

ПРОЦЕССЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

УДК 550.388.2

А.Ф. ЯКОВЕЦ, В.В. ВОДЯННИКОВ, Г.И. ГОРДИЕНКО,
Я.Ф. АШКАЛИЕВ, Ю.Г. ЛИТВИНОВ

ГЕНЕРАЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БОЛЬШОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРЕЙ

14-15 ДЕКАБРЯ 2006 ГОДА

Представлены результаты исследования отклика разнообразных параметров ночного F-слоя на прохождение атмосферной гравитационной волны, сгенерированной во время большой магнитной бури 14 - 15 декабря 2006 г. Анализ фазовых соотношений между вариациями электронной плотности в максимуме F-слоя ($N_m F$), высоты максимума слоя ($h_m F$) и полутолщины слоя показал, что они определяются наклоном фазового фронта волны. Показано, что полутолщина F-слоя колеблется в противофазе с вариациями $N_m F$.

Отклик ионосферы на магнитные бури является ключевым моментом для понимания физических механизмов воздействия солнечного электромагнитного и корпускулярного излучения на Землю и для прогноза неблагоприятной космической погоды. Во время бурь происходит значительное усиление аврорального электроджета, вызывающее локальный нагрев атмосферы. Расширение и последующее сжатие атмосферы генерирует крупномасштабные атмосферные гравитационные волны (АГВ), распространяющиеся к экватору и создающие на своем пути перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), регистрируемые различными радиофизическими методами [Williams, 1996, Afraimovich и др., 1998]. Распространение АГВ в нейтральной атмосфере и их ионосферное проявление изучалось как экспериментально, так и теоретически в течение многих лет. Результаты этих исследований сведены в ряде обзорных работ [Yeh and Liu, 1974; Hunsucker, 1982; Hocke and Schlegel, 1996]. Изучение взаимодействия АГВ и ПИВ весьма актуально в рамках проблемы термосферно-ионосферных связей. На основе теоретических и экспериментальных исследований было развито несколько моделей, описывающих основные характеристики взаимодействия АГВ и ПИВ. Моделирование взаимодействия АГВ и ПИВ, ориентированное на сравнение модельных результатов с данными вертикального зондирования ионосферы, было проведено в [Millward и др., 1993], при этом использовалась глобальная модель термосферы/

ионосферы, разработанная в работе [Fuller-Rowell и др., 1987]. Недавно результаты численного моделирования были сравнены с результатами вертикального зондирования ионосферы [Ashkaliev и др., 2003]. Поведение большинства параметров ПИВ, полученных в эксперименте, показало хорошее соответствие модельным результатам. Настоящая работа является продолжением работы [Ashkkaliev и др., 2003]. В работе анализируется реакция разнообразных параметров ночного F-слоя на прохождение АГВ, сгенерированной во время большой магнитной бури 14 - 15 декабря 2006 г.

Методы обработки ионограмм и ночные наблюдения F-слоя ионосферы. Ночные наблюдения ионосферы в 2006 г. были проведены на установленном в Институте ионосферы ионозонде «Парус», сопряженным с компьютером “Pentium-166”, который предназначен для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Необходимая для расчетов информация считывалась с ионограмм полуавтоматическим методом. С ионограммами считаются значения действующих высот отражения $h(t)$ радиосигнала на ряде фиксированных рабочих частот зондирования и значения критических частот ($f_0 F$). Дальнейшая обработка позволяет получать высотные распределения электронной плотности ($N(h)$ -профили). Ионозонд обеспечивает точность считывания $h'(t) \sim 2.5$ км и точность считывания $f_0 F \sim 0.05$ МГц.

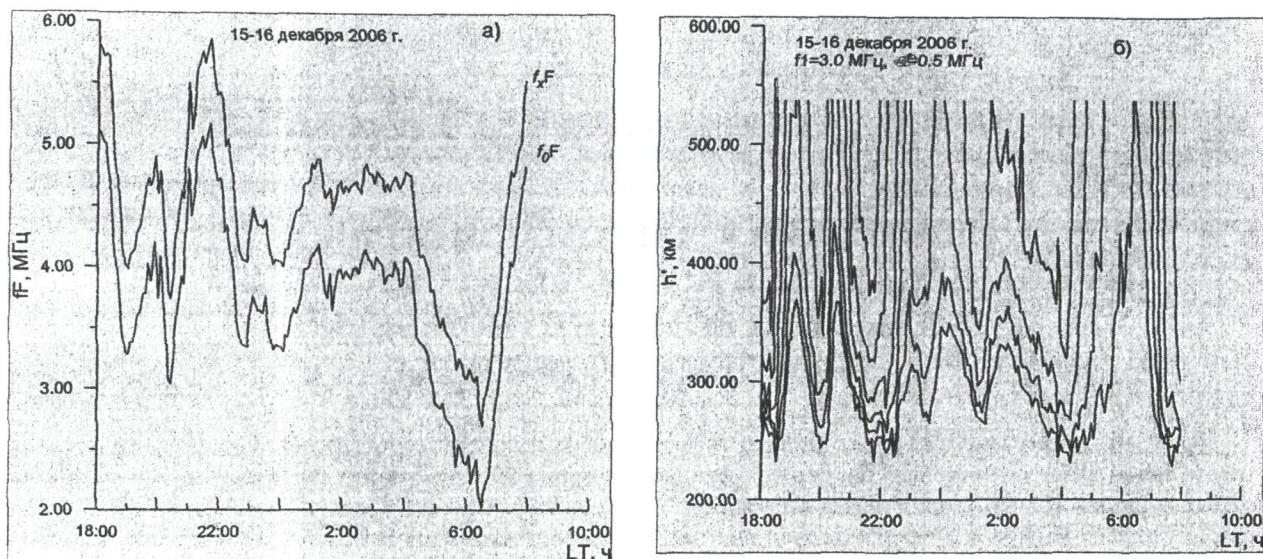


Рис. 1. Поведение критических частот (а) и действующих высот отражения (б)
на ряде зондирующих частот при прохождении атмосферных гравитационных волн

Критические частоты и действующие высоты непосредственно считываются с ионограмм, поэтому они наиболее часто используются исследователями для изучения, как медленных вариаций параметров ионосфера, так и относительно быстрых с периодами порядка нескольких часов. Учитывая, что критическая частота обыкновенной компоненты связана с электронной плотностью в максимуме слоя (N_{\max}) выражением $N_{\max} = 1.24 \cdot 10^4 f_0^2$ (где f_0 выражается в МГц, а N_{\max} - в см⁻³), от значений критической частоты легко перейти к электронной плотности.

Вариации критических частот и действующих высот отражения, показанные на рисунке 1, демонстрируют вариации ионосферных параметров во время большой магнитной бури 14-15 декабря 2006 года. Вариации содержат квазипериодические вариации ионосферных параметров, соответствующие прохождению атмосферных гравитационных волн над местом наблюдения [Ashkaliев et al., 2003]. Дальнейшая обработка первичных данных включала получение из ионограмм высотных профилей электронной плотности ($N(h)$ -профилей) методом Титериджа [Titheridge, 1985] и получение из профилей вариаций ряда параметров F слоя.

На рисунке 2 представлены сглаженные вариации электронного содержания ионосферы ($N(t)$) для рассматриваемой ночи на серии высот с расстоянием между соседними высотами 10 км. Нижняя кривая соответствует высоте основания

слоя ($h=190$ км). Верхняя (жирная) кривая соответствует вариациям $N(t)$ в максимуме слоя h_F . Чтобы устраниТЬ высокочастотные составляющие, как ионосферного происхождения, так и вызванные шумом, возникающим в процессе обработки, осуществлялась низкочастотная фильтрация рядов с применением скользящего окна с длиной $T=30$ мин. Представленные на рисунке примеры вариаций $N(t)$ содержат особенности, характерные для большинства сеансов

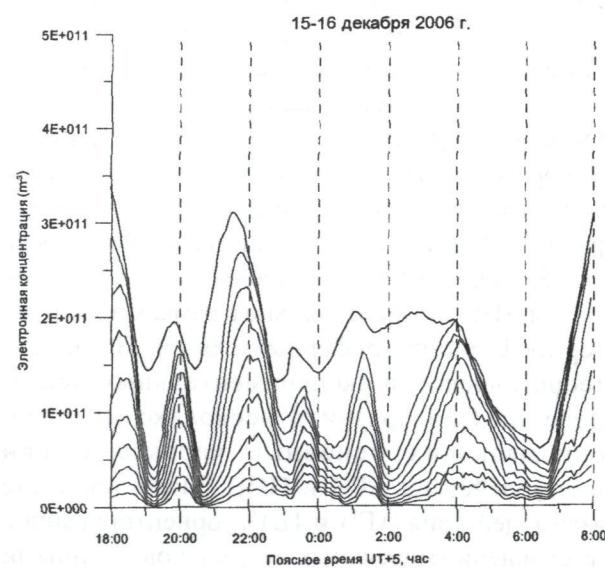


Рис. 2. Поведение электронной плотности ионосферы
на серии фиксированных высот ($\Delta h=10$ км)
и в максимуме слоя F

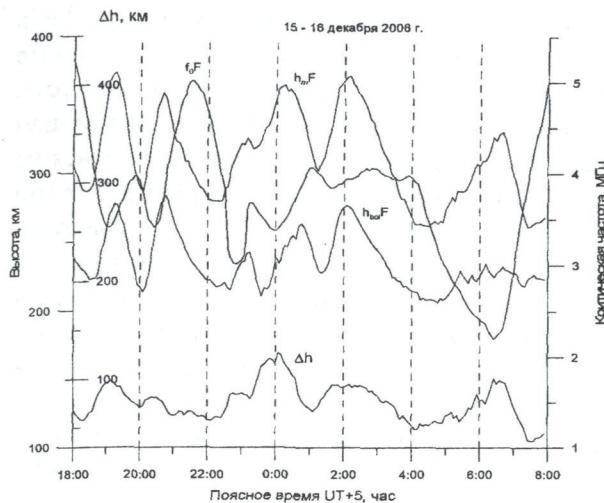


Рис. 3. Вариации высоты максимума слоя (h_mF), высоты основания слоя ($h_{b0}F$), величины полутолщины слоя ($\Delta hF = h_mF - h_{b0}F$) и критической частоты (f_0F), вызванные прохождением АГВ

измерений, в которых наблюдалась квазипериодические вариации ионосферных параметров. Также как и вариации действующих высот, вариации $N(t)$ на меньших высотах запаздывают относительно вариаций на больших высотах. Средняя вертикальная фазовая скорость волны, вычисленная из выражения $V = \Delta h/\tau$, где Δh – средняя за сеанс полутолщина слоя, а τ – среднее за сеанс запаздывание вариаций $N(t)$ в основании слоя относительно вариаций в максимуме слоя, оказалась равной 170 м/сек. Средняя вертикальная длина волны для такой скорости составляет $\lambda_z = V \cdot T = 920$ км, где T = период волны.

Для получения фазовых соотношений между вариациями ионосферных параметров, которые позволяют делать выводы о физике взаимодействия АГВ и ПИВ были построено поведение (рисунок 3) высоты максимума слоя (h_mF), высоты основания слоя $h_{b0}F$, значения полутолщины слоя ($\Delta hF = h_mF - h_{b0}F$) и критической частоты (f_0F). Высоте основания слоя соответствовала высота со значением электронной плотности на уровне 0.3 от N_mF . Из рисунка видно, что вариации h_mF , $h_{b0}F$ и ΔhF очень похожи, однако между ними существуют фазовые сдвиги. Вариации $h_{b0}F$ запаздывают относительно вариаций h_mF . Этот факт объясняется наклоном фазового фронта АГВ, приводящего к фазовым запаздываниям волн на меньших высотах относительно больших высот.

Для определения фазы вариаций полутолщины слоя представим вариации $h_m(t)$ и $h_{b0}(t)$ в виде $h_m(t) = h_{m0} + A_m \sin(\omega t - \Phi_1)$ и $h_{b0}(t) = h_{b0} + A_{b0} \sin(\omega t - \Phi_2)$, где h_{m0} и h_{b0} представляют средние значения высот максимума и основания слоя соответственно. Тогда поведение полутолщины слоя выразится в виде

$$\Delta hF(t) = \Delta h_0 + A_d \sin(\omega t - \Phi_3), \quad (1)$$

где $\Delta h_0 = h_{m0} - h_{b0}$ и $A_d \sin(\omega t - \Phi_3) = A_m \sin(\omega t - \Phi_1) - A_{b0} \sin(\omega t - \Phi_2)$.

Для установления фазовых соотношений между вариациями рассматриваемых параметров их удобно представить в виде векторной диаграммы (рисунок 4), на которой они изображены в виде радиусов-векторов с длинами, равными соответствующим амплитудам, и полярными углами, равными соответствующим фазам. Векторы врачаются по часовой стрелке с угловой скоростью ω . Проекции векторов на ось y представляют синусоидальные величины. Из диаграммы видно, что опережение по фазе вариаций в максимуме слоя относительно основания слоя приводит к тому, что вариации полутолщины слоя опережают вариации в максимуме, что мы и наблюдали в эксперименте (рисунок 4).

Из рисунка также видно, что по времени максимумы и минимумы $f_0F(t)$ наиболее близки соответственно к минимумам и максимумам $\Delta hF(t)$. Из векторной диаграммы также видно, что разность фаз между вариациями высоты максимума и высоты основания слоя определяет не только величину опережения по фазе вариаций

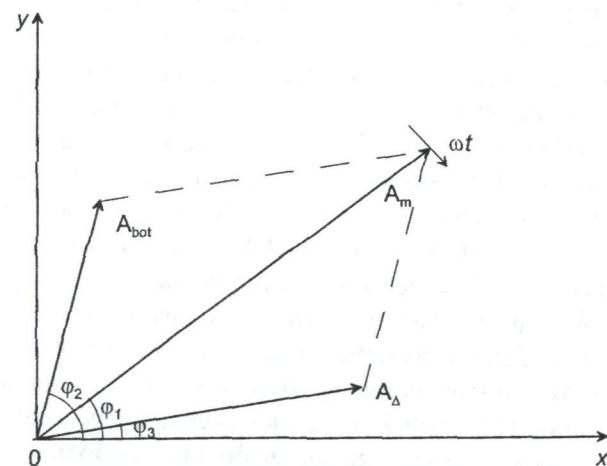


Рис. 4. Векторная диаграмма вариаций высоты максимума слоя, высоты основания слоя и величины полутолщины слоя

полутолщины слоя, но и величину его амплитуды вариаций.

Физические процессы, протекающие в ионосфере при прохождении через нее АГВ и определяющие поведение F слоя, изучены на модели [Millward и др., 1993]. АГВ, сгенерированная во время магнитной бури или суббури в полярной области, при достижении ею средних широтах имеет длину волны, превышающую 2000 км. Для такой волны движение нейтрального газа на высотах F области представляет горизонтальный ветер, дующий вдоль меридиана на юг в течение прохождения над местом наблюдения положительной полуволны, и на север в течение прохождения над местом наблюдения отрицательной полуволны. Так как F область ионосферы представляет слабо ионизированную плазму, то она вовлекается в движение благодаря соударениям нейтралов с ионами. В F области ионосферная плазма замагничена, так что ее движение возможно только вдоль магнитных силовых трубок. Скорость этого движения определяется компонентой нейтрального ветра, направленной вдоль магнитного поля. Нейтральный ветер, создаваемый последовательно положительной и отрицательной полуволнами, заставляет плазму двигаться вдоль магнитных силовых линий вверх и вниз соответственно, приводя к периодическим колебаниям высоты максимума F слоя.

На основе характера вариаций основных параметров слоя F ионосферы, представленных на рисунках 2, 3, можно описать качественную картину поведения электронной плотности в F слое во время прохождения АГВ с вертикальным фазовым фронтом. Общей характеристикой ПИВ является то, что их амплитуда возрастает с высотой. Следовательно, величина горизонтальной скорости переноса нейтральных частиц в АГВ, вызывающей ПИВ, увеличивается с высотой. Рассмотрим нейтральную полуволну, частицы в которой двигаются вдоль меридиана на юг. Движение нейтральных частиц заставляет заряженные частицы двигаться вверх вдоль линий геомагнитного поля к большим высотам. И так как амплитуда волны больше на больших высотах, то ионизация, находящаяся там, будет двигаться вверх на большее расстояние по сравнению с ионизацией, которая первоначально

находилась на меньшей высоте, поэтому в результате будет наблюдаться увеличение толщины слоя и уменьшение плотности ионизации в максимуме слоя. Следующая полуволна АГВ с частицами, двигающимися на север, приведет к обратной картине. F слой начинает двигаться вниз, к меньшим высотам. Его толщина будет уменьшаться тогда, как величина плотности ионизации в максимуме слоя будет возрастать. Отклонение фазового фронта волны от вертикали, обычно наблюдавшееся в эксперименте, существенно не меняет представленную картину. Оно приводит к появлению фазовых сдвигов между вариациями различных параметров слоя, при этом вариации полутолщины слоя опережают вариации высоты максимума и основания слоя. Так происходит процесс периодического перераспределения ионосферной плазмы по изменяющейся толщине слоя при сохранении на протяжении периода волны интегрального содержания ионосферы, близкого к постоянному значению, если не учитывать изменения, связанные с суточным ходом.

Заключение

На основе анализа данных ионосферного зондирования во время большой магнитной бури получены характеристики крупномасштабных ПИВ, представляющих квазипериодические вариации всех параметров ночных F слоев. Изучение фазовых соотношений показало, что величина фазовых запаздываний между вариациями электронной плотности в максимуме F слоя ($N_m F$), высоты максимума слоя ($h_m F$) и полутолщины слоя определяется наклоном фазового фронта волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Afraimovich E.L., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of traveling ionospheric disturbances // J. Atm. Solar-Terr. Phys. V. 60. P. 1205-1223. 1998.
2. Ashkaliyev Ya.F., Gordienko G.I., Jacobi Ch., Litvinov Yu.G., Vodyannikov V.V., and Yakovets A.F. Comparison of travelling ionospheric disturbance measurements with thermosphere/ionosphere model results // Ann. Geophysicae. V. 21. P.1031-1037. 2003.
3. Fuller-Rowell T.J.I., Rees D., Quegan S., Moffett R.J., Bailey G.J. Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-

thermosphere model // J. Geophys. Res. V. 92. P. 7744-7775. 1987.

4. Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // Rev. Geophys. V. 20. P. 293-315. 1982.

5. Millward G.H., Moffet R.J., Quegam S., Fuller-Rowell T.J. Effect of an atmospheric gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer // J. Geophys. Res. V. 98. P. 19173-19179. 1993.

6. Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalised program Polan. National Geophysical Data Center. Boulder. CO USA. 1985. P. 189.

7. Williams P.J.S. Tides, atmospheric gravity waves and traveling disturbances in the ionosphere // Modern ionospheric science. EGS, Katlenburg-Linday. P. 136-180. 1996.

8. Yeh K.C. and Liu C.H. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere // Rev. Geophys. Space Phys. V. 12. P. 193-216. 1974.

Резюме

2006 жылғы 14-15 желтоқсанда болған магниттік үлкен дауыл кезінде генерацияланған атмосфералық гравитациялық толқынның өтүіне тұнгі F-қабаттың өртүрлі

параметрлерінің өсерін зерттеудің нәтижелері көрсетілген. F-қабаттың ($N_m F$) максимумындағы электрондық тығыздық түрленімдері арасындағы фазалық катынастарға, ($h_m F$) қабаты максимумы биктігіне және қабаттың жартылай қалындығына жасалған талдау олардың толқынның фазалық фронттының көлбеулігімен анықталатындығын көрсетті. F-қабаттың жартылай қалындығы $N_m F$ түрленімді қарсылазада байқалады.

Summary

Ionospheric measurements obtained during the strong geomagnetic storm of December 14-15, 2006 were used to study large-scale traveling ionospheric disturbances (TIDs) representing to be quasiperiodic variations in all ionospheric parameters. The phase relation degree between the variations in the maximum electron density ($N_m F$), altitude ($h_m F$) and semi-thickness (Δh) of the F2-layer were analyzed, it was shown the phase differences found in process of the analysis are defined by the phase front slopes the passing AGWs have.

ДГП «Институт ионосферы»,
г. Алматы

Поступила 11 июня 2008 г.