

Л. Козак^{1,2}, Б. Петренко¹, О. Кронберг³, А. Прохоренков¹,
О. Григоренко⁴, О. Черемних², С. Черемних², Е. Луї⁵, П. Козак¹, І. Кунделько¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

² Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
і Державного космічного агентства України, Київ, Україна

³ Інститут Макса Планка, Геттінген, Федеративна Республіка Німеччина

⁴ Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Російська Федерація

⁵ Університет імені Джона Хопкінса, Балтимор, США

ТУРБУЛЕНТНІ ПРОЦЕСИ У ХВОСТІ МАГНІТОСФЕРИ ЗЕМЛІ: СТАТИСТИЧНИЙ ТА СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Дослідження процесів у хвості магнітосфери істотно ускладнюються наявністю турбулентності за рахунок розвитку нестійкостей, у результаті яких відбувається «катастрофічна» перебудова потоку і структури магнітного поля. Складні турбулентні процеси, які спостерігаються у магнітосфері Землі, не вдається описати в рамках аналітичних моделей МГД-течій. Для розгляду властивостей турбулентності на великих часових і просторових масштабах слід залучати методи статистичної фізики і каскадні моделі, розвинені в гідродинамічних теоріях. При цьому з експерименту вдається визначити статистичні властивості турбулентності, пов'язані з масштабною інваріантністю. Даний підхід дозволяє отримати уявлення про фізичні властивості турбулентності плазми і дає можливість якісно і кількісно описати процеси переносу в турбулентних областях. В ході роботи проаналізовано властивості дрібномасштабної розвиненої турбулентності у хвості магнітосфери Землі за вимірами ферозондових магнітометрів трьох космічних апаратів місії «Кластер-2» з частотою опитування 22.5 Гц для 17 жовтня 2005 року. Для досягнення поставленої цілі було використано фрактальні та мультифрактальні методи дослідження, які були доповнені спектральним та вейвлет-аналізом. Зокрема було проведено: аналіз крил функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля (фрактальний розгляд); аналіз розширеної самоподібності (ESS-аналіз, мультифрактальний розгляд); аналіз спектральної густини потужності (спектральні дослідження); аналіз амплітуди та wavelet power spectral сигналу (вейвлет-аналіз). В ході виконання роботи отримані залежності порівнювалися з наявними на сьогодні моделями опису як однорідних, так і неоднорідних турбулентних процесів. В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що функція розподілу флуктуацій магнітного поля під час суббури вказує на негауссову статистику процесів, а також на надлишок великомасштабних збурень, що генеруються джерелом. При порівнянні структурних функцій флуктуацій магнітного поля під час ініціації суббури із моделями Колмогорова, Крейчана та ізотропною логнусаонівською 3D-моделлю із параметрами Ше і Левека отримано, що дані турбулентні процеси неможливо описати ізотропними однорідними моделями, і, крім того, вони характеризуються наявністю супердифузії. Відмічається суттєва відмінність спектрального індексу для моментів до і під час ініціювання суббури: так, до суббури спектральний індекс приблизно відповідає до моделі Колмогорова, а під час суббури він близький до індексу у моделі електрон-магніто-гідродинамічної турбулентності. Вейвлет-аналіз показав наявність як прямих, так і зворотних каскадних процесів, а також наявність Pc-пульсації.

Ключові слова: турбулентні процеси, хвіст магнітосфери Землі, моделі розвитку суббури, Pc-пульсації, спектри турбулентності у хвості магнітосфери Землі.

ВСТУП

На сьогоднішній день є два основних сценарії розвитку суббурі які відрізняються локалізацією — у першому підході, модель CD (Current Disruption — розрив струмового шару), суббуря розвивається на відстанях 6...15 радіусів Землі за рахунок маломасштабних розривів [6, 7, 28, 29], в іншому, модель NENL (Near-Earth Neutral Line), передбачається ініціація всередині хвоста на відстанях 15—30 радіусів Землі за рахунок великомасштабних процесів, які включають перез'єднання силових ліній [6, 7]. При цьому характер розвитку буде залежати як від процесів у сонячному вітрі, так і від внутрішнього стану магнітосфери безпосередньо до початку фази розширення. Протиставлення даних двох теорій розвитку суббурі відбувається тому, що у їхній основі закладено різні механізми кінетичної нестійкості. Для моделі NENL це головним чином розривна нестійкість, що розбиває струмовий шар на «магнітні волокна». Для моделі CD — нестійкість струму, що тече впоперек хвоста, яка визначається відношенням дрейфової і теплової швидкості іонів. Ця нестійкість має нижчий поріг, ніж розривна, тому її розвиток може створювати необхідні умови для початку магнітного перез'єднання [18, 30]. Обидва сценарії мають спільні закономірності: магнітне перез'єднання та неминуче поширення дипольризації у хвостову частину [29, 33]. Завдяки цьому вони однаково успішно забезпечують правильну інтерпретацію проявів суббурі, таких як прискорення частинок, дипольризацію, утворення струмового клину, інжекцію [6, 7]. Крім того, в рамках CD-моделі момент настання суббурі випереджає перез'єднання, а в рамках NENL — навпаки. Для перевірки цього порівнюють моменти початку суббурі на Землі з часом проходження супутника через область перез'єднання. Виявилось, що численні спостереження підтверджують першу і другу парадигму. При цьому різниця між цими моментами складає лише декілька хвилин, а точне їхнє знаходження ускладнюється наявністю так званих псевдорозривів [6, 27—29, 34].

Суттєву роль в характеристиках розвитку суббурі відіграють і важкі іони. Їхня наявність призводить до зміни товщини струмового шару та

його структури, зміни умов магнітного перез'єднання та виникнення нестійкості Кельвіна — Гельмгольца [26]. Важкі іони у магнітосфері мають переважно іоносферне походження за рахунок трьох факторів: сонячного жорсткого ультрафіолетового випромінювання, електромагнітної енергії при перез'єднанні на магнітопаузі та прискорення електронів. Перший фактор відповідає за іонізацію нейтральних компонентів, нагрівання та дисоціацію молекул. Другий та третій фактори спричинені змінами в сонячному вітрі та міжпланетному магнітному полі. Передостанній є фактично потоком вектора Пойтінга, який утворився внаслідок джоульовської дисипації. Ці ефекти підвищують температуру іонізованого компонента, а отже і висоту його перебування. На таких висотах взаємодія хвиля — частинка прискорює іони далі — у магнітосфері [6, 26].

Дослідження процесів у хвості магнітосфери істотно ускладнюються наявністю турбулентності за рахунок розвитку нестійкостей, у результаті яких відбувається «катастрофічна» перебудова потоку і структури магнітного поля [1, 8, 9]. Складні турбулентні процеси, які спостерігаються у магнітосфері Землі, не вдається описати в рамках аналітичних моделей МГД-течій. Для розгляду властивостей турбулентності на великих часових і просторових масштабах слід залучати методи статистичної фізики і каскадні моделі, розвинені в гідродинамічних теоріях. При аналізі дуже важливим є дослідження властивостей турбулентності в залежності від масштабу. Необхідно також враховувати, що властивості турбулентних процесів пов'язані не стільки з фізичними механізмами розвитку нестійкостей, скільки з симетріями, що описують масштабну інваріантність [36, 38].

Аналітично або чисельно розв'язати задачу про динаміку турбулентної плазми (у тривимірній геометрії) і визначити особливості турбулентності на великих часових масштабах в даний час не вдається, тому з експерименту визначають статистичні властивості турбулентності, пов'язані з масштабною інваріантністю, і отримують оцінки для показників степеня залежності параметрів плазми у припущенні степеневих законів.

Це дозволяє отримати уявлення про фізичні властивості турбулентності плазми і дає можливість якісно і кількісно описати процеси переносу в турбулентних областях [2, 4, 17, 23].

В ході виконання роботи статистичний розгляд особливостей розриву струмового шару у хвості магнітосфери Землі (подія 17 жовтня 2005 р.) доповнено спектральними дослідженнями: фур'є-та вейвлет-аналіз. При цьому вейвлет-розгляд дозволяє простежити за зміною спектральних властивостей сигналу з часом та вказати які частоти (масштаби) домінують в сигналі в кожен конкретний момент. Але слід відмітити, що спектральний аналіз, крім найпростіших випадків, не дозволяє визначити тип турбулентних процесів, особливо при наявності неоднорідності турбулентних процесів (переміжності).

МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ

Статистичний аналіз. Розподіл ймовірностей амплітуд флуктуацій найпростішого випадкового процесу підпорядковується гауссівському закону [2, 13, 22]. З поведінки функції розподілу густини ймовірності (*PDF*) можна визначити характерний просторовий або часовий масштаб, що визначається кроком, на якому *PDF* сигналу втрачає властивість гауссовості. При наявності неоднорідності турбулентних процесів ми спостерігаємо значне «розпливання» *PDF*. Вірогідність значних флуктуацій на крилах розподілу буде високою завдяки надлишку енергії великомасштабних збурень, що генеруються джерелом.

В теорії Колмогорова розглядаються структурні функції (моменти) порядку q для різниці швидкостей на просторовому масштабі, $v = v(x + l) - v(x)$, $S_q(l) \equiv \langle |\delta v|^q \rangle$, або в часі на масштабі τ , $\delta_\tau v = v(t + \tau) - v(t)$, $S_q(\tau) \equiv \langle |\delta_\tau v|^q \rangle$. Для турбулентного поля $X(t)$ структурна функція порядку q визначається як статистичне середнє по ансамблю співвідношень $\delta_\tau X = X(t + \tau) - X(t)$, $S_q(\tau) = \langle |\delta_\tau X|^q \rangle$. Статистичне усереднення $\langle \dots \rangle$ відбувається з ваговою функцією — функцією розподілу для $\delta_\tau X$. Дослідження структурних функцій еквівалентне дослідженню функції розподілу турбулентних флуктуацій. З практичної точки зору дослідити структурні функції простіше, їх можна вимірювати в експерименті. Метод структурних функ-

цій дозволяє детально описати неоднорідність розподілу на різних масштабах процесу. Для ізотропної розвиненої турбулентності Колмогоров розглянув турбулентний каскад і припустив, що в інерційному інтервалі $\eta \ll l \ll L$ (η — дисипативний, а L — глобальний масштаб) при великих числах Рейнольдса всі статистично усереднені моменти $S_q(l)$ поля швидкостей v на масштабі l залежать лише від середньої швидкості дисипації ϵ_l і даного масштабу l (властивість локальності). Ця теорія А. Н. Колмогорова була названа K41 [5]. В інерційному діапазоні теорія K41 припускає статистичну квазірівновагу флуктуацій і гауссівську статистику пульсацій швидкостей. Динаміка інерційного діапазону не залежить від способу генерації турбулентності і визначається інваріантом потоку енергії через цей інтервал: середній потік енергії зберігається. Скейлінги (тобто закони масштабної інваріантності) для $S_q(l)$ і для енергії дисипації ϵ_l при цьому [5, 35]:

$$S_q(l) \propto \langle |\delta v|^q \rangle \propto l^{\zeta(q)}, \langle \epsilon_l^q \rangle \propto l^{\tau(q)}$$

з взаємозалежними показниками $\zeta(q) = q/3 + \tau(q/3)$. Із міркувань розмірності А. Н. Колмогоров вивів знаменитий закон для спектру потоку енергії $E_k \propto k^{-5/3}$ (закон «п'яти третіх» для розвиненої ізотропної турбулентності в інерційному діапазоні). У моделі K41 $\zeta(q) = q/3$, що відображає факт однорідності турбулентних процесів. Нелінійна залежність $\zeta(q)$ від порядку q свідчить про іррегулярний перерозподіл енергії в турбулентних каскадах та порушення локальної однорідності турбулентності — «переміжності» (чергування вихорів з квазіламінарними потоками), а також вказує на відхилення *PDF* від гауссового закону.

У моделі Колмогорова K41 основним є припущення про локальний характер турбулентності. Це означає, що в інерційному інтервалі зміна енергії на даному масштабі визначається взаємодією тільки вихорів, які мають близькі значення хвильових чисел і тривалий час (більший ніж час «обертання» вихору) взаємодіють між собою. Взаємодія вихорів з сильно різними розмірами мала. У моделі K41 турбулентні вихори кожного масштабу однорідно заповнюють весь простір.

Наявність магнітних полів в міжпланетному середовищі може викликати сильну анізотропію

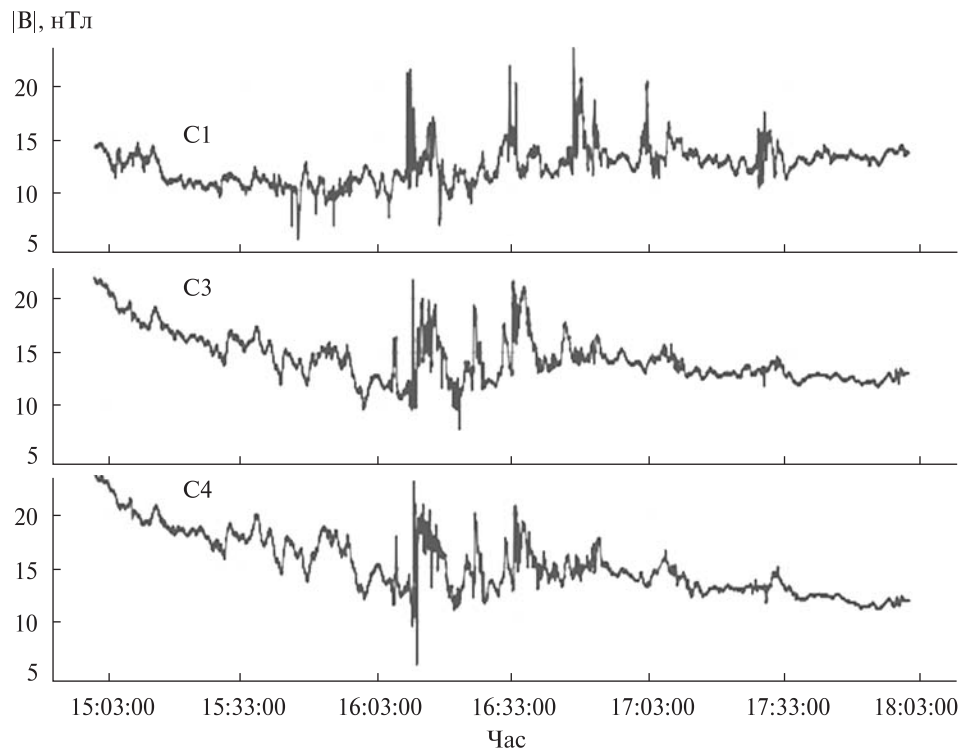


Рис. 1. Проаналізовані флуктуації магнітного поля космічних апаратів С1, С3 та С4 космічної місії «Кластер»

динамічних процесів у плазмі. Спробою адаптувати модель К41 до замагніченого середовища є двовимірна модель Ірошнікова — Крейчнана (ІК) [24, 25]. В рамках цього розгляду турбулентні збурення є малими по амплітуді і схожі на хвильові збурення, що поширюються уздовж середнього поля (альвенівська турбулентність). Спектр енергії для моделі ІК задається співвідношенням $E_{IK}(k) = \langle |\delta v(k)|^2 \rangle k^2 \propto k^{-3/2}$. При цьому у порівнянні з колмогорівським спектром значно зменшується рівень передачі енергії на малих масштабах і збільшується час передачі енергії. Залежність для структурних функцій в моделі ІК: $S_q(l) \propto l^{q/4}$.

У підході Крейчнана перебільшується вплив великомасштабних флуктуацій на еволюцію дрібномасштабних неоднорідностей: цей вплив зводиться до перенесення дрібномасштабних флуктуацій з малою їхньою деформацією (адіабатичне наближення). Незважаючи на недоліки, модель ІК широко використовується у багатьох роботах (наприклад, для інтерпретації властивостей турбулентності міжпланетної плазми, плазми в токамаках тощо).

Для аналізу моментів функції розподілу визначальною є наявність властивості розширеної самоподібності (ESS — extended self-similarity) [11]. При відносно низьких значеннях чисел Рейнольдса, коли у звичайному представленні $S_q(l) \propto l^{\zeta(q)}$ інерційний інтервал не виявляється, спостерігається залежність

$$S_q(l) \propto S_3(l)^{\zeta(q)/\zeta(3)}$$

для розширеного діапазону масштабів $l \geq 5\eta$, η — колмогорівський масштаб дисипації. Така властивість (її ще називають самоподібністю) спостерігається майже до масштабів дисипації.

Це феноменологічне спостереження призвело до вироблення критерію узагальненої самоподібності для довільної пари структурних функцій

$$S_q(l) \propto S_p(l)^{\zeta(q)/\zeta(p)}$$

Передбачається, що така самоподібність є проявом прихованих статистичних симетрій і

характеризує флуктуації в турбулентних потоках з переміжністю для великого діапазону чисел Рейнольдса. Використовуючи властивість розширеної самоподібності можна знайти з досить високою точністю $\zeta(q)$ і оцінити тип турбулентних процесів. При цьому нелінійна функціональна залежність $\zeta(q)$ від порядку моменту q для експериментальних даних є наслідком переміжності процесів. Для інтерпретації нелінійного спектру $\zeta(q)$ застосовують лог-пуассонівські моделі турбулентності, в яких показник степеня структурної функції визначається співвідношенням [3, 14, 37]:

$$\zeta(q) = (1 - \Delta) \frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1 - \beta} [1 - \beta^{q/3}],$$

де β і Δ — параметри, які характеризують переміжність і сингулярність дисипативних процесів відповідно. Важливо, що в рамках даної моделі розглядається стохастичний мультиплікативний каскад, і логарифм енергії дисипації описується пуассонівським розподілом. Для ізотропної тривимірної турбулентності Ше і Левек [37] запропонували $\Delta = \beta = 2/3$.

На практиці в результаті проведеного ESS-аналізу можна отримати значення параметрів лог-пуассонівської моделі β й Δ і використати їх для визначення особливостей турбулентного переносу плазми. У такому підході коефіцієнт узагальненої дифузії визначається через параметри структурної функції $\zeta(q)$ (переміжність і сингулярність) співвідношенням [12, 32, 40]

$$D \propto \tau^R, R = \Delta(1/\beta - 1).$$

Такий підхід використовується для оцінки переносу у статистично неоднорідному середовищі, а показник R у загальному випадку визначається фрактальними властивостями середовища.

Спектральний аналіз. Найбільш грубою характеристикою турбулентного середовища є спектральний індекс, що характеризує зміну спектральної густини потужності в інерційному інтервалі. При цьому інерційний інтервал обмежений низькими частотами, пов'язаними з великомасштабними джерелами енергії, і частотами, які відповідають дрібномасштабним дисипативним (кінетичним) процесам. Основним припущенням при статистичному (мультифрактальному) аналі-

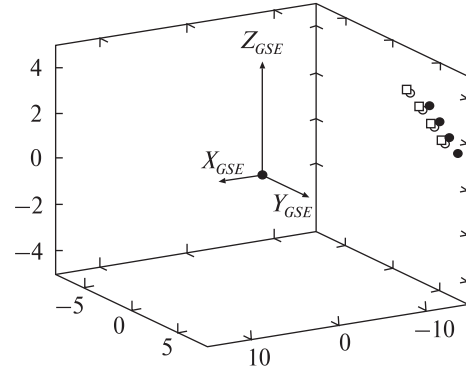


Рис. 2. Траєкторії космічних апаратів в GSE-системі координат (світлі кружки — КА С1, квадратики — КА С3, темні кружки — КА С4)

зу є те, що сигнал, який ми розглядаємо, приймається стаціонарним, тобто характерні часи не змінюються у межах розглянутого інтервалу. Однак для дуже динамічної ситуації нестационарність сигналу не може бути виключена. Тому було проведено спектральний і вейвлет-аналіз.

У рамках аналізу спектральної густини потужності (PSD) сигналу для серії N вимірів X_n було використано дискретне фур'є-перетворення в вигляді [31]:

$$PSD = \frac{2N}{f_s} \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp\left(\frac{2\pi i n j}{N}\right) \right|^2,$$

де $n = 0, 1, \dots, N - 1, j = 0, 1, \dots, N/2$.

В рамках вейвлет-аналізу для серії вимірів X_n ($n = 0, \dots, N - 1$) зі зсувом по часу δt було використано вейвлет Морле з огинаючою гауссіаною [39]:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2 / 2},$$

де ω_0 — безрозмірна частота, η — безрозмірний «часовий» параметр. Індекс «0» у функції ψ вказує, що ця функція є нормованою.

Неперервне вейвлет-перетворення дискретного сигналу x_n визначається як згортка материнського вейвлету, аргумент якого масштабують та транслюють, з сигналом [15, 16, 19]:

$$W_n(s) = \sum_{n'} x_{n'} \psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right],$$

де зірочкою позначено комплексне спряження, $|W_n(s)|^2$ — вейвлет-спектр потужності сигналу, s — вейвлет-шкала.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ

Для аналізу характеристик турбулентних процесів у хвості магнітосфери Землі було використано виміри ферозондових магнітометрів трьох космічних апаратів місії «Кластер-2» з частотою опитування 22.5 Гц у момент розриву струмового шару 17 жовтня 2005 р. Слід відмітити, що для проведення коректного аналізу флуктуацій магнітного поля наявність експериментальних даних із високою частотою опитування є дуже актуальною, особливо на малих масштабах.

Розглянуті зміни флуктуацій абсолютного значення магнітного поля при русі космічних апаратів у хвості магнітосфери Землі приведено на рис. 1. Початок суббури для КА — 16:10. Із рисунків добре видно, що під час розвитку суббури відносний рівень флуктуацій магнітного поля зростає у 2—3 рази. Всі три космічні апарати фіксують диполаризацію магнітного поля і ініціацію суббури у просторовому діапазоні $-10R_E < X_{GSE} < -14R_E$, $5R_E < Y_{GSE} < 9R_E$ і $1R_E < Z_{GSE} < 4R_E$ (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У рамках досліджень визначалися зміни флуктуацій магнітного поля на різних часових масштабах. Використання даного підходу для визначення типу турбулентності виправдане, якщо вимірювання проводяться у середовищі з великою

відносною швидкістю через правомірність гіпотези Тейлора [21, 20, 22].

Для дослідження особливостей функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля P вибирався зсув по часу, кратний дискретності вимірів $\tau_{\min} = 0.0445$ с. Аналізувалися статистичні властивості абсолютного значення варіацій магнітного поля $dB = B(t + \tau) - B(t)$ для моментів до, під час і після ініціювання суббури на різних часових масштабах. На рис. 3 подано приклади розподілів для часових зсувів. Добре видно, що до початку розвитку суббури крила набагато менші, ніж для інших розглянутих ситуацій. Найбільші крила, тобто найбільше відхилення розподілу флуктуацій від нормального процесу, спостерігаються під час суббури.

Із отриманих залежностей можна зробити висновок, що для малих масштабів під час суббури розподіл помітно відхиляється від гауссівського.

Для визначення типу турбулентних процесів, що спостерігаються в експерименті, було проведено аналіз особливостей структурних функцій (моментів функції густини ймовірності) різних порядків q відповідно до часового інтервалу τ для ряду даних $B(t)$. Структурні функції високих порядків дозволяють охарактеризувати властивості неоднорідності на малих масштабах процесу. При цьому структурна функція визначалася співвідношенням

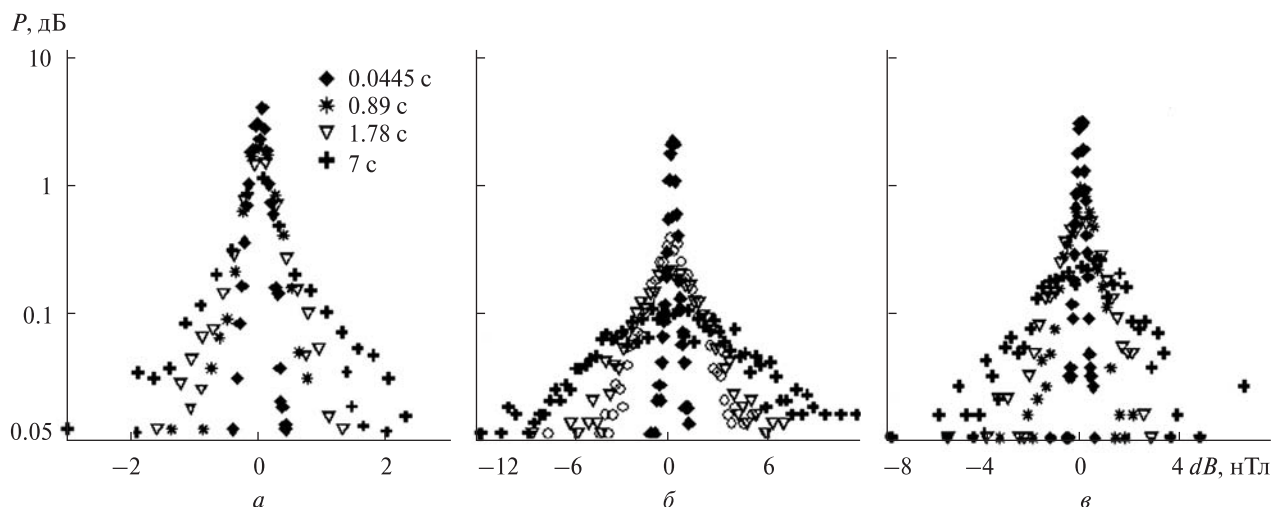


Рис. 3. Залежність функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля від кроку по часу (КА С1): а — до початку суббури, б — під час суббури, в — після суббури

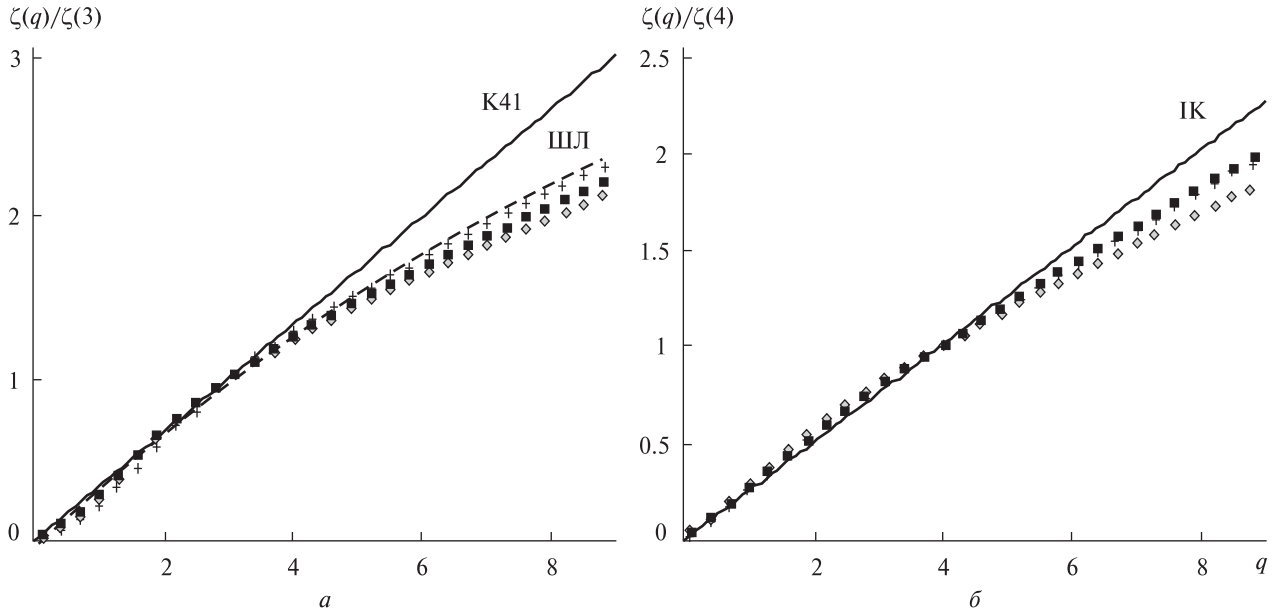


Рис. 4. Відношення експоненціального значення $\zeta(q)$ структурної функції порядку q : a — до значення $\zeta(3)$ третього порядку (суцільна лінія — модель K41, штрихова — ізотропна лог-пуассонівська каскадна модель Ше—Левека (ШЛ)); b — до значення $\zeta(4)$ четвертого порядку (суцільна лінія — модель ІК). Хрестики, ромбики та кружки — експериментальні дані КА С1, С3 та С4 відповідно

$$S_q(\tau) = \langle |B(t+\tau) - B(t)|^q \rangle \propto \tau^{\zeta(q)},$$

де $\langle \dots \rangle$ означає усереднення експериментальних даних за часом, а τ — зсуву по часу.

Для лог-пуассонівської ізотропної турбулентної каскадної 3D-моделі маємо залежність [37]

$$\zeta(q) = \frac{q}{9} + 2 \left[1 - \left(\frac{2}{3} \right)^{q/3} \right].$$

На практиці властивість узагальненої самоподібності дозволяє підвищити точність визначення степеня структурної функції при аналізі експериментальних даних. Параметр $\zeta(q)/\zeta(3)$ може бути отриманий з нахилу графіка в логарифмічному масштабі. При цьому будемо мати порівняння експериментальних даних із колмогорівською моделлю турбулентності K41, для якої $\zeta(3) = 3/3 = 1$. Для порівняння ж експериментальних значень із моделлю двовимірної турбулентності Ірошнікова — Крейчнана знаходять залежність $\zeta(q)/\zeta(4)$, оскільки для неї $\zeta(4) = 4/4 = 1$.

Степенева залежність типу $S_q(\tau) \propto \tau^{\zeta(q)}$ (самоподібність) спостерігається лише на обмежено-

му інтервалі часових масштабів. Цей інтервал відповідає інерційному діапазону, що розглядається у класичних моделях ізотропної розвиненої турбулентності (K41 та ін.). Саме інтервал, на якому має місце степеневий зв'язок, і вибирають для ESS-аналізу.

Таблиця 1. Параметри дифузійних процесів

Космічний апарат	β	Δ	$R = \Delta(1/\beta - 1)$
C1	0.58	0.51	0.37
C3	0.42	0.48	0.66
C4	0.54	0.55	0.47

Таблиця 2. Спектральні індекси PSD-аналізу

Космічний апарат	До суббурі	Під час суббурі	Після суббурі
C1	-1.7386 ± 0.0516	-2.4320 ± 0.0552	-1.8134 ± 0.0432
C3	-1.5699 ± 0.0508	-2.6340 ± 0.0482	-1.6789 ± 0.0611
C4	-1.9672 ± 0.0494	-2.5089 ± 0.0303	-1.9974 ± 0.0578

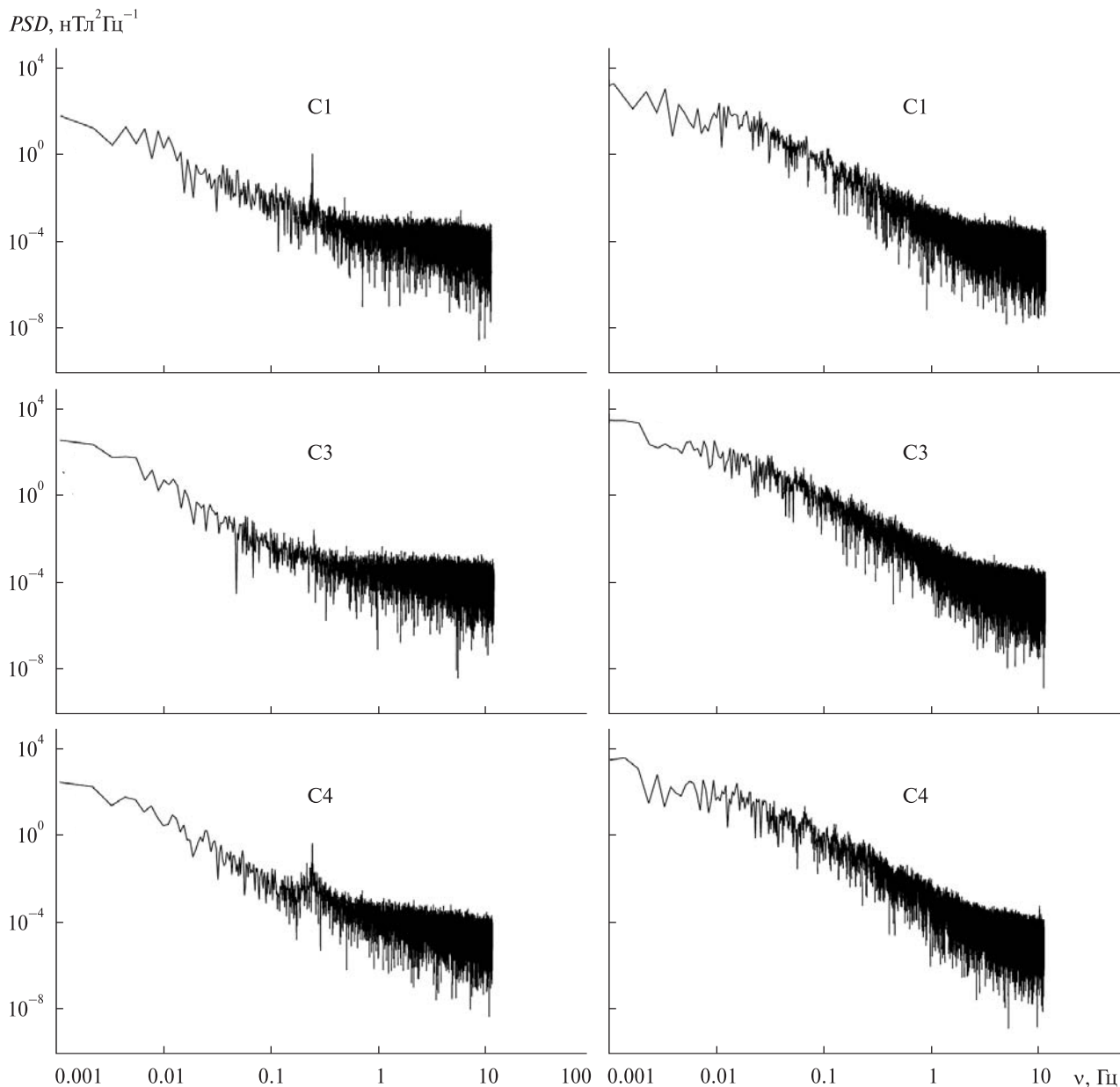


Рис. 5. Результати спектрального аналізу для моментів до (зліва) та під час (справа) ініціації суббури для КА C1, C3, C4

Результати розрахунку скейлінгів моментів функції густини ймовірності для різних порядків q при аналізі маломасштабної турбулентності та порівняння їх із колмогорівською моделлю та двовимірною моделлю Ірошнікова — Крейчна показані на рис. 4. Результати ESS-аналізу супутникових вимірів вказують на неоднорідність турбулентних процесів під час ініціації суббури,

описати які можна лог-пуассонівською каскадною моделлю із параметрами підгонки.

В результаті проведеного ESS-аналізу можна із рис. 4, а отримати значення параметрів лог-пуассонівського скейлінгу β і Δ під час суббури (табл. 1) і використати їх для визначення узагальненого коефіцієнта дифузії. Отримані значення R лежать в межах 0.37...0.66. Враховуючи,

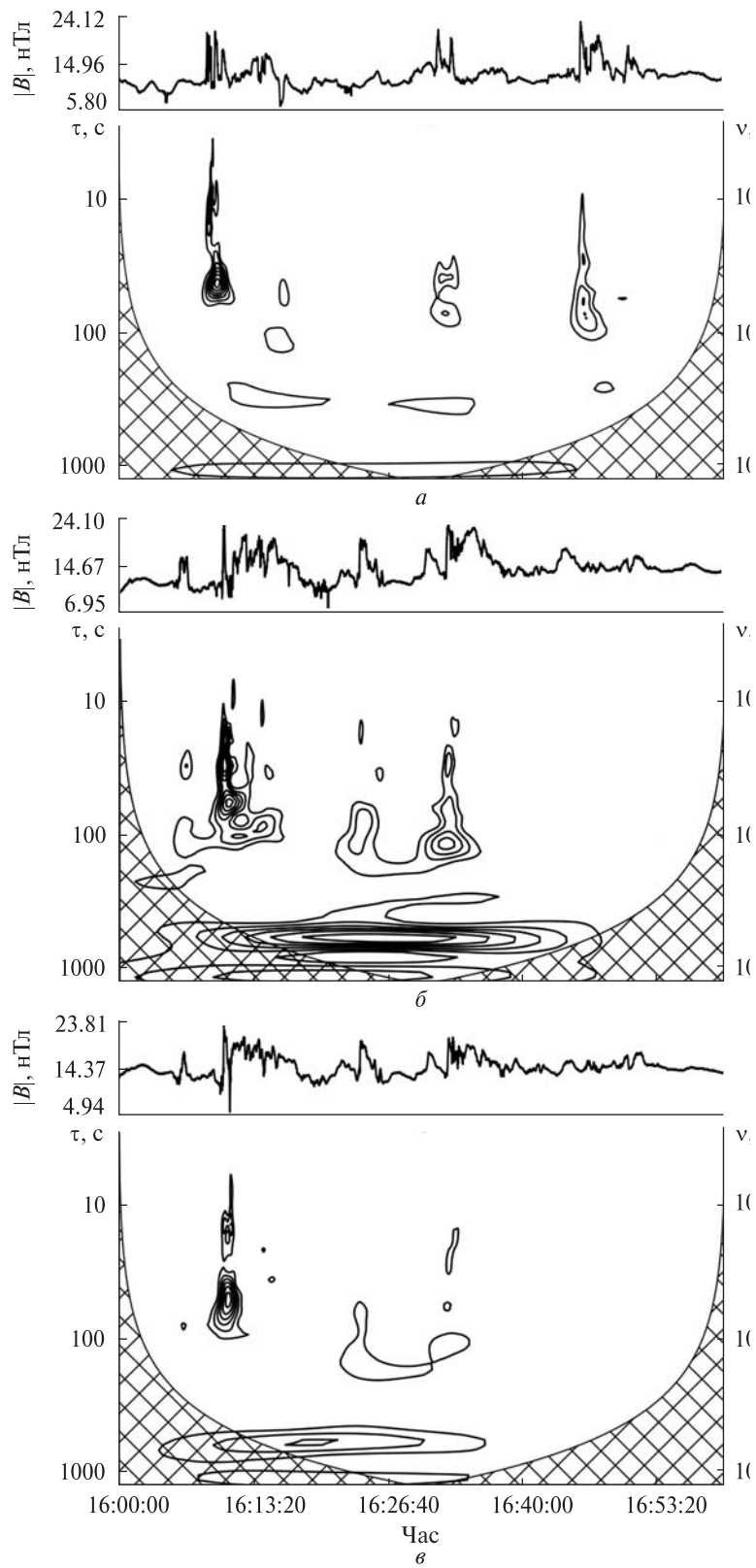


Рис. 6. Результати вейвлет-аналізу вимірів КА С1 (а), КА С3 (б), КА С4 (в)

що закон зміщення частинок з часом задається співвідношенням $\langle \delta x^2 \rangle \propto Dt \propto \tau^\delta$ з показником $\delta \approx 1 + R \approx 1.37 \dots 1.66 > 1$, то така залежність вказує на процес супердифузії.

Про наявність різних характерних масштабів свідчать і результати спектрального аналізу (рис. 5). На рис. 5, крім зламу в околі частоти 1 Гц, чітко видно пік на частоті 0.25 Гц, що відповідає частоті обертання супутника.

Спектральні індекси в частотному діапазоні 0.01...1 Гц для розглянутих космічних апаратів представлено у табл. 2

Під час ініціації суббури нахил спектру збільшується. Найбільше значення спостерігається для КА С4. До та після суббури спектральні індекси лежать у межах 1.57...1.97.

Порівняння результатів вейвлет-аналізу під час суббури представлено на рис. 6.

Незважаючи на те, що КА С1 перебував на відстанях до декількох радіусів Землі від КА С3 та С4, на графіках чітко видно каскадні процеси, зафіксовані на всіх космічних апаратах. Вони лежать у межах від 0.025 до 0.1 Гц і близькі до іонно-циклотронної частоти O^+ для даних вимірювань магнітного поля. При цьому для С1 і С2 усі каскади мають приблизно однакову потужність. Лише один каскад (з протяжністю у 2 хв і частотною шириною майже у 1 Гц: від 0.02 до 1 Гц) можна точно ідентифікувати в усіх трьох рядах даних, при цьому потужність та протяжність по часу для супутників С3 та С4 зменшується, але частотний діапазон майже не зазнає змін; і два каскади можна однозначно ідентифікувати на близьких супутниках: вони у 2—3 рази слабкіші і мають частоти від 0.005 до 0.5 Гц.

Крім того, під час суббури на КА С3 та С4 спостерігається потужний сигнал з періодом 550 с і тривалістю 27 хв для третього супутника та 25 хв для четвертого, який відповідає Рс5-пульсаціям.

Таким чином, результати проведеного вейвлет-аналізу вказують на наявність каскадних процесів, здебільшого зворотних, що свідчить про багатомасштабний характер динаміки магнітосфери. І важливо, що при цьому магнітосфера поводить ся як самоорганізована система з різними характерними масштабами.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що відносні варіації магнітного поля під час розриву струмового шару перевищують значення до ініціювання суббури приблизно в 2—3 рази. Функція розподілу флуктуацій магнітного поля під час розриву струмового шару вказує на негауссову статистику процесів, а також на надлишок великомасштабних збурень, що генеруються джерелом.

При порівнянні структурних функцій флуктуацій магнітного поля під час ініціації суббури із моделями Колмогорова, Крейчнана та ізотропною лог-пуассонівською 3D-моделлю із параметрами Ше і Левека, отримано, що дані турбулентні процеси неможливо описати ізотропними однорідними моделями. З використанням знайдених в рамках ESS-аналізу значень коефіцієнта переміжності і сингулярності турбулентних процесів отримано степеневу залежність узагальненого коефіцієнта дифузії від масштабу (показник степені варіюється у межах 0.37...0.66), що вказує на наявність супердифузійних процесів.

Одним із важливих результатів є суттєва відмінність спектрального індексу для моментів до і під час суббури. Так до ініціювання суббури спектральний індекс лежить у межах від -1.5699 ± 0.0508 до -1.9672 ± 0.0494 ($\sim -5/3$ згідно з моделлю Колмогорова), а під час суббури значення спектрального індексу варіюється від -2.4320 ± 0.0552 до 2.6340 ± 0.0482 ($\sim -7/3$ — електрон-магнітогідродинамічна турбулентність (ЕМНД)). ЕМНД-теорія описує поведінку плазми із високим параметром β на часових масштабах, менших від іонно-циклотронного періоду, і на просторових масштабах, менших від іонно-інерційної довжини, де переважна частина динаміки плазми регулюється електронами [10].

Вейвлет-аналіз показав наявність як прямих, так і зворотних каскадних процесів, а також наявність РС-пульсацій.

Таким чином, під час суббури фіксується багатомасштабність і мультифрактальність збурень магнітного поля, а наявність зворотних каскадних процесів вказує також на можливість процесів самоорганізації.

Робота виконувалася відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр. та при підтримці освітньої програми Міністерства освіти і науки України № 2201250 «Освіта, навчання студентів, аспірантів, наукових і педагогічних кадрів за кордоном» (стажування в лабораторії прикладної фізики університету імені Джона Гопкінса, Меріленд, США), гранту 90312 фонду Фольксваген («VW-Stiftung») і Міжнародного інституту турбулентності ISSI-BJ, Пекін, Китай.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И. Турбулентные пограничные слои при очень больших числах Рейнольдса // Успехи мат. наук. — 2004. — 59, № 1. — С. 45–62.
2. Козак Л. В. Методи і підходи визначення характеристик турбулентного середовища // Космічна наука і технологія. — 2016. — 22, № 2 (99). — С. 60–77.
3. Козак Л. В., Пилипенко В. А., Чугунова О. М., Козак П. Н. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя Земли // Космич. исслед. — 2011. — 49, № 3. — С. 202–212.
4. Козак Л. В., Савин С. П., Будаев В. П., Лежен Л. А., Пилипенко В. А. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — 52, № 4. — С. 470–481.
5. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. — 1941. — 30, № 4. — С. 299–303.
6. Космическая геогеофизика / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. — М.: Физматлит, 2008. — Том 1. — 624 с.
7. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. — М.: Мир, 1980. — 300 с.
8. Фрик П. Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. — Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. — Ч. II. — 136 с.
9. Фриш У. Турбулентность: Наследие А. Н. Колмогорова. — М.: Фазис, 1998. — 343 с.
10. Biskamp D., Schwarz E., Drake J. F. Two-dimensional electron magnetohydrodynamic turbulence // Phys. Rev. Lett. — 1996. — 76. — P. 1264–1272.
11. Benzi R., Ciliberto S., Tripicciono R., Baudet C., Mascioli F., Succi S. Extended self-similarity in turbulent flows // Phys. Rev. E. — 1993. — 48, N 1. — P. 29–32.
12. Chechkin A. V., Gonchar V. Y., Gorenflo R., Korabel N., Sokolov I. M. Generalized fractional diffusion equations for accelerating subdiffusion and truncated Levy flights // Phys. Rev. E. Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. — 2008. — 78, N 2. — P. 290–302.
13. Consolini G., Kretzschmar M., Lui A. T. Y., Zimbardo G., Macek W. M. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach // J. Geophys. Res. Space Phys. — 2005. — 110, N A7. — P. 1–12.
14. Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: Log-poisson statistics and generalized scale covariance // Phys. Rev. Lett. — 1994. — 73, N 7. — P. 959–962.
15. Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1992. — 24, N 1. — P. 395–458.
16. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Process. Geophys. — 2004. — 11, N 5/6. — P. 561–566.
17. Hadid L. Z., Sahraoui F., Kiyani K. H., Retinò A., Modolo R., Canu P., Masters A., Dougherty M. K. Nature of the MHD and kinetic scale turbulence in the magnetosheath of Saturn: Cassini observations // Astrophys. J. — 2015. — 813, N 2. — 29 p.
18. Handbook of the Solar-terrestrial environment / Eds. Y. Kamide, A. Chian — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. — 539 p.
19. 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, N D21. — P. 4677–4708.
20. Kiyani K. H., Chapman S. C., Khotyaintsev Y. V., Dunlop M. W., Sahraoui F. Global scale-invariant dissipation in collisionless plasma turbulence // Phys. Rev. Lett. — 2009. — 103, N 7. — 75006 (4 p.)
21. Kiyani K. H., Chapman S. C., Sahraoui F., Hnat B., Fauvarque O., Khotyaintsev Y. V. Enhanced magnetic compressibility and isotropic scale invariance at sub-ion Larmor scales in solar wind turbulence // Astrophys. J. — 2013. — 763, N 1. — 10 p.
22. 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. Solar-Terrestrial Phys. — 2017. — 154. — P. 115–126.
23. Kozak L. V., Prokhorenkov A. S., Savin S. P. Statistical analysis of the magnetic fluctuations in boundary layers of Earth's magnetosphere // Adv. Sp. Res. — 2015. — 56, N 10. — P. 2091–2096.
24. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers // J. Fluid Mech. — 1959. — 5. — P. 497–543.
25. Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions // J. Fluid Mech. — 1970. — 41, N 1. — P. 189–217.
26. Kronberg E. A., Ashour-Abdalla M., Dandouras I., Delcourt D. C., Grigorenko E. E., Kistler L. M., Kuzichev I. V., Liao J., Maggiolo R., Malova H. V., Orlova K. G., Perroomian V., Shklyar D. R., Shprits Y. Y., Welling D. T., Zelenyi L. M.

- Circulation of heavy ions and their dynamical effects in the magnetosphere: recent observations and models // *Space Sci. Rev.* — 2014. — **184**, N 1. — P. 173–235.
27. Lopez R. E. Magnetospheric substorms // *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* — 1990. — **11**. — P. 264–271.
 28. Lui A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* — 2002. — **64**, N 2. — P. 125–143.
 29. Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // *Space Sci. Rev.* — 2004. — **113**, N 1–2. — P. 127–206.
 30. Lui A. T. Y., Zheng Y., Zhang Y., Livi S., Rème H., Dunlop M. W., Gustafsson G., Mende S. B., Mouikis C., Kistler L. M. Cluster observation of plasma flow reversal in the magnetotail during a substorm // *Ann. Geophys.* — 2006. — **24**, N 7. — P. 2005–2013.
 31. Paschmann G., Daly P. W. Spectral analysis, reprinted from analysis methods for multi-spacecraft data // *ISSI Scientific Report SR-001 (Electronic edition 1.1)*. — 2000. — 491 p.
 32. Prokhorenkov A., Kozak L. V., Lui A. T. Y., Gala I. Diffusion processes in the transition layer of the Earth's magnetosphere // *Adv. Astron. Sp. Phys.* — 2015. — **5**, N 2. — P. 99–103.
 33. 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. Sp. Phys.* — 2009. — **114**, N 7. — P. 2156–2202.
 34. Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z. Multipoint observations of dipolarization front formation by magnetotail reconnection // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2012. — **117**, N A5. — P. 2156–2202.
 35. Savin S., Amata E., Zelenyi L., Lutsenko V., Safrankova J., Nemecek Z., Borodkova N., Buechner J., Daly P. W., Kronberg E. A., Blecki J., Budaev V., Kozak L., Skalsky A., Lezhen L. Super fast plasma streams as drivers of transient and anomalous magnetospheric dynamics // *Ann. Geophys.* — 2012. — **30**, N 1. — P. 1–7.
 36. Savin S., Budaev V., Zelenyi L., Amata E., Sibeck D., Lutsenko V., Borodkova N., Zhang H., Angelopoulos V., Safrankova J., Nemecek Z., Blecki J., Buechner J., Kozak L., Romanov S., Skalsky A., Krasnoselsky V. Anomalous interaction of a plasma flow with the boundary layers of a geomagnetic trap // *JETP Lett.* — 2011. — **93**, N 12. — P. 754–762.
 37. She Z.-S., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence // *Phys. Rev. Lett.* — 1994. — **72**, N 3. — P. 336–339.
 38. THOR Exploring plasma energization in space turbulence. — Assessment Study Report ESA/SRE. — 2017. — 109 p.
 39. Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* — 1998. — **79**, N 1. — P. 61–78.
 40. Treumann R. A., Brostrom L., LaBelle J., Sckopke N. The plasma wave signature of a “magnetic hole” in the vicinity of the magnetopause // *J. Geophys. Res.* — 1990. — **95**, N A11. — P. 19099–19144.

Стаття надійшла до редакції 24.01.18

REFERENCES

1. Barenblatt G. I. Turbulent boundary layers at very high Reynolds numbers. *Progress Math. Sci.* **59** (1), 45–62 (2004), [In Russian].
2. Kozak L.V. Methods and approaches for determination of turbulent environment characteristics. *Space Science and Technology*, **22** (99), 60–77 (2016).
3. Kozak L.V., Pilipenko V. A., Chugunova O. M., Kozak P. N. Statistical analysis of the turbulence of a forshock region and earth's magnetosheet. *Cosmic Research*, **49** (3), 202–212 (2011).
4. Kozak L. V., Savin S. P., Budaev V. P., Pilipenko V. A., Lezhen L. A Character of turbulence in the boundary regions of the Earth's magnetosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **52** (4), 445–455 (2012).
5. Kolmogorov A.N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *USSR Academy Report*, **30** (4), 299–303 (1941).
6. Cosmic geoheliophysics / Eds L. M. Zelenyi, I. S. Veselovskiy. 624 p. (Physmatlit, Moscow, 2008). **1**,
7. Nishida A. Geomagnetic diagnose of the magnetosphere. *Mir (Moscow)*, 300 P. (1980).
8. Frick P. G. The turbulence: models and approaches. *Perm's State Tech. Univ. Part II*, 139 P. (1999).
9. Frish U. The turbulence: the heritage of A.N. Kolmogorov. *Phasic (Moscow)*, 343 P. (1998).
10. Biskamp D., Schwarz E., Drake J. F. two-dimensional electron magnetohydrodynamic turbulence. *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1264–1272 (1996).
11. Benzi R., Ciliberto S., Tripicciono R., Baudet C., Massaioli F., Succi S. Extended self-similarity in turbulent flows. *Phys. Rev. E* **48** (1), 29–32 (1993).
12. Chechkin A. V. Gonchar V. Y., Gorenflo R., Korabel N., Sokolov I. M. Generalized fractional diffusion equations for accelerating subdiffusion and truncated Levy flights. *Phys. Rev. E. Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* **78** (2), 290–302 (2008).
13. Consolini G., Kretzschmar M., Lui A. T. Y., Zimbardo G., Macek W. M. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach. *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* **110** (A7), 1–12 (2005).
14. Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: Log-poisson statistics and generalized scale covariance. *Phys. Rev. Lett.* **73** (7), 959–962 (1994)

15. Farge M. Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **24** (1), 395—458 (1992).
16. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process. Geophys.* **11** (5/6), 561—566 (2004).
17. Hadid L.Z., Sahraoui F., Kiyani K. H., Retinò A., Mollo R., Canu P., Masters A., Dougherty M. K. Nature of the MHD and Kinetic Scale Turbulence in the Magnetosheath of Saturn: Cassini Observations. *Astrophys. J.* **813** (2) 29 p. (2015).
18. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Eds Kamide Y., Chian A. *Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.* 539 P. (2007).
19. 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.* **108** (D21), 4677—4708 (2003).
20. Kiyani K. H., Chapman S. C., Khotyaintsev Y. V., Dunlop M. W., Sahraoui F. Global Scale-Invariant Dissipation in Collisionless Plasma Turbulence. *Phys. Rev. Lett.* **103** (7), 75006 (4 p.) (2009).
21. Kiyani K. H., Chapman S. C., Sahraoui F., Hnat B., Fauvarque O., Khotyaintsev Y. V. Enhanced magnetic compressibility and isotropic scale invariance at sub-ion Larmor scales in solar wind turbulence. *Astrophys. J.* **763** (1), 10 p. (2013).
22. 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. Solar-Terrestrial Phys.* **154**, 115—126 (2017).
23. Kozak L. V., Prokhorenkov A. S., Savin S. P. Statistical analysis of the magnetic fluctuations in boundary layers of Earth's magnetosphere. *Adv. Sp. Res.* **56**(10), 2091—2096 (2015).
24. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* **5**, 497—543 (1959).
25. Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions. *J. Fluid Mech.* **41**(1), 189—217 (1970).
26. Kronberg E. A., Ashour-Abdalla M., Dandouras I., Delcourt D. C., Grigorenko E. E., Kistler L. M., Kuzichev I. V., Liao J., Maggiolo R., Malova H. V., Orlova K. G., Perroomian V., Shklyar D. R., Shprits Y. Y., Welling D. T., Zelenyi L. M. Circulation of Heavy Ions and Their Dynamical Effects in the Magnetosphere: Recent Observations and Models. *Space Sci. Rev.* **184**(1), 173—235 (2014).
27. Lopez R. E. Magnetospheric substorms. *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **11**, 264—271 (1990).
28. Lui A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* **64** (2), 125—143 (2002).
29. Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets. *Space Sci. Rev.* **113** (1), 127—206 (2004).
30. Lui A. T. Y., Zheng Y., Zhang Y., Livi S., Rème H., Dunlop M. W., Gustafsson G., Mende S. B., Mouikis C., Kistler L. M. Cluster observation of plasma flow reversal in the magnetotail during a substorm. *Ann. Geophys.* **24** (7), 2005—2013 (2006).
31. Paschmann G., Daly P. W. Spectral Analysis, Reprinted from Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. *JSSI Scientific Report SR-001 (Electronic edition 1.1).* 491 p. (2000).
32. Prokhorenkov A., Kozak L. V., Lui A. T. Y., Gala I. Diffusion processes in the transition layer of the Earth's magnetosphere. *Adv. Astron. Sp. Phys.* **5**(2), 99—103 (2015).
33. 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. Sp. Phys.* **114** (7), 2156—2202 (2009).
34. Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z. Multipoint observations of dipolarization front formation by magnetotail reconnection. *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* **117** (A5), 2156—2202 (2012).
35. Savin S., Amata E., Zelenyi L., Lutsenko V., Safrankova J., Nemecek Z., Borodkova N., Buechner J., Daly P. W., Kronberg E. A., Blecki J., Budaev V., Kozak L., Skalsky A., Lezhen L. Super fast plasma streams as drivers of transient and anomalous magnetospheric dynamics. *Ann. Geophys.* **30** (1), 1—7 (2012).
36. Savin S., Budaev V., Zelenyi L., Amata E., Sibeck D., Lutsenko V., Borodkova N., Zhang H., Angelopoulos V., Safrankova J., Nemecek Z., Blecki J., Buechner J., Kozak L., Romanov S., Skalsky A., Krasnoselsky V. Anomalous interaction of a plasma flow with the boundary layers of a geomagnetic trap. *JETP Lett.* **93** (12), 754—762 (2011).
37. She Z.-S., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence. *Phys. Rev. Lett.* **72** (3), 336—339 (1994).
38. THOR Exploring plasma energization in space turbulence. *Assessment Study Report ESA/SRE.* 109 p. (2017).
39. Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79** (1), 61—78 (1998).
40. Treumann R. A., Brostrom L., LaBelle J., Skopke N. The plasma wave signature of a “magnetic hole” in the vicinity of the magnetopause. *J. Geophys. Res.* **95** (A11), 19099—19144 (1990).

Received 24.01.18

Л. Козак^{1,2}, Б. Петренко¹, Е. Кронберг³,
А. Прохоренков¹, Е. Григоренко⁴, О. Черемных²,
С. Черемных², Е. Луї⁵, П. Козак¹, І. Кунделько¹

- ¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина
² Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев, Украина
³ Институт Макса Планка, Геттинген, Федеративная Республика Германия
⁴ Институт космических исследований Российской академии наук, Российская Федерация
⁵ Университет имени Джона Хопкинса, Балтимор, США

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Рассмотрены свойства турбулентных процессов в хвосте магнитосферы Земли по измерениям трех космических аппаратов миссии «Кластер-2» для 17 октября 2005 г. (данные представлены с временной дискретностью 22.5 Гц). Для определения параметров турбулентных процессов был проведен анализ моментов функции распределения флуктуаций магнитного поля на разных масштабах, а также спектральный и вейвлет-анализ. Полученные зависимости сравнивались с известными на сегодняшний момент моделями для описания как однородных, так и неоднородных турбулентных процессов. Отмечаются существенные вариации спектрального индекса: для момента до инициирования суббури спектральный индекс соответствует модели Колмогорова, а во время суббури он близок к индексу электрон-магнито-гидродинамической турбулентности. Вейвлет-анализ показал наличие как прямых, так и обратных каскадных процессов, а также наличие РС-пульсаций.

Ключевые слова: турбулентные процессы, хвост магнитосферы Земли, модели развития суббури, РС-пульсации, спектры турбулентности в хвосте магнитосферы Земли.

L. Kozak^{1,2}, B. Petrenko¹, E. Kronberg³, A. Porokhorenkov¹,
E. Grigorenko⁴, O. Cheremnyh², S. Cheremnyh², A. Lui⁵,
P. Kozak¹, I. Kundelko¹

- ¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
² Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine
³ Max Planck Institute, Getttingen, Germany
⁴ Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
⁵ John Hopkins University, Baltimore, USA

TURBULENT PROCESSES IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL: STATISTICAL AND SPECTRAL ANALYSIS

Investigation of processes in the tail of Earth's magnetosphere is substantially complicated by the presence of

turbulence. Development of the instabilities results to a "catastrophic" reorganization of the flow and structure of the magnetic field. Complex turbulent processes observed in the Earth's magnetosphere cannot be described within the framework of analytical models of the MHD flows. To study the properties of the turbulence on large temporal and spatial scales one has to involve the methods of statistical physics and cascade models developed in hydrodynamic theories. At the same time, from an experiment it is possible to determine the statistical properties of the turbulence associated with the scale invariance. This approach allows us to obtain a comprehension about physical properties of plasma turbulence and to describe qualitatively and quantitatively the processes of transport in the turbulent regions. In the course of the work we analyzed the properties of the small-scale developed turbulence in the tail of Earth's magnetosphere by measurements of the flux-gate magnetometer on-board of the 3 spacecrafts of the "Cluster-2" mission with a sampling frequency of 22.5 Hz for October 17, 2005. To achieve this goal we used the fractal and multifractal research methods that we supplemented with spectral and wavelet analysis. In particular, we carried out the following methods: analysis of the wings of the PDF of the magnetic field fluctuations (fractal consideration); analysis of the expanded self-similarity (ESS-analysis, multifractal consideration); analysis of the power spectral density (spectral studies); amplitude analysis and wavelet power spectral analysis of the signal (wavelet analysis). As a result of the analysis we can conclude that the distribution of magnetic field fluctuations during the sub-storm indicates non-Gaussian statistics of the process as well as on the excess of large-scale perturbations generated by the source. When comparing the structure functions of the magnetic field fluctuations during the initiation of the sub-storm with the Kolmogorov, Kraichnan and three-dimensional isotropic log-Poisson model with the She and Leveque parameters we have found that these turbulent processes cannot be described by isotropic homogeneous models and, in addition, they are characterized by the presence of super-diffusion. There is a significant difference between the spectral indices for the moments before and during the initiation of the sub-storm: before the initiation of the sub-storm the spectral index is close to the Kolmogorov model, and during the initiation it is close to the electron-magneto-hydrodynamic turbulence. The wavelet analysis showed the presence of both direct and inverse cascade processes, as well as the presence of PC pulsations.

Keywords: turbulent processes, tail of the Earth's magnetosphere, substorm development models, Pc pulsations, turbulence spectra in the tail of the Earth's magnetosphere.