters. In particular it was registered the changes of concentration, significant increase of temperature, and increasing fluctuations of the velocity components with the increase of z -component. The time shift of heating protons and oxygen ions, and also density changing was detected. During the

substorm electron density exceeds in order one of helium ions, and almost in two orders one of oxygen ions; Alfven velocity is near 470 km/s, and parameter beta characterizing the ratio of thermal pressure to magnetic one exceeds a unity. Using wavelet analysis the comparison of wave characteristics for different pressures was carried out. The pressure of magnetic field, and also dynamic and thermal pressure for different types of particles was considered. In fluctuations of the magnetic field pressure, thermal pressure of electrons and protons the Pc5 and powerful Pc4 pulsations (45...150 s), and also direct and inverse cascades was observed. At this the direct cascades point to the decay of larger structures, as a result of which one could observe the transfer from lower to higher frequencies, and on the contrary the reverse cascades are characterized by the transfer from higher to lower frequencies, and by the presence of merging (self-organization) of small structures into larger ones. The obtained results point to significant role of kinetic effects in the complex chain of processes in Earth magnetosphere in the period of explosive phase of substorm.

Keywords: substorm, Earth magnetosphere tail, Pc pulsations; magnetic, thermal and dynamic pressure in Earth magnetosphere tail; role of electrons in Earth magnetosphere.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2019

Після доопрацювання 06.09.2019

Прийнята до друку 04.10.2019