

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

КОЗАК ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 551.510; 533.93; 523.4; 523.6

**ТУРБУЛЕНТНІ ПРОЦЕСИ  
В НАВКОЛОЗЕМНОМУ КОСМІЧНОМУ ПРОСТОРИ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи  
10 – Природничі науки, 104 – Фізика та астрономія

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2023

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України, відділі космічної плазми Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Сумарук Юрій Петрович,**  
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна  
НАН України, провідний науковий співробітник  
відділу геомагнетизму;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Федоров Юрій Іванович,**  
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,  
завідувач лабораторії космічних променів відділу  
позагалактичної астрономії та астроінформатики;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Яковенко Юрій Володимирович,**  
Інститут ядерних досліджень НАН України,  
провідний науковий співробітник  
відділу теорії ядерного синтезу.

Захист відбудеться «23» березня 2023 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України за адресою:

03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідання о 11-00 год.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою:

03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розіслано «20» лютого 2023 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01  
кандидат фізико-математичних наук

І.В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Турбулентність – одна з визначальних рис як гідродинамічних (ГД), так і магнітогідродинамічних (МГД) потоків космічної плазми. Приклади турбулентних рухів можна знайти в галактиках, зорях, міжзоряних та міжпланетних середовищах, атмосферах планет та ін., а їх дисипація призводить до нагрівання плазми та прискорення заряджених частинок. Ефекти, пов'язані з турбулізацією потоків, спостерігаються на просторово-часових масштабах від сантиметрів до мегапарсеків та від секунд до мільйонів років. Тому аналіз основних процесів зміни параметрів плазми внаслідок турбулентності має принципове значення не лише для розуміння еволюції Всесвіту в цілому, а й для пояснення еволюції його окремих структур.

В космічній плазмі ми зазвичай стикаємося із високопровідною плазмою, в якій виконується умова вмороженості. Тому вплив динаміки плазми на зміни магнітних полів та магнітних сил на динаміку плазми є вирішальним у формуванні плазмових характеристик. Так, турбулентна адвекція магнітного поля і зворотна реакція поля разом призводять до розвиненої МГД-турбулентності. Незважаючи на більш ніж шістьдесят років досліджень і ряд вагомих результатів, МГД-теорія турбулентності все ще залишається незавершеною і не пояснює значну кількість спостережних фактів.

Серед найбільш важливих невирішених питань, які стоять при розгляді турбулентних процесів у космічній плазмі, є такі:

- Яким чином турбулентність посилюється і підтримується магнітними полями? Яка структура і спектр флуктуацій цих полів на великих і малих масштабах?
- Як відбувається передача енергії і її дисипація в турбулентних середовищах?
- Як турбулентність впливає на розігрів та прискорення частинок?
- Яка роль магнітних полів і турбулентних потоків у формуванні популяції високоенергетичних частинок – космічних променів?

І це далеко не повний перелік запитань, які стоять при аналізі як космічної плазми в цілому, так і навколоземної зокрема.

Тому проведені в рамках дисертаційної роботи дослідження властивостей турбулентних процесів та самоорганізації складних систем, що включають плазму і магнітне поле, є актуальними і практично важливими.

Навколоземний космічний простір – привілейована область для дослідження турбулентних процесів, оскільки ми можемо безпосередньо (*in situ*) отримати експериментальні дані про властивості турбулентності в діапазонах просторових і часових масштабів, недоступних у лабораторних експериментах на Землі. При цьому турбулентні процеси в різних областях навколоземного простору можуть суттєво відрізнятися, зокрема в магнітошарі основні процеси взаємопов'язані і глобально синхронізовані низькочастотними магнітозвуковими коливаннями [133]. На середніх масштабах у турбулентних перехідних шарах самоорганізація може спостерігатися за рахунок зворотних каскадів, які можуть бути викликані відбитими від границь хвилями. У хвості магнітосфери турбулентні області виникають за рахунок «скидання енергії», накопиченої в результаті витягування силових ліній

магнітного поля. Отже, ми маємо справу не із послідовністю адитивних реакцій на збурення в сонячному вітрі (СВ) і в окремих областях магнітосфери Землі, а зі складною великомасштабною нелінійною системою, в якій відбувається «хаотична» перебудова течії і магнітної топології (прискорені і уповільнені потоки, перехід від ламінарних течій до турбулентних). Крім того, спостерігається залежність від передісторії та поява аномально великих кореляцій на великих часових і просторових масштабах, що призводить до аномального перенесення плазми [120]. Аналіз турбулентних потоків у навколоземному космічному просторі ускладнюється також через наявність переміжності (неоднорідності) – активні області співіснують з пасивними, в яких потік квазіламінарний.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні результати, викладені в дисертації, отримані автором за час роботи на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України (основне місце роботи) та в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України (за сумісництвом). Науково-дослідні роботи за комплексною науковою програмою «Астрономія та фізика космосу» проводилися в рамках тем (виконавець): № 01БФ051-14 «Дослідження динамічних процесів у геліосфері, магнітосфері та атмосфері Землі за результатами наземних та супутникових вимірювань» (№ держреєстрації 0101U002469); № 06БФ051-12 «Динамічні процеси в навколоземному космосі, верхній атмосфері та озоносфері в аспекті сонячно-земних зв'язків» (№ держреєстрації 0106U006356); № 11БФ051-01 «Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій» (*Підрозділ 12: «Динаміка навколоземного космічного простору та атмосфери Землі: залежність від стану геліосфери»*) (№ держреєстрації 0106U006356); № 16БФ051-02 «Взаємодія частинок, хвиль і електромагнітного поля з конденсованим середовищем, атмосферою, магнітосферою, наноструктурами і метаматеріалами»; № 20БФ051-02 «Хвильові процеси та ефекти в активних резонансних шаруватих плазмових середовищах і метаматеріалах» (№ держреєстрації 0120U102178).

У рамках науково-дослідних робіт НАНУ–ДКАУ дослідження проводилися за темами (виконавець): НДР «Дослідження та математична інтерпретація фундаментальних плазмових процесів у ближньому космосі» 2020–2021 рр., бюджетна тема; НДР «Моделі спостережуваних динамічних процесів у близькому космосі та методи їх математичної інтерпретації і прогнозування» 2018–2019 рр., бюджетна тема; НДР «Дослідження хвильових і турбулентних процесів в плазмі ближнього космосу» 2018 р., цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій»; НДР «Дослідження колективних процесів в плазмі ближнього космосу, відповідальних за формування космічної погоди» 2020–2021 рр., цільова комплексна програма НАН України «Фізика плазми і плазмова електроніка: фундаментальні дослідження та застосування».

Дослідження підтримані також спільним науково-дослідним проектом науковців Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Національної академії наук України (тема № 9Ф «Роль турбулентних і хвильових процесів у космічній плазмі» (2019–2020 рр.)), відповідальний виконавець. Низка

результатів отримана у рамках міжнародних програм/грантів: ДФФД 2011–2012 рр. № Ф40.2/053 «Взаємодія потоків плазми із перешкодою: експериментальне вивчення великомасштабної динаміки обтікання сонячним вітром магнітосфери», відповідальний виконавець; ДФФД 2013–2014 рр. № Ф53.2/039 «Експериментальне вивчення процесів переносу плазми із сонячного вітру вглиб магнітосфери», відповідальний виконавець; американський грант CRDF # UKP2-2644-KV-05 «Plasma turbulence in magnetospheric current systems» (2005–2007 рр.), відповідальний виконавець; німецькі гранти Volkswagen Foundation (“VW- Stiftung”) Фольксваген №№ 90312, 90312-1 та 97742 «Energy transformation, turbulence and acceleration in space plasmas» (2016–2023 рр.) та британський грант The ROYAL Society International Exchanges scheme 2021 IES\R1\211177 «Predicting natural hazards by driven ionospheric perturbations» (2021–2023 рр.), керівник. Робота виконувалася також за підтримки 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 Хопкінса, Меріленд, США) та грантів Міжнародного інституту космічних досліджень: International Space Science Institute (ISSI) «Comparative analysis of turbulence and anomalous transfer in space and thermonuclear plasma», Берн, Швейцарія, та International Space Science Institute – Beijing (ISSI–BJ), Пекін, КНР.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи – визначення властивостей турбулентних процесів у навколоземному космічному просторі на різних просторових/часових масштабах та їх впливу на динаміку та енергетику частинок.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні ключові завдання:

- визначення типу турбулентних процесів у збурених областях магнітосфери Землі за різних умов і на різних масштабах, використовуючи статистичний та спектральний аналіз супутникових вимірів;
- визначення властивостей дифузійних процесів у турбулентних областях магнітосфери Землі, використовуючи результати аналізу розширеної самоподібності;
- дослідження зміни потоків та енергетичних спектрів прискорених частинок (електронів та ядер) у турбулізованих областях;
- визначення особливостей взаємодії «хвиля–частинка» в турбулізованих областях магнітосферного хвоста;
- отримання дисперсійних кривих у турбулізованих областях, використовуючи багатосупутникові виміри;
- визначення механізму ініціювання турбулентного каскаду та характеристик хвиль, що відповідають за перенесення збурення з хвоста магнітосфери в область аврорального овалу, ґрунтуючись на аналізі пульсацій;
- оцінка впливу на інтенсифікацію турбулентності верхньої атмосфери Землі вертикальних градієнтів температури та вітру.

**Об’єкт дослідження** – навколоземний космічний простір, зокрема магнітосфера та верхня атмосфера Землі.

**Предмет дослідження** – варіації магнітних та електричних полів, потоків частинок, швидкостей, змін температури в магнітосфері Землі, а також температура та складові вітру верхньої атмосфери Землі.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених у дисертації завдань використовувалися аналітичні методи розв'язку рівнянь МГД, теоретичний аналіз моделей та чисельне моделювання турбулентних процесів у плазмі, аналіз даних супутникових та наземних вимірювань для верифікації теоретичних моделей.

Методи обробки та аналізу експериментальних даних включали – статистичні (фрактальні і мультифрактальні (аналіз розширеної самоподібності, аналіз ексцесу)), спектральні (Фур'є, вейвлет, біспектральний), метод мінімуму варіації змінних, таймінг-аналіз, метод накладання епох та метод хвильової зйомки.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше визначено тип турбулентних процесів та масштаби їх зміни у різних областях магнітосфери Землі (форшок, постшок, магнітошар, область магнітопаузи, касп та хвіст магнітосфери) із використанням спектральних, статистичних та багатосупутникових методів досліджень.
2. Вперше визначено передумови фіксації зламу спектральних залежностей густини потужності магнітного поля на гірочастотах важких іонів у турбулентних областях на відстанях до  $17R_{\text{Землі}}$ .
3. Вперше отримано взаємозв'язок магнітного, теплового (протонів та електронів) та динамічного (протонів) тисків у геомагнітних пульсаціях та визначено, що інтенсивність  $P_{\text{с4}}$ -пульсацій для теплового тиску електронів вдвічі менша в порівнянні з динамічним і тепловим тиском протонів.
4. Вперше зареєстровано спонтанну генерацію когерентних структур (самоорганізацію) в турбулентних областях під час багатократної диполяризації (посилення квазідипольних компонентів під час розриву струмового шару) як для магнітних структур, так і для потоків плазми на основі фіксації прямих і обернених каскадів.
5. Вперше отримано нелінійний енергетичний каскад із побудови дисперсійних кривих у турбулентних областях під час розриву струмового шару магнітосферного хвоста, використовуючи багатосупутникові виміри.
6. Вперше визначено зв'язок між величиною ексцесу, параметрами логпуассонівської каскадної моделі, спектральними індексами та коефіцієнтом дифузійного перенесення.
7. Вперше знайдено/оцінено узагальнений коефіцієнт дифузії, що вказує на супердифузію в турбулентних областях магнітосфери Землі, використовуючи аналіз висоти максимуму функції густини розподілу флуктуацій магнітного поля та коефіцієнти логпуассонівської каскадної моделі.
8. Вперше визначено роль взаємодії «хвиля–частинка» в турбулентних областях за змінами потоків частинок у різних енергетичних каналах та з аналізу потужності коливань магнітного поля на різних гірочастотах.
9. Вперше показано, що зафіксовані космічними апаратами UARS та TIMED зміни температури і динаміки верхньої атмосфери від тропосферних джерел можна пояснити турбулентними шарами на висотах 95–105 км, причиною яких є приріст швидкості вітру та температури в результаті наявності гравітаційних хвиль.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні цілісної картини розвитку спостережуваних турбулентних процесів у суміжних областях

магнітосфери Землі за спокійних і збурених умов та впливу цих процесів на стан навколоземного космічного простору. Отримані результати можуть бути використані не тільки для інтерпретації/верифікації спостережних ефектів у навколоземному космічному просторі, а й для теоретичного опису процесів у складних магнітогідродинамічних середовищах та планування наукових завдань наступних космічних експериментів.

**Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень.** Основні результати, положення та висновки, що виносяться на захист, логічно впливають з матеріалів дисертації та опублікованих за темою дисертації наукових праць. Достовірність результатів забезпечена застосуванням перевірених сучасних експериментальних методик, а також порівнянням проведених оцінок з відомими у літературі даними. Надійність основних наукових положень і висновків роботи базується на фізичній обґрунтованості запропонованих моделей та підходів до аналізу супутникових вимірів. Результати роботи були успішно апробовані на численних міжнародних конференціях.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є узагальненням результатів досліджень, що були виконані безпосередньо автором або за його безпосередньої участі, чи під його керівництвом. Роботи [26, 27] виконані автором одноосібно. У роботах [2, 4–12, 21, 25, 28–31] здобувач формулював наукову задачу дослідження, проводив розробку методики аналізу, брав участь у опрацюванні даних та написанні необхідного програмного забезпечення, аналізі отриманих результатів та написанні статей. У роботах [3, 19, 20, 32–34] автору належить постановка задачі досліджень та контроль за її виконанням, обговорення результатів, практична участь у розв'язанні завдань, участь у написанні статей. У роботі [18] автору належить постановка задачі дослідження, участь у аналізі отриманих результатів, обговорення та коригування тексту статті. У роботах [1, 16, 23, 35, 36] автор брав участь у постановці задачі досліджень, аналізі отриманих результатів, обговоренні та коригуванні тексту статей. У роботах [13–15, 22, 23] автор брав участь у постановці задачі, опрацюванні результатів експериментів, аналізі отриманих результатів, обговоренні та коригуванні тексту статей. У роботі [17] автор брав участь у опрацюванні результатів експериментів (взаємодія «хвиля–частинка»), аналізі отриманих результатів, обговоренні та коригуванні тексту статті. У роботах [24, 37], що є узагальнюючими роботами великої кількості авторів, автор брав участь у постановці задачі, підготовці матеріалу для публікації – а саме, своєї частини тексту, що стосується динамічних і турбулентних процесів у магнітосфері Землі.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали, які представлені в дисертаційній роботі, багаторазово апробовані на семінарах Інституту космічних досліджень НАНУ–ДКАУ, Головної астрономічної обсерваторії НАН України та кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка; робочих зустрічах в Інституті Макса Планка, Геттінген, Німеччина, Міжнародному інституті космічних досліджень відділення в Берні (Швейцарія) та Пекіні (КНР), а також доповідалися на наступних українських та міжнародних конференціях:

6-та, 7-ма, 8-ма 10-та, 11-та, 13-та Конференція із космічних досліджень, Євпаторія, Україна, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011, 2013 рр.;

17-та Українська конференція із космічних досліджень, Одеса, Україна,

2017 р.; 18-та Українська конференція із космічних досліджень, Київ, Україна, 2018 р.;

13th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Одеса, Україна, 2013 р.;

V Workshop on Computational Data Analysis and Numerical Methods (WCDANM) Фелгейраш, Португалія, 2018 р.;

16th, 18th, 20th, 21st, 22nd, 23rd, 24th, 25th, 26th, 27th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Київ, Україна 2009, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021 pp.;

20th, 22nd, 27th Annual Conference of Doctoral Students, Прага, Чехія, 2011, 2013, 2018 pp.;

36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, Київ, Україна, 2009 р.;

37th COSPAR Scientific Assembly, Монреаль, Канада, 2008 р.; 38th COSPAR Assembly 2010, Бремен, Німеччина, 2010 р.; 41st COSPAR Scientific Assembly, Стамбул, Туреччина, 2016 р.;

Cluster 29th workshop, Лансароте, Іспанія, 2019 р.;

General Assembly 2007 of the European Geosciences Union (EGU2007), General Assembly 2009 of the European Geosciences Union (EGU2009), General Assembly 2017 of the European Geosciences Union (EGU2017), General Assembly 2018 of the European Geosciences Union (EGU2018), General Assembly 2019 of the European Geosciences Union (EGU2019), Відень, Австрія, 2007, 2009, 2017, 2018, 2019 pp.;

Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science, Київ, Україна, 2019 р.; Fourth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science, Київ, Україна, 2017 р.; Second UK–Ukraine Meeting on Solar Physics and Space Science, Київ, Україна, 2013 р.;

5th, 6th, 9th Annual International Conference on Physics, Афіни, Греція, 2017, 2018, 2021 pp.;

14th International Symposium on Numerical Analysis of Fluid Flows, Heat and Mass Transfer, Родос, Греція, 2019 р.;

Fall Meeting of American Geophysical Union (AGU), Сан-Франциско, США, 2019 р.;

Міжнародна наукова конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті», Київ, Україна, 2011, 2013, 2014, 2015, 2017, 2021 pp.;

World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016), Прага, Чехія, 2016 р.;

Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, Київ, Україна, 2019 р.

**Публікації.** Результати, представлені в дисертації, опубліковано в 116 наукових роботах [1–116]: у 37 статтях у профільних наукових журналах [1–37], серед яких 13 статей відносяться до Q1, Q2 кuartилів; двох навчальних посібниках, один із яких із грифом МОН [38, 39], і в 77 матеріалах та тезах доповідей на українських та міжнародних конференціях [40–116].

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів основного тексту з рисунками і таблицями, висновків, списку використаних літературних джерел і п'яти додатків. Обсяг дисертації становить 350 сторінок. Вона



містить 131 рисунок (з них 30 розміщені на 26 окремих сторінках), 23 таблиці та 253 бібліографічні посилання.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, основні задачі, об'єкт та предмет дослідження, наведено нові наукові результати, що виносяться до захисту, та їх практичне значення. Також наведено дані щодо публікацій здобувача, його особистого внеску та апробації отриманих результатів. Вказано інформацію про структуру та обсяг дисертації.

У **розділі 1 «Магнітосфера Землі: структура та динаміка»** представлено огляд властивостей різних областей магнітосфери Землі та приділено значну увагу динамічним процесам у кожній області. Зокрема, розглянуто систему струмів та структуру магнітосфери Землі, що формується під впливом суперпозиції власної квазідипольної структури та потоку плазми від Сонця. Визначено найбільш збурені області магнітосфери Землі, які характеризуються високим рівнем флуктуацій параметрів плазми, інтенсивними конвективними рухами, магнітним переоб'єднанням та прискоренням частинок. В **підрозділі 1.1** коротко описано ланцюг процесів в області ударної хвилі (УХ), особливості утворення форшокової області (ФШ) для квазіпоздовжніх та квазіпаралельних УХ, а також зазначено роль магнітошару (МШ) у динаміці й енергетиці навколосередовища. В **підрозділі 1.2** коротко описано структуру хвоста магнітосфери Землі та відмічено особливості руху частинок у залежності від кривизни магнітної силової лінії та ларморівського радіуса. Опис процесів проникнення плазми в магнітосферу Землі зібрано в **підрозділі 1.3**. В цьому підрозділі проаналізовано: Perez'єднання магнітних полів; ефект скінченого гірорадіуса іонів; волокнисте проникнення плазми; дифузію; нестійкість Кельвіна–Гельмгольца; перенесення за рахунок поляризаційного і градієнтного дрейфу та імпульсне проникнення. Відносний внесок різних механізмів дотепер залишається нез'ясованим. Енергетичними «резервуарами», за допомогою яких відбувається трансформація електромагнітної енергії плазми СВ у кінетичну енергію потоків плазми в магнітосфері Землі, є тонкі струмові шари (**підрозділ 1.4**), товщиною порядку або менше іонного гірорадіуса. Вони фіксуються в різних областях магнітосфери і характеризуються підвищеним рівнем флуктуацій та є найбільш цікавими областями щодо аналізу турбулентних процесів. Метастабільні тонкі струмові шари реєструються переважно під час фази зародження суббури. Ланцюг процесів, що виникають під час розвитку суббури, розглянуто в **підрозділі 1.5**. Відмічено різні фази, якими характеризується суббура, зміну конфігурації магнітосфери, яка при цьому виникає і до яких наслідків це призводить. На сьогоднішній день є два основних сценарії розвитку суббури, які відрізняються локалізацією і механізмами, – в першому підході (модель CD (Current Disruption)) суббура розвивається на відстанях 6–15 радіусів Землі за рахунок маломасштабних розривів [127], в іншому (модель NENL (Near-Earth Neutral Line) – передбачається ініціація в середині хвоста на відстанях 15–30 радіусів Землі за рахунок великомасштабних процесів, які включають Perez'єднання силових ліній [132]. В якості фізичного механізму для них виступають різні кінетичні нестійкості (для NENL – розривна нестійкість, для CD – нестійкість струму). Розвиток

нестійкостей як у першому, так і у другому сценарії суббурі може призводити до виникнення турбулізованої області у хвості магнітосфери Землі. У **висновках до розділу 1** відмічено, що незважаючи на велику кількість факторів, які впливають на навколоземну плазму (магнітосфера – відкрита система, в якій відбувається велика кількість нелінійних процесів), для аналізу турбулентних процесів її можна розглядати як просторово-структуровану картину багатомасштабних згустків магнітного поля, між якими за складними хаотичними траєкторіями рухаються частинки, що підтримують струм, необхідний для самого існування такої плазмової конфігурації. Матеріали, представлені в розділі, частково опубліковано в [1, 23, 36, 38].

У **розділі 2 «Турбулентність та підходи до її визначення»** увагу зосереджено на особливостях і підходах до визначення турбулентних процесів. Вказано на відмінності в аналізі турбулентних процесів у гідродинамічних та магнітогідродинамічних потоках. Розглянуто наближення та моделі, які дозволяють не тільки якісно і кількісно описати особливості турбулентних процесів, а й оцінити характер дифузії. В **підрозділі 2.1** визначено, що найбільш зручним є теоретико-імовірнісний підхід, який трактує поля гідродинамічних величин у турбулентному потоці як випадкові. Це дозволяє на практиці замінювати теоретичні «середні по ансамблю» безпосередньо спостережуваними часовими (просторовими) середніми. Справедливість такої заміни може бути в деяких спеціальних випадках доведена строго (ергодична теорема Дж. Біркгофа) [126], в більшості ж випадків достатньо ергодичної гіпотези. В дисертаційній роботі розглядається розвинена турбулентність (**підрозділ 2.2**), що характеризується наявністю пульсацій різних масштабів та каскадним процесом в інерційному інтервалі. Зазначено, що оскільки розвинена турбулентність характеризується багатомасштабною структурою поля швидкостей (величезною кількістю ступенів вільності в системі), то підхід до опису розвиненої турбулентності – по суті, обмеження числа ступенів вільності, що призводить до відповідних підходів чи моделей [39, 118, 123] (**додаток А**). Визначено, що за наявності неоднорідності турбулентних процесів (переміжності) спостерігається відхилення від закону «двох третіх/п'яти третіх» Колмогорова 1941 р., і виникає необхідність фрактального підходу до опису турбулентності (**підрозділ 2.3**). Визначено, що симетрії, які відповідальні за масштабну інваріантність рівнянь Нав'є–Стокса, формують властивості каскаду енергії в турбулентному потоці. При цьому однаковий закон самоподібності для різних параметрів, що характеризують турбулентний потік, дозволяє використовувати підходи, розвинуті для аналізу поля швидкостей (наприклад, із експерименту визначати показник степеня структурної функції) і для характеристики інших параметрів плазми (наприклад, індукція магнітного поля, густина). Розглянуті вище в **розділі 2** підходи є загальними для гідродинамічних та магнітогідродинамічних турбулентних потоків, але наявність магнітного поля накладає додаткові умови (**підрозділ 2.4**). В МГД-середовищі ми стикаємося із відсутністю однозначності у визначенні часу каскаду (альвенівський час і «вихровий» час співвіднесені з кожним хвильовим пакетом), а турбулентність в цій області узгоджується з моделлю Ірошнікова–Крейчнана. Відзначено також, що за наявності сильної турбулентності більш придатною буде модель Гольдрайха–Шридхара, що враховує баланс нелінійних членів у МГД-рівнянні, а спектр каскаду буде близький до

колмогорівського. У **висновках до розділу 2** відмічено, що ми ще далеко від розуміння того, що насправді відбувається в турбулентному МГД-поточи на динамічному рівні, а дослідити тип турбулентних рухів із експериментальних вимірювань можна, використовуючи статистичні властивості турбулентності, пов'язані з масштабною інваріантністю, і отримати оцінки для скейлінгу (показників степеня залежності параметрів плазми в припущенні степеневих законів). Матеріал, представлений в цьому розділі частково опубліковано в наступних роботах [24, 27, 39].

В **розділі 3 «Турбулентні процеси в хвості магнітосфери Землі»** проаналізовано турбулентні процеси в хвості магнітосфери Землі під час диполяризації/розриву струмового шару, що супроводжують вибухову фазу суббури. При цьому проведено спектральний, статистичний та дисперсійний аналіз подій за 2001–2019 рр. зі списку, зібраному в **додатку Б (97 подій)**. Аналіз вимірів ферозондових магнітометрів (FGM (дискретність вимірів 22.5 Гц)) [117], встановлених на космічних апаратах (КА) місії «Кластер-2» в близькому геомагнітному хвості (10–16  $R_E$ ) для подій 2005–2015 рр., дозволив визначити особливості диполяризаційних фронтів (**підрозділ 3.1**): швидкість варіюється від  $182 \pm 37.0$  км/с (9 вересня 2014 р.) до  $705.3 \pm 77.1$  км/с (24 липня 2015 р.), напрямок руху диполяризаційного фронту – до Землі; товщина фронту – від 49 до 1056 км; відмінність нормалей у різних точках та хороше узгодження форми диполяризаційного фронту із формулою Fu et al. (2012) [124]. В **підрозділі 3.2**, використовуючи виміри температури, швидкості та концентрації електронів та різних типів іонів з експериментів PEACE [130] та CIS-CODIF [131] (дискретність вимірів 0.125–0.25 Гц), визначено характеристики плазми у хвості магнітосфери під час суббури. Серед отриманих результатів можна відмітити, що під час суббури концентрація протонів на порядок перевищує концентрацію іонів гелію і майже на два порядки перевищує концентрацію іонів кисню; спостерігається зростання температури, флуктуацій швидкості та тисків; наявність затримки в часі між зростанням температури протонів і температури іонів кисню; альвенівська швидкість фіксується в межах від 640 до 360 км/с, а параметр  $\beta$ , який характеризує відношення теплового тиску до магнітного, більше одиниці.

В рамках спектрального аналізу (**підрозділ 3.3**) із використанням дискретного фур'є-перетворення визначено залежності спектральної густини потужності  $PSD$  від частоти. Обмеження частот зверху викликано присутністю інструментального шуму, а знизу – об'ємом вибірки даних і крайовим ефектом процедури згладжування. Приклад результату розрахунку спектральної густини потужності для абсолютного значення магнітного поля представлено на рис. 1.

Зафіксовано суттєву відмінність спектрального індексу для моментів до і під час диполяризації. Так, до диполяризації на розглянутих інтервалах, де відносний рівень флуктуацій магнітного поля варіюється від 0.2 до 0.5, спектральний індекс лежить в межах від  $-2.14$  до  $-1.57$  (модель Колмогорова –  $\sim -5/3$ ), а під час диполяризації змінюється тип турбулентних рухів: на більших часових масштабах спектральний індекс лежить у діапазоні від  $-2.00$  до  $-1.31$  (близький до однорідної МГД), а на менших часових масштабах спектральний індекс  $-2.99 \div -2.33$  (Холл–МГД-модель). Злам фіксується на значеннях менше/рівне гірчастоти протона.

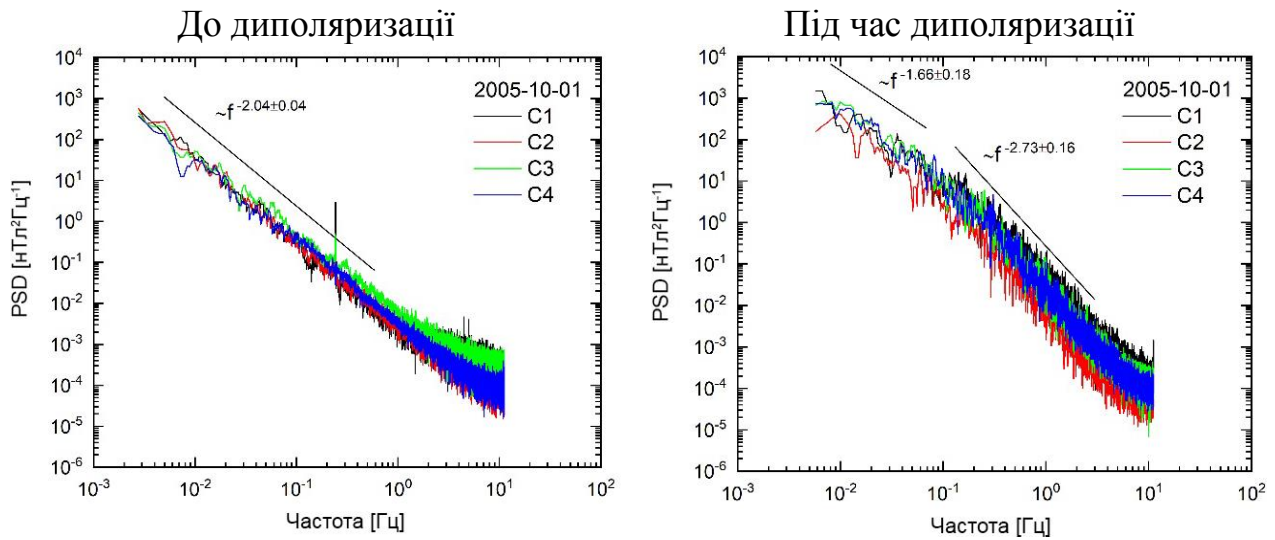


Рис. 1. Приклад результату спектрального аналізу даних

У ході порівняння значення спектральних індексів у моменти до суббурі і після її повної релаксації визначено, що вони дещо вищі, ніж перед початком суббурі. Порівняння внеску Vz-компоненти магнітного поля в загальну картину процесів під час суббурі показав, що для всіх спектрів і для модуля магнітного поля, і для Vz-складової спостерігається злам (рис. 2) на частоті, знову ж таки меншій або близькій до середнього значення гірочастоти протонів. При цьому, на всьому розглянутому часовому інтервалі, абсолютні значення показника степеня для модуля магнітного поля та Vz-компоненти хоч і в межах похибки, але здебільшого мають більші значення (може вказувати на швидше перетворення енергії вздовж осі  $z$ ). Також зафіксовано кореляцію між значеннями спектрального індексу на малих часових масштабах зі значенням параметра  $\beta$ : при збільшенні параметра бета абсолютне значення спектрального індексу зростає [10].

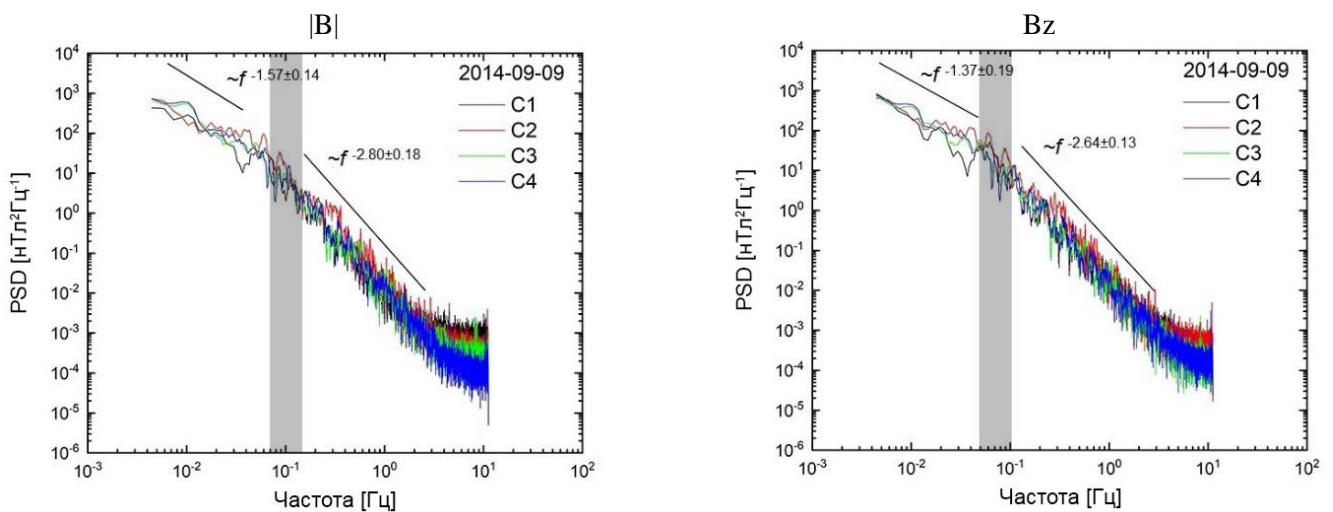


Рис. 2. Приклад результату порівняння спектральних залежностей для модуля магнітного поля та Vz-компоненти під час суббур (розриву струмового шару)

В рамках статистичного аналізу (підрозділ 3.4) досліджено статистичні

властивості абсолютного значення варіацій магнітного поля на різних часових масштабах. Чітко прослідковується, що під час диполяризації хвости розподілів ймовірностей стають більш широкими (розширюються більш ніж у чотири рази). Це вказує на наявність переміжності, що викликана нелінійним, неоднорідним перенесенням енергії. Крім вимірів космічної місії Кластер-2, особливості функції густини ймовірностей флуктуацій магнітного поля в хвості магнітосфери Землі аналізувалися і за вимірами супутника Geotail у 1997, 1999 та 2000 рр. (КА знаходився в струмовому шарі на відстанях від 8 до 10 радіусів Землі, дані представлені з роздільною здатністю 0.062–0.063 с) [2]. Аналіз еволюції висоти максимуму функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля в залежності від масштабу показав два асимптотичні режими, які характеризуються різними степеневими законами: на великих часових масштабах зміна максимуму функції густини ймовірності характеризується гауссівським процесом, а для малих часових масштабів – описується розподілом Леві. Про відхилення функції розподілу густини ймовірності флуктуацій досліджуваних параметрів від нормального розподілу вказує і аналіз ексцесу. Зафіксовано, що для області диполяризації на малих часових масштабах ми маємо розподіл з більш високою вершиною і широкими крилами (значення ексцесу більше 3), ніж у нормального розподілу, і масштаб переходу – менше/рівне гірчастоті протона (рис. 3).

Наявність переміжності підтвердилася також і при аналізі першого порядку структурної функції (показник Гельдера). Використання критерію узагальненої самоподібності для довільної пари структурних функцій дозволило визначити показник степеня структурних функцій високих порядків та порівняти спостережувані турбулентні процеси із наявними однорідними та неоднорідними моделями. Результати ESS-аналізу супутникових вимірів показали неоднорідність турбулентних процесів на малих масштабах під час диполяризації, описати які можна логпуассонівською каскадною моделлю із параметрами підгонки (параметр, що характеризує переміжність, варіюється в межах від 0.34 до 0.68, а параметр, що відповідає за форму дисипативних структур, від 0.20 до 0.92).

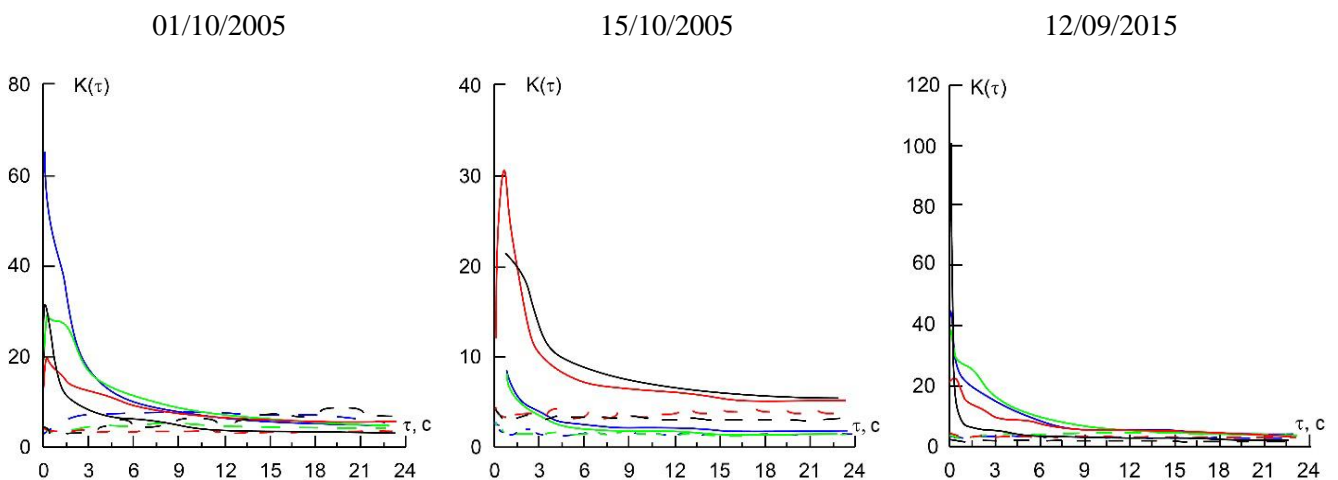


Рис. 3. Результати порівняння значення ексцесу до диполяризації (суцільна лінія) та під час диполяризації (пунктирна лінія). Кольорова градація така ж, як і на рис. 1

Для визначення особливостей перенесення плазми (підрозділ 3.5) використано

зв'язок коефіцієнта узагальненої дифузії із параметрами скейлінгу структурної функції. Отримані значення вказують на зміну характеру дифузійних процесів у залежності від масштабу розгляду (степенева залежність). Показник степеня варіюється в межах 0.2–0.77, що вказує на наявність супердифузійних процесів. Із значенням коефіцієнта дифузії корелює також спектральний індекс.

В ході вейвлет-аналізу (опис використаного вейвлету подано в додатку В) у флуктуаціях магнітного поля під час суббурі зафіксовано потужні сигнали з періодами 50, 125, 400 с (рис. 4) (підрозділ 3.6).

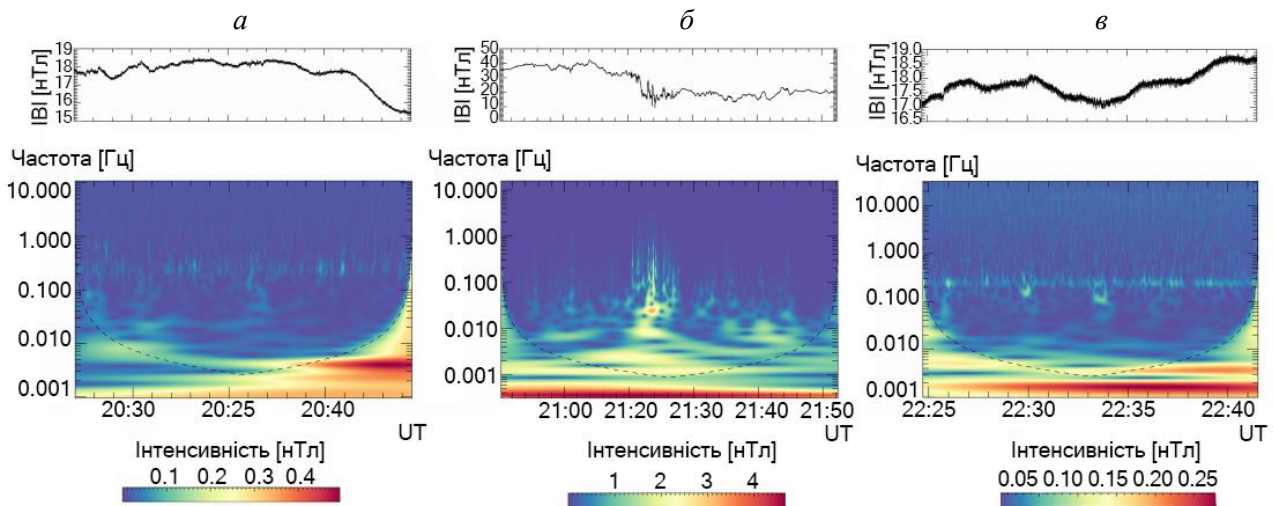


Рис. 4. Приклад результату вейвлет-перетворення для модуля магнітного поля: *а* – до ініціації суббурі, *б* – під час суббурі та *в* – після суббурі 20 вересня 2015 р.

Рс4- і Рі1-пульсації чітко спостерігаються і для Vz-компоненти. Наявність даних пульсацій вказує на інжекцію високоенергетичних частинок, а також на наявність нестійкостей (зокрема на наявність нестійкостей Кельвіна–Гельмгольца [14], потокової нестійкості та ін.). Геомагнітні пульсації, які спостерігаються для магнітного тиску, чітко проявляються і при аналізі динамічного тиску протонів та теплового тиску протонів та електронів (рис. 5). При цьому амплітуди флуктуацій для них суттєво різняться. Для динамічних тисків гелію, кисню, а також для їх теплових тисків зафіксовано тільки пульсації в області високих частот. В області диполяризації магнітного поля чітко виявляються як прямі, так і зворотні каскадні процеси. Наявність каскадів, а особливо зворотних каскадів (перехід до менших хвильових чисел/більших вихорів) згідно з [119], вказує на спонтанну генерацію масштабних когерентних структур (самоорганізацію).

Вимірювання характеристик плазми одночасно декількома КА (багатоточкові вимірювання) дозволили отримати дисперсійні залежності із аналізу експериментальних даних (підрозділ 3.7). Приклад отриманих дисперсійних залежностей із використанням методу хвильової зйомки в області диполяризації магнітного поля подано на рис. 6. Вхідними параметрами були часові ряди зміни магнітного поля, координати сенсорів (положення КА) та середній вектор потокової швидкості середовища. Суттєвий розкид значень, особливо в високочастотній області, вказує на наявність в області диполяризації нелінійного енергетичного каскаду, що повністю узгоджується із представленим вище спектральним та

статистичним аналізом.

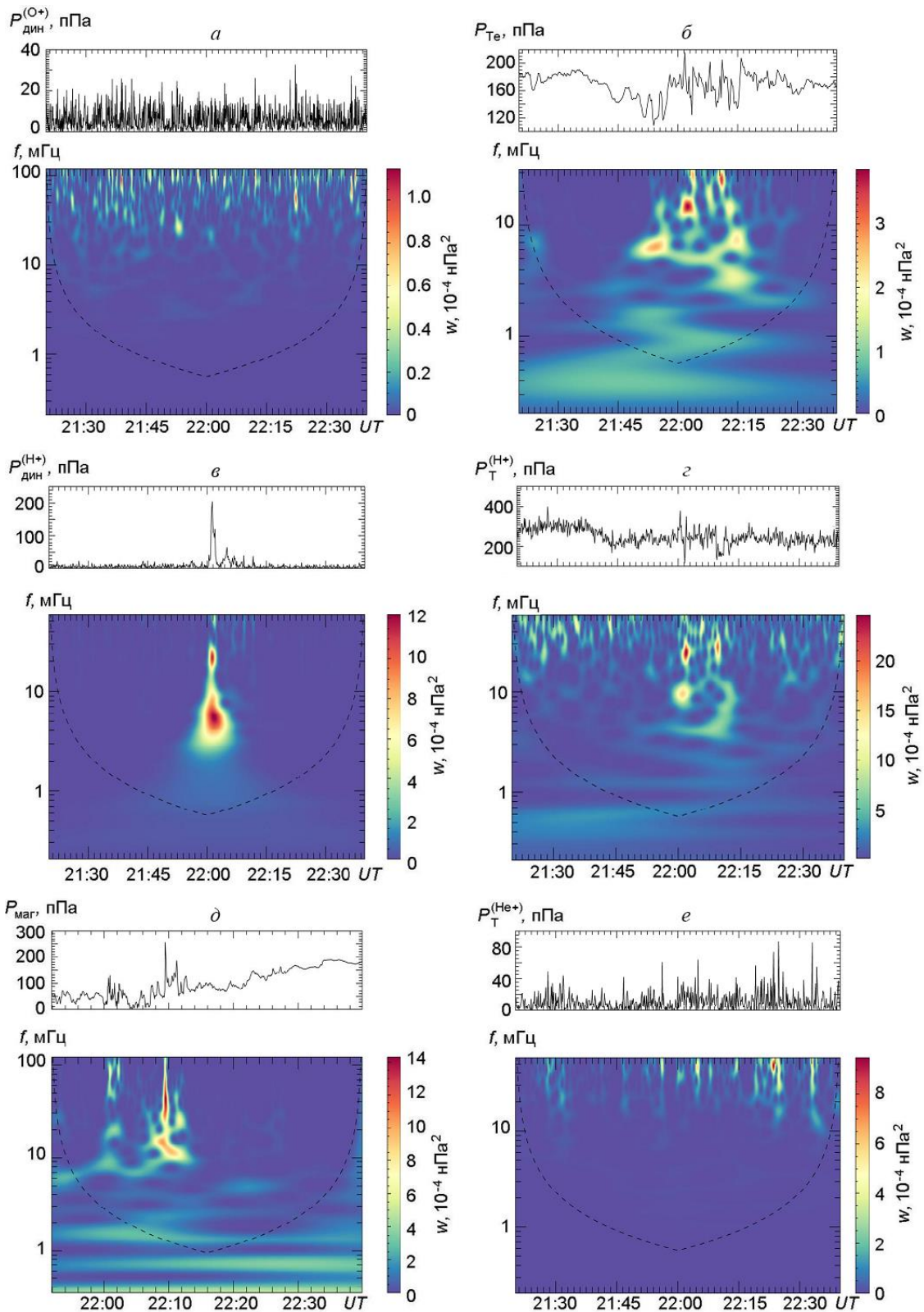


Рис. 5. Результати вейвлет-аналізу за вимірами КА С4 флуктуацій тисків в області диполаризації магнітного поля під час суббури 11 серпня 2015 р.: *a* – динамічний тиск для іонізованого кисню; *б* – тепловий тиск для електронів; *в* – динамічний тиск для протонів; *г* – тепловий тиск для протонів; *д* – тиск магнітного поля; *е* – тепловий тиск для іонізованого гелію

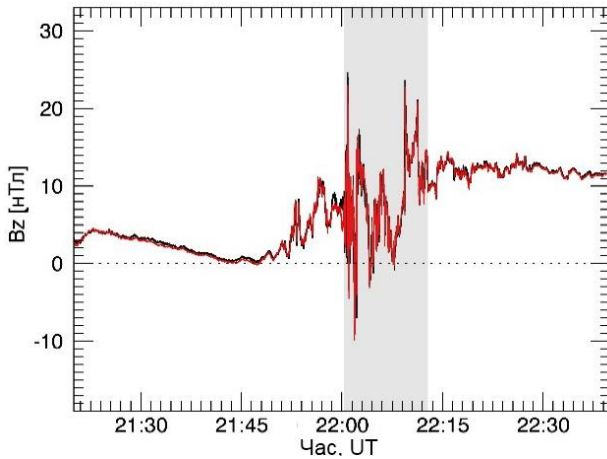


Рис. 6а. Зміни  $V_z$ -компоненти магнітного поля для 11 серпня 2015 р. під час диполаризації магнітного поля

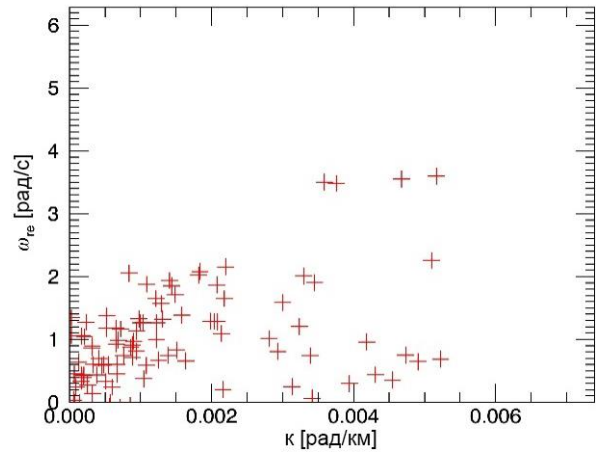


Рис. 6б. Дисперсійна залежність для  $V_z$ -компоненти магнітного поля для 11 серпня 2015 р. під час диполаризації магнітного поля

У висновках до розділу 3 вказано основні отримані результати та відмічено, що більш детально із матеріалом, який представлено, можна ознайомитися в роботах [2, 4, 8–11, 18, 30, 40].

**Розділ 4 «Турбулентні процеси в області магнітошару»** присвячено аналізу турбулентних процесів у «підсонячних» областях магнітосфери Землі: форшоковій області (ФШ), постшоковій області (ПШ), магнітошарі (МШ), магнітопаузі (МП) та області каспу за супутниковими вимірами в період 1996–2014 рр. (50 подій). Розділ складається із двох частин: у першій частині проводиться аналіз турбулентних процесів у пограничних областях магнітосфери за вимірами супутника Інтербол-1 (підрозділ 4.1), а у другій – за вимірами космічних апаратів місії Кластер-2 (підрозділ 4.2).

За вимірами супутника Інтербол-1 визначено, що ФШ-область заповнена висококогерентними та синфазними коливаннями магнітного поля й потоку (коефіцієнт кореляції  $\sim 0.8$ ), при перетині УХ зростає інтенсивність флуктуацій та змінюється їх структура (в постшоковій області варіації поля і плазми інтенсивні та низькокогерентні; у глибині МШ магнітне поле із сильними флуктуаціями за напрямом переважно стискається). Зафіксована відмінність у спектральних індексах ПШ ( $p_{B1} = 1.8 \pm 0.06$ ) і МШ ( $p_{B1} = 2.7 \pm 0.05$ ) вказує на різну природу низькочастотної (великомасштабної) турбулентності в цих областях.

Аналіз функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля (рис. 7) показав відмінність структури турбулентності для перехідних областей магнітосфери: ми маємо два асимптотичні режими зміни максимуму функції густини ймовірності (PDF), що характеризується різними степеневими законами  $P(0) \sim \tau^{-s}$ : на великих часових масштабах зміна максимуму функції густини подібна до типового гауссівського розподілу ( $s \sim 0.5$ ). Для малих часових масштабів спостережувані особливості краще описуються розподілом Леві ( $s \sim 1$ ). Перетин двох асимптот приблизно відповідає значенню 1 с, що вдалося пов'язати із гірорадіусом протона. Наявність двох різних режимів вказує, що для опису процесів із характерним масштабом  $L > 100$  км можемо використовувати рівняння



магнітогідродинаміки, а для опису процесів з характерним масштабом менше 100 км – електронну МГД або кінетичні рівняння.

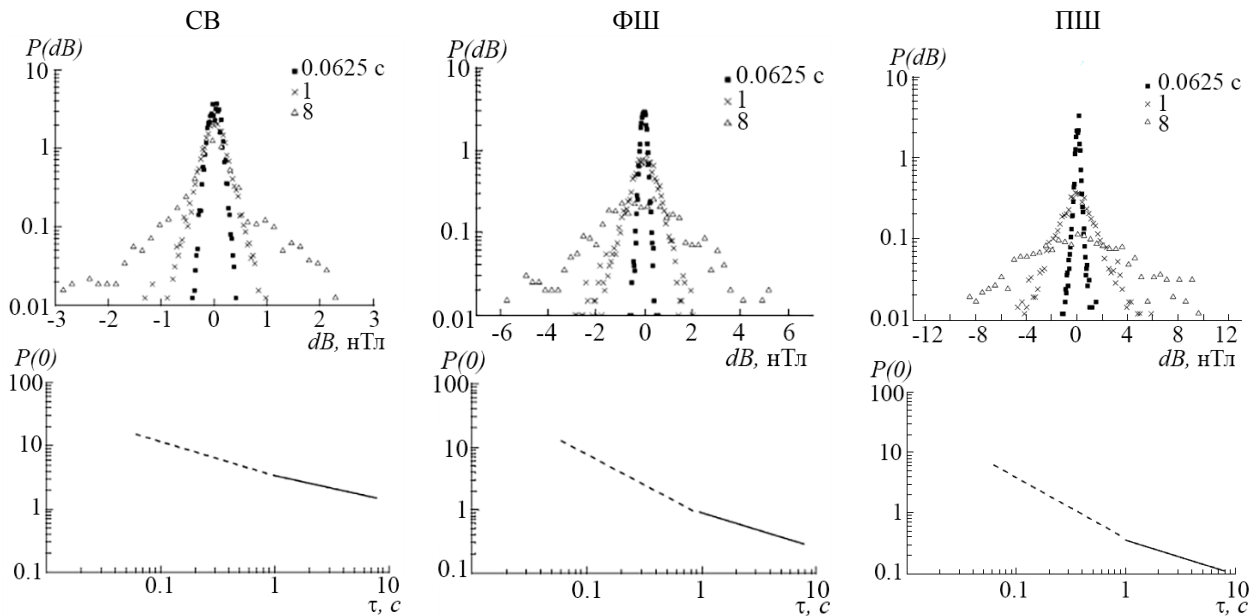


Рис.7. Аналіз функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля (вгорі) та еволюції максимуму функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля (внизу)

ESS-аналіз показав відмінність для дрібномасштабної турбулентності в ФШ, МШ та в областях аврорального овалу: процеси в ФШ близькі до моделі однорідної ізотропної 3D-турбулентності (K41), а для плазми МШ і області входження в касп – логпуассонівської каскадної моделі з параметрами Ше–Левека.

За вимірами супутника Кластер-2 (48 подій зібрано в **додатку Г**) визначено, що флуктуації в магнітошарі суттєво відрізняються від незбуреного сонячного вітру насамперед набагато більш високою мінливістю параметрів плазми (відносні варіації магнітного поля перевищують значення в СВ приблизно в 2–3 рази). В рамках порівняння між лінійним та спектральним аналізом (**пункт 4.2.1**) підтверджено отримані в роботі [129] переваги фрактального аналізу, а саме: фрактальний аналіз характеризується значно більшою стабільністю і локалізацією в часі, ніж спектральний аналіз; крім того, він дає надійні результати навіть при аналізі на масштабах, які складають значну частину всього інтервалу вимірів. Зафіксовано, що часовий масштаб, на якому відбувається зміна фрактальної розмірності, близький до значення іонноциклотронної частоти і характеризує різні масштаби розгляду турбулентних процесів у форшоковій області магнітосфери Землі. Еволюція максимуму PDF показала, що для малих масштабів, за виключенням плазми сонячного вітру, розподіл помітно відхиляється від гауссівського. На масштабах більше 1 с значення показника степеня ( $s$ ) лежить в діапазоні від 0.62 до 0.47, а злам залежності добре співвідноситься зі значенням для іонноциклотронної частоти в проаналізованих областях (рис. 8). Відмінності спостерігалися при наявності відносних флуктуацій у плазмі сонячного вітру, що перевищували значення 0.3.

Зміну переміжності турбулентних процесів показав і аналіз ексцесу (**пункт 4.2.2**).

В рамках мультифрактального підходу (**пункт 4.2.3**) було побудовано мультифрактальний спектр (спектр сингулярностей) та проведено порівняння із однорідними моделями турбулентних процесів (Колмогорова й Ірошнікова–Крейчнана) та логпуассонівською моделлю з параметрами Ше–Левека і моделлю Пулітано–Пукке (рис. 9). Мультифрактальний спектр має дугоподібний характер із уширенням у межах 0.2–0.7 (для різних областей). Найбільше уширення спостерігається для постшокової області, а найменше для форшоку (випадок квазіпаралельних УХ).

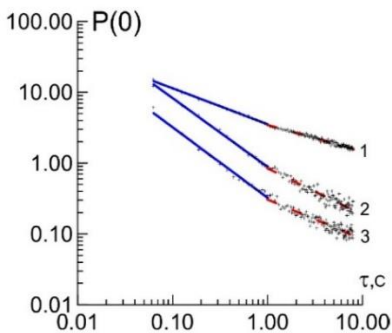


Рис. 8. Еволюція максимуму функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля  $P(0)$  від кроку по часу в логарифмічному масштабі.

Експериментальні точки апроксимувалися прямою  $P(0) \sim \tau^{-s}$ : 1 – ФШ, 2 – МШ, 3 – ПШ. Суцільна лінія – для малих часових масштабів, штрихова – для великих

Отримано, що турбулентні процеси в плазмі сонячного вітру можна описати двовимірною моделлю Ірошнікова–Крейчнана (при середніх варіаціях  $\sim 0.25$ ) та ізотропною моделлю Колмогорова, якщо варіації значно менші (0.05–0.15). При цьому інерційний діапазон у перехідних областях магнітосфери Землі на порядок менший, ніж у плазмі сонячного вітру.

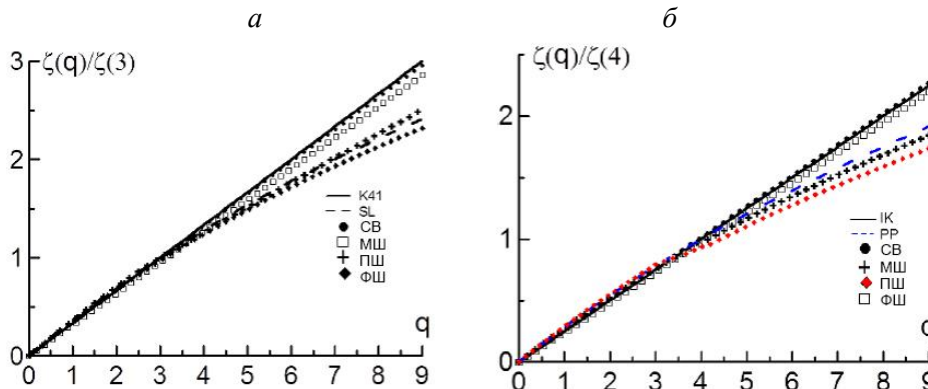


Рис. 9. Результати порівняння із моделями турбулентності: *a* – відношення експоненціального значення структурної функції  $q$ -того порядку до третього порядку для події 9 квітня 2014 р. Лінії – значення, розраховані за моделлю Колмогорова (K41); SL – значення, розраховані за ізотропною логпуассонівською каскадною моделлю. Експериментальні значення показано символами; *б* – відношення експоненціального значення структурної функції  $q$ -того порядку до четвертого порядку для події 1 травня 2008 р. Експериментальні значення показано символами. Лінії – значення, розраховані за моделлю Ірошнікова–Крейчнана (IK); PP – значення, розраховані за моделлю Пулітано–Пукке

Використовуючи еволюцію максимуму PDF та коефіцієнти підгонки в логпуассонівській моделі, отримано, що значення узагальненого коефіцієнта дифузії зростає при зміні масштабів розгляду процесів (**пункт 4.2.4**). Так, при аналізі еволюції функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля показник степеня залежності узагальненого коефіцієнта дифузії ( $R$ ) від масштабів у перехідних областях магнітосфери – ФШ, ПШ та МШ – варіюється в межах 0.32–0.92. При цьому найбільші значення спостерігаються для ПШ-області. В результаті аналізу властивостей статистичних моментів отримані значення параметра  $R$  лежать у межах 0.3–0.98. Найбільші значення також спостерігаються для ПШ.

Проведений вейвлет-аналіз (**пункт 4.2.5**) показав наявність в області магнітосфери прямих і зворотних каскадних процесів, а біспектральний аналіз (**пункт 4.2.6**) – наявність фазового зв'язку між різними частотними сигналами, які мають місце у флуктуаціях магнітного поля.

У **висновках до розділу 4** подано основні отримані результати та вказано, що більш детально із матеріалом, який представлено в цьому розділі, можна ознайомитися в роботах [6, 7, 12, 19, 20, 28, 31, 34, 37].

**Розділ 5 «Енергетика потоків у турбулентних областях»** присвячено аналізу енергетики потоків у турбулентних областях, де окремо розглянуто особливості потоків електронів та різних типів іонів. Аналіз зміни потоків плазми із використанням вимірів спектрометрів RAPID (Research with Adaptive Particle Imaging Detectors) у діапазоні енергій 20–400 кеВ [134] та CODIF (COmposition DIstribution Function) у діапазоні енергій 0–38 кеВ для окремих подій (**підрозділ 5.1**) показав відмінність в характеристиках «низько» і високоенергетичних електронів та іонів (рис. 10а).

Після початку диполяризації спостерігаються множинні та короткі інжекції електронів та протонів. Кількість інжекцій протонів суттєво менша, та фіксуються зсуви між спостережними потоками електронів та протонів: інжекції електронів спостерігалися до диполяризації магнітного поля, а протонів – після (адіабатичний рух електронів і неадіабатичний рух протонів). Чітко прослідковується відмінність у зміні потоків у різних енергетичних каналах – селективне прискорення частини протонів у залежності від їх енергії.

Аналіз потужності коливань магнітного поля на гірчастоті різних типів іонів показав, що резонансні взаємодії іонів з низькочастотними електромагнітними хвилями більш суттєвіші для «важких» складових (іонів гелію та кисню) (рис. 10б).

Використання методу накладання епох для узагальнення залежності динаміки різних типів іонів в області багатократної диполяризації магнітного поля під час суббур (**підрозділ 5.2**) підтвердило селективне зростання потоків іонів у залежності від енергії та відповідність між зростанням потоку і зменшенням спектрального індексу  $\gamma$ . Але, на відміну від поведінки потоків іонів, зменшення  $\gamma$  спостерігалось протягом різних часових інтервалів для різних типів іонів. При цьому для потоків іонів високих енергій (надтеплових іонів) спостерігається збільшення за декілька хвилин до початку диполяризації ( $\sim 3$  хв), яке тривало наступні  $\sim 8$  хв (рис. 11).

Аналіз змін магнітного поля і потоків частинок у магнітосфері Юпітера показав, що турбулентність відіграє суттєву роль у прискоренні іонів (важких іонів) і в магнітосферах інших планет (**підрозділ 5.3**).

а

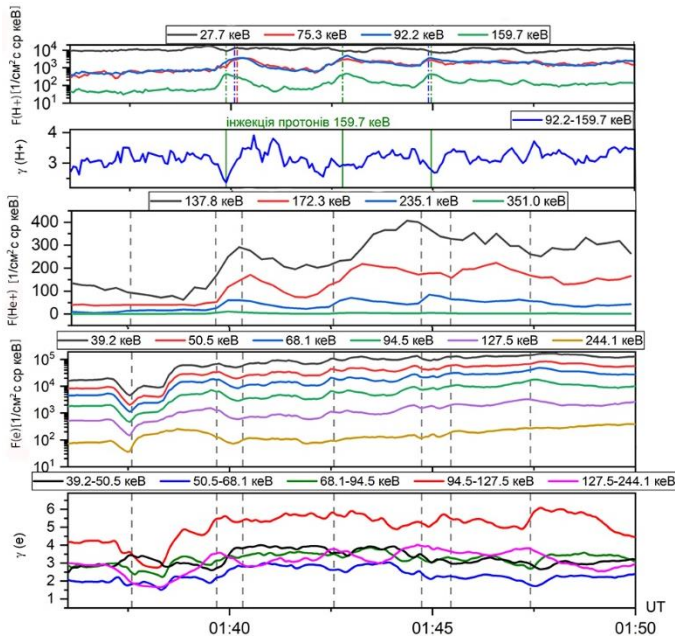


Рис. 10. Порівняння змін потоків протонів, іонів гелію та електронів у різних енергетичних каналах із зазначенням змін спектрального індексу (а) та інтенсивності вейвлет-сигналу на різних гірчастотах (б) в області множинної диполяризації для суббури 20 липня 2013 р.

б

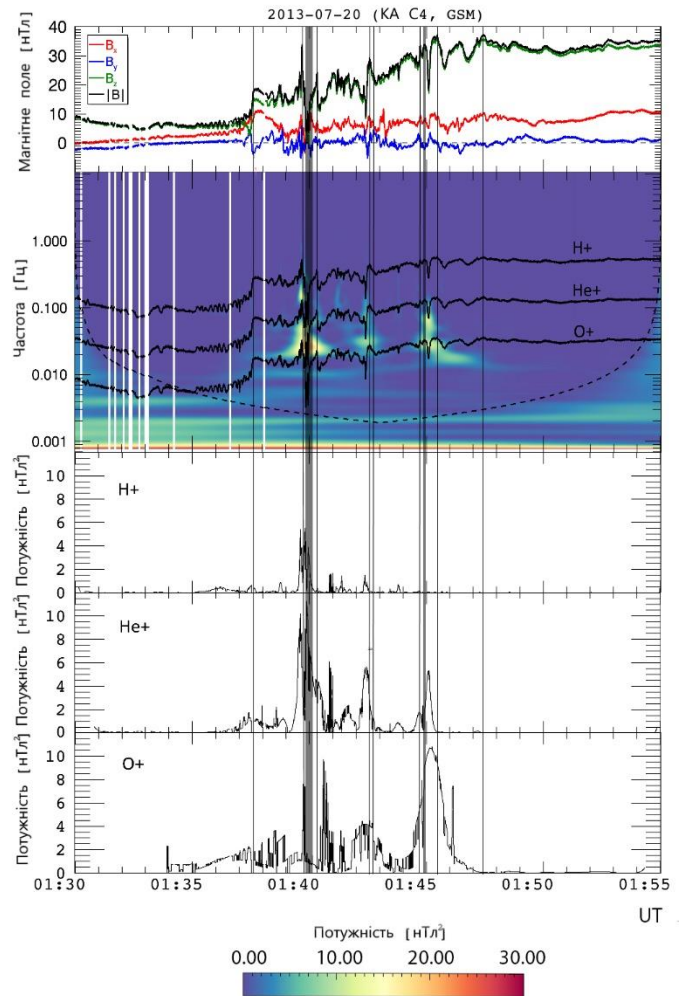
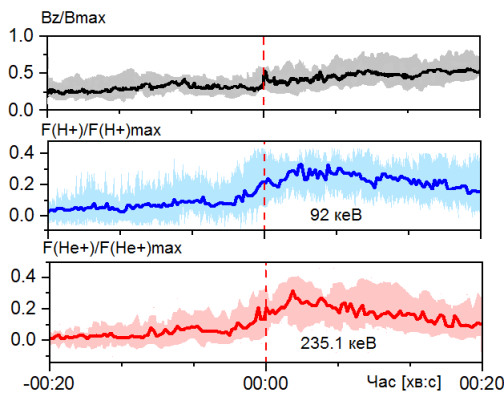


Рис. 11. Приклад зміни магнітного поля та потоків протонів та гелію в різних енергетичних каналах для подій 2001 – 2015 рр. Результати отримані методом накладання епох. Нуль-пункт – початок диполяризації (перший фронт диполяризації)



У висновках до розділу 5 представлено основні отримані результати та зазначено, що більш детально із матеріалом, який представлено в цьому розділі, можна ознайомитися в роботах [14, 16, 17].

Оскільки за спостережні пульсації відповідають різні типи нестійкостей, в розділі 6 «Порівняння наземних та супутникових геомагнітних пульсацій під час суббур» проведено порівняння між виникненням пульсацій магнітного поля на висотах магнітосфери та початком реєстрації і локалізацією збурення на поверхні планети. Для аналізу було використано виміри флуктуацій магнітного поля з ферозондових магнітометрів космічних апаратів місії Кластер-2 (<https://csa.esac.esa.int/csa-web/>) та виміри із наземних магнітометрів мереж

Intermagnet ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)) та SuperMag ([supermag.jhuapl.edu/info](http://supermag.jhuapl.edu/info)) в області аврорального овалу (**підрозділ 6.1**). Для пошуку суббур було використано ряди узагальненого аврорального індексу (SML). Наземні обсерваторії, виміри яких було відібрано для розгляду, визначалися через програму візуалізації локалізації космічних апаратів з асоційованими силовими лініями геомагнітного хвоста (програма 3DView).

Для визначення геомагнітних пульсацій було використано неперервне вейвлет-перетворення (рис. 12), а для оцінки типу пульсацій і спостережуваних зсувів між зареєстрованими в хвості магнітосфери Землі та в області аврорального овалу пульсаціями було розглянуто інтегроване представлення в різних частотних діапазонах (**підрозділ 6.2**). Зафіксовано скорельовані Pi2- і Pc5-пульсації під час суббур в авроральній області та в хвості магнітосфери. Величина зареєстрованих збурень залежить від взаємної локації наземних магнітометрів та проекції силової лінії, на якій знаходяться космічні апарати. Зафіксовані ефекти вдалося пояснити наявністю струмового клину, що виникає під час суббури. Із затримки в часі між максимумами геомагнітних пульсацій на поверхні Землі та на магнітосферних висотах оцінено швидкість поширення збурення вздовж силової лінії магнітного поля (значення узгоджуються із значенням альвенівської швидкості в струмовому шарі).

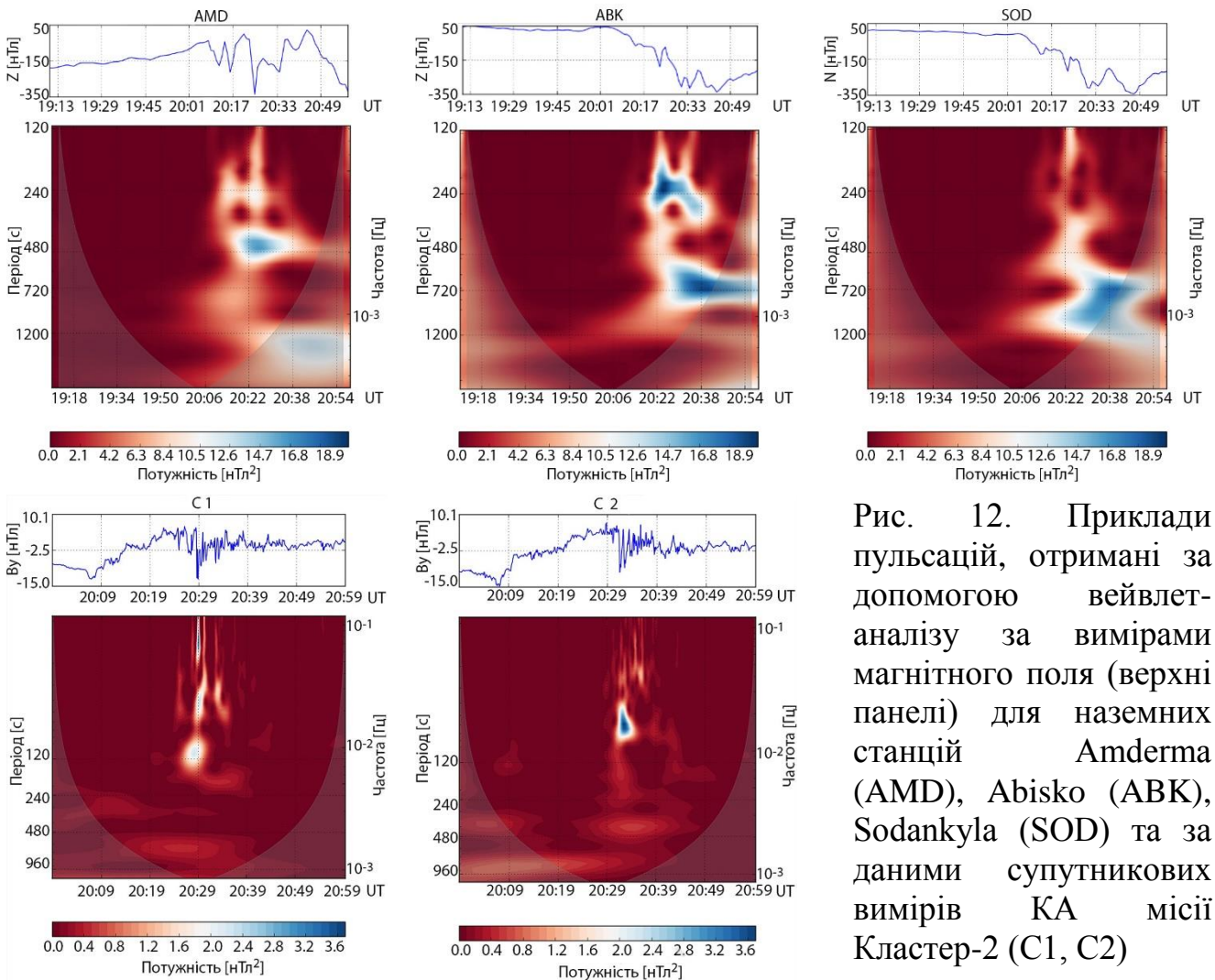


Рис. 12. Приклади пульсацій, отримані за допомогою вейвлет-аналізу за вимірами магнітного поля (верхні панелі) для наземних станцій Amderma (AMD), Abisko (ABK), Sodankyla (SOD) та за даними супутникових вимірів КА місії Кластер-2 (C1, C2)

У **висновках до розділу 6** подано отримані результати та вказано, що більш детально із матеріалом, який представлено в розділі, можна ознайомитися в роботах [3, 15].

**Розділ 7 «Зміни турбулентних процесів, викликані потоками знизу»** дисертації присвячено аналізу зміни турбулентних процесів у верхній атмосфері Землі (висоти 70–120 км). У **підрозділі 7.1** визначено зміну коефіцієнтів турбулентної в'язкості і температуропровідності в залежності від градієнтів температури та швидкості з висотою. Отримано залежність від висоти границі інерційного інтервалу та вказано, що врахування збурень від джерел енергії «знизу» зводиться до визначення приросту температури та вітру відносно «фонових» значень (знаходження змін вітру і температури в результаті проходження хвиль). Аналіз варіацій температури та змін термосферної циркуляції над ураганами за вимірами на супутнику UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) [<https://mls.jpl.nasa.gov/uars-mls/data>] протягом 1993–1994 рр. (**підрозділ 7.2**) показав підвищення температури на 25–45 К на висотах мезопаузи та обертання вектора швидкості убік від центру урагану. Аналогічні дослідження змін температури над ураганами 2005 р. було проведено й з використанням вимірів супутника TIMED [<http://www.timed.jhuapl.edu/WWW/mission/mission.php>] (**підрозділ 7.3**), де також зафіксовано підвищення температури на 25–40 К над ураганами на рівні мезопаузи (рис. 13), яке не можна пояснити змінами сонячної і геомагнітної активності.

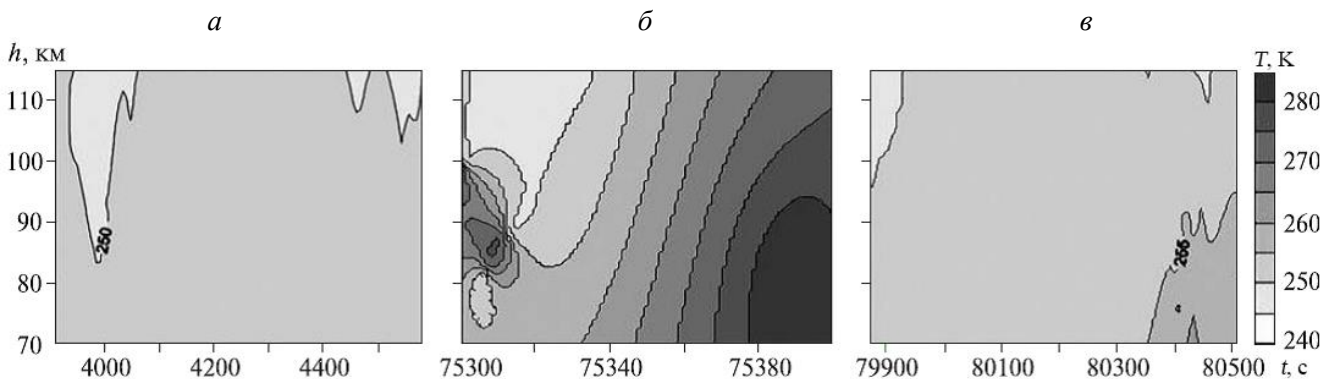


Рис. 13. Зміна температури з часом на різних висотах  $h$ : *a*, *б*, *в* — до, під час та після урагану Катріна (21 серпня, 28 серпня та 2 вересня 2005 р. відповідно)

В **підрозділі 7.4** розглянуто перенесення збурення у верхню атмосферу за допомогою атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ). При моделюванні поширення АГХ в атмосфері був взятий за основу метод розв'язку рівнянь Нав'є–Стокса, представлений ще в роботах [121, 122], а концентрації основних складових нейтральної атмосфери Землі розраховувалися за моделлю нейтральної атмосфери MSIS-E-90 [125]. Визначено, що хвилі розповсюджуються до висот 120 км, а максимальне значення їх амплітуди відповідає діапазону висот від 90 до 100 км (рис. 14). На величину збурення температури та швидкості впливає як горизонтальна складова хвильового вектора, так і вибраний період хвилі. При цьому зміни горизонтальної складової швидкості майже на порядок перевищують приріст вертикальної компоненти.

Зміни температури та швидкості в результаті поширення АГХ призводять до

виникнення/інтенсифікації тонких турбулізованих шарів на висотах 95–105 км.

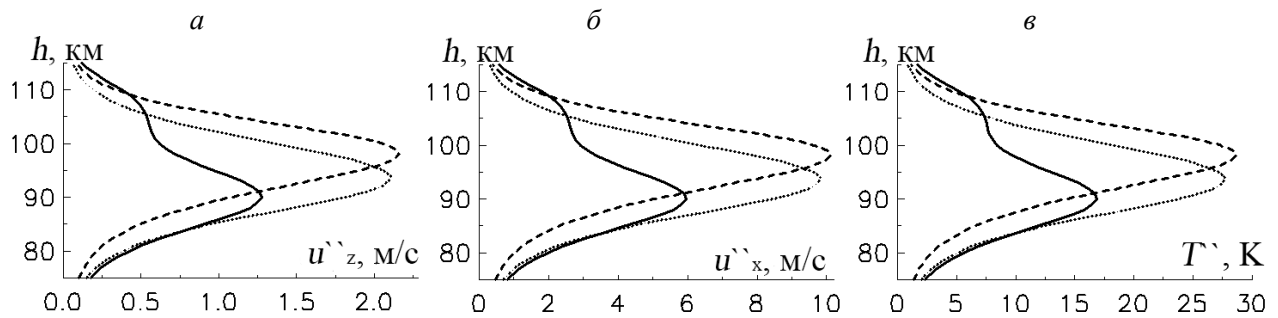


Рис. 14. Зміни з висотою вертикальної (а), горизонтальної (б) складових швидкості та температури (в) у результаті проходження АГХ з періодом 65 хв та  $k_x = 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  (суцільна лінія 18 липня 2005 р., пунктирна – 28 серпня 2005 р., штрихова – 19 жовтня 2005 р.)

У висновках до розділу 7 вказано, що більш детально із матеріалом, який представлено в розділі, можна ознайомитися в роботах [5, 21, 22, 25, 32–35].

У висновках сформульовано основні результати роботи.

Додаток Г містить список опублікованих праць за темою дисертаційного дослідження.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі створено цілісну картину розвитку спостережуваних турбулентних процесів за спокійних і збурених умов у магнітосфері та мезосфері Землі та визначено їх вплив на стан навколосферного космічного простору, використовуючи спектральні, статистичні та багатосупутникові методи обробки даних. Отримано такі нові наукові результати:

1. Турбулентні області хвоста магнітосфери під час диполаризації магнітного поля в вибуховій фазі суббури характеризуються надлишком великомасштабних збурень, швидкою передачею енергії між вихорами вздовж інерційного діапазону при зростанні кінетичних ефектів, переходом від однорідної МГД- до Холл–МГД-моделі на частотах менше/рівне гірчастоти протона. Вперше визначено передумови фіксації зламу спектральних залежностей густини потужності магнітного поля на гірчастотах важких іонів.
2. Вперше отримано, що геомагнітні пульсації, які фіксуються для магнітного тиску в хвості магнітосфери, чітко проявляються і при аналізі динамічного тиску протонів та теплового тиску протонів та електронів. Визначено, що передача збурення з хвоста магнітосфери до авроральних областей відбувається через зміну струму в струмовому клині (струми Біркеланда), а швидкість поширення вздовж силової лінії близька до альвенівської.
3. Вперше зареєстровано спонтанну генерацію когерентних структур (самоорганізацію) в турбулентних областях під час багатократної диполаризації як для магнітних структур, так і для потоків плазми на основі

- фіксації прямих і обернених каскадів.
4. Для турбулентних областей магнітосфери Землі вперше визначено зв'язок між величиною ексцесу, параметрами логпуассонівської каскадної моделі, спектральними індексами та коефіцієнтом дифузійного перенесення.
  5. Отримані із використанням методу хвильової зйомки дисперсійні криві демонструють наявність нелінійного енергетичного каскаду та швидку зміну характеристик плазми в турбулентних областях під час розриву струмового шару магнітосферного хвоста.
  6. У «підсонячних» областях магнітосфери Землі (ФШ, ПШ, МШ та МП) визначено характер турбулентних процесів, масштаби їх зміни із зазначенням меж використання МГД та параметри уширення спектру сингулярностей (мультифрактальний спектр). Знайдено відмінність для дрібномасштабної турбулентності у випадку квазіпоздовжніх і квазіперпендикулярних УХ та умови фіксації логпуассонівської каскадної моделі турбулентності з параметрами Ше–Левека.
  7. Вперше у «спокійних» областях плазми сонячного вітру отримано передумови реєстрації процесів, які відповідають двовимірній моделі Ірошнікова–Крейчнана та ізотропній моделі Колмогорова.
  8. Використовуючи аналіз висоти максимуму функції густини розподілу флуктуацій магнітного поля та коефіцієнти логпуассонівської каскадної моделі, вперше знайдено/оцінено узагальнений коефіцієнт дифузії, що вказує на супердифузію в турбулентних областях магнітосфери Землі.
  9. В турбулентних областях хвоста магнітосфери прослідковується селективне прискорення протонів у залежності від їх енергії, а резонансні взаємодії іонів з низькочастотними електромагнітними хвилями більш суттєвіші для «важчих» складових (іонів гелію та кисню). Аналогічна роль турбулентності прослідковується і при аналізі змін магнітного поля і потоків іонів у магнітосферах інших планет (магнітосфера Юпітера).
  10. Вперше показано, що зафіксовані космічними апаратами UARS та TIMED зміни температури і динаміки верхньої атмосфери від тропосферних джерел можна пояснити турбулентними шарами на висотах мезосфери, які виникають при наявності атмосферних гравітаційних хвиль.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні наукові праці у реферованих фахових виданнях

1. Cheremnykh, O., Cheremnykh, S., Kozak, L. & Kronberg, E. (2018). Magnetohydrodynamic waves and the Kelvin-Helmholtz instability at the boundary of plasma mediums. *Physics of Plasmas*, 25(10), 102119.
2. Kozak, L. V., & Lui, A. T. (2008). Statistical analysis of plasma turbulence based on satellite magnetic field measurements. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 24(4), 209-214.
3. Kozak, L. V., Petrenko, B. A., Grigorenko, E. E., & Kronberg, E. A. (2022). Comparison of ground-based and satellite geomagnetic pulsations during substorms. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 38(1), 1-10.



4. Kozak, L. V., Petrenko, B. A., Kronberg, E. A., Grigorenko, E. E., Kozak, P. M., & Reka, K. D. (2020). Variations in the plasma parameters of the Earth's magnetotail during substorm initiation. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 36(2), 94-102.
5. Kozak, L., Dzubenko, M. & Ivchenko, V. (2004). Temperature and thermosphere dynamics behavior analysis over earthquake epicentres from satellite measurements. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(4-9), 507-515.
6. Kozak, L., Lui, A. & Savin, S. (2013). Statistical analysis of the magnetic field measurements. *Odessa Astronomical Publications*, 26(2), 268-270.
7. Kozak, L., Lui, A., Kronberg, E. & Prokhorenkov, A. (2017). Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 154, 115-126.
8. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2018). Characteristics of the Turbulence Processes in the Magnetohydrodynamic Environment. *Athens Journal of Sciences*, 5(2), 101-124.
9. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., Grigorenko, E., Lui, E., & Cheremnykh, S. (2018). Spectra of turbulence during the dipolarization of the magnetic field. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 34(5), 259-270.
10. Kozak, L., Petrenko, B., Lui, A., Kronberg, E. & Daly, P. (2021). Processes in the current disruption region: From turbulence to dispersion relation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(1), e2020JA028404.
11. Kozak, L., Petrenko, B., Lui, A., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Prokhorenkov, A. (2018). Turbulent processes in the Earth's magnetotail: spectral and statistical research. *Annales Geophysicae*, 36(5), 1303-1318.
12. Kozak, L., Prokhorenkov, A. & Savin, S. (2015). Statistical analysis of the magnetic fluctuations in boundary layers of Earth's magnetosphere. *Advances in Space Research*, 56(10), 2091-2096.
13. Kronberg, E., Gorman, J., Nykyri, K., Smirnov, A., Gjerloev, J., Grigorenko, E., Kozak, L., Ma, X., Trattner, K. & Friel, M. (2021). Kelvin-Helmholtz instability associated with reconnection and ultra low frequency waves at the ground: A case study. *Frontiers in Physics*, 9, 738988.
14. Kronberg, E., Grigorenko, E., Malykhin, A., Kozak, L., Petrenko, B., Vogt, M., Roussos, E., Kollmann, P., Jackman, C., Kasahara, S., Malova, K., Tao, C., Radioti, A. & Masters, A. (2019). Acceleration of ions in Jovian plasmoids: Does turbulence play a role? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7), 5056-5069.
15. Kronberg, E., Grigorenko, E., Turner, D., Daly, P., Khotyaintsev, Y. & Kozak, L. (2017). Comparing and contrasting dispersionless injections at geosynchronous orbit during a substorm event. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(3), 3055-3072.
16. Malykhin, A., Grigorenko, E., Kronberg, E., Daly, P. & Kozak, L. (2019). Acceleration of protons and heavy ions to suprathermal energies during dipolarizations in the near-Earth magnetotail. *Annales Geophysicae*, 37(4), 549-559.
17. Malykhin, A., Grigorenko, E., Kronberg, E., Koleva, R., Ganushkina, N., Kozak, L. & Daly, P. (2018). Contrasting dynamics of electrons and protons in the near-Earth plasma sheet during dipolarization. *Annales Geophysicae*, 36(3), 741-760.

18. Petrenko, B. A., & Kozak, L. V. (2020). Dynamics of Magnetic Structures during a Magnetospheric Substorm. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 36(5), 238-242.
19. Prokhorenkov, A., Kozak, L. & Lui, A. (2015). Magnetosheath and solar wind turbulence processes features identification. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 5(2), 93-98.
20. Prokhorenkov, A., Kozak, L., Lui, A. & Gala, I. (2015). Diffusion processes in the transition layer of the Earth's magnetosphere. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 5(2), 99-103.
21. Pylypenko, S., Motsyk, O. & Kozak, L. (2016). Temperature changes over storms from measurements of spacecraft TIMED. *Advances in Astronomy and Space Physics*. 6(1), 50-55.
22. Rapoport, Y., Gotynyan, O., Ivchenko, V., Kozak, L. & Parrot, M. (2004). Effect of acoustic-gravity wave of the lithospheric origin on the ionospheric F region before earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(4-9), 607-616.
23. Savin, S., Amata, E., Zelenyi, L., Lutsenko, V., Safrankova, J., Nemecek, Z., Borodkova, N., Buechner, J., Daly, P., Kronberg, E., Blecki, J., Budaev, V., Kozak, L., Skalsky, A. & Lezhen, L. (2012). Super fast plasma streams as drivers of transient and anomalous magnetospheric dynamics. *Annales Geophysicae*, 30(1), 1-7.
24. Savin, S., Zelenyi, L., Amata, E., Budaev, V., Buechner, J., Blecki, J., Balikhin, M., Klimov, S., Korepanov, V., Kozak, L., Kudryashov, V., Kunitsyn, V., Lezhen, L., Milovanov, A., Nemecek, Z., Nesterov, I., Novikov, D., Panov, E., Rauch, J., Rothkaehl, H., Romanov, S., Safrankova, J., Skalsky, A. & Veselov, M. (2011). ROY – A multiscale magnetospheric mission. *Planetary and Space Science*, 59(7), 606-617.
25. Козак, Л. & Пилипенко, С. (2011). Изменение температуры верхней атмосферы Земли над ураганами по спутниковым измерениям. *Вісник астрономічної школи*, 7(1-2), 42-47.
26. Козак, Л. (2010). Статистичний розгляд турбулентних процесів у магнітосфері Землі за вимірами супутника «Інтербол». *Космічна наука і технологія*, 16(1), 28-39.
27. Козак, Л. (2016). Методи і підходи для визначення характеристик турбулентного середовища. *Космічна наука і технологія*, 22(2), 60-77.
28. Козак, Л. В., & Петренко, Б. А. (2016). Статистичний аналіз турбулентності плазми за даними місії Кластер-2. *Вісник Астрономічної школи*, (12, № 2), 179-184.
29. Козак, Л., Костик, Р., Черемних, О. & Прохоренков, А. (2015). Прояви процесів самоорганізації плазми в атмосфері Сонця та навколоземному просторі. *Космічна наука і технологія*, 21(4), 66-80.
30. Козак, Л., Петренко, Б., Кронберг, Е., Прохоренков, А., Григоренко, О., Черемних, О., Черемних, С., Луї, Е., Козак, П. & Кунделько, І. (2018). Турбулентні процеси у хвості магнітосфери Землі: статистичний та спектральний аналіз, *Космічна наука і технологія*, 24(3), 55-68.
31. Козак, Л., Савин, С., Луї, А. & Цупко, О. (2012). Особливості турбулентних процесів у магнітосфері землі за вимірами місії «Кластер». *Космічна наука і технологія*, 18(2), 43-54.

32. Пилипенко, С. & Козак, Л. (2010). Аналіз поширення та затухання атмосферних гравітаційних хвиль. *Космічна наука і технологія*, 16(4), 22-29.
33. Пилипенко, С. & Козак, Л. (2012). Ветровые сдвиги в атмосфере Земли над мощными ураганами. *Космічна наука і технологія*, 18(6), 43-50.
34. Пилипенко, С. & Козак, Л. (2013). Зміни фізичних властивостей атмосфери при поширенні та затуханні атмосферних гравітаційних хвиль. *Журнал фізичних досліджень*, 17(2), 2905.
35. Черемних, О., Гримальський, В., Івантишин, О., Івченко, В., Козак, Л., Кошовий, В., Мезенцев, В., Мельник, М., Ногач, Р., Рапопорт, Ю., Селіванов, Ю. & Жук, І. (2015). Експериментальні та теоретичні дослідження штучної акустичної модифікації атмосфери та іоносфери. *Космічна наука і технологія*, 21(1), 48-53.
36. Черемных, О., Черемных, С., Козак, Л. & Кронберг, Е. (2019). Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца и магнитогидродинамические моды на границе геомагнитного хвоста. *Космічна наука і технологія*, 25(2), 43-59.
37. Черемных, О., Ямпольский, Ю., Агапитов, А., Зализовский, А., Ивченко, В., Козак, Л., Парновский, А., Рапопорт, Ю., Селиванов, Ю., Колосков, А. & Черемных, С. (2013). Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы земли в космическом проекте РЕЗОНАНС. *Космічна наука і технологія*, 19(2), 5-42.

### Навчальні посібники

38. Козак Л. (2010) *Вступ до фізики космічної плазми*, К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2010, 317 с. (ISBN 978-966-439-351-2).
39. Козак Л. (2020) *Турбулентні процеси в гідродинамічному та магнітогідродинамічному середовищі*, К.: Видавництво «Друкарник», 2020. 236 с. (28.03.2022 (друге видання) ISBN 976-617-7901-59-3).

### Матеріали конференцій та тези доповідей

40. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., & Lui, A. (2020). Application of statistical and spectral analysis for investigation of the turbulent processes in the magnetohydrodynamics. In *AIP Conference Proceedings*, 2293(1), 420049. AIP Publishing LLC.
41. Pylypenko, S. & Kozak, L. (2011). Variations of the temperature of mesosphere above storms from satellite measurements. *WDS'11 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media*. pp. 97-101.
42. Amata, E., Savin, S., Treumann, R., Zeleniy, L., Consolini, G. & Kozak, L. (2008). Observation of high kinetic energy density jets in the Earth's magnetosheath. *37th COSPAR Scientific Assembly 2008, Space Plasmas in the Solar System, including Planetary Magnetospheres (D), Multiscale Magnetospheric Processes: Theory, Simulations and Multipoint Observations*. 2008.
43. Bovchaliuk, A., Kozak, L. & Savin, S. (2009). Statistical features of the magnetic field fluctuations from satellite Interball data. *16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 27 April – 2 May 2009. p. 45.

44. Gala, I., Kozak, L., Prokhorenkov, A. & Lui, A. (2015). Transfer processes in the transition layer of solar wind and the Earth's magnetosphere. *22nd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 20–25 April 2015. p. 34–35.
45. Kozak, L. & Lui, A. (2008). Statistical analysis of magnetic field fluctuations in the Earth's magnetotail from the measurements of Geotail spacecraft. *37th COSPAR Scientific Assembly 2008*. 2008.
46. Kozak, L. & Motsyk, O. (2007). Influence of the large-scale weather structures onto the temperature of upper Earth's atmosphere from the satellite TIMED measurements. *General Assembly 2007 of the European Geosciences Union*. Vienna, Austria, 15–20 April 2007.
47. Kozak, L. & Savin, S. (2009). Plasma turbulence in the Earth's magnetosphere: statistical approach. *36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods*. Kyiv, Ukraine. 17–22 August 2009. p. 21.
48. Kozak, L. & Savin, S. (2009). Statistical analysis of plasma turbulence. *General Assembly 2009 of the European Geosciences Union*. Vienna, Austria. 19–24 April 2009.
49. Kozak, L. & Tsupko, A. (2011). Analysis of the turbulent processes in the boundary layers of the Earth's magnetosphere. *International Conference «Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv, dedicated to 90-th Anniversary of P.R. Romanchuk»*. Kyiv, Ukraine. 24–27 May 2011. p. 84.
50. Kozak, L., Lui, A. & Ivchenko, V. (2007). Statistical analysis of magnetic field fluctuations in the Earth's magnetotail. *General Assembly 2007 of the European Geosciences Union*. Vienna, Austria, 15–20 April 2007.
51. Kozak, L., Lui, A., Grigorenko, E., Kronberg, E. & Prokhorenkov, A. (2016). Statistical properties of magnetic field fluctuations in the Earth's magnetosphere. *WMESS 2016*. Prague, Czech Republic. 5–9 September 2016. p. 430.
52. Kozak, L., Lui, A., Kronberg, E., Grigorenko, E., Savin, S. & Budaev, V. (2017). Analysis and comparison of different methods to characterize turbulent environment. *EGU General Assembly 2017*. 2017.
53. Kozak, L., Petrenko, B. & Kronberg, E. (2021). Manifestations of substorm initiation by satellite and ground measurements. *International Conference «Astronomy and Space Physics in Kyiv University»*. 2021. p. 103.
54. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E. & Grigorenko, E. (2021). Variations of Plasma Parameters During Substorms. *9th Annual International Conference on Physics*. Athens, Greece. 2021. pp. 18-19.
55. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2018). Turbulent processes in the Earth's magnetotail: statistical and spectral analysis. *EGU General Assembly 2018*. 8–13 April 2018.
56. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2019). Processes in the dipolarizing flux bundles region: from turbulence to dispersion relation. *Cluster 29th workshop*. Lanzarote. 2019. p. 48.
57. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., Lui, A. & Kundelko, I. (2018). Features of the turbulent processes in the Earth's magnetosphere tail space applications. *18 Українська конференція з космічних досліджень*. Київ, Україна. 17–19 вересня 2018. с. 15.

58. Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E., Prokhorenkov, A., Grigorenko, E. & Lui, A. (2018). Investigation of Turbulent Processes in Magnetosphere Plasma. *6th Annual International Conference on Physics*. Athens, Greece. 23–26 July 2018. pp. 30–31.
59. Kozak, L., Petrenko, B., Lui, A. & Kronberg, E. (2019). Turbulent processes during dipolarization in the Earth's magnetotail. *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 26–30 August 2019. p. 35.
60. Kozak, L., Petrenko, B., Lui, A. & Kronberg, E. (2019). Turbulent processes during dipolarization in the Earth's magnetotail. *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine, 2019. p. 35.
61. Kozak, L., Petrenko, B., Reka, K., Lui, A. & Kronberg, E. (2019). Changes of the pressures in the Earth's magnetotail during the substorm initiation. *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 26–30 August 2019. p. 37.
62. Kozak, L., Petrenko, B., Reka, K., Lui, A. & Kronberg, E. (2019). Changes of the pressures in the Earth's magnetotail during the substorm initiation. *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine, 2019. p. 37.
63. Kozak, L., Prokhorenkov, A., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2017). Analysis of the turbulent processes in geospace. *Fourth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 28 August – 1 September 2017. p. 22.
64. Kozak, L., Savin, S., Budaev, V. & Pilipenko, V. (2010). The statistical approach for turbulent processes in the Earth's magnetosphere. *38th COSPAR Assembly 2010*. Bremen, Germany. 18–25 July 2010.
65. Kronberg, E., Grigorenko, E., Turner, D., Daly, P., Khotyaintsev, Y. & Kozak, L. (2017). Comparing and contrasting dispersionless injections at geosynchronous orbit during a substorm event: Dispersionless injections. *EGU General Assembly 2017*. 23–28 April 2017.
66. Kronberg, E., Grigorenko, E., Malykhin, A., Kozak, L., Petrenko, B., Vogt, M., Roussos, E., Kollmann, P., Jackman, C., Kasahara, S., Malova, Kh., Tao, C., Radioti, A. & Masters, A. (2019). Acceleration of ions in Jovian plasmoids: do magnetic fluctuations play a role? *Fall Meeting of American Geophysical Union (AGU)*. San Francisco, USA. 08–15 December 2019.
67. Kundelko, I., Kozak, L., Kronberg, E., Petrenko, B. & Prokhorenkov, A. (2017). Analysis of the geomagnetic pulsations during a substorm. *Fourth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 28 August – 1 September 2017. p. 15.
68. Kundelko, I., Kozak, L., Kronberg, E., Prokhorenkov, A. & Petrenko, B. (2017). Geomagnetic pulsations as an indicator of substorm. *24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 24–29 April 2017. p. 43.
69. Malykhin, A., Grigorenko, E., Kronberg, E., Koleva, R., Ganushkina, N., Kozak, L., & Daly, P. (2018). Dynamics of suprathermal electron and proton fluxes during magnetotail dipolarization associated with magnetic flux pile up in the near-Earth plasma sheet. *EGU General Assembly 2018*. 8–13 April 2018.
70. Petrenko, B., Kozak, L. & Kronberg, E. (2019). Characterization of turbulent plasma fluctuations inside dipolarizing flux bundles in the Earth's magnetotail. *EGU General Assembly 2019*. Vienna, Austria. 2019.

71. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2017). The turbulence processes in the Earth magnetotail. *Fourth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 28 August – 1 September 2017. p. 21.
72. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2018). Turbulence spectra in region of magnetic depolarization. *25th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 24–29 April 2018. p. 41.
73. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2019). Dispersion relation concept to turbulent medium of the geomagnetic tail. *26th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 22–27 April 2019. p. 17.
74. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2019). Dispersion relations in turbulent wave fields in the geomagnetic tail. *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 26–30 August 2019. p. 36.
75. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2017). Characteristics of the Turbulence Processes in the Magnetohydrodynamic Environment. *5th Annual International Conference on Physics*. Athens, Greece. 2017. pp 18–19.
76. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2019). Dispersion relation concept to turbulent medium of the geomagnetic tail. *26th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine, 2019. p. 19
77. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2018). Turbulence spectra in the regions of magnetic dipolarization events. *27th Annual Student Conference Week of Doctoral Students 2018 focused on physical study branches*. Prague, Czech Republic. 5–7 June 2018.
78. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Prokhorenkov, A. (2017). The turbulent and dynamic processes in the Earth's magnetotail. *24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 24–29 April 2017. p. 38.
79. Petrenko, B., Kozak, L., Lui, A., Kronberg, E. & Grigorenko, E. (2021). Plasma Wave Recognition by Multipoint Filtering Techniques. *27th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. 2021. p. 41.
80. Petrenko, B., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2019). Dispersion Relations of Turbulent Wave Fields in the Geomagnetic Tail. *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine, 2019. p. 36.
81. Prokhorenkov, A., Kozak, L. & Lui, A. (2014). Magnetic field fluctuation properties in the transition layer of the Earth's magnetosphere. *21th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 28 April – 3 May 2014. p. 38.
82. Prokhorenkov, A., Kozak, L. & Lui, A. (2015). Statistical analysis of the transition processes in the Earth's magnetosheath. *22nd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 20–25 April 2015. p. 39.
83. Prokhorenkov, A., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E. & Lui, A. (2018). Power spectrum manifestation of Kelvin–Helmholtz instability by Cluster II mission measurements. *25th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 24–29 April 2018. p. 40.
84. Prokhorenkov, A., Kozak, L., Kronberg, E., Grigorenko, E., Petrenko, B., Lui, A. & Kundelko, I. (2018). Signal identification: wavelet transform and structure function

- analysis for satellite data. *Book of Abstract V WCDANM, ESTG Instituto Politécnico do Porto*. Felgueiras, Portugal. 10–12 May 2018. p. 12.
85. Prokhorenkov, A., Kozak, L., Kronberg, E., Petrenko, B., Grigorenko, E., Lui, A. & Kundelko, I. (2017). Analysis of the characteristic frequencies and cascade processes in the Earth magnetosheath. *24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 24–29 April 2017. p. 37.
86. Prokhorenkov, A., Kozak, L., Lui, A., Grigorenko, E. & Kronberg, E. (2016). Methods and approaches to characterize turbulent environment. *23rd Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 25–30 April 2016. p. 33.
87. Prokhorenkov, A., Kozak, L., Petrenko, B., Kronberg, E. & Lui, A. (2017). Cascade processes in the Earth magnetosphere. *Fourth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 28 August – 1 September 2017. p. 20.
88. Pylypenko, S. & Kozak, L. (2009). Atmosphere gravity waves: spread and dissipation. *36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods*. Kyiv, Ukraine. 17–22 August 2009. p. 50.
89. Pylypenko, S. & Kozak, L. (2009). Simulation of spread and dissipation of atmospheric waves. *16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 27 April – 2 May 2009. p. 46.
90. Pylypenko, S. & Kozak, L. (2011). Changes of the temperature of upper atmosphere above storms. *International Conference “Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv, dedicated to 90-th Anniversary of P.R. Romanchuk”*. Kyiv, Ukraine. 24–27 May 2011. p. 87.
91. Reka, K., Kozak, L., Petrenko, B., Lui, A. & Kronberg, E. (2019). Alteration of pressures in the tail of the Earth's magnetosphere during the substorm initiation. *26th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 22–27 April 2019. p. 20.
92. Reka, K., Kozak, L., Petrenko, B., Lui, A. & Kronberg, E. (2019). Alteration of pressures in the tail of the Earth's magnetosphere during the substorm initiation. *26th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine, 2019. p. 20.
93. Savin, S., Belakhovsky, V., Sharma, A., Pilipenko, V., Marcucci, M., Consolini, G., Kozak, L., Blecki, J., Kronberg, E., Safrankova, J. & Nemecek, Z. (2016). The super-low frequency resonances at magnetospheric boundaries versus geostationary and ionospheric data. *41st COSPAR Scientific Assembly*. Istanbul, Turkey. 30 July – 7 August 2016.
94. Savin, S., Budaev, V., Amata, E., Zelenyi, L., Consolini, G., Jordanova, E., Kozak, L., Khotyaintsev, Y., Blecki, J. & Rauch, J. (2009). Superdiffusion at outer magnetospheric boundaries. *General Assembly 2009 of the European Geosciences Union*. Vienna, Austria. 19–24 April 2009.
95. Savin, S., Budaev, V., Zeleniy, L., Amata, E., Kozak, L., Buechner, J., Romanov, S., Blecki, J., Balikhin, M. & Lezhen, L. (2010). On statistical properties of transport barriers in magnetospheric and laboratory boundary layers. *38th COSPAR Assembly 2010*. Bremen, Germany. 18–25 July 2010.
96. Senchenko, O., Kozak, L., Kronberg, E. & Prokhorenkov, A. (2019). Application the Bispectral Wavelet Analysis for Multisatellite Measurements of the Cluster-II Mission.

*Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine, 2019. p. 38.

97. Tsupko, A. & Kozak, L. (2011). Analysis of turbulent processes in the boundary layers of Earth's magnetosphere. *18th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 2–7 May 2011. p. 73.
98. Tsupko, A. & Kozak, L. (2013). Some features of turbulent processes in the Earth's magnetosphere from «Cluster II» mission measurements. *20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*. Kyiv, Ukraine. 22–27 April 2013. p. 27.
99. Tsupko, O. & Kozak, L. (2013). Features of turbulent processes in Earth's magnetosphere based on data by ESA's Cluster II spacecraft. *22nd Annual Student Conference “Week of Doctoral Students'2013”*. Prague, Czech Republic. 4–7 June 2013. p. 54.
100. Tsupko, O. & Kozak, L. (2013). Statistical features of turbulent processes in Earth's magnetosphere from ESA's Cluster measurements. *International Conference «Astronomy and Space Physics in Kyiv University»*. Kyiv, Ukraine. 21–24 May 2013. p. 108.
101. Tsupko, O., Kozak, L., Savin, S., Lui, A. & Ivchenko, V. (2013). Analysis of the magnetic fluctuations in the boundary region of Earth's magnetosphere. *Second UK–Ukraine Meeting on Solar Physics and Space Science*. Kyiv, Ukraine. 16–20 September 2013. p. 70.
102. Козак, Л. & Луи, А. (2007). Статистический анализ флуктуаций магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли по данным спутника Geotail. *7-ма Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 3–8 вересня 2007. с. 83.
103. Козак, Л. & Моцик, О. (2006). Исследование воздействия крупномасштабных погодных структур на температуру верхней атмосферы Земли. *6-та Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 3–10 вересня 2006.
104. Козак, Л. & Петренко, Б. (2017). Спектральний аналіз процесів в хвості магнітосфери Землі. *Міжнародна наукова конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті»*. Київ, Україна. 23–26 травня 2017. с. 112.
105. Козак, Л. & Пилипенко, С. (2010). Распространение и затухание атмосферных гравитационных волн. *10-та Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 30 серпня – 3 вересня 2010. с. 27.
106. Козак, Л., Гала, І. & Луї А. (2014). Дифузні процеси в магнітосфері Землі. *Міжнародна наукова конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті»*. Київ, Україна. 27–30 травня 2014. с. 92.
107. Козак, Л., Костик, Р., Черемних, О. & Прохоренков, А. (2015). Прояви процесів самоорганізації в атмосфері Сонця та навколоземному просторі. *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: Міжнародна наукова конференція*. Київ, Україна. 25–29 травня 2015. с. 51-52.
108. Козак, Л., Луи, А. & Пилипенко, В. (2008). Турбулентные процессы в магнитосфере Земли. *8-ма Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 1–7 вересня 2008. с. 22.
109. Козак, Л., Луї, А., Григоренко, Е., Кронберг, Е. & Прохоренков, А. (2016). Аналіз характеристик турбулентних процесів у магнітосфері Землі. *16-а Українська конференція з космічних досліджень*. Одеса, Україна. 22–27 серпня 2016. с. 21.



110. Козак, Л., Петренко, Б., Кронберг, Е. & Луї, А. (2019). Процеси в області розриву струмового шару в хвості магнітосфери Землі: статистичний та спектральний аналіз. *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу-2019*. Київ, Україна. 11–12 грудня 2019.
111. Козак, Л., Петренко, Б., Кронберг, О., Григоренко, О. & Луї, А. (2017). Аналіз флуктуацій магнітного поля в хвості магнітосфери Землі. *17-та Українська конференція з космічних досліджень*. Одеса, Україна. 21–25 серпня 2017. с. 28.
112. Козак, Л., Савин, С. & Луї, А. (2013). Экспериментальное изучение турбулентных процессов в магнитосфере Земли. *13-та Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 2–6 вересня 2013. с. 53.
113. Козак, Л., Савин, С., Будаев, В., Луї, А., Ивченко, В. & Цупко, А. (2013). Статистический анализ измерений магнитного поля. *13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-Astronomy and Astrobiology»*. Odessa, Ukraine. 19–25 August 2013. с. 53.
114. Козак, Л., Савин, С., Луї, А. & Цупко, О. (2011). Особенности турбулентных процессов в магнитосфере Земли по измерениям миссии Кластер. *11-та Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 29 серпня – 2 вересня 2011. с. 46.
115. Петренко, Б., Козак, Л. & Луї, А. (2019). Визначення дисперсійних співвідношень хвиль у космічній плазмі. *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу – 2019*. Київ, Україна. 11–12 грудня 2019.
116. Пилипенко, С. & Козак, Л. (2010). Розповсюдження і затухання атмосферних гравітаційних хвиль. *10-та Українська конференція з космічних досліджень*. Євпаторія, Україна. 30 серпня – 3 вересня 2010. с. 27.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

117. Balogh, A., Carr, C., Acuña, M., et al. (2001). The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results. *Annales Geophysicae*, 19(10/12), 1207-1217.
118. Varenblatt, G. I., & Goldenfeld, N. (1995). Does fully developed turbulence exist? Reynolds number independence versus asymptotic covariance. *Physics of fluids*, 7(12), 3078-3082.
119. Biskamp, D., Schwarz, E. & Drake, J. (1996). Two-Dimensional Electron Magnetohydrodynamic Turbulence. *Physical Review Letters*, 76(8), 1264-1267.
120. Budaev, V., Savin, S., Zelenyi, L., et al. (2008). Intermittency and extended self-similarity in space and fusion plasma: boundary effects. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 50(7), 074014.
121. Francis, S. (1973). Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic, dissipative atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 78(13), 2278-2301.
122. Francis, S. (1975). Global propagation of atmospheric gravity waves: A review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 37 (6-7), 1011-1030.
123. Frisch, U., & Kolmogorov, A. N. (1995). *Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov*. Cambridge university press.

124. Fu, H., Khotyaintsev, Y., Vaivads, A., André, M. & Huang, S. (2012). Occurrence rate of earthward-propagating dipolarization fronts. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
125. Hedin, A. (1991). Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 96(A2), 1159-1172.
126. Katok, A., & Hasselblatt, B. (1995). *Introduction to the modern theory of dynamical systems* (No. 54). Cambridge University press.
127. Lui, A. (1996). Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 101(A6), 13067-13088.
128. Narita, Y. (2012). *Plasma Turbulence in the Solar System*. Springer Briefs in Physics. 112 pp.
129. Ohtani, S., Higuchi, T., Lui, A. & Takahashi, K. (1995). Magnetic fluctuations associated with tail current disruption: Fractal analysis. *Journal of Geophysical Research*, 100(A10), 19135.
130. Rae, I., Mann, I., Angelopoulos, V., et al. (2009). Near-Earth initiation of a terrestrial substorm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A7), 2156-2202.
131. Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J., et al. (2001). First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Annales Geophysicae*, 19(10/12), 1303-1354.
132. Russell, C. T., & McPherron, R. L. (1973). The magnetotail and substorms. *Space Science Reviews*, 15(2-3), 205-266.
133. Savin, S. P., Zelenyi, L. M., Amata, E., et al. (2004). Dynamic interaction of plasma flow with the hot boundary layer of a geomagnetic trap. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 79, 368-371.
134. Wilken, B., Daly, P., Mall, U., et al. (2001). First results from the RAPID imaging energetic particle spectrometer on board Cluster. *Annales Geophysicae*, 19(10/12), 1355-1366.

## АНОТАЦІЯ

**Козак Л.В. Турбулентні процеси в навколоземному космічному просторі.**  
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи (10 – природничі науки; 104 – фізика та астрономія). – Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ; Інститут космічних досліджень НАН-ДКА України, Київ; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2022.

Турбулентні рухи відіграють вирішальну роль у динаміці плазми, генерації електромагнітного випромінювання, прискоренні космічних променів, формуванні та еволюції астрофізичних об'єктів. У роботі визначено характер турбулентних процесів у різних областях магнітосфери Землі (форшок, постшок, магнітошар, область магнітопаузи, касп та хвіст магнітосфери) і на різних масштабах, а також проведено порівняння з турбулентними потоками в нейтральній атмосфері Землі

(на рівні мезопаузи). Визначено характер передачі енергії між вихорами, масштаби зміни турбулентності та роль в цьому «важких» іонів. Вперше зареєстровано спонтанну генерацію когерентних структур (самоорганізацію) в турбулентних областях як для магнітних структур, так і для потоків плазми, а також отримано нелінійний енергетичний каскад із побудови дисперсійних залежностей. Використовуючи статистичні підходи та каскадні моделі, вперше знайдено/оцінено узагальнений коефіцієнт дифузії, що вказує на супердифузію в турбулентних областях магнітосфери Землі. Вперше отримано, що резонансна взаємодія «хвиля – частинка» в турбулентних областях суттєвіша для «важких» складових (іонів гелію та кисню). Вперше показано, що зафіксовані супутниками зміни температури і динаміки верхньої атмосфери від тропосферних джерел можна пояснити турбулентними шарами на висотах мезосфери від атмосферних гравітаційних хвиль.

**Ключові слова:** турбулентні процеси, магнітосфера, нейтральна атмосфера, геомагнітні пульсації, статистичний аналіз, фрактальний та мультифрактальний аналіз, моделі опису турбулентних процесів.

## ANNOTATION

**Kozak L.V. Turbulent processes in near-Earth space.** – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for a Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, specialty 01.03.03 – Heliophysics and Physics of the Solar System (10 – Natural sciences; 104 – Physics and Astronomy). – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv; Institute of Space Research of the NAS-GSA of Ukraine, Kyiv; Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2022.

Examples of turbulent motions can be found in galaxies, stars, interstellar and interplanetary environments, planetary atmospheres, etc. They play a decisive role in plasma dynamics, generation of electromagnetic radiation in it, acceleration of cosmic rays, formation and evolution of astrophysical objects. At the same time, near-Earth space is a privileged area for the study of turbulent processes, since we can directly (*in situ*) obtain experimental data on the properties of turbulence on scales that are not available in laboratory experiments on Earth. Therefore, research conducted within the framework of the dissertation aimed at deepening our knowledge about the properties of turbulent processes and self-organization of complex systems, which include plasma and a magnetic field, are relevant and practically important. To achieve the goal of the dissertation, analytical methods of solving MHD equations, theoretical analysis of models and numerical modeling of turbulent processes in plasma, analysis of satellite and ground measurement data for verification of theoretical models were used. Processing methods included both statistical (fractal and multifractal (extended self-similarity analysis, kurtosis analysis)) and spectral (Fourier, wavelet, bi-spectral) and multi-satellite methods (timing analysis, wave survey method) of research. In the dissertation, the nature of turbulent processes in various regions of the Earth's magnetosphere (foreshock, postshock, magnetosphere, magnetopause region, cusp, and tail of the magnetosphere) and on different scales was determined and also the comparison between turbulent flows

in the Earth's neutral atmosphere (mesopause) was carried out. Turbulent regions of the magnetotail during the dipolarization of the magnetic field in the explosive phase of the substorm are characterized by an excess of large-scale disturbances, faster energy transfer between vortices along the inertial range as kinetic effects increase, and a transition from the homogeneous MHD to the Hall MHD model at frequencies less than/equal to the proton gyrofrequency. For the first time, the prerequisites for fixing the break in the spectral dependences of the magnetic field power density at the gyrofrequencies of heavy ions have been determined. For the first time, the relationship between magnetic, thermal (protons and electrons) and dynamic (protons) pressures in geomagnetic pulsations was obtained and their intensity was determined. For the first time, the spontaneous generation of coherent structures (self-organization) in turbulent regions during multiple dipolarization (amplification of quasi-dipole components) was reported for both magnetic structures and plasma flows based on the fixation of forward and reverse cascades. For the first time, a nonlinear energy cascade was obtained from the construction of dispersion curves in turbulent regions during the breakup of the current layer of the magnetotail, using multisatellite measurements. The scale of changes in turbulent processes was determined and their type was determined in the foreshock and postshock regions, the magnetosphere, and the magnetopause. For the first time, the generalized diffusion coefficient (superdiffusion in the turbulent regions of the Earth's magnetosphere) was found/estimated using the analysis of the height of the maximum of the density function of the distribution of magnetic field fluctuations and the coefficients of the log-Poisson cascade model. For the first time, the role of «wave-particle» interaction in turbulent regions was determined based on changes in particle flows in different energy channels and analysis of the power of magnetic field fluctuations at different gyro frequencies. For the first time, it was shown that changes in the temperature and dynamics of the upper atmosphere from tropospheric sources recorded by the satellites can be explained by turbulent layers at altitudes of mesopause, the cause of which is the change of wind speed and temperature increase as a result of the presence of gravity waves.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a complete picture of the features of turbulent processes in various regions of the Earth's magnetosphere under calm and disturbed conditions and the «consequences» it causes in near-Earth space. The obtained results can be used not only for the interpretation/verification of observational effects in near-Earth space, but also for the theoretical description of processes in complex magnetohydrodynamic environments and the planning of scientific tasks for subsequent space experiments.

The obtained results and developed methods are included in the programs of the courses «Fundamentals of Plasma Physics», «Planetary Atmospheres», «Near Earth Space», «Turbulent Processes in Plasma» which are read to students of the Department of Astronomy and Space Physics at the Faculty of Physics of Taras Shevchenko National University of Kyiv, and it is reflected in two training manuals (one of which is recommended by the Ministry of Education).

**Keywords:** turbulent processes, magnetosphere, neutral atmosphere, geomagnetic pulsations, statistical analysis, fractal and multifractal analysis, models of turbulent processes.