

УДК 550.348.098.45; 551.511

КОНВЕКТИВНЫЕ ЯЧЕЙКИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ОКРЕСТНОСТИ МЕЗОПАУЗЫ

© 2015 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

Изучено влияние неоднородных ветров со сдвигом скорости на вихревую структуру (типа роллов) в атмосфере. Выведена замкнутая система уравнений, описывающих нелинейную динамику внутренних гравитационных волн в атмосфере с конечными вертикальными градиентами температуры и ветра. В квазистационарном приближении полученная система нелинейных уравнений приводится к одному, имеющему вихревое решение.

Исследована зависимость пространственных масштабов и скорости перемещения роллов от параметров атмосферы и неоднородности ветра. Показано, что эти вихревые структуры могут существовать в динамически неустойчивой окрестности мезопаузы, играя решающую роль в конвекции мезосферы и генерации атмосферной турбулентности, и влиять на глобальную циркуляцию.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, мезопауза, устойчивость, нелинейные структуры.

Введение

Изучение взаимодействия литосферы с нейтральной атмосферой и ионосферой является одной из актуальных задач фундаментальной геофизики и прикладных исследований. Согласно современным представлениям, за один из самых популярных каналов связи атмосфера-ионосфера ответственны внутренние гравитационные волны [Fritts, Alexander, 2003]. Распространяясь до больших высот с нарастанием амплитуды возмущений в атмосфере с убывающей плотностью, эти волны способны возмущать ионосферу. Спутниковое и наземное электромагнитное зондирование нижних слоев ионосферы свидетельствует о связи наземных катастроф с возмущениями нижних слоев слабоионизированной ионосферы. Поэтому наблюдение катастроф и их прогнозирования методом электромагнитного зондирования тесно связаны с распространением внутренних гравитационных волн. Согласно современным представлениям, турбулентность и турбулентный перенос в окрестности мезопаузы на высотах 80–105 км определяется именно этими волнами [Gardner, Zhao, Liu, 2002; Zhao, Liu, Gardner, 2003].

Вертикальный градиент температуры – один из наиболее важных параметров, определяющих динамику вертикального переноса и конвективной устойчивости реальной атмосферы, которая конвективно устойчива, если квадрат частоты Брента–Вяйсяля, определяемой как

$$\omega_g^2 = g \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma H} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} \right), \quad (1)$$

больше нуля. Здесь g – ускорение свободного падения; d/dz – производная по высоте; γ – показатель адиабаты; H – локальный приведенный масштаб высоты атмосферы; T – невозмущенная температура. В области, где температура убывает с высотой и $\omega_g^2 < 0$, зарождается мощный вертикальный конвективный перенос. Наряду с конвек-

тивной (статической) неустойчивостью в атмосфере с неоднородным по высоте ветром может развиваться динамическая неустойчивость, если число Ричардсона

$$Ri = \frac{\omega_g^2}{U'^2} \quad (2)$$

меньше критической величины. Здесь $U' = dU/dz$; $U(z)$ – горизонтальная скорость ветра. Необходимое условие динамической неустойчивости плоскопараллельного течения – $Ri < 1/4$. Параметры атмосферы и условия неустойчивости существенно зависят от высоты, широты и сезона. Амплитуда внутренних гравитационных волн, распространяющихся в атмосфере с экспоненциально убывающей плотностью, экспоненциально растет с высотой, достигая больших амплитуд в окрестности мезопаузы [Gardner, Zhao, Liu, 2002]. Рост амплитуды волн служит причиной параметрической генерации зональных ветров (структур). Параметрическая неустойчивость этих волн исследовалась в работах [Horton, Kaladze, Van Dam, 2008; Онищенко, Похотелов, 2012]. Наряду с генерацией зональных структур нелинейность внутренних гравитационных волн может служить причиной образования вихревых конвективных ячеек (роллов) на нелинейной стадии развития конвективной или динамической неустойчивости. Изучению вихревых структур рассматриваемых волн посвящен целый ряд работ (см., например, [Kaladze, Tsamalashvili, 1997; Stenflo, Shukla, 2009]). Недавно проблема вихревых структур в атмосфере Земли получила дальнейшее развитие в работе [Onishchenko, Pokhotelov, Fedun, 2013], где были пересмотрены результаты предыдущих исследований и показано, что конвективные ячейки (вихри) внутренних гравитационных волн могут существовать только в конвективно неустойчивых слоях атмосферы.

В последние годы проблему глобального изменения климата тесно связывают с изменением содержания озона и углекислого газа в области мезопаузы. В отличие от тропосферы, где присутствие парниковых газов служит причиной разогрева атмосферы, увеличение содержания CO_2 в мезосфере ведет к охлаждению атмосферы из-за радиационного длинноволнового излучения CO_2 . В окрестности мезопаузы на высотах 80–105 км [Gardner, Zhao, Liu, 2002] существуют неоднородные ветры со скоростями порядка 20–40 м/с и наблюдаются пространственные структуры. Генерируемые вихревые структуры могут стать причиной возникновения аномального переноса импульса и вещества в мезосфере. Поэтому особый интерес представляет исследование нелинейных конвективных ячеек (роллов) в окрестности мезопаузы с неоднородным ветром. Этой проблеме посвящена настоящая работа.

Цель данной работы – исследование нелинейных вихревых структур (конвективных ячеек) внутренних гравитационных волн в атмосфере с учетом конечных вертикальных градиентов температуры и ветров. Сначала выводится замкнутая система нелинейных уравнений для внутренних гравитационных волн; затем последовательно исследуются их нелинейные вихревые структуры (конвективные ячейки), обсуждаются характерные параметры вертикальных градиентов температуры и ветра в окрестности мезосферы и, наконец, обсуждаются полученные результаты.

Модельное описание ВГВ конечной амплитуды

В данной работе нас будут интересовать динамические характеристики мезосферы в пренебрежении такими диссипативными процессами, как вязкость, теплопроводность, приток тепла извне и трение. В качестве исходных используются два уравнения, одно из которых – уравнение движения

$$\rho \mathbf{du} / dt + \nabla p - \rho \mathbf{g} = 0; \quad (3)$$

второе – уравнение переноса потенциальной температуры Θ , имеющее вид

$$d\Theta/dt=0. \quad (4)$$

$\Theta = p^{1/\gamma}/\rho$, где γ – показатель адиабаты; ρ и p – плотность и давление; $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$ – эйлерова (конвективная) производная по времени; \mathbf{u} – скорость вещества; $\mathbf{g} = -g\hat{\mathbf{z}}$ – гравитационное ускорение; $\hat{\mathbf{z}}$ – единичный вектор локальной декартовой системы координат (x, y, z) , направленный вдоль вертикали. Для описания двумерного движения несжимаемого газа в гравитационных волнах примем $\mathbf{u} = (u + U(z), 0, w)$ – скорость вещества, где $u = -\partial\psi/\partial z$ и $w = \partial\psi/\partial x$, $\psi(t, x, z)$ – функция тока; $U(z)$ – скорость ветра (зонального или меридионального).

Считая возмущения слабыми, полагаем $\rho = \rho_0(z) + \tilde{\rho}(t, x, z)$, $p = p_0(z) + \tilde{p}(t, x, z)$ и $\Theta = \Theta_0(z) + \tilde{\Theta}(t, x, z)$, где ρ_0, p_0, Θ_0 – невозмущенные плотность, давление, потенциальная температура; $\tilde{\rho}, \tilde{p}, \tilde{\Theta}$ – возмущения. При этом из уравнений (3) и (4) получаем

$$\frac{d}{d\tau} \left(\nabla^2 \psi + \frac{d \ln \rho_0}{dz} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \left(U'' + U' \frac{d \ln \rho_0}{dz} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x} + J(\psi, \nabla^2 \psi) = -\frac{\partial \chi}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0^2} J(\tilde{\rho}, \tilde{p}), \quad (5)$$

$$\frac{d\chi}{d\tau} - \omega_g^2 \frac{\partial \psi}{\partial x} + J(\psi, \tilde{\rho}) = 0. \quad (6)$$

Здесь $J(a, b) = (\partial a / \partial x) \partial b / \partial z - (\partial a / \partial z) \partial b / \partial x$ – якобиан; $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial z^2$; $\chi = g\tilde{\rho} / \rho_0$; $U'' = d^2 U / dz^2$ и $d/d\tau = \partial/\partial t + U \cdot \partial/\partial x$.

В невозмущенной мезосфере давление экспоненциально убывает с высотой –

$$p_0(z - z_0) = p_0(z_0) \exp[-(z - z_0) / H],$$

где $H = c_s^2 / \gamma g$ – шкала высот; $c_s = (\gamma p_0 / \rho_0)^{1/2}$ – скорость звука.

Будем считать, что невозмущенная температура и плотность изменяются с высотой, как $T(z - z_0) = T(z_0) \exp[-(z - z_0) / L_T]$ и $\rho(z - z_0) = \rho(z_0) \exp[-(z - z_0) / L_\rho]$ где L_T и L_ρ – характерные масштабы вертикальных градиентов температуры и плотности. В мезосфере $L_T > 0$. Воспользовавшись уравнением состояния идеального газа $p/\rho T = \text{const}$, получим уравнение для невозмущенной плотности

$$\rho_0(z - z_0) = \rho_0(z_0) \exp[-(z - z_0) / L_\rho],$$

где L_ρ – характерный масштаб вертикального градиента плотности.

Из уравнения состояния идеального газа получаем соотношение $1/L_\rho = 1/H - 1/L_T$. Используя подстановку $\psi = \hat{\psi}(t, x, z) \exp[(z - z_0) / 2L_\rho]$ и $\chi = \hat{\chi}(t, x, z) \exp[(z - z_0) / 2L_\rho]$, преобразуем уравнения (5), (6) к следующему виду:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\nabla^2 \hat{\psi} \right) - U'' \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + J \left(\hat{\psi}, \nabla^2 \hat{\psi} \right) = -\frac{\partial \hat{\chi}}{\partial x}, \quad (7)$$

$$\gamma \frac{\partial \hat{\chi}}{\partial \tau} - \omega_g^2 \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + J(\hat{\psi}, \hat{\chi}) = 0. \quad (8)$$

Уравнения (7), (8) получены из (5), (6) в предположении, что характерный масштаб изменения невозмущенной плотности атмосферы L_ρ много больше длины волны, считая,

что $L_p^{-1} \ll (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ и $U'' \gg UL_p^{-1}$. Замкнутая система уравнений (7), (8) может быть использована для численного моделирования динамики нелинейных внутренних гравитационных волн в окрестности мезосферы. Из этих же уравнений следует закон сохранения энергии волн $\partial E / \partial t = 0$, где

$$E = \frac{1}{2} \int \rho_0 \left[(\nabla \Psi)^2 + \frac{\chi^2}{\omega_g^2} \right] dx dz, \quad (9)$$

и может быть получено уравнение

$$\frac{d^2}{d\tau^2} \nabla^2 \hat{\Psi} - U'' \frac{d^2 \hat{\Psi}}{d\tau dx} + \omega_g^2 \frac{\partial^2 \hat{\Psi}}{\partial x^2} + \frac{d}{d\tau} J \left(\hat{\Psi}, \nabla^2 \hat{\Psi} \right) - \frac{\partial}{\partial x} J \left(\hat{\Psi}, \hat{\chi} \right) = 0. \quad (10)$$

В пренебрежении вкладом нелинейных слагаемых для возмущений в виде $\hat{\Psi} = \Psi(z) \exp(-i\omega t + ik_x x)$ из уравнения (10) следует уравнение Тейлора–Голдстейна:

$$\Psi'' + \left(\frac{U''}{U-c} + \frac{\omega_g^2}{(U-c)^2} - k_x^2 \right) \Psi = 0, \quad (11)$$

где $\Psi'' = d^2 \Psi / dz^2$; $c = \omega / k_x$ – горизонтальная фазовая скорость волн. Влияние неоднородности ветра на поглощение, преломление, отражение и захват волн в модели атмосферных слоев с конечными границами детально изучалось в ряде работ (см., например, [Dunkerton, 1987; Yuan, Fritts, 1989]). В нейтрально стратифицированных слоях мезосферы при $\omega_g^2 = 0$ уравнение Тейлора–Голдстейна сводится к уравнению Орра–Зоммерфельда (или Рэлея), описывающего рэлей-тэйлоровскую неустойчивость (см., например, [Онищенко, Похотелов, Астафьева, 2008]).

Конвективные ячейки

Для поиска стационарных вихревых решений в системе координат, движущейся со скоростью v вдоль оси x , введем новую переменную $\eta = x - vt$, в результате подстановки которой система двух уравнений (7), (8) может быть сведена к одному уравнению

$$J_1 \left[\nabla^2 \hat{\Psi} - \Lambda \hat{\Psi}, \hat{\Psi} + (U-v)z \right] = 0, \quad (12)$$

где $J_1[a, b] = (\partial a / \partial \eta) \partial b / \partial z - (\partial a / \partial z) \partial b / \partial \eta$ и

$$\Lambda = -\frac{U''}{U-v} - \frac{\omega_g^2}{(U-v)^2}. \quad (13)$$

Уравнение, подобное (12), ранее детально исследовалось аналитическими и численными методами в ряде работ (см., например, [Ларичев, Резник, 1976; Михайловский, Лахин, Михайловская, 1984; Петвиашвили, Похотелов, 1989; Онищенко, Похотелов, Астафьева, 2008]), где было показано, что оно имеет решение в виде дипольных вихрей, во внешней области которых выполняется условие

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

Уединенные вихри в атмосфере с конечным вертикальным градиентом температуры существуют, если $\Lambda > 0$. Соотношение (13) связывает характерный масштаб вих-

ря (конвективной ячейки) $L = \Lambda^{-1/2}$ с характерными параметрами атмосферы, ω_g^2 , масштабом L_p и горизонтальной скоростью вихря v . При условии $\Lambda > 0$ получаем

$$Ri < \frac{1}{4} \frac{L^2}{L_U^2}. \quad (15)$$

При выводе (15) использовалось приближение $U'' = U / L_U^2$, где L_U – характерный пространственный масштаб неоднородности скорости. В рассматриваемом приближении масштаб вихря L больше масштаба неоднородности ветра L_U , поэтому условие существования конвективных ячеек совпадает с условием динамической неустойчивости атмосферы. Условие $\Lambda > 0$ можно представить как

$$\frac{H}{L_T} > \frac{\gamma - 1}{\gamma} - \frac{\gamma U^2}{4 c_s^2} \frac{H^4}{L_U^4} \frac{L^2}{H^2}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что в пренебрежении вкладом ветра ($U=0, L_U \rightarrow \infty$) конвективные ячейки могут существовать в конвективно неустойчивой мезосфере при сверхадиабатическом градиенте температуры $H / L_T > (\gamma - 1) / \gamma$, когда $\omega_g^2 < 0$ [Onishchenko, Pokhotelov, Fedun, 2013]. Из условия (16) видно, что в атмосфере с неоднородным ветром возможно существование конвективных ячеек и при субадиабатическом градиенте температуры $H / L_T < (\gamma - 1) / \gamma$.

Вертикальные профили температуры и ветра в окрестности мезопаузы

Основываясь на результатах многодневных лидарных наблюдений, выполненных в университетах штата Иллинойс [Gardner, Zhao, Liu, 2002; Zhao, Liu, Gardner, 2003] и штата Колорадо [Sherman, She, 2006], приведем характерные параметры профилей температуры и ветра в окрестности мезопаузы (на высотах 85–105 км). В области наблюдений характерное время для развития конвективной неустойчивости было порядка $\omega_g^{-1} \approx 5$ мин, а характерное время для развития динамической неустойчивости – порядка 10–20 мин. Наблюдения на высотах 80–105 км показали, что в этой области гравитационные волны могут достигать больших амплитуд. Эти же наблюдения свидетельствуют о том, что совместное влияние фоновых вертикальных градиентов температуры, приливных эффектов и параметрической неустойчивости внутренних гравитационных волн может быть причиной генерации достаточно больших вертикальных градиентов скорости горизонтального ветра и температуры. В результате влияния таких эффектов рассматриваемая окрестность мезопаузы может стать конвективно или динамически неустойчивой.

Усредненную по большим временам (порядка часа и более) окрестность мезопаузы можно условно разделить на две характерные области. На высотах 80–90 км располагается область нейтральной устойчивости, характеризующаяся отрицательными градиентами температуры, близкими к адиабатическим. Сразу перед локальным восходом Солнца область высот 90–95 км также нейтрально устойчива. Средняя величина ω_g^2 по всему слою составляет $\sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}$. На названных высотах невозмущенная атмосфера близка к границе неустойчивости, когда $H / L_T = (\gamma - 1) / \gamma$. В то же время эта область мезопаузы может быть динамически неустойчивой. Скорость горизонтального ветра здесь превышает 30 м/с. Мезопауза, усредненная по большим временам, на высотах более 95 км устойчива.

По данным наблюдений, приводимым в [Gardner, Zhao, Liu, 2002; Zhao, Liu, Gardner, 2003], вероятность конвективной неустойчивости по всему слою 85–105 км составляет 8 %, динамической – 15 %. Из наблюдений также следует, что сильная сезонная и средняя климатологическая переменчивость, как и переменчивость ветров, могут существенно менять условия устойчивости мезосферы.

Выводы

Исследованы нелинейные вихревые структуры внутренних гравитационных волн в атмосфере с конечными вертикальными градиентами температуры и ветра. Выведено необходимое условие для существования квазистационарных вихревых структур. Показано, что такие структуры могут существовать в динамически неустойчивой мезосфере даже при субадиабатических вертикальных градиентах температуры.

Выведено уравнение, определяющее скорость движения структур в связанной с ветром системе координат с пространственным масштабом вихрей и параметрами мезосферы. Для окрестности мезопаузы, где скорость ветра $U=40$ м/с и $L_U=1$ км, получаем оценку для вертикального масштаба градиента скорости $U'=40$ м·с⁻¹/км. Используя (16) как необходимое условие существования конвективных ячеек, получаем оценку для пространственного масштаба роллов – $L \leq 1$ км. Вероятность существования таких структур, усредненная по большим временам, не превышает 5–10 %.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 14-05-00850 и 15-05-07623) и Программ №№ 9, 18 Президиума РАН.

Литература

- Ларичев В.Д., Резник Г.М. О двумерных уединенных волнах Россби // Докл. АН СССР. 1976. Т. 231, № 5. С.1077–1079.
- Михайловский А.Б., Лахин В.П., Онищенко О.Г., Смоляков А.И. К теории вихрей в плазме // ЖЭТФ. 1984. Т. 86, № 6. С.2061–2074.
- 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 // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 6. С.605–616.
- Петвиашвили В.И., Похотелов О.А. Уединенные вихри в плазме и атмосфере. М.: Энергоатомиздат, 1989. 200 с.
- Dunkerton T.J. Shear instability of internal inertia-gravity waves // J. Atmos. Sci. 1987. V. 54. P.1628–1641.
- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. V. 41, N 1. doi: 10.1029/2001RG000106.
- Gardner C.S., Zhao Y., Liu A. Atmospheric stability and gravity wave dissipation in the mesopause region // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2002. V. 64. P.923–929.
- Horton W., Kaladze T.D., Van Dam J.W. Zonal flow generation by internal gravity waves in the atmosphere // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A08312. doi: 10.1029/2007JA012952.
- Onishchenko O.G., Pokhotelov O.A., Fedun V.N. Convective cells of internal gravity waves in the Earth's atmosphere with finite temperature gradient // Ann. Geophys. 2013. V. 31. P.459–462.
- Sherman J.P., Che C.Y. Seasonal variation of mesopause region wind shears, convective and dynamic instabilities above Fort Collins, CO: A statistical study // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2006. V. 68. P.1061–1074.

Stenflo L., Shukla P.K. Nonlinear acoustic gravity waves // J. Plasma Phys. 2009. V. 75, N 6. P.841–847.

Yuan L., Fritts D. Influence of mean shear on the dynamical instability of an inertio-gravity wave // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46. P.2562–2568.

Zhao Y., Liu A., Gardner C.S. Measurements of atmospheric stability in the mesopause region at Starfire Optical Range, NM // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2003. V. 65. P.219–232.

Сведения об авторах

ОНИЩЕНКО Олег Григорьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; Институт космических исследований РАН. 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: 8(499) 254-88-05. E-mail: onish@ifz.ru

ПОХОТЕЛОВ Олег Александрович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 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. 8(495) 333-21-45. E-mail: ast@iki.rssi.ru

CONVECTIVE CELLS OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE MESOPAUSE REGION

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 of RAS, Moscow, Russia

Abstract. The influence of the shear wind on the formation of vortex (roll type) structure of the internal gravity waves (IGWs) in atmosphere is investigated. A closed system of equations is derived for the nonlinear dynamics of the IGWs in the presence of vertical gradients of temperature and wind. The obtained set of non-linear equations in the quasi-stationary case can be reduced to the equation which yields a vortex solution. The dependence of spatial scale and horizontal velocity of rolls on parameters of atmosphere and shear wind is studied. It is found that roll type vortex structures of the IGWs can exist in the dynamic unstable mesopause. These structures play a crucial role in mesosphere convection and generation of atmospheric turbulence and may affect global circulation.

Keywords: internal gravitational waves, mesopause, stability, nonlinear structures.