

Конвективные ячейки внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли

Онищенко О. Г.

Институт космических исследований, РАН

Институт физики Земли, РАН

Похотелов О. А.

Институт физики Земли, РАН

План

Мотивация.

Классические результаты.

Цель исследования.

Модельное гидродинамическое описание
нелинейных ВГВ.

Генерация зональных структур.

Существование вихревых структур в
атмосфере.

Мотивация. I

ВГВ распространяясь в атмосфере с экспоненциально убывающей плотностью, способны переносить энергию и импульс из нижних слоев атмосферы в верхние слои атмосферы и в D-слой ионосферы. Такой перенос может играть решающую роль в энергетическом балансе и химическом составе верхних слоев атмосферы.

Мотивация. II

Спутниковые и наземные наблюдения свидетельствуют о том, что крупномасштабные возмущения атмосферы и нижних слоев ионосферы могут быть связаны с земными катастрофами (сильные землетрясения, извержения вулканов) (ЗК). Поэтому, проблема предсказания и мониторинга ЗК тесно связана с проблемой распространения ВГВ в атмосфере

Некоторые примеры структур



Характерные параметры ВГВ

- Частота *больше* Brunt-Vaisala частоты и *меньше* частоты Кориолиса: период ~ 5 мин. – ~ 1 день.
- Характерные вертикальный масштаб волн ~ 2 км.
- Волны могут распространяться в верхние слои стратосферы и мезосферы.
- Амплитуда волны изменяется как $\rho^{-1/2}$: убывающая с высотой плотность атмосферы служит причиной роста амплитуды волн.

Классические результаты. I

$$\exp(z / 2H) \exp[i(\omega t + k_x x + k_z z)]$$

$$k_z^2 = k_x^2 \left(\frac{\omega_b^2}{\omega^2} - 1 \right) + \frac{\omega^2 - \omega_a^2}{c^2}$$

$$\omega_b^2 = \frac{(\gamma - 1)g}{\gamma H}$$

$$\omega_a^2 = \frac{\gamma g}{4H} = \left(\frac{c}{2H} \right)^2$$

Механизмы генерации

Реакция атмосферы на процессы в литосфере.
Причины генерации ВГВ:
колебания земной
поверхности, инжекция
газов, нагрев атмосферы,
возбуждение электрических
полей.

Цель

Проблема предсказания и мониторинга ЗК тесно связана с условиями распространения ВГВ.

Основная цель исследования: модификация нелинейной теории ВГВ в атмосфере со сдвиговыми зональными ветрами и в слабоионизованной ионосфере.

Модельное гидродинамическое описание нелинейных ВГВ. I

$$\rho d\mathbf{u} / dt = -\nabla p + \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\rho}{\gamma p} \frac{d}{dt} p - \frac{d}{dt} \rho + \frac{(\gamma-1)\rho}{\gamma p} \zeta_p E^2 = 0$$

$$\mathbf{u} = \{u + U(z), 0, w\}$$

$$\psi = \exp(z/2H) \bar{\psi}$$

$$\mathbf{q} = \zeta_p E^2$$

$$u = -\partial \psi / \partial z$$

$$w = \partial \psi / \partial x$$

$$\rho = \exp(-z/2H) \bar{\rho}$$

Модельное гидродинамическое описание нелинейных ВГВ. II

$$\frac{\partial}{\partial t'} \left(\nabla^2 \bar{\psi} + \frac{1}{4H^2} \bar{\psi} + \frac{1}{2H} \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} \right) - U'' \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} + J(\bar{\psi}, \nabla^2 \bar{\psi}) = - \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial x} \left(1 - \frac{\bar{\chi}}{\chi_0} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{\chi}}{\partial t'} - \omega_g^2 \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial x} + J(\bar{\psi}, \bar{\chi}) = \frac{(\gamma - 1)\zeta_P \bar{\chi}}{c_s^2 \rho_0} E^2 \quad \bar{\chi} = g \bar{\rho} / \rho_0$$

$$\omega_g^2 = g \left(\frac{1}{c_s^2} \frac{dp_0}{dz} - \frac{d\rho_0}{dz} \right) \quad \partial / \partial t' = \partial / \partial t + U \partial / \partial x$$

$$U'' \equiv \partial^2 U / \partial z^2$$

Модельное гидродинамическое описание нелинейных ВГВ. III. Линейное дисперсионное уравнение

$$\operatorname{Re} \omega \gg \Gamma$$

$$a(\omega - k_x U)^2 - k_x U''(\omega - k_x U) - \omega_g^2 k_x^2 \approx 0$$

$$a \equiv k^2 - \frac{1}{4H^2} - \frac{1}{2H} \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz}$$

$$\Gamma \approx \frac{5(\gamma-1)}{2c_s^2 \rho_0} \varsigma_p E^2$$

Модельное гидродинамическое описание нелинейных ВГВ. IV. Конвективные ячейки

$$\eta = x - (U + v)t$$

$$\bar{\chi} = - \frac{\omega_g^2}{U + v} \bar{\psi}$$

$$J(\nabla^2 \bar{\psi} - \Lambda \bar{\psi}) = 0$$

$$\Lambda = -\frac{1}{4H^2} - \frac{1}{2H} \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} - \frac{U''}{U + v} - \frac{\omega_g^2}{(U + v)^2}$$

Модельное гидродинамическое описание нелинейных ВГВ. V. Внешняя область вихря

$$\nabla^2 \bar{\psi} - \Lambda \bar{\psi} = 0$$

$$\bar{\psi} \propto \exp(-\kappa r)$$

$$\nu = \omega / k_x, \kappa = ik$$

$$\omega_g^2 < 0$$

$$U'' < 0$$

Генерация зональных структур

$$\psi = \tilde{\psi}(\mathbf{r}, t) + \Psi(\mathbf{R}, T)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(q^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \Psi = \{\psi, \nabla^2 \psi\}$$

$$\Gamma_{\max} = \frac{k^4 |\psi_k|^2}{\omega_g}$$

Генерация зональных структур

$$H = 10 \text{ km}$$

$$\omega_g = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$k^2 = 10^{-5} \text{ m}^{-2}$$

$$k^2 |\psi_k|^2 = \nu_k^2 = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$\Gamma_{\max} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Заключение

Показано, что в устойчиво стратифицированной атмосфере не могут существовать ранее предсказанные стационарные вихревые структуры.

Стационарные вихревые структуры могут существовать в неустойчиво стратифицированной атмосфере, либо в атмосфере со сдвигом зональным ветром с

Показано, что в слаботурбулентной атмосфере ВГВ могут генерировать

