

*Г.В. ЛИЗУНОВ*, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. лабораторией, Институт космических исследований НАН и НКА Украины  
*А.Ю. ЛЕОНТЬЕВ*, аспирант, Институт космических исследований НАН и НКА Украины

## О ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ АГВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Дана робота присвячена теоретичному дослідженню вертикального транспорту енергії атмосферними гравітаційними хвилями (АГХ) у висотному діапазоні від земної поверхні до основи екзосфери. Показано, що АГХ, які існують на висотах, більших ніж 250–300 км не можуть досягти поверхні Землі, оскільки вони зазнають повного внутрішнього відбивання від термокліну. АГХ, що поширюються у нижній і середній атмосфері не досягають верхньої термосфери, оскільки вони затухають на висотах нижчих, ніж 200 км. Таким чином, хвилі, що існують у верхній термосфері ні в якому разі не можуть бути згенерованими безпосередньо наземними джерелами.

This work deals with the theoretical study of vertical energy transport by atmosphere gravity wave (AGW) in altitude range from the Earth surface up to exobase. It is shown that AGW existing above the 250–300 km can not reach the surface because they undergo total internal reflection from the thermospheric thermocline. In chain, AGW propagating in lower and middle atmosphere can not reach upper thermosphere because they undergo fading at heights below 200 km. Thus the waves existing in upper thermosphere by no means can not be generated directly by the ground sources.

**Постановка задачі.** Атмосферные гравитационные волны (АГВ) играют важную роль в динамике ионосферы [1]. Значительный интерес представляет вопрос о вкладе АГВ в вертикальный транспорт энергии в ионосфере и из нижней атмосферы в ионосферу. Теоретическое исследование этих вопросов, однако, сталкивается с большими вычислительными трудностями, поскольку в реальной вертикально-неоднородной, вязкой и теплопроводной атмосфере смоделировать распространение АГВ можно только численно. До сих пор не установлены базовые физические критерии, определяющие саму возможность связи различных высотных областей атмосферы посредством АГВ.

**Анализ литературы.** Экспериментальные сведения об ионосферных возмущениях с масштабами АГВ и их связи с приземными и космическими источниками обобщены в работах [2 – 4]. Теория вертикального переноса атмосферных возмущений представлена в [5 – 9].

**Цель статьи** – установление критериев, определяющих возможность вертикального каплинга атмосферных областей посредством АГВ.

**Приближённое дисперсионное соотношение АГВ.** Введём следующие обозначения:

$T$  – температура,

$m$  – средняя молекулярная масса воздуха,

$\gamma = c_p / c_v$  – показатель адиабаты,

$g$  – ускорение свободного падения.

Это первичные атмосферные параметры. Производные параметры:

$H = \frac{k_B T}{mg}$  – высота однородной атмосферы ( $k_B$  – постоянная Больцмана),

$c_s = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m}} = \sqrt{\gamma g H}$  – скорость звука,

$\omega_a = \frac{\gamma g}{2c_s} = \frac{c_s}{2H}$  – частота акустической отсечки,

$\omega_g = \frac{\sqrt{\gamma - 1}g}{c_s}$  – частота Брента-Вяйсяля ( $\omega_g < \omega_a$ ),

$\alpha = \omega_g / \omega_a < 1$ ,

$c_g = \frac{\omega_g}{\omega_a} c_s = 2H\omega_g$  – характерный масштаб, имеющий смысл

максимальной скорости АГВ,

$k_* = (2H)^{-1}$ ,  $\lambda_* = 2\pi/k_* = 4\pi H$  – характерные волновые масштабы.

Дисперсионное соотношение АГВ [1] между частотой  $\omega$  и волновым вектором  $\vec{k}$  можно записать в виде уравнения:

$$x^4 + px^2 + q = 0, \quad (1)$$

где  $p = -\alpha^{-2}((k_x/k_*)^2 + 1)$ ,  $q = \alpha^{-2}(k_x/k_*)^2$ ,  $x = \omega/\omega_g$  – нормированная частота,  $k_x$  – горизонтальная компонента,  $k$  – модуль волнового вектора АГВ.

Введём малый параметр

$$\xi = \xi(k_x, k_z) = 4 \frac{q}{p^2} = 4\alpha^2 \frac{(k_x/k_*)^2}{(1 + (k/k_*)^2)^2} > 0, \quad (2)$$

максимум которого  $\xi|_{\max} = \alpha^2 < 1$  достигается на плоскости волновых чисел в точке  $\{k_x = k_*$ ,  $k_z = 0\}$ , где  $k_z$  – вертикальная компонента волнового вектора АГВ. По мере удаления от этой точки  $\xi \rightarrow 0$ . Тогда приближённое решение уравнения (1) будет иметь вид:

$$x_1^2 \approx -p, \quad x_2^2 \approx -q/p. \quad (3)$$

В явном виде

$$\omega = \sqrt{\omega_a^2 + k^2 c_s^2}, \quad \omega > \omega_a \text{ (акустическая ветвь)}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{c_g k_x}{\sqrt{1 + (k/k_*)^2}}, \quad \omega < \omega_g \text{ (гравитационная ветвь)}. \quad (5)$$

На рис. 1 сплошными кривыми представлено точное численное решение дисперсионного уравнения (1), пунктирные кривые – приближённые решения (5). Наибольшая погрешность приближённого решения (около 20%)

достигается в точке  $\{k_x = k_*, k_z = 0\}$ , с ростом  $k_z$  точность быстро увеличивается.

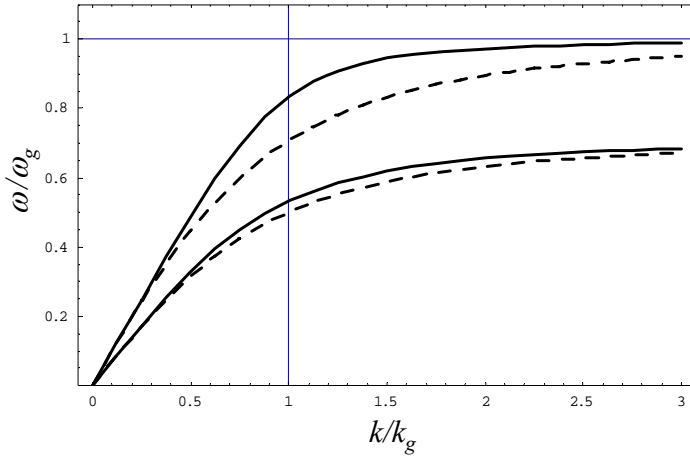


Рис. 1. Точные (сплошные кривые) и приближённые (пунктир) дисперсионные ветви АГВ при  $\theta = 0^\circ$  (верхняя пара кривых) и  $\theta = 45^\circ$  (нижняя пара).

Согласно (5), горизонтальная фазовая скорость АГВ равна:

$$\frac{\omega}{k_x} = \frac{c_g}{\sqrt{1 + k^2/k_*^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, в длинноволновом пределе  $k \rightarrow 0$  горизонтальная скорость АГВ достигает максимума  $\omega/k_x|_{\max} = c_g$ . С уменьшением длины волны (с увеличением волнового числа  $k$ ) горизонтальная фазовая скорость АГВ уменьшается.

**Диссипация АГВ в термосфере.** Чтобы количественно оценить высотный уровень, на котором ещё возможно распространение АГВ, воспользуемся эвристическим методом, предложенным в работе [10]. Как известно, диссипация неоднородностей концентрации, импульса и температуры в атмосфере происходит в результате процессов переноса (диффузии, вязкости и теплопроводности), характеризуемых кинематическим коэффициентом:

$$D = \frac{1}{3} V_T l, \quad (7)$$

где  $V_T$  – тепловая скорость,  $l$  – длина свободного пробега нейтральных частиц. Качественно оценим темп диссипации неоднородностей, вызываемых распространением АГВ. Из уравнения диффузии в гравитационном поле [11]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = D \left( \Delta + H^{-1} \frac{\partial}{\partial z} \right) \rho, \quad (8)$$

для возмущений вида

$$\delta \rho \sim \exp \{i(\omega t - \vec{k} \vec{r})\}, \quad (9)$$

находим декремент диссипации

$$\omega'' \equiv \text{Im} \omega = k^2 D. \quad (10)$$

Зададим «допустимый» темп затухания волновых неоднородностей:

$$\omega'' < \frac{\omega'}{2\pi} \quad (11)$$

за одно колебание амплитуда волны уменьшается не более чем в  $e$  раз (здесь  $\omega' \equiv \text{Re} \omega$  – частота АГВ). Условие (11), вместе с (10) и (6), выделяет на дисперсионной плоскости  $\{\omega, k\}$  области распространяющихся АГВ (рис. 2).

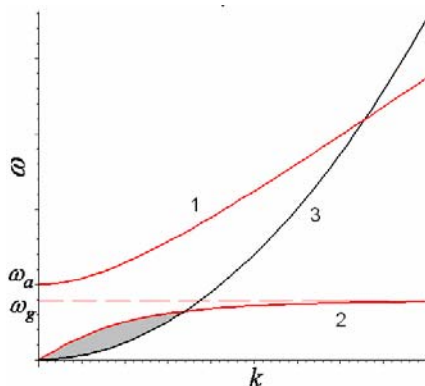


Рис. 2. Спектральный диапазон существования АГВ (заштрихован). На рисунке цифрами обозначены: 1 – дисперсионная кривая акустической волны, 2 – АГВ, 3 – декремент затухания

На рис. 3 эти области представлены в переменных период-длина волны. Рассчитанные с использованием модели MSIS-90 для реального вертикального распределения коэффициента диффузии (7) минимальные длины волн  $\lambda_{\min}$  “распространяющихся” АГВ составляют:

на высоте 150 км – десятки км,

на высоте 300 км – 200...300 км (в зависимости от солнечной активности),

на высоте 400 км – 400...700 км.

Согласно (6), с ростом  $\lambda_{\min}$  возрастает горизонтальная фазовая скорость АГВ:

$$\left. \frac{\omega}{k_x} \right|_{\min} = \frac{c_g}{\sqrt{1 + (\lambda_* / \lambda_{\min})^2}}. \quad (12)$$

Численно находим:

на высоте 150 км  $\omega/k_x|_{\min} \sim 70$  м/с,  
 на высоте 300 км  $\omega/k_x|_{\min} \sim 500$  м/с,  
 на высоте 400 км  $\omega/k_x|_{\min} \sim 700$  м/с.

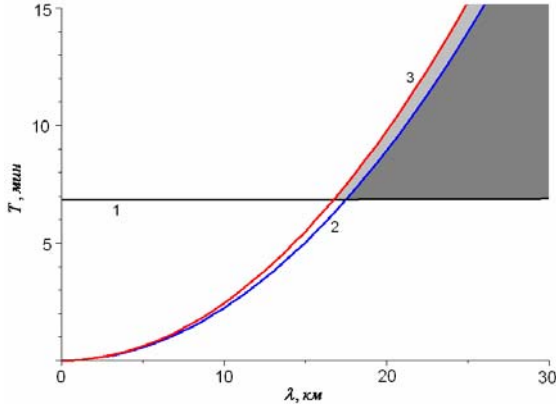


Рис. 3. Спектральный диапазон существования АГВ на высоте 150 км (заштрихован).  
 На рисунке: 1 – дисперсионная кривая АГВ, 2 – кривая декремента затухания АГВ при низкой солнечной активности, 3 – при высокой солнечной активности

Таким образом, возможные фазовые скорости АГВ ограничены как сверху, так и снизу. На каждой данной высоте максимальная горизонтальная скорость определяется локальным значением  $c_g = c_g(z)$ , минимальная – диссипативной отсечкой (12). Теоретически рассчитанные для условий минимума солнечной активности диапазоны скоростей АГВ на различных высотных уровнях представлены на рис. 4.

**На какие высоты распространяются АГВ от приземных источников?** При распространении АГВ в вертикально неоднородной атмосфере помимо частоты волны  $\omega$  остаются неизменными горизонтальное волновое число  $k_x$  и горизонтальная фазовая скорость  $\omega/k_x$ . Как видно из рис. 4, диапазоны существования АГВ в тропосфере и в верхней термосфере не перекрываются между собой. Быстрые и длинные термосферные АГВ, распространяющиеся на высотах порядка 300 км, не могут достичь поверхности Земли, поскольку они испытывают полное внутреннее отражение от основания термосферы, где скорость  $c_g$  минимальна. В свою

очередь, медленные и короткие тропосферные АГВ при распространении вверх поглощаются ниже 200 км.

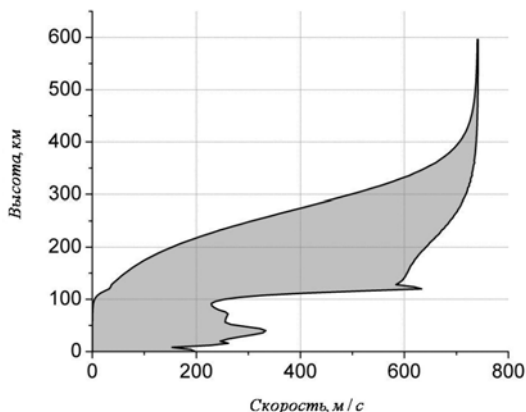


Рис. 4. Диапазоны возможных горизонтальных фазовых скоростей АГВ на различных высотных уровнях в минимуме солнечной активности

Отсюда следует, что АГВ, наблюдаемые в F2-области ионосферы, не могут быть сгенерированы приземными источниками непосредственно, это могут быть только вторичные волны. В качестве гипотетического примера такой возможности, приведём сценарий генерации перемещающихся ионосферных возмущений наземным ядерным взрывом, предложенный в [2]: на первом этапе акустический импульс от взрыва достигает ионосферы, нагревая воздух в диапазоне высот 80 – 150 км, на втором этапе разогретая область излучает АГВ, распространяющиеся в термосфере на большие расстояния от эпицентра взрыва.

#### **Выводы.**

1. Разработана параметрическая диаграмма, определяющая область существования АГВ в переменных “высота” – “горизонтальная фазовая скорость”.

2. На каждом высотном уровне диапазон горизонтальных фазовых скоростей АГВ ограничен. Наличие максимальной скорости  $c_g$  (близкой к скорости звука) является специфической особенностью, вытекающей из закона дисперсии этих волн. Минимальная скорость также ограничена. Дело в том, что в АГВ горизонтальная фазовая скорость однозначно связана с длиной волны, поэтому медленные АГВ “автоматически” являются коротковолновыми; такие волны испытывают поглощение из-за вязкости и теплопроводности. Например, на высоте ~ 300 км, где АГВ регистрировались

со спутников, диапазон горизонтальных скоростей АГВ для условий средней солнечной активности составляет 350 – 800 м/с.

3. Поскольку в вертикально неоднородной атмосфере не изменяется горизонтальная (тангенциальная к градиенту неоднородности) фазовая скорость, представленная параметрическая диаграмма определяет области высот, между которыми физически возможно распространение АГВ. Так, АГВ, распространяющиеся в нижней атмосфере, в принципе не достигают высот области F2. А ионосферные АГВ, регистрируемые на высотах порядка 300 км, не достигают поверхности Земли.

**Список литературы:** 1. *Hines C.O.* Internal gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* – 1960. – 38. – P. 1441 – 1481. 2. *Francis S.H.* Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // *J. Atm. Terr. Phys.* – 1975. – 37. – P. 1011 – 1054. 3. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophys.* – 1996. – 14. – P. 917 – 940. 4. *Черногор Л.Ф.* Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта "Попередження" // *Космічна наука і технологія.* – 1999. – 5, №1. – С. 38 – 47. 5. *Francis S.H.* Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic, dissipative atmosphere // *J. Geophys. Res.* – 1973. – 78, № 13. – P. 2278 – 2300. 6. *Погорельцев А.И., Перцев Н.Н.* Влияние фонового ветра на формирование структуры акустико-гравитационных волн в термосфере // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1996. – 36, № 2. – С. 111 – 118. 7. *Черногор Л.Ф.* Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1997. – 2, № 4. – С. 463 – 472. 8. *Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е.* Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2004. – 44, № 1. – С. 1 – 8. 9. *Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В., Литвиненко Л.Н., Лизунов Г.В., Гровс К., Молдвин М.* Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – 9, № 2. – С. 130 – 151. 10. *Del Genio A.D., Schubert G., Straus J.M.* Gravity wave propagation in a diffusively separated atmosphere with height-dependent collision frequencies // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84, NA8. – P. 4371 – 4378. 11. *Ратклифф Дж.* Введение в физику ионосферы и магнитосферы. – М.: Мир, 1975. – 296 с.

*Поступила в редколлегию 31.05.2010*