

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВГВ ИЗ ТРОПОСФЕРЫ В ИОНОСФЕРУ ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНЫЕ ЗОНАЛЬНЫЕ ВЕТРОВЫЕ ПОТОКИ

Николай Ерохин^{1,3}, Александр Суслов¹, Людмила Михайловская¹, Румен Шкевов²

¹Институт космических исследований – Российская академия наук

²Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

³Российский университет дружбы народов

e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.bg

Ключевые слова: Внутренние гравитационные волны, атмосфера, ионосфера, ветровые потоки, слои отражения, критический слой, групповая скорость, траектории лучей.

Аннотация: Рассмотрено прохождение внутренних гравитационных волн (ВГВ) из нижней атмосферы до ионосферных высот при наличии неоднородного зонального ветрового потока. Проведен анализ лучевых траекторий ВГВ с учетом неоднородности плотности атмосферы и ветрового потока. Исследованы возможности возникновения слоев отражения ВГВ в горизонтальном и вертикальном направлениях, появление критического слоя, который блокирует прохождение ВГВ в ионосферу и приводит к поглощению волны в его окрестности. Указано, что для достаточно длинноволновых волн максимальная скорость ветра будет ниже критического значения, критические слои отсутствуют и возможно (при отсутствии слоя вертикального отражения) прохождение ВГВ до ионосферных высот с генерацией возмущений в ионосферной плазме, что будет индикатором кризисного события в нижней тропосфере.

NUMERICAL CALCULATIONS OF IGW PASSAGE FROM THE TROPOSPHERE UP TO THE IONOSPHERE THROUGH INHOMOGENEOUS ZONAL WINDS

Nikolay Erokhin^{1,3}, Aleksandr Suslov¹, Ludmila Mikhailovskaya¹, Rumen Shkevov²

¹Space Research Institute – Russian Academy of Sciences

²Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

³People's Friendship University of Russia

e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.bg

Abstract: The passage of internal gravity waves (IGW) from the lower atmosphere to ionospheric altitudes in the presence of an inhomogeneous zonal wind flow is considered. Analysis of the ray trajectories IGW taking into account the inhomogeneity of atmospheric density and wind flow was done. The possibility of occurrence of reflection layers IGW in the horizontal and vertical directions, the appearance of the critical layer that blocks the passage of IGW in the ionosphere and leads to the absorption of waves in its vicinity was investigated. In the work is pointed that for a sufficiently long-wavelength waves the maximum wind speed is below a critical value, the critical layers are missing and it is possible (in the absence of a vertical reflection layer) for IGW to pass thru to the ionospheric heights with the generation of perturbations in the ionospheric plasma, which is an indicator of the crisis events in the lower troposphere.

Введение

На основе численных расчетов лучевых траекторий рассмотрено прохождение внутренних гравитационных волн из тропосферы (высоты в несколько километров) через вертикально неоднородные ветровые структуры до ионосферных высот с учетом неоднородности частоты Брента-Вяйсяля. ВГВ могут возбуждаться в тропосфере за счет различных процессов, например, кризисных явлений типа сейсмической активности, струйных течений. При достижении ионосферных высот ВГВ могут (за счет сильного уменьшения плотности атмосферы) значительно усилиться по амплитуде. В результате этого на

ионосферных высотах будут возникать предвестники и индикаторы как сейсмических событий, так и других кризисных явлений в приземной атмосфере, а также возможен нагрев атомов, в частности, кислорода, что приведет к наблюдаемому в ночное время свечению на зеленой и красной линиях кислорода.

Для нескольких вариантов выбора параметров ВГВ и ветровых структур проведен анализ особенностей лучевых траекторий этих волн, связанные с возникновением на трассе распространения ВГВ слоев горизонтального и вертикального отражений волн, а также критического слоя. В окрестности критического слоя происходит сильное уменьшение вертикальной компоненты групповой скорости ВГВ вследствие роста вертикальной компоненты волнового вектора и, соответственно, резко возрастает поглощение волны за счет вязкости.

Расчетами показано, что для коротковолновых внутренних гравитационных волн невозможно их прохождение из тропосферы до ионосферных высот поскольку возникают слои вертикального отражения и критические слои, возникающие при достаточно большой скорости ветрового потока. Для конкретного вертикального профиля скорости ветра и частоты Вайсяля-Брента вычислены характерные значения длин волн ВГВ, при которых блокируется прохождение ВГВ в ионосферную плазму, величины горизонтального смещения ВГВ по достижении ими слоев вертикального отражения и критического слоя.

Необходимо отметить, что исследование процессов генерации возмущений ионосферной плазмы за счет кризисных процессов в тропосфере относится к числу актуальных задач физики околоземного пространства и представляет большой интерес, например, для наблюдений индикаторов и предвестников кризисных атмосферных явлений спутниковой аппаратурой, корректной интерпретации данных измерений характеристик возмущений ионосферной плазмы, развития современных методик их обработки (см., например, работы [1-8]).

Основные уравнения и численные расчеты

При исследовании распространения ВГВ в неоднородной атмосфере с зональным ветром анализ проще проводить на основе метода лучевых траекторий для групповой скорости ВГВ при заданных вертикальных профилях частоты Вайсяля-Брента $N(z)$ и зонального потока $\mathbf{U} = U(z) \mathbf{e}_x$. Уравнения для лучевых траекторий волнового пакета в неоднородной среде имеют вид (Госсард, Хук, 1978; Миропольский, 1981)

$$(1) \quad \mathbf{dr} / dt = \mathbf{v}_g, \quad \mathbf{dk} / dt = - \partial \omega / \partial \mathbf{r}.$$

Здесь $\mathbf{v}_g = \partial \omega / \partial \mathbf{k}$ – групповая скорость; $\omega(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = k_x U(z) + N(z) k_h / k$ частота ВГВ с учетом доплеровского сдвига, где $k_h = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} = \text{const}$ горизонтальная компонента волнового вектора. Согласно расчетам, прохождение ВГВ в ионосферу имеет место для достаточно крупномасштабных волн, когда выполняется условие $k_h \ll k_z$. Отметим, что для ВГВ групповая скорость и волновой вектор взаимно перпендикулярны.

Для удобства анализа введем безразмерные переменные $z = L_z \xi$, $x = L_x \eta$, $y = L_y \zeta$, где $L_z = 1$ км, $L_x = L_y = 5$ км. Для скорости ветра запишем $U(z) = u(\xi)$ м/с. Частоту Вайсяля-Брента $N(z)$ нормируем на характерное значение: $N(z) = \mu(\xi) / 50$ с. Введем также безразмерные волновые числа $k_x = q_x / 5$ км, $k_y = q_y / 5$ км, $k_z = q_z / 1$ км и безразмерное время $\tau = t / 250$ с.

В результате уравнения для лучевых траекторий (1) принимают вид

$$\begin{aligned} d\xi / d\tau &= -(\mu q_h q_z) / p^3, \quad p = \left[q_z^2 + (q_h / 5)^2 \right]^{1/2}; \\ d\eta / d\tau &= (\mu q_z^2 q_x) / p^3 q_h + u(\xi) / 20; \\ (2) \quad d\zeta / d\tau &= (\mu q_z^2 q_y) / p^3 q_h; \\ d\zeta / d\tau &= (\mu q_z^2 q_y) / p^3 q_h; \\ dq_z / d\tau &= -(q_x / 20)(du / d\xi) - (q_h / p)(d\mu / d\xi) \end{aligned}$$

Здесь необходимо отметить, что для распространяющейся вверх ВГВ следует полагать $q_z < 0$, поскольку по вертикали компоненты фазовой и групповой скоростей направлены противоположно. Интеграл движения для системы уравнений выше (несущая частота пакета) запишем следующим образом:

$$\varepsilon = [q_x u(\xi) / 20] + \mu(\xi) q_h / p(\xi) \equiv \omega \cdot 250 \text{ сек} = T_0 / T_\omega,$$

где $T_0 = 500 \cdot \pi$ сек ≈ 26 мин 10 сек, а $T_\omega = T_0 / \varepsilon$ – период ВГВ. Величина интеграла ε определяется начальными значениями входящих в него функций ($\varepsilon = \text{const}$). Отметим также, что горизонтальные и вертикальная длины ВГВ равны:

$$\lambda_x = 10 \cdot \pi \text{ (км)} / q_x, \lambda_y = 10 \cdot \pi \text{ (км)} / q_y, \lambda_z = 2\pi \text{ (км)} / q_z.$$

Отметим главные особенности взаимодействия ВГВ с неоднородной фоновой ветровой структурой. Так при попутном (относительно ветра) распространении волны на некоторых высотах могут возникать критические слои z_c . В окрестности критического слоя согласно (2) в рассматриваемой модели вертикальная длина волны стремится к нулю поскольку на критическом уровне $q_z^2 \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow k_x U(z_c)$. Следовательно, в критическом слое групповая скорость волны стремится к нулю. Поэтому ВГВ неограниченно замедляется и полностью поглощается в критическом слое за счет возросшей роли вязкости. Отсюда следует, что критические слои z_c блокируют распространение ВГВ на ионосферные высоты. При $q_z \rightarrow \infty$ критическая скорость потока равна $u_c = 20 \varepsilon / q_x$, т.е. $U = \omega / k_x$. Поскольку волна распространяется в попутном к ветру направлении величина u_c определяется значениями интеграла ε и компоненты волнового вектора q_x . Таким образом, если максимальная скорость потока $u_{\text{max}} > u_c$, то в ветровой структуре на некоторой высоте имеется критический слой (при отсутствии на трассе распространения слоя вертикального отражения).

При встречном к ветру распространении ВГВ могут существовать слои горизонтального и вертикального отражений. Отражение по горизонтальному направлению x происходит в некотором слое ξ_{rx} , где горизонтальная групповая скорость пакета равна нулю $v_{gx} = 0$. Согласно (2) это дает следующее условие:

$$[u(\xi_{rx}) / 20] + \{ \mu(\xi_{rx}) q_x [q_z(\xi_{rx})]^2 / q_h \rho(\xi_{rx})^3 \} = 0,$$

которое определяет профиль $u_{rx}(\xi) = -20 \cdot \{ \mu(\xi) q_x [q_z(\xi)]^2 / q_h \rho(\xi)^3 \}$. Условие горизонтального (по оси x) отражения ВГВ встречным ветровым потоком можно записать в виде $u(\xi) = u_{rx}(\xi)$. Графически слои горизонтального отражения ВГВ встречным ветром z_{rx} (т.е. ξ_{rx}) определяются точками пересечения кривых $u(\xi)$ и $u_{rx}(\xi)$. В окрестности слоев ξ_{rx} происходит отражение пакета ВГВ назад, к источнику их генерации.

Слои вертикального отражения пакета ВГВ встречным ветром z_{rz} соответствуют условию $v_{gz} = 0$, т.е. $q_z(z) = 0$. На этой высоте $\varepsilon = 5 \mu(\xi_{rz}) + [q_x u(\xi_{rz}) / 20]$. Вводя функцию $u_{rz}(\xi) \equiv 20 [\varepsilon - 5 \mu(\xi)] / q_x$ находим, что слои вертикального отражения ВГВ фоновой ветровой структурой z_{rz} определяются графически, как точки пересечения ξ_{rz} кривой $u(\xi)$ с кривой $u_{rz}(\xi)$. Важно отметить, что выполняется условие $u_{rz}(\xi) < u_c$. В слоях ξ_{rz} происходит отражение пакета ВГВ вниз. Следовательно, аналогично критическим уровням ξ_c эти слои тоже препятствуют прохождению ВГВ на ионосферные высоты. Один из вариантов расчетов с $q_z(0) = -1$, $q_x = 1.5$, $q_y = 0.5$ дан на рис.1, где по вертикали скорости в м/сек, а по горизонтали высота в км причем диапазон высот $18.8 < z / \text{км} < 86$.

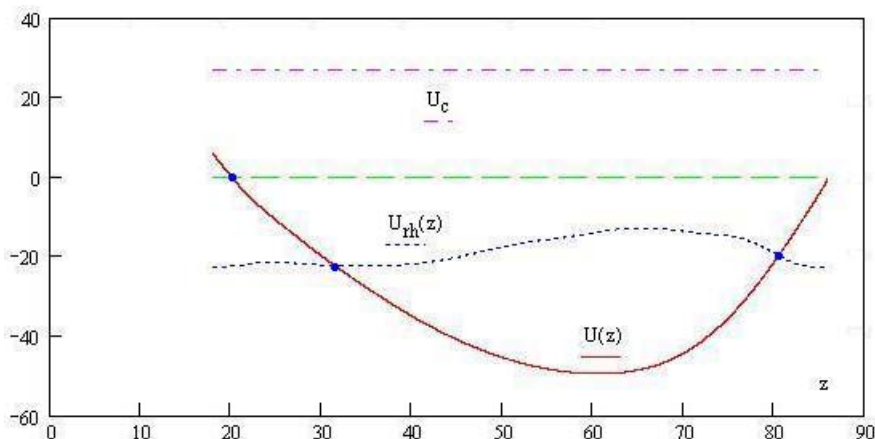


Рис. 1. Профили скоростей $U(z)$, $U_{rx}(z)$ при вариантах расчетов с $q_z(0) = -1$, $q_x = 1.5$, $q_y = 0.5$

Как видно из графиков, в данном случае нет критических слоев, но имеются два слоя горизонтального отражения ВГВ на высотах z порядка 32 и 82 км.

На рис.2 приведены профили скоростей $U(z)$, $U_{rz}(z)$. Пересечение кривых определяет высоты слоев вертикального отражения. В данном варианте есть два слоя вертикального

отражения. При распространении от земной поверхности ВГВ будет отражаться вниз от нижнего слоя, блокирующего ее прохождение в ионосферу. Если волна была возбуждена выше верхнего слоя z_{rz} и распространялась вниз, то верхний слой вертикального отражения отразит ее обратно т.е. он будет блокировать прохождение ВГВ к земной поверхности. В принципе волна может быть заперта между двумя слоями z_{rz} , что означает возникновение волновода в неоднородной атмосфере с зональным ветром.

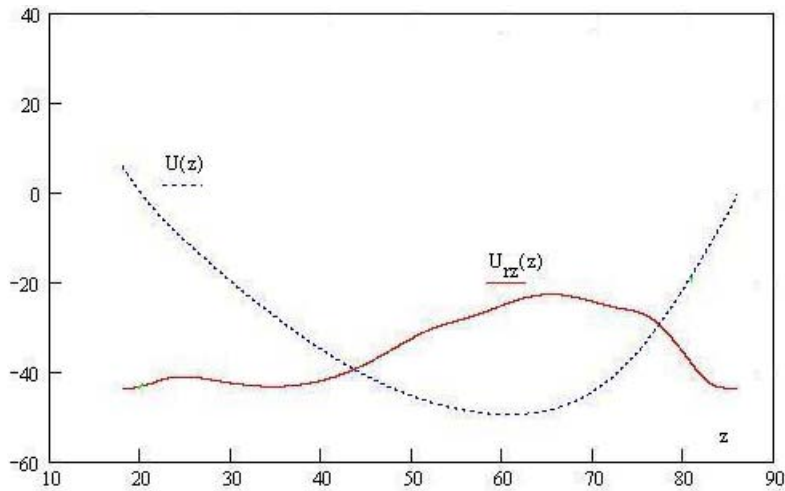


Рис. 2. Профили скоростей $U(z)$, $U_{rz}(z)$

Возможны и более сложные траектории лучей при наличии в системе ВГВ-ветровой поток слоев вертикального и горизонтального отражений. Такая ситуация продемонстрирована на рис.3. Здесь ВГВ от источника на высотах менее 18 км распространяется направо, затем она отражается обратно поднимаясь вверх, достигает слоя вертикального отражения и опускается вниз к слою горизонтального отражения.

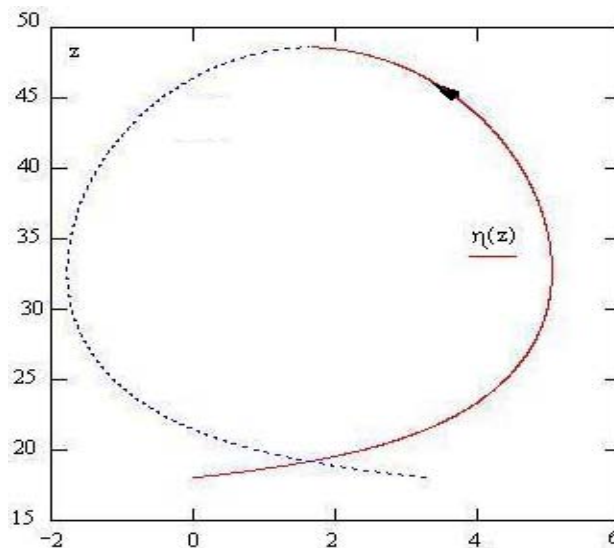


Рис. 3. Сложные траектории лучей при наличии в системе ВГВ-ветровой поток слоев вертикального и горизонтального отражений

Затем ВГВ распространяется снова направо и проходит над источником ее генерации у поверхности Земли. Здесь важно отметить, что горизонтальные смещения волны на этой траектории могут быть весьма большими, порядка тысяч км. Наконец, другой вариант высотного профиля зонального ветра для диапазона высот (0÷90) км приведен на рис.4 вместе с графиками критической скорости U_c и скорости горизонтального отражения U_x для варианта $q_z(0) = -1$, $q_x = 1.5$, $q_y = 0.5$. Здесь имеются три критически слоя на высотах 1.445 км, 18.12 км и 87.439 км, которые будут блокировать прохождение ВГВ в ионосферу от источников, находящихся ниже 88 км. Имеются три слоя горизонтального отражения волны, а слоев

вертикального отражения нет поскольку график скорости U_{rz} расположен значительно ниже графика $U(z)$.

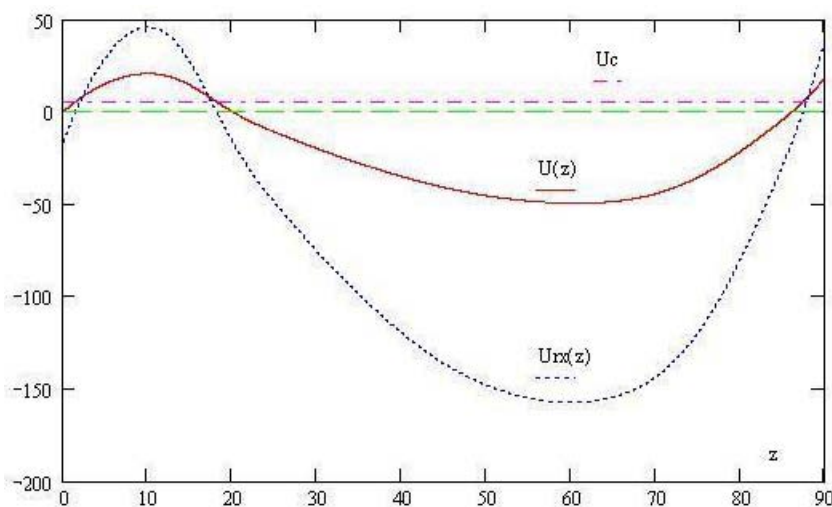


Рис. 4. Три критически слоя на высотах 1.445 км, 18.12 км и 87.439 км, которые будут блокировать прохождение ВГВ в ионосферу от источников, находящихся ниже 88 км

Заключение

В настоящей работе на основе численных расчетов лучевых траекторий проведен анализ ряда вариантов распространения внутренних гравитационных волн из приземной атмосферы до ионосферных высот в случае коротковолновых ВГВ с горизонтальными длинами волн порядка 100 км. Показано, что для рассмотренных вариантов выбора параметров задачи могут возникать слои вертикального отражения и критические слои, блокирующие прохождение ВГВ на ионосферные высоты (порядка 90 км и более). Имеются слои горизонтального отражения, что может привести к сложной структуре лучевых траекторий. Результаты расчетов показывают, что динамику лучевых траекторий необходимо учитывать при проведении экспериментов по регистрации откликов, создаваемых в ионосферной плазме приходящими из тропосферы ВГВ, для корректной интерпретации данных наблюдений ионосферных откликов на тропосферные возмущения. Такие исследования будут продолжены в последующих работах для других вариантов выбора характерных параметров задачи.

Список литературы:

1. Госсард, Э. Э., У. К. Хук. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
2. Ерохин Н. С., Л. А. Михайловская, С. Л. Шалимов. Геофизические исследования. 2007. Вып. 7. с. 53–64.
3. Ерохин, Н.С., А. К. Некрасов, С. Л. Шалимов. Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т. 34, № 6. с. 150–160.
4. Миропольский, Ю. З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 302 с.
5. Липеровский, В. А., О. А. Похотелов, С. Л. Шалимов. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
6. Buhler, O., M. E. McIntyre, J. Atm. Sci. 1999. V. 56. pp. 3749–3763.
7. Medvedev, A. S., N. M. Gavrilov. J. Atm. Terr. Phys. 1995. V. 57, N 11. p. 1221–1231.
8. Черный, И. В., Г. М. Чернявский, А. Б. Успенский, В. М. Пегасов. Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. с. 1–15.