

О. К. Черемних, А. К. Федоренко, Є. І. Крючков, С. О. Черемних, А. В. Беспалова

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

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В МАГНІТОСФЕРНО-ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ

*Представлено основні результати експериментальних та теоретичних досліджень резонансних явищ в магнітосферно-іоносферній плазмі. А саме: розроблено теоретичні моделі резонансних хвильових УНЧ-явищ в магнітосфері; на основі супутникових вимірювань досліджено глобальні коливання нейтральної верхньої атмосфери та іоносфери; за супутниковими даними виявлено ефекти магнітосферно-іоносферної взаємодії.*

**Ключові слова:** іоносфера, магнітосфера, резонансні явища, хвильові процеси.

### ВСТУП

Робота спрямована на дослідження резонансних механізмів магнітосферно-іоносферної взаємодії за допомогою ультранизькочастотних (УНЧ) хвиль, в тому числі на вивчення джерел, механізмів генерації та просторово-часової структури збурень в магнітосферно-іоносферній плазмі. Актуальність цих досліджень пов'язана з їхнім фундаментальним науковим значенням і підготовкою міжнародних супутникових експериментів «Іоносат» та «Резонанс».

Впродовж десятків років магнітосфера та іоносфера досліджувалися як окремі підсистеми навколоземного космічного простору. Теоретичні дослідження останніх років, а також численні дані супутникових вимірювань показали, що фізику цих підсистем неможливо остаточно зрозуміти без врахування взаємодії в глобальній системі Сонце — сонячний вітер — магнітосфера — іоносфера. Ключовими механізмами, що забезпечують взаємодію окремих ланок цієї системи, є резонансні хвильові процеси УНЧ-

діапазону — найбільш масштабні за часовими, просторовими і енергетичними характеристиками процеси в навколоземній космічній плазмі.

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В МАГНІТОСФЕРІ

Магнітосфера Землі є гігантським природним резонатором для магнітогідродинамічних (МГД) коливань, які можна розглядати як комбінацію дрібніших МГД-резонаторів і хвилеводів різних типів. Коливання в цих резонаторах реєструються як на поверхні Землі, так і в навколоземному космічному просторі у вигляді ультранизькочастотних хвиль з періодами від декількох секунд до десятків хвилин [10]. УНЧ-коливання визначають загальну стійкість космічної плазми і контролюють колективні процеси в ній.

Серед низькочастотних МГД-коливань найбільш часто спостерігаються хвилі, що являють собою коливання силових ліній магнітного поля. Вивчення структури азимутально-дрібномасштабних УНЧ-хвиль досі здійснювалося в рамках магнітної гідродинаміки. Було встановлено, що різні гілки МГД-коливань є зчепленими одна з одною [8, 11]. Для азимутально-великомасштаб-

них коливань важливу роль відіграє зчеплення альвенівських хвиль з швидким магнітним звуком, для азимутально-дрібномасштабних коливань в плазмі скінченного тиску — зчеплення альвенівської і повільної магнітозвукових гілок, викликане кривиною магнітних силових ліній. Було показано, що за певних умов в плазмі скінченного тиску може розвинутиися балонна нестійкість, яка зазвичай вважається тригером магнітосферних суббур [9, 12].

За напрямком теоретичне моделювання резонансних явищ в магнітосфері Землі розглянуто задачу про поширення азимутально-дрібномасштабних УНЧ-мод в одновимірній-неоднорідній плазмі зі змінною кривиною силових ліній магнітного поля [6]. Розглянуто циліндричну модель плазмового середовища, в якому силові лінії магнітного поля вважаються концентричними колами, а всі рівноважні параметри змінюються тільки впоперек магнітних оболонок (рис. 1). Незважаючи на відносну простоту цієї моделі, вона якісно враховує такі базові риси магнітосфери, як кривину силових ліній і радіальну неоднорідність плазми і магнітного поля. Визначено області поширення та поперечну структуру стійких альвенівських і каспових мод, а також нестійких балонних мод. Для прикладу на рис. 2 наведено залежність квадрата радіальної складової хвильового вектора від квадрата частоти для УНЧ-збурень, яка визначає область поширення альвенівських і каспових хвиль. Тут  $\omega_A$  — альвенівська частота,  $\omega_r$  — каспова частота,  $\omega_{\pm}$  — частоти відсічки [2]. Ці частоти виражаються через рівноважні параметри плазми і магнітного поля, залежать від радіальної координати і мають конкретний фізичний зміст. Області  $\omega^2 < 0$  і  $k_r^2 > 0$  описують нестійкі балонні моди. Поблизу альвенівської і каспової частот реалізуються резонанси. Можливість довгоживучих балонних і каспових мод впливає з рис. 2. Отримані результати якісно описують поведінку УНЧ-мод з неперервним спектром у магнітосфері Землі і можуть бути використані для інтерпретації даних вимірювань з космічних апаратів [7] та мережі радарів SuperDARN.

Отримані результати узагальнено для розгляду генерації резонансних УНЧ-мод в магнітосфері

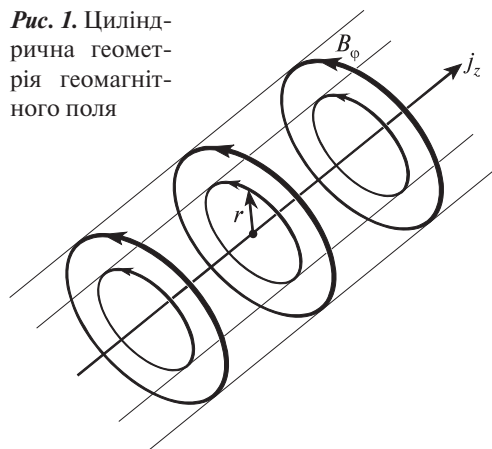


Рис. 1. Циліндрична геометрія геомагнітного поля

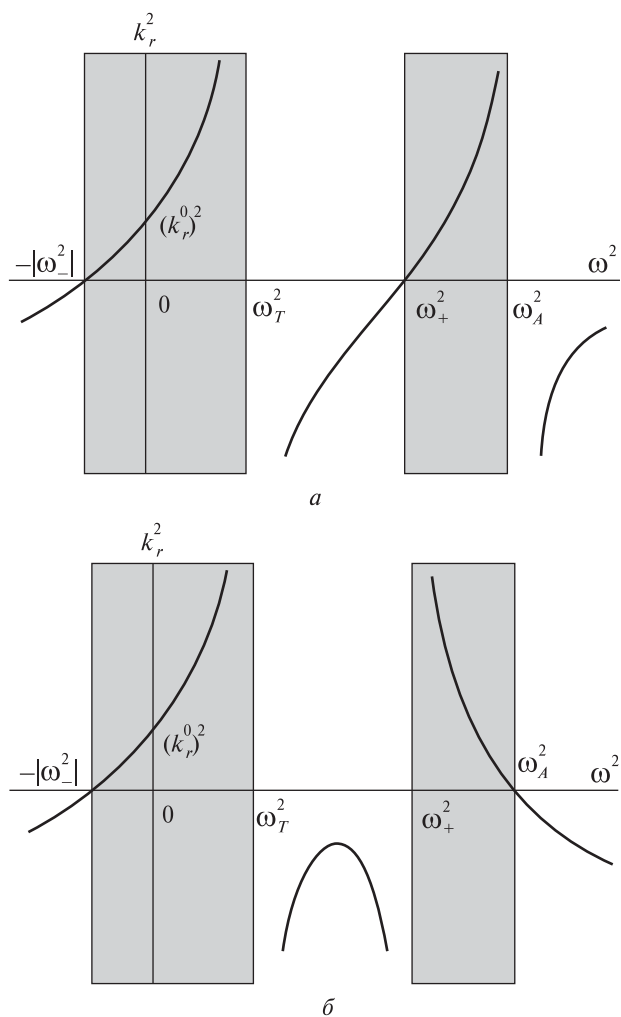


Рис. 2. Залежність квадрата радіальної складової хвильового вектора від квадрата частоти. Заштриховано області поширення хвиль

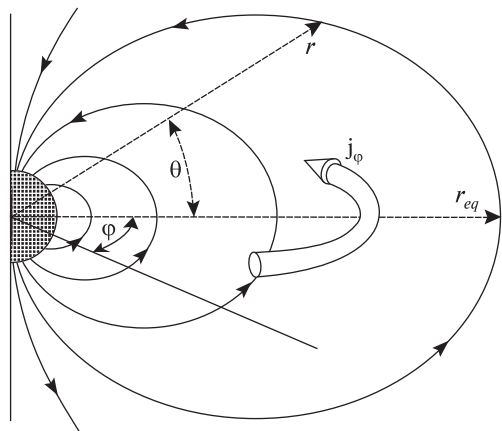


Рис. 3. Дипольна геометрія геомагнітного поля

Землі в дипольному магнітному полі (рис. 3) у локальному наближенні. Це поле точніше описує геомагнітне поле до 6-7 радіусів Землі і не залежить від тороїдального кута. З врахуванням цих обставин отримано та проаналізовано дисперсійне рівняння для неоднорідної тривимірної плазми з магнітними поверхнями, яке виявилось подібним до дисперсійного рівняння для циліндричного випадку. Окремо розглянуто стійкий та нестійкий режими генерації збурень, а також умови реалізації резонансів.

Теоретично досліджено дискретні власні альвенівські моди у магнітосфері Землі. Саме ці

моди, зазвичай, спостерігаються на космічних апаратах на відстані 3-4 радіусів Землі. Для знаходження спектру вказаних мод вихідну систему рівнянь було зведено до рівняння Шредінгера з потенціальною ямою типу Пешеля — Теллера. Дискретні моди цієї ями відповідають спектру дискретних альвенівських мод. Отримано, що умова існування цих мод визначається кривиною силових ліній магнітного поля і градієнтом тиску плазми. Такі моди можуть ефективно «розгойдуватися» високоенергетичними частинками у магнітосфері Землі.

### СУПУТНИКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ УНЧ-ПРОЦЕСІВ В ІОНОСФЕРІ

За даними вимірювань на супутнику «Dynamic Explorer 2» над полярними областями було виявлено глобальні коливання нейтральної верхньої атмосфери та іоносфери Землі в УНЧ-діапазоні [3, 13]. Встановлено, що за фізичною природою ці збурення являють собою акустико-гравітаційні хвилі (АГХ), які характеризуються рядом специфічних властивостей [1, 4]: 1) в інтервалі висот 250—400 км хвилі спостерігаються систематично над полярними шапками в обох півкулях; 2) періоди АГХ близькі до періоду Брента — Вьяллі на висотах спостережень (10—11 хв); 3) пе-

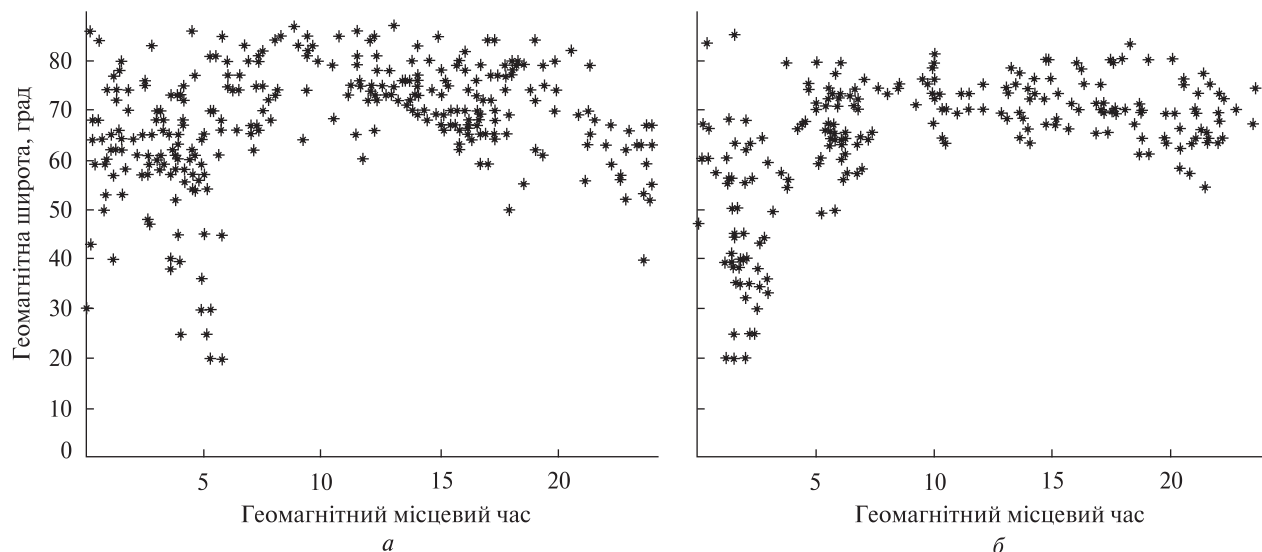
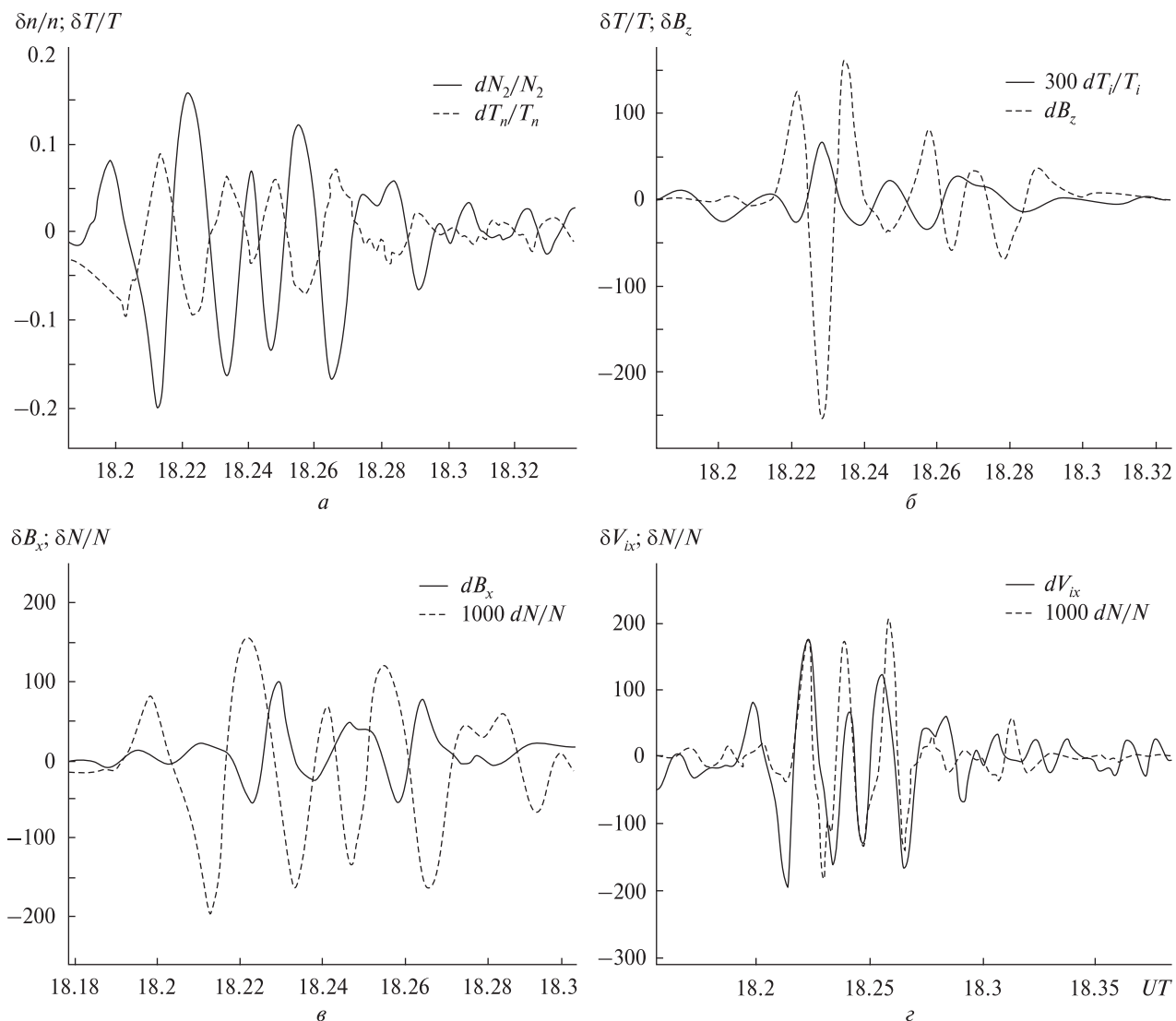


Рис. 4. Локалізація полярних хвильових збурень за даними вимірювань супутника «Dynamic Explorer 2»: а — північна півкуля, б — південна півкуля



**Рис. 5.** Хвильові УНЧ-збурення у північній полярній області на витку 329 супутника «Dynamic Explorer 2»: *a* — відносні варіації концентрації нейтральних молекул  $\delta n(N_2)/n(N_2)$  і температури  $\delta T_n/T_n$  (протифазний характер коливань є характерним для АГХ); *б* — відносні варіації температури іонів  $300 \cdot \delta T_i/T_i$  і зональна складова магнітного поля  $\delta B_z$  (нТл); *в*, *г* — відносні варіації концентрації нейтральних частинок  $1000 \cdot \delta N/N$ , меридіональна складова магнітного поля  $\delta B_x$  (нТл), меридіональна складова швидкості іонів  $\delta V_{ix}$  (м/с)

реважають горизонтальні масштаби хвиль 500—600 км; 4) амплітуди АГХ над полярними шапками на порядок перевищують амплітуди хвиль цього типу в середніх широтах. Великі амплітуди полярних АГХ та вузький спектральний діапазон просторових і часових масштабів, скоріше за все, вказують на резонансний механізм їхньої генерації [5].

На основі статистичного аналізу супутникових даних встановлено глобальні закономірності розподілу та напрямки поширення АГХ на іоносферних висотах і проведено порівняльний аналіз цих збурень в полярних областях обох півкуль (рис. 4). Просторова локалізація цугів полярних АГХ демонструє виражений зв'язок з авроральним овалом — просторовою областю,

де відбувається основна магнітосферно-іоносферна взаємодія. На нашу думку, саме ці полярні глобальні коливання полярної термосфери на частоті Брента—Вайсяля є важливими агентами магнітосферно-іоносферного зв'язку.

Виявлено безпосередні експериментальні свідчення такого зв'язку на іоносферному рівні у вигляді збігу масштабів полярних АГХ- та УНЧ-коливань магнітосферного походження. Приклад таких узгоджених хвильових збурень показано на рис. 5. Як видно, коливання МГД-типу відбуваються в тому ж діапазоні, що і коливання нейтральної атмосфери. Це наводить на думку, що спостережувані хвилі є «зчепленими» та пов'язані спільним механізмом генерації. Ця проблема потребує подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

## ВИСНОВКИ

Досліджено розповсюдження УНЧ-хвиль з неперервним спектром у магнітосферній плазмі. Встановлено умови поширення цих хвиль через фізичні параметри магнітного поля і плазми. Визначено умови генерації резонансних збурень, а також нестійких балонних збурень і довживучих каспових мод.

Аналіз даних супутникових спостережень полярних АГХ на іоносферних висотах вказує на їхню важливу роль в енергообміні між магнітосферою та верхньою атмосферою. Отримано експериментальні свідчення зв'язку альвенівських магнітосферних хвиль та АГХ в полярній іоносфері. На сьогодні механізм цього зв'язку потребує уточнення.

Надалі передбачається дослідити особливості збудження магнітосферних МГД-коливань різного походження за наявності резонаторів і хвилеводів, локалізованих в окремих областях магнітосфери та іоносфери в рамках різних моделей. Ці дослідження можуть дати істотний внесок в розвиток теорії магнітосферно-іоносферної взаємодії та фізики навколоземного космосу в цілому. Подальше продовження робіт в цьому напрямку є важливим для уточнення наукових програм та режимів вимірювань в космічних експериментах «Іоносат» та «Резонанс», які в 2015 році виходять на стадію запуску.

1. Беспалова А. В., Федоренко А. К. Супутникові дослідження іоносферних проявів поширення акустико-гравітаційних хвиль // *Радиофизика и радиоастрономия* — 2014. — **19**, № 3 — С. 206—216.
2. Загородний А. Г., Черемних О. К. Введение в физику плазмы. — Киев: Наук. думка, 2014. — 697 с.
3. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение среднемасштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // *Геомагнетизм и аэронаомия*. — 2011. — **51**, № 1. — С. 527—539.
4. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Наблюдаемые особенности акустико-гравитационных волн в гетеросфере // *Геомагнетизм и аэронаомия* — 2014. — **54**, № 1. — С. 116—123.
5. Черемних О. К. Резонансная мода в термосфере Земли // *Космічна наука і технологія*. — 2011. — **17**, № 6. — С. 74—76.
6. Черемних О. К., Климушкин Д. Ю., Костарев Д. В. О структуре азимутально-мелкомасштабных УНЧ-колебаний горячей космической плазмы в кривом магнитном поле. Моды с непрерывным спектром // *Кинематика и физика небес. тел.* — 2014. — **30**, № 5. — С. 3—21.
7. Черемних О. К., Ямпольский Ю. М., Агапитов А. В. и др. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте «Резонанс» // *Космічна наука і технологія*. — 2013. — **19**, № 2. — С. 5—42.
8. Agapitov O. V., Cheremnykh O. K. Natural oscillations of the Earth magnetosphere associated with solar wind sudden impulses // *Ukr. Phys. J.* — 2008. — **53**. — P. 506—510.
9. Burdo O. S., Cheremnykh O. K., Verkhoglyadova O. P. Study of ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth // *Izv. Akad. Nauk. Fiz.* — 2000. — **6**, N 9. — P. 1986—1900.
10. Cheng C. Z., Chang T. C., Lin C. A., Tsoi W. N. Magneto-hydrodynamic theory of field line resonances in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* — 1993. — **98A**, N 7. — P. 11339—11347.
11. Cheremnykh O. K. Transversally small-scale perturbations in arbitrary plasma configurations with magnetic surfaces // *Plasma Phys. and Contr. Fusion*. — 2010. — **52**, N 9. — 095006.
12. Cheremnykh O. K., Parnovski A. S. Flute and ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth: stability and influence of the ionospheric conductivity // *Space Science: New Research / Ed. N. S. Maravell*. — New York: Nova Sci. Publ., 2006 — P. 97—139.
13. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. Gravity waves near 300 km over the polar caps // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 23993—24002.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2014

*О. К. Черемных, А. К. Федоренко,  
Е. И. Крючков, С. О. Черемных, А. В. Беспалова*

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Представлены основные результаты экспериментальных и теоретических исследований резонансных явлений в магнитосферно-ионосферной плазме. А именно: разработаны теоретические модели резонансных УНЧ волновых явлений в магнитосфере; на основе спутниковых измерений исследованы глобальные колебания нейтральной верхней атмосферы и ионосферы; по спутниковым данным выявлены эффекты магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

**Ключевые слова:** ионосфера, магнитосфера, резонансные явления, волновые процессы.

*O. K. Cheremnykh, A. K. Fedorenko,  
E. I. Kryuchkov, S. O. Cheremnykh, A. V. Bespalova*

Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

#### EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF RESONANCE PHENOMENA IN THE MAGNETOSPHERIC-IONOSPHERIC PLASMA

The main results of experimental and theoretical studies of resonance phenomenon in the magnetospheric-ionospheric plasma are presented. Among them, a theoretical model of resonance ULF wave phenomena in the magnetosphere is developed; the global oscillations of the neutral upper atmosphere and ionosphere is investigated basing on satellite measurements; the effects of the magnetosphere-ionosphere interaction is detected from the satellite data.

**Key words:** ionosphere, magnetosphere, resonance phenomena, wave processes.