

УДК 533.951

О. В. Агаптов, О. П. Верхоглядова, В. М. Івченко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Хвилі стиснення в магнітосфері Землі: інтерпретація спостережень супутника «Інтербол-1»

Надійшла до редакції 19.07.01

Проаналізовані дані вимірювань магнітного поля і плазмових параметрів, які були одержані КА «Інтербол-1» в ранковому секторі середнього хвоста магнітосфери на відстанях близько 10—25 R_E від центра Землі. За допомогою спектрального аналізу та вейвлет-перетворення вивчено зв'язування повільних магнітозвукових та альвенівських хвиль. В областях хвильової активності знайдено вихрові утворення в плазмі. Вони чітко визначаються за сплесками у компоненті вектора Пойнтінга вздовж локальної силової лінії магнітного поля. Показано існування зв'язку вихрових структур в плазмовому шарі магнітосфери Землі з хвилями стиснення типу Pc5,6. Запропоновано механізм утворення вихрових структур в плазмовому шарі в результаті розвитку нелінійних збурень.

ВСТУП

В магнітосфері Землі під час супутникових та наземних вимірювань часто реєструються вихрові утворення. Розміри вихрових структур змінюються в широких межах від $0.1R_E$ (R_E — радіус Землі) в іоносфері, де вони утворюються за рахунок внутрішніх нестійкостей плазми, до декількох R_E в далекому хвості магнітосфери, де за їхню генерацію відповідають крайові ефекти.

Проект «Інтербол» орієнтовано на дослідження тонкої структури магнітосфери Землі та взаємодії між різними її частинами в залежності від змін у сонячному вітрі. У межах проекту виконувались координовані вимірювання за допомогою чотирьох супутників — хвостового та аврорального зондів, кожний у супроводі власного субсупутника [9]. Одночасні вимірювання на борту супутника і на борту недалеко розташованого від нього субсупутника дають змогу розрізнити часові зміни фізичних параметрів та просторові зміни, які спостерігаються внаслідок руху зонда у просторі. Пара космічних апаратів «Інтербол-1» і «Магіон-4» з апогеєм орбіти близько 190000 км і періодом обертання близько 4 діб призначена для вивчення процесів у хвості магнітосфери.

Робота ґрунтується на даних вимірювання магнітного поля, які було одержано за допомогою

магнітометра MIF-M на борту КА «Інтербол-1». Цей прилад вимірює три компоненти сталого магнітного поля та його низькочастотні флуктуації [9]. У роботі використано експериментальні дані по температурі і концентрації плазми, які одержано за допомогою плазмового аналізатора CORALL [18]. На основі аналізу орбітальних даних зонду «Інтербол-1», вимірювань магнітного поля, швидкості плазмових потоків, температури і густини плазми визначені низькочастотні геомагнітні періодичні пульсації та досліджені їхні спектрально-часові характеристики. Виділені вихрові структури в плазмовому шарі та вивчені їхні властивості. Статистично встановлено взаємозв'язок вихрових рухів з періодичними пульсаціями типу Pc-5, 6.

ВЛАСТИВОСТІ ХВИЛЬ СТИСНЕННЯ ТА ВИХРОВИХ РУХІВ ПЛАЗМИ

Низькочастотні збурення у магнітосфері Землі розділяються на періодичні пульсації (Pc — pulsation continuos) і неперіодичні пульсації (Pi — pulsation irregular). Геомагнітні пульсації спостерігаються понад сто років за допомогою наземних магнітометрів. В залежності від періоду вони умовно розподіляються на шість типів. Пульсації з різними періодами відрізняються своїми фізичними харак-

теристиками і спричиняються різними механізмами генерації. У 1960 р. було показано, що низькочастотна хвиля спостерігається одночасно на обох кінцях однієї силової лінії геомагнітного поля (див., наприклад, огляд [8]). Це доводило поширення хвиль вздовж силових ліній. Супутникові дослідження, що розпочалися у 1965 р., дали змогу вивчити просторову структуру цього низькочастотного збурення. КА «Експлорер-26» зареєстрував збурення геомагнітного поля вздовж траєкторії польоту [8]. Мультисупутникові дослідження (GOES-2, 3 і ISEE-1, 2) показали, що в деяких випадках періодичні пульсації набувають вигляду стоячих хвиль вздовж силової лінії геомагнітного поля [13].

У даній роботі головна увага приділяється найбільш низькочастотним пульсаціям типу Pc-5, 6 з періодами понад 150 с. У спостереженнях досліджуваних низькочастотних коливань виявляють себе як хвилі стиснення-збурення магнітного поля, що супроводжуються збуреннями теплового тиску плазми. На основі попередніх досліджень хвильових процесів цього типу можна коротко описати їхні основні властивості. Pc-5, 6 проявляються як збурення повздовжньої відносно незбуреного магнітного поля та поперечної, в меридіанальній площині, складових геомагнітного поля з амплітудою 10—40 % від фонового значення [13]. Часто при цьому реєструються збурення потоку низькоенергетичних (з енергіями близько 25 кеВ) іонів з амплітудою порядку 10—20 % від фонового значення у протифазі зі збуреннями магнітного поля (наприклад у вимірюваннях пар геостационарних супутників у 1977 та 1979 р.) [12, 13, 16]. Потоки електронів з енергіями 25 кеВ збурюються як у фазі, так і у протифазі зі збуреннями магнітного поля — відповідно синфазні та протифазні події. Синфазні події локалізовані переважно у нічному секторі при локальному часі близько 20—24 LT [16]. Статистичне дослідження спостережень Pc-5, 6 проведене за матеріалами проекту ISEE (грудень 1977 — січень 1979 рр.) показало, що більшість протифазних подій реєструвалася на флангах магнітосфери у приекваторіальній області, причому переважно у ранковому секторі [8, 13, 16, 17]. Амплітуда збурень також максимальна саме на флангах [6]. Кількість спостережень максимальна при значенні $K_p = 4$ [16]. Реєстрація низькочастотних пульсацій характерна для фази відновлення після геомагнітної бурі з індексом $D_{st} \approx -35$ нТ [12]. Азимутальна просторова структура хвиль вивчена краще, ніж радіальна. Із спостережень супутників GOES2 і GOES3, а також GEOS3 і геостационарних супутників 1979 р. [12] було встановлено, що азимутальна довжина хвилі для біль-

шості спостережень становить у середньому $1R_E$. Азимутальна швидкість поширення хвилі у західному напрямку оцінюється як 10 км/с, а хвильове число дорівнює 40—110. Вздовж магнітної силової лінії хвилі мають стоячу структуру з довжиною хвилі близько $3R_E$. Радіальна структура досліджувалася супутниками ISEE1, ISEE2, SCATHA. Було показано, що хвилі реєструються практично на всіх магнітних оболонках, і радіального компонента хвильового вектора майже немає [11, 12, 16]. Поздовжня складова відносно локальної силової лінії геомагнітного поля, або складова стиснення, має мінімум на самому екваторі, проте швидко збільшується при віддаленні від нього і там переважає поперечні складові. Крім магнітного поля, збурюється також і тепловий тиск плазми. Причому різниця фаз коливань магнітного і газокінетичного тисків плазми складає 180° у переважній більшості випадків. Ця ознака процесу характерна саме для хвильової активності типу Pc-5, 6 [8, 11, 12, 16].

На основі спостережень хвиль стиснення можна виділити основні характеристики цих процесів:

- спостерігається антиподібна поведінка (коливання у протифазі) газокінетичного тиску іонного компонента плазми й тиску магнітного поля;
- хвилі стиснення найбільше проявляють себе у повздовжньому відносно магнітного поля напрямку;
- частота хвильового процесу належить до діапазону Pc-5, 6;
- спектр часто має гармонічну структуру з кількома гармоніками основної частоти;
- квазісинусоїдальний сигнал спостерігається протягом 3 год;
- хвильові процеси локалізовані переважно в ранковому секторі магнітосфери Землі на низьких геомагнітних широтах;
- має місце кореляція з плазмовим параметром β , який показує відношення плазмового тиску P_T до тиску магнітного поля $P_M = B^2/8\pi$: амплітуда хвилі приблизно пропорційна β (виникнення хвиль стиснення при $\beta \ll 1$ не реєструвалося. Частіше всього $\beta \propto 1$);
- хвильовий процес пов'язаний з геомагнітною активністю і еволюцією кільцевого струму у магнітосфері Землі. Існує кореляція з індексами D_{st} та K_p . Частіше від усього хвилі стиснення спостерігаються під час фази відновлення після геомагнітної бурі.

У ближній магнітосфері періодичні пульсації типу Pc-5, 6 проявляються як стояча альвенівська

хвиля вздовж силової лінії магнітного поля. Зазначимо, що для досліджуваних просторових областей альвенівська швидкість складає 1000 км/с. При періодах 150—1000 с довжина хвилі відповідного альвенівського процесу складатиме $25\text{--}160R_E$, що наближається до розмірів магнітосфери. Таким чином, розглядати процес як альвенівську хвилю не можна. Крім того, поряд зі збуреннями магнітного поля впоперек локальної силової лінії спостерігаються збурення магнітного поля у поздовжньому напрямку і збурення густини плазми. Для низькочастотних хвиль у наближенні ідеальної МГД показано, що коливання магнітного та газокінетичного тисків відбуваються у фазі для швидкої магнітозвукової хвилі, і у протифазі — для повільної магнітозвукової [3], причому хвилі другого типу існують лише у теплій плазмі. Отже, на основі експериментальних даних можна припустити, що хвилі стиснення є комбінацією збурень альвенівського типу і повільної магнітозвукової хвилі.

Непередбаченим результатом проекту ISEE було відкриття великомасштабних вихрових рухів плазми у плазмовому шарі. В результаті цілеспрямованого аналізу даних виділено 169 вихрових подій за перших 19 місяців вимірювань в рамках проекту ISEE [7]. На основі циклу робіт з дослідження цих вихрових подій [6, 7 та ін.] можна виділити такі властивості:

- період повного оберту вектора швидкості складає 5—20 хв;
- площина вихрового руху майже перпендикулярна до силових ліній незбуреного магнітного поля;
- плазмовий параметр β приблизно дорівнює 1;
- вихрові події локалізовані у плазмовому шарі;
- вихрова активність пов'язується переважно з ранковим сектором магнітосфери Землі;
- поодинокі вихорі можуть об'єднуватись, утворюючи вихрові доріжки;
- при проходженні вихрової структури КА реєструється зміна не тільки напрямку вектора швидкості, але і його модуля;
- значення індексу геомагнітної активності K_p лежали у межах 2—4.

Одна з теоретичних моделей утворення вихрових структур у іоносфері та магнітосфері Землі була запропонована Чмирьовим, Похотеловим та ін. у роботі [5]. У цій моделі розглядаються збурення швидкості, магнітного та електричного полів у площині, перпендикулярній до фонового магнітного поля. Збуреннями фізичних величин уздовж силової лінії магнітного поля, тобто збуреннями магнітозвукового типу, нехтують. Дана модель не може бути безпосередньо застосована для пояснен-

ня механізмів генерації хвиль стиснення типу Pc-5, 6. Вихрові структури можуть утворюватися на нелінійній стадії розвитку альвенівського хвильового процесу. Проте реальні пульсації поєднуються з повільними магнітозвуковими хвилями, що ми і спостерігаємо експериментально. Ми вважаємо, що запропонований у роботі [5] підхід відкриває можливість пояснення зв'язку між цими хвилями і вихровими подіями на нелінійній стадії розвитку хвильового процесу.

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Як було зазначено вище, для хвильового процесу типу Pc5,6 характерні коливання магнітного та плазмового тисків у протифазі. Тому для початкового виділення часових інтервалів хвильової активності було застосовано методику, яка базується на методах кореляційного аналізу рядів. При виділенні інтервалів вводимо поняття антикореляції. Для окремого невеликого інтервалу даних коефіцієнт антикореляції показує ймовірність того, що відрізок належить до інтервалу антизбігів двох досліджуваних рядів даних, наприклад вимірювань магнітного та газокінетичного тисків. Таким чином, обчислюючи ймовірність для всього масиву даних, можна отримати інтервали хвильової активності типу Pc-5, 6 з будь-якою вірогідністю. Детальніше методику пошуку інтервалів антикореляції двох масивів даних можна знайти у роботах [14, 15]. Надалі, щоб проілюструвати застосування методики обробки, будемо використовувати дані зонду «Інтербол-1» за 23 жовтня 1996 р.

Усі послідовні перетворення проводимо в системі координат GSM, обраній таким чином, щоб вісь X була напрямлена з центра Землі до Сонця, площина XOZ містила в собі вісь земного магнітного диполя, а вісь Y складала з ними праву трійку векторів. Незбурене магнітне поле може визначатися із різних моделей (наприклад, із моделі Циганенка 1996 р.). Для днів з невисокою сонячною активністю це дає непогані результати, але для днів з великими збуреннями, характерними для магнітних бур чи для фази відновлення після магнітної бурі, кращі результати можуть бути одержані шляхом знаходження локального середнього для магнітного поля й використання його як незбуреного фону.

Перетворення Фур'є дає максимально можливе розділення по частоті, але не дає жодної часової інформації, тобто малоефективне для опису процесів, які еволюціонують у часі. Для одержання часового розділення використовують перетворення

Фур'є на коротких інтервалах. Це — перетворення Фур'є для масиву даних, який згорнуто в найпростішому випадку зі сталим по частоті фільтром. Результатом є набір послідовних спектрів, які зручно подати у вигляді тривимірної діаграми. Така методика має ряд недоліків, головним із яких є зменшення кількості точок масиву даних, що зменшує достовірність отриманих спектрів. Наступним якісним кроком у частотно-часових дослідженнях є вейвлет-перетворення, теоретичні основи якого були розроблені наприкінці 1980-х рр. Метод вейвлет-аналізу часових рядів дозволяє досліджувати некогерентні процеси в широкому діапазоні частотно-часових характеристик [1].

В загальному випадку вейвлет-перетворення має вигляд

$$W(\tau) = \frac{1}{|\omega|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g^*[\omega(t - \tau)]dt = |\omega|^{-1/2} \int x(z/\omega + \tau)g^*(z)dz, \quad (1)$$

де $x(t)$ — досліджуваний сигнал, ω — циклічна частота, g^* — комплексно спряжена до ядра вейвлет-перетворення величина. Для вейвлет-перетворення характерні деякі математичні та статистичні властивості [2]:

- вейвлет сталої функції дорівнює нулю;
- для вейвлет-аналізу існує аналог співвідношення невизначеностей в квантовій механіці: чим більше розділення по частоті, тим менше розділення по часу;
- обмеженість на нескінченності норми ядра вейвлету $\int |g(t)|^2 dt < \infty$.

Для обробки сигналів квазісинусоїдальної форми, яку, наприклад, мають хвилі типу Pc-5, 6, зручно проводити розклад за гармонічними функціями. Це обумовило вибір вейвлету Морле у нашому дослідженні серед множини ядер вейвлет-перетворення. Ядро Морле має вигляд

$$g(z) = \exp(-cz^2)(\exp(iz) - q), \quad (2)$$

де $q = \exp[-1/(4c)]$, c — константа, яка визначає форму обвідного контуру вейвлету. Чим більше c , тим менша ефективна ширина нормального розподілу Гаусса, що є обвідним контуром вейвлету Морле. Змінюючи c , можна змінювати розділення вейвлет-перетворення по частоті та у часі згідно з співвідношенням невизначеності. Причому збільшення c збільшує розділення по часу, а зменшення — збільшує розділення по частоті, але одночасно і часову невизначеність. У граничному випадку, коли c прямує до нуля, а півширина обвідного контура — до нескінченності, отримуємо перехід до

перетворення Фур'є. Таким чином, до кожного конкретного випадку константу c необхідно вибирати згідно з вимогами до результатів та фізичними особливостями сигналів, що обробляються. В нашому випадку c було вибрано таким чином, щоб ефективний час вейвлет-перетворення дорівнював трьом-п'яти характерним періодам процесу.

В роботі було використано скорочений вейвлет Морле у вигляді

$$g(z) = \exp(-cz^2)\exp(iz), \quad (3)$$

застосовний за умови приведення даних до локального нульового середнього [1].

Було проведено дослідження вейвлет-перетворення магнітного та плазмового тисків. Були виявлені хвильові процеси на частотах, характерних для хвиль типу Pc-5, 6 (періоди 6—20 хв). Часові інтервали, на яких були знайдені ці процеси, збігаються з інтервалами, які були визначені з використанням методів антикореляції. За допомогою вейвлет-перетворення можна дослідити фазову картину хвильового процесу. Для цього потрібно розглянути дійсну частину перетворення (1). Таким чином, розглядаючи фази коливань магнітного та плазмового тисків, можна підтвердити їх антикореляцію і належність до хвиль стиснення. На рис. 1 подано фазову картину хвильової поведінки магнітного та плазмового тиску методом контурних

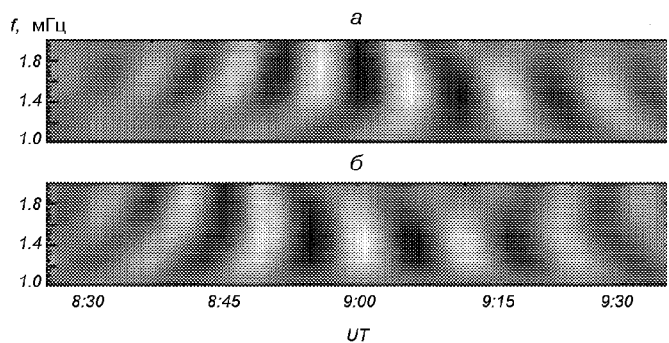


Рис. 1. Фазова діаграма поведінки магнітного та плазмового тисків для 23 жовтня 1996 р. Зверху — вейвлет перетворення даних по магнітному тиску, знизу — плазмового. Коливання знаходяться у протифазі

діаграм. При розгляді виділених хвильових процесів о 8-й та о 10-й год спостерігається антиподібна поведінка — максимальна фаза магнітного тиску відповідає мінімальній фазі плазмового тиску. Видно, що хвильовий процес має місце протягом 6-7 періодів.

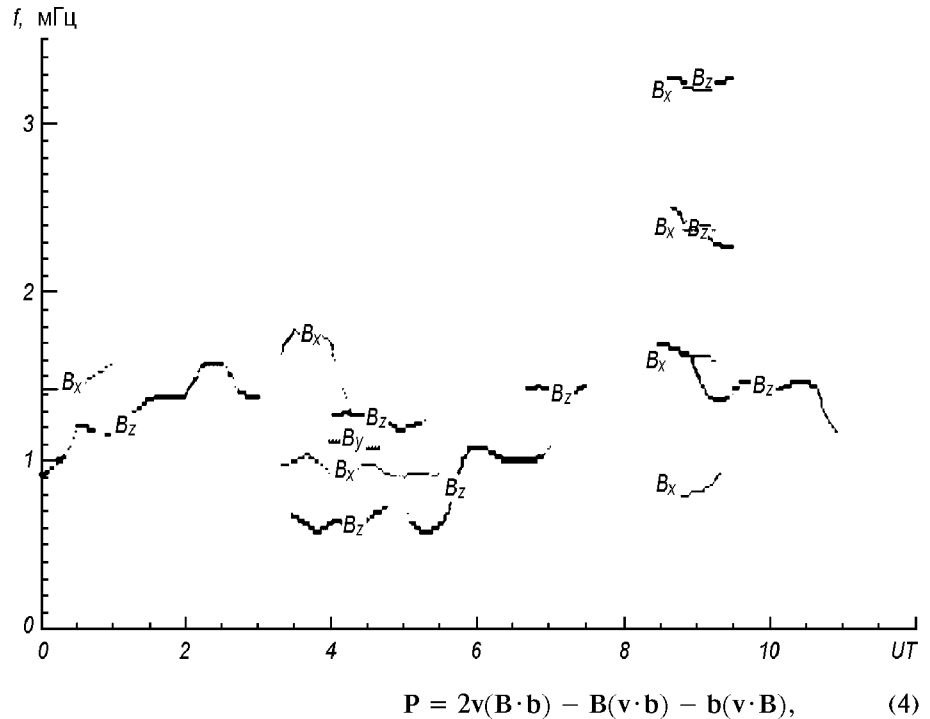
Рис. 2. Модуль вейвлет-перетворення збурення складових магнітного поля для 23 жовтня 1996 р.

При дослідженні вейвлетів різних компонентів магнітного поля були з'ясовані закономірності розподілу інтенсивності. На рис. 2 показано модуль вейвлет-перетворення складових збуреного магнітного поля в обраній системі координат для 23 жовтня 1996 р. Найінтенсивнішою є поздовжня складова відносно локального магнітного поля (Z -компонент). В Y -компоненті хвильової активності практично немає. Ці результати добре узгоджуються з даними по Рс-5, 6 інших супутникових досліджень (GOES, ISEE1, ISEE2), і їх можна інтерпретувати як прояв хвиль магнітозвукового типу, а враховуючи антикореляцію магнітного та плазмового тисків можна припустити і наявність повільного магнітного звуку. Оскільки є хвильова активність з поперечною X -поляризацією, то можливо, є і зв'язок альвенівських та повільних магнітозвукових хвиль. При розгляді вейвлету в залежності від модуля фонового магнітного поля спостерігається пороговий характер хвильової активності [4].

Крім хвильових процесів, що проходять з характерною антикореляцією магнітного та плазмового тисків, при дослідженні вейвлетів були знайдені й інші періодичні збурення (рис. 2, період часу від 2^h до 3^h30^m). За комплексом ознак (активніший поперечний компонент, слабкі прояви хвильової активності у тиску плазми) можна припустити, що це альвенівські хвилі.

За даними приладу CORALL за характеристиками теплової плазми були досліджені великомасштабні рухи плазми та знайдені вихрові структури. За допомогою методу мінімуму варіацій [10] виявлено, що ці вихрові структури суто тривимірні, причому площина локалізації процесу залежить від напрямку фонового магнітного поля. Це також було підтверджено статистично [14].

Були досліджені потоки енергії вздовж магнітного поля під час вихрових подій шляхом розрахунку компонента вектора Пойнтінга вздовж локальної силової лінії магнітного поля. Вектор Пойнтінга було взято в наближенні ідеальної МГД [7]:



$$P = 2v(\mathbf{B} \cdot \mathbf{b}) - \mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) - \mathbf{b}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}), \quad (4)$$

де \mathbf{v} — гідродинамічна швидкість теплової плазми, \mathbf{B} та \mathbf{b} — незбурене та збурене магнітне поле.

Поведінка вектора Пойнтінга для 23 жовтня 1996 р. показана на рис. 3. У момент 9^h20^m чітко локалізується різке збурення. Модуль вектора Пойнтінга під час цього збурення збільшується на 3—4 порядки, що вказує на перенос енергії вздовж локальної силової лінії. В деяких роботах зазначається, що ці збурення збігаються у часі з вихровими подіями, що узгоджується з результатами ISEE1, ISEE2 [6]. Щоб підтвердити отримані результати, було проведено дослідження повороту вектора швидкості в площині, перпендикулярній до силової лінії локального магнітного поля та годог-

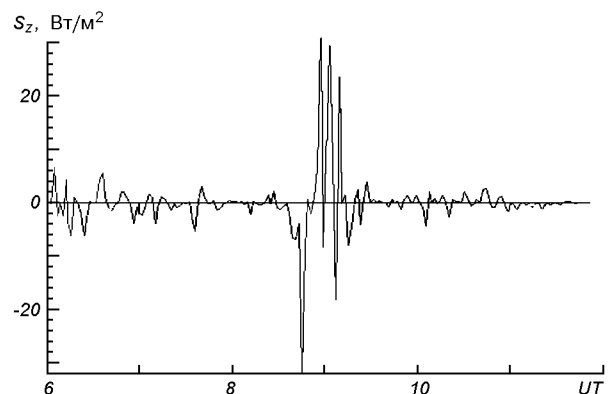


Рис. 3. Поведінка поздовжнього компонента вектора Пойнтінга для 23 жовтня 1996 р.

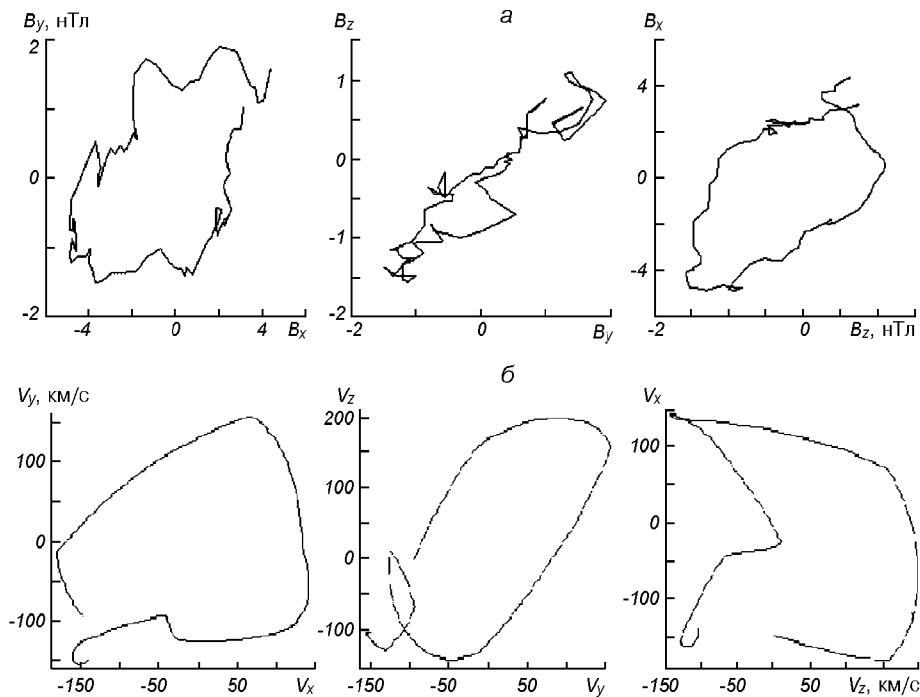


Рис. 4. Годограф збурень магнітного поля (а) та гідродинамічної швидкості теплової плазми (б) у площині, перпендикулярній до локальної силової лінії для вихрової події $8^{\text{h}}50^{\text{m}}\text{--}9^{\text{h}}30^{\text{m}}$ 23 жовтня 1996 р.

рафа вектора швидкості і збурень магнітного поля (рис. 4). На рис. 4, а показана поведінка вектора збуреного магнітного поля під час вихрового явища в трьох проекціях на координатні площини системи координат GSE. За час спостереження проекції вектора здійснюють повний оберт. На рис. 4, б подано проекції годографів вектора збурення магнітного поля та вектора швидкості течії плазми за час з $9^{\text{h}}20^{\text{m}}$ по $9^{\text{h}}27^{\text{m}}$. Попередня оцінка розмірів знайдених вихрових структур дає поперечний розмір вихору менше або порядку R_E .

Ці структури локалізуються в площині, майже перпендикулярній до магнітного поля, аналогічно альвенівському вихору [5]. Переважна більшість подій зареєстрована у ранковому секторі магнітосфери (рис. 5).

З рис. 1 і 3 можна побачити, що вихрова подія проходить одночасно з хвильовим збуренням типу Pc-5, 6. Інтервали, на яких були знайдені хвилі стиснення, та інтервали з вихровими подіями корелюють з коефіцієнтом кореляції між ними 0.75—0.9. Цей результат дає змогу зробити припущення про зв'язок вихрових структур в плазмовому шарі магнітосфери Землі з хвилями стиснення типу Pc-

5, 6. Можна припустити, що внаслідок великої амплітуди хвиль (15—30 % від фону) процес переходить в нелінійну стадію розвитку, одним з проявів якої в плазмовому шарі є альвенівський вихор.

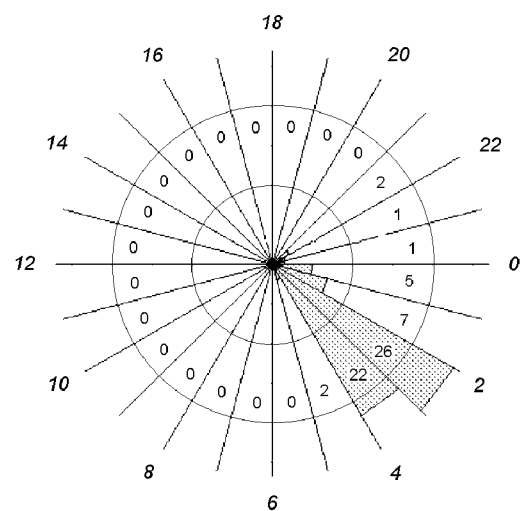


Рис. 5. Розподіл кількості вихрових подій по локальному часу

ВИСНОВКИ

У роботі проаналізовані дані вимірювань магнітного поля і плазмових параметрів, які були одержані КА «Інтербол-1». Дослідження проводилися для даних, отриманих в ранковому секторі середнього хвоста магнітосфери на відстанях $10\text{--}25R_E$ від центра Землі. Виділені часові інтервали антикореляції тиску магнітного поля та теплового тиску плазми. Діапазон частот хвиль ($0.1\text{--}0.2$ мГц), як і зазначена антиподібна поведінка тисків, дають змогу впевнено віднести знайдені процеси до хвиль стиснення типу Pc-5, 6. Поляризаційні особливості хвиль, досліджені за допомогою вейвлет-перетворення, вказують на зв'язок повільних магнітозвукових та альвенівських хвиль.

В областях хвильової активності знайдено вихрові утворення в плазмі. Вони чітко визначаються за сплесками у компоненті вектора Пойнтінга вздовж локальної силової лінії магнітного поля. Вихрові структури забезпечують перенос енергії вздовж поля. Знайдені структури знаходяться далеко від магнітопаузи та від головних струмових систем, тому їхня генерація не може бути пояснена граничними ефектами. Показано існування зв'язку вихрових структур у плазмовому шарі магнітосфери Землі з хвилями стиснення типу Pc-5, 6. На наш погляд, перспективним напрямком досліджень є пошук механізмів утворення вихрових структур у плазмовому шарі як нелінійної стадії розвитку хвиль типу Pc-5, 6 [5, 14].

Робота частково підтримувалась грантом INTAS 99-0078. Автори вдячні колегам з Інституту космічних досліджень РАН за обговорення результатів. Дані вимірювань магнітометра MIF-M надані С. О. Романовим (ІКД РАН), а дані плазмового аналізатора CORALL — Ю. І. Єрмолаєвим (ІКД РАН).

1. Андронов И. Л. Всплеск-анализ временных рядов методом наименьших квадратов с дополнительными весами // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 6.—С. 490—511.
2. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук.—1996.—166, № 11.—С. 1145—1170.
3. Половин Р. В., Демущкий В. П. Основы магнитной гидродинамики. — М.: Энергоатомиздат, 1987.—208 с.
4. Agapitov A. V., Verkhoglyadova O. P. Peculiarities of ULF waves in the tail of Earth magnetosphere // Proc. Inter. Symp. «From solar corona through interplanetary space, into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites, and ground-based observations». — Kyiv, 2000.—P. 15.
5. Chmyrev V. M., Bilchenko S. V., Pokhotelov O. A., et al. Alfvén vortices and related phenomena in the ionosphere and the

- magnetosphere // Physica Scripta.—1988.—38.—P. 841—854.
6. Hones E. W., Birn Jr. J., Bame S. J., et al. New observations of plasma vortices and insights into their interpretation // Geophys. Res. Letters.—1983.—10, N 8.—P. 674—677.
7. Hones E. W., Paschmann G., Bame S. J. Vortices in magnetospheric plasma flow // Geophys. Res. Letters.—1978.—5, N 12.—P. 1059—1062.
8. Hughes W. Magnetospheric ULF Waves: A tutorial with a historic perspective // J. Geophys. Res.—1991.—96, N A11.—P. 1811—1822.
9. Klimov S., Romanov S., Amata E., et al. ASPI experiment: measurements of fields and waves onboard the Interball-1 spacecraft // Ann. Geophys.—1997.—15.—P. 514—527.
10. Motschmann U., Woodward T. I., Glassmeier K.-H., Southwood D. J. Wave field analysis by magnetic measurements at satellite arrays: generalized minimum variance analysis // Adv. Space Res.—1996.—18, N 8.—P. (8)315—(8)319.
11. Southwood D. J., Hughes W. J. Theory of hydromagnetic waves in the magnetosphere // Space Sci. Rev.—1983.—35.—P. 301—366.
12. Takahashi J., Fennell F., Amata E., Higbie P. R. Field-aligned structure of storm time Pc 5 wave of November 14—15, 1979 // J. Geophys. Res.—1988.—92, N A6.—P. 5857—5864.
13. Takahashi K., Higbie P. R., Baker D. N. Azimuthal propagation and frequency characteristic of compressional Pc 5 waves observed at geostationary orbit // J. Geophys. Res.—1985.—90, N A2.—P. 1473—1485.
14. Verkhoglyadova O., Agapitov A., Andrushenko A., et al. Compressional wave events in the dawn plasma sheet observed by Interball-1 // Ann. Geophys.—1999.—17.—P. 1145—1154.
15. Verkhoglyadova O., Agapitov A., Ivchenko V., et al. Study of vortices in the dawn plasma sheet using Interball-1 data // Interball in the ISTP program / Eds D. G. Sibeck, K. Kudela. — Kluwer, 1999.—P. 265—275.
16. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves in the Outer Magnetosphere. 1. Statistical Study // J. Geophys. Res.—1991.—96, N A11.—P. 19451—19457.
17. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves. 2. Case Study // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A1.—P. 241—252.
18. Yermolaev Yu. I., Fedorov A. O., Vaisberg O. L., et al. Ion distribution dynamics near the Earth's bow shock: first measurements with the 2D ion energy spectrometer CORALL on the INTERBALL/Tail-probe satellite // Ann. Geophys.—1997.—15.—P. 533—541.

COMPRESSION WAVES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE: INTERPRETATION OF INTERBALL 1 OBSERVATIONS

O. V. Agapitov, O. P. Verkhoglyadova, V. M. Ivchenko

The magnetic field data and plasma parameters obtained by Interball 1 in the morning sector of magnetospheric tail at a geocentric distance of about $10\text{--}25$ Earth radii are analyzed. Wave properties are investigated using the spectral and wavelet analyses. The slow magnetosonic and Alfvén wave coupling is studied. Vortical structures are found using the Poynting vector disturbances along the local magnetic field line. Association between the vortical structures and the compression waves of Pc 5, 6 type is found. The formation of vortical structures due to the development of nonlinear disturbances is discussed.