

УДК 550.348.098.45; 551.511

КОНВЕКТИВНЫЕ ЯЧЕЙКИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ С ЗОНАЛЬНЫМ ВЕТРОМ

© 2013 г. О.Г. Онищенко^{1,2}, О.А. Похотелов¹, Н.М. Астафьева²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

Исследуется влияние сдвиговых зональных ветров на распространение нелинейных внутренних гравитационных волн в земной атмосфере; выведена замкнутая система нелинейных уравнений для этих волн. Получено условие существования уединенных вихрей в атмосфере со сдвиговым зональным ветром. Показано, что в такой атмосфере горизонтальная скорость перемещения вихревых конвективных ячеек может быть существенно меньше скорости звука.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, зональные ветры, вихри.

Введение

Проблема передачи энергии от литосферных движений в атмосферу и ионосферу актуальна как для фундаментальной геофизики, так и для прикладных исследований. Отклик ионосферы на возмущения нейтральной атмосферы и литосферы является частной задачей более общей проблемы взаимодействия геосфер. Внутренние гравитационные волны способны переносить энергию и импульс из нижних слоев нейтральной атмосферы в ионосферу. Источником этих волн в атмосфере могут быть извержения вулканов, тайфуны, зональные ветры, приливные возмущения, землетрясения и ряд других процессов. Распространяясь до больших высот в атмосфере с убывающей плотностью и нарастая при этом по амплитуде, внутренние гравитационные волны могут заметно возмущать ионосферу. Спутниковое и наземное электромагнитное зондирование нейтральной атмосферы и нижних слоев ионосферы свидетельствует о связи наземных катастроф с возмущениями нижних слоев слабоионизированной ионосферы. Поэтому прогнозирование катастроф на основе электромагнитного зондирования тесно связано с изучением вышеназванных волн.

Генерация нелинейных структур может ограничивать рост возмущений. Проведенные в работе [Онищенко, Похотелов, 2012] исследования свидетельствуют в пользу параметрического механизма генерации зональных структур в атмосфере мелкомасштабными внутренними гравитационными волнами конечной амплитуды. Генерируемый при этом зональный ветер является саморегулирующейся системой сдвиговых течений, существенно ослабляющих процессы переноса в направлении экватор–полюс. Такой механизм обеспечивает эффективный канал переноса энергии из области мелкомасштабной турбулентности рассматриваемых волн в область глобальных конвективных движений и играет важную роль в регуляризации турбулентности атмосферы. Этот процесс — парадигма обратного турбулентного каскада в теории двумерной анизотропной турбулентности как результата формирования регулярной крупномасштабной структуры из мелкомасштабного хаоса.

Нелинейные внутренние гравитационные волны в турбулентной атмосфере наряду с зональными ветрами могут генерировать вихревые структуры. В работах [Kaladze et al., 2008; Stenflo, Shukla, 2009], посвященных исследованию таких структур, показа-

но, что горизонтальная скорость рассматриваемых уединенных вихрей должна превышать скорость звука.

Цель данной работы – исследование влияния зональных ветров на условия существования уединенных вихрей внутренних гравитационных волн. В рамках модельного гидродинамического описания выводится замкнутая система уравнений, позволяющая описывать динамику нелинейных волн и исследовать условие существования их уединенных вихрей.

Модельное гидродинамическое описание нелинейных внутренних гравитационных волн

В качестве исходных используются два уравнения – уравнение движения

$$\rho \mathbf{d}\mathbf{u} / dt = -\nabla p - \rho \mathbf{g} \quad (1)$$

и уравнение переноса потенциальной температуры

$$d\Theta / dt = 0, \quad (2)$$

в которых $\Theta = p^{1/\gamma} / \rho$; ρ и p – плотность и давление; $\mathbf{u} = (v + U(z), 0, w)$ – скорость вещества; $d / dt = \partial / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$ – эйлеровская (конвективная) производная по времени; U – скорость зонального ветра; $\mathbf{g} = g\hat{\mathbf{z}}$ – гравитационное ускорение; $\hat{\mathbf{z}}$ – вертикально направленный единичный вектор локальной декартовой системы координат (x, y, z) ; γ – показатель адиабаты. Для описания двумерного движения несжимаемого газа в гравитационных волнах введем такую функцию тока ψ , что $v = -\partial\psi / \partial z$ и $w = \partial\psi / \partial x$. Считая возмущения слабыми, полагаем $\rho = \rho_0(z) + \tilde{\rho}(t, x, z)$ и $p = p_0(z) + \tilde{p}(t, x, z)$, где ρ_0 и p_0 – невозмущенные плотность и давление; $\tilde{\rho}$ и \tilde{p} – возмущения; при этом $|\tilde{\rho}| \ll \rho_0$ и $|\tilde{p}| \ll p_0$. В таких предположениях из уравнений (1, 2) получаем

$$\rho_0 \left(\frac{\partial}{\partial \tau} \nabla^2 \psi - U'' \frac{\partial \psi}{\partial x} + J(\psi, \nabla^2 \psi) \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x} \frac{dp_0}{dz} - \frac{dp_0}{dz} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} J(\tilde{\rho}, \tilde{p}), \quad (3)$$

и

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tau} + \left(\frac{d\rho_0}{dz} - \frac{1}{c_s^2} \frac{dp_0}{dz} \right) \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial x} + J(\tilde{\psi}, \tilde{\rho}) = 0, \quad (4)$$

где J – якобиан, представляемый как $J(a, b) = (\partial a / \partial x) \partial b / \partial z - (\partial a / \partial z) \partial b / \partial x$;

$U'' = d^2 U / dz^2$; $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial z)$; $\partial / \partial \tau = \partial / \partial t + U \partial / \partial x$.

Учитывая, что давление в атмосфере экспоненциально убывает с высотой, имеем $p_0(z) = p_0(0) \exp(-z/H)$, где $H = c_s^2 / \gamma g$ – приведенная высота атмосферы. Из уравнения движения (1) следует, что возмущения функции тока, плотности и давления можно представить в виде:

$$\psi = \hat{\psi}(t, x, z) \exp(z/2H), \quad \tilde{\rho} = \hat{\rho}(t, x, z) \exp(-z/2H), \quad \tilde{p} = \hat{p}(t, x, z) \exp(-z/2H). \quad (5)$$

Используя соотношения (5), преобразуем уравнение (3) к виду

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\nabla^2 \hat{\psi} - \frac{\hat{\psi}}{4H^2} \right) - \left(U'' - \frac{U'}{H} \right) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + J(\hat{\psi}, \nabla^2 \hat{\psi}) = -(1 - \chi) \frac{\partial \chi}{\partial x}. \quad (6)$$

Из условия адиабатичности получаем

$$\frac{\partial \chi}{\partial \tau} - \omega_g^2 \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + J(\hat{\psi}, \chi) = 0, \quad (7)$$

где $\chi = g\hat{\rho} / \rho_0$; $\omega_g^2 = (\gamma - 1)g / \gamma H$; ω_g – частота Брента–Вяйсяля (частота плавучести). Замкнутая система уравнений (6, 7) позволяет описывать нелинейную динамику внутренних гравитационных волн в атмосфере со сдвиговыми зональными ветрами с уче-

том конечного градиента равновесной температуры. В пренебрежении зональными ветрами эта система уравнений совпадает с соответствующей системой, исследовавшейся в работах [Kaladze et al., 2008; Stenflo, Shukla, 2009].

В линейном приближении из (6, 7), используя преобразование Фурье, получаем дисперсионное уравнение внутренних гравитационных волн

$$\left(k^2 + \frac{1}{4H^2}\right)\omega'^2 - k_x \left(U'' - \frac{U'}{H}\right)\omega' = k_x^2 \omega_g^2, \quad (8)$$

где ω – частота волны; $\omega' = \omega - k_x U$ – локальная частота в системе координат, движущейся с зональным ветром; $k^2 = k_x^2 + k_z^2$, $k_{x(z)}$ – $x(z)$ -компонента волнового вектора \mathbf{k} . В области, где $U'' = U' = 0$, решение дисперсионного уравнения имеет стандартный вид для внутренних гравитационных волн: $(\omega - k_x U)^2 = \omega_g^2 / (k^2 + 1/4H^2)$.

Конвективные ячейки

Для исследования стационарных структур, распространяющихся вдоль оси x со скоростью v , введем переменную $\eta = x - vt$, и в результате ее подстановки из уравнения (6) получим

$$(U - v) \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\nabla^2 \hat{\psi} - \frac{1}{4H^2} \hat{\psi} \right) + \left(U'' - \frac{U'}{H} \right) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \eta} = J(\hat{\psi}, \nabla^2 \hat{\psi}) - \left(1 - \frac{\hat{\chi}}{\chi_0} \right) \frac{\partial \hat{\chi}}{\partial \eta}. \quad (9)$$

Подставив в это выражение частное решение уравнения (7)

$$\hat{\chi} = \frac{\omega_g^2}{U - v} \hat{\psi}, \quad (10)$$

имеем

$$(U - v)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\nabla^2 \hat{\psi} - \frac{1}{4H^2} \hat{\psi} \right) + (U - v) \left(U'' - \frac{U'}{H} \right) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \eta} - (U - v) J(\hat{\psi}, \nabla^2 \hat{\psi}) + \omega_g^2 \left(1 - \frac{\hat{\psi}}{\psi_0} \right) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \eta} = 0. \quad (11)$$

Пренебрегая скалярной нелинейностью как малой величиной по сравнению с векторной (пренебрегая слагаемым, пропорциональным $\partial \hat{\psi}^2 / \partial \eta$), из уравнения (11) можно получить

$$J(\nabla^2 \hat{\psi} - \Lambda \hat{\psi}, \hat{\psi}) = 0, \quad (12)$$

где

$$\Lambda = \frac{1}{4H^2} - \frac{1}{U - v} \left(U'' - \frac{U'}{H} \right) - \frac{\omega_g^2}{(U - v)^2}. \quad (13)$$

При выводе уравнения (12) из уравнения (11) предполагалось, что $U(z) - v(z) = \text{const}$, т.е. вихревая структура в принятом приближении переносится однородным зональным потоком без деформаций. Во внешней области дипольного вихря (см., например, [Онищенко, Похотелов, Астафьева, 2008]) выполняется соотношение

$$\nabla^2 \hat{\psi} - \Lambda \hat{\psi} = 0 \quad (14)$$

Уравнение (14) при $\Lambda > 0$ имеет локализованное в пространстве решение. В пренебрежении эффектами, связанными с зональным ветром, из этого условия при $\gamma = 1.4$ получаем оценку для минимальной трансляционной скорости вихрей $v > v_{\min}$, где

$v_{\min} = 0.9c_s$ ($c_s \approx 300$ м/с – скорость звука) [Kaladze et al., 2008; Stenflo, Shukla, 2009]. Такая оценка означает, что уединенная структура должна двигаться в атмосфере со звуковой или сверхзвуковой скоростью. Учет сдвиговых эффектов зонального ветра определяется вторым слагаемым в правой части равенства (13). Первое слагаемое в этом равенстве всегда положительно, а третье в устойчиво стратифицированной атмосфере ($\omega_g^2 > 0$) всегда отрицательно. Вклад второго и третьего слагаемых определяет условие существования уединенных вихрей внутренних гравитационных волн в атмосфере с зональным ветром без учета эффектов, связанных со сдвигом (широм) зонального ветра. Знак второго слагаемого определяется знаком $(U - v)(U'' - U'/H)$.

Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют, что в атмосфере Земли со сдвиговым зональным ветром возможно существование уединенных конвективных ячеек (вихрей), если параметр Λ , определяемый уравнением (13), положителен. В пренебрежении сдвиговыми эффектами при $U'' \rightarrow 0$, $U' \rightarrow 0$ и $\gamma=1.4$ из уравнения (13) следует, что скорость вихрей в системе координат, связанной с зональным ветром, должна быть близка к скорости звука или превышать ее – $|U - v| > 0.9c_s$. Сверхзвуковое движение структур должно возбуждать ударные волны, в связи с чем невозможно в рассмотренном приближении несжимаемости атмосферы.

Зональный ветер в атмосфере на высотах 35–100 км имеет скорость около 10 м/с [Lu et al., 2009]; его сдвиг (шир) по вертикали, согласно наблюдениям [Sherman, She, 2006], на высоте 80–100 км составляет порядка $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, а на высоте 100 км может достигать $4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Из этого следует, что значение U' может быть близким к частоте Брента–Вяйсяля ($\omega_g \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$) или даже превышать ее. При таких значениях U' существенно модифицируется условие существования вихрей. Приняв $|U''| \ll |U'|/H$, $|U'| = (2 \div 4) \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $H=7$ км, при $\Lambda > 0$ получаем оценку модуля скорости структур в связанной с ветром системе координат – $|U - v| > 60 \div 110 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Отсюда следует, что скорость вихрей может быть существенно меньше скорости звука в атмосфере.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-0500376), Рамочной Программы Европейского Союза N7 (грант № 262005), Программы 8 Отделения наук о Земле РАН и Международного института космических исследований (ISSI), Берн, Швейцария.

Литература

- Онищенко О.Г., Похотелов О.А. Генерация зональных структур внутренними гравитационными волнами в земной атмосфере // Докл. РАН. 2012. Т. 445, № 1. С.86–89.
- Онищенко О.Г., Похотелов О.А., Астафьева Н.М. Генерация крупномасштабных вихрей и зональных ветров в атмосферах планет // УФН. 2008. Т. 178, № 6. С.605–616.
- Kaladze T.D., Pokhotelov O.A., Shah H.A., Khan M.I., Stenflo L. Acoustic-gravity waves in the Earth's ionosphere // J. Atmosp. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70. P.1607–1616.
- Lu X., Liu A.Z., Swenson G.R., Li T., Leblanc T., McDermit S. Gravity wave propagation and dissipation from the stratosphere to the lower thermosphere // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D11101. doi:10.1029/2008JD010112.

Sherman J.P., She C.-Y. Seasonal variation of mesopause region wind shears, convective and dynamic instabilities above Fort Collins, CO: A statistical study // *J. Atmosp. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P.1061–1074.

Stenflo L., Shukla P.K. Nonlinear acoustic-gravity waves // *J. Plasma Phys.* 2009. V. 75. P.841–847.

Сведения об авторах

ОНИЩЕНКО Олег Григорьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; Институт космических исследований РАН. 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: 254-88-05. E-mail: onish@ifz.ru

ПОХОТЕЛОВ Олег Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 254-88-05. E-mail: pokh@ifz.ru

АСТАФЬЕВА Наталия Михайловна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт космических исследований РАН. 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: 333-21-45. E-mail: ast@iki.rssi.ru

CONVECTIVE CELLS OF INTERNAL GRAVITY VORTICES IN THE EARTH ATMOSPHERE WITH ZONAL WIND

O.G. Onishchenko^{1,2}, O.A. Pokhotelov¹, N.M. Astafieva²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

Abstract. The effect of shear of zonal winds on the dynamics of nonlinear internal gravity waves in the Earth's atmosphere is studied. Closed system of nonlinear equations describing these waves is derived. A condition for the existence of solitary vortices in the atmosphere with shear zonal wind is obtained. It is shown that in the atmosphere with zonal shear wind the horizontal velocity of the vortices can be substantially smaller than the sound speed.

Keywords: internal gravity waves, zonal winds, vortices.