

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

С. А. Пазюра<sup>1</sup>, В. И. Таран<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## Особенности ионосферной бури 4—6 апреля 2006 г.

Надійшла до редакції 20.06.07

Наведено результати дослідження відгуку шару  $F$  та зовнішньої іоносфери на помірну магнітну бурю 4—6 квітня 2006 р. Спостереження проведені за допомогою радара некогерентного розсіяння в Харкові. Магнітна буря супроводжувалася іоносферною бурєю зі змінними фазами. Особливістю даної іоносферної бури є наявність двох позитивних фаз збурення. Розглянуто головні механізми, що формують розвиток позитивних та негативної фаз бури.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что значительные возмущения космической погоды приводят к выходу из строя космических аппаратов, энергосистем, средств телекоммуникаций и т. д. Для предотвращения возможных аварий и своевременного предупреждения населения об изменениях космической погоды (в частности о магнитных бурях) требуются продолжительные и комплексные наблюдения за состоянием космической погоды в широком диапазоне высот, истолкование наблюдаемых физических процессов, а также их моделирование и предсказание.

Многообразие процессов в геокосмосе и сложность их взаимодействия делают индивидуальной каждую бурю, что затрудняет прогнозирование ее развития. Анализ каждой новой бури дает дополнительную информацию о формирующих ее процессах.

При помощи единственного в среднеширотной Европе харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) метрового диапазона на протяжении почти трех циклов солнечной активности (СА) проводятся наблюдения состояния ионо-

сферной плазмы и космической погоды [3—11, 15, 26, 27, 29, 30]. Расположение харьковского радара некогерентного рассеяния (геомагнитная широта  $45.7^\circ$ ,  $L \approx 1.9$ ) дает возможность исследовать эффекты, связанные с процессами ионосферно-магнитосферного взаимодействия глубоко во внутренней плазмосфере. Роль этих эффектов существенно возрастает во время сильных геомагнитных возмущений, которые охватывают не только высокие широты, но проникают также в средние широты.

Ранее авторы основное внимание уделяли исследованию сильнейших ионосферных бурь, которые происходят сравнительно редко и, как правило, вблизи периода максимальной солнечной активности [3—11, 15, 26, 27, 29, 30]. В то же время умеренные ионосферные бури возникают значительно чаще, но они остаются менее изученными.

Целью работы является исследование особенностей поведения области  $F2$  и внешней ионосферы во время умеренной магнитной бури 4—6 апреля 2006 г. (максимальное значение индекса  $K_p \approx 5$ ).

Наблюдения бури проводились с 27 марта по

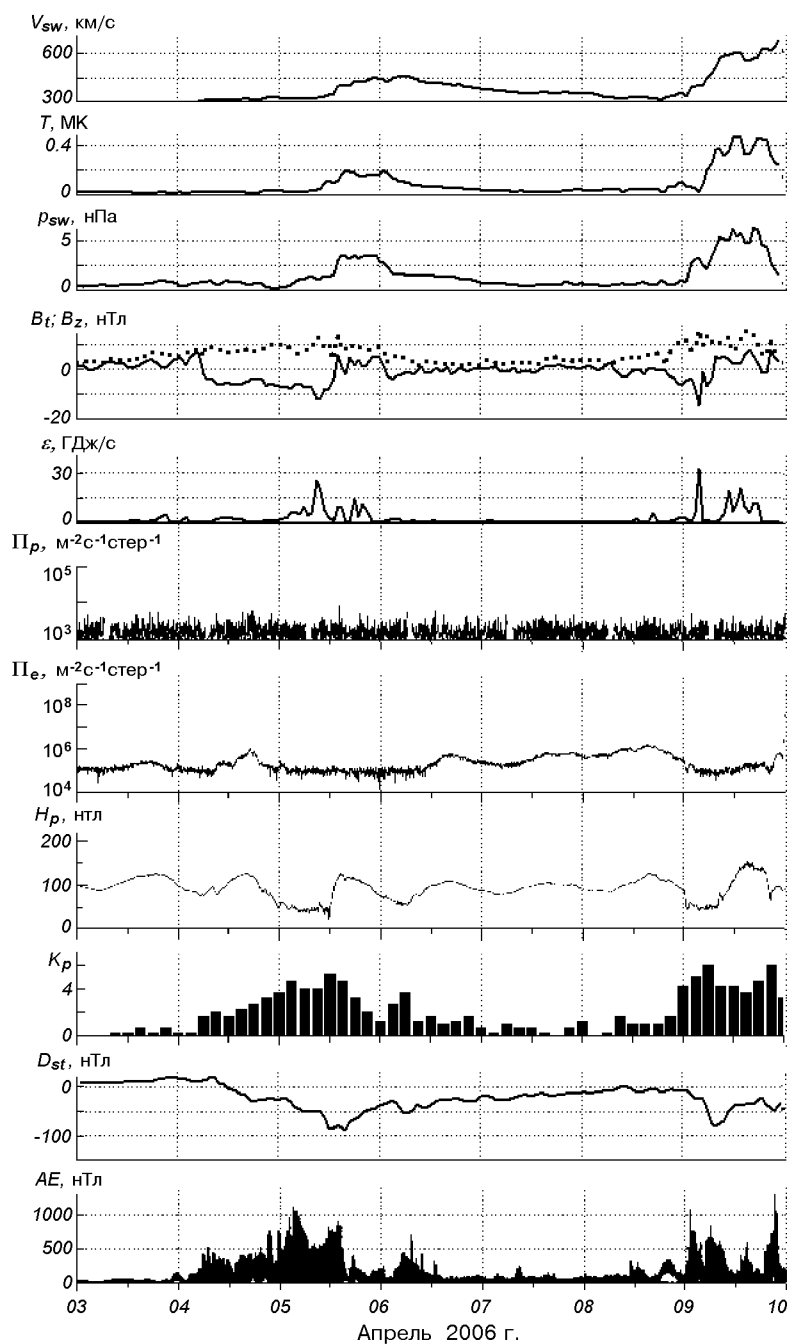


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: радиальной скорости  $V_{sw}$ , температуры  $T$ , рассчитанных значений динамического давления  $p_{sw}$ , модуля  $B_t$ - (точки) и  $B_z$ -составляющих (линия) ММП, рассчитанных значений энергии  $\epsilon$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, плотности потоков протонов  $\Pi_p$  с энергиями более 10, 50 и 100 МэВ и электронов  $\Pi_e$  с энергией более 2 МэВ,  $H_p$ -составляющей геомагнитного поля,  $K_p$ -индекса (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>),  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и  $AE$ -индекса (WDC Kyoto) в течение 3—9 апреля 2006 г.

6 апреля 2006 г. в соответствии с международной программой LTCS-C/NOFS (Lower Thermosphere Coupling Study-Communications /Navigation Outage Forecasting System).

#### СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

**Радар некогерентного рассеяния.** Использованный радар некогерентного рассеяния (географические координаты: 49.6° N, 36.3° E, геомагнитные координаты: 45.7°, 117.8°) [6, 15] работал 27 марта — 6 апреля 2006 г. в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 660 и 130 мкс на частотах  $f_1$  и  $f_1 \pm 100$  кГц, где  $f_1 \approx 158$  МГц. Такой режим обеспечивал высотное разрешение примерно 100 и 20 км в диапазонах высот 200—1000 и 100—400 км соответственно.

**Ионозонд «Базис»** использовался для получения ионограмм вертикального зондирования, измерения критической частоты  $f_0F2$  слоя  $F2$  ионосферы и калибровки профиля электронной концентрации, получаемого методом некогерентного рассеяния (НР).

#### СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ

Магнитная буря 4—6 апреля 2006 г. протекала на фоне низкой вспышечной активности Солнца. Параметры, определяющие состояние космической погоды 3—9 апреля 2006 г., приведены на рис. 1. До 4 апреля геомагнитное поле было спокойным. Скорость солнечного ветра не превышала 300 км/с. Примерно в 06:00 (здесь и далее время UT) 4 апреля  $B_z$ -составляющая межпланетного магнитного поля резко повернула к югу, достигла значения  $-11$  нТл, оставаясь отрицательной до 18:00 5 апреля. В это же время скорость солнечного ветра постепенно увеличивалась до 350 км/с, в 18:00 5 апреля наблюдается более резкое увеличение  $V_{sw}$  до 400 км/с, после чего продолжалось постепенное увеличение скорости до 450 км/с. В результате этого возникла умеренная магнитная буря 4—6 апреля 2006 г. с экстремальными значениями индексов  $A_p = 29$ ,  $D_{st} = -100$  нТл. Буря началась внезапно 4 апреля около 07:00, главная фаза

продолжалась до 15:00 5 апреля, а фаза восстановления — до конца периода наблюдений.

#### ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ

Магнитная буря сопровождалась ионосферной бурей со знакопеременными фазами (рис. 2). Особенностью данной ионосферной бури является наличие двух положительных фаз возмущения. Первая фаза носила характер длительной (~ 5 ч) положительного возмущения с наибольшим отклонением  $\delta f_0F2$  около +30 %. Затем последовала отрицательная фаза. Она была менее интенсивной, максимальное отклонение  $\delta f_0F2$  составило  $-25$  %. Фаза продолжалась 22 ч, ее запаздывание относительно начала магнитной бури составило около 15 ч. Вблизи 05:00 6 апреля имела место вторая положительная фаза возмущений с наибольшим отклонением  $\delta f_0F2$  около +30 %, которая продолжалась до конца наблюдений (12:45).

**Первая положительная фаза** 4 апреля сопровождалась увеличением критической частоты  $f_0F2$  по сравнению с контрольным днем. Наибольшее отклонение  $\delta f_0F2$  составило 30 % около 20:00, что соответствовало увеличению  $N_mF2$  примерно в 1.4 раза (рис. 2). При этом высота максимума слоя  $z_mF2$  увеличилась по сравнению с контрольным днем 1—3 апреля на 30—40 км (рис. 2).

**Отрицательная фаза** началась 4 апреля около 23:00 и развивалась в течение 5 апреля. Максимальное падение  $f_0F2$  по сравнению с контрольным днем наблюдалось 5 апреля около 03:00 и составило 1.3 МГц, что соответствовало уменьшению  $N_mF2$  в 1.8 раза (рис. 2). На рис. 2 приведены также временные вариации высоты  $z_mF2$ . До местного полудня 4 апреля поведение  $z_mF2$  можно считать характерным для слабо возмущенной среднеширотной ионосферы: ночью значения  $z_mF2 \approx 320$  км превышали дневные значения, равные 220—240 км. Вариации  $z_mF2$ , как известно, обусловлены регулярными суточными изменениями нейтрального состава, фотохимических процессов и термосферных ветров. После захода Солнца высота  $z_mF2$  увеличилась и достигла характерных ночных значений. Во время ионосферных возмущений

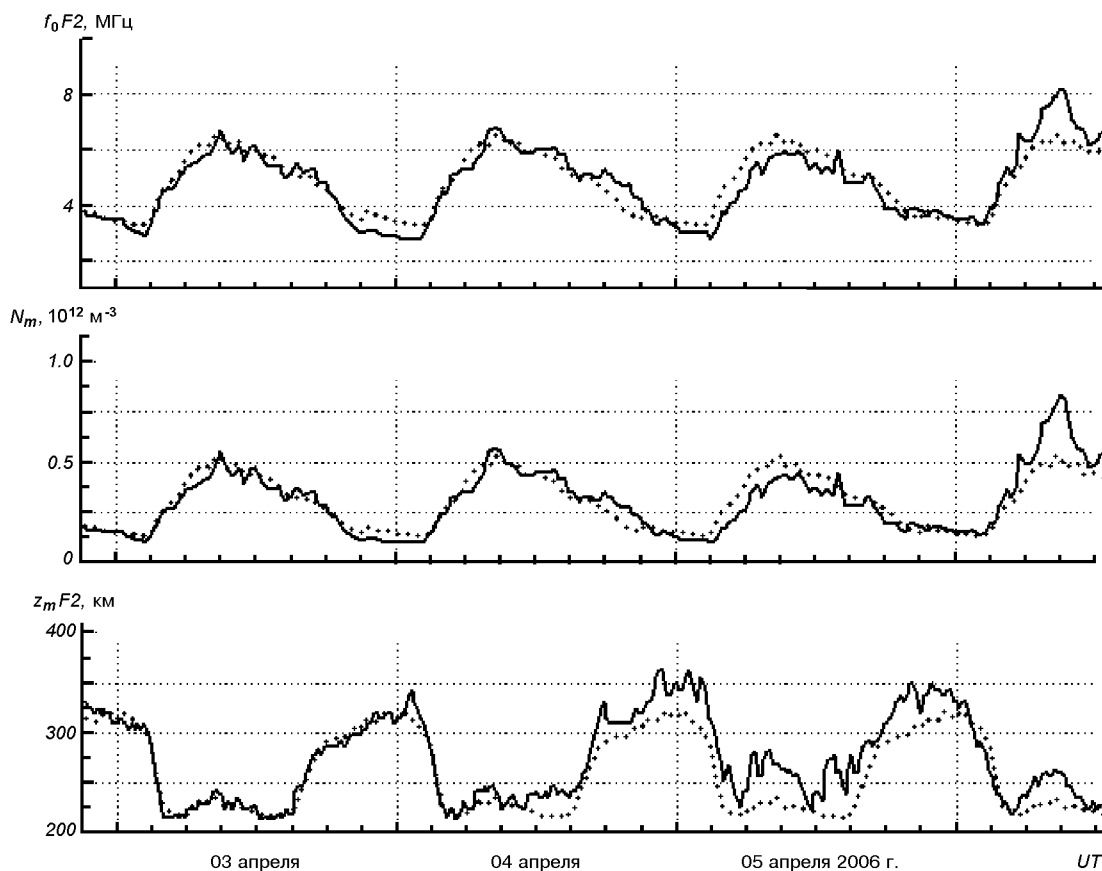


Рис. 2. Вариации критической частоты  $f_0F2$ , электронной концентрации  $N_mF2$  в максимуме слоя  $F2$ , высоты максимума  $z_mF2$  в течение 3—6 апреля 2006 г. (линия) и в контрольный день (точки), полученные при усреднении данных 1—3 апреля 2006 г.

4—6 апреля наблюдался подъем  $z_mF2$  по сравнению с контрольным периодом 1—3 апреля на 30—50 км.

**Вторая положительная фаза** началась 6 апреля около 01:00 и сопровождалась увеличением критической частоты  $f_0F2$  по сравнению с контрольным днем. Наибольшее отклонение  $\delta f_0F2$  составило 30 % около 10:00, что соответствовало увеличению  $N_mF2$  примерно в 1.4 раза (см. рис. 2). При этом высота максимума слоя  $z_mF2$  увеличилась по сравнению с контрольным днем 1—3 апреля на 30 км (см. рис. 2).

**Вариации температуры электронов и ионов.** На рис. 3 приведены вариации температур электронов и ионов в период 3—6 апреля.

Суточные изменения температуры электронов  $T_e$  в спокойной ионосфере при средней солнечной активности характеризуются быстрым увеличением во время восхода Солнца, уменьшением  $T_e$  вблизи полудня за счет увеличения теплопередачи от электронов к ионам, которая пропорциональна  $N^2$ , и уменьшением  $T_e$  после захода Солнца (см. данные за 3 апреля, которые в рассматриваемом цикле измерений соответствуют спокойным условиям:  $A_p = 1$ ). В контрольный день 3 апреля, например в 09:00 на высоте 300 км,  $T_e \approx 2000$  К. В последующие сутки поведение  $T_e$  определялось значениями концентрации электронов  $N$ , а значит и характером ионосферного возмущения. Так, 4, 5, 6 апреля

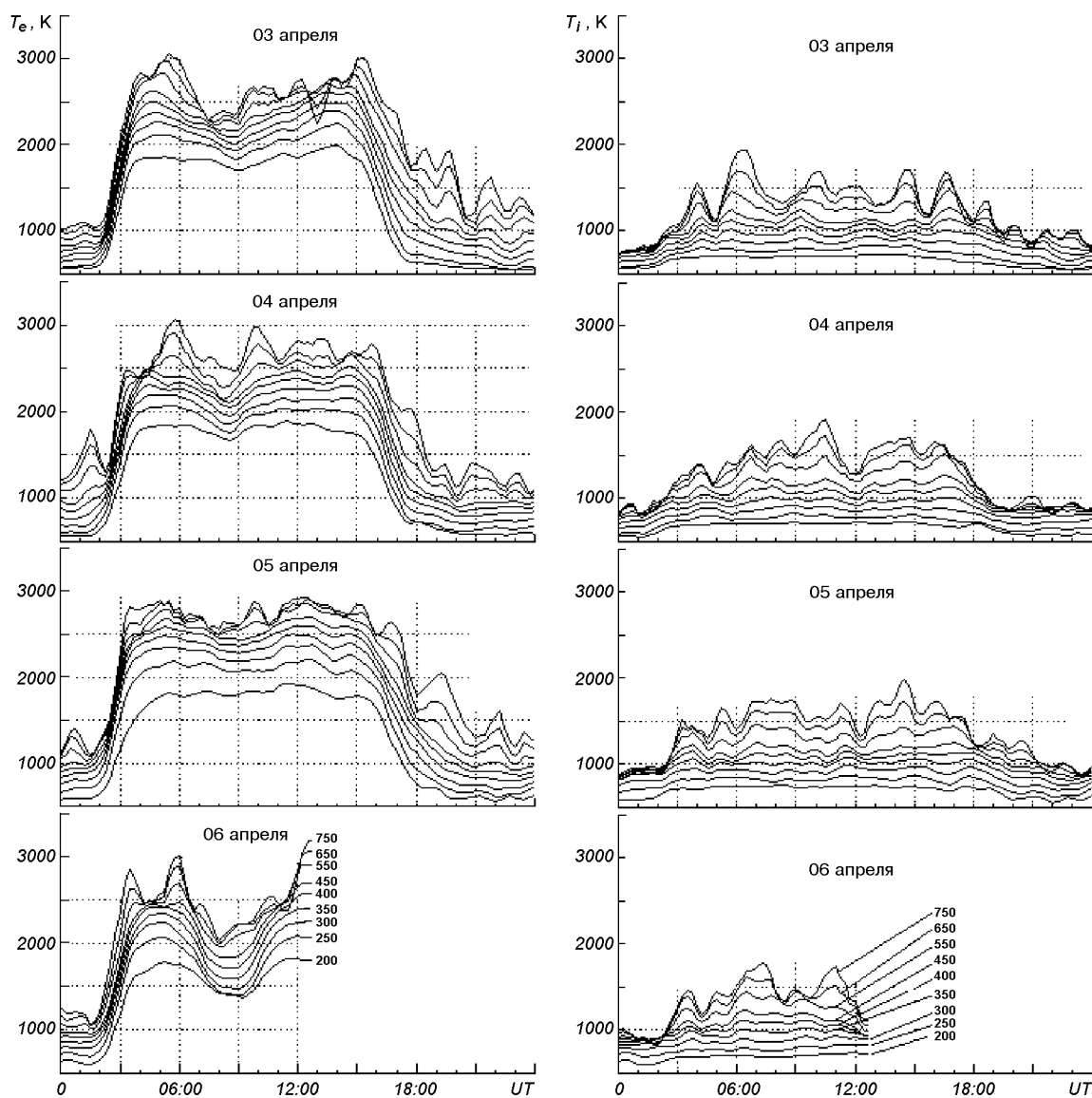


Рис. 3. Вариации температур электронов  $T_e$  (слева) и ионов  $T_i$  (справа) в магнитоспокойный день 3 апреля и возмущенные сутки 4—6 апреля 2006 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

вблизи местного полудня в 09:00 температура электронов на высоте 300 км составляла  $T_e \approx 2000, 2200$  и  $1650$  К соответственно.

Значения изменения  $T_i$  как в контрольный день 3 апреля, так и в возмущенные дни отличались незначительно. Ионосферные возмущения слабо повлияли на нагрев ионов.

#### РАСЧЕТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Концентрация нейтралов.** Состав нейтральной атмосферы, как известно, определяет скорости фотохимических процессов в ионосфере, процессов переноса плазмы и поведение заряженных частиц (электронной концентрации).

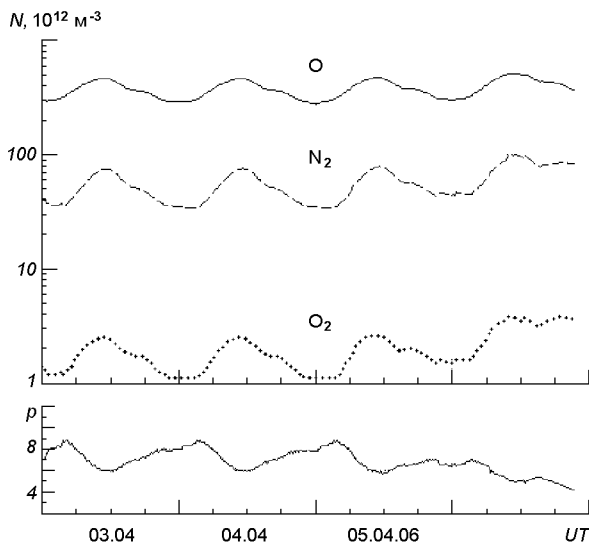


Рис. 4. Вариации концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы и параметра  $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$  на высоте 300 км в период 3—6 апреля 2006 г. (из расчета по модели NRLMSISE-00 [[http://uap-www.nrl.navy.mil/models\\_web/](http://uap-www.nrl.navy.mil/models_web/)])

На рис. 4 приведены вариации концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы  $N(N_2)$ ,  $N(O)$ ,  $N(O_2)$  — молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода на высоте 300 км в течение 3—6 апреля 2006 г. Данные получены из расчетов по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [31]. Дополнительно приведены временные вариации параметра  $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ , который характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов  $O^+$  и пропорционален концентрации электронов в области  $F$  ионосферы. Во время отрицательной фазы ионосферной бури 5 апреля максимальное уменьшение электронной концентрации в максимуме слоя  $F2$  (до 1.8 раза) наблюдалось около 04:00. В это время согласно модели концентрация основных компонентов нейтральной атмосферы на высоте 300 км по сравнению с контрольным днем почти не изменилась. Со второй половины 5 апреля наблюдается увеличение  $N(O_2)$  и  $N(N_2)$ . В результате параметр  $p$  уменьшился менее чем на 30 %.

Вариации параметра  $p_1 = N(O)/N(N_2)$  и ТЕС по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED [[http://guvi.jhuapl.edu/-levels/level3/-guvi\\_on2\\_tec/plot/summary/gif/](http://guvi.jhuapl.edu/-levels/level3/-guvi_on2_tec/plot/summary/gif/)] около 06:00

для широты города Харькова составляли  $p_1 = 0.5, 0.5, 0.3, 0.7$  для 3, 4, 5, 6 марта 2006 г. соответственно. По сравнению со спокойным днем 3 марта уменьшение параметра  $p_1$  во время отрицательной фазы бури 5 марта в 06:00 достигало примерно 1.6 раз, значения  $N_m F2$  уменьшились в это время также в 1.6 раза (рис. 2). Во время положительной фазы бури 6 марта в 06:00 увеличение параметра  $p_1$  составляло примерно 1.4 раза, что соответствовало увеличению значения  $N_m F2$  в это время. Заметим, что на высотах  $z = 200$  км параметр  $p_1 \approx p$ .

**Температура нейтрального газа.** Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, связанных с магнитной бурей. Температура нейтралов  $T_n$  вычислялась по методике [34, 35] на основе уравнения теплового баланса ионного газа [1, 21, 36]. В расчете использовались параметры ионосферы  $N$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ , измеренные непосредственно методом некогерентного рассеяния. Для нахождения концентраций нейтральных компонент привлекалась модель NRLMSISE-00. Временные вариации  $T_n$  в спокойные сутки 3 апреля и в возмущенный период 4—6 апреля 2006 г. на высотах 250—450 км показаны на рис. 5. Здесь же для сравнения приведены данные  $T_{nMSIS}$ , рассчитанные по модели NRLMSISE-00.

Анализ результатов расчета  $T_n$  позволил обнаружить следующие особенности. В данном цикле измерений высота термпаузы, где атмосфера становится изотермичной, составляла около 300 км. В течение отрицательной фазы бури температура нейтралов увеличилась в среднем на 50 К по сравнению со спокойным днем.

Реакции на ионосферные возмущения температуры нейтрального газа, рассчитанной по модели NRLMSISE-00, не наблюдалось.

**Подвод энергии к электронам.** Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ( $z \leq 300$  км) из-за малости их длин свободного пробега носит локальный характер. Выше 200 км частота соударений электронов с нейтрами становится меньше, чем с ионами  $\nu_{ei}$ , и основными механизмами охлаждения электронного газа являются кулоновские соударения с ионами, а также возбуждение уровней тонкой структуры атомов

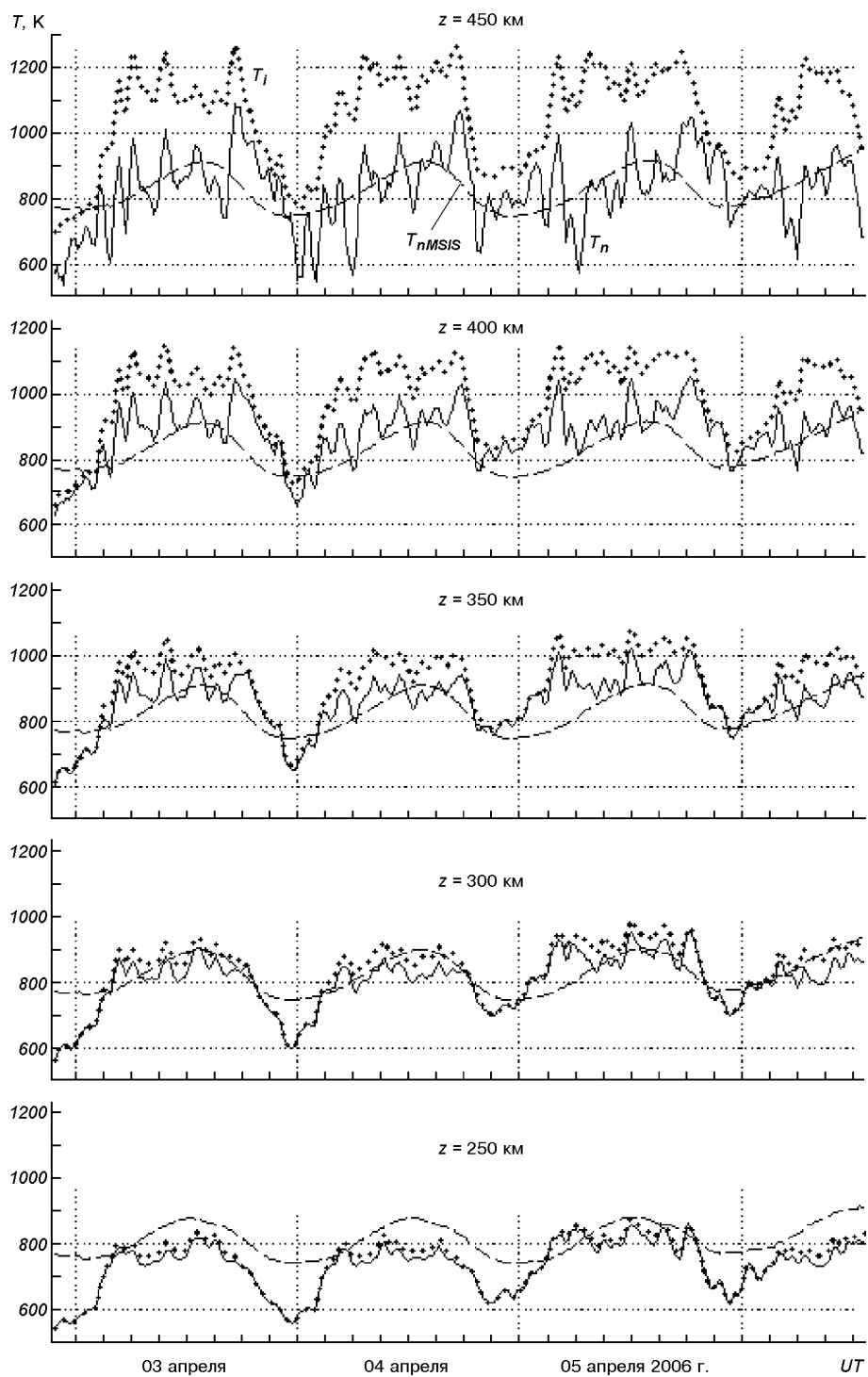


Рис. 5. Временные вариации измеренных температур ионов  $T_i$  (точки) и рассчитанных температур нейтралов  $T_n$  по данным радара HP (сплошные линии) и  $T_{nMISIS}$  по модели NRLMSISE-00 (штриховая) в период 3—6 апреля 2006 г.

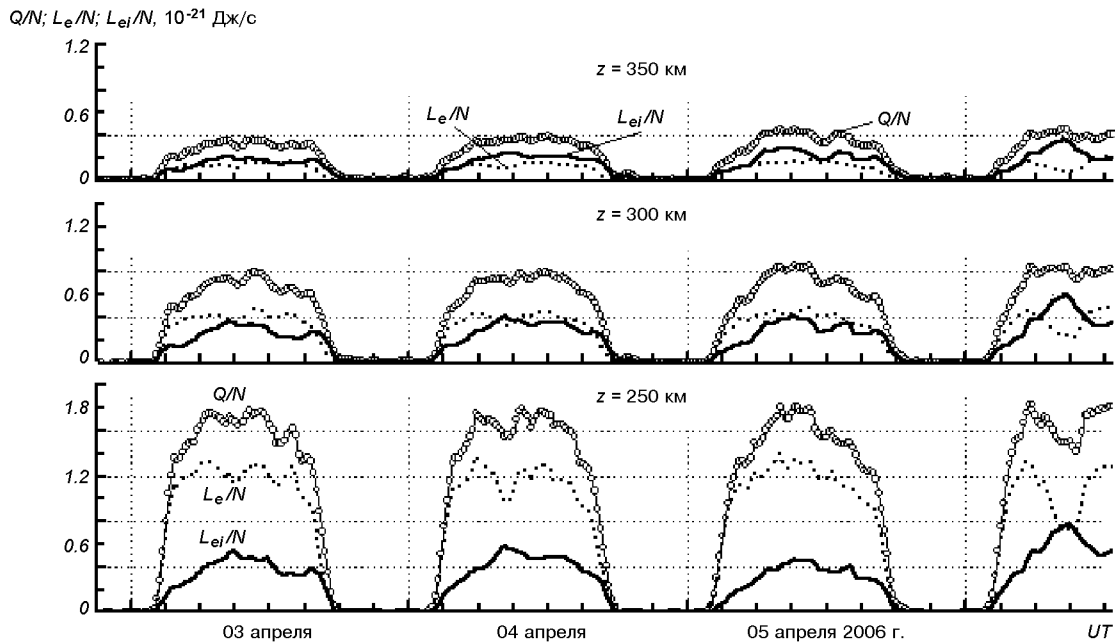


Рис. 6. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа  $Q/N$  и теплообмена электронов с ионами  $L_{ei}/N$  и атомами кислорода  $L_e/N$  в период 3—6 апреля 2006 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

кислорода и теплопроводность электронного газа [1, 36]. Последней можно пренебречь, если время переноса тепла электронами  $t_{T_e}$  намного больше времени становления  $t_{T_e}$  за счет первых двух механизмов. Уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае в системе СИ имеет вид [22, 28]

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

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

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

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,  $N(O)$  — концентрация этих атомов ( $Q$ ,  $L_{ei}$  и  $L_e$  — соответствующие значения энергии в единицу времени, отнесенные к единичному объему).

На рис. 6 приведены оценки энергии  $Q/N$ , подводимой к электрону в единицу времени, а

также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами  $L_{ei}/N$  и нейтралами  $L_e/N$ . В расчетах использовались значения  $T_e$ ,  $T_i$  и  $N$ , получаемые методом НР. Параметры  $T_n$  и  $N(O)$  взяты из модели NRLMSISE-00. Видно, что в разные даты вклад составляющих  $L_{ei}/L_{ei}$  и  $L_e/N$  в процесс охлаждения электронного газа был разным. Например, в спокойный день 3 апреля 2006 г. вблизи максимума слоя  $F2$ , на высоте 250 км, около местного полудня (когда  $f_0 F2 \approx 6$  МГц) преобладали потери в процессе неупругого теплообмена электронов с нейтралами  $L_e/N$  за счет высокой разности температур  $T_e - T_i$  при малых значениях  $N$ , что характерно для условий невысокой СА. На высоте около 350 км вклад двух механизмов охлаждения электронов, по-видимому, сравнялся за счет уменьшения с высотой концентрации атомов кислорода  $N(O)$  и увеличения потерь энергии электронов  $L_{ei}/N$  в кулоновских соударениях с ионами. В возмущенный период на высоте 350 км преобладающими стали в основном потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами. 4 и 6 апреля вблизи



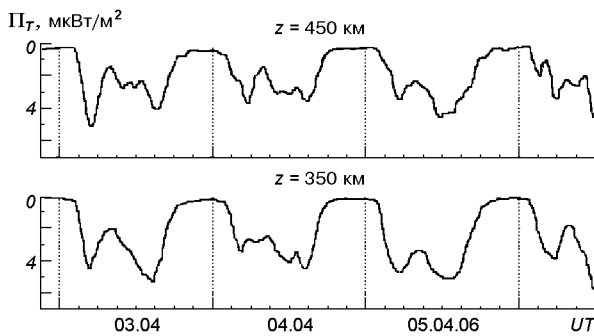


Рис. 7. Временные вариации плотности потока тепла  $\Pi_T$ , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, в период 3—6 апреля 2006 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

местного полудня наблюдалось стремительное уменьшение потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами и увеличение потерь энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами, что на высотах 300 и 350 км не повлияло на суточные вариации подвода энергии к электронному газу. Причиной могло послужить увеличение высоты максимума слоя  $F2$  и изменения нейтрального состава в эти периоды.

**Потоки тепла, переносимого электронами**, характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности электронного газа. Вертикальная составляющая плотности потока тепла равна

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

где  $\kappa_e = 2.08k^2NT_e/(mv_{ei})$  — коэффициент теплопроводности электронного газа,  $k$  — постоянная Больцмана,  $m$  — масса электрона,  $I = 66.4^\circ$  — наклонение геомагнитного поля. В системе СИ [2]

$$v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} NT_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}).$$

Результаты расчета величины плотности  $\Pi_T$  потока в период 3—6 апреля 2006 г. приведены на рис. 7. Наибольшее по модулю значение  $\Pi_T$  наблюдалось 5 апреля. Это объясняется тем, что плотность потока тепла сильно зависит от  $T_e$  ( $\Pi_T \sim T_e^{5/2}$ ), а также от градиента  $T_e$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Положительные фазы бури.** Физические механизмы, которые поддерживают длительную положительную фазу, и особенности ее проявления изучены до настоящего времени еще недостаточно. Возможны следующие причины положительных возмущений [12, 23]. Первая связана с подъемом слоя  $F2$  вверх за счет усиления меридиональных ветров, направленных к экватору, в область более низкой рекомбинации. Согласно работе [23] этот механизм более эффективен в дневное время, когда главенствуют процессы ионообразования. Другой механизм связан с изменением состава нейтральной атмосферы за счет оседания легких компонентов газа в низких и средних широтах. Роль второго механизма более существенна ночью. Причиной таких крупномасштабных возмущений термосферной циркуляции и нейтрального состава является высокоширотный нагрев термосферы во время магнитной бури [23]. В этих двух случаях воздействие солнечного ветра происходит по следующему каналу: граничный слой хвоста магнитосферы — плазменный слой — продольные токи — джоулево нагревание — изменение термосферной циркуляции и нейтрального состава [12, 14, 23]. Высыпание мягких частиц с энергиями  $E \leq 1$  кэВ в область дневного каспа также может вносить значительный вклад в положительную фазу бури. Энергия частиц поглощается на высотах области  $F$  (200—300 км), вызывая ее разогрев, а также меридиональную циркуляцию, что способствует переносу обогащенного атомарным кислородом газа к экватору [13]. Высыпание мягких частиц в дневной касп связано с дневными граничными слоями магнитосферы и не имеет непосредственного отношения к плазменному слою, который контролирует развитие кольцевого тока, магнитную активность и высыпание авроральных частиц.

Перечисленные процессы могут происходить одновременно, создавая большое разнообразие ионосферных бурь.

Рассмотрим возможность реализации первого механизма. Сравнение результатов измерений высоты  $z_m F2$  со спокойными сутками, в качестве которых выбраны сутки 1—3 апреля, показало, что высота максимума слоя  $z_m F2$  увеличилась на

30—40 км в первую положительную фазу бури 4 апреля и на 30 км во время второй положительной фазы 6 апреля. Таким образом, дрейф слоя  $F2$  вверх за счет усиления меридионального ветра к экватору, в дневных условиях 4 и 6 апреля мог стать причиной формирования положительных фаз бури.

Рассмотрим роль второго механизма, т. е. изменения состава нейтральной атмосферы, в формировании положительных фаз бури в близких к дневным условиям. Как было описано выше, по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED во время положительной фазы бури 6 марта в 06:00 увеличение параметра  $p_1$  составило примерно 1.4 раза, что соответствовало увеличению значения  $N_m F2$  в это время. Теоретические расчеты составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами и нейтралами (см. рис. 6) показали значительное уменьшение энергии, затрачиваемой на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода во время второй положительной фазы 6 апреля, что свидетельствует об изменении состава нейтральной атмосферы, которое могло быть причиной второй положительной фазы бури.

**Отрицательная фаза бури.** Среди ряда факторов, ответственных за уменьшение электронной концентрации, одним из основных принято считать возмущение нейтрального состава [12, 23, 33]. Нагрев высокоширотной атмосферы вызывает подъем газа вверх и движение его в стороны к более холодным областям, что приводит к уменьшению концентрации атомов O и увеличению концентраций молекулярных компонентов  $N_2$  и  $O_2$  и, соответственно, уменьшению параметра  $p$ , определяющего соотношение процессов ионообразования и потерь в фотохимическом приближении. Градиенты давления, возникающие при расширении области нагрева, а также изменение картины магнитосферной конвекции [24, 25] вызывают перестройку глобальной термосферной циркуляции. При этом усиливаются ветры, направленные к экватору, которые переносят измененный газовый состав в средние и низкие широты.

Вариации параметра  $p_1$  подтверждают, что возмущения нейтрального состава вполне могли быть причиной отрицательной фазы бури 5 апреля. Аналогичные случаи развития отрицательных ионосферных бурь в дневное время подроб-

но рассмотрены, например, в работе [24].

Таким образом, результаты настоящей работы свидетельствуют, что и при умеренных, а не только сильных геокосмических бурях, эффекты взаимодействия подсистем в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера становятся определяющими [16—20].

## ВЫВОДЫ

В работе изложены результаты исследования ионосферной бури со знакопеременными фазами 4—6 апреля 2006 г. Рассмотрены основные механизмы, формирующие развитие положительных и отрицательной фаз бури. Основные итоги работы сводятся к следующему.

1. Обосновано, что причиной положительной фазы ионосферной бури 4 апреля 2006 г. мог послужить подъем слоя  $F2$  вверх за счет усиления меридионального ветра к экватору. Причиной положительной фазы ионосферной бури 6 апреля 2006 г. было, скорее всего, возмущение нейтрального состава.

2. Зафиксировано, что в течение положительной фазы бури концентрация  $N_m$  увеличилась примерно в 1.4 раза и уменьшилась в 1.8 раз в отрицательную фазу бури, по сравнению с контрольным днем.

3. Обнаружено относительно небольшое отличие дневных температур электронов  $T_e$  во время отрицательной (2200 К) и второй положительной (1650 К) фазы бури по сравнению со спокойным днем (2000 К).

4. Расчеты показали, что во время бури температура нейтралов  $T_n$  в дневное время увеличилась примерно на 50 К в отрицательную фазу бури по сравнению с контрольным днем. Высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, составляла около 300 км.

5. Расчеты теплового режима ионосферы показали, что значительное уменьшение потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами и увеличение потерь энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами 4 и 6 апреля на высотах 300 и 350 км вблизи местного полудня мало повлияло на суточные вариации подвода энергии к электронному газу. При этом наибольшее значение потока тепла из плазмосферы наблюдалось 5 апреля.

6. Количественное определение роли обсуждаемых механизмов формирования положительных и отрицательных бурь требует дальнейшего анализа.

1. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИ-ЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6—30.
2. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.
3. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А. и др. Возмущения ионосферной плазмы во время сверхсильной магнитной бури 29—31 мая 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 4.—С. 21—39.
4. 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 аэронаука.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
5. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г. // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 4—11.
6. 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.
7. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—2005.—45, № 6.—С. 789—802.
8. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокоsmической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 12—25.
9. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Сильнейшая геокоsmическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 3/4.—С. 20—37.
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 аэронаука.—2005.—45, № 6.—С. 803—823.
11. Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 4.—С. 3—20.
12. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
13. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэронаука.—1985.—25, № 5.—С. 768—772.
14. Кринберг И. А., Тащилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.
15. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
16. Черногор Л. Ф. Геокоsmосфера — открытая динамическая нелинейная система // Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка.—2002.—№ 570, вип. 2.—С. 175—180.
17. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокоsmос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
18. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокоsmоса в свете системной парадигмы // Радіофізика і радіоастрономія.—2003.—8, № 1.—С. 56—104.
19. Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
20. Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 198—231.
21. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // Солнечно—земная физика. — М.: Мир, 1969.—С. 292—352.
22. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577—584.
23. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
24. 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. 14.673—14.691.
25. 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. 14.153—14.167.
26. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Ionosphere wave-like disturbances (WLD) following the September 23, 1998 Solar flare from Kharkiv incoherent scatter radar observations // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science. — Maastricht, Netherlands, 2002.—P. 99.
27. 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. — Maastricht, Netherlands, 2002.—P. 99.
28. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // Planet. Space Sci.—1968.—16.—P. 125—132.
29. 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.—2000.—81, N 48.—(Fall Meeting. F 947, San Francisco, USA).
30. 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*—2001.—82, N 20.—(Spring Meeting. S 291, San Francisco, USA)
31. 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.
32. Prolss J. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // *Ann. Geophys.*—1993.—11.—P. 1—9.
33. Prolss G. W. Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics* / Ed. by H. Volland. — Boca Raton, Fla., CRC Press, 1995.—V. 2.—P. 195—248.
34. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // *Space Res.*—1973.—13.—P. 267—286.
35. Salah J. E., Evans J. V., Alcayde D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin // *Ann. Geophys.*—1976.32, N 3.—P. 257—266.
36. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // *Rev. Geophys. Space Phys.*—1978.—16, N 3.—P. 355—399.

---

**FEATURES OF THE IONOSPHERE STORM  
ON 4—6 APRIL 2006**

*S. A. Pazura, V. I. Taran, L. F. Chernogor*

The study results of the F region and topside ionosphere response to moderate magnetic storm on 4—6 April 2006 are presented. The observations were carried out with the Kharkov incoherent scatter radar. The magnetic storm was accompanied by the ionosphere storm with sign-variable phases. The feature of the ionosphere storm is presence of two positive phases of disturbance. The basic mechanisms forming development of positive and negative phases of the storm are considered.