

Міністерство освіти України
Київський університет ім. Тараса Шевченка

На правах рукопису
УДК 523.9+533.951

Юхимук Вячеслав Адамович

Параметрична взаємодія хвиль
в космічній плазмі

01.03.02 - астрофізика
01.04.02 - теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико - математичних наук

Київ - 1995



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Київському університеті ім. Тараса Шевченка та в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук,
професор Коцаренко М. Я.

доктор фізико-математичних наук,
член кореспондент НАН України
Костик Р. І.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Степанов О. В.
доктор фізико-математичних наук,
професор Боев А. Г.

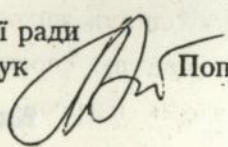
Провідна організація: Харківський університет
ім. О. Горького

Захист відбудеться 27 червня 1995 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої ради Д 01.01.26 по захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук при Київському університеті ім. Тараса Шевченка за адресою:

252, Київ-22, МСП, проспект Глушкова ,6, фізичний факультет Київського університету ім. Тараса Шевченка, ауд.500 .

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського університету ім. Тараса Шевченка. травня

Автореферат розісланий 26 червня 1995 року.

Вчений секретар спеціалізованої ради
доктор фізико-математичних наук  Поперенко Л. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми

Інтенсивний розвиток космічної фізики потребує значного розширення та поглиблення теоретичних досліджень в галузі космічної фізики плазми та їх використання при побудові плазмових моделей. Крім того, специфіка космічних експериментів не дозволяє проводити всебічне дослідження плазмових процесів в космосі, як це можна зробити в лабораторних умовах. Тому теоретичні дослідження в галузі космічної фізики плазми мають дуже важливе значення для пояснення природи фізичних явищ, які спостерігаються в космічному просторі.

Теоретичні дослідження хвильових процесів в космічній плазмі є одним з найбільш актуальних наукових напрямків у сучасній фізиці космосу. Це обумовлено тим що з ними пов'язані такі проблеми фізики космосу, як нагрівання плазми, прискорення космічних променів, радіовипромінювання, динаміка сонячного вітру, перенос енергії в системі Сонце - Земля та багато інших проблем. Особливо важливе значення мають хвильові процеси у розрідженій космічній плазмі, де частота зіткнення частинок дуже низька.

Незважаючи на безсумнівні успіхи, що були досягнуті при застосуванні лінійної теорії, останнім часом все частіше виникає необхідність виходити за межі лінійної теорії для пояснення явищ, що спостерігаються у космічному просторі. Останнім часом нагрівні експерименти в іоносфері Землі викликали новий інтерес до нелінійних явищ в космічній

плазмі. Одним з найважливіших результатів отриманих при нагріванні іоносфери електромагнітними хвилями є так звана вимушена електромагнітна емісія (ВЕЕ) [1]. Спектр цього випромінювання має дуже багато характерних особливостей і займає полосу частот в декілька десятків кілогерц навколо частоти ВЧ - випромінювача. Як правило, спектр, який спостерігався в роботі [1], не був симетричним, нижня його частина (в сторону менших частот) була більш виражена, ніж верхня (в сторону більших частот). В роботі [2] отримано нові дані спостережень, де було знайдено нову особливість у спектрі ВЕВ. Ця особливість була названа широкою симетричною структурою (ШСС). Вона являє собою два максимума, які розташовані симетрично відносно частоти накачки.

Дані спостережень, які були отримані за допомогою супутників, свідчать про те, що в магнітосфері Землі одночасно існують хвилі різних типів. Дуже цікаві дані були отримані останнім часом про випромінювання сонця і планет.

Вважається, що багато хвильових явищ, які спостерігаються в космічній плазмі, пов'язані з параметричною взаємодією хвиль. Особливо важливу роль відіграють параметричні процеси за участю альвенівських хвиль. Але більшість робіт стосовно параметричної взаємодії альвенівських хвиль було виконано за допомогою класичної МГД - теорії, яка не враховує теплових ефектів. Завдяки цьому участь альвенівських хвиль в параметричних процесах була дуже обмежена. З врахуванням кінетичних ефектів властивості альвенівських хвиль суттєво змінюються. З'являється залежність групової швидкості від поперечних масштабів хвиль і хвильова енергія може

переноситися як вздовж так і перпендикулярно до магнітного поля. Другою важливою властивістю є наявність у кінетичної альвенівської хвилі (КАХ) повздовжнього електричного поля. Тому кінетичні альвенівські хвилі більш ефективно ніж МГД - альвенівські хвилі взаємодіють як між собою, так і з іншими типами хвиль. З'являються нові канали розпаду хвиль за участю альвенівських хвиль. Таким чином, КАХ відіграють важливу роль в таких характерних для космічної плазми процесах як нагрівання плазми, прискорення та дифузія частинок плазми, трансформація та дисипація енергії хвиль.

Враховуючи, що параметрична взаємодія хвиль відіграє важливу роль в космічній плазмі і одночасно є недостатньо вивченою (особливо параметрична взаємодія за участю КАХ), дослідження в цій галузі вважаються актуальними і перспективними.

Мета роботи

Метою дисертаційної роботи є теоретичні дослідження параметричної взаємодії хвиль в космічній плазмі та пояснення природи плазмових явищ, що спостерігаються в космосі.

Наукова новизна роботи

Наукова новизна роботи полягає в тому, що при дослідженні параметричної взаємодії електромагнітних та електростатичних хвиль з альвенівськими хвилями для останніх враховувались кінетичні ефекти, завдяки цьому були знайдені нові канали розпаду електромагнітних та електростатичних хвиль і дано

пояснення фізичним явищам, що спостерігаються в космічній плазмі.

До основних результатів відносяться:

- нелінійний механізм генерації верхньогібридної хвилі за допомогою потужної електромагнітної хвилі накачки,
- параметрична взаємодія верхньогібридної хвилі з кінетичними альвенівськими хвилями та генерація вторинного електромагнітного випромінювання,
- каскадний механізм генерації вимушеної електромагнітної емісії в іоносферній плазмі під час нагрівних експериментів та в сонячній плазмі під час сонячних спалахів,
- параметричний механізм генерації довгохвильових магнітних пульсацій в магнітосферній плазмі,
- розпадна параметрична взаємодія мод вістлера з кінетичними альвенівськими хвилями та генерація нижньогібридних хвиль в космічній плазмі.

НАУКОВЕ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Отримані в роботі результати є подальшим розвитком теорії параметричної взаємодії хвиль в космічній плазмі. Вони дають суттєвий внесок до теорії маловивчених питань параметричної взаємодії альвенівських хвиль з врахуванням кінетичних ефектів. За допомогою нових теоретичних результатів вдається пояснити фізичні явища, що спостерігаються в іоносферній, магнітосферній та сонячній плазмах.

Особливо важливе значення мають отримані результати для пояснення природи тонкої структури вимушеної електромагнітної емісії в іоносфері під час проведення нагрівних експериментів, та тонкої структури радіовипромінювання Сонця під час сонячних спалахів.

Апробація роботи

Оновні наукові результати дисертаційної роботи доповідались на:

1. Міжнародному симпозиумі по вивченню сонячно - земних зв'язків (Ірландія, Кілларні, вересень 1992);

2. Міжнародному симпозиумі з програми STEP (США, Балтімор, серпень 1992);

3. Міжнародному семінарі по фізиці космічної плазми (Київ, червень 1993);

4. Міжнародній конференції "Когерентність та турбулентність" (Київ, серпень 1994);

5. Міжнародному семінарі, присвяченому пам'яті С. К. Всехсвятського (Київ, липень 1994);

6. XX Генеральній асамблеї Європейського Геофізичного Союзу (Німеччина, Гамбург, квітень 1995);

7. Науковій конференції "Сучасні фізико - математичні дослідження молодих вчених вузів України" (Київ, травень 1995);

8. Наукових семінарах кафедри загальної астрономії Київського університету ім. Тараса Шевченко та наукових семінарах відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Публікації

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в дев'яти роботах, список яких наведено у кінці автореферату.

Структура роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох глав, висновка та списку літератури із 85 найменувань. Загальний об'єм дисертаційної роботи становить 125 сторінок.

Основні положення представлені до захисту

1. Результати теоретичних досліджень параметричної взаємодії електромагнітних і кінетичних альвенівських хвиль в космічній плазмі.
2. Нелінійний механізм генерації електромагнітного випромінювання в космічній плазмі, (в земній іоносфері, магнітосфері та сонячній короні).
3. Результати досліджень тонкої структури вимушеної електромагнітної емісії в іоносферній плазмі під час нагрівних експериментів та тонкої структури сонячного радіовипромінювання під час сонячних спалахів.
4. Теорія параметричної взаємодії верхньогібридних хвиль з кінетичними альвенівськими хвилями.
5. Параметричний механізм генерації довгохвильових магнітних пульсацій в магнітосферній плазмі.

6. Результати теоретичних досліджень параметричної трьоххвальної взаємодії: розпаду моди вістлера на кінетичну альвенівську хвилю та нижньогібридну хвилю.

Зміст роботи

У вступі обгрунтовано актуальність роботи, сформульована мета роботи, викладені наукова новизна роботи та положення представлені до захисту. Описана структура роботи.

Перший розділ роботи присвячений теоретичним дослідженням параметричної взаємодії електромагнітних і кінетичних альвенівських хвиль (йонно - звукових хвиль) та механізмам генерації верхньогібридних хвиль.

В розділі 1.2 за допомогою двохрідинної МГД - теорії отримано дисперсійне рівняння для альвенівських хвиль з врахуванням теплових ефектів та пондеромоторної сили, що виникає завдяки взаємодії хвилі накачки з верхньогібридною хвилею.

В розділі 1.3 отримано дисперсійне рівняння для верхньогібридних хвиль (ВГХ). При цьому було враховано як нелінійність пов'язану з взаємодією хвилі накачки з КАХ, так і "концентраційну нелінійність" пов'язану з КАХ, яка виявилася одного порядку з пондеромоторною нелінійністю.

В розділі 1.4 знайдено нелінійне дисперсійне рівняння, що описує взаємодію трьох хвиль. Виявилось що ефективний зв'язок між трьома хвилями виникає завдяки повздовжній компоненті електричного поля кінетичних альвенівських хвиль. Розглянуто два випадки. В першому випадку електромагнітна хвиля накачки розпадається на ВГХ і КАХ, а в другому - на

ВГХ і йонно - звукову хвилю (ЙЗХ). Знайдено інкременти та час розвігку параметричних нестійкостей.

В розділі 1.5 вивчено посилення КАХ потоком плазми. Показано, що в плазмі яка рухається з альвенівською швидкістю має місце посилення КАХ за рахунок кінетичної енергії потоку плазми. Таким чином, в тих областях міжпланетного простору, де швидкість сонячного вітру дорівнює альвенівській швидкості, має місце посилення КАХ.

У другому розділі розглянуті механізми створення тонкої структури ВЕЕ під час нагрівних експериментів, та тонкої структури сонячного радіовипромінювання під час сонячних спалахів. З метою пояснення тонкої структури спектру ВЕЕ було розглянуто двохкаскадний процес. На першому етапі потужня електромагнітна хвиля накачки, створена наземним ВЧ - випромінювачем, внаслідок взаємодії з КАХ, генерує в іоносфері ВГХ. На другою етапі, утворена внаслідок такого параметричного процесу ВГХ, також взаємодіє з КАХ і при цьому має місце генерація вимушеної електромагнітної емісії.

Перший етап каскадного процесу був розглянутий у першому розділі. В розділі 2 розглянуто другий етап каскадного процесу. В розділі 2.2 отримано дисперсійне рівняння для КАХ з врахуванням низькочастотної нелінійної сили, що виникає внаслідок взаємодії електричних полів ВГХ та електромагнітної хвилі. В розділі 2.3 отримано нелінійне дисперсійне рівняння для розсіяної

електромагнітної хвилі. Нелінійність обумовлена нелінійним током, який виникає внаслідок взаємодії між ВГХ і КАХ.

Із знайдених двох рівнянь отримано нелінійне дисперсійне рівняння, яке описує трьоххвильову взаємодію ВГХ, КАХ та ЕМХ. Знайдено його рішення. Отримані результати використано для пояснення фізичних явищ, які спостерігаються в іоносферній, магнітосферній та сонячній плазмах. Проведений аналіз показав, що розглянуті в роботі каскадні параметричні процеси можуть мати місце в іоносферній плазмі під час нагрівних експериментів, та в сонячній короні під час радіовсплесків. Крім цього, розглянута в третьому розділі параметрична нестійкість може бути механізмом генерації низькочастотного електромагнітного випромінювання, яке спостерігалось під час польоту супутників [3].

В третьому розділі роботи запропоновано нелінійний механізм генерації довгоперіодичних геомагнітних пульсацій в магнітосфері Землі.

Як відомо, довгоперіодичні геомагнітні пульсації являють собою альвенівські хвилі. Дані спостережень, які були отримані за допомогою геостационарних супутників, показують, що періодичними пульсаціями можуть бути кінетичні альвенівські хвилі [4]. В запропонованому нами механізмі генерація кінетичних альвенівських хвиль обумовлена нелінійною взаємодією верхньогібридної хвилі накачки з розсіяною верхньогібридною хвилею та переходом хвильової енергії від верхньогібридної хвилі

накачки до КАХ. Отримано нелінійне дисперсійне рівняння для КАХ, в якому нелінійні члени обумовлені взаємодією електричних полів верхньогібридних хвиль. Поява кінетичної альвенівської хвилі призведе, в свою чергу, до модуляції верхньогібридної хвилі накачки та посилення розсіяної верхньогібридної хвилі. Цей нелінійний процес описано дисперсійним рівнянням для розсіяної верхньогібридної хвилі. З комбінації двох рівнянь знайдено нелінійне дисперсійне рівняння, яке описує трюххвильову взаємодію ВГХ, КАХ та розсіяної ВГХ. Розрахунки показують, що розглянута в цьому розділі параметрична нестійкість може бути ефективним механізмом генерації довгоперіодичних геомагнітних пульсацій в магнітосфері Землі. Такий висновок підтверджують дані спостережень, які було отримано на геостационарних супутниках [4].

Четвертий розділ роботи присвячений вивченню параметричної взаємодії однієї з найбільш розповсюджених хвиль в космічній плазмі - вістлерів. Вістлери - електромагнітні хвилі, які існують в замагніченій плазмі в області низьких частот (їх частота значно менше електронної гірочастоти).

Одночасно з вістлерами в магнітосфері Землі існують і нижньогібридні хвилі, які спостерігались під час польоту супутників "Алуєт1,2" [5,6], "Інжун 3" [7], а також ОГО 2,4,5,6. Ці дані показують, що існує тісний зв'язок між вістлерами та нижньогібридними хвилями. В зв'язку з цим нами розглянуто параметричну взаємодію між вістлерами,

нижньогібридними хвилями та кінетичними альвенівськими хвилями. Отримано дисперсійне рівняння для нижньогібридної гілки коливань з врахуванням нелінійної взаємодії між вістлерами та кінетичними альвенівськими хвилями. Дисперсійне рівняння для нижньогібридної хвилі було отримано з врахуванням пондеромоторної сили, яка виникає при взаємодії електричних полів вістлеровської моди та кінетичної альвенівської хвилі.

Далі із комбінації двох рівнянь знайдено нелінійне дисперсійне рівняння, яке описує трьоххвильову взаємодію нижньогібридної хвилі, КАХ і моди вістлера. Тут слід зауважити, що коефіцієнт зв'язку в цьому рівнянні пропорційний кінетичній добавці в законі дисперсії для КАХ. Таким чином, параметрична взаємодія трьох хвиль можлива лише завдяки тому, що було враховано теплові ефекти для альвенівських хвиль.

Знайдено рішення нелінійного дисперсійного рівняння та зроблено його аналіз для різних значень плазмового параметра, який визначається відношенням газокінетичного тиску до тиску магнітного поля. Отримані інкременти розвитку нестійкості та порогові значення амплітуди поля вістлеровської хвилі. Теоретичні результати використовуються для пояснення природи нижньогібридних хвиль, які спостерігались під час польоту супутників [5-7]. Показано, що розглянута нами параметрична нестійкість може бути тригерним механізмом НГР-випромінювання в магнітосфері Землі, яке спостерігалось в широкому інтервалі

висот аж до декількох радіусів Землі на супутнику ОГО 5 [8].

Відомо, що в авроральній області магнітосфери спостерігається одночасно збудження як вістлеровської хвилі так і геомагнітних пульсацій Pc5. Цей факт дозволяє зробити висновок, що ці явища пов'язані між собою: збудження електромагнітних хвиль типу вістлерів призводить до генерації кінетичних альвенівських хвиль в діапазоні пульсацій Pc5. Результати нашої роботи показують, що параметрична взаємодія хвиль відіграє важливу роль для встановлення зв'язків між геомагнітними пульсаціями та НЧ-випромінюванням.

У заключенні роботи наводяться її основні результати.

Основні результати та висновки :

1. Проведено дослідження впливу кінетичних ефектів в альвенівських хвилях на їх параметричну взаємодію з різними типами електромагнітних та електростатичних хвиль. Внаслідок врахування скінченності ларморовського радіуса протонів були знайдені нові канали розпаду електромагнітних та електростатичних хвиль, які не можливі за участю класичних МГД - альвенівських хвиль.

2. Запропановано каскадний механізм формування тонкої структури вимушеного електромагнітного випромінювання в

іоносфері під час проведення нагрівних експериментів, оснований на параметричній взаємодії хвиль. Аналіз тонкої структури сонячних радіовсплесків показує, що аналогічні каскадні параметричні процеси можуть мати місце і в сонячній короні.

3. Запропановано нелінійний механізм генерації довгоперіодичних геомагнітних пульсацій, оснований на нелінійній трансформації верхньогібридних хвиль в кінетичні альвенівські хвилі.

4. Побудовано теорію параметричної розпадної взаємодії вістлерів з кінетичними альвенівськими хвилями. Аналіз даних наземних та супутникових спостережень показує, що після збудження вістлерів в магнітосфері з'являються альвенівські хвилі в діапазоні пульсацій Pc 5, що підтверджується побудованою нами теорією.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах

1. A. K. Yukhimuk, N. Ya. Kotsarenko, V. A. Yukhimuk. Nonlinear interaction of Alfvén waves in Solar Atmosphere, Proceedings of 26th ESLAB Symposium, Study of the Solar-Terrestrial System., Killarney, Ireland 16-19 June 1992, p. 337-341.

2. N. Ya. Kotsarenko, V. A. Yukhimuk, A. K. Yukhimuk. The transformation of the energy of the solar radio bursts in the corona and solar wind., 1992 STEP Symposium 5th COSPAR Colloquium.

3. Коцаренко Н. Я., Юхимук А. К., Юхимук В. А. Нелинейное взаимодействие электромагнитных волн с альвеновскими волнами в солнечной атмосфере., Кинематика и физика небесных тел.,-1993.,- т. 9.,-с. 46-53.

4. N. Ya. Kotsarenko, V. A. Yukhimuk, A. K. Yukhimuk. Nonlinear interaction between waves in space plasma., Proceedings of International seminar " Space plasma physics " June 6 - 10, 1993, Kiev, Ukraine, p. 235 -244.

5. Юхимук В. А. Параметрическая генерация верхне-гибридных и йонно-звуковых волн в космической плазме., Кинематика и физика небесных тел.,-1994.,- т.6., -с. 67-73.

6. Юхимук В. А., Юхимук А. К., Кучеренко В. П. Нелинейный механизм генерации альвеновских волн в замагниченой плазме., Кинематика и физика небесных тел.,-1995.,-т. 11, №3.

7. V. A. Yukhimuk. Parametric excitation of upper-hybrid wave and ion-acoustic waves in the Earth ionosphere. Annales Geophysical., 1995, Part 3, Supplement 3 to Volume 13, p. c698.

8. V. A. Yukhimuk, A. K. Yukhimuk, V. P. Kucherenko. Parametric decay instabilities of upper-hybrid wave in the Earth magnetosphere. Annales Geophysical., 1995, Part 3, Supplement 3 to Volume 13, p. c698.

Література

1. Stubbe P., Kopka H., Thide B., Derblom H. Stimulated electromagnetic emissions: a new technique to study the Parametric decay instability in the ionosphere, J.Geophys. Res.,89,7523,1984.
2. Stubbe P., Kopka H. Stimulated electromagnetic emission in magnetized plasma: A new symmetric spectral feature, Phys. Rev. Lett., 65,183,1990.
3. Kurth W. S. et. al. A comparison of intense electrostatic waves near FUHR with linear instability theory. Geophysics Research Lett.,6, 487, 1979.
4. Hughes W.J., Southwood D.J. The screening of micropulsation signals by the atmosphere and ionosphere., J.Geophys. Res., 81, 3234,1976.
5. Barrington R. F., Berlose J. S. Preliminary results from the very low - frequency receiver on board Canada's Alouette satellite. Nature, 198, 651, 1963.
6. Brice N. M., Smith R. L. Triggered very low - frequency emissions. Nature, 203, 927, 1964.
7. Gurrent D. A. A satellite study of VLF hiss. J. Geophysics Research, 71, 5599, 1966.

Юхимук В. А.

Параметрическое взаимодействие волн в космической плазме.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям: 01.03.02 - астрофизика и 01.04.02 - теоретическая физика, Киевский университет им. Тараса Шевченко, Киев, 1995.

Защищаются 8 научных работ, которые содержат результаты теоретических исследований параметрического взаимодействия волн в космической плазме.

Проведено исследование влияния кинетических эффектов в альвеновских волнах на их параметрическое взаимодействие с различными типами волн. Найденны новые каналы распада волн. Предложены нелинейные механизмы генерации электромагнитных волн в космической плазме.

Yukhimuk V. A.

Parametric wave interaction in space plasma.

Dissertation for Candidate Degree of Phys. and Math. Sciences on Specialities: 01.03.02 - astrophysics and 01.04.02 - theoretical physics, Kiev Taras Shevchenko University, Kiev, 1995.

The author defends 8 scientific works, which contain the results of the research of parametric wave interaction in space plasma.

The research on kinetic effects for Alfvén waves influence to the processes of parametric wave interaction was carried out. Some new ways of wave decay were found. The author suggests the nonlinear mechanisms of electromagnetic waves generation in space plasma.

Ключові слова: космічна плазма, хвилі, нестійкості.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

В. Юхимук

Підп. до друку 25.05.95 формат 60x84/16. Папір офс.
друк. офс. Умов. друк. л. 11. Умов. фарб.-відб. 1,12.
Обл.-вид.л. 082. Тираж 70 прим. Зам. 526.

Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.

дільниця Оперативної поліграфії
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, доч, вул.Кржижанівського,3.

118745

AB 32.45

AB 32.453