

## РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 550.388, 551.520.32

А. В. БЕСПАЛОВА, А. К. ФЕДОРЕНКО

Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,  
пр. Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1, м. Київ, 03680, Україна  
E-mail: aurora28@i.ua, bez.anna@mail.ru

### СУПУТНИКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІОНОСФЕРНИХ ПРОЯВІВ ПОШИРЕННЯ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

*Досліджено відгук іоносферної плазми на поширення акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) за даними вимірювань на супутнику Dynamics Explorer 2. Хвильові збурення проаналізовано в інтервалі атмосферних висот 250 ÷ 350 км за даними одночасних вимірів температур, концентрацій і швидкостей нейтральних частинок та іонів у високих і середніх широтах. Встановлено наступні особливості іоносферних проявів АГХ: 1) відносні варіації температур іонів та нейтральних частинок на цих широтах, за винятком областей авроральних овалів, приблизно співпадають; 2) варіації загальної концентрації плазми протифазні до варіацій концентрації нейтральних частинок, а їх відносна амплітуда в середньому в кілька разів перевищує амплітуду варіацій концентрації нейтральних частинок; 3) концентрація молекулярних іонів змінюється у фазі з концентрацією нейтральних частинок; 4) вертикальна швидкість іонів у високих широтах узгоджується з вертикальною швидкістю нейтральних частинок, відображаючи їх спільні рухи вздовж силових ліній магнітного поля. Для відокремлення іоносферних проявів АГХ від інших типів збурень у високих широтах слід виконати синхронний аналіз різних параметрів іоносферної плазми.*

*Ключові слова:* акустико-гравітаційні хвилі, рухомі іоносферні збурення, авроральний овал, іоносфера, атмосфера

#### 1. Вступ

Поширення акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) на іоносферних висотах проявляється у вигляді рухомих іоносферних збурень (РІЗ). Основна експериментальна інформація щодо характеристик хвильових збурень верхньої атмосфери традиційно отримується власне на основі спостережень РІЗ за допомогою наземних вимірювальних засобів [1]. У різних географічних областях іоносферний відгук на поширення АГХ має свої особливості. Відгук на поширення АГХ у F2-області іоносфери низьких широт було докладно досліджено в роботі [2] за даними спостережень екваторіального супутника Atmosphere Explorer-E. Найбільш складною і водночас найменше вивченою є реакція на поширення АГХ у високоширотній іоносфері, де через вплив електричних полів і висипань заряджених частинок не завжди можна відокремити прояви АГХ від інших типів іоносферних збурень. Особливості поширення АГХ у полярних областях у параметрах нейтральної атмосфери розглядалися в роботі [3]. При цьому синхронні дослід-

ження варіацій параметрів нейтральних частинок та іонів під час поширення АГХ у високих широтах наразі не виконувалися.

Метою цієї роботи є визначення особливостей відгуку іоносферної плазми на поширення АГХ у високих і середніх широтах за даними вимірювань на супутнику Dynamics Explorer 2 (DE2). Висота орбіти супутника становила 250 ÷ 1000 км, нахил орбіти – 89.9°, період обертання – 98 хв. Концентрації нейтральних складових вимірювалися на DE2 за допомогою мас-спектрометра в експерименті NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer), температура і швидкість нейтральних частинок – в експерименті WATS (Wind and Temperature Spectrometer), концентрація і температура іонів – в експерименті RPA (Retarding Potential Analyzer) [4, 5].

Вимірювання з борту супутника параметрів нейтрального середовища та іоносферної плазми дозволяють безпосередньо досліджувати зв'язок АГХ та РІЗ у різних географічних областях і залежно від геофізичних умов. Значної уваги у роботі приділено дослідженню високоширотних областей, де часто виникає проблема відокремлен-

ня ефектів РІЗ від інших типів збурень у полярній іоносферній плазмі. Подібні дослідження є важливими у інтерпретації наземних спостережень іоносферних хвильових збурень.

## 2. Аналіз супутникових спостережень

У дослідженні зв'язку АГХ та РІЗ використовувалась наступна послідовність аналізу супутникових даних:

1) пошук хвильових збурень на окремих витках у різних параметрах нейтральної атмосфери, виключення тренду та відокремлення хвильових варіацій;

2) ідентифікація АГХ на основі порівняння синхронних варіацій температур, концентрацій різних газів та швидкості частинок з теоретичними уявленнями;

3) синхронний аналіз вимірювань параметрів плазми на цих самих витках;

4) виділення ділянок з узгодженим характером варіацій температури, концентрації, поздовжньої (уздовж геомагнітного поля  $B_0$ ) компоненти швидкості іонів і нейтральних частинок.

З виконанням указаних умов спостережувані в іоносферній плазмі збурення інтерпретувалися як іоносферні прояви АГХ, тобто РІЗ.

### 2.1. Температура нейтральних частинок та іонів

У середніх широтах температури нейтральних частинок  $T_n$  та іонів  $T_i$  є близькими внаслідок ефективного обміну енергією під час зіткнень цих частинок. У полярних областях, де відбувається інтенсивний приток енергії, найперш у плазмову компоненту (за рахунок висипань заряджених частинок, розігріву іонів у полях тощо), спостерігається систематичне перевищення  $T_i$  над  $T_n$  на кілька сотень кельвінів. На рис. 1, а, б показано розподіл температури нейтральних частинок та іонів уздовж двох витків супутника DE2 для нічного сектора південної півкулі. На розглянутих ділянках географічна широта змінювалась приблизно від  $88^\circ$  до  $45^\circ$  на витку 8123 і від  $90^\circ$  до  $10^\circ$  на витку 8092. Висота супутника при цьому змінювалась в інтервалі  $250 \div 320$  км. На обох витках полярні області чітко виділяються систематично підвищеною температурою іонів, на широтах менше  $70^\circ$  температури іонів і нейтралів відрізняються мало.

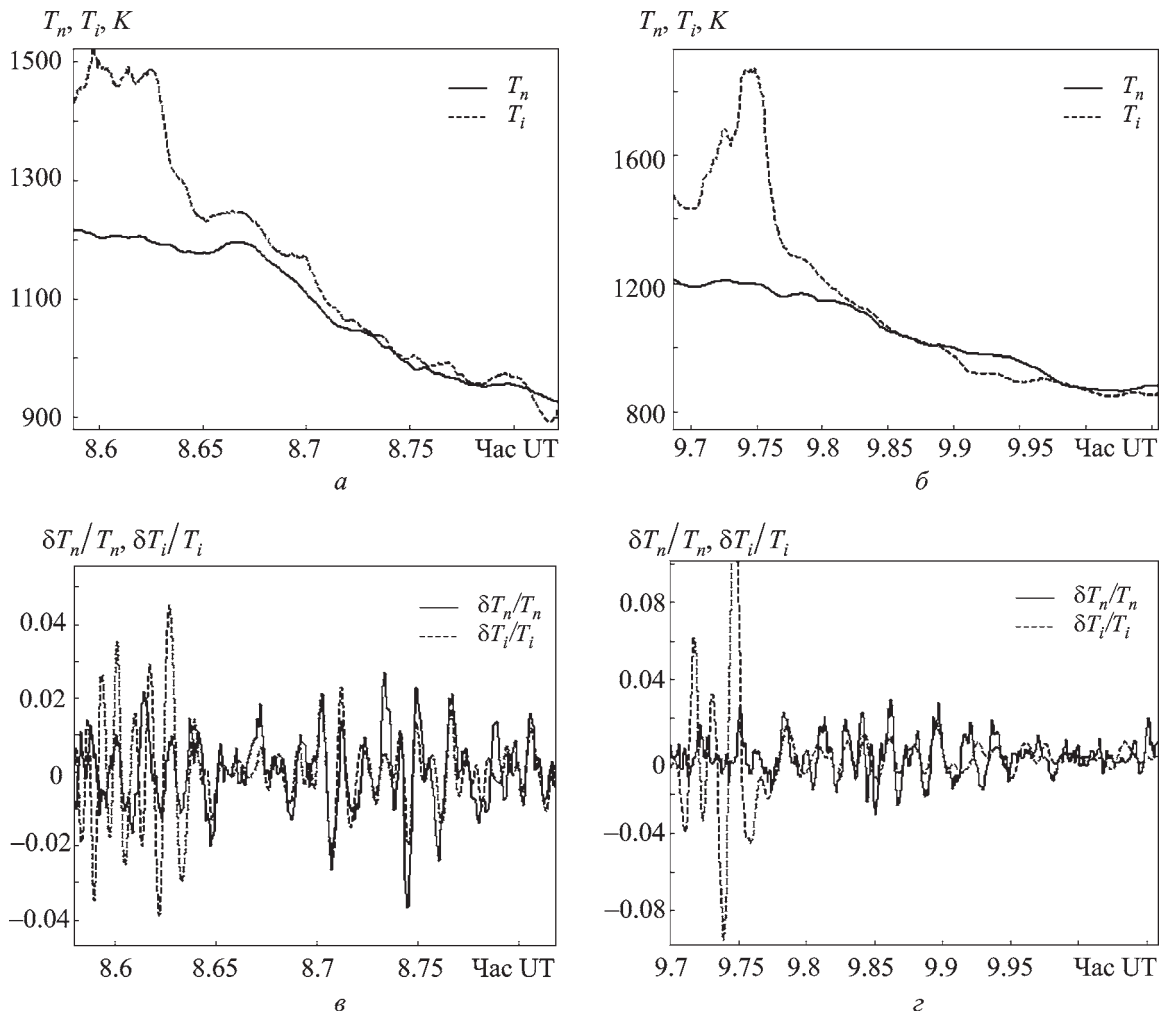
З поширенням АГХ у параметрах іоносферної плазми мають проявлятися збурення з тими са-

мими просторовими і часовими масштабами, що і в нейтральній компоненті. Фазова горизонтальна швидкість АГХ становить сотні метрів на секунду і є значно меншою від орбітальної швидкості супутника (близько 8 км/с), тому ці збурення з борту супутника фактично реєструються у вигляді квазіперіодичних варіацій у просторі. Виділимо в даних вимірювань хвильову складову з масштабами АГХ (сотні кілометрів) за допомогою методу ковзаючого середнього,  $\delta T_i = T_i - \bar{T}_i$ ,  $\delta T_n = T_n - \bar{T}_n$ , де  $\bar{T}_i$ ,  $\bar{T}_n$  – усереднені величини. У подальшому аналізі розглядатимемо відносні варіації температури іонів  $\delta T_i / \bar{T}_i$  і нейтральних частинок  $\delta T_n / \bar{T}_n$ , а знак усереднення опустимо.

На окремих витках супутника постійно спостерігається деякий фоновий рівень хвильових збурень  $\sim 0.5\%$ . АГХ проявляються як перевищення фонового рівня з характерними амплітудами у відносних варіаціях температури в середньому кілька процентів. Варіації температур нейтральної та іонної компонент на витках 8092 і 8123 є узгодженими в протяжному інтервалі географічних широт ( $75^\circ \div 30^\circ$ ) (рис. 1, в, з). Узгоджений характер варіацій температури і концентрацій окремих нейтральних компонент дозволяє ідентифікувати тип хвильового збурення.

Для визначення типу збурення додатково розглянемо синхронні варіації концентрацій атомарного кисню O, молекулярного азоту  $N_2$  і температури нейтральної компоненти. Згідно з теорією АГХ, при поширенні цих хвиль мають спостерігатися приблизна протифазність варіацій температури і концентрації, а також перевищення відносної амплітуди коливань  $n(N_2)$  над  $n(O)$  [3, 6]. Вказані особливості чітко проявляються на витку 8092 для всесвітнього часу  $UT > 9.77$  год, що вказує на АГХ природу спостережуваних збурень (рис. 2). На обох витках 8123 і 8092 цуги АГХ простягаються за широтою понад 5000 км. Для ідентифікації АГХ подібний аналіз виконувався на всіх досліджуваних витках.

Над полярними шапками на обох розглянутих витках хвильові варіації температури іонів і нейтральних частинок не узгоджені. Це, радше, свідчить про інший тип хвильового процесу, не пов'язаного з АГХ. Розглянемо докладніше результати вимірювань на витку 8092 у приполюсній області в інтервалі  $UT = 9.71 \div 9.77$  год (рис. 3). Характер змін  $n(O)$  і  $n(N_2)$  на цьому інтервалі є майже однаковий, а температура іонів не узгод-



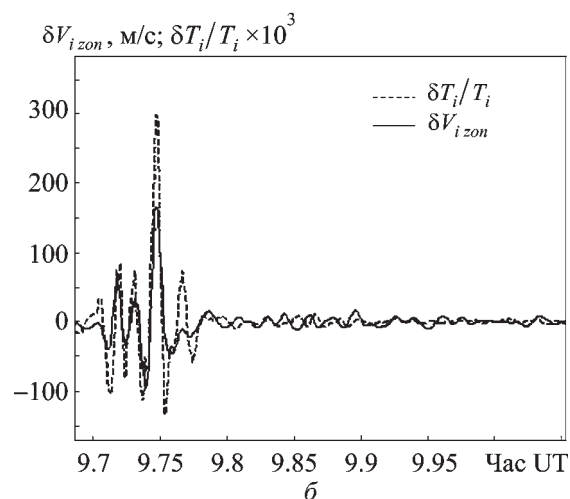
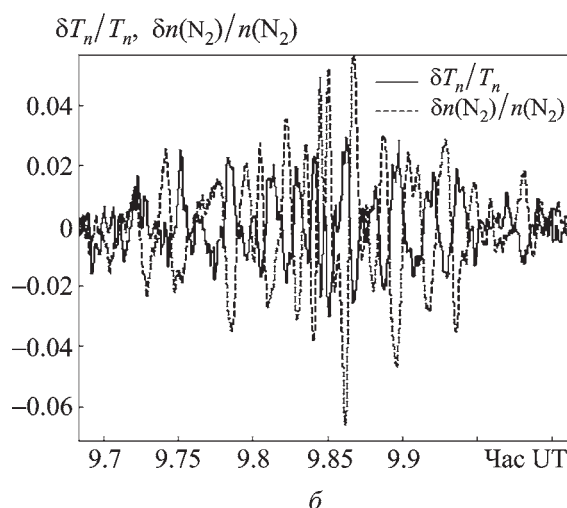
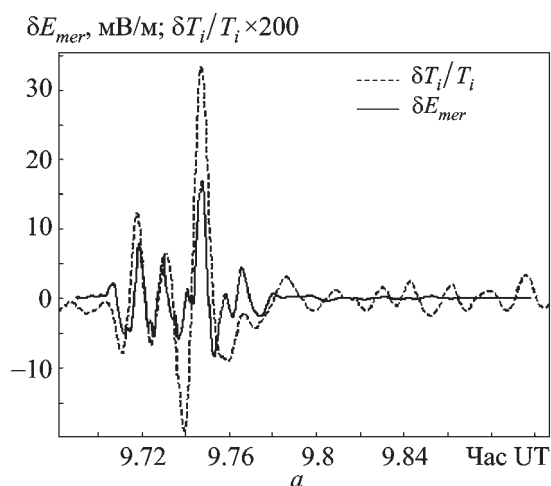
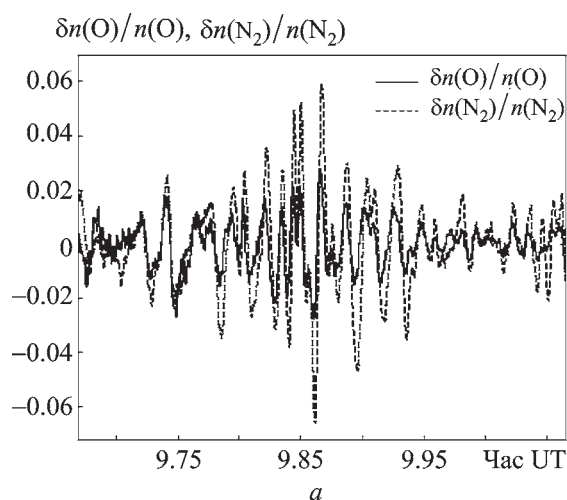
**Рис. 1.** Температури іонів та нейтральних частинок на витках 8123 (зліва) та 8092 (справа) у південній півкулі в нічних умовах: *а, б* – вихідні ряди вимірювань температури; *в, г* – відносні варіації температури

жується з температурою нейтральної компоненти. Тим часом спостерігається кореляція  $T_i$  з напруженістю електричного поля. На рис. 3, *а, б* показано відносні варіації температури іонів, меридіональної компоненти електричного поля  $E_{mer}$  і зональної швидкості іонів  $V_{i\,zon}$ . Ці розглянуті складові змінюються узгоджено, що свідчить про електромагнітну природу спостережуваного в іоносферній плазмі хвильового збурення, найімовірніше, це – хвиля альфвенівського типу. Поширення такої хвилі супроводжується значними варіаціями горизонтальних поперечних компонент  $\delta E$  і  $\delta V_i$  (перпендикулярних до  $B_0$ ) та розігрівом іонів в електричному полі.

З розглянутих прикладів видно, що в іоносферній плазмі полярних областей відображається ширший клас хвильових процесів, ніж у нейтральному середовищі. Цей результат є цілком прогнозо-

ваним, оскільки іоносферна плазма зазнає подвійного впливу: як з боку динаміки нейтрального середовища, так і з боку електромагнітних процесів. Заряджена іоносферна плазма миттєво “відчуває” зміни електромагнітних полів, тоді як нейтральна складова реагує на ці зміни із запізненням. Час запізнення визначається співвідношенням між концентраціями іонів та нейтральних частинок і на висотах F2-області іоносфери становить близько 1 год [7].

Частотні діапазони електромагнітних УНЧ хвильових процесів і АГХ частково перебиваються. Тому для інтерпретації спостережуваних в іоносфері збурень власне як проявів АГХ потрібні синхронні вимірювання різних параметрів плазми, наприклад, температури і концентрації, які мають узгоджуватися з теоретичними уявленнями.



**Рис. 2.** Хвильові варіації параметрів нейтральної атмосфери на витку 8092: *a* – відносні варіації концентрації O і N<sub>2</sub>; *б* – відносні варіації концентрації N<sub>2</sub> і температури T<sub>n</sub>

**Рис. 3.** Варіації температури та швидкості іонів під дією електричного поля на витку 8092: *a* – відносні варіації температури іонів (для наочності помножено на 200) і напруженість меридіональної компоненти електричного поля; *б* – відносні варіації температури іонів (помножено на 1000) і зональної складової швидкості іонів

## 2.2. Концентрації нейтральних частинок та іонів

На досліджуваних атмосферних висотах (250 ÷ 350 км) концентрація нейтральних частинок на 3–4 порядки перевищує концентрацію плазми. Основним джерелом іонів та електронів в атмосфері середніх і низьких широт є фотоіонізація нейтральних складових, у високих широтах значний вклад можуть вносити інші механізми, зокрема, ударна іонізація в області аврорального овалу. Первинний іонний склад постійно змінюється внаслідок протікання іонно-молекулярних реакцій. На висотах іоносферної F2-області, до яких належать результати спостережень, переважачим за вмістом є іон атомарного кисню

O<sup>+</sup>, концентрація якого  $n(O^+) \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$  вночі і  $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$  вдень. На цих висотах лише незначна частина молекулярних іонів NO<sup>+</sup> і O<sub>2</sub><sup>+</sup> виникає безпосередньо за рахунок фотоіонізації через низькі концентрації відповідних нейтральних компонент. Основним джерелом їх утворення є швидкі іонно-молекулярні реакції, внаслідок чого  $n(NO^+)$  і  $n(O_2^+)$  є дуже варіативними. Концентрації молекулярних іонів у F2-області на кілька порядків менші, ніж  $n(O^+)$ . У всьому інтервалі іоносферних висот плазма в цілому є квазінейтральною, а для F2-області виконується  $n(e) \approx n(O^+)$  [8].



Розглянемо поведінку концентрацій молекул  $N_2$  та іонів  $O^+$  на витках 8092 і 8123. Велико-масштабний тренд нейтральної концентрації пов'язаний в основному із зміною висоти орбіти (рис. 4, а, б). Зміни  $n(O^+)$  є більш нерегулярними, спостерігаються неоднорідності з великими масштабами в кілька тисяч кілометрів (рис. 4, в, г).

Виділимо в концентрації хвильову складову та розглянемо відносні варіації  $\delta n(O^+)/n(O^+)$  і  $\delta n(N_2)/n(N_2)$ . Хвильова складова в нейтральних частинках та іонах демонструє приблизно протифазний характер змін на тих самих ділянках витків, де варіації температур є узгодженими (рис. 4 д, е). У плазмі відносні варіації загальної концентрації зазвичай у кілька разів більші, ніж у нейтральній складовій. Співвідношення відносних амплітуд варіацій концентрацій плазми і нейтральних частинок може відрізнитися на окремих витках і змінюється навіть в межах одного хвильового цугу.

Хвильові зміни концентрації молекулярних іонів лише на окремих ділянках узгоджені зі змінами концентрації нейтральних частинок. Так, для двох представлених витків, тільки в інтервалі  $UT = 8.69 \div 8.76$  год на витку 8123 вони узгоджені з АГХ (рис. 5, а–г). Частково це пов'язано з недостатньою точністю супутникових вимірювань концентрацій молекулярних іонів через їх низькі абсолютні значення, а частково – з високою чутливістю цих іонів до різних збурень. Як буде показано в розділі 3, через малий фотохімічний час життя молекулярних іонів їх концентрація за частки секунди реагує на будь-які зміни електричних полів, температури електронів та інших чинників, тому в полярних областях її поведінка є дуже нестабільною. Проте за відносно спокійних геофізичних умов на окремих витках спостерігається досить чітке узгодження варіацій концентрацій молекулярних іонів та нейтральних частинок, наприклад на витку 8296 (рис. 6, а, б).

### 2.3. Швидкість частинок

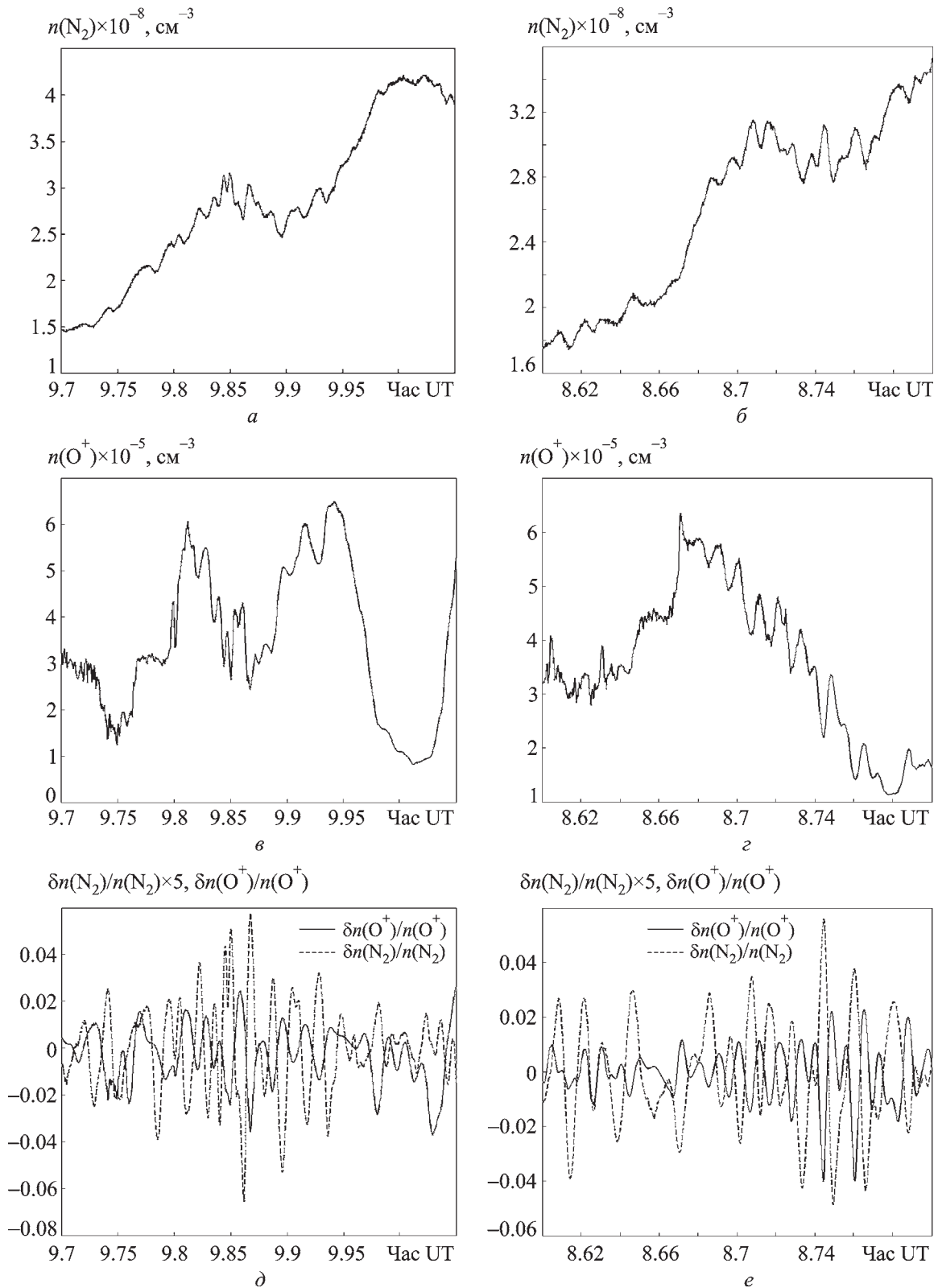
Аналіз вимірювань швидкості нейтральних частинок та іонів надає важливу інформацію щодо взаємодії АГХ та РІЗ. На супутнику DE2 в експерименті WATS виконувались контактні вимірювання двох компонент швидкості нейтральних частинок – вертикальної та горизонтальної (перпендикулярної до вектора швидкості супутника  $\vec{V}_s$ ). При нахилі орбіти супутника DE2 ( $89.9^\circ$ ) в експе-

рименті WATS фактично вимірювалася горизонтальна зональна  $V_{n\,zon}$  (вздовж паралелі) і вертикальна  $V_{n\,vert}$  складові швидкості нейтральних частинок. В експерименті RPA вимірювались вертикальна  $V_{i\,vert}$ , горизонтальна зональна  $V_{i\,zon}$  і горизонтальна меридіональна  $V_{i\,mer}$  (вздовж  $\vec{V}_s$ ) компоненти швидкості іонів.

На висотах F2-області іоносфери частоти зіткнень іонів з нейтральними частинками значно менші від їх гірчастоти, що обумовлює різний характер поздовжніх (уздовж  $B_0$ ) і поперечних (перпендикулярно до  $B_0$ ) рухів іонів. При поширенні АГХ іони вільно рухаються разом з нейтральними частинками вздовж силових ліній магнітного поля. Внаслідок цього у високих широтах вертикальні складові швидкостей іонів і нейтральних частинок практично співпадають. Рухи іонів у поперечному до  $B_0$  напрямку обумовлені дрейфом у схрещених полях. Тому в поперечних компонентах швидкості іонів мають проявлятися переважно електромагнітні хвильові збурення альфвенівського типу, а в поздовжніх компонентах – АГХ.

Над полярною областю на витку 8092 спостерігаються електромагнітні хвильові процеси, які обумовлюють великі амплітуди поперечних швидкостей іонів (рис. 7, а, б). В інтервалі  $UT = 9.8 \div 9.95$  год, що відповідає цугу АГХ, варіації вертикальних (поздовжніх) складових швидкості іонів та нейтральних частинок добре узгоджені (рис. 7, в). Натомість над самою полярною шапкою вертикальні швидкості іонів і нейтральних частинок не узгоджені, що не відповідає АГХ. У поперечних компонентах швидкостей іонів і нейтральних частинок узгодження варіацій, зазвичай, не спостерігається (рис. 7, г).

В табл. 1 нижче наведено характеристики АГХ та РІЗ, що спостерігалися на окремих витках супутника DE2. В інтервалі висот 250  $\div$  350 км такі збурення реєструвалися фактично на кожному з розглянутих витків. Амплітуди АГХ є максимальними, як правило, у високих широтах, при цьому не демонструють прямої залежності від геомагнітної активності. Для ілюстрації цього в останній колонці в табл. 1 наведено значення  $D_{st}$  індексу геомагнітної активності. Цуги АГХ простягаються над полярними областями на кілька тисяч кілометрів. У більшості наданих у таблиці випадків хвилі поширюються через всю полярну шапку. Інколи виражено дві відокремлені області



**Рис. 4.** Концентрації молекул  $N_2$  та іонів  $O^+$  на витках 8092 (ліва колонка) і 8123 (права колонка): а, б – концентрація  $N_2$ ; в, г – концентрація  $O^+$ ; д, е – відносні варіації концентрацій  $N_2$  (помножено на 5) та  $O^+$

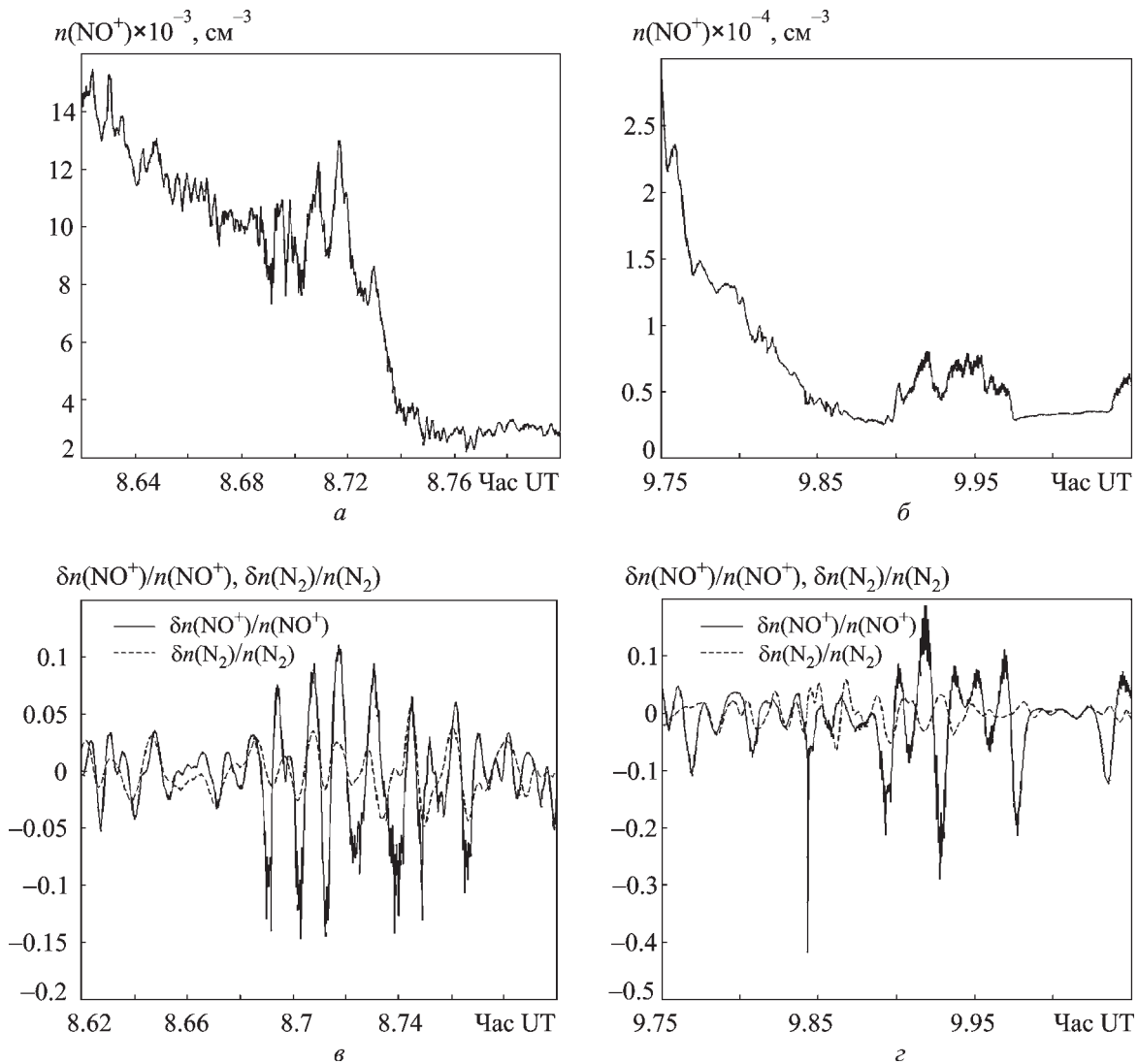


Рис. 5. Концентрація молекулярних іонів на витках 8123 (зліва) і 8092 (справа): а, б – концентрація  $\text{NO}^+$ ; в, з – відносні варіації концентрацій  $\text{N}_2$  і  $\text{NO}^+$

підвищеної хвильової активності, як, наприклад, на витках 8209 і 8296, або хвильова активність виражена лише з одного нічного боку полярної шапки. В таблиці стрілкою позначено напрямок поширення АГХ та РІЗ, який визначено за методикою, розглянутою в [3]. Виявляється, що АГХ систематично поширюються з нічної півкулі через полюс на денну півкулю. Відповідно, якщо спостереження виконуються лише вдень, складатиметься враження про систематичний рух АГХ від полюса до нижчих широт, що є цілком логічним з огляду на локалізацію можливих джерел в авроральному овалі. Для нічних умов спостережень, навпаки, всі АГХ рухаються до полюса, що пояснити важче.

Плазмовий відгук іоносфери на поширення АГХ впевнено реєструвався у вигляді РІЗ в інтервалі широт  $70^\circ \pm 20^\circ$ . Амплітуди відносних варіацій плазми складають переважно  $10 \div 15\%$ , в той час як у концентрації нейтральних частинок – лише кілька процентів. Над полярними шапками на ефекти АГХ часто накладаються потужні електромагнітні хвильові процеси. Для відокремлення цих ефектів від іоносферних проявів АГХ слід ретельно аналізувати різні параметри плазми.

### 3. Теоретична інтерпретація

Відгук іоносферної плазми на поширення АГХ визначається двома основними механізмами: 1) механічним переносом іонів нейтральними частинками в

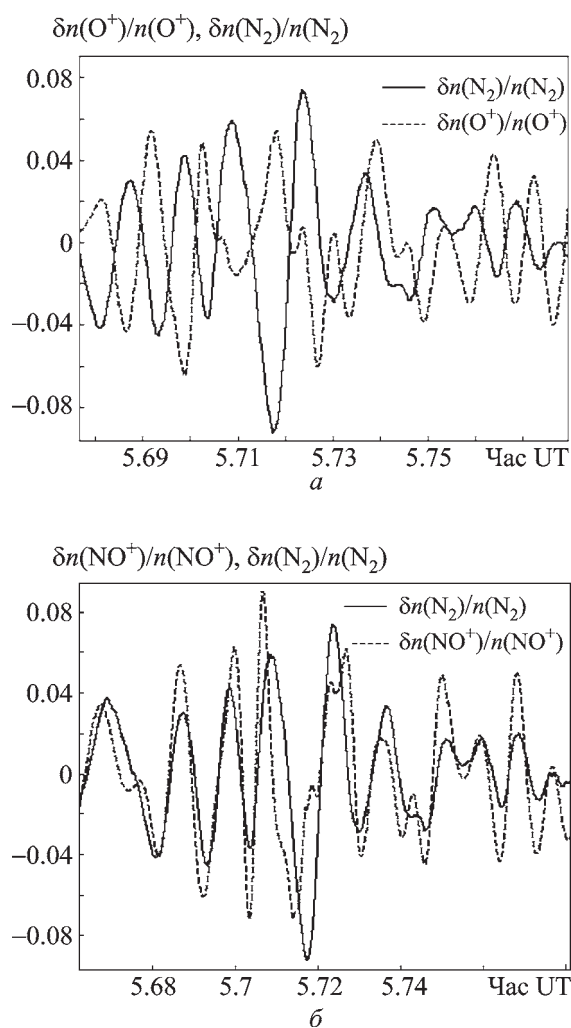
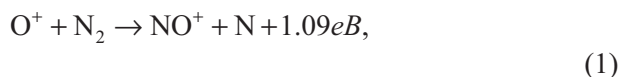


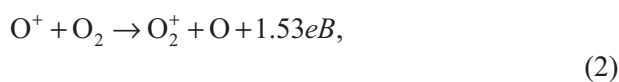
Рис. 6. Зв'язок АГХ та РІЗ на витку 8296: а – відносні варіації концентрацій  $N_2$  і  $O^+$ ; б – відносні варіації концентрацій  $N_2$  і  $NO^+$

результаті зіткнень; 2) зміною швидкості фотохімічних реакцій в областях мінімумів (максимумів) нейтральної густини і температури. Вклад кожного з цих механізмів варіюється залежно від висоти і визначається, в першу чергу, фотохімічним часом життя іона.

На висотах F2-області основними каналами фотохімічних втрат  $O^+$  є реакції [8]:



$$\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$



$$\alpha_2 = 2.2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$

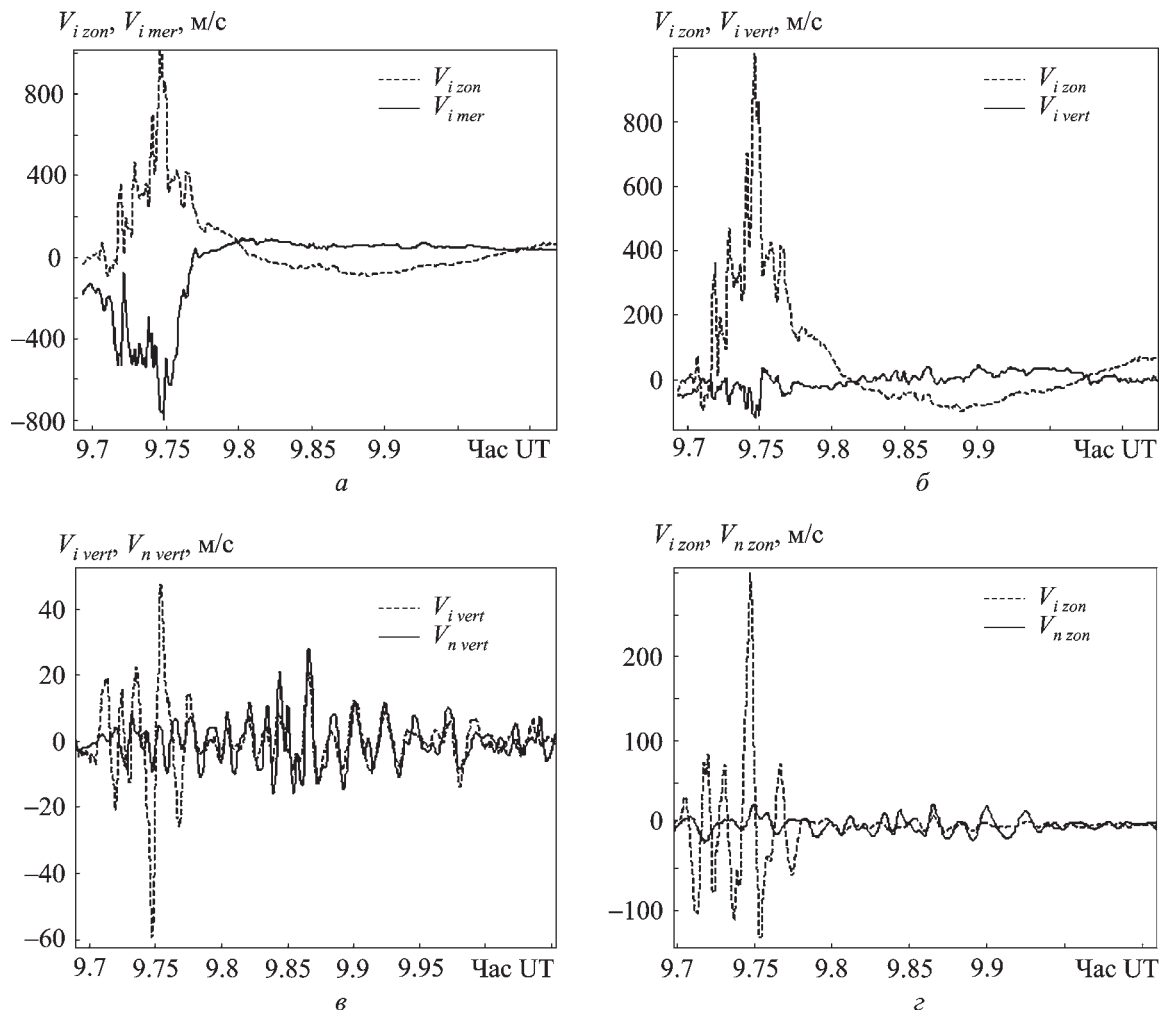
де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти швидкостей реакцій. Згідно з моделлю MSIS 90 на висоті 250 км для нічних високоширотних умов спостережень  $n(N_2) \sim 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ,  $n(O_2) \sim 3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ . Для цих умов на основі реакцій (1), (2) оцінимо фотохімічний час життя іона  $O^+$ :  $\tau(O^+) = [\alpha_1 n(N_2) + \alpha_2 n(O_2)]^{-1} = 625 \text{ с}$ . Переважання механізму 1) або 2) у результируючому плазмовому відгуку на поширення АГХ визначається співвідношенням між фотохімічним часом життя іона та періодом хвилі. Оскільки характерні періоди АГХ близько  $\tau(O^+)$ , визначальним для  $O^+$  є механічний перенос за рахунок зіткнень з нейтральними частинками. Іон  $O^+$  можна розглядати як окремий сорт атмосферного газу, застосовуючи у його розгляді результати теорії АГХ для багатокомпонентної атмосфери [2, 3]. Згідно з теоретичними уявленнями нижче максимуму F2-області відносні варіації концентрації  $O^+$  і нейтрального атома O пов'язані співвідношенням [2]:

$$\frac{\delta n(O^+)}{n(O^+)} \sim -\frac{\gamma H / H(O^+) + 1}{\gamma - 1} \frac{\delta n(O)}{n(O)}, \quad (3)$$

де  $H$  і  $H(O^+)$  – висотні масштаби розподілу нейтральної атмосфери та іоносферної плазми,  $\gamma$  – показник адіабати. Враховано також, що концентрація плазми нижче максимуму зростає з висотою. Згідно (3) варіації  $n(O^+)$  відбуваються, по-перше, у протифазі з нейтральними частинками, а по-друге, їх відносна амплітуда визначається відношенням  $H/H(O^+)$ . Збурення концентрації плазми будуть тим більші, чим крутіший висотний профіль концентрації іонів  $n_i(z)$ . На границях полярної шапки і в авроральних овалах на зв'язок АГХ та РІЗ суттєво впливають поздовжні струми, які втікають в іоносферу та витікають з неї, що призводить до суттєвої перебудови висотних профілів плазми  $n_i(z)$ . В цілому в областях вертикальних струмів нижче максимуму електронної концентрації висотний градієнт стає крутішим [9]. Тому навіть незначні збурення концентрації нейтральних частинок можуть обумовлювати на порядок більші відносні варіації концентрації плазми. Як видно з табл. 1, у полярних областях відносні амплітуди РІЗ у середньому в кілька разів перевищують амплітуди АГХ.

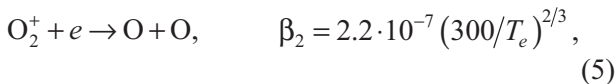
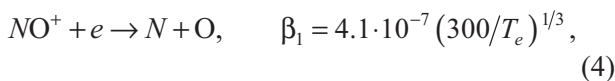
На відміну від переважаючого іона  $O^+$  для молекулярних іонів  $NO^+$  і  $O_2^+$  на часових і просторових масштабах АГХ механічний перенос нейтральними частинками відіграє другорядну





**Рис. 7.** Швидкість нейтральних частинок та іонів на витку 8092: *a* – зональна і меридіональна компоненти швидкості іонів; *b* – зональна і вертикальна швидкості іонів; *в, г* – хвильові збурення вертикальних і зональних швидкостей іонів та нейтральних частинок після виключення тренду

роль. Це впливає з оцінки фотохімічного часу життя іонів  $NO^+$  і  $O_2^+$ , основні втрати яких на висотах F2-області визначаються реакціями дисоціативної рекомбінації [8]:



де  $\beta_1, \beta_2$  – коефіцієнти швидкостей реакцій;  $T_e$  – температура електронів. Тоді згідно з (4), (5)  $\tau(NO^+) = 1/\beta_1 n(e) \approx 12$  с вдень і  $\approx 24$  с вночі,  $\tau(O_2^+) = 1/\beta_2 n(e) \approx 25$  с вдень і  $\approx 50$  с вночі, що значно менше, ніж характерні періоди АГХ. Тому в розподілі молекулярних іонів, на відміну від іона  $O^+$ ,

встигає встановитися квазірівноважний стан, який визначається реакціями утворення (1), (2) і втрат (4), (5) молекулярних іонів. За умови квазірівноваги

$$\alpha_1 n(O^+) \cdot n(N_2) = \beta_1 n(NO^+) \cdot n(e),$$

$$\alpha_2 n(O^+) \cdot n(O_2) = \beta_2 n(O_2^+) \cdot n(e).$$

З урахуванням умови квазінейтральності  $n(e) \approx n(O^+)$  відносні варіації молекулярних іонів мають бути пропорційними до варіацій відповідних нейтральних молекул  $\delta n(NO^+)/n(NO^+) \sim \delta n(N_2)/n(N_2)$ ,  $\delta n(O_2^+)/n(O_2^+) \sim \delta n(O_2)/n(O_2)$ . Якщо на фоні поширення АГХ відбуваються інші швидкозмінні процеси, що супроводжуються зміною  $T_e$ , квазірівновага не встигає встановитися і концентрація молекулярних іонів не відслідковує АГХ.

Таблиця 1. Характеристики АГХ та РІЗ

Орбіта	UT, год	Широта, градуси	Півкуля	Напрямок	$\delta n(O)/n(O)$ , %	$\delta n(O^+)/n(O^+)$ , %	$D_{SI}$ , нТл
8140	10.4÷10.5	70÷45	S	←	4÷5	15÷20	-10
8137	5.85÷6.05	73÷36	S	←	2÷3	10÷20	-22
8123	8.6÷8.9	88÷20	S	←	2.5÷3	20÷30	-16
8122	6.95÷7.25	55÷52*	S	←	6÷8	10÷15	-21
8092	9.8÷9.95	70÷33	S	←	2÷3	10÷15	-35
8023	0.32÷0.5	65÷72*	N	→	4÷5	10÷15	-14
8027	7.25÷7.4	88÷58	S	←	4÷5	8÷10	-21
8033	15.45÷15.7	58÷63*	N	→	2÷3	15÷20	-22
8050	18.15÷18.35	80÷45	S	←	7÷8	20÷25	-41
8051	18.8÷19.0	75÷57*	N	→	7÷10	20	-30
8088	2.75÷2.95	57÷76*	N	→	4÷5	15÷20	-35
8088	3.58÷3.7	72÷80*	S	←	4÷5	10	-33
8096	16.4÷16.55	63÷81*	N	→	5	15÷20	-27
8100	20.98÷21.1	73÷79*	N	→	8÷10	15÷20	-17
8101	22.45÷22.65	63÷70*	N	→	10÷12	20	-16
8152	4.4÷4.59	77÷55*	S	←	4÷5	10	-15
8209	18.5÷18.6	80÷75*	S	←	5÷7	10÷15	-2
	18.65÷18.73	64÷43	S	←	3÷4	10	-29
8210	19.2÷19.4	69÷63*	N	→	10÷15	10÷15	-29
8296	5.6÷5.77	68÷70*	S	←	3÷4	5÷7	-14
	5.82÷5.94	57÷30	S	←	1.5÷2	5	-14
7918	8.9÷9.05	60÷72*	N	→	4÷5	15	6

\* – хвильовий цуг охоплює всю полярну шапку

#### 4. Висновки

За даними прямих супутникових вимірювань досліджено безпосередній зв'язок АГХ та РІЗ у різних параметрах нейтральної атмосфери та іоносфери у високих і середніх широтах. На висотах F2-області іоносферний відгук на поширення АГХ найкраще проявляється у варіаціях поздовжньої (уздовж силових ліній геомагнітного поля) компоненти швидкості іонів та у варіаціях температури іонів. Ці параметри практично співпадають у нейтральній та зарядженій компонентах, при цьому спостережувані амплітуди РІЗ фактично відповідають амплітудам АГХ. У відносних варіаціях концентрацій нейтральних частинок та іонів зв'язок амплітуд АГХ та РІЗ є складнішим і переважно визначається висотним розподілом плазми. В середньому амплітуди РІЗ у високих широтах у кілька разів перевищують амплітуди АГХ (табл. 1). За наявності різких висотних градієнтів

концентрації плазми, наприклад у областях поздовжніх струмів, амплітуди РІЗ можуть на порядок перевищувати амплітуди відповідних АГХ. Відносні варіації концентрації молекулярних іонів повторюють хід концентрації нейтральних молекул, але є занадто чутливими до швидких змін електронної температури і, крім того, не завжди вимірюються на супутнику з задовільною точністю.

В цілому результати супутникових спостережень хвильових варіацій іоносферної плазми в середніх та приполярних широтах узгоджуються з теоретичними уявленнями щодо відгуку іоносфери на поширення АГХ. Винятком є полярні області, де на плазмові прояви АГХ почасти накладаються електромагнітні ефекти. Для відокремлення цих ефектів від іоносферних проявів АГХ слід розглядати синхронні вимірювання різних параметрів плазми. Зокрема, за супутниковими даними, амплітуди АГХ як у поздовжніх, так і в поперечних компонентах швидкості нейтральних частинок

не превышают десятки метров на секунду. Тому великие значения поперечной скорости ионов (несколько сотен метров на секунду) скорее указывают на альфвеновские волны, а не на проявления АГВ.

#### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4–35.
2. Лизунов Г. В., Федоренко А. К. Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике “Atmosphere Explorer-E” // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т.11, № 1. – С. 49–62.
3. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 254–265.
4. Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., Hedin A. E., Reber C. A., and Spencer N. W. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. – 1981. – Vol. 5. – P. 429–441.
5. Spencer N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., Hedin A. E., Carignan G. R., and Maurer J. C. The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // Space Sci. Instrum. – 1981. – Vol. 5. – P. 417–428.
6. Dudis J. J. and Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves // Geophys. Res. Lett. – 1976. – Vol. 3, No. 12. – P. 727–730.
7. Раклифф Дж. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. – М.: Мир, 1975. – 295 с.
8. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 527 с.
9. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. – М.: Наука, 1983. – 191 с.

А. В. Беспалова, А. К. Федоренко

Институт космических исследований  
НАН Украины и ГКА Украины,  
пр. Академика Глушкова, 40, корп. 4/1, г. Киев,  
03680, Украина

#### СПУТНИКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Исследован отклик ионосферной плазмы на распространение акустико-гравитационных волн (АГВ) на основе измерений на спутнике Dynamics Explorer 2. Волновые возмуще-

ния проанализированы в интервале атмосферных высот 250 ÷ 350 км по данным одновременных измерений температур, концентраций, скоростей нейтральных частиц и ионов в высоких и средних широтах. Установлены следующие особенности ионосферных проявлений АГВ: 1) относительные вариации температур ионов и нейтральных частиц в этих широтах, за исключением областей авроральных овалов, примерно совпадают; 2) вариации общей концентрации плазмы противофазны вариациям концентрации нейтральных частиц, а их относительная амплитуда в среднем в несколько раз превышает амплитуду вариаций концентрации нейтральных частиц; 3) концентрация молекулярных ионов изменяется в фазе с концентрацией нейтральных частиц; 4) вертикальная скорость ионов в высоких широтах согласована с вертикальной скоростью нейтральных частиц, отражая их совместные движения вдоль силовых линий магнитного поля. Для отделения ионосферных проявлений АГВ от других типов возмущений в высоких широтах нужен синхронный анализ различных параметров ионосферной плазмы.

А. В. Беспалова and А. К. Федоренко

Space Research Institute,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
and State Space Agency of Ukraine (SRI NASU and SSAU),  
40, Pr. Akademika Glushkova, build. 4/1, Kyiv, 03680, Ukraine

#### SATELLITE STUDIES OF IONOSPHERIC MANIFESTATIONS OF ACOUSTIC-GRAVITY WAVES

The response of the ionospheric plasma on the propagation of acoustic-gravity waves (AGW) studied at altitudes of 250–350 km using the satellite Dynamics Explorer 2 measurements. Wave perturbations are analyzed according to simultaneously measured data of temperature, concentration and velocity of neutral particles and ions at high and middle latitudes. The following features of ionospheric manifestations of acoustic-gravity waves have been established: 1) relative variations of temperature of neutral particles and ions are roughly the same for these latitudes, except for the regions of auroral ovals; 2) variations in total plasma concentration are antiphase to those in concentration of neutral particles, their relative amplitude being several times larger than the amplitude of neutral particles; 3) concentration of molecular ions is in phase with neutral particles; 4) vertical velocity of the ions at high latitudes is consistent with that of neutral particles, thus showing their mutual movement along the magnetic field lines. In the high-latitude ionosphere, to separate the ionospheric manifestations of acoustic-gravity waves from other types of disturbances, the simultaneous analysis of different parameters should be used.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2014