

УДК 523.98, 533.951, 551.510.536, 551.510.535, 52(15).003
КП
Номер держ. реєстрації 0115U003437
Інв. №

Національна академія наук України
Державне космічне агентство України
Інститут космічних досліджень
(ІКД)

03680, МСП, Київ 187, проспект Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1
телефон 526 41 24, ел. пошта: ikd@ikd.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ІКД
НАН України та ДКА України
чл.-кор. НАН України

_____ О.П.Федоров

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Дослідження магнітосферно-іоносферної взаємодії з використанням високоорбітальних КА, дослідження впливу інфразвуку на іоносферу»
етап 3 «Дослідження УНЧ резонансних коливань в навколоземній плазмі»,
Цільова комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень на 2012-2016 рр., розпорядження Президії НАН України від 26.02.2015 № 122

Науковий керівник теми
заст. директора
д.ф.-м.н., професор

О.К. Черемних

Відповідальний
виконавець
к.ф.-м.н.

А.К. Федоренко

2015

Результати роботи розглянуто Вченою радою ІКД НАН України та ДКА України,
протокол № 9 від «15» грудня 2015 р.

1. УНЧ коливання в іоносферній плазмі

1.1 Дослідження впливу інфразвуку на іоносферу

У звітний період було продовжено аналіз результатів наземно-космічних експериментів, виконаних спільно з Львівським центром ІКД НАНУ-ДКАУ та Фізико-механічним інститутом НАНУ в 2013-2014 рр. [1]. На цій основі отримано наступні результати [2, 3]:

1. Побудовано уточнену нелінійну модель каскадного перетворення послідовності пакетів акустичних хвиль при їх розповсюдженні до висот іоносфери та проникненні в іоносферні шари. Схема збудження іоносферних збурень, що була застосована в проведених експериментах, має особливості, що не використовуються в експериментах інших авторів. В першу чергу, на відміну від прямої генерації низькочастотних акустичних коливань з параметрами, що забезпечують проникнення через фільтруючі шари атмосфери, як, наприклад, в установці «Сура», і яка має низьку ефективність, використовується генерація двох середньочастотних (500-800 Гц) акустичних променів великої інтенсивності (165 дБ, що відповідає амплітуді надлишкового тиску 3600 Па) з невеликою (20-30 Гц) різницею частот. При таких інтенсивностях проявляються нелінійні ефекти і випромінювання не буде гармонічним. В результаті, на невеликій висоті над генератором утворюється об'ємна параметрична антена, що випромінює хвилі з різницевою частотою (20-30 Гц). Початкова генерація на досить високій частоті є ефективною, разом з тим низькочастотний параметричний випромінювач має ряд переваг, в першу чергу – можливість отримання високої спрямованості випромінювання при невеликих розмірах самого випромінювача. По-друге, оскільки, за рахунок фільтрації в атмосфері високочастотної частини спектру сигналу, найбільшу інтенсивність буде мати обвідна сигналу, доцільно використати наднизькочастотну модуляцію сигналу різницевої частоти. Найпростіше це можна зробити за рахунок формування хвильових пакетів ще на першому етапі – етапі середньочастотної генерації. При тривалості пакета в 60 с з таким же проміжним інтервалом маємо оцінку ефективної частоти кінцевого сигналу близько 0.016 Гц, що відповідає акустико-гравітаційним хвилям. Врахування ефектів нелінійності, в більшості випадків, підвищує дисипацію випромінювання, ефектів дифракції – ізотропізацію (розмивання) пучка. Маємо два ефективних рівня висот, що відповідають середній висоті параметричної антени та середній висоті дисипації різницевого сигналу з утворенням акустико-гравітаційної хвилі.

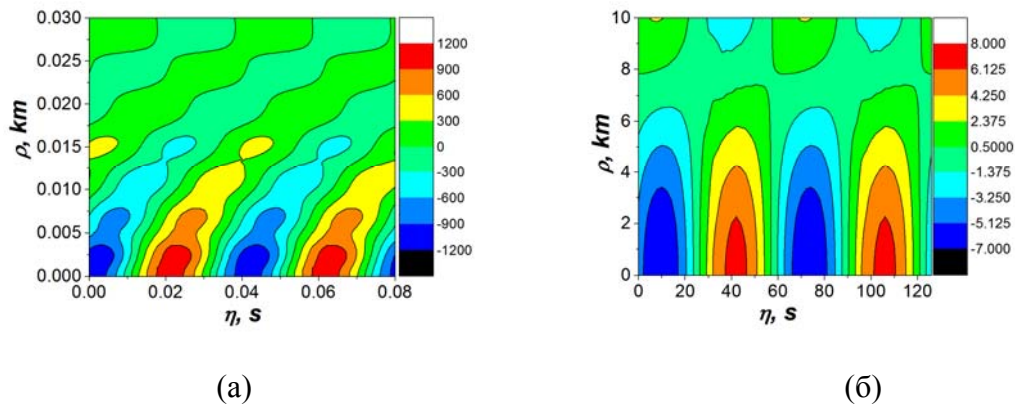


Рис.1 – Послідовне перетворення частоти 600 Гц → 25 Гц → 0.016 Гц. Діаметр вихідного отвору випромінювача – 1 м, початкові частоти – 600 Гц і 625 Гц, початкова амплітуда – 420 м/с. (а) – Розподіл швидкості повітря (см/с) на висоті 60 м (перше перетворення), ρ - радіальна координата в поперечній площині пучка, η – час від приходу хвилі на висоту 60 м; (б) – Розподіл швидкості повітря (см/с) на висоті 130 км (друге перетворення), ρ – радіальна координата в поперечній площині пучка, η – час від приходу хвилі на висоту 130 км

Протягом звітнього періоду було деталізовано початкові умови випромінювання, граничні умови на генераторі та на обох ефективних рівнях висот з проведенням обчислювальних експериментів на основі програмного забезпечення, створеного на попередньому етапі.

2. Включено в модель механізм вибору параметрів акустичного випромінювання, що забезпечують його проникнення в іоносферу. Введення вказаних вище двох ефективних рівнів висоти дозволило побудувати на основі вже розробленого програмного забезпечення схему оптимізації параметрів експерименту за критерієм досягнення потрібного рівня гідродинамічної швидкості на визначеній висоті в іоносфері. Ідея полягає в тому, щоб «розміщувати» ефективні рівні на «сприятливих» для розповсюдження випромінювання висотах атмосфери.

3. Запропоновано механізми утворення в певних областях іоносфери явища акустично-індукованої радіопрозорості. Виходячи з результатів експериментів, виконаних у 2008 р. Львівським центром ІКД НАНУ-ДКАУ та CNRS (Франція) з використанням мікросупутника DEMETER, в яких було виявлено подібність відгуків іоносфери на дію наземного акустичного випромінювача та поштовхи землетрусу у зоні Вранча (Румунія), виконано аналіз можливих механізмів формування відгуків.

4. Запропоновано уточнену схему наземно-космічного експерименту з активною дією на іоносферу програмним чином модульованого акустичного випромінювання наземного параметричного генератора. Уточнення стосуються задач космічного сегмента експериментальної конфігурації, де для низки вимірювань запропоновано використати

магнітометричні дані супутникових констеляцій SWARM (ЄКА) та COSMIC (США-Китай-Японія), але з застосуванням власного математичного апарату обробки.

1.2 Акустико-гравітаційні хвилі у вихровій полярній термосфері

АГХ є важливим типом УНЧ хвильових процесів в іоносфері, які відіграють значну роль у динаміці та енергетиці верхньої атмосфери та іоносфери. Вони досліджуються вже понад 60 років теоретично та численними експериментальними методами, як наземними, так і супутниковими. Аналіз супутникових вимірів показав, що в полярних областях обох півкуль на висотах 250-400 км спостерігаються протяжні області (5-7 тис. км) підвищеної хвильової активності [4]. Амплітуди полярних АГХ на порядок перевищують амплітуди хвиль в середніх і низьких широтах. Полярні АГХ характеризуються виділеними горизонтальними масштабами (500-600 км) і періодами, близькими до періоду Брента-Вайсяля. На основі супутникових даних також було виявлено ефект систематичного руху АГХ назустріч вітру. В обох півкулях хвильова активність зосереджена переважно всередині авроральних овалів, а азимути рухів АГХ визначаються вітрами полярної циркуляції.

При наближенні до полярних областей практично синхронно зі збільшенням амплітуди хвильових збурень спостерігається також збільшення швидкості вітру (рис. 2). Для наочності, усереднена амплітуда АГХ показана на рис.2 у відносних одиницях. Подібні хвильові збурення систематично спостерігалися на витках супутника DE 2 над полярними шапками нижче приблизно 400 км. Амплітуди АГХ на різних витках варіювалася в інтервалі 2-10%, швидкість вітру складала 300-700 м/с. Залежність амплітуд полярних АГХ від швидкості полярної циркуляції за даними ряду вимірювань на кількох витках в обох півкулях показано на рис. 3.

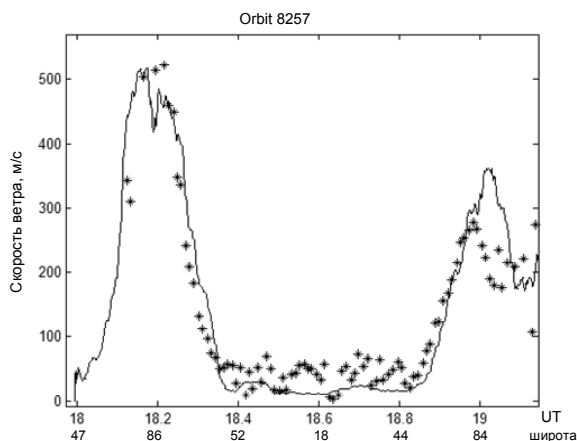


Рис.2 – Зв'язок АГХ з вітровою циркуляцією в полярних областях на окремому витку супутника Dynamics Explorer 2: усереднена амплітуда АГХ (в одиницях $1000 \times \delta n/n$, $\delta n/n$ – відносні варіації нейтральної концентрації) і модуль швидкості вітру в м/с (позначено зірочками).

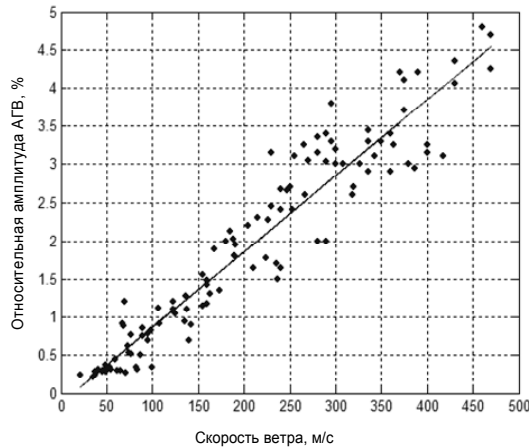


Рис. 3 – Залежність амплітуди АГХ від швидкості вітру в полярних областях за даними вимірювань на кількох витках

Вказані вище спостережувані особливості полярних АГХ неможливо пояснити в рамках сучасних теоретичних уявлень. Для цього необхідно припустити існування певного механізму, що відфільтровує АГХ за напрямком, а також відповідального за виділені спектральні характеристики хвиль. Відмінною особливістю полярної термосфери є наявність вихрових рухів з характерними масштабами в декілька тисяч км. Виникають такі вихрові рухи в результаті притоку енергії та імпульсу до нейтральних частинок від іонів, прискорюваних за рахунок електромагнітного дрейфу в полях магнітосферної конвекції. В результаті, в іоносфері формуються два вихори: один у вечірньому, а другий в ранковому секторі. Ступінь розвитку цих вихорів залежить від геомагнітної активності та конфігурації міжпланетного магнітного поля. Тому при теоретичному розгляді АГХ в полярній термосфері доцільно враховувати глобальну циркуляцію атмосфери.

Впродовж звітного періоду в рамках моделі вихрового циліндра, що апроксимує великомасштабний вихор в полярній термосфері, було теоретично досліджено особливості розповсюдження АГХ у такому середовищі [5]. Показано, що на границі вихору переважають АГХ з частотами порядку частоти Брента-Вяйсяля. Проведено порівняння отриманих результатів з даними супутникових вимірювань над полярними шапками [5]. За рамками моделі залишилося багато неврахованих особливостей середовища, наприклад, неоднорідність кутової швидкості вихору, вертикальні рухи середовища, наявність другого вихору, вплив магнітного поля Землі та ін. Однак навіть у

такому наближенні врахування ефекту обертання середовища пояснює основні експериментально спостережувані особливості АГХ в термосфері над полярними шапками: переважання хвиль з частотою порядку частоти Брента-Вяйсяля, горизонтальні масштаби хвиль, а також їх систематичні напрямки руху назустріч вітру.

2. Резонансні коливання в магнітосфері

Розглянуто модель магнітосфери як одновимірної-неоднорідної плазми з магнітним полем, силові лінії якого являють собою концентричні кільця, а рівноважні параметри магнітного поля і середовища змінюються впоперек магнітних оболонок [6]. В рамках такої моделі показано можливість існування альфвенівських мод з дискретним спектром, які безпосередньо спостерігаються на космічних апаратах [7]. Необхідною передумовою для виникнення таких мод є наявність резонаторів впоперек магнітних оболонок. Досліджено характерні особливості реалізації мод з дискретним спектром [7]. Запропонована модель дозволяє пояснити основні експериментально спостережувані особливості азимутально-дрібномасштабних УНЧ коливань в навколосферній плазмі. Отримані результати можуть бути використані для інтерпретації даних вимірювань з космічних апаратів та мережі радарів SuperDARN.

Циліндричний плазмовий шнур круглого перетину з гвинтовим магнітним полем є зручною плазмовою моделлю для експериментального і теоретичного дослідження різних типів МГД-збурень. Така модель протягом тривалого часу служить об'єктом досліджень у космічній і високотемпературній плазмі. Ця геометрія також часто використовується для розгляду фундаментальних проблем фізики плазми. Незважаючи на значні зусилля по теоретичному дослідженню поведінки плазми в циліндричній геометрії, багато питань на сьогодні залишаються неясними. Почасти це пов'язано з тією обставиною, що для вивчення коливань у зазначеній геометрії зазвичай використовується рівняння Хайна-Люста або його модифікації, які мають досить складний вигляд. Розв'язок цих рівнянь пов'язаний з істотними математичними труднощами. В ході виконання роботи отримано рівнянь малих коливань, яке є значно простішим в порівнянні зі стандартним виглядом рівняння Хайна-Люста. Показано, що це рівняння малих коливань може бути отримано з рівняння Хайна-Люста після деяких громіздких математичних перетворень. Продемонстровано, що отримане рівняння призводить до ряду добре відомих результатів. Воно також дозволяє досліджувати поперечно-дрібномасштабні збурення плазми, які в ряді випадків призводять до розвитку нестійкостей жолобкових і балонних мод, що відіграють важливу роль у фізиці плазми. Основна увага приділялась умовам поширення і

стійкості поперечно-дрібномасштабних збурень з неперервним спектром в неоднорідному плазмовому шнурі.

Отримані результати якісно описують поведінку УНЧ-мод з неперервним спектром в неоднорідних плазмових циліндрах і можуть бути використані для інтерпретації поведінки сонячних магнітних трубок.

3. Організаційне забезпечення та методичний супровід Програми

В ході виконання роботи проведено ряд організаційних заходів з підготовки та проведення Британо-Українсько-Іспанської конференції з фізики Сонця та космічних досліджень:

- організовано закупівлю та проведено інсталяцію комплексу презентаційного обладнання для забезпечення роботи Конференції;
- сформовано склад локального організаційного комітету Конференції;
- у складі оргкомітету проведено роботу з визначення місця проведення Конференції та залучення організацій-учасників;
- розроблено сайт Конференції;
- підготовлено макет постера Конференції, буклети інформаційних матеріалів для учасників;
- підготовлено збірник тез конференції.

Конференцію було успішно проведено в м. Львів протягом 7-11 вересня 2015 року. Учасниками конференції стали близько 40 фахівців з 9 країн світу. На восьми секціях Конференції було заслухано оглядові доповіді запрошених провідних учених, пленарні, секційні доповіді, а також представлено стендові презентації. Тематика доповідей була спрямована на дослідження фізики Сонця, магнітосфери та іоносфери, нелінійних явищ у космічній плазмі, спостережень та моделювання сонячно-атмосферних структур, сонячної активності. В ході роботи Конференції відбулися наукові дискусії за напрямками проведення досліджень та реалізації спільних проектів.

Впродовж 2015 року за темою було опубліковано 6 статей, матеріали досліджень доповідались на Третій Британо-Українсько-Іспанській конференції з фізики Сонця та космічних досліджень та 15-ій Українській конференції з космічних досліджень.

Література

1. Черемных О.К., Климов С.И., Корепанов В.Е., Кошовый В.В., Мельник М.Е., Ивантишин О.Л., Ногач Р.Т., Рапопорт Ю.Г., Селиванов Ю.А., Семенов Л.П. Наземно-космический эксперимент по искусственной акустической модификации ионосферы. Первые результаты, // *Космічна наука і технологія*, 2014, т. 20, № 6, с. 60-74.
2. Черемных О.К., Гримальський В.В., Івченко В.М., Кошовий В.В., Мезенцев В.П., Мельник М.О., Івантишин О.Л., Ногач Р.Т., Рапопорт Ю.Г., Селиванов Ю.О. Експериментальні та теоретичні дослідження штучної акустичної модифікації атмосфери та іоносфери // *Космічна наука і технологія*, 2015, т. 21, № 1, с. 48-53.
3. Емельянов Л.Я., Живолуп Т.Г., Сорока С.А., Черемных О.К., Черногор Л.Ф. Наземное акустическое воздействие на атмосферу: результаты наблюдений методами некогерентного рассеяния и вертикального зондирования // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2015. – Т. 20, № 1. – С. 37-47.
4. Fedorenko A.K, Bepalova A.V, Cheremnykh O.K, and Kryuchkov E.I. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere // *Ann. Geophys.*, 33,101-108, 2015; doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
5. Ладиков-Роев Ю.П., Черемных О.К., Федоренко А.К., Набивач В.Е. Акустико-гравитационные волны в вихревой полярной термосфере // *Проблемы управления и информатики* – 2015 – №5. – С. 74-84.
6. Cheremnykh O.K. On the theory of transversally small-scale modes in the cylindrical plasma column // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2015. – V. 31, № 5. – С.213-224.
7. O.K. Cheremnykh, D.Yu. Klimushkin, D.V. Kostarev. On the Structure of Azimuthally Small-Scale ULF Oscillations of Hot Space Plasma in a Curved Magnetic Field. Modes with Discrete Spectrum // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2015 (in print).