

УДК 550.388, 551.520.32

А. К. Федоренко, І. В. Захаров

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

СПЕЦИФІЧНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ РЕЖИМ У ПОЛЯРНІЙ ТЕРМОСФЕРІ

На основі аналізу спостережень на супутнику «Dynamics Explorer 2» досліджено особливості поведінки акустико-гравітаційних хвиль над полярними шапками. Встановлено, що для цих хвиль коливання вертикальної складової швидкості V_z і концентрації $\delta n / n$ відбуваються синфазно. В інтервалі висот 250–350 км властивості акустико-гравітаційних хвиль над обома полярними шапками і в різні сезони подібні. Визначено фазову горизонтальну швидкість полярних хвиль, їхній період, істинну горизонтальну довжину хвилі, вертикальну довжину хвилі, напрямок поширення по вертикалі. Значення $k_z < 0$ свідчить про поширення хвиль знизу вгору від джерел, що знаходяться нижче рівня супутника. Фазова горизонтальна швидкість складає близько 700 м/с, а кут нахилу хвильового вектора до горизонту близький до 20° .

ВСТУП

Акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) є важливою складовою енергетики та динаміки верхньої атмосфери. Ці хвилі спостерігаються вже понад 60 років переважно наземними методами у вигляді рухомих іоносферних збурень (РІЗ). Згідно з даними наземних спостережень РІЗ/АГХ поділяються за спектральними властивостями на дві групи [6]: великомасштабні і середньомасштабні. Великомасштабні РІЗ мають горизонтальні довжини хвиль $\lambda_x > 1000$ км, періоди 0.5–3 год, фазові горизонтальні швидкості 400–1000 м/с. Появу таких АГХ в основному пов'язують з геомагнітними бурями, вони добре корелюють з рівнем геомагнітної активності і, як правило, поширюються з полярних областей в напрямку до екватора [3, 7]. Середньомасштабні АГХ з довжиною λ_x порядку сотні км, горизонтальними фазовими швидкостями 100–250 м/с і періодами 15–60 хв спостерігаються в різних широтних регіонах, проте найчастіше їх пов'язують з тропосферними та літосферними джерелами. Аналіз даних вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» (DE2) показав, що у полярних регіонах обох півкуль на висотах F2-області іоносфери систематично спостерігаються АГХ з характерними просторовими масштабами 500–650 км

і періодами 12.5–14.0 хв [1, 9]. Спостережувані над полярними шапками АГХ цікаві тим, що вони не підпадають під цю класифікацію: мають великі фазові швидкості (близько 700 м/с), як великомасштабні АГХ, проте їхні довжини хвиль і часові періоди характерні для середньомасштабних хвиль.

У полярних регіонах вплив електричних полів і висипань частинок на стан іоносфери часто виявляється більш визначальним, ніж динаміка нейтральної атмосфери. Внаслідок цього поведінка високоширотної іоносферної плазми значно ускладнюється, і зв'язок АГХ-РІЗ стає неоднозначним. Тому полярні АГХ є важкодоступними для наземних іоносферних спостережень. Кількість супутникових даних щодо параметрів нейтральної атмосфери у високих широтах також обмежена. У зв'язку з цим на сьогоднішній день полярні середньомасштабні АГХ є недостатньо вивченими.

Поширення хвиль в атмосфері супроводжується узгодженими варіаціями всіх атмосферних параметрів: концентрації, температури, тиску, швидкості, при цьому характер поляризаційних співвідношень між цими параметрами залежить від спектральних властивостей АГХ. Тому порівняння теоретичних співвідношень з експериментальним ходом різних параметрів дозволяє встановити основні спектральні характеристики

хвилі. В даній роботі для дослідження полярних АГХ використано дані вимірювань нейтральної концентрації та вертикальної складової швидкості на супутнику DE2.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

На супутнику DE2 концентрації нейтральних компонентів: атомарного кисню O, молекулярного азоту N₂, аргону Ar та гелію He вимірюва-

лись за допомогою мас-спектрометра в експерименті NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [4]. Розподіл сумарної концентрації вздовж витка 8257 DE2 показано на рис. 1, б. Переважають гази O і N₂, концентрації яких складають 10⁸–10⁹ см⁻³. Температура і швидкість нейтральних частинок вимірювалась на DE2 в експерименті WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [10]. Розподіл вертикальної скла-

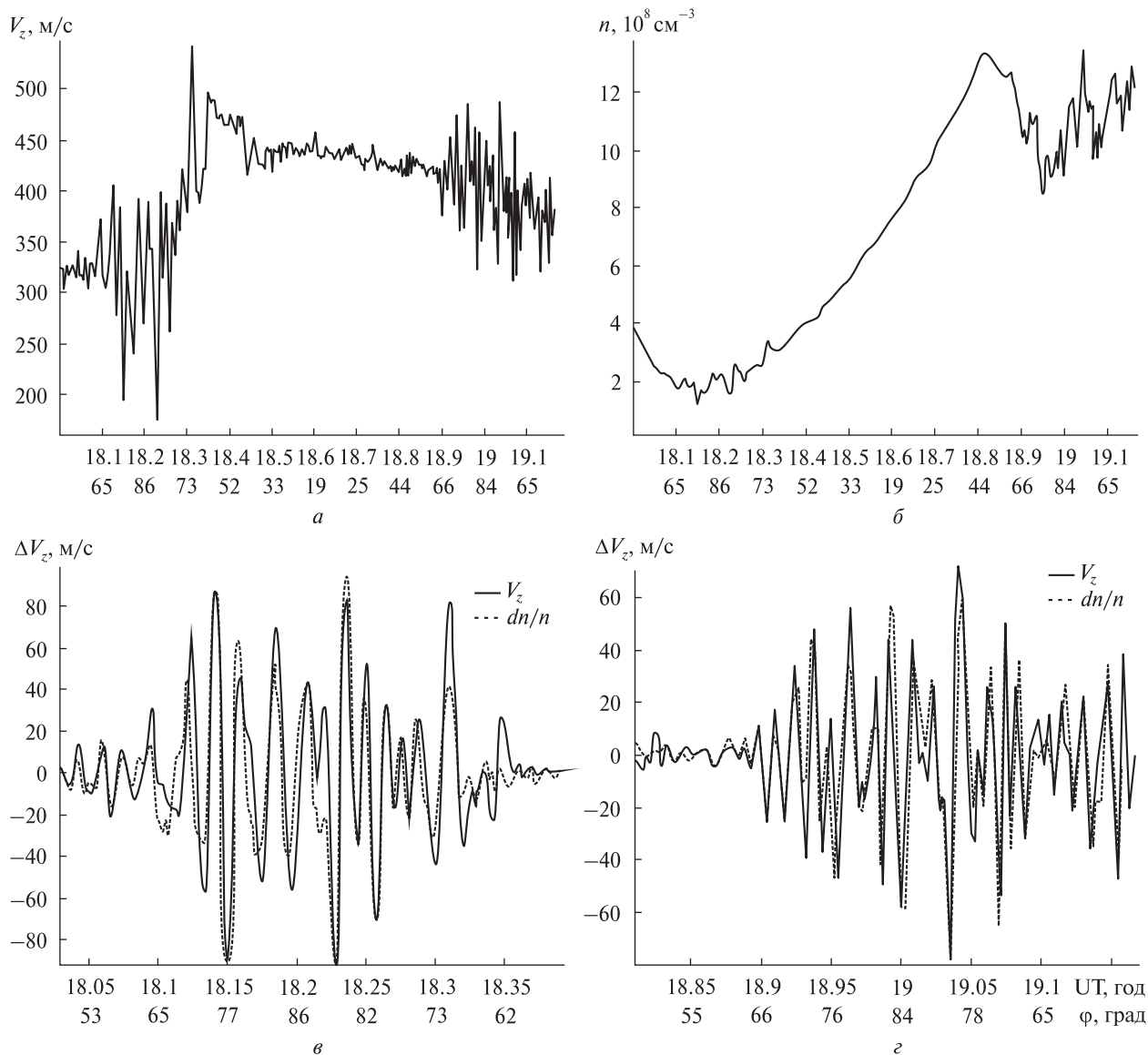


Рис. 1. Розподіл вертикальної складової V_z швидкості (а) і концентрації n нейтралів (б) вздовж витка 8257, а також порівняння варіацій V_z і n над північною (в) і південною полярними шапками (г) на цьому ж витку

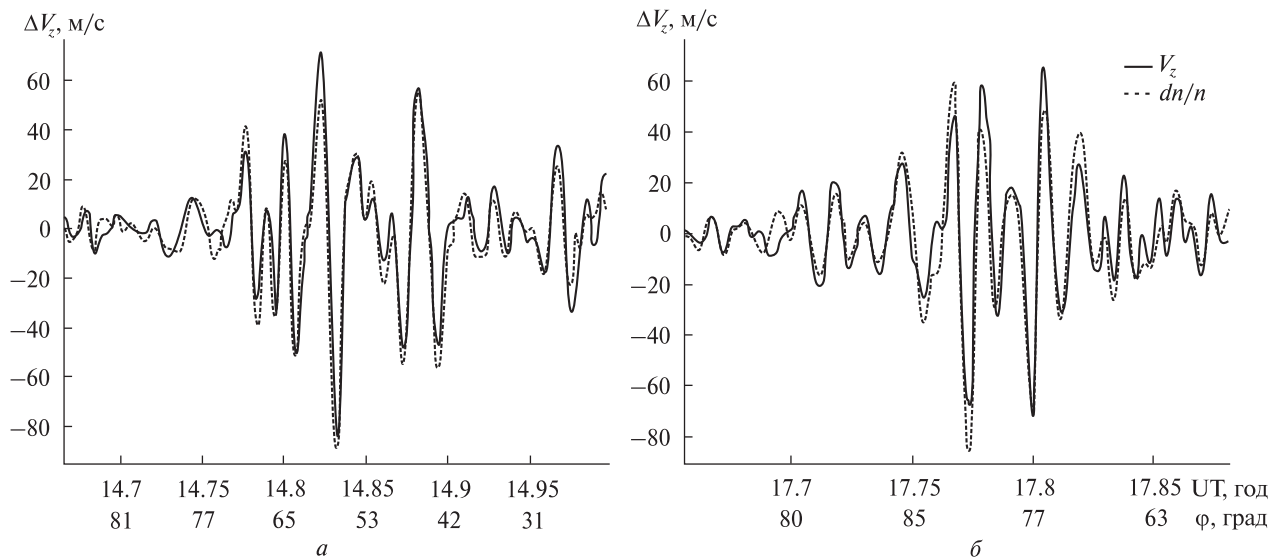


Рис. 2. Просторові профілі коливань вертикальної складової V_z швидкості та концентрації n (відносні одиниці) в полярних АГХ за даними вимірювань на DE2: *a* — північна півкуля, 20.06.82, виток 4820, *б* — південна півкуля, 21.01.83, виток 8129

дової швидкості вздовж цього ж витка показано на рис. 1, *a*. Одночасне зростання хвильової активності для обох атмосферних параметрів добре видно над обома полярними шапками. Хвильові варіації різних параметрів реєструються на фоні великомасштабних трендів іншого походження (добові зміни, висота орбіти та ін.). Як видно з рис. 1, *б*, в нейтральній концентрації найбільш наочною є зміна висоти супутника приблизно від 370 км над північною шапкою до 250 км над південною шапкою, а добові та широтні зміни менш відчутні. У складовій V_z тренд незначний, оскільки в атмосфері просто немає вертикальних рухів, швидкість яких значно перевищувала б амплітуду хвильових коливань. В даних вимірювань вертикальної швидкості тренд фізичного походження накладається на тренд інструментальний (300—400 м/с). Відокремлення хвильових змін від великомасштабного ходу параметрів здійснювалось за методом ковзного середнього, при цьому кількість точок фільтра вибиралась з умови максимальної кореляції варіацій концентрацій O і N_2 , описаною в роботі [1]. Відносні варіації концентрації $\delta n/n$ (нормування здійснюється на незбурене усереднене значення) одночасно з варіаціями вертикальної швидкості V_z на цьому ж витку показано на рис. 1,

в, г. Області підвищеної хвильової інтенсивності спостерігаються над полярними областями обох півкуль, простягаючись на кілька тисяч кілометрів, інколи — до 10 тис. км. Відносні амплітуди у варіаціях концентрації в полярних регіонах досягають 10 %, що на порядок перевищує амплітуду фонових коливань у середніх і низьких широтах (рис. 1). Подібна картина реєструвалася практично на всіх витках DE2, коли супутник опускався над полярними шапками досить низько (250—400 км). На основі зіставлення експериментальних залежностей з теоретичними поляризаційними співвідношеннями для різних параметрів ці хвильові варіації було ідентифіковано як АГХ [2, 5]. Як видно з рис. 1, коливання вертикальної швидкості і концентрації є приблизно синфазними. Подібний характер зв'язку цих параметрів спостерігається на різних витках над обома полярними шапками в різні сезони (рис. 2). Це відкриває можливості для встановлення багатьох їхніх властивостей.

ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛЯРНИХ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

В основі методик визначення спектральних властивостей АГХ на базі одноточкових супут-

никових вимірювань лежить аналіз поляризаційних співвідношень між різними параметрами. Теоретичне співвідношення між амплітудою коливань вертикальної швидкості та відносними варіаціями концентрації в АГХ має вигляд [5]:

$$V_z = \frac{\omega H \left[1 - \frac{\gamma^2 H^2 k_x^2 \omega_B^2}{(\gamma-1)\omega^2} \right]}{k_z H + i \left(\frac{\gamma \omega_B^2 H^2 k_x^2}{\omega^2} - \frac{1}{2} \right)} \frac{\delta n}{n}, \quad (1)$$

де $H = \frac{kT_n}{\bar{m}g}$ — висота однорідної атмосфери, k — стала Больцмана, T_n — температура нейтрального компонента, \bar{m} — середня маса атомів і молекул, g — прискорення вільного падіння, γ — показник адиабати, k_x, k_z — горизонтальна і вертикальна складові хвильового вектора, ω — частота хвилі, $\omega_B = g\sqrt{(\gamma-1)}/c$ — частота Брента — Вайсяля, c — швидкість звуку. Спектральні параметри ω, k_x, k_z задовольняють дисперсійне рівняння АГХ [8]:

$$k_z^2 = \frac{\omega_B^2 - \omega^2}{U_x^2} - \frac{\omega_a^2 - \omega^2}{c^2}, \quad (2)$$

де $\omega_a = \gamma g / 2c$ — частота акустичної відсічки, $U_x = \omega / k_x$ — горизонтальна фазова швидкість хвилі. Враховуючи, що $c^2 = \gamma g H$, вираз (1) перепишемо у зручнішому для подальшого аналізу вигляді:

$$V_z = \frac{\omega H \left[1 - \left(\frac{c}{U_x} \right)^2 \right]}{k_z H + i \left[\frac{(\gamma-1)}{\gamma} \cdot \left(\frac{c}{U_x} \right)^2 - \frac{1}{2} \right]} \frac{\delta n}{n}. \quad (3)$$

Залежності зсуву фаз між коливаннями вертикальної швидкості і концентрації від періоду для набору значень λ_x , близьких до спостережуваних (сотні км), показано на рис. 3. Період представлено у відносних одиницях T/T_B , де $T_B = 2\pi/\omega_B$, а довжина хвилі — в одиницях $L_x = \lambda_x / 4\pi H$. Окремі криві відповідають різним значенням L_x , близьким до спостережуваних. Обмеження кривих в області коротких періодів виникає з умови $k_z^2 > 0$. На основі (3) можна виділити два граничних випадки. Якщо період АГХ значно більший, ніж період Брента — Вайсяля, а

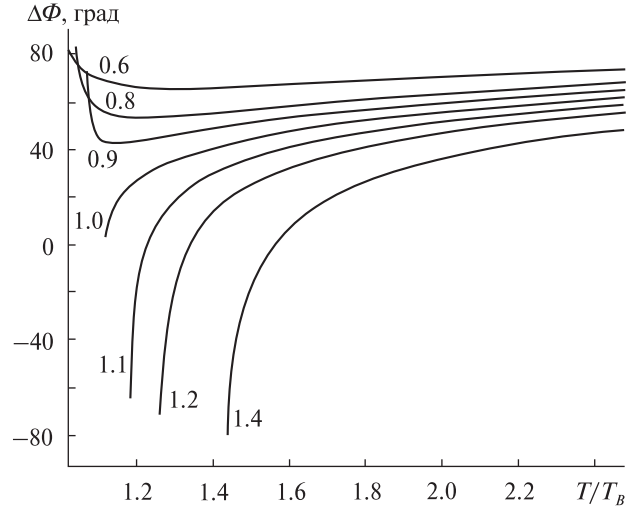


Рис. 3. Теоретична залежність зсуву фаз $\Delta\Phi$ між коливаннями вертикальної швидкості і концентрації в АГХ для $k_z < 0$ від періоду T . Числа біля кривих — значення L_x

вертикальна довжина хвилі мала порівняно з висотою однорідної атмосфери ($T^2 \gg T_B^2$, $k_z H \gg \gg 1$), коливання швидкості V_z виявляються зсунутими по фазі відносно коливань концентрації на кут, близький до $\pi/2$:

$$V_z = \frac{i\gamma\omega H}{(\gamma-1)} \frac{\delta n}{n}. \quad (4)$$

З рис. 3 видно, що дійсно, у міру збільшення періоду і зменшення довжини хвилі зсув фаз між коливаннями швидкості і концентрації поступово наближається до $\pi/2$. Як впливає з аналізу даних DE2, над полярними шапками спостерігаються АГХ, що відповідають іншому граничному випадку — коливання вертикальної складової швидкості і концентрації відбуваються практично синфазно (рис. 1, 2). Прирівнявши до нуля уявну частину виразу (3), отримаємо, що фазова горизонтальна швидкість дорівнює

$$U_x = c\sqrt{2(\gamma-1)/\gamma}, \quad (5)$$

і визначається лише властивостями середовища. Згідно з (5) $U_x \approx 0.9c$ для одноатомного О ($\gamma = 1.67$) і $U_x \approx 0.76c$ для двоатомного N_2 ($\gamma = 1.4$). Для суміші газів О і N_2 з процентним вмістом, що приблизно відповідає умовам спостережень на DE2, $U_x \approx 0.85c$, що при $c \approx 860$ м/с складає

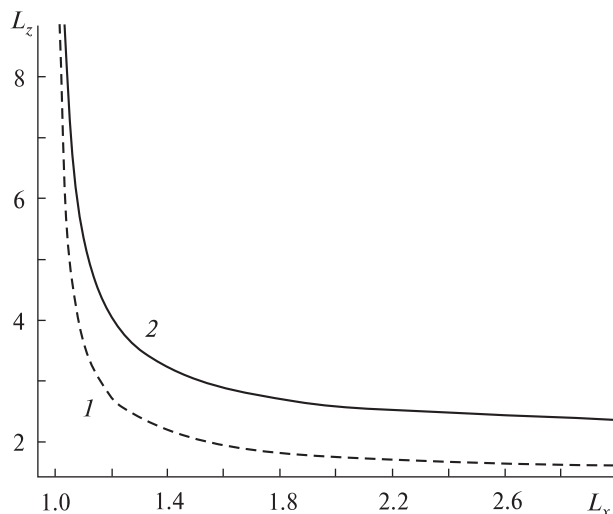


Рис. 4. Зв'язок між L_x і L_z в полярних АГХ: 1 — $\gamma = 1.4$, 2 — $\gamma = 1.67$

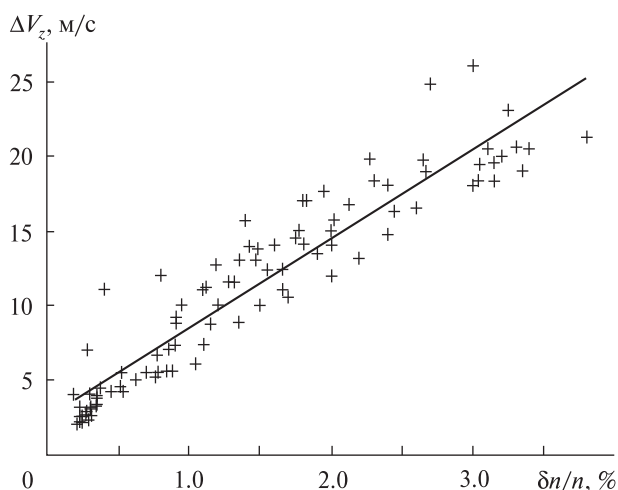


Рис. 5. Корелятивна залежність між амплітудою коливань вертикальної швидкості і амплітудою коливань концентрації в АГХ над полярними шапками

близько 730 м/с. Оскільки в АГХ завжди виконується $U_x < c$, це означає, що хвилі виникли в атмосфері не нижче 200 км (для умов середньої сонячної активності).

Оскільки чисельник у виразі (3) від'ємний, коливання швидкості і концентрації можуть відбуватися у фазі лише при $k_z < 0$, тобто джерела таких АГХ знаходяться нижче супутника. Якби джерела були локалізовані вище рівня супутника ($k_z > 0$), для АГХ з такими ж спектральними характерис-

тиками спостерігалась би протифазність коливань вертикальної швидкості і концентрації.

ГОРИЗОНТАЛЬНА ДОВЖИНА ХВИЛІ

Горизонтальна довжина хвилі — єдина спектральна характеристика АГХ, що безпосередньо вимірюється з борту супутника. Проте в однокоткових контактних вимірюваннях реєструється не істинна горизонтальна довжина λ_x , а лише її складова λ_{xs} вздовж витка, значення якої залежить від кута перетину супутником хвильового фронту. Це значно обмежує можливості супутникової діагностики хвильових процесів. Спостережувана у полярних АГХ синфазність коливань концентрації і вертикальної швидкості дозволяє опосередковано оцінити істинне значення λ_x . Підставивши в дисперсійне рівняння (2) значення горизонтальної фазової швидкості у вигляді (5), з умови $k_z^2 > 0$ отримаємо обмеження на часовий період АГХ $T > T_B \sqrt{2/\gamma}$. Звідси ж випливає і обмеження на $\lambda_x > \lambda_x^*$, де $\lambda_x^* = c T_B \cdot 2\sqrt{\gamma-1} / \gamma = 4\pi H$ (для умов спостережень на DE2 приблизно 520...560 км). У міру зменшення λ_x від граничного значення допустимий зсув фаз між коливаннями вертикальної швидкості і концентрації швидко зростає. Так, при $L_x < 0.8$ ($\lambda_x \approx 400$ км) зсув фаз між цими параметрами вже не може бути меншим за 55° при будь-яких періодах (рис. 3). З іншого боку, в спостереженнях полярних АГХ систематично переважають горизонтальні масштаби $L_x = 1...1.3$ (500—650 км) [1, 2, 9]. Оскільки вимірювана довжина хвилі може або дорівнювати (якщо фронт перетинається перпендикулярно), або бути більшою від істинної (при інших способах перетину хвильового фронту), приходимо до висновку, що істинна λ_x також належить цьому ж інтервалу. Це означає, що хвильові фронти полярних АГХ є не плоскими, а скоріше сферичними. У випадку сферичного хвильового фронту при будь-яких варіантах перетину супутником вимірюване значення довжини хвилі буде близьким до істинного.

ВЕРТИКАЛЬНА ДОВЖИНА ХВИЛІ

Для АГХ з горизонтальною фазовою швидкістю (5), дисперсійне рівняння (2) перепишемо у вигляді

$$\frac{1}{\lambda_z^2} = \frac{(2-\gamma)}{\gamma} \left[\frac{1}{(4\pi H)^2} - \frac{1}{\lambda_x^2} \right]. \quad (6)$$

Згідно з (6) граничне значення $\lambda_x^* = 4\pi H$ відповідає горизонтальному поширенню хвилі ($k_z^2 = 0$). Зв'язок між безрозмірними компонентами довжини хвилі $L_x = \lambda_x / 4\pi H$ і $L_z = \lambda_z / 4\pi H$ показано на рис. 4. Умова синфазності коливань V_z і δn виділяє гармоніки з фіксованим значенням U_x . Згідно з дисперсійним рівнянням (2) досягати такої швидкості можуть лише великомасштабні гармоніки з $L_x > 1$, $L_z > \left(\frac{\gamma}{2-\gamma}\right)^{1/2}$ (рис. 4).

ФАЗОВА ВЕРТИКАЛЬНА ШВИДКІСТЬ І ПЕРІОД

Оцінимо фазову вертикальну швидкість цих АГХ. За умови синфазності коливань V_z і $\delta n/n$ з формули (3) випливає:

$$V_z = \frac{\omega}{k_z} \left(1 - \left(\frac{c}{U_x} \right)^2 \right) \frac{\delta n}{n} = \frac{\lambda_z}{T} \frac{\gamma-2}{2(\gamma-1)} \frac{\delta n}{n} = \alpha \frac{\delta n}{n}. \quad (7)$$

На рис. 5 наведено залежність V_z від $\delta n/n$ для семи витків в інтервалі висот 250–300 км. Два витки відносяться до північної півкулі, п'ять — до південної. Залежність між амплітудами концентрації та вертикальної швидкості АГХ апроксимована методом лінійної регресії. Незважаючи на дещо відмінні фонові умови, інтегральна для різних витків залежність є чітко вираженою. Це вказує на однотипність коливального режиму над полярними шапками для всіх розглянутих витків. В загальному випадку α залежить від спектральних характеристик АГХ і властивостей середовища. В середньому коефіцієнт пропорційності $\bar{\alpha} \approx 600$. Спостерігається тенденція до зменшення α з висотою: від 650 на висотах 250–300 км до близько 500 на висотах 350–400. Це узгоджується зі зміною γ з висотою від 1.67 (переважно одноатомний газ на висотах 350–400 км) до приблизно 1.6 (70 % одноатомного O і 30 % двоатомного N₂ на висоті 250 км).

В середньому $U_z = \frac{\lambda_z}{T} = \bar{\alpha} \frac{2(\gamma-1)}{2-\gamma} \approx 1800$ м/с, що вдвічі перевищує швидкість звуку на висотах спостережень. Враховуючи, що $U_x / U_z = \lambda_x / \lambda_z$,

оцінимо значення $\lambda_z \approx 2.5\lambda_x$. З рівняння (6) отримаємо $\lambda_x = 1.3 \times 4\pi H$, $\lambda_z = 3.25 \times 4\pi H$. Кут нахилу хвильового вектора до горизонту $\varphi = \arctg(\lambda_x / \lambda_z) \approx 20^\circ$, тобто поширення цих хвиль можна вважати квазігоризонтальним. Згідно з (5) період АГХ $T = \sqrt{\frac{2}{\gamma}} \cdot \frac{\lambda_x}{4\pi H} T_B \approx 1.45 \cdot T_B$. Це значення узгоджується з даними робіт [2, 9], де періоди полярних АГХ оцінювалися іншими способами.

ВИСНОВКИ

Виявлено синфазний характер хвильових варіацій $\delta n/n$ та V_z в АГХ над полярними шапками. На основі теоретичних співвідношень можна зробити висновок, що близький до синфазності характер коливань цих параметрів в АГХ одразу вказує, що значення k_z — дійсне і від'ємне. Таким чином, спостережувані хвилі поширюються знизу вгору від джерел, що знаходяться нижче рівня супутника. Фазова горизонтальна швидкість АГХ близька до швидкості звуку $U_x \approx 0.85c$, а компоненти довжини хвилі обмежені знизу: $\lambda_x > 4\pi H$, $\lambda_z > 4\pi H \sqrt{\gamma/(2-\gamma)}$. Систематичний характер коливань над полярними шапками та подібність спектральних характеристик ймовірно вказують, що спостерігається резонансна термосферна мода, існування якої теоретично передбачалося в роботі [6]. Важко уявити систематичне джерело, яке генерувало б однотипні АГХ над обома полярними шапками в різні сезони. Спектральні характеристики полярних АГХ виділені скоріше властивостями середовища, а не джерел, які в цих регіонах можуть бути найрізноманітнішими як за потужністю, так і за характером енерговиділення (висипання частинок, дисипація систем іоносферних струмів та ін.). Фізична природа ефекту синфазності коливань $\delta n/n$ та V_z потребує подальшого дослідження і теоретичної інтерпретації.

1. Федоренко А. К. Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космична наука і технологія. — 2008. — **14**, № 5. — С. 1–7.
2. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань // Радіофізика і радіоастрономія. — 2009. — **14**, № 3. — С. 254–265.

3. *Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S., et al.* Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network // *Ann. geophys.* — 2001. — **19**. — P. 723—731.
4. *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.
5. *Dudis J. J., Reber C. A.* Composition effects in thermospheric gravity waves // *Geophys. Res. Lett.* — 1976. — **3**, N 12. — P. 727—730.
6. *Francis S. H.* Global propagation of atmospheric gravity waves // *Revs J. Atmos. and. Ter. Phys.* — 1975. — **37**. — P. 1011—1054.
7. *Hajkovicz L. A.* Auroral electrojet effect on the global occurrence pattern of large scale travelling ionospheric disturbances // *Planet. Space.Sci.* — 1991. — **39**. — P. 1189—1196.
8. *Hines C. O.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* — 1960. — **38**. — P. 1441—1481.
9. *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.
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.

Надійшла до редакції 05.12.11

A. K. Fedorenko, I. V. Zakharov

SPECIFIC OSCILLATORY MODE IN THE POLAR THERMOSPHERE

Some features of behaviour of middle-scale acoustic gravity waves (AGW) in the polar region are investigated using the «Dynamics Explorer 2» satellite data. It is found that the oscillations of vertical component of velocity V_z and relative concentration $\delta n/n$ occur in phase for these AGW. The properties of the AGW are similar above both polar caps and for different seasons at altitudes from 250 to 350 km. The main characteristics of the polar waves, namely, the horizontal phase speed, period, true horizontal wavelength, vertical wavelength, propagation direction relative to the vertical, are determined. Value $k_z < 0$ points to the wave propagation from sources that are below the satellite. The horizontal phase speed is about 700 m/s and the angle between the wave vector and surface is about 20°.