

УДК 550.388

*Т.Г. ЖИВОЛУП*, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы,  
Харьков

*Д.А. ДЗЮБАНОВ*, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. отделом, Институт  
ионосферы, Харьков

## **ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ F2 ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 5 – 6 АВГУСТА 2011 Г. ПО ДАННЫМ РАДАРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ХАРЬКОВА И EISCAT**

Проведено дослідження добових варіацій електронної концентрації в максимумі шару F2, висоти шару F2, іонної і електронної температур в середніх і високих широтах під час сильної геомагнітної бурі. Виявлено особливості варіацій параметрів шару F2, зокрема те, що температура електронів та іонів у Харкові та Тромсё після початку магнітної бурі веде себе по-різному. Встановлено, що під час бурі спостерігався незвичайно інтенсивний нічний нагрів іоносферної плазми в Харкові і Тромсё до денних значень температур електронів і іонів.

Проведены исследования суточных вариаций электронной концентрации в максимуме слоя F2, высоты слоя F2, ионной и электронной температур в средних и высоких широтах во время сильной геомагнитной бури. Выявлены особенности вариаций параметров слоя F2, в частности то, что температура электронов и ионов в Харькове и Тромсё после начала магнитной бури ведет себя по-разному. Установлено, что во время бури наблюдался необычно интенсивный ночной нагрев ионосферной плазмы в Харькове и Тромсё до дневных значений температур электронов и ионов.

The investigations of the diurnal variations of the electron density in the F2-layer maximum, F2-layer maximum height, ion and electron temperatures in the middle and high latitudes during a severe geomagnetic storm are conducted. The features of the F2-layer parameter variations, in particular, electrons and ions temperature over Kharkov and Tromsø during magnetic storm was identified as different. It was found that during the storm unusual nighttime ionospheric plasma heating over Kharkiv and Tromsø was observed.

**Введение.** Экспериментальные и теоретические исследования ионосферы в средних и высоких широтах важны для создания целостной картины физических процессов, учета влияния среды на условия распространения радиоволн, функционирование искусственных спутников Земли, средств радиосвязи. Современные знания о структуре ионосферы и ее динамике, а также существующие ионосферные и термосферные модели во многом основаны на данных, полученных на международной сети радаров некогерентного рассеяния. Поэтому создание надежной теоретической модели области F2 ионосферы и изучение поведения слоя F2 в средних и высоких широтах при разных геофизических условиях, особенно во время геомагнитных возмущений, представляют интерес как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач геофизики и распространения радиоволн

**Анализ литературы.** Исследования глобальных эффектов ионосферных возмущений по международным программам с участием радара Института ионосферы проводятся достаточно давно. В работе [1] приведены результаты совместных измерений (в рамках проекта CEDAR) эффектов магнитной бури 17 апреля 2002 г. Измерения проведены на сети радаров некогерентного рассеяния, в том числе Харькова и обсерватории EISCAT. Было отмечено, что на высоких широтах выпадение частиц приводит к увеличению электронной концентрации и росту температур, вызывает расслоения профиля электронной концентрации, что подтверждают наблюдения радаром Svalbard.

Во время этой геомагнитной бури также наблюдалось значительное уменьшение электронной концентрации на высоких широтах. Такое уменьшение могут вызывать несколько механизмов. Значительную роль играют сильные электрические поля, особенно в начале бури. Они могут быстро переносить плазму в области с пониженной электронной концентрацией и увеличивать вклад локальных процессов. Кроме переноса плазмы, электрические поля могут в дальнейшем уменьшать концентрацию электронов в высоких широтах за счет увеличения коэффициента линейной рекомбинации иона  $O^+$  [2, 3]. Усиление джоулева нагрева может приводить к утечке ионов и существенно уменьшать их концентрацию [4]. И наконец, в процессе развития бури уменьшение отношения  $[O]/[N_2]$  за счет изменения нейтрального состава вносит свой вклад в дальнейшее уменьшение концентрации электронов.

**Цель статьи** – выявление особенностей суточных вариаций электронной концентрации в максимуме слоя F2, высоты слоя F2, ионной и электронной температур в средних и высоких широтах во время сильной геомагнитной бури, вызвавшей ионосферные возмущения.

**Сильная магнитная буря 5 – 6 августа 2011 г.** В 19:03 UT 5 августа 2011 г. имело место внезапное начало сильной магнитной бури.  $B_z$ -компонента межпланетного магнитного поля резко повернула к югу и стала отрицательной примерно в момент наступления внезапного начала. При этом индекс  $D_{st}$  сначала увеличился до 19 нТл в 19:03 UT, потом – до 29 нТл в 20:00 UT, а затем уменьшился до –113 нТл в 04:00 UT 06.08.2011. Буре предшествовало увеличение концентрации частиц, температуры и давления солнечного ветра. Сильная магнитная буря 5 – 6 августа 2011 г. имела следующие экстремальные значения индексов:  $A_p = 49$  ( $K_p = 7,8$ ),  $D_{st} = -113$  нТл. Резкое увеличение горизонтальной составляющей геомагнитного поля в самом начале бури обусловлено сжатием магнитного поля при контакте облака вещества солнечного ветра с магнитосферой. Последующее же уменьшение горизонтальной составляющей связано с возникновением кольцевого тока в плоскости геомагнитного экватора, магнитное поле которого направлено навстречу геомагнитному полю и частично

компенсирует его. Величина магнитного поля кольцевого тока определяется количеством солнечной плазмы, выброшенной во время вспышки.

На рис. 1 и 2 показано поведение индекса авроральной активности  $AE$  и  $D_{st}$  индекса 5 августа 2011 г.

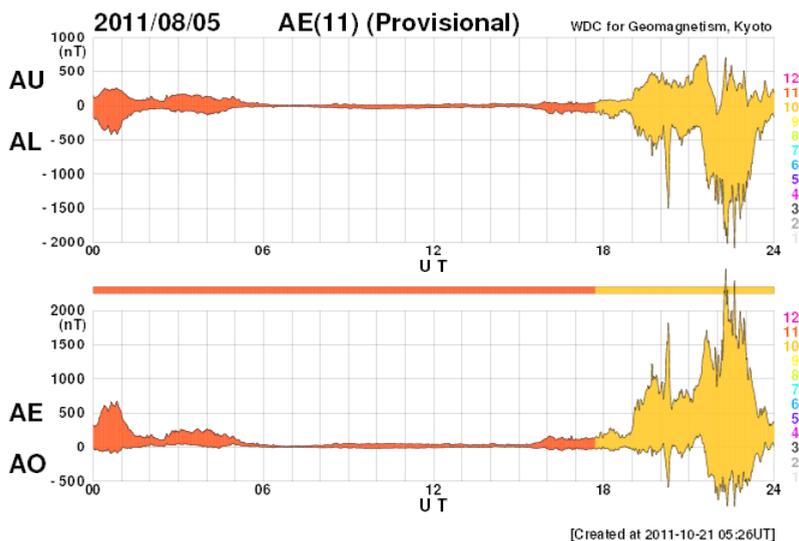


Рис. 1 – Вариации  $AE$ -индекса 05.08.2011

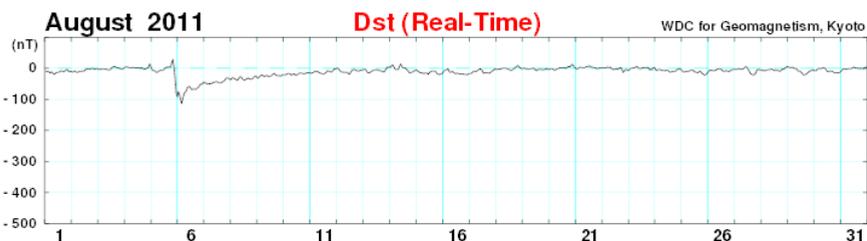


Рис. 2 – Вариации  $D_{st}$  индекса в период с 1 по 31 августа 2011 г.

**Вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 и высоты его максимума 5 августа 2011 г. по данным радаров Харькова и Тромсё.** Особый интерес представляет изучение суточно-сезонных вариаций концентрации электронов  $n_{em}$  в максимуме слоя F2 и высоты его максимума  $h_m F2$  в средних и высоких широтах при магнитных возмущениях. На рис.3 и 4 представлено сравнение суточных вариаций  $\lg n_{em} F2$  и  $h_m F2$  по данным радаров Харькова и Тромсё. 5 августа 2011 г. Как видно из рис. 3, суточный ход  $\lg n_{em} F2$  для Харькова имеет два ярко выраженных локальных максимума в 8 часов UT и в 18 часов UT, в то время как и суточный ход  $\lg n_{em} F2$  для

Тромсё имеет относительно небольшие локальные максимумы в 07:00, 16:00 и 19:00 UT. В Тромсё электронная концентрация в максимуме слоя F2 ( $n_{em}F2$ ) монотонно возрастает с 00:00 UT (восход Солнца в Тромсё – в 00:42 UT) до первого локального максимума в 07:00 UT. В Харькове  $n_{em}F2$  монотонно возрастает с 02:00 UT (восход Солнца в Харькове – в 02:09 UT) до первого локального максимума в 08:00 UT. Значение первого локального максимума  $n_{em}F2$  для Харькова превышает значение первого локального максимума  $n_{em}F2$  для Тромсё на 51%, а значение второго локального максимума  $n_{em}F2$  – на 24%, хотя с 00:00 по 03:00 UT  $n_{em}F2$  в Тромсё превышает  $n_{em}F2$  в Харькове на 5 – 18%. С 04:00 до 19:00 UT значения  $n_{em}F2$  в Харькове превышают значения  $n_{em}F2$  в Тромсё.

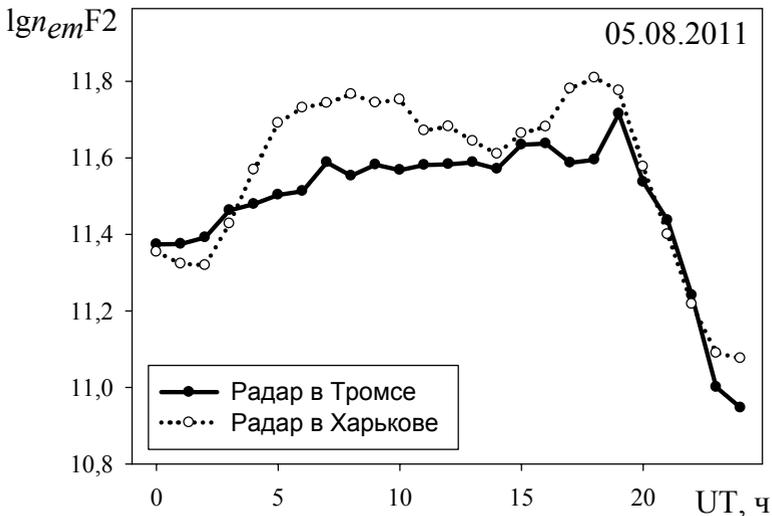


Рис. 3 – Сравнение суточного хода  $lg n_{em}F2$  по данным радаров в Харькове и Тромсё для 05.08.2011

С началом магнитной бури (19:03 UT в Тромсё и в Харькове) наблюдается резкое монотонное уменьшение  $n_{em}F2$ , и в интервале 19:30 – 22:00 UT зависимости  $lg n_{em}F2(t)$  для Тромсё и для Харькова почти совпадают (их расхождение на данном временном интервале не превышает 5 – 8%). После 22:00 UT значения  $n_{em}F2$  в Тромсё становятся меньше значений  $n_{em}F2$  в Харькове на 23 – 35%.

Рассмотрим теперь вариации высоты максимума слоя F2 в течение суток 05.08.2011 по данным радаров в Харькове и Тромсё. Вариации высоты максимума слоя F2 в рассматриваемые сутки приведены на рис. 2.9. В Харькове  $h_mF2$  имела значение 342 км с 00:00 до 02:00 UT. После восхода

Солнца в 02:09 UT значение  $h_mF2$  уменьшается, в 04:00 UT становится равным 242 км и не изменяется до 16:00 UT.

С заходом Солнца в Харькове (17:09 UT)  $h_mF2$  возрастает до значения 286 км и остается неизменной с 17:00 до 20:00 UT. В 21:00 UT, т.е. через 2 часа после начала магнитной бури,  $h_mF2$  резко возрастает до значения 410 км, а в 23:00 UT – до значения 488 км.

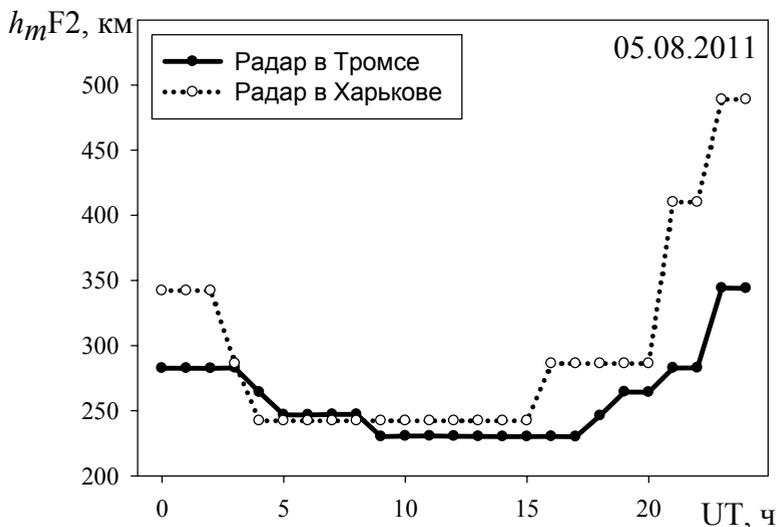


Рис. 4 – Сравнение суточного хода  $h_mF2$  по данным радаров в Харькове и Тромсё для 05.08.2011

С восходом Солнца в Тромсё (00:42 UT) высота максимума слоя F2 не уменьшается и не меняет своего значения, равного 282 км, с 00:00 до 03:00 UT. После 03:00 UT  $h_mF2$  плавно уменьшается, с промежуточными значениями 264 км в 04:00 UT, 246 км с 05:00 до 08:00 UT, и в 09:00 UT достигает своего минимального значения 230 км. Это значение  $h_mF2$  не меняется до 17:00 UT, после чего  $h_mF2$  начинает плавно возрастать, имея значение 246 км в 18:00 UT, значение 264 км – с 19:00 до 20:00 UT, и через 2 часа после начала магнитной бури (заход Солнца в 20:51 UT) достигает значения 282 км в 21:00 UT, которое возрастает до 344 км в 23:00 UT.

Следует отметить одинаковое скачкообразное повышение  $h_mF2$  в Харькове и Тромсё через 2 часа после начала магнитной бури – с 21:00 до 24:00 UT, однако в Харькове  $h_mF2$  с 23:00 до 24:00 UT превысила свое максимальное значение для спокойных суток 04.08.2011 – на 146 км, а в Тромсё – только на 62 км.

**Суточные вариации температуры электронов 5 августа 2011 г. по данным радаров в Харькове и Тромсё.** Вариации температуры электронов  $T_e$  5 августа 2011 г. на высотах 342 и 344 км в Харькове и Тромсё показаны на рис. 5. Из рис. 5 видно, что перед восходом Солнца в Харькове (02:08 UT)  $T_e$  имело минимальное значение, равное 720 К (в 00:00 UT), и с восходом Солнца (в 02:09 UT) начала быстро возрастать до значения 2260 К (в 06:00 UT). После этого температура электронов плавно убывает до своего локального минимума – 2180 К в 08:00 UT. Начиная с 09:00 UT температура электронов снова плавно возрастает до своего второго локального максимума – 2510 К в 14:00 UT. После 14:00 UT с заходом Солнца в магнитосопреженной с Харьковом точке в 14:32 UT температура электронов плавно уменьшается, и с заходом Солнца в Харькове в 17:10 UT наблюдается более быстрое уменьшение  $T_e$  до ее значения 720 К, которое она принимает в 21:00 UT. В 22:00 UT наблюдается локальный максимум температуры электронов – 870 К, и в 24:00 UT наблюдается резкий скачок  $T_e$  до значения 1900 К.

В Тромсё с восходом Солнца в 00:42 UT температура электронов возрастает от минимального значения 1960 К в 00:00 UT до своего первого локального максимума 2590 К в 04:00 UT. Второй локальный максимум  $T_e$  – 2660 К наблюдается в околополуденное время – в 12:00 UT (полдень в Тромсё – в 10:47 UT). После этого температура электронов плавно уменьшается до значения 2480 К, которое она принимает в 18:00 UT.

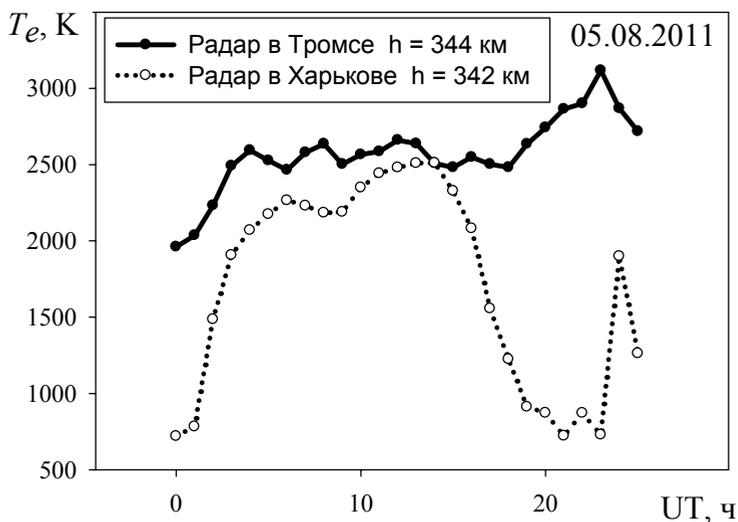


Рис. 5 – Сравнение суточного хода  $T_e$  по данным радаров в Харькове и Тромсё для 05.08.2011

С началом магнитной бури в авроральных широтах (19:03 UT) начинается монотонный рост температуры электронов, которая достигает своего максимума, равного 3120 К, в 23:00 UT. Это можно объяснить тем, что максимальное возмущение в полярной области ( $AE$ -индекс достигает значения 2500 – 2700 нТл) произошло в период 22:20 – 22:40 UT.

Таким образом, температура электронов в Харькове и Тромсё после начала магнитной бури ведет себя по-разному. В Харькове  $T_e$  после начала бури монотонно уменьшается до минимального значения 720 К, которого она достигает в 21:00 UT, а в 24:00 UT наблюдается резкий скачок  $T_e$  до значения 1900 К. В Тромсё температура электронов с началом магнитной бури монотонно возрастает, достигая максимума (3120 К) в 23:00 UT после максимального возмущения в полярной области. Поэтому можно говорить о некоторой задержке разогрева ионосферы на средних широтах по сравнению с реакцией высокоширотной ионосферы. Действительно, выпадение энергичных частиц происходит, прежде всего, в высоких широтах, наглядно проявляясь в полярных сияниях, впоследствии возмущения распространяются с севера к югу.

**Суточные вариации температуры ионов 5 августа 2011 г. по данным радаров в Харькове и Тромсё.** Вариации температуры ионов  $T_i$  5 августа 2011 г. на высотах 342 и 344 км в Харькове и Тромсё показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что температура ионов в Тромсё превышает температуру ионов в Харькове в период с 00:00 до 02:00 UT до восхода Солнца в Харькове в 02:09 UT на 280 – 130 К.

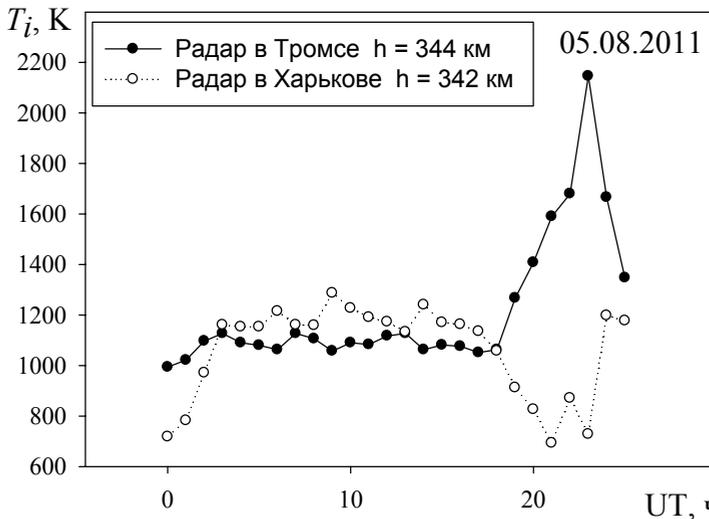


Рис. 6 – Сравнение суточного хода  $T_i$  по данным радаров в Харькове и Тромсё для 05.08.2011

В дневное время (с 03:00 до 17:00 UT) превышение температура ионов в Харькове над температурой ионов в Тромсё достигает 230 К.

В Харькове температура ионов с восходом Солнца (02:09 UT) возрастает до своего первого локального максимума 1160 К, который она имеет в 03:00 UT. Максимальное значение, равное 1290 К, температура ионов в Харькове имеет в 10:00 UT (полдень в Харькове – в 09:39 UT). С заходом Солнца (17:09 UT) температура ионов убывает до своего минимального значения 690 К, которое она принимает в 21:00 UT.

В 22:00 UT наблюдается локальный максимум температуры ионов – 870 К, и после этого в 24:00 UT наблюдается резкий скачок  $T_i$  до значения 1200 К.

В Тромсё температура ионов с восходом Солнца (00:42 UT) возрастает до своего первого локального максимума 1130 К, который она также имеет в 03:00 UT. Второй и третий локальные максимумы – 1130 и 1130 К температура ионов в Тромсё имеет в 07:00 и 13:00 UT. После 14:00 UT  $T_i$  медленно убывает до значения 1060 К, которое она принимает в 18:00 UT.

С началом магнитной бури в полярной области в 19:03 UT начинается быстрый рост температуры ионов, которая достигает своего максимального значения, равного 2150 К, в 23:00 UT после максимального возмущения в полярной области.

Таким образом, температура ионов в Харькове и Тромсё после начала магнитной бури ведет себя по-разному. В Харькове  $T_i$  после начала бури монотонно уменьшается до минимального значения 690 К, которого она достигает в 21:00 UT, а в 24:00 UT наблюдается резкий скачок  $T_i$  до значения 1200 К. В Тромсё с началом магнитной бури наблюдается быстрый рост температуры ионов, которая достигает своего максимума, 2150 К, в 23:00 UT поле максимального возмущения в полярной области.

**Выводы.** 1) С началом магнитной бури (19:03 UT в Тромсё и Харькове) наблюдается резкое монотонное уменьшение  $n_{em}F2$ , и в интервале 19:30 – 22:00 UT зависимости  $\lg n_{em}F2(t)$  для Тромсё и для Харькова практически совпадают (их расхождение на данном временном интервале не превышает 5 – 8%). После 22:00 UT значения  $n_{em}F2$  в Тромсё становятся меньше значений  $n_{em}F2$  в Харькове на 23 – 35%.

2) Температура электронов в Харькове и Тромсё после начала магнитной бури ведет себя по-разному. В Харькове  $T_e$  после начала бури монотонно уменьшается до минимального значения 720 К, которого она достигает в 21:00 UT, тогда как в Тромсё с началом магнитной бури  $T_e$  монотонно возрастает. В Харькове в 24:00 UT наблюдается резкий скачок  $T_e$  до значения 1900 К. В Тромсё  $T_e$  достигает своего максимума, равного 3120 К, в 23:00 UT после максимального возмущения в полярной области.

3) Температура ионов в Харькове и Тромсё после начала магнитной бури ведет себя по-разному. Температура ионов в Харькове после начала бури сначала монотонно уменьшается до минимального значения 690 К, которого

она достигает в 21:00 UT, а в 24:00 UT происходит резкий скачок  $T_i$  до значения 1200 К. В Тромсё с началом магнитной бури наблюдается монотонный рост температуры ионов, которая достигает своего максимума, равного 2150 К, в 23:00 UT после максимального возмущения в полярной области.

4) Установлено, что во время бури наблюдался необычный ночной нагрев ионосферной плазмы в Харькове до дневных значений температур  $T_i = 1200$  К и  $T_e = 1900$  К на высоте 342 км, и в Тромсё –  $T_i = 2150$  К и  $T_e = 3120$  К на высоте 344 км.

**Список литературы.** 1. *Goncharenko L.P., Salah J.E., van Eyken A.P., Howells V., Thayer J.P., Taran V.I., Shpynev B., Zhou Q., Chau J.* Observations of the April 2002 Geomagnetic Storm by the Global Network of Incoherent Scatter Radars // *Ann. Geophysicae.* – 2005. – Vol. 23, No. 1. – P. 163 – 181. 2. *Schunk R.W., Raitt W.J., Banks P.M.* Effects of electric fields on the daytime high-latitude E and F regions // *J. Geophys. Res.* – 1975. – Vol. 80. – P. 3121 – 3130. 3. *Prolss G.W.* Ionospheric F-region storms, In *Handbook of atmospheric electrodynamics*, v. 2, Ed. H. Volland, CRC Press, Boca Raton. – 1995. – P. 195 – 248. 4. *Idenden D.W., Moffett R.J., Quegan S.* Ionospheric structure produced during a rapid polar cap expansion // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102. – P. 14581 – 14594.

*Поступила в редколлегию 20.09.2012*