

УДК 550.388, 551.520.32

А. В. Беспалова, А. К. Федоренко

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

ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ ШВИДКОСТІ НЕЙТРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК ТА ІОНІВ У ПОЛЯРНИХ ОБЛАСТЯХ

Досліджено хвильові збурення полярної іоносфери за вимірюваннями швидкості нейтральних частинок та іонів на низькоорбітальному супутнику «Dynamic Explorer 2». Амплітуди горизонтальних і вертикальних складових швидкості нейтральних частинок складають десятки метрів за секунду, при цьому досягають максимальних значень переважно над центральними областями полярних шапок. Показано, що вертикальні швидкості іонів фактично збігаються з вертикальними швидкостями нейтральних частинок. Горизонтальні швидкості іонів максимальні на границях полярних шапок і в авроральних овалах, де вони досягають сотень метрів за секунду. В нічних секторах авроральних овалів амплітуди в середньому більші, ніж у денних секторах.

ВСТУП

Поширення акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) у верхній атмосфері супроводжується збуреннями іоносферної плазми і може бути зареєстроване у вигляді рухомих іоносферних збурень (РІЗ) як з борту супутника, так і наземними методами. Традиційно основна експериментальна інформація щодо хвильових збурень верхньої атмосфери отримується в наземних спостереженнях іоносфери. Суттєвими перевагами таких спостережень, у порівнянні з вимірюваннями на космічних апаратах, є значно менші фінансові затрати та можливість отримання довгих рядів неперервних спостережень. Проте під час інтерпретації наземних спостережень РІЗ виникають труднощі, пов'язані зі складним характером іоносферного відгуку на поширення хвиль в нейтральній атмосфері. Перш за все цей відгук залежить від висоти. На висотах приблизно до 100 км, де частоти ν_i зіткнень іонів з нейтральними частинками значно перевищують гірочастоту іонів Ω_i , іони рухаються в тому ж напрямку, і з тією ж швидкістю, що й нейтральна складова. На висотах F2-області іоносфери, де $\nu_i \ll \Omega_i$, відгук

іоносферної плазми на поширення хвиль у нейтральній атмосфері стає значно складнішим і залежить від напрямку коливань частинок відносно геомагнітного поля. У високих широтах при наявності електричних полів і висипань частинок зв'язок АГХ/РІЗ ускладнюється ще більше. В зв'язку з цим в ідеальному випадку дані наземних вимірювань хвильових процесів слід комбінувати з одночасними супутниковими вимірюваннями параметрів нейтральної атмосфери та іоносфери. Проте кількість низькоорбітальних супутників з контактними вимірюваннями атмосферних параметрів на іоносферних висотах є дуже обмеженою. В основному це супутники NASA серій «Atmosphere Explorer» і «Dynamic Explorer», які функціонували у 1970—1980 рр.

В даній роботі проведено порівняння властивостей АГХ та РІЗ у полярній F2-області іоносфери за даними прямих супутникових вимірювань швидкості нейтральних частинок та іонів. У полярних областях зосереджені найпотужніші джерела збурень верхньої атмосфери, такі як висипання заряджених частинок, дисипація струмів магнітосферного походження та ін. Внаслідок цього тут часто спостерігаються хвильові збурення великих амплітуд [1, 6—9]. Для дослідження цих збурень будуть використані дані

вимірювань на низькоорбітальному супутнику «Dynamics Explorer 2» (DE2). Попередній аналіз даних вимірювань на цьому супутнику показав, що хвильові збурення систематично спостерігаються над полярними шапками в інтервалі висот 250—400 км [1, 5, 6]. Амплітуди полярних АГХ у відносних варіаціях концентрації нейтральних частинок і температури складають в середньому кілька відсотків, і у кілька разів перевищують амплітуди хвиль у середніх і низьких широтах.

Дослідження взаємозв'язку АГХ/РІЗ на основі аналізу синхронних супутникових вимірювань швидкостей нейтральних частинок та іонів раніше не провадилися. Такі дослідження є важливими для інтерпретації наземних спостережень РІЗ в полярних областях.

ДАНІ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Супутник «Dynamic Explorer 2» було запущено на полярну орбіту з нахилом 89.9° , перигеєм близько 250 км і апогеєм 1000 км. Комплекс наукової апаратури вимірював різні параметри нейтральної атмосфери та іоносфери, а також електричне і магнітне поле. Концентрації різних сортів нейтральних газів вимірювались на DE2 за допомогою мас-спектрометра в експерименті NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [3]. Температура і швидкість нейтральних частинок вимірювались в експерименті WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [10]. Три складові швидкості іонів вимірювались в експерименті RPA (Retarding Potential Analyzer). Синхронні вимірювання цих параметрів дозволяють одночасно аналізувати хвильові процеси у нейтральному середовищі, іоносферній плазмі та варіаціях полів і встановлювати їхній можливий взаємозв'язок.

Швидкості нейтральних частинок та іонів представлено у базі даних вимірювань DE2 в системі координат супутника (СКС), де вісь X_s вибрано вздовж вектора швидкості супутника \mathbf{V}_s , вісь Y_s напрямлена вертикально вгору, Z_s доповнює праву трійку векторів. Кожні півроку з метою теплового контролю супутник перевертався, що відповідає переходу із системи координат $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ в $\{X_s, -Y_s, -Z_s\}$. Це необхідно враховувати при аналізі вимірюваних складових

швидкості. В експерименті WATS проводилися контактні вимірювання двох складових швидкості нейтральних частинок — вертикальної та горизонтальної, перпендикулярної до \mathbf{V}_s . При нахилі орбіти 89.9° супутника DE2 в експерименті WATS фактично вимірювалась горизонтальна зональна V_{nz} (вздовж паралелі) і вертикальна V_{nv} складові швидкості нейтральних частинок. В експерименті RPA вимірювались вертикальна V_{iv} , горизонтальна зональна V_{iz} і горизонтальна меридіональна V_{im} (вздовж \mathbf{V}_s) складові швидкості іонів.

ШВИДКІСТЬ НЕЙТРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК

Поширення АГХ відображається в різних параметрах нейтральної атмосфери, зокрема у швидкості нейтральних частинок. Вимірювання вертикальної і зональної складових швидкості нейтральних частинок показано на рис. 1, а, б на двох послідовних витках над північною полярною областю. У вертикальній складовій хвильовій варіації добре помітно навіть без попередньої обробки даних. У горизонтальній зональній складовій швидкості проявляються ефекти, пов'язані з зональними вітрами та обертанням Землі, внаслідок чого хвильові збурення спостерігаються на фоні цих великомасштабних змін. Відокремлення хвильових варіацій від трендів здійснювалося за методом ковзного середнього. Кількість точок усереднення вибиралась з умови максимальної кореляції варіацій вертикальної і горизонтальної складових швидкості за методикою, описаною в роботі [1].

Після виключення великомасштабної складової хвильові варіації в обох складових швидкості є узгодженими (рис. 1, в, г). При цьому синфазний характер хвильових варіацій вказує на поширення хвилі вправо відносно \mathbf{V}_s , а протифазний — вліво [2]. Відмітимо, що вертикальна V_{nv} і зональна V_{nz} складові швидкості близькі за величиною. Хоча в загальному випадку супутник летить під деяким кутом до хвильового фронту, повна горизонтальна швидкість частинок $V_{hor} = \sqrt{V_{nz}^2 + V_{nm}^2}$ також буде близька до V_{nv} . З теоретичних співвідношень АГХ випливає, що для близьких значень горизонтальної і вертикальної складових швидкості частота хвилі наближається-

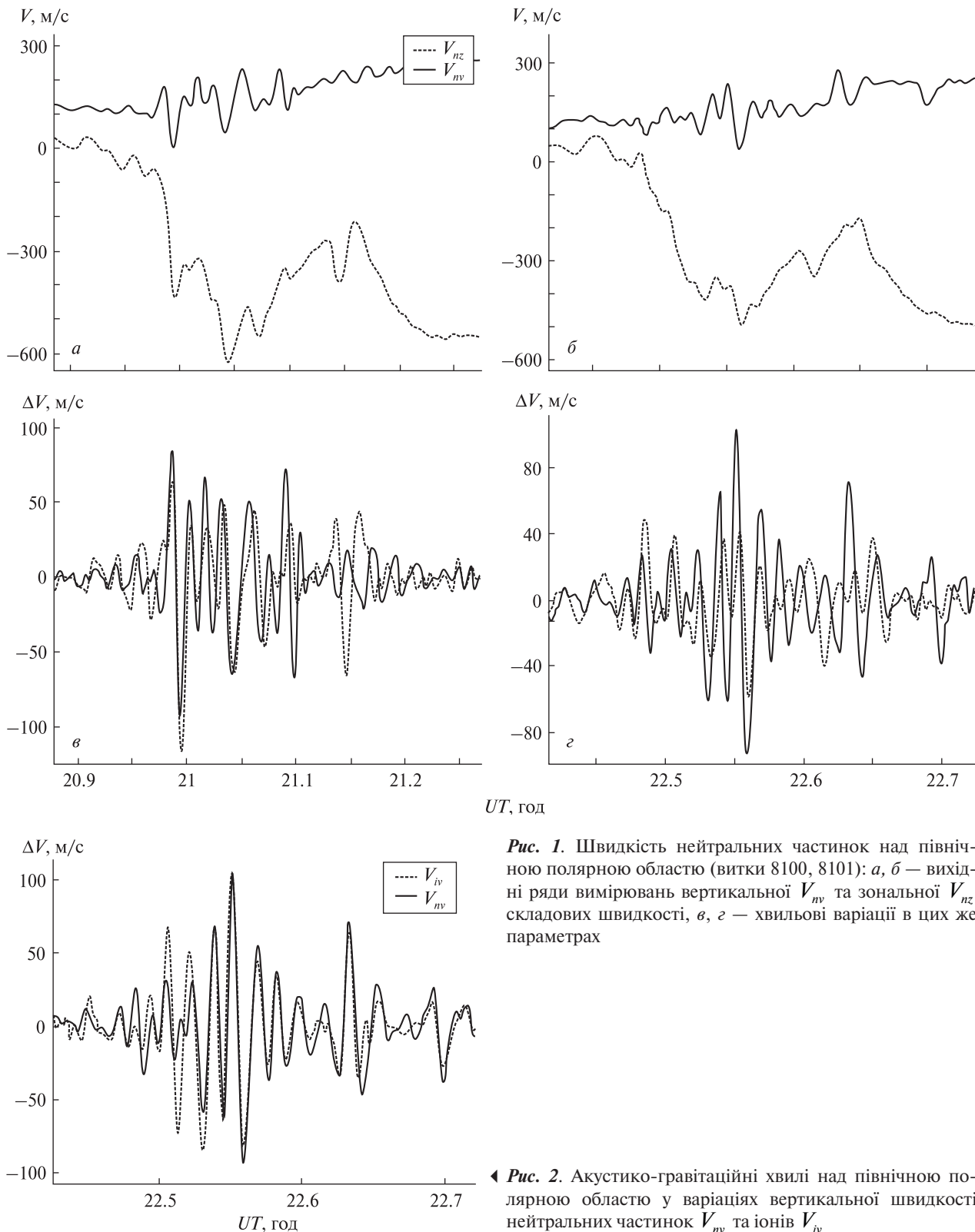


Рис. 1. Швидкість нейтральних частинок над північною полярною областю (витки 8100, 8101): *a, б* — вихідні ряди вимірювань вертикальної V_{nv} та зональної V_{nz} складових швидкості, *в, г* — хвильові варіації в цих же параметрах

◀ **Рис. 2.** Акустико-гравітаційні хвилі над північною полярною областю у варіаціях вертикальної швидкості нейтральних частинок V_{nv} та іонів V_{iv}

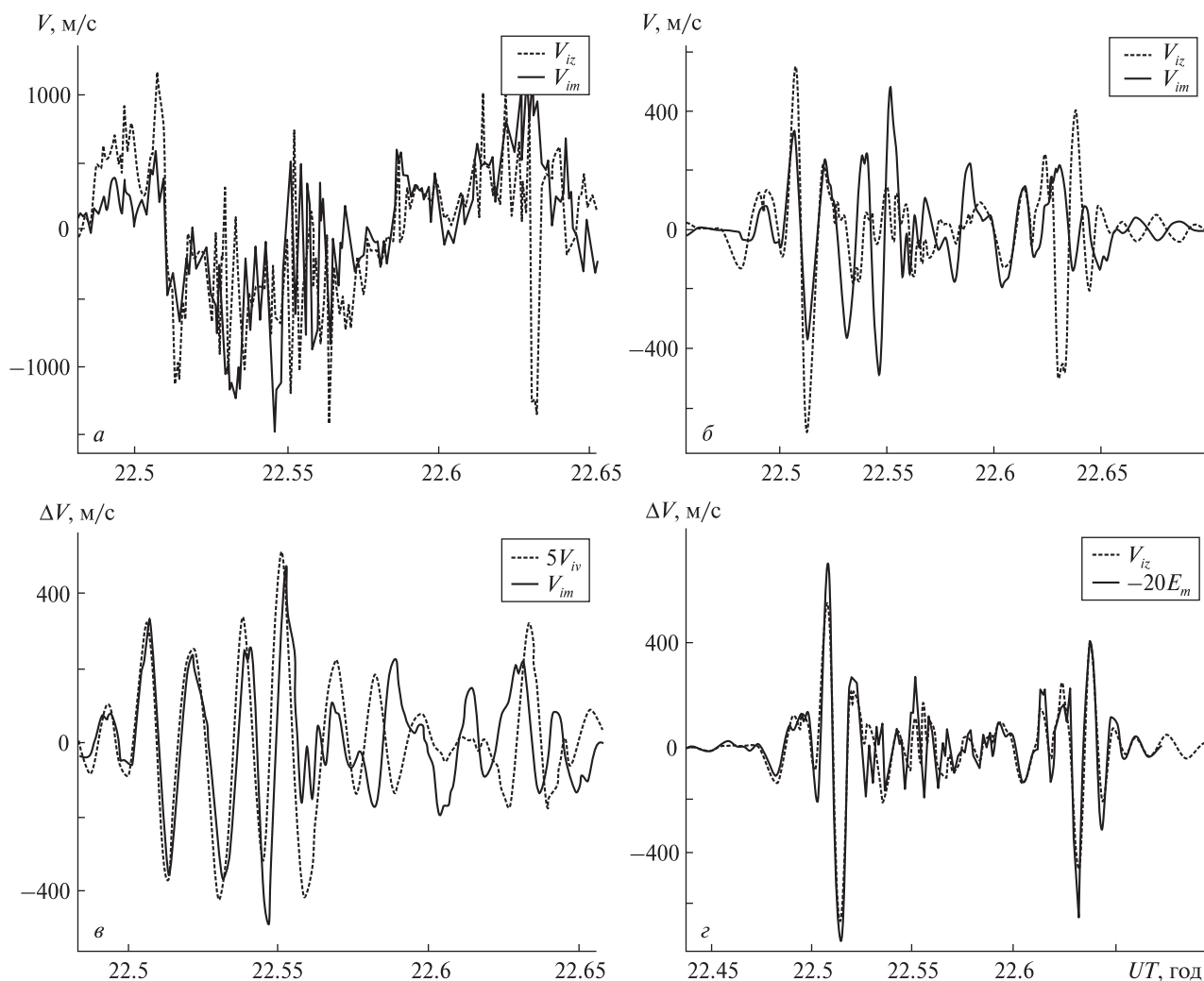


Рис. 3. Горизонтальні компоненти швидкості іонів на північній полярній ділянці витка 8100: *a* — вихідні ряди вимірювань зональної та меридіональної складових швидкості іонів, *б* — хвильові варіації зональної та меридіональної складових, *в* — варіації вертикальної та меридіональної складових, *г* — варіації зональної швидкості іонів та меридіонального електричного поля

ся до частоти Брента — Вайсяля [4]. Цей факт узгоджується з незалежними оцінками частоти полярних АГХ у ряді робіт [2, 5, 7].

ШВИДКІСТЬ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

На висотах спостережень на супутнику DE 2 (вище 250 км) $v_i \ll \Omega_i$, що обумовлює різний характер рухів іонів вздовж \mathbf{B} і перпендикулярно до нього. Вздовж силових ліній магнітного поля іони рухаються разом з нейтральними частинками. Оскільки у полярних областях си-

лові лінії геомагнітного поля майже вертикальні, коливання нейтральних частинок та іонів у вертикальному напрямку фактично збігаються $V_{iv} \approx V_{mv}$ (рис. 2).

У полярній F2-області іоносфери рухи іонів у горизонтальному напрямку (перпендикулярно до \mathbf{B}) підтримуються за рахунок $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфу. На рис. 3, *a* показано вимірювання зональної та меридіональної горизонтальних компонент швидкості іонів на полярній ділянці витка 8100. Супутник рухається з нічного сектора

у денний, при цьому перехід ніч — день відбувається приблизно в $UT = 22.52^h$. Від’ємні значення швидкості в центральній частині рисунка відповідають полярній шапці, зміна знаку швидкості відбувається на границях полярної шапки і авроральних овалів. Хвильові варіації зональної та меридіональної швидкості іонів після виключення тренду представлено на рис. 3, б. Періодичні варіації горизонтальної швидкості іонів повинні підтримуватися відповідним періодичним електричним полем. В нічній частині компоненти швидкостей є синфазними, у денній частині — протифазними, що вказує на зміну знаку електричного поля, яке підтримує цей дрейф. Порівняння вертикальної та меридіональної складових швидкостей іонів демонструє близькі просторові масштаби, чітко виражений синфазний характер коливань у нічній частині та менш виражений протифазний характер коливань у денній частині (рис. 3, в). На відміну від швидкості нейтральних частинок, амплітуда коливань горизонтальної складових швидкості іонів приблизно у п’ять разів переви-

щує вертикальну. Якщо варіації горизонтальної швидкості обумовлені дрейфом у схрещених полях, для північної півкулі мають виконуватися співвідношення $V_{iz} = -E_m / B$ і $V_{im} = E_z / B$, де B — величина магнітного поля, E_m і E_z — меридіональна і зональна горизонтальні складові електричного поля. Якщо швидкість вимірюється в м/с, а електричне в поле в мВ/м, тоді при $B = 50$ мкТл матимемо $V_{iz} = -20E_m$. Фактичний збіг кривих V_{iz} і $-20E_m$ (рис. 3, г) свідчить, що горизонтальні варіації швидкості іонів дійсно контролюються відповідними варіаціями електричного поля.

Таким чином, щоб пояснити періодичні варіації швидкості іонів у полярних областях у горизонтальному напрямку, необхідно припустити наявність періодичного горизонтального електричного поля з масштабами, що відповідають горизонтальній довжині АГХ. При цьому поле підтримує дрейф іонів у меридіональному напрямку з швидкістю, яка у п’ять разів більша, ніж швидкість нейтральних частинок у цьому ж напрямку. Періодичне електричне поле, перпен-

Значення швидкостей нейтральних частинок та іонів у північній полярній області

Виток	UT, год	Швидкість нейтральних частинок (АГХ), м/с		Швидкість іонів (РІЗ), м/с				
		V_{nv}	V_{nz}	V_{iv}	V_{iz}		V_{im}	
					овал, ніч	овал, день	овал, ніч	овал, день
8011	6.15—6.3	40	25	40	400	300	200	200
8019	19.8—20.05	35	35	30	300	300	250	150
8087	1.3—1.45	50	40	60	350	50	500	150
8088	2.7—3	30	20	30	350	300	250	300
8096	16.4—16.6	50	50	50	300	200	150	150
8100	20.95—21.15	50	50	50	600	400	600	200
8101	22.5—22.65	60	40	60	400	400	400	250
8104	3—3.2	30	20	30	300	200	200	250
8106	6.0—6.2	25	25	30	500	500	250	150
8108	9—9.2	20	20	20	450	350	250	150
8115	19.65—19.9	40	40	40	400	200	400	150
8192	16.0—16.2	50	30	30	200	100	200	50

Примітка: V_{nv} — вертикальна і V_{nz} — горизонтальна зональні складові швидкості нейтральних частинок; V_{iv} — вертикальна, V_{iz} — горизонтальна зональна, V_{im} — горизонтальна меридіональна складові швидкості іонів

дикулярне до \mathbf{V} , може бути викликане варіаціями поздовжніх струмів, майже вертикальних в області аврорального овалу, або бути наслідком поширення альвенівської хвилі. У будь-якому випадку отримані результати вказують на зв'язок АГХ, що поширюються в нейтральній атмосфері, з електромагнітними процесами в іоносфері. Як мінімум, спостерігаються узгоджені періодичні структури в нейтральній атмосфері, швидкості іонів та в електричному полі. Цей факт потребує подальших експериментальних і теоретичних досліджень.

Основні результати вимірювань швидкості нейтральних частинок та іонів у полярних областях узагальнено в таблиці на прикладі 12 прольотів супутника DE2 над північною полярною областю. У полярних областях чітко виділяються два типи періодичних рухів іонів: 1) дрейфові рухи, що проявляються в горизонтальних компонентах швидкості іонів (перпендикулярно до \mathbf{V}) з швидкостями в сотні метрів за секунду; 2) вертикальні рухи вздовж \mathbf{V} з швидкістю нейтральної складової за рахунок зіткнень іонів з нейтральними частинками. Особливу увагу привертає той факт, що дрейфові рухи іонів демонструють періодичну структуру з горизонтальними масштабами, які збігаються з масштабами АГХ. В той час як амплітуди швидкості нейтральних частинок максимальні над центральними областями полярних шапок, амплітуди швидкості іонів максимальні на границях шапок і в авроральних овалах. Відмітимо також, що в нічному секторі аврорального овалу амплітуди хвильових варіацій горизонтальних складових швидкості іонів систематично перевищують відповідні денні значення.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу даних супутникових вимірювань встановлено такі особливості відгуку іоносферної плазми на поширення АГХ в полярних областях.

1. Горизонтальні масштаби коливань швидкості іонів та нейтральних частинок приблизно збігаються і складають сотні кілометрів.

2. Над полярними шапками коливання нейтральних частинок досягають максимальних

амплітуд переважно над центральними областями шапок, при цьому вертикальна і горизонтальна складові швидкості близькі за величиною ($V_{n\text{hor}} / V_{n\text{vert}} \approx 1$).

3. Вертикальна складова швидкості іонів практично збігається з вертикальною швидкістю нейтральних частинок. Оскільки у полярних областях силові лінії геомагнітного поля майже вертикальні, це вказує на спільні рухи плазми і нейтральних частинок вздовж геомагнітного поля.

4. Горизонтальні компоненти швидкості іонів досягають максимальних амплітуд на границях полярних шапок і в авроральних овалах. В цих областях горизонтальні швидкості іонів значно перевищують швидкості нейтральних частинок і вертикальні швидкості іонів ($V_{i\text{hor}} / V_{i\text{vert}} \approx 5 \dots 10$).

Отримані результати вказують на те, що поширення АГХ у нейтральній атмосфері спричиняє відгук не тільки в іоносферній плазмі, а й у полях, ймовірно, через модуляцію провідності іоносфери. Оскільки полярні АГХ поширюються квазігоризонтально [2], коливання плазми разом з нейтральними частинками по вертикалі відбуваються в одній фазі у всій товщі іоносфери, а модуляція провідності іоносфери має бути глобальною по висоті. Як наслідок, відгук на поширення АГХ у поздовжніх струмах і обумовлених ними варіаціях горизонтальних складових δE_{hor} і δB_{hor} є дуже відчутним.

Вказані особливості хвильових варіацій нейтральних частинок та іонів повинні бути враховані при інтерпретації наземних спостережень РІЗ у високоширотній іоносфері. Зокрема, не всі іоносферні хвильові збурення, що реєструються у полярних областях, можуть бути пов'язані з поширенням АГХ. Той факт, що амплітуди РІЗ максимальні в областях авроральних овалів і на границях полярних шапок, можна інтерпретувати як локалізацію РІЗ поблизу гіпотетичних джерел їхньої генерації в овалах. Такими джерелами можуть бути, наприклад, висипання заряджених частинок. Проте у варіаціях швидкості нейтральних частинок збільшення амплітуди в овалах не спостерігається, а їхні амплітуди переважно максимальні над центральними областями полярних шапок.

Робота виконана за фінансової підтримки ДУ НАНЦ Держінформнауки України (проект № Н/2-2013) та ДФФД (проект № Ф53/177-2013).

1. Федоренко А. К. Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 5. — С. 65–73.
2. Федоренко А. К. Направления распространения акустико-гравитационных волн над полярными шапками Земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 3. — С. 34–44.
3. Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., et al. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. — 1981. — **5**. — P. 429–441.
4. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — **38**. — P. 1441–1481.
5. Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data // J. Geophys. Res. — 2002. — **107**, N A12. — doi: 10.1029/2002JA009370.
6. Ishii M., Conde M., Smith R. W., et al. Vertical wind observations with two Fabry-Perot interferometers at Poker Flat, Alaska // J. Geophys. Res. — 2001. — **106**, N A65. — P. 10537–10551.
7. 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.
8. Oyama S., Watkins B. J. Generation of atmospheric gravity waves in the polar thermosphere in response to auroral activity // Space Sci. Revs. — 2011. — **168**, N 1-4. — P. 463–473. — doi:10.1007/s11214-011-9847-z.
9. Oyama S., Watkins B. J., Maeda S., et al. Generation of the lower-thermospheric vertical wind estimated with the EISCAT KST radar at high latitudes during periods of moderate geomagnetic disturbance // Ann. geophys. — 2008. — **26**. — P. 1491–1505.

10. Spencer N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., et al. The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // Space Sci. Instrum. — 1981. — **5**. — P. 417–428.

Стаття надійшла до редакції 10.07.13

А. В. Беспалова, А. К. Федоренко

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СКОРОСТИ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ИОНОВ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Исследованы волновые возмущения полярной ионосферы по измерениям скорости нейтральных частиц и ионов на низкоорбитальном спутнике «Dynamic Explorer 2». Амплитуды горизонтальных и вертикальных составляющих скорости нейтральных частиц составляют десятки метров за секунду, при этом достигают максимальных значений преимущественно над центральными областями полярных шапок. Вертикальные скорости ионов фактически совпадают с вертикальными скоростями нейтральных частиц. Горизонтальные скорости ионов максимальны на границах полярных шапок и в авроральных овалах, где они достигают сотен метров за секунду. В ночных секторах авроральных овалов амплитуды в среднем больше, чем в дневных секторах.

А. В. Беспалова, А. К. Федоренко

WAVE VELOCITY DISTURBANCES OF NEUTRAL PARTICLES AND IONS IN THE POLAR REGIONS

The wave disturbances of polar ionosphere by measuring the velocity of neutral particles and ions with the use of LEO satellite “Dynamic Explorer 2” are investigated. Amplitudes of the horizontal and vertical components of velocity of neutral particles are tens of metres per second, with maximum values being reached for the most part over the central regions of the polar caps. Vertical velocities of ions almost coincide with vertical velocities of neutral particles. Horizontal velocities of ions are maximal at the borders of the polar caps and in the auroral ovals where they reach hundreds of metres per second. The amplitudes of horizontal ion velocities are on average higher in night sectors of auroral ovals than in daytime sectors.