

Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань

А. К. Федоренко

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

Стаття надійшла до редакції 10 листопада 2008 р.

Виконано дослідження атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) в полярних регіонах за даними вимірювань на супутнику Dynamics Explorer 2. Розвинено методика відновлення спектральних характеристик АГХ на основі одноточкових супутникових вимірювань концентрацій різних сортів атмосферних газів. За цією методикою визначено такі характеристики полярних АГХ: вертикальне зміщення, варіації температури і тиску, напрямок поширення хвилі відносно супутника, часовий період, горизонтальну фазову швидкість і горизонтальну швидкість частинок уздовж напрямку руху супутника. Встановлено, що за різних відносних амплітуд полярні АГХ характеризуються виділеними просторовими і часовими масштабами, та висловлено припущення щодо їх резонансного характеру.

Вступ

Морфологія іоносферних збурень в полярних регіонах є дуже складною, оскільки саме в цих областях геомагнітна та сонячна активність найінтенсивніше впливає на стан верхньої атмосфери та іоносфери. Висипання заряджених частинок та модифікація магнітосферно-іоносферних струмових систем суттєво ускладнюють динаміку високоширотної плазми і нейтральної атмосфери, викликаючи генерацію різних типів збурень. Важливу роль у перерозподілі енергії високоширотних збурень у планетарному масштабі відіграють атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) [1]. Внаслідок зіткнень нейтральних частинок з іонами поширення АГХ спостерігаються на іоносферних висотах у вигляді рухомих іоносферних збурень. Оскільки плазма на висотах F2-області іоносфери значною мірою контролюється

електричними та магнітними полями, це значно ускладнює характер динамічної взаємодії нейтральної і плазмової атмосферних компонент. Унікальну можливість для дослідження цієї взаємодії надають прямі супутникові вимірювання на іоносферних висотах. Подібні дослідження є важливими не лише для поглиблення фундаментальних уявлень щодо взаємодії нейтральної атмосфери з іоносферною плазмою, але також щодо інтерпретації численних наземних спостережень іоносферних збурень. Прямих вимірювань параметрів АГХ з борту супутників було виконано відносно небагато (проекти Atmospheric Explorer, Dynamics Explorer). Це пов'язано з принциповими обмеженнями: супутник повинен бути низькоорбітальним (висота орбіти 250 ÷ 450 км) і обладнаним громіздкими датчиками параметрів нейтральної атмосфери. АГХ реєструються в прямих супутникових

вимірюваннях у вигляді квазіперіодичних варіацій атмосферних параметрів: температури, тиску, концентрації, швидкості. Оскільки фазові горизонтальні швидкості АГХ (сотні метрів за секунду) значно менші від швидкості руху супутника (близько 8 км/с), ці хвилі реєструються у вигляді квазістаціонарних періодичних структур у просторі. Таким чином, самі експериментальні можливості дослідження АГХ на основі контактних супутникових вимірювань також обмежені, тому що безпосередньо реєструється лише компонента довжини хвилі уздовж витка.

У цій роботі розвинено методику, що дозволяє за одноточковими мас-спектрометричними вимірюваннями концентрацій різних газів відтворити основні спектральні характеристики АГХ. Виконано дослідження середньомасштабних АГХ над регіонами полярних шапок за даними вимірювань на супутнику Dynamics Explorer 2 (DE2). Висота орбіти супутника становила 250 ÷ 1000 км, нахил 89.9°, період обертання близько 98 хв. Подібна орбітальна конфігурація дозволяє на кожному витку систематично досліджувати полярні регіони. Концентрації нейтральних компонент: атомарного кисню (O), молекулярного азоту (N₂), аргону (Ar) та гелію (He) вимірювались за допомогою бортового мас-спектрометра в експерименті NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) на низьких ділянках витків (приблизно нижче 500 км) [2]. Усереднені за 1 с дані за період з 15 серпня 1981 р. до 16 лютого 1983 р. отримано з бази даних <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data>.

1. Варіації АГХ у різних атмосферних компонентах

Реєстрація хвильових варіацій в нейтральних концентраціях ускладнена наявністю великомасштабних перепадів густини атмосфери уздовж витка супутника, пов'язаних з добовим та сезонним ходом параметрів, зміною висоти орбіти тощо (рис. 1). На фоні великомасштабних просторових змін концентрацій добре видно область полярних шапок з вираженими квазіперіодичними варіаціями

в інтервалі 17.7 ÷ 17.9 UT (довжиною близько 3000 км). Варіації краще виражені у важких газах N₂ і Ar. Крім низькочастотних трендів у даних вимірювань є шуми, відчутніші у концентраціях газів з малими абсолютними значеннями концентрацій Ar і He.

Відокремлення хвильових варіацій АГХ від трендів виконувалося за методом ковзаючого середнього, при цьому кількість точок усереднення вибиралась за умови максимальної кореляції варіацій двох рядів вимірювань O і N₂, описаної у роботі [3]. Основна ідея методу є такою. На відміну від великомасштабних трендів концентрацій і шумової складової варіації АГХ повинні показувати високу кореляцію у різних сортах атмосферних газів, оскільки вони відображають одну й ту ж саму хвилю. Виходячи з цих міркувань розраховувалася крос-кореляція між рядами різниць $\delta n_i(N_2) = n_i(N_2) - \overline{n_i(N_2)}$ і $\delta n_i(O) = n_i(O) - \overline{n_i(O)}$, де $\overline{n_i(N_2)}$, $\overline{n_i(O)}$ – ряди вимірювань, $\overline{n_i(N_2)}$, $\overline{n_i(O)}$ – згладжені ряди при різних значеннях точок згладжування N . Зняття тренду виконувалося згладжуванням за N точками, що відповідає максимальній кореляції $\delta n_i(N_2)$ і $\delta n_i(O)$. Відносні варіації концентрацій O, N₂, Ar над нічним сектором аврорального овалу після виключення тренду показано на рис. 2. При цьому нормування виконувалося на усереднені незбурені значення концентрацій. Узгоджений характер коливань концентрацій різних газів підтверджує адекватність процедури відокремлення хвильових варіацій. Добре видно, що на висотах спостережень (250 ÷ 300 км) у різних газах спостерігаються відносні амплітудні і фазові відмінності між профілями коливань їх концентрацій. Відносні варіації концентрації O складають кілька процентів, а важких газів – у кілька разів більші. За допомогою стандартних методів спектрального аналізу можна оцінити просторовий масштаб коливань уздовж витка супутника (горизонтальну довжину хвилі). В розглянутому прикладі цей масштаб складає близько 500 ÷ 600 км.

Відмінності між профілями коливань концентрацій різних компонент дозволяють

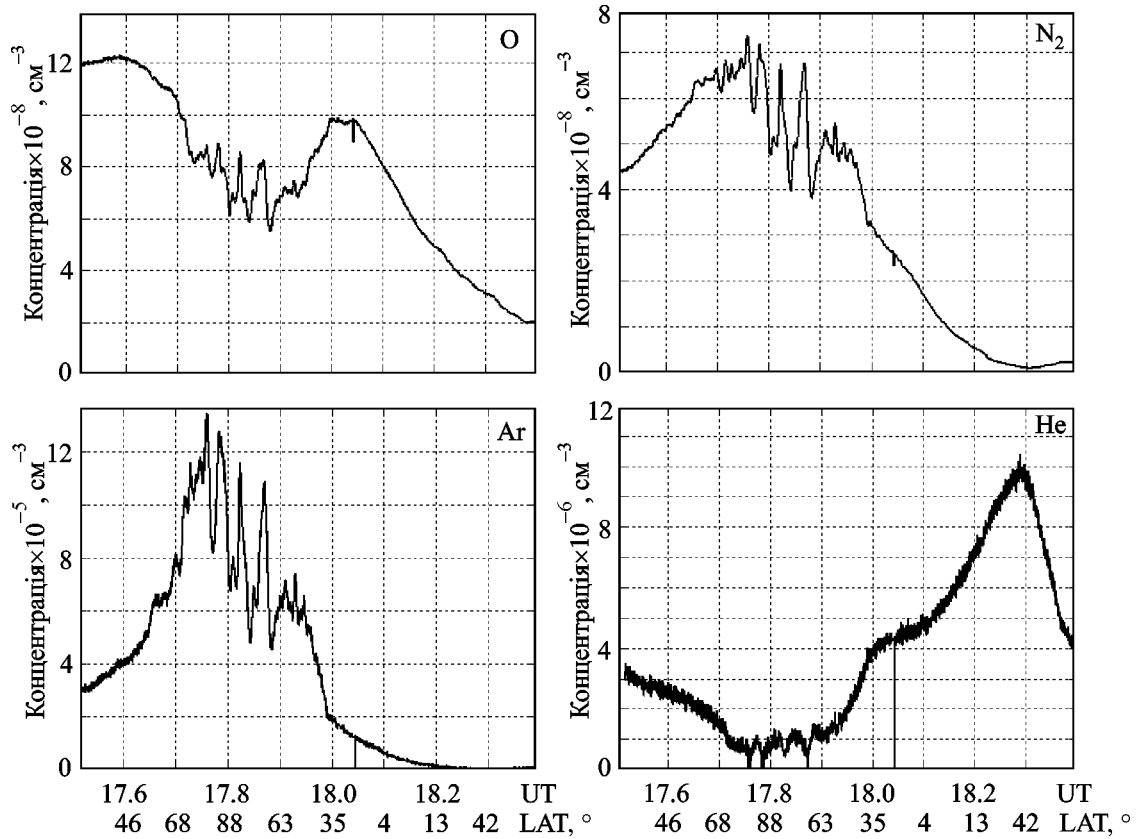


Рис. 1. Залежність концентрацій атмосферних газів уздовж витка 8304 від широти, UT – всесвітній час, LAT – інваріантна широта

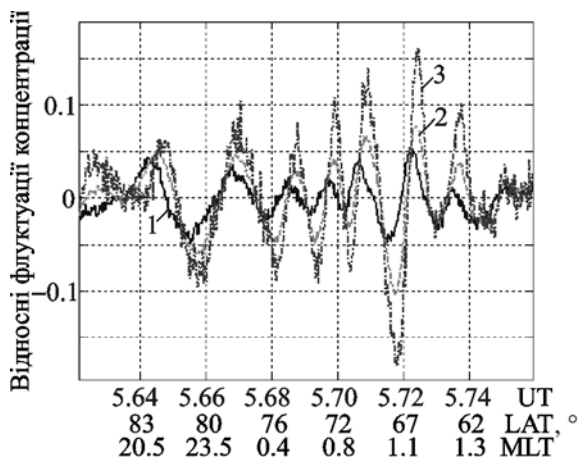


Рис. 2. Профілі коливань концентрацій атмосферних газів в нічному секторі аврального овалу (виток 8296), MLT – магнітний місцевий час: 1 – O; 2 – N₂; 3 – Ar

відтворити основні спектральні характеристики даної АГХ. Більші відносні амплітуди коливань у важких газах вказують на зміщення елементарного об'єму по вертикалі [4, 5], а фазові зсуви містять інформацію про часовий період і фазову горизонтальну швидкість хвилі [3].

2. Розділення варіацій густини на акустичну і гравітаційну складові

Пов'язані з поширенням АГХ варіації густини атмосферного газу, що спостерігаються з супутника, є наслідком дії двох ефектів: вертикального зміщення елементарного об'єму і його поздовжнього розширення (стиснення). В роботі [6] на основі теорії АГХ показано,

що варіації густини АГХ можна наближено представити як суму двох складових, так званих “гравітаційної” і “акустичної”:

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)\frac{h}{H} + \frac{V_x U_x}{c^2} = \frac{\delta\rho_{gr}}{\rho_0} + \frac{\delta\rho_{ac}}{\rho_0},$$

де h – вертикальне зміщення об’єму; $H = \frac{RT}{Mg}$ – висота однорідної атмосфери, R – універсальна газова стала, T – температура нейтральної компоненти, M – середня молекулярна маса, g – прискорення сили тяжіння; γ – показник адиабати; U_x – горизонтальна фазова швидкість; V_x – горизонтальна швидкість частинок. Гравітаційна складова включає варіації внаслідок адиабатичного розширення (стиснення) елементарного об’єму з його рухом вгору (вниз) на фоні висотного перепаду концентрації. Акустична складова – варіації внаслідок поздовжнього розширення (стиснення) як у звичайній акустичній хвилі.

Визначимо окремо внески акустичної і гравітаційної складових до результуючих варіацій концентрації на прикладі АГХ на витку 8132. На висотах спостережень переважаючими газами є O і N_2 , концентрації яких складають близько 70 і 30 % відповідно. Тому, знехтувавши малими добавками, відносні варіації АГХ можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\delta\rho}{\rho_0} &= \frac{\delta(n(O) \cdot M(O) + n(N_2) \cdot M(N_2))}{n(O) \cdot M(O) + n(N_2) \cdot M(N_2)} = \\ &= \frac{\delta(n(O) + 1.75n(N_2))}{n(O) + 1.75n(N_2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $n(O)$ і $n(N_2)$ – концентрації; $M(O) = 16$, $M(N_2) = 28$ – молекулярні маси газів.

Для обчислення гравітаційної складової $\frac{\delta\rho_{gr}}{\rho_0} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)\frac{h}{H}$ необхідно спочатку визначити h і H . Висоту однорідної атмосфери можна відразу обчислити за формулою:

$$H = \frac{n(N_2)}{n(N_2) + n(O)} H(N_2) + \frac{n(O)}{n(N_2) + n(O)} H(O),$$

де $H(O) = \frac{RT}{M(O)g}$, $H(N_2) = \frac{RT}{M(N_2)g}$. Взявши значення температури $T = 1000$ К за моделлю MSIS 90, отримуємо $H(O) \approx 53$ км, $H(N_2) \approx 30$ км.

Для визначення h використаємо співвідношення теорії АГХ для багатокомпонентного газового середовища, за яким відносна амплітуда концентрації газу сорту “ j ” пов’язана з відносною амплітудою хвилі [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta n_j}{n_j} &= \\ &= \left(1 - \frac{i(H - H_j)}{H_j} \frac{1 - \frac{\gamma^2 k_x^2 H^2 \omega_B^2}{(\gamma - 1)\omega^2}}{k_z H + i \left(\frac{\gamma \omega_B^2 H^2 k_x^2}{\omega^2} - \frac{1}{2} \right)} \right) \frac{\delta n}{n}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $H_j = \frac{RT}{M_j g}$ – висота однорідної атмосфери для газу сорту “ j ”; k_x , k_z – горизонтальна і вертикальна складові хвильового вектора; ω , ω_B – частота хвилі і частота Брента-Вяйсяля.

Амплітуда коливань вертикальної швидкості пов’язана з коливаннями концентрації [4]:

$$V_z = \frac{\omega H \left(1 - \frac{\gamma^2 H^2 k_x^2 \omega_B^2}{(\gamma - 1)\omega^2} \right)}{k_z H + i \left(\frac{\gamma \omega_B^2 H^2 k_x^2}{\omega^2} - \frac{1}{2} \right)} \frac{\delta n}{n}. \quad (3)$$

Використовуючи (2) і (3), можна отримати вирази для відносних варіацій концентрації:

$$\frac{\delta n(O)}{n(O)} = \frac{\delta n}{n} - i \frac{V_z}{\omega} \left(\frac{1}{H(O)} - \frac{1}{H} \right),$$

$$\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} = \frac{\delta n}{n} - i \frac{V_z}{\omega} \left(\frac{1}{H(N_2)} - \frac{1}{H} \right).$$

Оскільки $V_z = i\omega h$, для коливань вертикального зміщення отримуємо:

$$h = \left(\frac{H(O)H(N_2)}{H(O) - H(N_2)} \right) \left(\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} - \frac{\delta n(O)}{n(O)} \right). \quad (4)$$

На основі вимірювань концентрацій $n(O)$ і $n(N_2)$ (або іншої пари газів) за формулою (4) можна розрахувати вертикальне зміщення елементарного об'єму в АГХ. Розподіл вертикального зміщення уздовж окремого витка супутника показано на рис. 3. Чітко виділяються полярні регіони, де амплітуда вертикальних зміщень досягає кількох кілометрів. В середніх і низьких широтах вертикальне зміщення в денних умовах складає близько 200 м, вночі приблизно вдвічі більше.

Розрахувавши h і H , відразу можна обчислити гравітаційну складову варіацій густини.

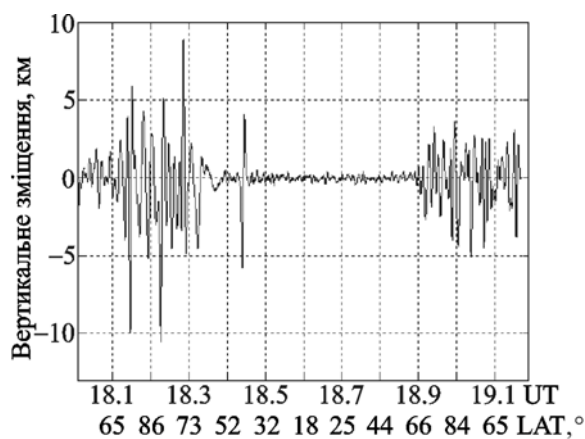


Рис. 3. Розподіл вертикального зміщення уздовж витка 8257 залежно від інваріантної широти (LAT)

Потім, віднявши гравітаційну складову від сумарних варіацій концентрації, обчислених за формулою (1), отримати акустичну компоненту АГХ:

$$\frac{\delta p_{ac}}{\rho_0} = \frac{\delta p}{\rho_0} - \frac{\delta p_{gr}}{\rho_0}. \quad (5)$$

Загальні варіації концентрації на витку 8132 показано на рис. 4, а, відокремлені гравітаційну та акустичну компоненти АГХ на рис. 4, б. Слід відзначити, що амплітуда акустичної складової у цій АГХ перевищує гравітаційну, це означає, що U_x досить близька до швидкості звуку на висотах спостережень ($c \approx 850$ м/с).

З рис. 4, б видно, що зсув фаз між коливаннями гравітаційної та акустичної компонент складає близько $\pi/2$ (максимум однієї функції відповідає нульовому значенню іншої). Точніше зсув фаз можна обчислити за допомогою крос-кореляційного аналізу: $\Delta\phi \approx 360 \cdot 14/52 = 97^\circ$, де 52 – подвійна кількість точок між максимальним і мінімальним піками, 14 – зміщення максимуму кореляції відносно нуля (рис. 4, в).

3. Відтворення варіацій температури і тиску в АГХ

Варіації тиску і температури в АГХ можна легко розрахувати через акустичну і гравітаційну компоненти варіацій концентрації за формулами [6]:

$$\frac{\delta p}{\rho_0} = \frac{\gamma U_x V_x}{c^2} = \gamma \frac{\delta p_{ac}}{\rho_0},$$

$$\frac{\delta T}{T_0} = \frac{\delta T_{ac}}{T_0} + \frac{\delta T_{gr}}{T_0} = (\gamma - 1) \frac{\delta p_{ac}}{\rho_0} - \frac{\delta p_{gr}}{\rho_0}. \quad (6)$$

Результат порівняння відносних варіацій температури, відтворених на основі мас-спектрометричних вимірювань концентрацій O і N_2

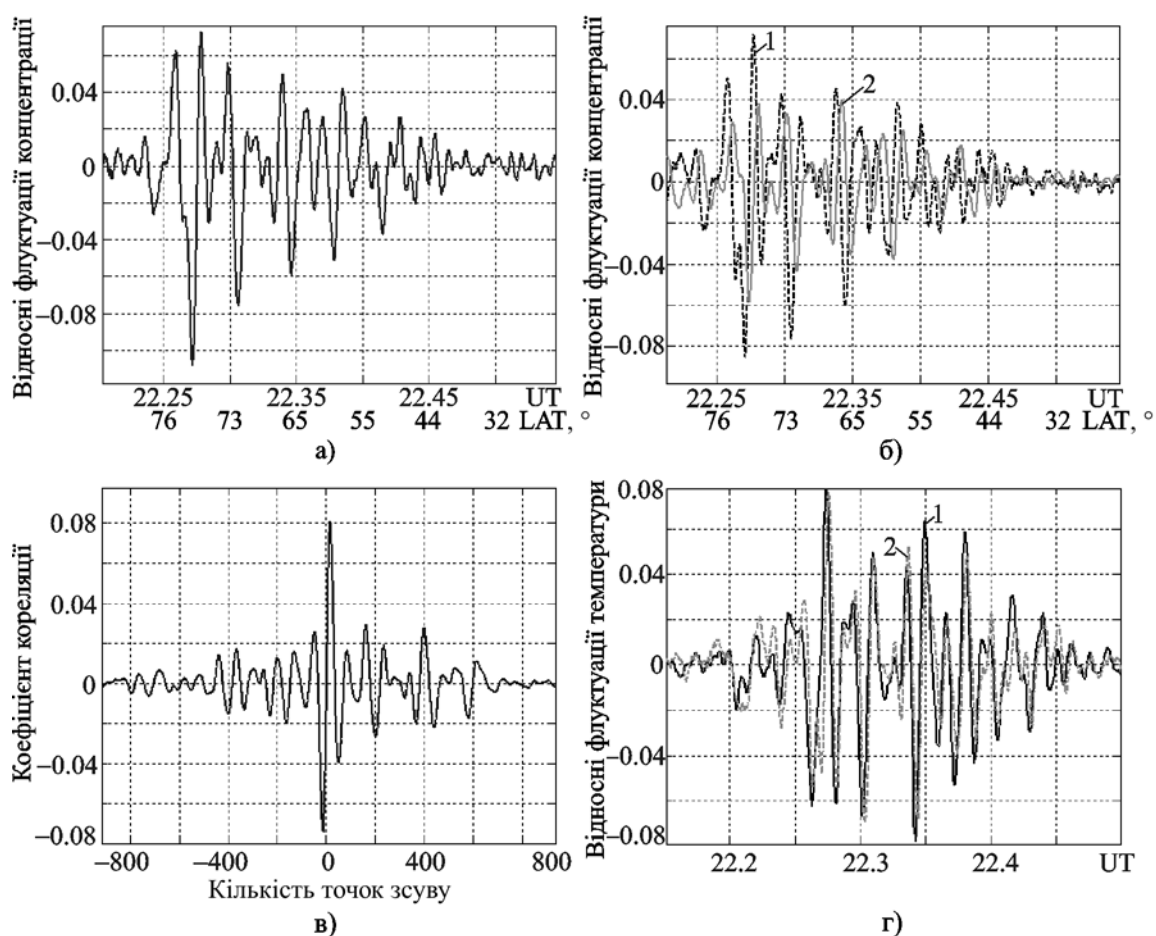


Рис. 4. Відносні флуктуації сумарної концентрації атмосфери (а), відокремлених акустичної і гравітаційної компонент (б), крос-кореляція між гравітаційною (1) і акустичною (2) складовими флуктуації концентрації (в), порівняння відносних флуктуацій температури (1 – за безпосередніми вимірюваннями в експерименті WATS, 2 – відтворені за мас-спектрометричними вимірюваннями в експерименті NACS) (г); виток 8132

за формулою (6) з варіаціями температури, безпосередньо вимірними у іншому експерименті WATS (Wind and Temperature Spectrometer) на борту DE2, показано на рис. 4, г. Узгодження результатів вказує: 1) на добру роботу різного типу приладів на DE2; 2) адекватність теорії АГХ на висотах F2-області іоносфери; 3) ефективність розділення загальних варіацій концентрації на акустичну і гравітаційну складові, що дозволяє відтворити варіації температури і тиску в АГХ лише за вимірюваннями концентрацій.

4. Інтерпретація амплітудно-фазових відмінностей коливань різних компонент, встановлення напрямку поширення АГХ

Для аналізу амплітудно-фазових відмінностей між профілями концентрацій різних газів виділимо в них окремо акустичну і гравітаційну складові. Акустична компонента є приблизно однаковою для всіх сортів атмосферних газів, якщо знехтувати відмінностями у їх температурах і швидкостях частинок. Проте гравітаційні складові є різними, оскільки крім

ефекту адіабатичного розширення-стиснення об'єму, включають і фоновий перепад концентрації даного газу за висотою, що залежить від його молекулярної маси.

Для окремих атмосферних газів варіації концентрації можна записати у вигляді:

$$\frac{\delta n(O)}{n(O)} = \frac{\delta n(O)_{gr}}{n(O)} + \frac{\delta p_{ac}}{\rho_0},$$

$$\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} = \frac{\delta n(N_2)_{gr}}{n(N_2)} + \frac{\delta p_{ac}}{\rho_0},$$

тощо для інших компонент. Тому, розрахувавши акустичну компоненту за формулою (5), легко обчислити гравітаційні складові для різних газів.

У різних газах амплітудно-фазові співвідношення між акустичною і гравітаційною компонентами суттєво відрізняються (рис. 5): в O акустична складова в декілька разів перевищує гравітаційну, відповідно результуючі варіації є близькими до $\frac{\delta p_{ac}}{\rho_0}$; в N₂ гравітаційна складова дещо перевищує акустичну; в Ar гравітаційна складова у кілька разів перевищує акустичну; в He гравітаційна компонента дещо перевищує акустичну. Гравітаційна складова у важких газах (Ar і N₂) зумовлена переважно висотним градієнтом концентрації, у порівнянні з яким адіабатичне розширення (стиснення) є незначним. Концентрація ж легкого He, навпаки, з висотою майже не змінюється, тому варіації $\frac{\delta n(He)_{gr}}{n(He)}$ викликані власне адіабатичним розширенням (стиснен-

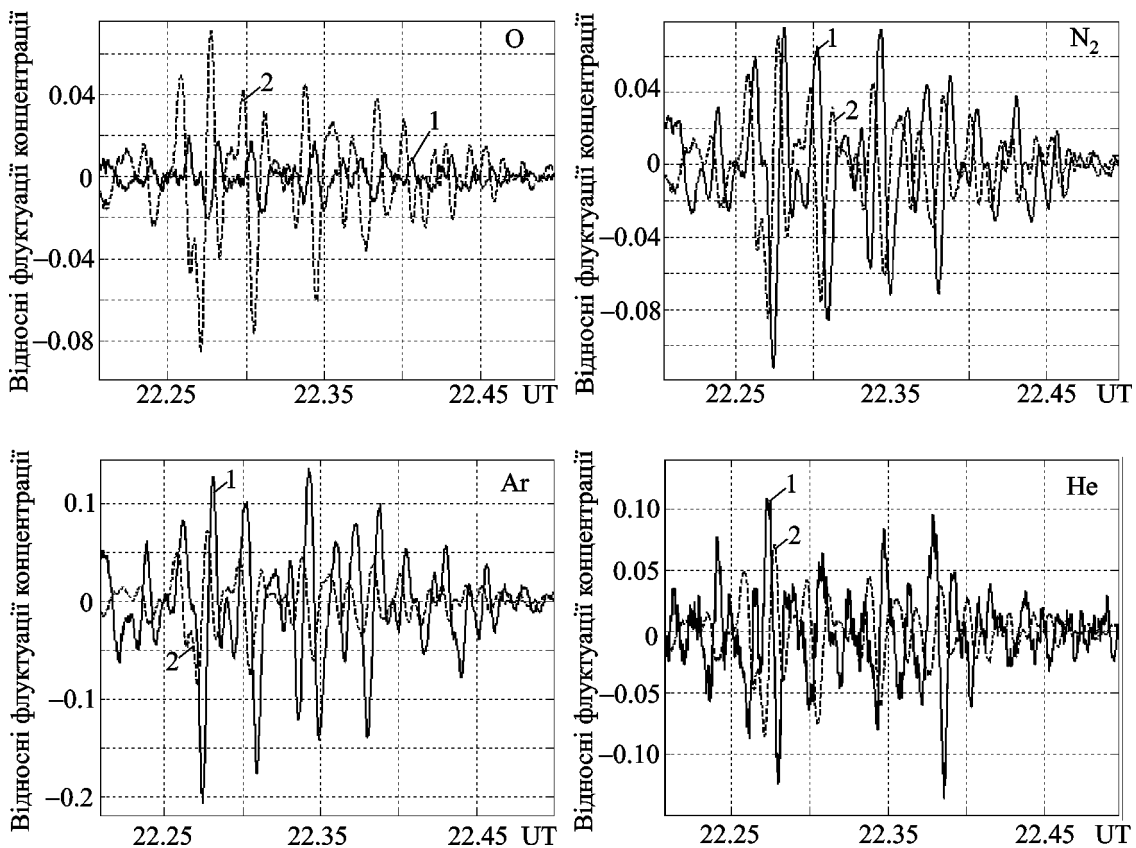


Рис. 5. Акустична (1) і гравітаційна (2) компоненти у відносних флуктуаціях концентрацій різних газів

ням). Для переважаючого O адіабатичне розширення (стиснення) майже компенсується висотним градієнтом розподілу цього газу, в результаті чого варіації $\frac{\delta n(O)_{gr}}{n(O)}$ є малими, а акустична складова – домінуючою в сумарних варіаціях концентрації O. Зсуви фаз між гравітаційними складовими у різних газах складають: близько 120° між коливаннями $\frac{\delta n(N_2)_{gr}}{n(N_2)}$ і $\frac{\delta n(He)_{gr}}{n(He)}$; $\sim 20^\circ$ між $\frac{\delta n(O)_{gr}}{n(O)}$ і $\frac{\delta n(N_2)_{gr}}{n(N_2)}$; всього 7° між $\frac{\delta n(N_2)_{gr}}{n(N_2)}$ і $\frac{\delta n(Ar)_{gr}}{n(Ar)}$.

Важливим прикладним аспектом інтерпретації фазових зсувів є можливість встановлення напрямку поширення АГХ відносно супутника за коливаннями концентрацій O і N_2 . Оскільки $\frac{\delta \rho_{ac}}{\rho_0} \sim U_x V_x$, просторовий профіль коливань акустичної складової випереджає коливання гравітаційної компоненти у напрямку поширення хвилі. Як видно з рис. 6, профілі коливань концентрацій O і N_2 виявляються “затисненими” між акустичним і гравітаційним профілями: легший кисень за фазою близький до акустичної компоненти, а важчий N_2 за фазою є ближчим до коливань вертикального зміщення. В таблиці 1 наведено

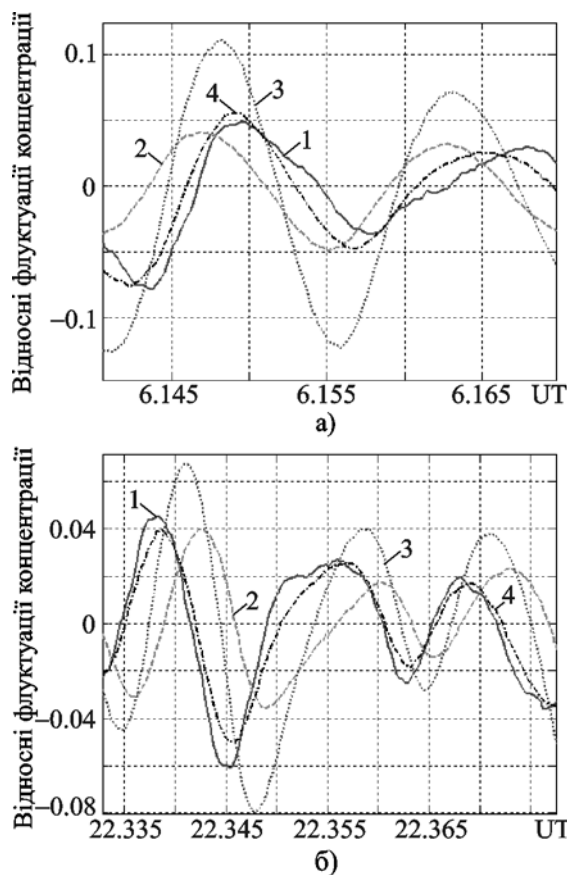


Рис. 6. Встановлення напрямку АГХ відносно супутника (профілі коливань акустичної компоненти (1), гравітаційної (2), концентрації N_2 (3), концентрації O (4)): а) – супутник наздоганяє АГХ (виток 5424), б) – супутник рухається назустріч хвилі (виток 8132). Числові значення зсувів фаз для цих АГХ наведено в табл. 1

Таблиця 1. Фазові зсуви в градусах на кількох витках між профілями коливань: акустичної і гравітаційної компонент АГХ, акустичної складової і концентрації O, концентрацій O і N_2 , концентрації N_2 і гравітаційної складової (→ – супутник наздоганяє АГХ, ← – рухається назустріч)

Виток	Напрямок АГХ	$\frac{\delta \rho_{ac}}{\rho_0}$ і $\frac{\delta \rho_{gr}}{\rho_0}$	$\frac{\delta \rho_{ac}}{\rho_0}$ і $\frac{\delta n(O)}{n(O)}$	$\frac{\delta n(O)}{n(O)}$ і $\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)}$	$\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)}$ і $\frac{\delta \rho_{gr}}{\rho_0}$
8257	→	+87°	+21.5°	+36°	+29°
8129	←	-82°	-8°	-41°	-33°
8209	←	-97°	-7°	-55°	-35°
5424	→	+82°	+25°	+37°	+20°
8132	←	-96°	-14°	-48°	-34°
8518	←	-79°	-9°	-43°	-26°

числові значення цих зсувів фаз для АГХ на кількох витках.

$$\lambda_x \geq \frac{2c\eta T_B \sqrt{(\gamma-1)}}{(\gamma-1) + \eta^2}.$$

5. Визначення періоду АГХ

і горизонтальної фазової швидкості

Аналіз відношення амплітуд гравітаційної і акустичної складових дає можливість наближено визначити недоступну в однокочових супутникових вимірюваннях характеристику АГХ – часовий період. Згідно з [6] амплітуди акустичної і гравітаційної складових пов'язані співвідношенням

$$\frac{|\delta\rho_{gr}|}{|\delta\rho_{ac}|} = \frac{[(\gamma-1)(1-(U_x/c)^2)]^{1/2}}{[1-(\omega/\omega_B)^2]^{1/2}} \frac{c}{U_x}. \quad (7)$$

Позначивши $\eta = \frac{|\delta\rho_{gr}|}{|\delta\rho_{ac}|}$ і враховуючи, що $U_x = \lambda_x/T$, $\omega = 2\pi/T$, можна отримати з (7) рівняння відносно періоду:

$$T^4(\gamma-1)c^2 - T^2\lambda_x^2((\gamma-1) + \eta^2) + \eta^2 T_B^2 \lambda_x^2 = 0,$$

розв'язком якого є

$$T^2 = \left(\lambda_x^2 [(\gamma-1) + \eta^2] \pm \sqrt{\lambda_x^4 [(\gamma-1) + \eta^2]^2 - 4(\gamma-1)c^2 \eta^2 T_B^2 \lambda_x^2} \right) \times (2(\gamma-1)c^2)^{-1}.$$

Таким чином, для заданого λ_x (визначається із спостережень) відношення амплітуд акустичної і гравітаційної складових визначає часовий період АГХ. Щоб період був дійсною величиною, горизонтальна довжина хвилі повинна бути не меншою, ніж деяке граничне значення

Графік залежності відношення T_B/T від η з кількома значеннями горизонтальних довжин хвиль, які переважали у спостереженнях (табл. 2), показано на рис. 7. На витку 8132 переважає гармоніка з горизонтальною довжиною 500 ÷ 600 км, а $\eta = 0.6 \div 0.9$. Тоді період $T_B/T \approx 890 \div 740$ с. Умова $\eta < 1$ може виконуватись лише для горизонтальних довжин хвиль, довших від граничного значення ≈ 510 км для умов спостережень. Для коротших довжин хвиль гравітаційна складова завжди переважає акустичну.

Для перевірки визначення часового періоду на основі вимірювань концентрацій його можна оцінити іншим способом, використовуючи вимірювання швидкості в експерименті WATS. У цьому експерименті вимірювались дві компоненти швидкості частинок: V_y – вертикальна компонента і V_z – горизонтальна компонента, перпендикулярна до вектора швидкості супутника. Комбінуючи вимірювання мас-спектрометра, з яких знаходимо h за формулою (4), з вимірюваннями вертикальної швидкості, оцінимо період: $T = \frac{2\pi h}{V_y} = \frac{2\pi \cdot 3000}{20 \div 30} \approx 940 \div 630$ с. Похибка вимірювання швидкості складає близько 10 м/с. Оцінені за обома методами періоди виявляються близькими за величиною і досить близькими до періоду Брента–Вяйсяля для умов спостережень (670 с).

Тоді фазова горизонтальна швидкість $U_x = \lambda_x/T \approx 730$ м/с, що складає близько 0.85 від швидкості звуку. Велике значення U_x , яке є надзвуковим від поверхні Землі і до висот близько 150 ÷ 180 км залежно від умов, одразу накладає обмеження на висоту джерела АГХ. Згідно з теоретичними уявленнями, спостережувані АГХ мають генеруватися вище 150 км.

Горизонтальну швидкість частинок можна обчислити за формулою: $V_x = \frac{c^2}{U_x} \frac{\delta\rho_{ac}}{\rho_0}$. На

Таблиця 2. Характеристики АГХ над полярними регіонами (північна (N) або південна (S) шапка). Для умов вимірювань $c \approx 860$ м/с, $T_B \approx 670$ с

Виток	Шапка	$\frac{\delta\rho}{\rho_0}$, %	Висота орбіти, км	λ_x , км	h , км	$\bar{\eta}$	T , с	V_x , м/с	U_x , м/с
320	N	6	440 ÷ 320	650	4	0.97	1120	40	580
321	N	6	400 ÷ 310	550	5	0.94	930	60	590
327	N	5	450 ÷ 310	500	4	0.85	800	45	620
329	N	10	480 ÷ 320	500	8	0.85	790	80	630
331	N	8	380 ÷ 310	550	7	0.86	870	90	630
8121	S	6	350 ÷ 250	600	4	0.70	850	50	700
8122	S	9	330 ÷ 250	650	4	0.68	990	70	650
8123	S	3	300 ÷ 250	500	1.5	0.85	750	20	660
8129	S	7	290 ÷ 250	550	4	0.75	770	70	670
8132	S	5	290 ÷ 240	650	3	0.75	770	30	710
8141	S	5	290 ÷ 245	650	2	0.85	1060	30	610
8142	N	4	280 ÷ 350	600	4	0.87	980	50	620
8152	S	5	300 ÷ 260	600	4	0.72	905	45	660
8159	S	2	290 ÷ 250	700	1.5	0.65	1010	20	690
8162	S	2	300 ÷ 255	630	2	0.75	985	20	640
8168	S	5	305 ÷ 250	650	4	0.85	1030	50	630
8173	S	2	255 ÷ 250	650	2	0.70	920	20	710
8177	S	3	290 ÷ 250	500	2	0.80	790	30	630
8181	S	2	280 ÷ 250	550	2	0.80	840	30	650
8296	S	4	260 ÷ 255	550	2	0.77	830	30	660
8303	S	7	255 ÷ 250	550	4	0.80	850	60	640
8304	S	6	250 ÷ 260	600	6	0.78	930	70	650

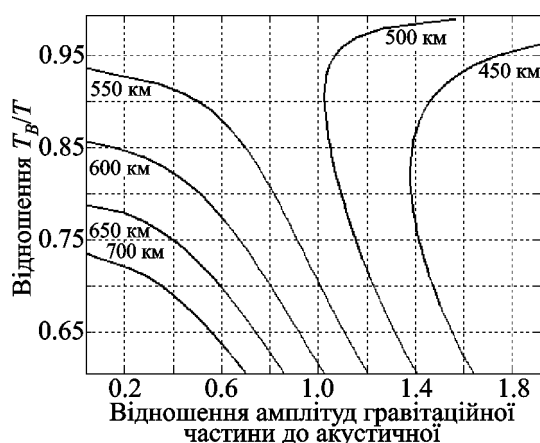
**Рис. 7.** Залежність періоду АГХ від відношення амплітуд гравітаційної і акустичної складових для кількох значень горизонтальних довжин хвиль

рис. 8 розрахована горизонтальна компонента V_x порівнюється з іншими компонентами швидкості, безпосередньо вимірними в експерименті WATS. Обидві горизонтальні компоненти швидкості, – зональна V_z , виміряна в експерименті, і розрахована меридіональна V_x , – виявились близькими за величиною. Це вказує на те, що період і швидкість визначено вірно і немає виділеного напрямку вектора швидкості частинок відносно супутника.

6. Результати спостережень АГХ над полярними регіонами

Застосовуючи описані в попередніх розділах способи, було розраховано основні параметри АГХ над полярним шапками (табл. 2). Встановлено,

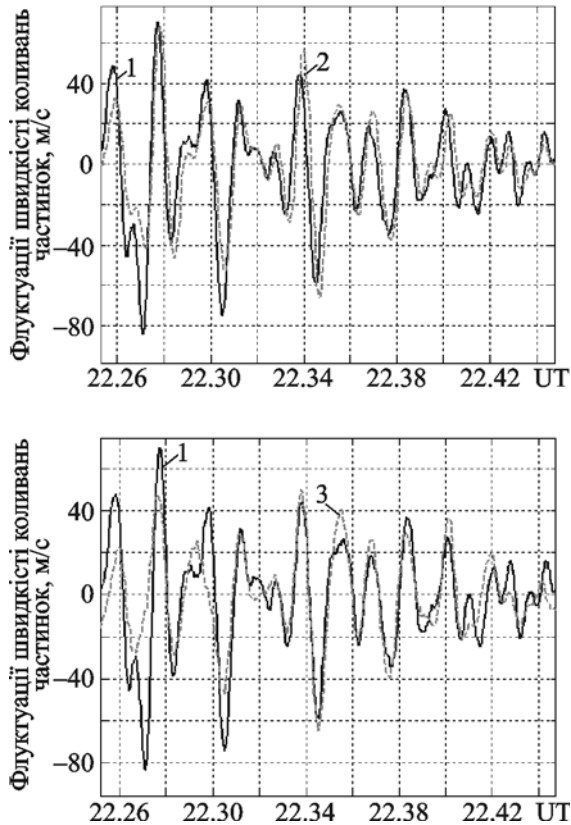


Рис. 8. Порівняння компонент швидкості частинок в АГХ на витку 8132. V_z (3) V_y (2) виміряні в експерименті WATS, V_x (1) – компонента вздовж вектора швидкості супутника, розрахована за мас-спектрометричними вимірюваннями концентрацій

що за різних значень відносних амплітуд, вертикальних зміщень і горизонтальних компонент швидкості частинок λ_x і періоди для окремих АГХ є дуже близькими між собою. Відношення T_B/T в середньому для показаних у таблиці АГХ складає близько 0.8. Отримані результати добре узгоджуються з даними роботи [7], де також досліджувалися полярні АГХ за даними DE2, однак на основі вимірювань температури і вертикальної швидкості іонів.

Висновки

Розвинено методику, що дозволяє на основі супутникових мас-спектрометричних вимірювань концентрацій визначити практично всі основні характеристики АГХ: вертикальне

зміщення, відносні варіації температури, варіації тиску, напрямок поширення відносно супутника, часовий період, горизонтальну фазову швидкість АГХ і компоненту горизонтальної швидкості частинок уздовж напрямку руху супутника.

На основі цієї методики виконано дослідження АГХ над полярними шапками за даними мас-спектрометричних вимірювань на супутнику DE2. Полярні АГХ характеризуються такими властивостями: 1) хвилі спостерігаються регулярно над полярними шапками в обох півкулях; 2) амплітуди у відносних варіаціях концентрацій складають $3 \div 10 \%$; 3) вертикальне зміщення – кілька кілометрів; 4) переважаючі горизонтальні масштаби складають $500 \div 600$ км; 5) часові періоди є близькими до періоду Брента–Вяйсяля, а фазові горизонтальні швидкості до швидкості звуку (табл. 2). Враховуючи встановлені властивості, для пояснення походження цих АГХ слід припустити або існування регулярного періодичного джерела з виділеними характеристиками, що є малоймовірним, або що вони є резонансними термосферними гармоніками, які підсилюються різними імпульсними високоширотними джерелами. На користь останнього вказує виділений просторовий масштаб хвиль і близькість періодів АГХ до періоду Брента–Вяйсяля.

Робота виконана за підтримки НДР “Арктика” НАН України за договором № 1-7/08, що виконується в рамках спільних з EISCAT проектів.

Література

1. Hunsucker R. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – Vol. 20. – P. 293-315.
2. 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.
3. Федоренко А. К. Спутниковые наблюдения среднemasштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // *Космична наука і технологія.* – 2008. – Т.14, №5. – С. 65-73.
4. Dudis J. J. and Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves // *Geophys. Res. Lett.* – 1976. – Vol. 3, No. 12. – P. 727-730.

5. 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.
6. Makhlof U. R., Dewan E. A., Isler J., Tuan T. F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95. – P. 4103-4111.
7. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., Coley W. R., Carignan G. R., Spencer N. W. Gravity waves near 300 km over the polar caps // J. Geophys. Res. – 1995. – Vol. 100. – P. 23993-24002.

Восстановление характеристик атмосферных гравитационных волн в полярных регионах на основе масс-спектрометрических спутниковых измерений

А. К. Федоренко

Исследованы атмосферные гравитационные волны (АГВ) в полярных областях по данным измерений на спутнике Dynamics Explorer 2. Разработана методика восстановления спектральных характеристик АГВ по односточечным спутниковым измерениям концентраций различных атмосферных газов. На основе этой методики определены следующие характеристики полярных АГВ: вертикальное смещение, вариации температуры и давления, направление распространения волны относительно спутника, временной период, горизонтальная фазовая скорость и горизонтальная скорость частиц вдоль направления движения спутника. Обнаружено, что при разных относительных амплитудах полярные АГВ характеризуются выделенными пространственными и временными масштабами, и высказано предположение относительно их резонансной природы.

Determination Characteristics of Atmospheric Gravity Waves in the Polar Regions Using Mass-Spectrometer Satellite Measurements

A. K. Fedorenko

Atmospheric gravity waves (AGW) in polar regions are investigated using the Dynamics Explorer 2 satellite data. The restoration technique for AGW spectral characteristics is developed. It uses one-dot satellite measurements of concentrations of different atmospheric gases. Employing this technique the following polar AGW characteristics are determined: vertical displacement, temperature and pressure variations, AGW propagation direction in relation to the satellite, time period, horizontal phase speed and horizontal speed of particles along the satellite trajectory. It is found that at different relative amplitudes the polar AGW are characterized by the determined spatial and time scales. The AGWs are assumed to be of resonant nature.