

(ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, Республика Казахстан)

ПОВЕДЕНИЕ ТЕРМОСФЕРНОГО ВЕТРА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аннотация. Проанализированы параметры колебаний меридионального термосферного ветра во время прохождения крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМПИВ), полученные на основе ночных наблюдений F-слоя ионосферы, проведенных в Институте ионосферы (Алматы, 76° 55' E, 43° 15' N) с 2000 по 2007 год с помощью цифрового ионозонда. Обработка данных позволила получить временные вариации электронной концентрации ($N(t)$) на фиксированных высотах и вариации высоты максимума (h_mF) и основания слоя ($h_{bot}F$). За указанный период было проведено 1166 сеансов наблюдения, и 581 сеанс характеризовался волновой активностью. Для анализа были выбраны сеансы с относительной амплитудой $N(t)$, превышающей 25%. Общее количество таких сеансов составило 63. Амплитуды колебаний меридионального ветра на высотах h_mF и $h_{bot}F$ рассчитывались исходя из значений амплитуд вариаций высоты h_mF и $h_{bot}F$.

Ключевые слова: ионосфера, перемещающиеся ионосферные возмущения, термосферный ветер.

Тірек сөздер: ионосфера, жылжымалы ионосфералық ауытқулар, термосфералық жел.

Keywords: ionosphere, Travelling Ionospheric Disturbances, thermospheric wind.

Введение. Как известно, крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (КМПИВ), вызванные атмосферными гравитационными волнами, генерируются в полярных регионах во время геомагнитных бурь [1], когда быстрое усиление полярных электроджетов приводит к локальному нагреву атмосферы. Процесс быстрого расширения и последующего сжатия атмосферы создает атмосферные гравитационные волны (АГВ), распространяющиеся к экватору и генерирующие КМПИВ на своем пути. Ряд наблюдений показали, что КМПИВ также могут сохраняться во время магнитоспокойных периодов [2, 3]. Распространение АГВ в нейтральной атмосфере и их ионосферные проявления (КМПИВ) изучалось как экспериментально, так и теоретически в течение многих лет. Результаты этих исследований представлены в серии обзорных работ [1, 4, 5].

Типичные параметры КМПИВ в F-слое ионосферы следующие: периоды составляют ~ 40 мин-3 ч, горизонтальные длины волн составляют ~ 1000-3000 км, а скорость составляет ~ 400-1000 мс⁻¹. Эти параметры рассматриваются во многих работах, но данных о

колебаниях меридионального ветра, обусловленных прохождением АГВ, явно недостаточно. В работе [6] измерили колебания меридионального ветра от -94 м/с, направленного к экватору до $+44$ м/с, направленного к полюсу, во время прохождения единичной АГВ. В работе [7] измеряли колебания меридионального ветра в течение нескольких магнитовозмущенных дней. Колебания меридионального ветра связаны с энергией и импульсом АГВ и, следовательно, их измерения важны для понимания характеристик распространения АГВ. Таким образом, целью данной работы является экспериментальное исследование колебаний меридионального ветра на основе данных, полученных на ионозонде, в течение второй части 23 цикла солнечной активности (2000-2007 гг).

Оборудование и анализ данных. Ночные наблюдения КМ ПИВ в F -области ионосферы проводятся в Институте ионосферы (Алматы $76^{\circ}55'E$, $43^{\circ}15'N$) на цифровом ионозонде ПАРУС, сопряженным с компьютером, предназначенным для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Информация, необходимая для расчетов разнообразных параметров КМПИВ, считывается с ионограмм полуавтоматическим методом. Зондирование ионосферы проводится каждые 5 мин. Длина ночных сеансов измерений изменялась в зависимости от сезона и составляла $\sim 8-12$ ч. С ионограмм считывались значения действующих высот отражения $h'(t)$ радиосигнала на ряде фиксированных рабочих частот зондирования и значения критических частот (foF). Ионозонд обеспечивает точность считывания $h'(t) \sim 2.5$ км и точность считывания $foF \sim 0.05$ МГц. Выбор ночного периода суток для наблюдений был обусловлен тем, что КМПИВ с большими амплитудами вариаций ионосферных параметров на средних широтах наблюдаются в основном в ночное время [8]. Дальнейшая обработка представляла получение высотных распределений электронной плотности ($N(h)$ -профилей) методом Титериджа [9] и получение из профилей вариаций ряда параметров F -слоя (вариации электронной плотности на фиксированных высотах ($N_h(t)$), вариации плотности в максимуме слоя ($N_mF(t)$), вариации высоты максимума и основания слоя ($h_mF(t)$ и $h_{bot}F$). За период 2000 г. – 2007 г. было проведено 1166 ночных наблюдений, при этом 581 ночь характеризовались волновой активностью, связанной с КМПИВ [10]. Вариации $N_h(t)$ на серии высот h позволяли определять форму высотного профиля амплитуд ($A(h)$) с максимальной абсолютной амплитудой (A_m). Для анализа мы выбрали сеансы наблюдений, во время которых были зарегистрированы КМ ПИВ с относительной амплитудой (δ_h), превышающей 25%, на высоте, соответствующей A_m . Здесь $\delta_h = A(h)/N(h)$, где $A(h)$ – абсолютная амплитуда волны на высоте h и $N(h)$ – величина фоновой электронной плотности на данной высоте. Выбор сеансов наблюдений, в течение которых были зарегистрированы КМ ПИВ с большими значениями амплитуд вариаций $N_h(t)$, обеспечивал высокую точность оценки амплитуд вариаций высоты максимума и основания слоя – параметров, необходимых для оценки амплитуд осцилляций меридионального термосферного ветра. Всего таких сеансов оказалось 63 (5.4% от общего числа наблюдений). Эти сеансы были разделены на две группы в соответствии с минимальной величиной D_{st} - индекса, имевшей место на временном интервале, начинающемся за несколько часов до начала сеанса наблюдений и оканчивающемся в конце сеанса. Общее число наблюдений с умеренной и большой геомагнитной активностью ($D_{st} \leq -50$ nT) оказалось 26, при этом 12 ночей характеризовались большими

геомагнитными бурями ($D_{st} \leq -100$ нТ). 37 наблюдений характеризовались низкой магнитной активностью ($D_{st} > -50$ нТ).

Типичный пример поведения параметров F -слоя для таких ночей приведены на рисунке 1. Квазипериодические КМ ПИВ, показанные на рисунке 1, могут быть связаны с большой геомагнитной бурей с внезапным началом, имевшей место 31 августа 2005 года. Максимальное значение D_{st} -индекса достигло -131 нТл и начало главной фазы падало на 14.00 UT (19.00 местного времени (LT)) [11]. Из рисунка 1 видно, что волновая активность в ионосферных параметрах началась около 21,00 LT, через два часа после начала главной фазы бури. Эта задержка является типичным временем распространения КМПИВ от зоны полярных сияний до средних широт [8]. На верхней панели рисунка 1 показаны сглаженные вариации плотности электронов ($N_h(t)$) на ряде фиксированных высот с расстоянием между соседними высотами 10 км. Нижняя кривая соответствует высоте 150 км, верхняя (жирная) кривая представляет вариации $N(t)$ на высоте максимума слоя ($h_m F$). Для удаления из первичных данных высокочастотного шума была выполнена низкочастотная фильтрация с использованием скользящего окна шириной $T = 30$.

На рисунке 1 (вторая панель сверху) показаны вариации $h_m F$ и $h_{bot} F$. Квазипериодические вариации $h_m F$ и $h_{bot} F$ могут быть вызваны квазипериодическими вариациями зонального электрического поля или нейтрального меридионального ветра в F -области. На средних широтах влияние электрического поля на вариации $h_m F$ и $h_{bot} F$, как ожидается, будет небольшим, поэтому в дальнейшем мы рассматриваем только влияние меридионального ветра. В целях устранения тренда, вызванного суточным ходом меридионального ветра (направленного к экватору ночью), была выполнена высокочастотная фильтрация с использованием полинома второй степени. Отфильтрованные вариации $h_m F$ представлены на рисунке 1 (третья панель сверху). Отфильтрованные вариации $h_{bot} F$ представлены на рисунке 1 (нижняя панель).

АГВ на средних широтах имеют длину волны, превышающую ~ 1000 км. Для такой волны движения нейтрального газа на высотах F области представляет собой горизонтальный ветер, дующий на юг вдоль меридиана при прохождении половины волны над точкой наблюдения и на север

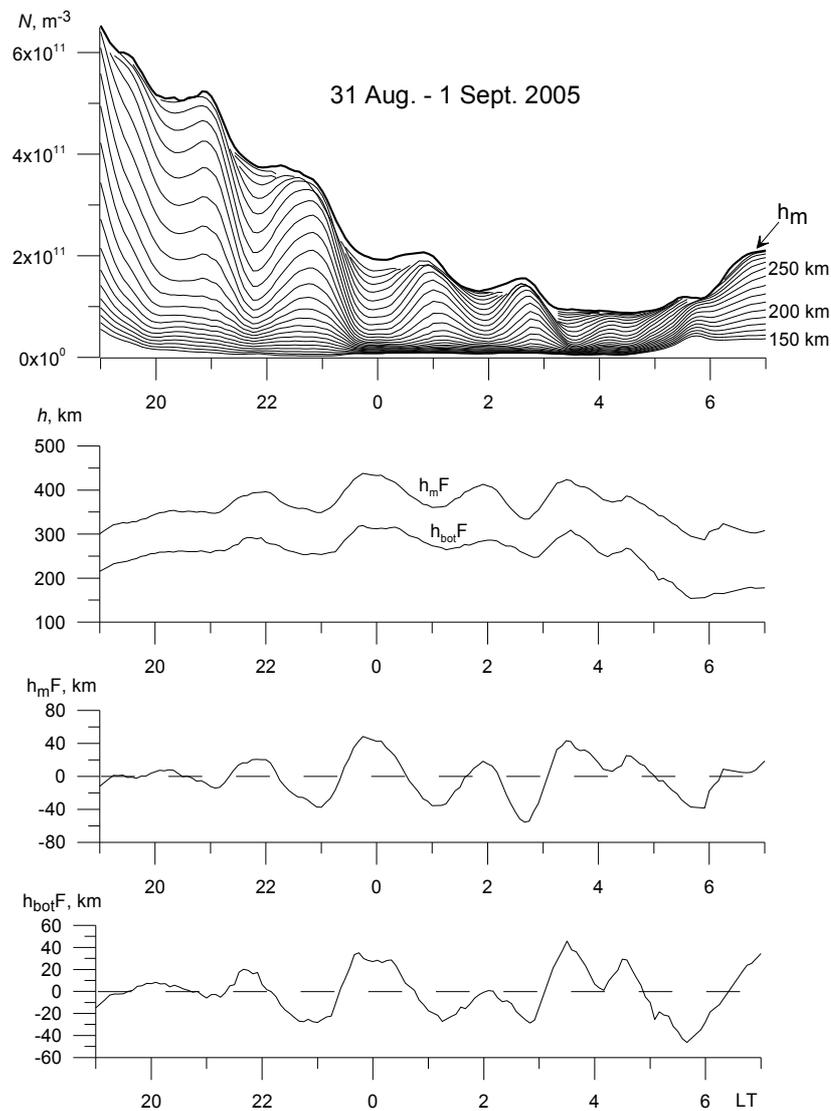


Рисунок 1 – Сглаженные вариации параметров F-слоя в течение ночи с большой магнитной активностью:

- а) электронная плотность ($N(t)$) на серии высот с расстоянием между соседними высотами 10 км (верхняя панель),
- б) высоты максимума F-слоя ($h_m F$) и основания слоя ($h_{bot} F$) (вторая сверху панель), $h_m F$ с исключенным трендом (третья сверху панель), $h_{bot} F$ с исключенным трендом (нижняя панель)

при прохождении последующей полуночи. Плазма в F-области ионосферы вовлекается в движение за счет столкновений нейтралов с ионами. Плазма в F-области замагничена и, следовательно, может двигаться только вдоль магнитных силовых линий. Это движение обусловлено компонентой нейтрального ветра, направленной вдоль магнитного поля. Нейтральный ветер, дующий по направлению к экватору и полюсу, толкает плазму вдоль силовых линий магнитного поля вверх и вниз, соответственно, приводя к периодическим

колебаниям высоты F-слоя. Нооке (1968) показал, что скорость движения ионов вдоль геомагнитного поля равна скорости движения нейтральной компоненты вдоль геомагнитного поля, обусловленного гравитационными волнами. Таким образом, процедура нахождения амплитуды колебаний меридионального ветра из колебаний высоты максимума F-слоя основана на заключении работы [12]. Пусть V_{\perp} представляет скорость меридионального ветра, а V_{\parallel} является вертикальной скоростью движения максимума F-слоя, то

$$V_{\parallel} = V_{\perp} \cdot \sin I \cos I, \quad (1)$$

где I – магнитное наклонение. Чтобы оценить амплитуду осцилляций термосферного ветра на высоте $h_m F$ из полного размаха колебаний $h_m F$ ($\Delta h_m F$), представим скорость колебаний $h_m F$ как $V_{\parallel} = V_h \sin \frac{2\pi t}{T}$. Тогда $\Delta h_m F = \int_0^{T/2} V_h \sin \frac{2\pi t}{T} dt = V_h \frac{T}{\pi}$. Отсюда $V_h = \Delta h_m F \frac{\pi}{T}$ и амплитуда осцилляций меридионального ветра (V_m) будет равна

$$V_m = \Delta h_m F \frac{\pi}{T \sin I \cos I}. \quad (2)$$

Для Алматы $I = 62^\circ$, поэтому (2) может быть записано в окончательной форме

$$V_m = \Delta h_m F \frac{\pi}{0.41T}. \quad (3)$$

Такое же выражение может быть использовано для оценки амплитуды осцилляций термосферного ветра для основания слоя:

$$V_{mb} = \Delta h_{bot} F \frac{\pi}{0.41T}. \quad (4)$$

Из рисунка 1 видно, что в течение сеанса наблюдались несколько волн со слегка различающимися амплитудами и периодами. Для построения статистических распределений учитывались волны с максимальной относительной амплитудой, превышающей 25%. На рисунке 2 показано распределение периодов, размаха вариаций высоты максимума ($\Delta h_m F$) и основания ($\Delta h_{bot} F$) слоя для возмущенного (верхняя панель) и спокойного (нижняя панель) магнитного поля. Видно, что нет большой разницы между распределениями для возмущенного и спокойного магнитного поля. Периоды распределены в диапазоне 40-200 мин с максимальной вероятностью 60-140 мин для условий возмущенного магнитного поля и 80-160 мин для спокойного поля. Максимальные вероятности $\Delta h_m F$ лежат в диапазоне 20-80 км для возмущенного и 20-60 км для спокойного магнитного поля. Такой же характер наблюдается для распределения $\Delta h_{bot} F$.

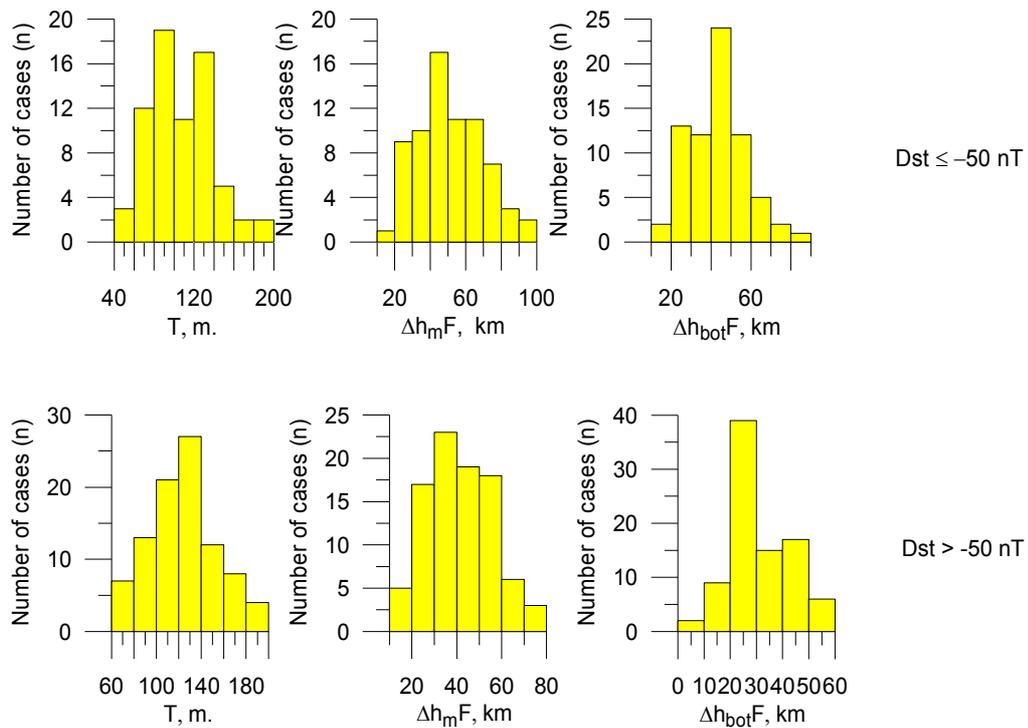
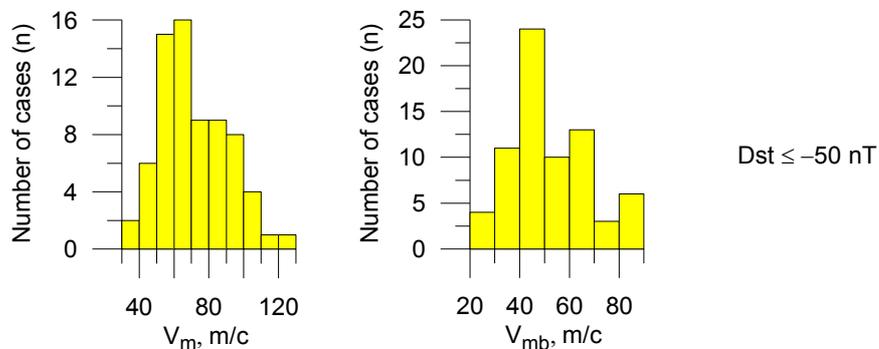


Рисунок 2 – Распределение периодов (T), размаха амплитуд ($\Delta h_m F$) осцилляций $h_m F$ и размаха амплитуд ($\Delta h_{bot} F$) осцилляций $h_{bot} F$ для возмущенного (верхняя панель) и спокойного (нижняя панель) магнитного поля

На рисунке 3 показано распределение амплитуд осцилляций меридионального ветра (V_m) для максимума слоя и (V_{mb}) для основания слоя. Верхняя панель соответствуют возмущенному, а нижняя панель – спокойному магнитному полю. Очевидные различия видны из сравнения распределений. Амплитуды осцилляций термосферного ветра для h_m рассеяны в более широком диапазоне, чем амплитуды h_{bot} как для $Dst < -50$ нТл и для $Dst > -50$ нТл. Кроме того, амплитуды осцилляций ветра для h_m и h_{bot} во время возмущенного периода рассеяны в более широкой полосе, чем амплитуды в спокойные периоды.



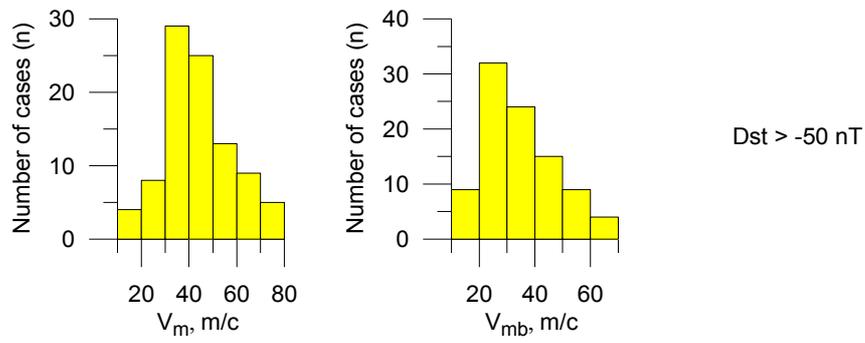


Рисунок 3 – Распределение амплитуд осцилляций скоростей меридионального ветра (V_m) для максимума слоя

и (V_{mb}) для основания слоя. Верхние панели соответствуют возмущенному магнитному полю

и нижние панели соответствуют спокойному полю

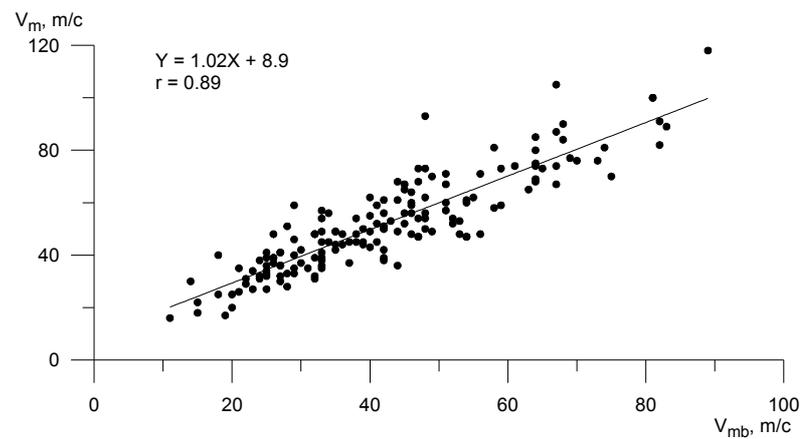
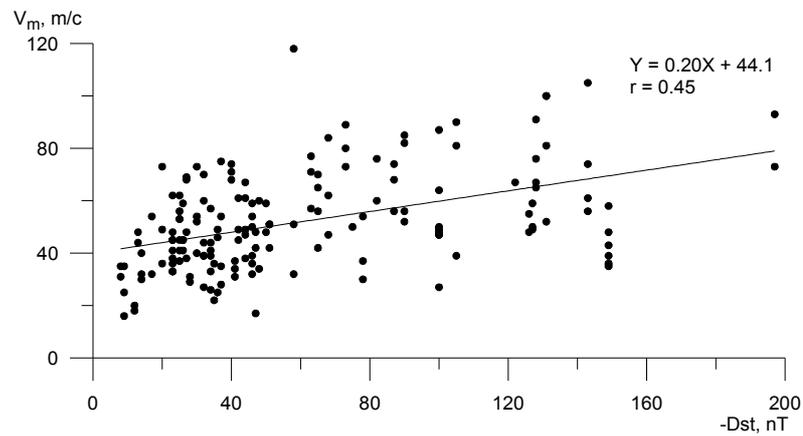


Рисунок 4 – Диаграммы рассеяния между V_m и Dst (верхняя панель) и между V_m и V_{mb} (нижняя панель);

линии регрессии показаны сплошными линиями. Формулы для линии регрессии и коэффициенты корреляции (r) представлены в верхних углах панелей

На рисунке 4 показаны диаграммы рассеяния между V_m и Dst (верхняя панель) и между V_m and V_{mb} (нижняя панель); линии регрессии показаны сплошными линиями. Формулы для линий регрессии и коэффициенты корреляции (r) представлены в верхних углах панелей. Они показывают существование умеренной корреляции между V_m и Dst и хорошей корреляции между V_m and V_{mb} .

Диаграмма рассеяния (рисунок 4 верхняя панель) показывает умеренную корреляцию между V_m и Dst. Это может быть объяснено на основе существования источников в нижних слоях атмосферы, которые генерируют АГВ, независимо от уровня магнитной активности. Диаграмма рассеяния (рисунок 4 внизу) показывает хорошую корреляцию между амплитудой колебаний меридионального ветра на высотах $h_m F$ и $h_{bot} F$, при этом среднее значение V_m превосходит среднее значение V_{mb} на $\sim 9,0$ км. Это превышение можно объяснить, принимая во внимание диффузию, которая вносит свой вклад в направленную вдоль магнитных силовых линий скорость ионов [13, рис. 9]. Ниже ~ 300 км этот вклад мал и эта скорость ионов тесно следует направленной вдоль магнитных силовых линий компоненте скорости нейтрального ветра. Но выше ~ 300 км этот вклад начинает увеличиваться с ростом высоты, и скорость ионов начинает превышать скорость нейтрального ветра. Экспериментальные данные этого исследования показали, что $h_m F$ превышают 300 км и $h_{bot} F$ находятся ниже 300 км для большинства наблюдений. Таким образом, V_m рассчитываемая из направленной вдоль поля скорости иона без учета диффузионного члена показывает некоторую эффективную скорость нейтрального ветра, превышающую реальную скорость.

Результаты этого исследования показали, что КМПИВ с большой амплитудой на средних широтах наблюдаются как во время больших магнитных возмущений, так и в периоды спокойного магнитного поля. Эти КМПИВ сопровождаются квазипериодическими осцилляциями меридиональной скорости ветра. Амплитуды этих осцилляций распределены в диапазоне ~ 10 -90 м/с. Амплитуды этих осцилляций мало связаны с уровнем магнитной активности.

Работа выполнялась по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Исследовать воздействия нестационарных явлений на среднеширотные атмосферу и ионосферу».

ЛИТЕРАТУРА

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

2 Tsugawa T., A. Saito and Y. Otsuka. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan // J. Geophys. Res. 2004. 109. A0630. doi:10.1029/2003JA010302.

3 Hawlitschka S. Travelling ionospheric disturbances (TIDs) and tides observed by a super-resolution HF direction finding system // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2006. 68. P. 568-577.

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

5 Hocke K. and Schlegel K.: A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophysical. 1996. 14. P. 917-940.

6 Shiokawa K. et al. Thermospheric wind during a storm-time large-scale traveling ionospheric disturbance // J. Geophys. Res. 2003. 108 (A12), 1423, doi: 10.1029/2003JA010001.

7 Lee, C. C., J. Y. Liu, M. Q. Chen, S. –Y. Su, H. C. Yeh, C. H. Liu, and K. Nozaki, Observation and model comparison of the traveling atmospheric disturbances over the western pacific region during the 6-7 April 2000 magnetic storm // J. Geophys. Res. 2004. 109, A9, 10.1029/2003JA010267, September 1.

8 Hajkowicz L.A. Monitoring ionospheric response to auroral electrojet activity from sub-auroral to equatorial latitudes in the East Asian-Australian longitudinal sector over a solar cycle (1978-1986) // J. Atm. Sol-Ter. Phys. 1999. 61. P. 857-866.

9 Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalised program Polan // National Geophysical Data Center. Boulder. CO USA. 1985.

10 Yakovets A. F., Vodyannikov V. V., Andreev A. B., Gordienko G. I., and Yu. G. Litvinov. Features of Statistical Distributions of Large_Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Almaty // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. 51. P. 640-645.

11 Pandey S.K., Dubey S.C. Characteristic features of large geomagnetic storms observed during solar cycle 23 // India Journal of Radio and Space Physics. 2009. 38. P. 305-312.

12 Hooke, W. H. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves // J. Atmos. Terr. Phys. 1968. 30. P. 795–823.

13 Millward G. H., Moffet R. J., Quegan S., and Fuller_Rowell T. J. Effect of an Atmospheric Gravity Wave on the Midlatitude Ionospheric F Layer // J. Geophys. Res. 1993. 98. P. 173-179.

Резюме

А. Ф. Яковец, В. В. Водяников, Г. И. Гордиенко, Ю. Г. Литвинов

ТЕРМОСФЕРАЛЫҚ ЖЕЛДІҢ ИОНОСФЕРАЛЫҚ АУЫТҚҰЛАР

ӨТУІНДЕГІ МІНЕЗ-ҚҰЛЫҒЫ

Ионосфера институтында (Алматы, $76^{\circ} 55' E$, $43^{\circ} 15' N$), цифрлік ионозондтың көмегімен 2000-нен 2007 жылы дейін өткізілген, ионосфера F-қабатының түнгі бақылаулары негізінде алынған үлкен масштабты жылжымалы ионосфералық ауытқулардың (КМПИВ) өтуі уақытында меридиональдық термосфералық желдің тербелістерінің параметрлері талданған. Мәліметтерлерді өңдеу белгіленген биіктіктерде электрондық концентрацияның ($N(t)$) уақытша вариацияларын және биіктік максимумының (hmF) және қабат негізінің ($h_{bot}F$) вариацияларын алуға мүмкіндік берді. Көрсетілген мерзім ішінде бақылаудың 1166 сеанстары жүргізілген болатын және 581 сеанс толқындық белсенділікпен бейнеленді. Талдау үшін 25% артық $N(t)$ салыс-тырмалы амплитудасы бар сеанстар таңдалған болған. Мұндай сеанстар жалпы саны 63 болды. h_mF және $h_{bot}F$ биіктіктерде меридиональдік жел тербелістерінің амплитудасы hmF және $h_{bot}F$ биіктік вариациялары амплитудаларының мағыналарынан барып есептелген.

Тірек сөздер: ионосфера, жылжымалы ионосфералық ауытқулар, термосфералық жел.

Summary

A. F. Yakovets, V. V. Vodnynikov, G. I. Gordienko, Yu. G. Litvinov

(Institute of Ionosphere, National Center for Space Research
and Technology, Almaty, Republic of Kazakhstan)

BEHAVIOR OF THE THERMOSPHERIC WIND AT THE PASSAGE OF IONOSPHERIC DISTURBANCES

Parameters of thermospheric wind oscillations during large-scale traveling ionospheric disturbances (LSTIDs) were analyzed on the basis of nighttime observations of the ionospheric F-layer performed at the Institute of Ionosphere (Almaty, $76^{\circ}55' E$, $43^{\circ}15' N$) since 2000 till 2007 using a digital ionosonde. Data processing allowed to obtain temporal variations in the electron content ($N(t)$) for fixed altitudes and variations of altitudes of the F-layer peak (hmF) and the F-

layer bottom (hbotF). The 1166 observation sessions were carried out during the analyzed period, and 581 nights were characterized by wave activity. For analysis, nights with the peak relative amplitude of $N(t)$ exceeding of 25% were selected. Total number of such nights was 63. A low and high pass filtering was used to eliminate a high frequency noise and a trend caused by diurnal variation of meridional wind (equatorward by night). Amplitudes of meridional wind oscillations at altitudes of hmF and hbotF were estimated from peak-to-peak amplitude (hmF) of hmF oscillations and peak-to-peak amplitude (hbotF) of hbotF oscillations.

Keywords: ionosphere, Travelling Ionospheric Disturbances, thermospheric wind.

Поступила 2.09.2013г.