

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, С. А. Пазюра¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН и МОН України, Харків

e-mail: iiion@kpi.kharkov.ua

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

e-mail: Leonid. F. Chernogor@univer.kharkov.ua

Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г.

2. Результаты расчетов и обсуждение

Надійшла до редакції 05.02.07

Розраховано ефекти термосферних збурень та збурень теплового режиму верхньої атмосфери Землі під час дуже сильної магнітної бури 7—10 листопада 2004 р. Використано результати вимірювань параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння та термосферної моделі NRLMSISE-00. Оцінено ефекти проникнення в середні широти магнітосферних електричних полів. Ефекти іоносферно-термосферних збурень пояснюються процесами високоширотного нагрівання за рахунок підведення енергії сонячного вітру, а також висипання частинок, зсуву високоширотних структур (аврорального овалу, головного іоносферного провалу, гарячої зони та ін.) до широти харківського радара.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть нашего исследования ионосферных процессов во время сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. (см. [6]) посвящена оценке эффектов термосферных возмущений и возмущений теплового режима верхней атмосферы Земли, а также обсуждению основных физических процессов, которые сопровождали эту бурю. Параметры ионосферной плазмы измерялись непосредственно с помощью радара некогерентного рассеяния в Харькове. Были получены температуры электронов T_e и ионов T_i , концентрация электронов N_e , изучен ионный состав внешней ионосферы. На базе измеренных параметров ионосферы с привлечением справочной термосферной модели NRLMSISE-00 рассчитывались параметры нейтральной атмосферы: нейтральный состав, температура нейтралов, высота термопаузы в магнитоспокойных и

возмущенных условиях. Исследовались возмущения теплового режима плазмы: подвода энергии к электронному газу, процессов теплообмена электронов с ионами и нейтралами, плотности теплового потока, переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов, теплового баланса в системе ионосфера — плазмосфера во время магнитной бури. Проанализированы эффекты проникновения в средние широты магнитосферных электрических полей, связанные как с их нестационарными возмущениями, так и с высыпаниями энергичных частиц из магнитосферы. Интерпретируются результаты наблюдений и моделирования ионосферно-термосферных возмущений, вызванных высокоширотным нагреванием за счет поступления энергии солнечного ветра, высыпанием энергичных частиц, смещением высокоширотных структур (аврорального овала, главного ионосферного провала, горячей зоны и др.) к экватору.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ, СОПУТСТВОВАВШИХ БУРЬ

Концентрация нейтралов. Для корректного изучения вариаций концентраций нейтралов в магнитовозмущенных условиях разрабатывались специальные модели [1, 12, 13, 18, 40–42, 49]. Мы ограничимся оценкой «снизу», а именно оценкой возмущения концентраций нейтралов, считая, что и в возмущенных условиях работает модель NRLMSISE-00. Хотя эта модель по замыслу ее авторов должна правильно определять изменение нейтральной атмосферы во время магнитных бурь, однако эффекты в нейтральной атмосфере получаются заниженными. Скорее всего, учет магнитной активности недостаточно полный и последовательный. Такой вывод напрашивается также и при сопоставлении параметров нейтрального состава, полученных из модели NRLMSISE-00 и данных спутника TIMED.

На рис. 1 приведены вариации концентраций $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ основных компонентов нейтральной атмосферы на высоте 300 км в спокойные сутки 29 октября 2004 г. и в возмущенный период 8–13 ноября 2004 г. Расчет нейтрально-

го состава выполнен по термосферной модели NRLMSISE-00 [42]. Дополнительно приведен параметр $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который, как известно, в фотохимическом приближении в стационарных условиях определяет соотношение процессов ионообразования и потерь ионов O^+ и концентрацию заряженных частиц. Видно, что состав нейтральной атмосферы во время отрицательной ионосферной бури 8 и 10 ноября изменился. В дневное время около 12^h UT концентрация $N(O)$ на высоте 300 км по сравнению с контрольным днем 29 октября составила 0.9 и 1.3, $N(N_2)$ — 0.9 и 1.8, $N(O_2)$ — 0.9 и 2.7. В результате параметр p увеличился в 1.1 раза 8 ноября и уменьшился в 1.3 раза 10 ноября.

Температура нейтралов и нагрев атмосферы. Температура нейтралов T_n вычислялась из уравнения теплового баланса ионного газа [4, 21, 50] с привлечением модели NRLMSISE-00. При этом полагалось, что в квазистационарных условиях на высотах 250–300 км, где теплопроводностью ионного газа можно пренебречь, скорость нагрева ионов O^+ за счет теплообмена с электронами можно считать равной скорости охлаждения за счет передачи тепла нейтральным частицам. Для этого случая уравнение

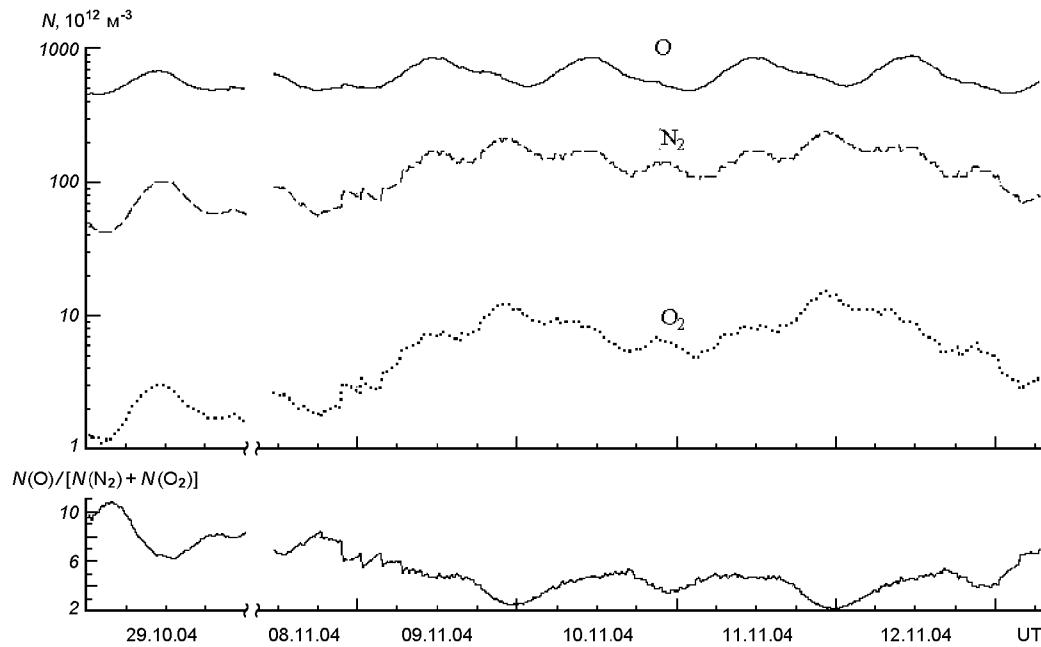


Рис. 1. Изменение концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы и параметра $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ на высоте 300 км на протяжении контрольных суток 29 октября и возмущенного периода 8–13 ноября 2004 г. (расчет по модели NRLMSISE-00 [...http://uap-www.nrl.navy.mil/models_web/msis/NRLMSISE-00.DIST17.TXT])

теплового баланса можно записать в виде [47, 48]

$$T_i - T_n = \frac{4.82 \cdot 10^7 N_e (T_e - T_i) T_e^{-3/2}}{6.6N(N_2) + 5.8N(O_2) + 0.2N(O)(T_i + T_n)^{1/2}}.$$

При расчетах использовались значения параметров ионосферы N_e , T_e , T_i , полученные методом НР. Концентрации нейтральных компонентов определены из модели NRLMSISE-00. Временные вариации T_n в спокойные сутки 29 октября и в возмущенный период 8–13 ноября 2004 г. на высотах 250–450 км показаны на рис. 2. Здесь же для сравнения приведены данные T_{nMSIS} , рассчитанные по модели NRLMSISE-00.

Анализ полученных значений T_n и T_{nMSIS} обнаружил следующие особенности.

1. В течение первой и второй магнитных бурь 8 и 10 ноября около полудня температура T_n изменялась почти аналогично температуре ионов T_i , увеличиваясь при этом с увеличением высоты по крайней мере до 400 км. Это свидетельствовало о нагревании и расширении нейтральной атмосферы.

2. В возмущенный день 8 ноября около 12^h UT значения T_n на высотах 250–450 км превышали значения в спокойный день 29 октября на 380, 360, 310, 250, 200 К, а 10 ноября — на 340, 320, 260, 220, 200 К соответственно.

3. Вочные часы, когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F2, T_n и T_i одновременно испытывали аналогичные увеличения (всплески) до значений дневных температур. Например, на высоте 300 км во время таких всплесков значения T_n достигали 1250, 1380, 1280, 1340, 1120 К в последовательные ночи 8–13 ноября. Для сравнения отметим, что в спокойные сутки ночные значения T_n не превышали 700 К (см. рис. 2).

4. Модель NRLMSISE-00 дает в основном заниженные значения T_n в спокойные и возмущенные сутки. Отличия T_n , рассчитанных по данным радара, от модельных значений T_{nMSIS} около 12^h UT составляли примерно –80, 60, 170, 220 и 240 К в спокойный день, 380, 460, 480, 480 и 450 К 8 ноября, 300, 350, 420, 420 и 420 К 10 ноября на высотах 250–450 км.

5. Во время главной фазы первой и второй магнитных бурь высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, увеличилась не менее чем до 400 км, тогда как в спокойных условиях (из модели NRLMSISE-00) она составляла около 350 км.

Подвод энергии к электронам. Нагревание тепловых электронов в дневное время осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \leq 300$ –350 км) из-за малости длин их свободного пробега носит локальный характер. На этих высотах основными механизмами охлаждения электронного газа являются кулоновские соударения с ионами и возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода [23, 50]. Тогда для стационарных условий уравнение баланса энергии электронов в системе СИ имеет вид [23, 30]:

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где Q — энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода (Q , L_{ei} и L_e — соответствующие значения энергии в единицу времени, отнесенные к единичному объему).

На рис. 3 приведены рассчитанные значения энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, а также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами (L_{ei}/N_e) и нейтралами (L_e/N_e). В расчетах использовались значения T_e , T_i и N_e , полученные методом НР. Параметры T_n и $N(O)$ взяты из модели NRLMSISE-00. Представлены данные, полученные в контрольный день 29 октября и во время ионосферной бури 8–13 ноября 2004 г. на высотах 250, 300 и 350 км. Видно, что в разные даты вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был различным. Например, в спокойный день 29 октября вблизи максимума слоя F2, на высотах 250 км и 300 км, около местного полудня

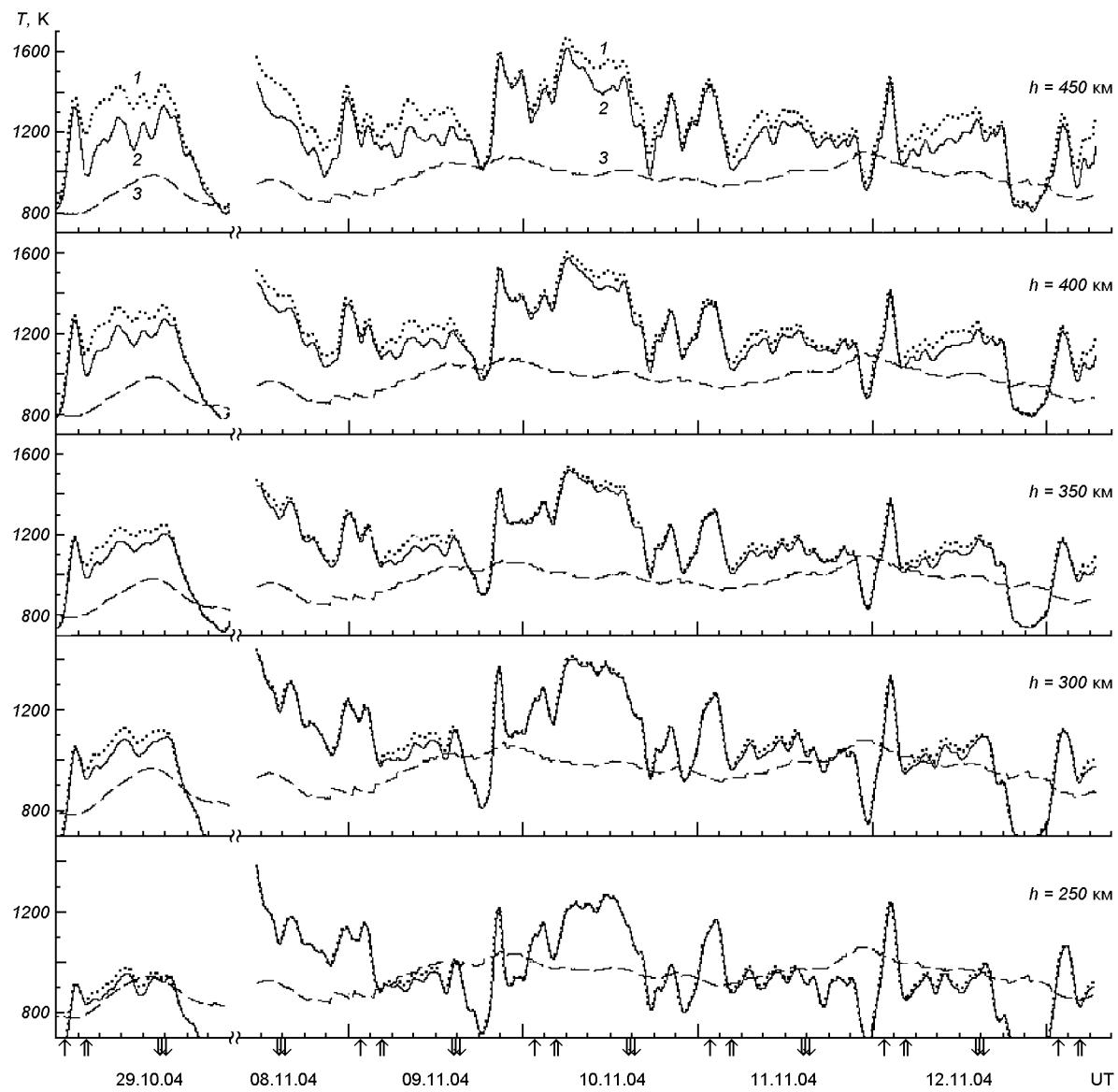


Рис. 2. Временные вариации измеренных температур ионов T_i (точки) и рассчитанных температур нейтралов T_n по данным радара НР (сплошные линии) и T_{nMSIS} по модели NRLMSISE-00 (штриховые линии) в контрольные сутки 29 октября и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г.

($f_0F2 \approx 9$ МГц) вклад двух механизмов охлаждения электронов за счет кулоновских соударений с ионами и неупругого теплообмена с нейтралами сравнялся. С увеличением высоты (на 350 км) стали преобладать потери энергии электронов L_{ei}/N_e в кулоновских соударениях с ионами. В возмущенный день 10 ноября в условиях

сильнейшей депрессии N_e ($f_0F2 \approx 4.0$ МГц вблизи местного полудня) потери L_{ei}/N_e были малы, и вплоть до высоты 350 км преобладали потери в процессе неупругого теплообмена электронов с нейтралами L_e/N_e за счет высокой разности температур $T_e - T_i$ при малых значениях N_e . Аналогичная картина наблюдалась и

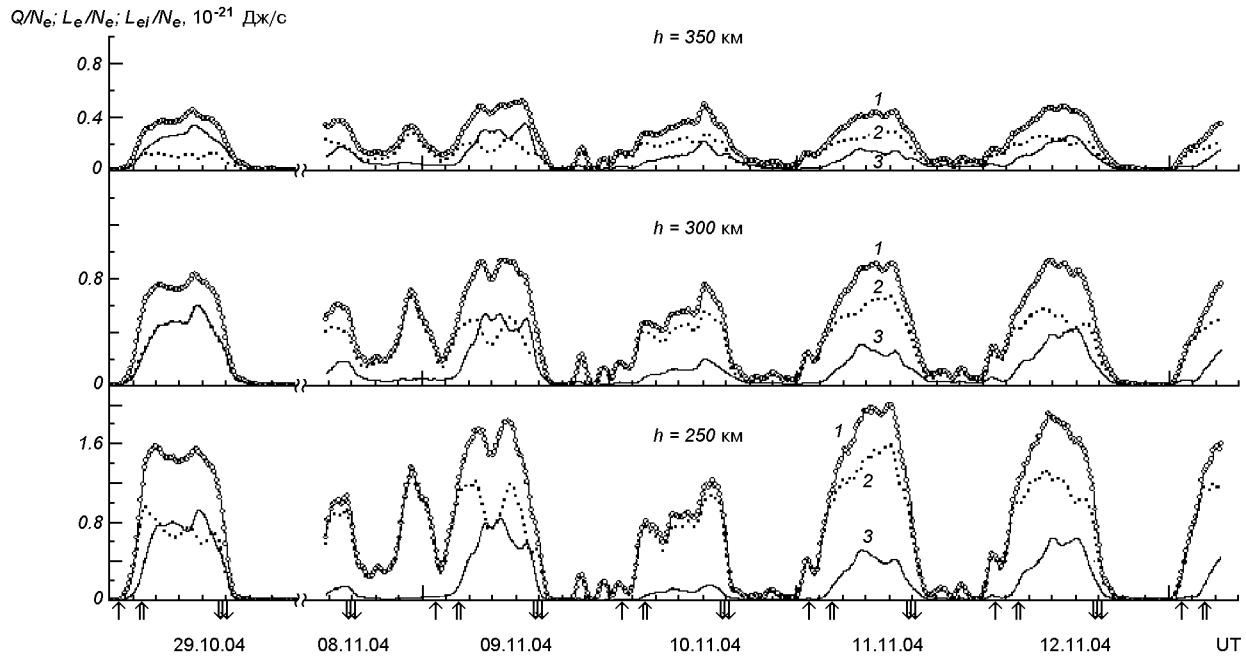


Рис. 3. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа Q/N_e (1) и теплообмена электронов с ионами L_{ei}/N_e (3) и атомами кислорода L_e/N_e (2) в контрольные сутки 29 октября и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

8 ноября в условиях такой же глубокой депрессии N_e ($f_0F2 \approx 4.5$ МГц). По мере затухания бури значения N_e увеличивались, и потери L_{ei}/N_e и L_e/N_e сравнялись 12 ноября на высоте 350 км.

В результате, например, вблизи местного полудня на высоте 300 км подвод энергии к электронному газу Q/N_e , который в спокойный день 29 октября составлял около $0.8 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, во время бури 10 ноября 2004 г. уменьшился до $0.65 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, т. е. примерно в 1.2 раза.

Особенностью теплового режима ионосферы стал ночной нагрев электронного газа. Значения Q/N_e вблизи местной полуночи 8/9 ноября и 9/10 ноября в условиях высокой геомагнитной активности ($K_p = 8.0$ и 7.0) составляли на высоте 300 км около $0.8 \cdot 10^{-21}$ и $0.25 \cdot 10^{-21}$ Дж/с соответственно, тогда как в спокойный день $Q/N_e \approx 0$. Увеличения значений Q/N_e в ночные часы коррелировали с ночных всплесками T_e [6, рис. 9]. При этом в процессе охлаждения электронного газа основную роль играло, по-ви-

димому, возбуждение тонкоструктурных уровней атомарного кислорода. Потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами были малы из-за низкой их концентрации.

Потоки тепла, переносимого электронами, как известно, характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. Вертикальный компонент плотности потока тепла равен

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z},$$

где $\kappa_e = 2.08 k^2 N_e T_e / (m v_{ei})$ — коэффициент теплопроводности электронного газа, k — постоянная Больцмана, m — масса электрона, $I = 66.4^\circ$ — наклонение геомагнитного поля, v_{ei} — частота столкновений электронов с ионами. В системе СИ $v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} N_e T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N_e^{-1/3})$ [5].

Рассчитанные значения Π_T в контрольные сутки 29 октября 2004 г. и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. приведены на рис. 4. Редко наблюдаемой в средних широтах особенностью теплового режима ионосферы ста-

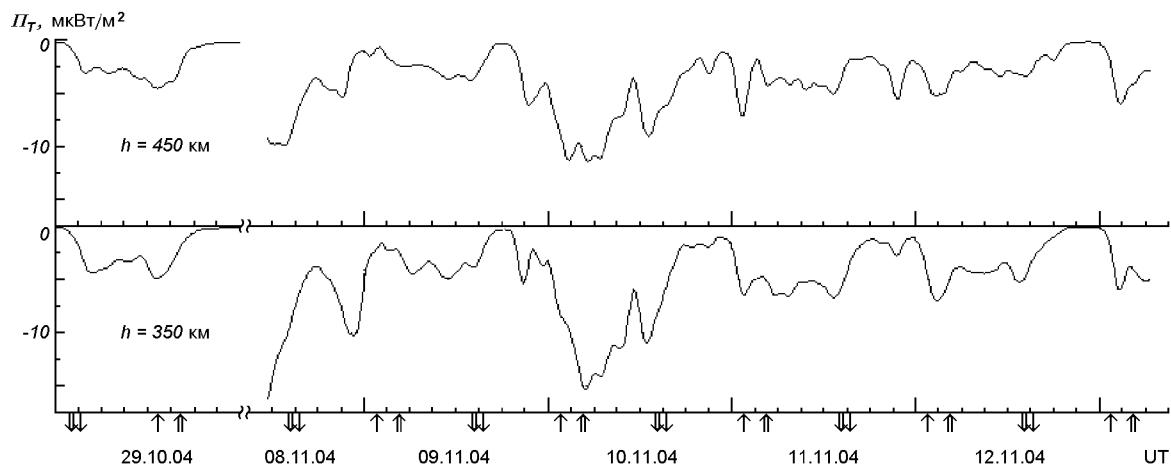


Рис. 4. Временные вариации плотности потока тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, в контрольные сутки 29 октября и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

ло высокое значение Π_T в ночное время в возмущенные сутки 8—12 ноября 2004 г., особенно вблизи местной полуночи 8/9 и 9/10 ноября при значениях $K_p = 8.0$ и 7.0, когда значения Π_T достигали -10 и -5 мкВт/м² на высоте 350 км в указанные даты соответственно. В последующие две ночи при затихающей буре ($K_p \approx 5$) плотность потока Π_T уменьшилась до значений -2 и -2.5 мкВт/м². В спокойный день, а также в ночь 12/13 ноября она была близка к нулю. Максимальные значения Π_T наблюдались сразу после главной фазы первой магнитной бури 8 ноября и во время главной фазы второй бури в утренние часы 10 ноября. Они составляли около -15 мкВт/м². Вблизи местного полудня $\Pi_T \approx -3$ и -4 мкВт/м² в контрольный день 29 октября и в слабо возмущенный день 9 ноября. Во время сильного возмущения 10 ноября $\Pi_T = -11.5$ мкВт/м², т. е. в три раза больше, чем в контрольный день.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации электронной концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$. Эффекты отрицательной ионосферной бури, сопровождающей магнитосферные возмущения, достаточно хорошо изучены. Среди ряда факторов, ответственных за

уменьшение электронной концентрации и имеющих различные пространственные и временные масштабы, одним из основных принято считать возмущение нейтрального состава [11, 25, 44]. Нагревание высокоширотной атмосферы во время поступления энергии из магнитосферы вызывает подъем газа вверх и движение его в стороны к более холодным областям. На ионосферных высотах это приводит к уменьшению концентрации атомов О и увеличению концентраций молекулярных компонентов N₂ и O₂. Это вызывает уменьшение параметра p , определяющего соотношение процессов ионообразования и потерь в фотохимическом приближении, и способствует развитию отрицательной бури. Градиенты давления, возникающие при расширении области нагрева, а также изменение картины магнитосферной конвекции и ее воздействие на нейтральные ветры в высоких широтах посредством ион-нейтрального трения (см., например, [27, 28, 33]) вызывают глобальную перестройку термосферной циркуляции. При этом усиливаются ветры, направленные к экватору, которые переносят газ измененного состава в средние и низкие широты. Возмущения нейтрального состава и термосферного ветра могут также передаваться из высоких в средние широты перемещающимися атмосферными возмущениями (ПАВ), когда энергия поступает в виде отдельных импульсов. Это происходит во время интен-

сивных магнитосферных суббурь, которые сопровождаются быстрыми изменениями авроральных токов.

Проанализируем возможности модели NRLMSISE-00 и данных спутника TIMED в оценке вклада возмущенного нейтрального состава в вариации электронной концентрации $NmF2$. Так, уменьшение $NmF2$ во время бури до шести и семи раз днем 8 и 10 ноября, а также до четырех и шести раз ночью 9/10 и 10/11 ноября (см. [6, рис. 3]) невозможно объяснить изменением нейтрального состава и уменьшением параметра p , полученным из модели NRLMSISE-00, поскольку днем 8 ноября этот параметр даже увеличился в 1.1 раза, а 10 ноября он уменьшился в 1.3 раза (см. рис. 1).

На рис. 5 для сравнения приведены вариации параметра $p = N(O)/N(N_2)$ и ТЕС по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED в спокойные дни 28—30 октября 2004 г. и во время магнитной бури 8—10 ноября 2004 г. Видно, что по сравнению со спокойным днем 29 октября уменьшение параметра p во время главной фазы бурь 8 ноября в 12^h UT и 10 ноября в 11^h40^m UT (время прохождения спутника TIMED над Харьковом) составило 3.5 и 4.2 раза соответственно, тогда как значения $NmF2$ уменьшились в это время в семь и четыре раза (см. [6, рис. 3]). Отсюда следует, что возмущения нейтрального состава вполне могли быть причиной отрицательной фазы второй бури 10 ноября.

В работе [43] показано, что отрицательные возмущения среднеширотной ионосферы в дневное время могли стать результатом расширения области нагрева и возмущенного состава в средние широты за счет меридионального переноса нейтральными ветрами (в виде ПАВ и/или крупномасштабной перестройки термосферной циркуляции), а также за счет зонального переноса из ночного в дневной сектор посредством адвекции.

Однако во время первой бури 8 ноября изменения нейтрального состава только частично могут объяснить уменьшение $NmF2$. Такие случаи отмечались и ранее [24, 46]. Необходимо привлечение дополнительных механизмов для объяснения депрессии N_e . В условиях рассматриваемой бури, по-видимому, мог быть существенным вклад в увеличение скорости потерь ионов

O^+ таких факторов, как нагрев атмосферы, усиление электрических полей, а также колебательное возбуждение молекул N_2 и O_2 [35, 36, 39—41, 49]. Известно, что вклад $N_2(v)$ и $O_2(v)$ может иметь место при значениях $T_e \geq 1500—2000$ К [3, 23, 41, 50], которые наблюдались в нашем случае [6, рис. 9].

Особенности высотного распределения концентрации электронов в области F2 ионосферы. Можно полагать, что деформация профилей $N_e(h)$ в ночь 9/10 ноября (см. [6, рис. 5 и 6]) с уменьшением $NmF2$ и подъемом слоя F2 служит подтверждением упомянутого выше смещения «зоны возмущенного состава» в средние широты и перестройки термосферной циркуляции, вызванных высокоширотным нагревом термосферы. Вместе с тем есть эффекты, косвенно свидетельствующие о смещении структур высокоширотной ионосферы — главного ионосферного провала и аврорального овала на широту, близкую к широте Харькова во время главной фазы бури (при $K_p = 8.7$). Так, сопоставления НР-профилей $N_e(h)$ с ВЗ-ионограммами показали, что в ночь 9/10 ноября ионосфера средних широт приобретала свойства, характерные для высокоширотной ионосферы. К ним относится, например, увеличение диффузности отраженного сигнала [6, рис. 6]. Оно могло быть связано с рассеянием сигнала на мелкомасштабных ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях, генерируемых вблизи экваториальной границы аврорального овала во время сильной бури и имеющих большой пространственный масштаб (сотни и тысячи километров) [2, 19].

Наклонные когерентные отражения зарегистрированы во время главной фазы второй бури (ночью 9 ноября и в первой половине суток 10 ноября) в интервале дальностей 650—1500 км [6, рис. 8]. По-видимому, эти эхо-сигналы принимались с северного направления боковыми лепестками диаграммы направленности антенны, которые под достаточно малыми углами (5—10°) просвечивали Е-область ионосферы. Известно, что отражение происходит на дальностях, где выполняются условия ракурсного рассеяния, и могут быть обусловлены рассеянием на неоднородностях электронной концентрации Е-слоя, генерируемых двухпотоковой неустойчивостью ионосферной плазмы (см., например, [2, 14]). В течение бури в ионосфере над

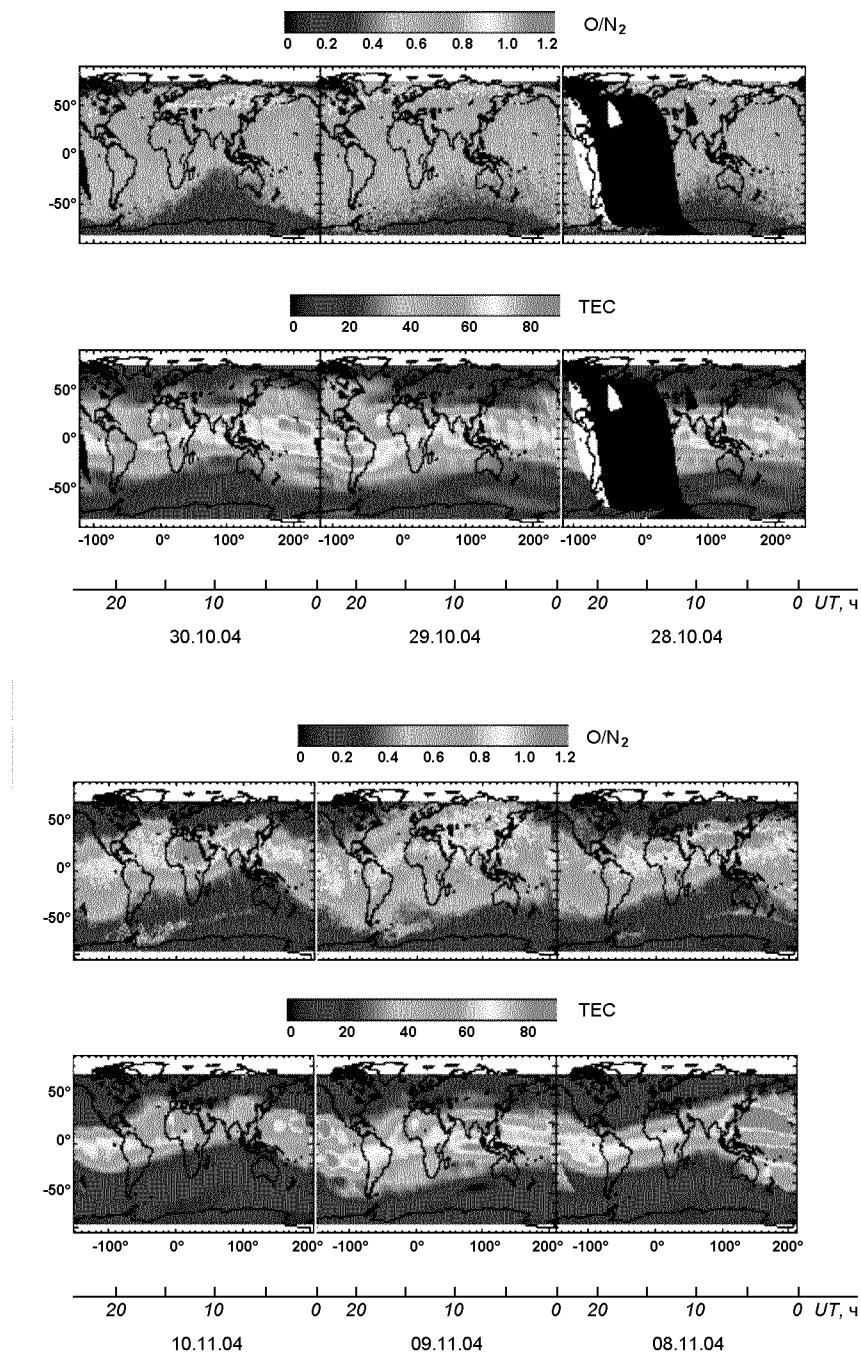


Рис. 5. Вариации отношения концентраций $N(O)/N(N_2)$ и ТЕС по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED в спокойные дни 28—30 октября 2004 г. и во время магнитной бури 8 и 10 ноября 2004 г. Для Харькова данные относятся примерно к 12^h UT 8 ноября и к 11^h40^m UT 10 ноября

радаром напряженность электрических полей, скорее всего, увеличилась. Об этом может свидетельствовать увеличение высоты $hmF2$ (см. далее). Можно полагать, что на 650—1500 км к северу от Харькова (т. е. $6-15^\circ$ по широте), поля E_y были еще интенсивнее и могли превышать пороговое значение $E_{yth} \approx 20$ мВ/м, необходимое для возникновения двухпотоковых неустойчивостей. Такого типа рассеяния редки для средних широт. Они наблюдались, например в Иркутске и Харькове во время магнитных бурь 25 сентября 1998 г., 15 июля 2000 г., 29/30 мая 2003 г., 9/10 ноября 2004 г. [2, 14—16].

Остановимся на необычном профиле $N_e(h)$, зарегистрированном 10 ноября в 11^h15^m UT. Он искажен из-за когерентных отражений на высотах 700 и 1000 км с мощностью, соизмеримой с мощностью сигнала на высоте максимума слоя F2 [6, рис. 7 и 8]. Кроме того, этому профилю $N_e(h)$ соответствовала ВЗ-ионограмма с рассеянным отражением, характерным для дневной высокоширотной ионосферы. Такие эффекты могут косвенно свидетельствовать о том, что в это время экваториальная граница аврорального овала на 15 мин сместилась на широту Харькова. При этом рассеяние радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях над Харьковом дали диффузный след на ионограмме ВЗ. Область турбулизации плазмы, вероятно, простиралась по широте к северу от радара, по крайней мере на расстояние 700—1000 км, где выполнялись условия для ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях Е-слоя. Быстрый характер процесса мог быть связан с изрезанностью и/или быстрой изменчивостью авроральной зоны за счет нестационарности магнитосферной конвекции. Важно отметить, что столь редкое дневное событие наблюдалось, когда индекс D_{st} , характеризующий интенсивность магнитосферного колецевого тока, имел экстремальное значение -289 нТл. Известно, что колецевой ток вносит существенный вклад в изменение экваториальной границы аврорального овала [19].

Вероятность смещения высокоширотных структур (аврорального овала, главного ионосферного провала) на широту радара во время бури была высокой. Об этом могут косвенно свидетельствовать максимальные значения уровня авроральной активности (POES Auroral Activity Level), равные 10, которые были зареги-

стрированы на спутнике NOAA POES примерно с 18^h30^m UT 7 ноября до 12^h49^m UT 8 ноября почти непрерывно, а также с 10^h44^m 44 UT 9 ноября до 17^h30^m UT 10 ноября с кратковременными уменьшениями индекса до значений 9 и еще реже 8 [<http://solar.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>]. Значение этого параметра, характеризующего мощность энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу аврорального овала, свидетельствовало о возможном смещении экваториальной границы овала до геомагнитных широт $\Phi \approx 51\ldots45^\circ$. Вероятность такого смещения значительно увеличивается, если учесть особенности классификации значений индекса POES Auroral Activity Level. Так, значение 9 соответствует мощности авроральных частиц 96 ГВт, индекс 10 — более 100 ГВт, а во время рассматриваемой бури мощность зачастую существенно превышала 100 ГВт. Например, 9 ноября в 19^h28^m UT и 21^h10^m UT эта мощность составляла 399 и 172 ГВт, а 10 ноября в 02^h20^m , 03^h31^m , 06^h57^m , 08^h39^m и 09^h10^m UT она имела значения 278, 461, 468, 419 и 644 ГВт соответственно. Отсюда можно предположить, что овал мог приблизиться к месту расположения харьковского радара ($\Phi = 45.7^\circ$), когда последний находился в ночном и утреннем секторах. Смещение к экватору главного ионосферного провала во время магнитной бури отмечалось неоднократно, например на радаре в Миллстоун Хилл ($L = 3.3$) [24, 26]. В Харькове ($L \approx 1.9$) подобное явление наблюдалось во время магнитных бурь 25 сентября 1998 г. и 29/30 мая 2003 г. [7, 8, 10, 17, 29, 37, 38].

Следует отметить также, что полярное сияние над Харьковом наблюдалось и было запечатлено фотографически во время сильнейшей магнитной бури в ночь 30/31 октября 2003 г. при значениях $K_p = 9.0\ldots8.3$ [20].

Вариации высоты $hmF2$ максимума слоя F2. Увеличение высоты $hmF2$ составляло 50—80 км днем 8 ноября после главной фазы первой бури, достигло 300 км ночью 9—10 ноября во время главной фазы второй бури и 150—180 км в полдень 10 ноября [6, рис. 3]) и объясняется совместным воздействием ряда факторов. Среди них эффекты расширения термосферы, а также увеличения меридиональной скорости термосферного ветра, направленной к экватору. Наряду с этим существенный вклад может вносить

также проникновение магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (в течение нескольких суток) высыпания энергичных частиц, зарегистрированных на спутниках GOES-8 и GOES-12. Высыпания частиц ведут к повышению проводимости нижележащей авроральной ионосфера, закорачивающей экранирующее поле поляризации, и способствуют проникновению магнитосферных электрических полей в средние широты [3, 34]. Исходя из увеличения $hmF2$, можно полагать, что зональная составляющая электрического поля E_y над Харьковом была направлена на восток. Оценка сверху E_y по величине изменения $hmF2$ [3] дала максимальные значения напряженности проникающих в ионосферу над Харьковом полей 12–45 мВ/м днем и 50 мВ/м ночью. Такие значения E_y свойственны высокоширотной ионосфере.

На фоне продолжительного подъема слоя F2 зарегистрированы также быстрые вариации величины $hmF2$. Например, 9 ноября около 16^h UT она резко уменьшилась примерно на 60 км, за ней с запаздыванием около 40 мин начала уменьшаться концентрация $NmF2$. Можно предположить, что произошло переключение поля с восточного направления на западное со значением $E_y \approx -15$ мВ/м (оценка E_y получена по величине изменения $hmF2$ [3]). Такие события могут свидетельствовать о проникновении импульса электрического поля в ионосферу над Харьковом в результате нестационарных возмущений магнитосферных электрических полей [26, 31, 32]. Причиной таких возмущений могла быть высокая суббуровая активность (при значениях индекса $AE \approx 1500$ –1700 нТл в авроральной области), вызванная внезапными изменениями динамического давления солнечного ветра и составляющей B_z межпланетного магнитного поля. Случаи быстрых «переключений» восточно-западного направления электрического поля, которые связаны с изменениями электродинамической обстановки во время магнитосферной суббури, с нестационарностью магнитосферной конвекции и т. д., рассмотрены, например, в работе [45]. Аналогичные эффекты наблюдались также в Харькове во время магнитных бурь 20/21 марта и 29/30 мая 2003 г. [9, 10].

Особенности вариаций T_e и T_i . К ним относится необычный ночной нагрев плазмы, кото-

рый был зарегистрирован не только во время главной фазы бури, но вплоть до конца измерений, когда магнитное поле было все еще возмущено (индекс $D_{st} \leq -65$ нТл). Совпадение во времени периодов депрессии $NmF2$ и ночных нагревов плазмы (см. [6, рис. 3 и 9]), которое нередко отмечалось в течение активного периода бури (в ночь 8/9 и 9/10 ноября), можно рассматривать как косвенное подтверждение эффекта смещения главного ионосферного провала на широту радара и горячей зоны вместе с плазмопаузой вплоть до геомагнитной оболочки радара $L = 1.9$. В Харькове аналогичный эффект наблюдался, например, во время магнитной бури 29/30 мая 2003 г. при $A_p = 89$ и $K_p = 8.3$ [10].

Вариации ионного состава. Зарегистрированные уменьшения («провалы») в 1.5–3.5 раза величины $N(H^+)/N_e$, например на высоте 1100 км, которые наблюдались ночью 8/9 и 9/10 ноября [6, рис. 11], по-видимому, можно объяснить все теми же эффектами смещения главного ионосферного провала, провала легких ионов и опустошения магнитной силовой трубы над Харьковом. Нестационарность магнитосферной конвекции и неравномерность высыпания заряженных частиц усложняют картину распределения плазмы в субавроральной ионосфере, делают ее нерегулярной, изрезанной, вызывают расслоения главного ионосферного провала. Это находит отражение в окрестности провала легких ионов в виде пиков, провалов относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$. Так, вблизи полуночи 9/10 ноября концентрации $N(H^+)/N_e$ на высоте 900 км уменьшилась от значения 0.7 в спокойный день до 0.2, т. е. в 3.5 раза, а высота h_t перехода от ионов O^+ к ионам H^+ увеличилась от 650 до 1450 км, что характерно для условий магнитных возмущений [22].

Вариации TEC, полученные из данных радара и спутника GUVI TIMED, имеют хорошее согласие в спокойные и возмущенные дни [6, рис. 4 и 10].

выводы

С привлечением наблюдательных данных радара НР проведены исследования ионосферных возмущений во время сильнейшей магнитной бури, которая состояла из двух последовательных маг-

нитных возмущений 7/8 и 9/10 ноября 2004 г. со значениями индексов: $A_p = 189$ и 181, $D_{smin} = -373$ и -289 нТл, $K_{pmax} = 8.7$ и 8.7 . Бура была связана с высокой вспышечной активностью Солнца, необычной для фазы перехода к минимуму 23-го цикла.

Результаты исследований сводятся к следующему.

1. Одной из причин редко наблюдаемого в средних широтах очень сильного отрицательного ионосферного возмущения (уменьшение концентрации электронов $NmF2$ в максимуме области F2 ионосферы до 6—7 раз на фоне высокой геомагнитной активности; необычный ночной нагрев плазмы до дневных значений температур ионов и электронов около 2000 и 3000 К соответственно) могла быть деформация магнитосферы, сопровождаемая смещением главного ионосферного провала на широту харьковского радара, и горячей зоны вместе с плазмопаузой вплоть до геомагнитной оболочки радара $L = 1.9$.

2. Уменьшение концентрации электронов $NmF2$ в дневное время до 6—7 раз в активные периоды бури обусловлено расширением области нагрева и зоны возмущенного состава из высоких в средние широты в результате меридионального переноса нейтральными ветрами (в виде ПАВ и/или крупномасштабной перестройки термосферной циркуляции), а также зональным переносом из ночного сектора вплоть до дневного сектора посредством адвекции. Такие события регистрируются во время сильных магнитных бурь.

3. Дневные значения отношения концентраций $N(O)/N(N_2)$, полученные с помощью прибора GUVI на спутнике TIMED, показали, что возмущение нейтрального состава полностью объясняет уменьшение $NmF2$ в четыре раза 10 ноября, однако для полного объяснения уменьшения $NmF2$ в семь раз 8 ноября необходимо привлечение дополнительных факторов (например колебательного возбуждения молекул N_2 и O_2 при $T_e \geq 1500$ — 2000 К).

4. Совместный анализ высотных профилей концентрации электронов $N_e(h)$, полученных из данных НР, и ионограмм вертикального зондирования показал увеличение диффузности отраженного сигнала на фоне значительной деформации профилей $N_e(h)$. Скорее всего, оно обусловлено рассеянием сигнала на мелкомасштаб-

ных неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля и генерируемых вблизи экваториальной границы аврорального овала во время сильной магнитной бури, а также смещением этой границы к экватору, причем область турбулизации плазмы может простираться вплоть до широты харьковского радара.

5. Обнаруженное увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя F2 в активные периоды бури примерно на 300 км ночью и на 150—180 км в дневное время объясняются эффектами расширения термосферы, усилением меридиональной скорости термосферного ветра и смещением к экватору главного ионосферного провала, а также проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (в течение нескольких суток) высыпания энергичных частиц, зарегистрированного на спутниках GOES-8 и GOES-12. Оценка сверху зонального компонента электрического поля по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения напряженности проникающих в ионосферу над Харьковом полей $E_y \approx 12$ — 45 мВ/м днем и 50 мВ/м ночью. Такие значения E_y свойственны высокосиротной ионосфере.

6. Зарегистрированные внезапные возмущения высоты $hmF2$ на фоне общего подъема слоя F2 во время бури, за которыми с запаздыванием около 40 мин следовали изменения концентрации $NmF2$, обусловлены, скорее всего, проникновением импульса электрического поля в ионосферу над Харьковом в результате нестационарных возмущений магнитосферных электрических полей. Причиной таких возмущений могла быть высокая суббуровая активность, вызванная резкими изменениями динамического давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

7. Обнаруженные среднеширотные когерентные отражения (эхо) в интервале дальностей 650—1500 км во время главной фазы второй магнитной бури свидетельствовали о превышении напряженности электрических полей магнитосферного происхождения порогового значения $E_{yth} \approx 20$ мВ/м, необходимого для возникновения токовых двухпотоковых неустойчивостей, поскольку когерентные отражения обусловлены рассеянием сигнала на неоднородностях электронной концентрации Е-слоя, генерируемых указанной неустойчивостью. Зарегистрировано

редкое событие, когда во время максимума главной фазы бури (при $D_{st} = -289$ нТл и $K_p = 8.3$) когерентные отражения наблюдались днем.

8. Расчеты показали, что и для обсуждаемой бури значения полного электронного содержания I в ионосферном столбе единичного сечения коррелировали в основном с вариациями электронной концентрации в максимуме области F2. Во время главной фазы первой и второй магнитных бурь значения I уменьшились по сравнению с контрольными сутками примерно в два раза около местного полудня, и в 2.5 раза — вблизи полуночи.

9. Зарегистрированные во время главной фазы бури уменьшения («провалы») значений относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах в 1.5—3.5 раза по сравнению с контрольным днем свидетельствовали об опустошении магнитной силовой трубы, проходящей над Харьковом, связанном, скорее всего, с деформацией магнитосфера, смещением главного ионосферного провала и провала легких ионов в средние широты. Изрезанность суточных вариаций $N(H^+)/N_e$ могла быть вызвана нестационарностью магнитосферной конвекции и нерегулярностью высыпаний заряженных частиц, которые усложняли картину распределения плазмы в субавроральной ионосфере.

10. На основе расчетов с привлечением термосферной модели NRLMSISE-00 показано, что во время бури температура нейтрального газа на высоте 300 км увеличилась вблизи полудня на 300 К, а высота термопаузы — не менее чем до 400 км, в спокойных условиях она составляла около 350 км.

11. Подвод энергии к электронному газу вблизи местного полудня на высоте 300 км в возмущенный день 10 ноября 2004 г. уменьшился в 1.3—1.5 раза по сравнению со спокойным днем. Это привело к росту плотности потока тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы, в среднем в три раза. Особенностью теплового режима ионосферы стал значительный нагрев электронов и увеличение значений Π_T в ночное время в возмущенные сутки 8—12 ноября 2004 г., тогда как в спокойных условиях их значения близки к нулю.

12. Наиболее интересным результатом проведенных исследований является то, что во время

сильнейшей магнитной бури 7—10 ноября 2004 г. крупномасштабные образования высокоширотной ионосферы (авроральный овал, ионосферный провал и др.) и связанные с ними неоднородности ионосферной плазмы могли смещаться к экватору до широты Харькова.

1. Аннакулиев С. К., Деминов М. Г., Шубин В. Н. Полуэмперическая модель бури в ионосфере средних широт // Солнечно-земная физика.—2005.—Вып. 8.—С. 145—146.
2. Афраймович Э. Л., Косогоров Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 4.—С. 491—498.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.
4. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИ-ЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6—30.
5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.
6. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 62—76.
7. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
8. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57—94.
9. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—45, № 6.—С. 789—802.
10. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И. и др. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 года // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—45, № 6.—С. 803—823.
11. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
12. Жеребцов Г. А., Пирог О. М., Полех Н. М. и др. Реакция ионосферы на большую геомагнитную бурю: наблюдение и моделирование // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—45, № 5.—С. 642—651.
13. Карпов И. В., Бессараб Ф. С. Моделирование отклика параметров термосферы на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэрономия.—2004.—44, № 3.—С. 394—401.
14. Куркин В. И., Пирог О. М., Полех Н. М. и др.

- Комплексные исследования ионосферных эффектов геомагнитных бурь в северо-восточном регионе России // Тр. XX Всерос. конф. по распространению радиоволн; Нижний Новгород, 2–4 июля 2002 г. — Нижний Новгород, 2002.—С. 62–63.
15. Лысенко В. Н., Черняк Ю. В. Особенности методики определения параметров ионосферной плазмы во время естественных возмущений в ионосфере // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 110–113.
 16. Лысенко В. Н., Черняк Ю. В. Определение параметров ионосферы при изменениях космической погоды // Радиофизика и электроника.—2006.—11, № 3.—С. 409–414.
 17. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659–666.
 18. Ташилин А. В., Романова Е. Б. Моделирование отклика ионосферы на геомагнитную бурю 22 марта 1979 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 2.—С. 224–226.
 19. Урядов В. Н., Куркин В. И., Вертоградов Г. Г. и др. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика.—2004.—67, № 12.—С. 1041–1056.
 20. Черногор Л. Ф. Нелинейная радиофизика. — Харьков: Харьков. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2004.
 21. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1969.—С. 292–352.
 22. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. Calculated daily variations of O⁺ and H⁺ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results // J. Atmos. and Terr. Phys.—1979.—41.—P. 471–482.
 23. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577–584.
 24. Buonsanto M. J. Millstone Hill incoherent scatter F region observations during the disturbances of June 1991 // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A4.—P. 5743–5755.
 25. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci. Revs.—1999.—88.—P. 563–601.
 26. Buonsanto M. J., Gonzalez S. A., Pi X., et al. Radar Chain Study of the May, 1995 Storm // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 233–248.
 27. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., et al. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A8.—P. 14673–14691.
 28. Burns A. G., Killeen T. L., Roble R. G. A theoretical study of thermospheric composition perturbations during an impulsive geomagnetic storm // J. Geophys. Res.—1991.—96, N A8.—P. 14153–14167.
 29. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science: Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17–24 August 2002. — Maastricht, 2002.—P. 2280.
 30. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // Planet. Space Sci.—1968.—16.—P. 125–132.
 31. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.367–26.372.
 32. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.359–26.366.
 33. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffet R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A3.—P. 3.893–3.914.
 34. Gonzales C. A., Kelley M. C., Behnke R. A., et al. On the Latitudinal Variations of the Ionospheric Electric Field During Magnetospheric Disturbances // J. Geophys. Res.—1983.—88, N A11.—P. 9135–9144.
 35. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime Thermosphere Above Millstone Hill During Severe Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17.275–17.282.
 36. Mikhailov A. V., Förster M. Some F2-layer effects during the January 6–11, 1997 CEDAR Storm Period as Observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Facility // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 249–261.
 37. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // EOS Trans. AGU. 81 N 48. Fall Meeting. F 947. San Francisco. USA. 2000.
 38. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998 // EOS Trans. AGU. 82 N. 20. Spring Meeting. S 291. San Francisco. USA. May 15. 2001.
 39. Pavlov A. V. The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the ionosphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 6–12 April 1990 // Ann. geophys.—1998.—16.—P. 589–601.
 40. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. Using steady-state vibrational temperatures to model effects of N₂^{*} on calculations of electron densities // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 26941–26945.
 41. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5–11 June 1991 storm // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 263–279.
 42. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res.—2002.—107, N 12.—P. 1468–1483.
 43. Prölss G. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 1–9.
 44. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms // Handbook of Atmospheric Electrodynamics / Ed. H. Volland. — Roca Raton, Fla. CRC Press, 1995.—P. 195–248.
 45. Reddy C. A., Nishida A. Magnetospheric Substorms and Nighttime Height Changes of the F2 Region at Middle and

- Low Latitudes // *J. Geophys. Res.*—1992.—**97**, N A3.—P. 3039—3061.
46. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurement // *J. Geophys. Res.*—1994.—**99**, N A12.—P. 23.359—23.365.
47. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // *Space Res.*—1973.—**13**.—P. 267—286.
48. Salah J. E., Evans J. V., Alcayde D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Saintin // *Ann. geophys.*—1976.—**32**, N 3.—P. 257—266.
49. Schlesier A. C., Buonsanto M. J. The Millstone Hill Ionospheric Model and its Application to the May 26—27, 1990, Ionospheric Storm // *J. Geophys. Res.*—1999.—**104**, N A10.—P. 22.453—22.468.
50. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // *Rev. Geophys. and Space Phys.*—1978.—**16**, N 3.—P. 355—399.

IONOSPHERIC PROCESSES DURING THE 7—10 NOVEMBER 2004 EXTREME GEOSPACE STORM.

2. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Ye. I. Grigorenko, S. A. Pazura, L. F. Chernogor

The simulation results of the effects of the thermosphere and the Earth's upper atmosphere heat regime disturbances during the extreme magnetic storm on 7—10 November 2004 are presented. The measurement results of the ionosphere parameters with the incoherent scatter technique and thermospheric model NRLMSISE-00 are used. The effects of the magnetospheric electric field penetration to the midlatitudes are estimated. The ionosphere-thermosphere disturbance effects are explained by the processes of high latitude heating due to the solar wind energy input, as well as particle precipitation, shift of the high latitude structures (auroral oval, midlatitude trough, hot zone etc.) to the latitudes that are closed to the Kharkiv radar latitude.