

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ЧЕРЕМНИХ СЕРГІЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК 523; 532; 533.951

**ДОСЛІДЖЕННЯ СПОРАДИЧНИХ І УЛЬТРАНИЗЬКОЧАСТОТНИХ
ПРОЦЕСІВ У ВНУТРІШНІЙ МАГНІТОСФЕРІ ЗЕМЛІ**

05.07.12 — дистанційні аерокосмічні дослідження

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Київ–2015

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ІКД НАНУ-ДКАУ)

Науковий керівник:

доктор технічних наук
Яценко Віталій Олексійович,
завідувач відділу дистанційних
методів та перспективних приладів
ІКД НАНУ-ДКАУ

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук
Чурюмов Клим Іванович,
член-кореспондент НАН України,
головний науковий співробітник
Астрономічної обсерваторії Київського
Національного Університету імені
Тараса Шевченка

доктор фізико-математичних наук
Кришталь Олександр Нектарійович,
завідувач відділу фізики космічної
плазми Головної Астрономічної
Обсерваторії НАН України

Захист відбудеться 15 вересня 2015 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.13 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус No3, ауд. 506, кафедра аерокосмічної геодезії.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного авіаційного університету України за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус No 8.

Автореферат розісланий « ___ » _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.062.13
кандидат фіз.-мат. наук, доцент

Л.С. Чубко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Вивчення фізичних процесів у внутрішніх областях магнітосфери Землі в останні роки є об'єктом пильної уваги міжнародного космічного наукового співтовариства. Ці області екрановані від прямого впливу плазми сонячного вітру, але їх динаміка багато в чому визначається саме впливом сонячного вітру на магнітосферу.

Взаємодія магнітосферної плазми з сонячним вітром призводить до розвитку хвильових процесів, наприклад таких, як «шипіння», «свисти», ленгмюрівські і ультранизькочастотні (УНЧ) хвилі. Вивчення УНЧ хвиль являє собою особливий інтерес, оскільки вони досить легко генеруються, переходять в нестійкий режим, відіграють ключову роль у ряді глобальних подій в магнітосфері Землі, а також беруть безпосередню участь у процесах переносу часток і енергії. Згідно сучасних уявлень, періодичні УНЧ збурення геомагнітного поля з періодом від 1 сек до 600 сек є одним з основних каналів транспорту енергії з сонячного вітру в магнітосферу Землі. Природа цих збурень пов'язана з резонансним розгойдуванням стоячих МГД хвиль на силових лініях геомагнітного поля. Ці хвилі мають просторовий масштаб, який можна порівняти з масштабом магнітосфери, і їх параметри істотно залежать від геометрії магнітного поля Землі. Один із ключових елементів «космічної погоди» – суббурі – відповідно до існуючих уявлень може бути пояснений за допомогою УНЧ хвиль. Суббурі регулярно спостерігаються в навколосемному просторі і супроводжуються великим виділенням енергії, інжекцією та прискоренням частинок, активізацією полярних сьвів і т.д. При цьому УНЧ хвильові збурення є індикаторами різних фаз суббурі. Згідно сучасних уявлень, взаємодія УНЧ хвиль із замкненими гарячими частинками може бути тригерним механізмом генерації суббур. З власними УНЧ коливаннями також зазвичай пов'язують спостережувані на Землі геомагнітні пульсації – УНЧ періодичні збурення магнітного поля в магнітосфері. Таким чином, дослідження УНЧ збурень у навколосемній плазмі є актуальною проблемою, яка має як фундаментальне, так і прикладне значення для розвитку уявлень про процеси, що протікають в геофізичній плазмі.

Найбільш різкі зміни в магнітосфері Землі викликаються спорадичними великомасштабними плазмовими структурами – корональними викидами маси (КВМ), що генеруються поблизу поверхні Сонця. КВМ – замкнута плазмова структура, яка динамічно змінюється, рухаючись від Сонця в міжпланетний простір, задовольняючи умові «вмороженості» магнітного поля, і збільшується в розмірах. Хмара коронального середовища в досить великій області простору викликає ряд явищ: ударні хвилі, прискорення сонячних частинок, спалахи радіовипромінювання і т.д. Потрапляння магнітосфери Землі в хмару КВМ може супроводжуватися різким початком геомагнітної бурі, якщо в хмарі присутня південна компонента магнітного поля. Питання про фізичну природу КВМ є одним з основних в сонячно-земній фізиці. Сучасні космічні засоби дозволяють точно виміряти тільки локальні характеристики внутрішньої

структури КВМ (вздовж траєкторії руху космічного апарату). Спостереження з наземних і орбітальних телескопів дозволяє оцінити ряд інтегральних характеристик КВМ: швидкість, розміри, форму. Цих даних недостатньо для з'ясування глобальної структури КВМ. Оскільки просторова магнітна структура КВМ досі невідома, то дуже важливим стає питання про структуру можливих магнітоплазмових утворень, які можуть самоузгоджено рухатися в сонячному вітрі, оскільки саме до геометрії таких утворень тяжіють КВМ.

Вплив сонячного вітру призводить до спорадичних варіацій геомагнітного поля, які реєструються в геомагнітних обсерваторіях і описуються геомагнітними індексами. Найбільш використовувані з них: Dst і Kp. Індекс Dst характеризує величину кільцевого тороїдального струму під час магнітних бур, а Kp – рівень флуктуацій магнітного поля. Дослідженню залежності цих індексів від стану сонячного вітру, а саме його швидкості і щільності, а також величини міжпланетного магнітного поля (ММП), присвячена велика кількість досліджень. Ці дослідження важливі для розуміння процесів передачі енергії в ланцюжку «Сонце – сонячний вітер – магнітосфера Землі – іоносфера Землі – Земля» і становлять практичний інтерес, пов'язаний з прогнозами «космічної погоди». Відомо, що під час підвищення сонячної активності амплітуда варіацій геомагнітного поля зростає, що може призводити до збоїв в роботі космічних апаратів, пошкодження телекомунікаційних систем, виведення з ладу систем електропостачання і т.д. Коректний прогноз «космічної погоди» дозволить передбачити появу геомагнітних збурень і тим самим знизити втрати від багатьох катастрофічних подій. Для опису процесів розвитку геомагнітних збурень зазвичай використовуються два підходи. Перший спрямований на пошук явної залежності одного з геомагнітних індексів від параметрів сонячного вітру і ММП; другий – на моделювання шуканої залежності методами фізичної кібернетики. За відсутності вичерпних знань про взаємодію сонячного вітру з магнітосферою застосування другого підходу зазвичай дає кращі результати. Дослідження залежності Dst-індексу, який, як правило, використовується для прогнозування геомагнітних бур, від параметрів сонячного вітру і ММП показали, що геомагнітна активність, яка характеризується цим індексом, визначається, в основному z-компонентою ММП і швидкістю сонячного вітру. Коефіцієнт кореляції для моделі з такими параметрами досягає близько 0,80. Таким чином, існує необхідність у створенні моделей, які більш ефективно описують поведінку Dst-індексу в часі для передбачення геомагнітних бур.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, викладені в дисертації, виконувались у відділі дистанційних методів і перспективних приладів Інституту космічних досліджень НАН України і ДКА України:

– за темою, яку було затверджено Президією НАН України «Математичне моделювання динамічних процесів у ближньому космосі та геліосферній плазмі на основі супутникових спостережень», номер Держреєстрації 0110U000228;

– за темою, яку було затверджено Президією НАН України "Моделювання, оцінювання та підтримка прийняття рішень в інтересах здійснення

перспективних космічних програм", номер держреєстрації 0108U000289;

– за темою, яку було затверджено Президією НАН України "Розробка моделей фізико-хімічних та гідродинамічних процесів у космічному просторі та методи обробки супутникових даних", номер держреєстрації 0113U003019;

– за контрактом з Президією НАН України на виконання НДР «Дослідження магнітосферно-іоносферної взаємодії в рамках проекту «Резонанс», в рамках цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр., номер держреєстрації 0114U003522;

– за контрактом з Президією НАН України на виконання НДР «УНЧ хвильові процеси в плазмі ближнього космосу» в рамках цільової комплексної програми цільової програми НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій», номер держреєстрації 0114U003520;

– за контрактом з Державним фондом фундаментальних досліджень на виконання НДР України на виконання НДР «УНЧ хвилі та нестійкості в магнітосфері Землі: теоретичні моделі для проекту «Резонанс», номер держреєстрації 0113U003662;

Мета і задачі дослідження

Мета даної роботи полягає у дослідженні генерації спорадичних та УНЧ хвильових процесів у магнітосфері Землі сонячним вітром, створенні аналітичних та чисельних моделей цих процесів, а також пошуку їх характеристик та умов реалізації.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі розв'язані такі задачі:

– Отримання системи рівнянь малих коливань МГД збурень в дипольному магнітному полі. Дослідження власних УНЧ мод у плазмі внутрішньої магнітосфери Землі, розгляд їх поляризації;

– Дослідження геометрії можливих довгоживучих безсилових плазмових конфігурацій у сонячному вітрі, проведення аналізу їх взаємодії із магнітосферою Землі на предмет генерації геомагнітних бур;

– Обґрунтування нових підходів до ідентифікації нелінійних дискретних динамічних моделей для прогнозування космічної погоди. Розробка прогностичні моделі поведінки Dst-індексу у часі для прогнозування геомагнітних бур, а також нового підходу до дослідження поведінки геомагнітного Dst-індексу з метою покращення прогнозування космічної погоди.

Об'єкт дослідження – довготривалі фізичні процеси у навколоземному космічному просторі;

Предмет дослідження – спорадичні та УНЧ процеси у внутрішній магнітосфері Землі.

Методи дослідження

У дисертації застосовуються методи теоретичної, математичної та статистичної фізики, фізики плазми, фізичної кібернетики, а також числові методи.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна роботи полягає у таких результатах:

– Отримано систему рівнянь малих збурень у дипольному магнітному полі, яка послідовно враховує усі основні особливості геомагнітного поля, повздовжню та поперечну структуру збурень, а також описує розповсюдження усіх гілок МГД хвиль;

– Встановлено, що у магнітосферній плазмі реалізуються УНЧ хвилі у вигляді тороїдальних та полоїдальних мод, зачеплених із повільною магнітозвуковою хвилею; показано що моди з «проміжною» поляризацією є такими, що складно реалізуються;

– Відкрито ефект згасання тороїдальних альфвенівських мод у магнітосферній плазмі через ефект перемішування фаз;

– Теоретично визначено, що у сонячному вітрі можуть бути присутні три геоєфективні плазмові структури, які можуть призводити до генерації магнітосферних бур;

– Запропоновано використовувати білінійні динамічні моделі для прогнозування Dst-індексу. Побудовано модель динаміки Dst-індексу та чисельно показано можливість його прогнозування на 5 – 6 годин наперед;

– Запропоновано новий підхід до прогнозування Dst-індексу на основі локальних показників Ляпунова і процедуру їх обчислення при наявності шумів. Реалізовано процедуру обчислення горизонту прогнозу Dst-індексу з використанням спектру локальних показників Ляпунова.

Практичне значення одержаних результатів

Проблеми, що розглядаються в дисертаційній роботі, мають не тільки фундаментальне, але й прикладне значення, пов'язане з можливістю пояснення експериментальних спостережень УНЧ збурень в магнітосфері Землі, а також можливістю прогнозування геомагнітних бур. Результати роботи можуть бути використані і вже застосовуються в Україні та за кордоном при плануванні космічних експериментів, спрямованих на дослідження динаміки магнітосферної плазми, розвитку геомагнітних бур, магнітосферно-іоносферних зв'язків та аналізі даних супутникових вимірювань. З використанням результатів дисертації та за участю автора розроблено наукове обґрунтування української наукової програми в межах міжнародного проекту «Резонанс». Області використання результатів – фізика плазми навколоземного середовища і сонячного вітру, динаміка магнітосфери Землі, космічна погода.

Особистий внесок здобувача

Всі основні наукові результати, викладені в дисертації, отримані особисто автором або при його безпосередній участі.

– У роботах [1, 3] автор брав участь у постановці задачі, проводив аналітичні та чисельні розрахунки, обробляв результати супутникових вимірювань, інтерпретував результати;

– У роботах [2, 4, 8, 10] автор із застосуванням методів фізичної кібернетики брав участь у розробці моделей прогнозування Dst-індексу у часі для передбачення геомагнітних бур. У роботі [8] автором був чисельно реалізований метод прогнозу Dst-індексу з використанням локальних показників Ляпунова;

– У роботі [5] автор брав участь у постановці задачі, проведенні

математичних розрахунків та графічному представленні отриманих результатів;
– У роботі [6] автор брав участь у обговоренні та постановці задачі, отриманні та інтерпретації результатів;

– Робота [7] виконана автором одноосібно;

– У роботах [9, 11,12], що є оглядовими, автор брав участь у підготовці матеріалів для публікацій, а саме – своєї частини тексту.

Апробація результатів роботи

Основні результати роботи були представлені автором на українських та міжнародних конференціях. Зокрема:

– На 10-й – 13-й Українських конференціях з космічних досліджень (Крим, Євпаторія, 2010–2013);

– На конференції молодих вчених «Modern Problems of Theoretical Physics», Київ, (2010р.);

– На «UK-Ukraine Meeting on Solar Physics and Space Science», Алушта, (2011р.);

– На VII Міжнародній науковій конференції імені академіка І.І.Ляшка «Обчислювальна та прикладна математика», Київ (2014 р.).

Результати, що увійшли до даної дисертаційної роботи, також неодноразово обговорювалися на наукових семінарах відділу дистанційних методів та перспективних приладів та відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень НАН та НКА України в 2010–2014 роках.

Публікації

Основні результати роботи надруковано у 21 публікації, з яких 11 статей – в фахових наукових журналах, рекомендованих МОН України (1 зі списку SCOPUS), 2 статті – у збірнику наукових праць та 8 у збірниках тез та праць конференцій.

Структура і обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, п'ятох розділів, загальних висновків, списку цитованої літератури у кількості 206 найменувань, вона містить 25 рисунків. Повний обсяг дисертації складає 153 сторінки друкованого тексту, обсяг додатків складає 8 сторінок друкованого тексту.

ЗМІСТ РОБОТИ

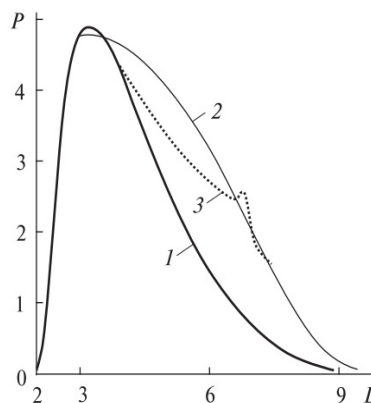
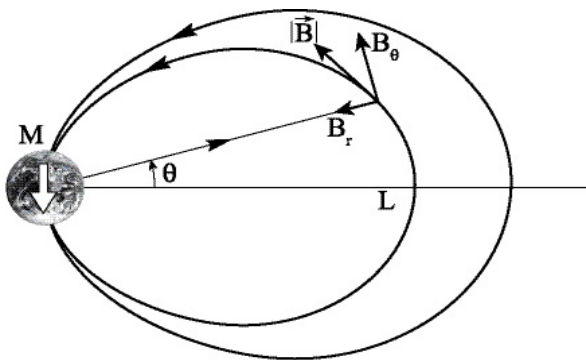
У вступі до дисертації обговорюється стан наукової проблеми, обраної для дослідження, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи та основні задачі дослідження, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами, відображено наукову новизну і практичне значення роботи та отриманих результатів, визначено особистий вклад здобувача, наведені дані про апробацію результатів дисертації, публікації.

Перший розділ містить стислий огляд розвитку головних напрямків досліджень, що відносяться до проблеми розповсюдження ультранизькочастотних хвиль в магнітосфері Землі та генерації спорадичних

збурень магнітного поля Землі (Агапітов О. В., Єрмолаєв Ю. И., Клімушкін Д. Ю., Ладіков-Роєв Ю. П., Леонович А. С., Мазур В. А., Парновський О. С., Похотєлов О. А., Семенів О. В., Федоров Є. Н., Яценко В. О., Akasofu S., Balikhin M. A., Billings S. A., Bothmer V., Cheng C. Z., Glassmeir K.-H., Hameiri E., Hurricane O. A., Kivelson M. G., Lakhina G. S., Nishinda A., Parker E. N., та ін.).

У другому розділі описано основні наближення та моделі збурення плазми у системі «магнітосфера Землі – сонячний вітер», які використовуються для досліджень, що представлені у дисертаційній роботі.

В підрозділі 2.1 розглянуто проблему рівноваги плазми у магнітосфері, в припущенні, що магнітне поле є осесиметричним і що навколо Землі тече лише тороїдальний струм. У цьому випадку магнітне поле Землі несуттєво відрізняється від дипольного магнітного поля (рис. 1). При зроблених припущеннях отримано нелінійне рівняння типу Греда-Шафранова, яке описує магнітостатичну рівновагу плазми. За допомогою цього рівняння отримано аналітичний розв'язок для тиску у приєкваторіальній області, яке представлено на рис. 2. Отримана залежність добре узгоджується з експериментальними даними та чисельними розрахунками інших авторів. Зроблено висновок про те, що модель магнітостатичної рівноваги плазми можна використовувати для вивчення збурень геомагнітного поля. Запропонована спрощена модель магнітостатичної рівноваги плазми з малим тиском, яка використовувалась для отримання рівнянь малих коливань. В межах цієї моделі показано, що геомагнітне поле можна вважати дипольним.



Рисунки 1 – Дипольне магнітне поле. Рисунки 2 – Розподіл тиску у приєкваторіальній області: 1 – чисельне моделювання; 2 – дані вимірювань з КА AMPTE/CSE; 3 – аналітичний розв'язок.

У підрозділі 2.2 викладено процедуру отримання рівняння малих коливань для плазми, яка знаходиться у дипольному магнітному полі, що має вигляд $\vec{B} = [\nabla \psi \times \nabla \varphi]$, де ψ – полоїдальний магнітний потік, а φ – тороїдальний кут. У якості характеристики МГД збурення був вибраний вектор зсуву елементарного об'єму плазми $\vec{\xi}$ (рис. 3), котрий зручно розкласти за

ортогональними векторами $\nabla \psi$, $\nabla \varphi$, \vec{B} (рис. 4):

$$\vec{\xi} = \xi \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} + \eta \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|^2} + \tau \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|^2}. \quad (1)$$

Для амплітуд збурень та збуреного повного тиску δp_1 отримана система рівнянь, яка описує довільні ультранизкочастотні збурення:

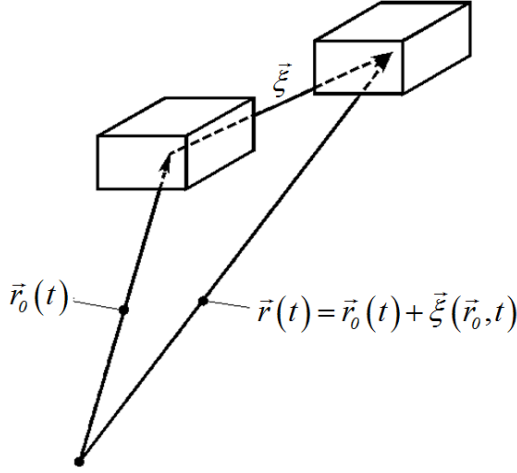


Рисунок 3 – Зміщення елементарного об'єму плазми при збуренні.

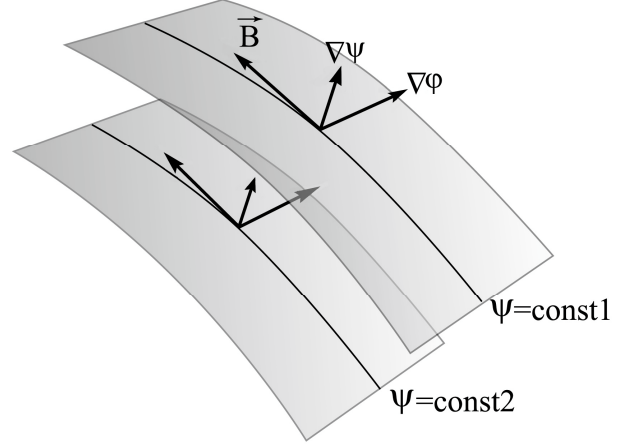


Рисунок 4 – Дипольні магнітні поверхні.

$$\frac{\nabla \psi \cdot \nabla \delta p_1}{|\nabla \psi|^2} = \frac{\omega^2 \rho \xi}{|\nabla \psi|^2} + \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{\vec{B} \cdot \nabla \xi}{|\nabla \psi|^2} \right) + \frac{2\vec{\chi} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} (\delta p_1 + p' \xi + \gamma p \operatorname{div} \vec{\xi}), \quad (2)$$

$$\frac{\nabla \psi \cdot \nabla \xi}{|\nabla \psi|^2} = -\xi \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right) - \frac{[\vec{B} \times \nabla \psi]}{|\vec{B}|^2} \cdot \nabla \eta + \operatorname{div} \vec{\xi} + \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{\gamma p}{\omega^2 \rho |\vec{B}|^2} \vec{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \vec{\xi} \right), \quad (3)$$

$$\frac{[\vec{B} \times \nabla \psi]}{|\vec{B}|^2} \cdot \nabla \delta p_1 = \omega^2 \rho \frac{|\nabla \psi|^2}{|\vec{B}|^2} \eta + (\vec{B} \cdot \nabla) \left(\frac{|\nabla \psi|^2}{|\vec{B}|^2} \vec{B} \cdot \nabla \eta \right), \quad (4)$$

$$\left(1 + \frac{\gamma p}{|\vec{B}|^2} \right) \operatorname{div} \vec{\xi} + \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{\gamma p}{\omega^2 \rho |\vec{B}|^2} \vec{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \vec{\xi} \right) = -\frac{2\vec{\chi} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \xi - \frac{\delta p_1}{|\vec{B}|^2}, \quad (5)$$

де ρ та p – щільність та тиск плазми, $\vec{\chi}$ – вектор кривизни силових ліній магнітного поля, ω – частота коливань, штрих означає похідну по ψ , решта позначень – загальноприйняті. При отриманні цих рівнянь використовувались тотожні векторні перетворення, тому рівняння (2) – (5) є точними. Рівняння (2) – (5) при $\delta p_1 = 0$ описують власні збурення в магнітосферній плазмі, які генеруються збуреннями у сонячному вітрі. В цьому випадку рівняння (3)

описує поперечну структуру збурень, рівняння (2), (4) та (5) – поздовжню.

У підрозділі 2.3 описані основні фізичні властивості безсилових плазмових конфігурацій, які використовуються у розділі 4 для опису динаміки корональних викидів маси КВМ у потоці сонячного вітру. Відомо, що КВМ генерують магнітосферні бурі. З міркувань підвищеної стійкості КВМ зроблено висновок про те, що ці плазмові конфігурації являють собою безсилові структури. Відзначається, що безсилові конфігурації являють собою стан плазми з мінімальною магнітною енергією, що робить їх дуже стійкими до внутрішніх та зовнішніх збурень. Приведено рівняння для безсилового магнітного поля, розв'язки якого у магнітостатичному наближенні повністю відповідають магнітним конфігураціям, що описані у четвертому розділі.

В підрозділі 2.4 представлено основні результати, що стосуються підходу до структурно-параметричної ідентифікації нелінійних дискретних динамічних моделей прогнозування геомагнітних бур. Зокрема, приведені якісні міркування, які пояснюють залежність Dst-індексу від добутку швидкості сонячного вітру та південної компоненти міжпланетного магнітного поля. Встановлена залежність дозволяє прогнозувати методами фізичної кібернетики динаміку Dst-індексу за даними спостережень з космічних апаратів. Викладені методи фізичної кібернетики, які можуть бути використані для аналізу поведінки Dst-індексу з часом та передбачення магнітних бур. Особливу увагу приділено білінійним моделям прогнозування Dst-індексу. Ці моделі у п'ятому розділі були використані для прогнозування космічної погоди.

У **третьому розділі** розглянуто УНЧ коливання з періодами від декількох секунд до десятків хвилин. Більшість досліджень з теорії УНЧ хвиль досліджуються чисельними методами. В даному розділі приведено низку аналітичних результатів, котрі є важливими для подальшого дослідження цих хвиль та спостереження таких хвиль з КА.

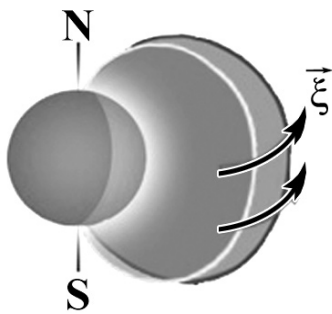


Рисунок 5 – Тороїдальні альфвенівські моди.

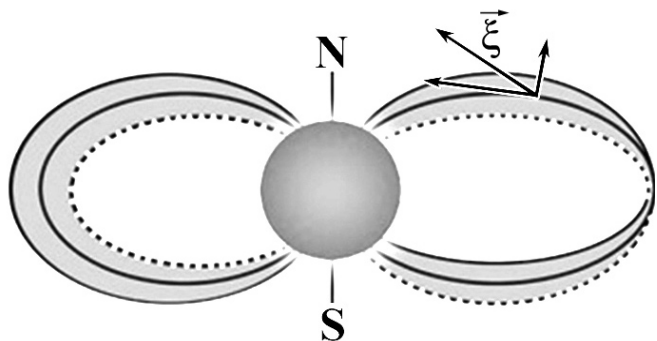


Рисунок 6 – Полоїдальні альфвенівські і повільні магнітозвукові моди.

У підрозділі 3.1 розглянуто власні УНЧ моди у дипольному магнітному полі. Для знаходження вказаних мод у системі (2) – (5) необхідно вилучити з розгляду швидкі магнітозвукові моди, поклавши $\delta p_1 = 0$, оскільки вони не можуть бути власними модами відкритої магнітосферної системи. В результаті рівняння (2) – (5) описують два типи власних мод. Перша мода описує поляризацію типу $\xi = 0, \tau = 0, \eta \neq 0$ і описує тороїдальні альфвенівські моди

(рис. 5). У випадку $\xi \neq 0, \tau \neq 0, \eta = 0$ рівняння (2) – (5) описують полоїдальні альфвенівські моди, зцепленні з повільними магнітозвуковими модами через радіальну кривизну силових ліній магнітного поля (рис. 6). Цей результат отримано з врахуванням поперечної структури збурень (рівняння (3)) і є універсальним для геометрії магнітного поля, яка розглядається, оскільки не накладає жодних обмежень на амплітуди збурень. Необхідно також відзначити, що з рівнянь (2) – (5) випливає, що повільна магнітозвукова мода ($\xi = 0, \eta = 0, \tau \neq 0$) у дипольній геометрії самостійно не реалізується.

У підрозділі 3.2 пояснюється ефект згасання тороїдальних альфвенівських мод через перемішування фаз збурень. Ефект згасання пояснюється неоднорідністю плазми поперек магнітних поверхонь, в результаті чого збурення на різних магнітних поверхнях матимуть різні частоти, що призводить до того, що такі хвилі матимуть різні фази. В результаті будь-яке початкове збурення буде розсіпатися на окремі шаруваті хвильові пакети, які розбігаються по фазах. Саме ця обставина призводить до того, що сумарна амплітуда збурень буде згасати з часом. Для тороїдальних альфвенівських хвиль, які описуються рівнянням (4) з $\delta p_1 = 0$, у ВКБ наближенні розраховані власні моди та частоти, які виявилися залежними від параметра Мак-Ілвайна, що характеризує магнітні поверхні. Проведені розрахунки з такими частотами показали, що спорадичні збурення середовища згасають. Вони можуть генеруватися збуреннями сонячного вітру.

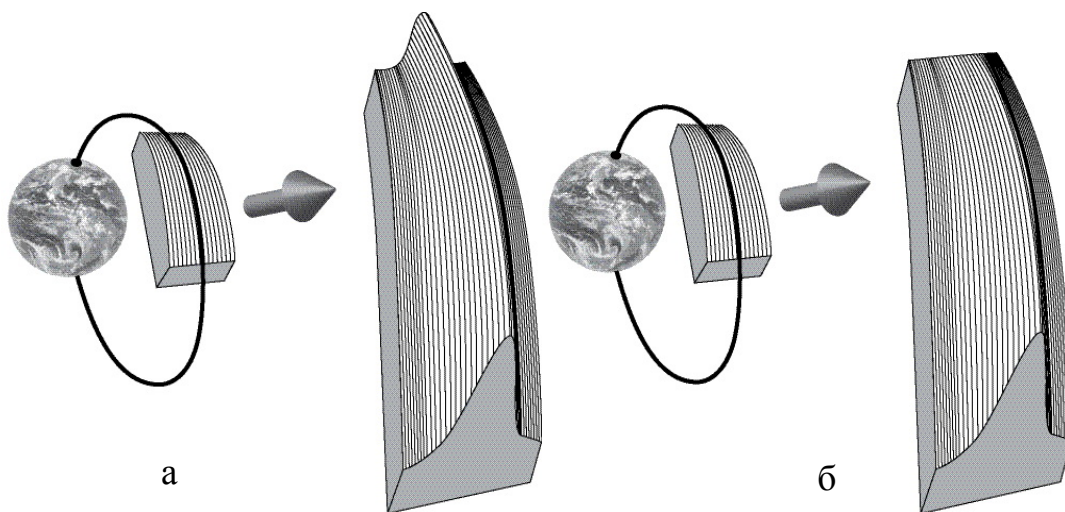


Рисунок 7 – Поперечно-дрібномасштабні збурення: а) жолобкові; б) балонні.

У підрозділі 3.3 отримані рівняння малих коливань для поперечно-дрібномасштабних УНЧ хвиль у дипольному магнітному полі. Ці хвилі легко генеруються у навколоземній магнітній пастці та часто переходить у нестійкий режим. Через те вони інтенсивно досліджувались у останні десятиріччя. У однорідному плазмовому середовищі поперечно-дрібномасштабними збуреннями називають збурення, що задовольняють вимозі $k_{\perp} \ll 1/b, k_{\parallel}$, де k_{\perp} та k_{\parallel} – поперечні та повздовжні компоненти хвильового вектора, а b – характерний

масштаб зміни рівноважних величин. У неоднорідному середовищі, що розглядається, під поперечно-дрібномасштабними збуреннями розуміють збурення, для який будь-який компонент x вектора зсуву задовольняє нерівностям:

$$\frac{|\nabla\psi \cdot \nabla x|}{|\nabla\psi|}, \frac{|\nabla\varphi \cdot \nabla x|}{|\nabla\varphi|} \ll \frac{x}{b}, \frac{|\vec{B} \cdot \nabla x|}{|\vec{B}|}. \quad (6)$$

Найбільш відомі поперечно-дрібномасштабні збурення реалізуються у вигляді жолобкових та балонних збурень (рис. 7). Нерівності (6) будуть задоволені, якщо вектор зсуву $\vec{\xi}$ має вигляд

$$\vec{\xi}(\vec{r}, t) = \hat{\xi} \exp(-i\omega t + iS(\vec{r})/\varepsilon), \quad (7)$$

де безрозмірна мала величина $\varepsilon \ll 1$ характеризує поперечну дрібномасштабність збурень, а S – поперечний ейконал, який задовольняє вимозі $\vec{k}_\perp \cdot \vec{B} = 0$, $\vec{k}_\perp = \nabla S$. Підстановка (7) до рівнянь (2) – (5) призводить до того, що в рівняннях присутні доданки різного порядку малості. Вилучення в цих рівняннях великих доданків, що пропорційні ε^{-2} та ε^{-1} , призведе до рівнянь малих коливань для поперечно-дрібномасштабних мод:

$$\rho \frac{\omega^2 \hat{\xi}}{|\nabla\psi|^2} + \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla\psi|^2} \vec{B} \cdot \nabla \hat{\xi} \right) + 2(P' \hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\vec{\chi} \cdot \nabla \psi}{|\nabla\psi|^2} = 0, \quad (8)$$

$$\rho \frac{\omega^2}{\alpha_s} \hat{\eta} + \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_s} \vec{B} \cdot \nabla \hat{\eta} \right) = 0, \quad \alpha_s = |\vec{B}|^2 / |\nabla\psi|^2, \quad (9)$$

$$\rho \omega^2 \hat{\tau} + \gamma P \vec{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \hat{\xi} = 0, \quad (10)$$

які описують «поздовжню» структуру збурень, і до рівнянь

$$\vec{k}_\perp \cdot \hat{\xi}_\perp = \hat{\xi} \frac{\vec{k}_\perp \cdot \nabla \psi}{|\nabla\psi|^2} + \hat{\eta} \frac{\vec{k}_\perp \cdot [\vec{B} \times \nabla \psi]}{|\vec{B}|^2} = 0, \quad (11)$$

$$\operatorname{div} \hat{\xi} = \frac{1}{1 + \beta} \left[\vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{\hat{\tau}}{|\vec{B}|^2} \right) - 2 \hat{\xi} \frac{\vec{\chi} \cdot \nabla \psi}{|\nabla\psi|^2} \right], \quad (12)$$

які описують «поперечну» структуру збурень. Напрямок вектору \vec{k}_\perp співпадає із напрямком збуреного електричного поля.

У підрозділі 3.4 за допомогою рівнянь (8) – (12) проаналізовано, які моди можуть бути присутні у магнітосферній плазмі. Показано, що у випадку $\vec{k}_\perp \cdot \nabla \varphi = 0$ реалізуються тороїдальні альфвенівські моди ($\hat{\xi} = 0$, $\hat{\tau} = 0$, $\hat{\eta} \neq 0$).

Якщо вектор \vec{k}_\perp перпендикулярний до магнітної поверхні ($\vec{k}_\perp \cdot \nabla \psi = 0$), рівняння (8) – (12) описує полоїдальні альфвенівські моди, «зчеплені» з повільними магнітозвуковими модами через радіальну кривизну магнітних

силових ліній ($\hat{\xi} \neq 0, \hat{\tau} \neq 0, \hat{\eta} = 0$). Тут також розглянуті поперечно-дрібномасштабні моди з «проміжною» поляризацією ($\vec{k}_\perp \cdot \nabla \psi \neq 0, \vec{k}_\perp \cdot \nabla \varphi \neq 0$). Ці моди були передбачені більш ніж двадцять років тому, але експериментально не спостережувались. Для пояснення була розглянута «тонка» структура мод із залученням двох векторних рівнянь

$$\vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{\vec{k}_\perp \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right) = 0, \quad \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{\vec{k}_\perp \cdot \nabla \varphi}{|\nabla \varphi|^2} \right) = 0, \quad (13)$$

котрі були доведені до геометрії магнітного поля, що розглядається. Аналіз рівнянь (8) – (12) для «проміжної» поляризації дає такий результат. Встановлено, що для реалізації цих мод повинно виконуватись додаткове диференціальне рівняння. Таке рівняння, яке відсутнє у випадках $\vec{k}_\perp \cdot \nabla \psi = 0$ та $\vec{k}_\perp \cdot \nabla \varphi = 0$, різко обмежує вірогідність реалізації мод зі «змішаною» поляризацією. Імовірно, саме з цієї причини такі моди досі не спостерігались з космічних апаратів.

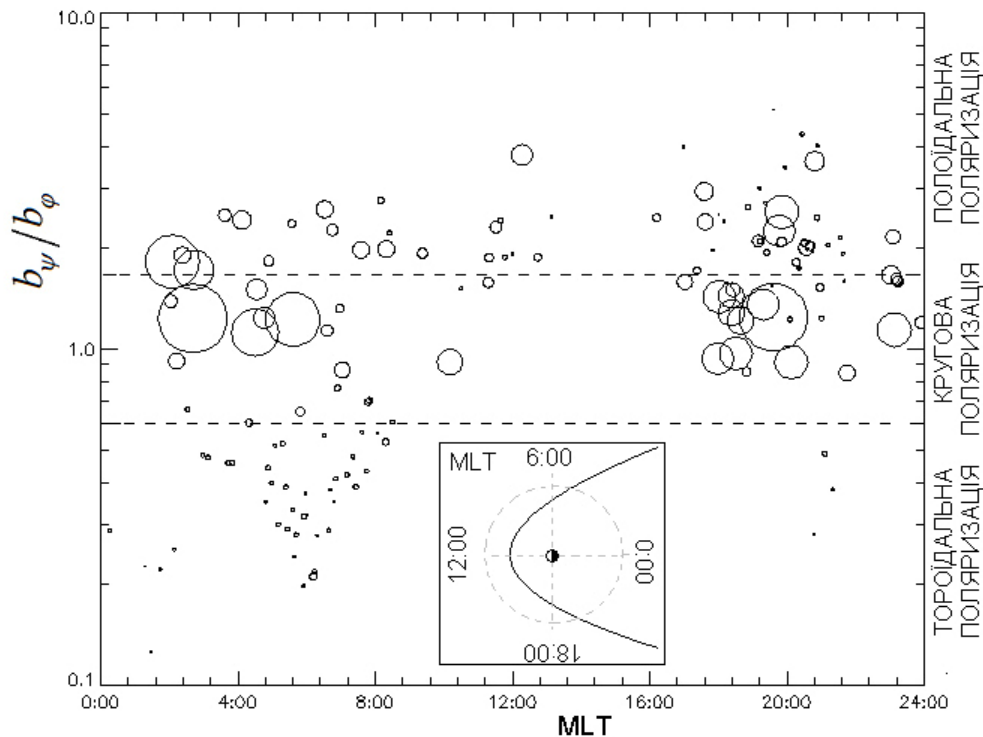


Рисунок 8 – Спостереження УНЧ хвиль за даними космічного апарата АМРТЕ/ССЕ в залежності від локального часу спостереження та поляризації.

У *підрозділі 3.5* проведена верифікація отриманих результатів за вимірами з КА АМРТЕ/ССЕ. Встановлено (рис. 8), що здебільшого реалізуються тороїдальні та полоїдальні альфвенівські, а також повільні магнітозвукові моди. Це відповідає викладеним вище результатам.

У **четвертому розділі** розглянуто математичні моделі можливих безсилових магнітних конфігурацій в потоці плазми. Необхідність такого розгляду обумовлена тією обставиною, що в даний час відсутня

загальновизнана модель корональних викидів маси (КВМ). З цієї причини, згідно з підходом Паркера, розглянуто питання про те, які можливі плазмові структури можуть самоузгоджено рухатися в потоці плазми і можуть призводити до генерації магнітних бур.

У *підрозділі 4.1* отримана самоузгоджена система магнітогідродинамічних рівнянь для опису безсилових конфігурацій з плазмою, яка стаціонарно рухається як всередині, так і ззовні структури. Отримано умову існування розв'язку отриманих рівнянь у припущенні, що плазму можна вважати ідеальним газом, для якого можна ввести функцію тиску $P = \int dp/\rho$. Всі результати отримані в припущенні про осесиметричність розглянутих конфігурацій.

У *підрозділі 4.2* знайдено розв'язок для модельної магнітної конфігурації – циліндричної плазмової трубки. Наведено точний розв'язок для цієї конфігурації. Показано, що в розглянутій конфігурації циркуляція магнітного поля по контуру, який містить усередині конфігурацію, дорівнює потоку вихору через цей контур і дорівнює нулю. Якби ця умова не була виконана, то поза циліндром існувало би магнітне поле, що надавало би тиск на конфігурацію.

У *розділі 4.3* отримано аналітичний розв'язок для більш реалістичної плазмової конфігурації у вигляді стиснутого еліпсоїда. У еліпсоїдальних координатах отримано розв'язок типу «літаючої тарілки». Наведено вираз для потенціалу швидкості і функції струму стиснутого еліпсоїда в припущенні, що він рухається зі швидкістю потоку плазми. При цьому якщо тиск всередині еліпсоїда буде більшим, ніж тиск у довколишньому середовищі, еліпсоїд стане розширюватися. Це розширення збільшується при збільшенні швидкості потоку плазми. Показано, що струми, які течуть всередині еліпсоїда, не генерують зовнішнє магнітне поле.

У *підрозділі 4.4* в тороїдальній системі координат розглянуто рух магнітоплазмової конфігурації у вигляді тора. З отриманого розв'язку випливає, що рівновага безсилового плазмового тора в навколишньому плазмовому потоці може мати місце тільки при русі тора у напрямку потоку. В протилежному випадку, відповідно до закону Бернуллі, він повинен розширюватись.

Всі розглянуті безсилові конфігурації можуть містити південну компоненту магнітного поля і тому можуть призводити до генерації геомагнітних бур.

У **п'ятому розділі** основна увага приділена скінченновимірним динамічним моделям геомагнітних індексів (лінійна, білінійна та NARMAX моделі). В даному розділі введено білінійну динамічну модель геомагнітного індексу, ідентифікація якої здійснюється за даними спостережень з космічних апаратів.

У *підрозділі 5.1* білінійна модель динаміки Dst-індексу побудована на основі використання структурно-параметричної ідентифікації. Білінійна динамічна модель Dst-індексу має наступний вигляд:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_0 x + \sum_{i=1}^m B_i x(t) u_i(t), \quad (14)$$

$$y(t) = Dx(t),$$

де A_0, B_i – постійні матриці розміру $n \times n$, $n \times n$ відповідно; $x(t)$ – вектор стану; $u(t)$ – вектор, компоненти якого $u_i(t)$ являють собою скалярні функції часу (параметри сонячного вітру); $y(t)$ – скалярна функція часу, яка представляє Dst-індекс; D – постійна матриця розміру $n \times 1$. Розмірність вектора $x(t)$ визначається на основі відомого алгоритму Такенса.

Нехай z – вектор, який складається з елементів матриці $F = [A_0; B_i; D]$. Тоді задача визначення параметрів матриць A_0, B_i, D із врахуванням фізичних обмежень на параметри матриці F зводиться до розв’язання такої задачі математичного програмування

$$\underset{z \in F}{\text{minimize}} \quad v(z) = \prod_{i=1}^m f_i(z), \quad (15)$$

де $v(z)$ – інтегральна похибка прогнозування, f_1, \dots, f_m – функціонали, які задають похибку прогнозування на $1, \dots, m$ годин наперед. В рамках задачі (15) було досліджено умови існування глобального мінімуму функціонала похибки та побудовано алгоритм розв’язку задачі.

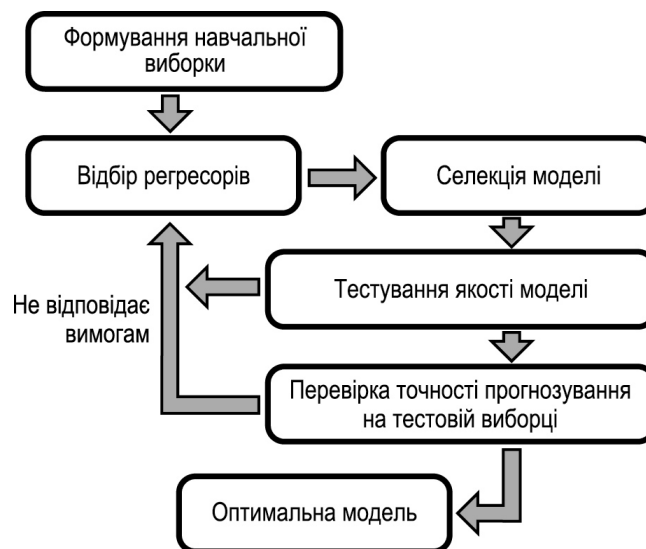


Рисунок 9 – Структура програмного забезпечення.

У підрозділі 5.2 описано алгоритм прогнозування та приведено результати чисельного моделювання на основі даних OMNI2 Database (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb>). Перед ідентифікацією моделі по набору даних за 1991 – 2009 роки застосовано процедуру відновлення пропущених спостережень. Описано результати прогнозування Dst-індексу з використанням супутникових даних спостережень параметрів сонячного вітру та білінійної

динамічної системи. Методична основа цих досліджень була викладена в роботах [11, 12].

Для порівняння з альтернативними моделями прогнозування було розглянуто нелінійну модель авторегресії з екзогенними (рівноправними) входами (NARX-модель), яка є окремим випадком більш загальних структур, що містять компоненти змінного середнього і відомих як NARMAX-моделі, які характеризуються більшою гнучкістю і потенційно більш високою точністю. Теоретично прогнозуюча NARMAX-модель може бути побудована на основі звичайного багаточарового перцептрона, охопленого зворотним зв'язком, однак навчання такої системи характеризується низькою швидкістю збіжності, необхідністю використання настройки по епохах, неможливістю роботи з нестационарними сигналами. Для порівняння з NARMAX-моделями розроблено програмне забезпечення, структура якого представлена на рис. 9. Структуру моделі, а також її параметри знайдено на основі розв'язку нелінійної задачі математичного програмування з обмеженнями. На рис. 10 приведено результати порівняння лінійної та нелінійної моделей. Із рисунку видно, що білінійна модель досить точно прогнозує поведінку Dst-індексу у порівнянні з іншими.

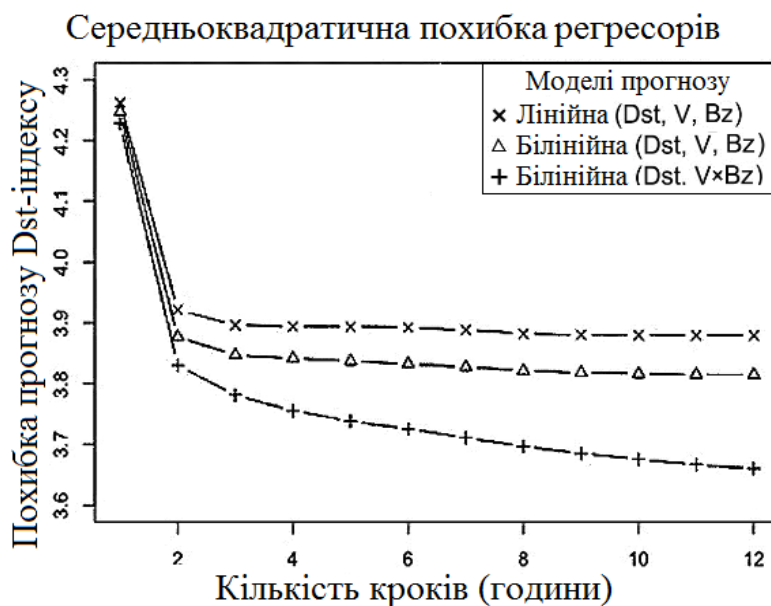


Рисунок 10 – Залежність похибки прогнозу від структури моделі.

На рис. 11 приведено чисельні результати щодо білінійного прогнозування Dst-індексу на одну годину наперед. Із рисунку видно, що білінійна модель досить точно прогнозує поведінку Dst-індексу. На рис. 12 приведено результати порівняння лінійного прогнозування Dst-індексу на одну годину наперед з експериментальними даними. Із рисунку видно, що лінійна модель прогнозує поведінку Dst-індексу з більш великою похибкою у порівнянні з білінійною.

У підрозділі 5.3 запропоновано новий підхід до аналізу прогнозованості Dst-індексу на основі локальних показників Ляпунова та процедуру їх



Рисунок 11 – Білінійне прогнозування Dst-індексу на годину наперед.

обчислення при наявності шумів. Отримано оцінки локальних та глобальних показників Ляпунова Dst-індексу для оцінки горизонту прогнозу. Наведено аналіз похибок прогнозування з використанням показників Ляпунова. З використанням алгоритму Такенса обчислено кореляційну розмірність та чисельну оцінку кількості показників Ляпунова Dst-індексу. Приведено чисельні результати прогнозування Dst-індексу. Реалізовано процедуру обчислення

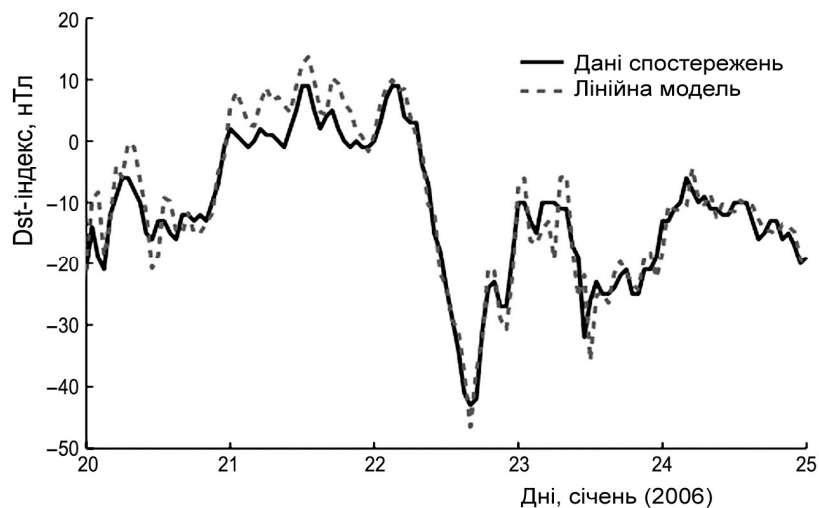


Рисунок 12 –Лінійне прогнозування Dst-індексу.

горизонту прогнозу Dst-індексу з використанням спектру локальних показників Ляпунова.

У підрозділі 5.4 розглянуто проблему гарантованого прогнозування Dst-індексу. Описано новий підхід до реконструкції гарантованого інтервалу прогнозування, який називається "трубка прогнозування". Приведено чисельні результати гарантованого прогнозування Dst-індексу з використанням супутникових даних спостережень параметрів сонячного вітру.

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи:

1. У рамках однорідної ідеальної МГД показано, що УНЧ збурення в магнітосфері Землі можуть бути коректно описані в рамках магнітостатичної рівноваги і наближення дипольного магнітного поля. Отримано систему рівнянь малих коливань для довільних УНЧ хвиль в дипольному магнітному полі, яка послідовно враховує як поздовжню так і поперечну структуру збурень.

2. Знайдено, що точними розв'язками отриманої системи рівнянь є тороїдальні альфвенівські моди і полоїдальні альфвенівські моди, зачеплені через радіальну кривизну магнітних силових ліній з повільними магнітозвуковими модами. Показано, що ММЗ моди самостійно в магнітосфері Землі не реалізуються.

3. Встановлено ефект загасання тороїдальних альфвенівських хвиль в магнітосфері Землі завдяки ефекту перемішування фаз збурень.

4. Дано роз'яснення чому наразі відсутні супутникові спостереження поперечно-дрібномасштабних УНЧ мод зі «змішаною» поляризацією.

5. Вперше проаналізовано самоузгоджений рух безсилових магнітних структур в плазмовому потоці з урахуванням руху середовища як всередині, так і зовні структури. Показано, що ці структури можуть призводити до генерації геомагнітних бур, оскільки містять південну компоненту магнітного поля.

6. Побудована чисельна дискретна білінійна модель поведінки Dst-індексу в часі. Встановлено, що ця модель може дати обґрунтований прогноз поведінки Dst-індексу на 5 – 6 годин наперед, і тому може бути використана для передбачення геомагнітних бур.

7. Запропоновано підхід до прогнозування поведінки Dst-індексу за допомогою локальних показників Ляпунова. Розроблено процедуру їх обчислення. Отримано вираз для обчислення горизонту прогнозу Dst-індексу з використанням спектра локальних показників Ляпунова.

8. Отримав подальший розвиток метод ідентифікації мінімальної за складністю дискретної білінійної динамічної моделі прогнозування Dst-індексу, який базується на знаходженні структури і параметрів моделі оптимізаційним методом з урахуванням помилки прогнозування та статистичного критерію регулярності.

Розвинені методи і запропоновані моделі можуть бути використані при підготовці та реалізації космічних проектів за участю України – «Іоносат», «Резонанс» та «Інтергеліозонд».

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ладиков-Роев Ю. П. О распределении плазменного давления в экваториальной области магнитосферы Земли / Ю. П. Ладиков-Роев, С. О. Черемных // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, №1. – С. 86-89.
2. Черемних С.О. Прогнозування геомагнітного Dst-індексу на базі

білінійних моделей та методів нелінійної фільтрації. / С. О. Черемних., В. О. Яценко // Наукові записки НаУКМА. – Сер. Фіз-мат. – 2011. – С. 65-71.

3. Cheremnykh S. O. MHD waves in the plasma system with dipole magnetic field configuration / S. O. Cheremnykh, O. V. Agapitov // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2011. – Vol. 2. – P. 103-106.

4. Семенів О. В. Прогнозування космічної погоди на основі адаптивної процедури статистичного навчання / О. В. Семенів, В. О. Яценко, С. О. Черемних // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Серія фізико-математичні науки*. – 2012. – Т. 3. – С. 233-238.

5. Ladikov-Roev Yu. P. Axisymmetric force-free magnetic configurations in plasma flux / Yu. P. Ladikov-Roev, S. O. Cheremnykh, V. A. Yatsenko // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2013. – Vol. 45, № 6. – P. 48-58.

6. Cheremnykh S. O. Damping of magnetospheric toroidal Alfvén eigenmodes due to phase mixing / S. O. Cheremnykh, O. S. Parnovski // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2013. – Vol. 3. – P. 58-62.

7. Черемных С. О. О поляризации поперечно-мелкомасштабных МГД-мод в магнитосфере Земли / С.О. Черемных // *Космічна наука і технологія*. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 57-64.

8. Яценко В. О. Лінійний і нелінійний аналіз часового ряду: кореляційна розмірність, показники Ляпунова та прогнозування / В. О. Яценко, О. І. Кочкодан, М. В. Макаричев, С. О. Черемних, І. С. Пашенковська // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2013. – № 4. – С. 84-89.

9. Черемных О. К. Исследования МГД колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте “Резонанс” / О. К. Черемных, Ю. М. Ямпольский, А. В. Агапитов, А. В. Зализовский, В. Н. Ивченко, Л. В. Козак, А. С. Парновский, Ю. Г. Рапопорт, Ю. А. Селиванов, А. В. Колосков, С. О. Черемных // *Космическая наука и технология*. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 5-42.

10. Яценко В.О. Ідентифікація білінійних систем та керування показниками Ляпунова / В.О. Яценко, О.І. Кочкодан, М.В. Макаричев, І.С. Пашенковська, С.О. Черемних, О.В. Шолохов // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2014. – №4. – С. 247-250.

11. Черемних О. К. Експериментальні та теоретичні дослідження резонансних явищ в магнітосферно-іоносферній плазмі / О. К. Черемних, А. К. Федоренко, Є. І. Крючков, С. О. Черемних, А. В. Беспалова // *Космічна наука та технологія*. – 2015. – Т. 21, №1. – С.64-69.

12. Сорока С. О. Вплив космічних факторів на атмосферу та іоносферу. Створення технічних засобів для локального моніторингу інфразвуку / С. О. Сорока, В. О. Яценко, В. П. Мезенцев, Л. П. Каратаєва, О. В. Семенів, С. О. Черемних, Ю. В. Шатохіна // *Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)»*. – збірка наукових звітів. – К.: НАН України. – 2010. – С.60-70.

13. Яценко В. О. Дослідження впливу факторів космічної погоди на супутникові прилади та системи / В. О. Яценко, Ю. О. Кліменко, В. Є. Набівач, Л. В. Підгородецька, Ю. В. Пруцко, О. В. Семенів, С. О. Черемних // *Цільова*

комплексна програма фундаментальних досліджень «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)». – Збірка наукових звітів. – К.: НАН України. – 2010. – С.136-148.

14. Yatsenko V. A. Geomagnetic Dst-index forecast based on bilinear models and nonlinear filtering techniques / V. A. Yatsenko, S. O. Cheremnykh, Yu. V. Prutsko // 10th Ukrainian Conference on Space Research. – Abstracts. – Yevpatoria, Ukraine. – 2010. – P. 108.

15. Cheremnykh S. O. MHD waves in the plasma system with dipole magnetic field configuration / S. O. Cheremnykh, O. V. Agapitov // Young Scientists Conference “Modern Problems of Theoretical Physics”. – Kyiv, Ukraine. – 2010. – P. 103.

16. Черемных С. О. УНЧ волны в плазме с дипольным магнитным полем / С. О. Черемных, А. В. Агапитов // 11я Украинская конференция по космическим исследованиям. – Евпатория, Украина. – 2011. – С. 51.

17. Yatsenko V.A. Geomagnetic Dst-Index Forecast Based on Bilinear Models and Nonlinear Filtering Techniques / V. A. Yatsenko, S. O. Cheremnykh // UK–Ukraine Meeting on Solar Physics and Space Science joint with Topical Advanced Summer School UKU SPSS/TASS. – Alushta, Ukraine. – 2011. – P. 11.

18. Yatsenko V. A. Dynamical approach to space weather prediction using identification and optimization methods / V. A. Yatsenko, S. O. Cheremnykh // 12th Ukrainian Conference on Space Research. – Yevpatoria, Ukraine. – 2012. – P. 58.

19. Черемных С. О. Осесимметричные бесиловые плазменные конфигурации у плазменном потоке / С. О. Черемных // 13я Украинская конференция по космическим исследованиям. – Евпатория, Украина. – 2013. – С. 43.

20. Черемных С. О. Про поляризацію поперечно-дрібномасштабних МГД-хвиль в магнітосфері Землі / С. О. Черемных // 13я Украинская конференция по космическим исследованиям. – Евпатория, Украина. – 2013. – С. 63.

21. Ладиков-Роев Ю. П. Моделирование осесимметричных бесиловых магнитных конфигураций в плазменном потоке / Ю. П. Ладиков-Роев, С. О. Черемных, В. О. Яценко // VII Міжнародна наукова конференція імені академіка І. І. Ляшка. Обчислювальна та прикладна математика. – Київ. – 9,10 жовтня 2014 р. – С. 65.

АННОТАЦІЯ

Черемных С.О. Исследование спорадических и УНЧ процессов во внутренней магнитосфере Земли. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.07.12 – дистанционные аэрокосмические исследования. – Национальный Авиационный Университет, Киев, 2015г.

Диссертационная работа посвящена изучению спорадических и ультранизкочастотных процессов во внутренней магнитосфере Земли. В рамках одножидкостной идеальной магнитной гидродинамики получена система

уравнений малых колебаний для произвольных УНЧ волн в дипольном магнитном поле. Найдено, что точными решениями полученной системы уравнений являются тороидальные альфвеновские моды и полоидальные альфвеновские моды, зацепленные с медленными магнитозвуковыми модами. Эти решения реализуются в околоземной плазме в виде собственных мод из-за взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Установлен эффект затухания тороидальных альфвеновских волн из-за перемешивания фаз возмущений. Разъяснено, почему отсутствует отдельная ветка магнитозвуковых мод в магнитосфере Земли, а поперечно-мелкомасштабные моды со «смешанной» поляризацией являются сложно реализуемыми. Проанализировано движение в плазменном потоке бессиловых магнитных конфигураций в виде цилиндрической трубки, эллипсоида сжатия и тороида, с учётом движения среды внутри и снаружи этих структур. Установлено, что движение таких структур является согласованным с движением солнечного ветра. Отмечено, что эти структуры содержат южную компоненту магнитного поля и поэтому могут генерировать геомагнитные бури. Построена численная билинейная модель поведения по времени Dst-индекса, характеризующая спорадические изменения магнитного поля, которая даёт обоснованный прогноз на 5-6 часов вперёд и может быть использована для предсказания геомагнитных бурь. Предложен подход к прогнозированию поведения Dst-индекса с помощью локальных показателей Ляпунова. Реализована процедура вычисления горизонта прогноза поведения Dst-индекса с использованием локальных показателей Ляпунова.

Ключевые слова: спорадические возмущения, солнечно-земные связи, космическая погода, внутренняя магнитосфера, УНЧ-возмущения, D_{st}-индекс.

ABSTRACT

Cheremnykh S.O. Investigation of sporadic and ULF processes in the inner magnetosphere of the Earth. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on the specialty 05.07.12 – remote aerospace research. – National Aviation University, Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to the study of ultra-low-frequency and sporadic processes in the inner magnetosphere of the Earth. System of equations was obtained for arbitrary small oscillations of ULF waves in the dipole magnetic field within the single-fluid ideal MHD. It was found that the exact solution of the resulting system of equations is toroidal Alfvén modes and poloidal Alfvén modes linked with the slow magnetosonic modes. These solutions are implemented in the near-Earth plasma in the form of eigenmodes due to the interaction of the solar wind with the Earth's magnetosphere. Set damping effect for toroidal Alfvén waves because mixing phase perturbations. It is shown that a separate branch of magnetosonic modes and small-scale-cross modes with "mixed" polarization in the Earth's magnetosphere are not implemented. The motion in the plasma flow force-free magnetic configurations of a cylindrical tube, compressed ellipsoid and the toroid, was analyzed in view of the

medium inside and outside of these structures. It is found that the movement of these structures is consistent with the movement of the solar wind. It is noted that these structures contains the southern component of the magnetic field and, therefore, can generate geomagnetic storms. A numerical bilinear model of behavior of Dst-index in time was built. It characterizes the sporadic change of the magnetic field, which gives reasonable forecast for 5–6 hours and can be used to predict the geomagnetic storms. The approach to predicting the behavior of Dst-index using local Lyapunov exponents was proposed. Procedure was implemented for calculating the forecast horizon Dst-index time behavior.

Keywords: sporadic disturbances, solar-terrestrial relations, space weather, the inner magnetosphere, ULF perturbations, Dst-index.

АНОТАЦІЯ

Черемних С.О. Дослідження спорадичних і УНЧ процесів у внутрішній магнітосфері Землі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження. – Національний Авіаційний Університет, Київ, 2015р.

Дисертаційна робота присвячена вивченню спорадичних і ультранизькочастотних процесів у внутрішній магнітосфері Землі. В рамках однорідної ідеальної магнітної гідродинаміки отримано систему рівнянь малих коливань для довільних УНЧ хвиль в дипольному магнітному полі. Знайдено, що точними розв'язками отриманої системи рівнянь є тороїдальні альфвенівські моди і полоїдальні альфвенівські моди, зачеплені з повільними магнітозвуковими модами. Ці розв'язки реалізуються в навколоземній плазмі у вигляді власних мод через взаємодію сонячного вітру з магнітосферою Землі. Встановлено ефект згасання тороїдальних альфвенівських хвиль через перемішування фаз збурень. Роз'яснено, чому відсутня окрема гілка повільних магнітозвукових мод, та поперечно-дрібномасштабні моди в магнітосфері Землі зі «змішаною» поляризацією є такими, що складно реалізуються. Проаналізовано самоузгоджений рух в плазмовому потоці безсилових магнітних конфігурацій у вигляді циліндричної трубки, еліпсоїда стиснення і тороїда, з урахуванням руху середовища всередині і зовні цих структур. Встановлено, що рух таких структур є узгодженим з рухом сонячного вітру. Відзначено, що ці структури мають південну компоненту магнітного поля і тому можуть генерувати геомагнітні бурі. Побудована чисельна білінійна модель поведінки у часі Dst-індексу, що характеризує спорадичні зміни магнітного поля, яка дає обґрунтований прогноз на 5-6 годин вперед і може бути використана для передбачення геомагнітних бур. Запропоновано підхід до прогнозування поведінки Dst-індексу за допомогою локальних показників Ляпунова. Реалізована процедура обчислення горизонту прогнозу поведінки Dst-індексу з використанням локальних показників Ляпунова.

Ключові слова: спорадичні збурення, сонячно-земні зв'язки, космічна погода, внутрішня магнітосфера, УНЧ-збурення, Dst-індекс.

Підписано до друку р. Формат 60×90 1/16 . Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. №

Друк: «Карат Лтд», 03194, м. Київ, вул. Литвиненко-Вольгемут, 2-а.
тел.: (044)229-11-49/90, (050)335-72-92, e-mail: karat@karat.in.ua
Свідоцтво ДК № 163 від 01.09.2015 р.