

## РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 550.388,  
520.16+523.31+523.9:520.86

И. Ф. ДОМНИН<sup>1</sup>, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, М. В. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>,  
С. В. ХАРИТОНОВА<sup>1</sup>, Л. Ф. ЧЕРНОГОР<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт ионосферы НАН и МОНМС Украины,  
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: sophiaharytonova@gmail.com

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

### ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ГЕОКОСМИЧЕСКУЮ БУРЮ 5–6 АВГУСТА 2011 Г.

*В работе приведены результаты исследования отклика ионосферы на сверхсильную магнитную бурю 5–6 августа 2011 г. Магнитная буря сопровождалась отрицательным ионосферным возмущением над Харьковом. Наблюдалось значительное увеличение высоты максимума слоя F2 (с 310 до 510 км). Исследованы вариации параметров ионосферы, измеренных с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков).*

*Ключевые слова:* геомагнитные бури, некогерентное рассеяние, ионосфера, возмущение

#### 1. Введение

Геокосмические бури являются результатом нестационарных процессов на Солнце (выбросы корональной массы, вспышки и др.), которые приводят к значительным возмущениям геомагнитного поля Земли (магнитные бури), параметров ионосферы (ионосферные бури) и атмосферы (атмосферные бури), а также ионосферно-магнитосферного электрического поля (электрические бури). Эффекты геокосмических бурь в большей степени проявляются в высоких широтах и в меньшей степени в средних. Сверхсильные магнитные бури носят планетарный характер, поэтому их эффекты проявляются и на низких широтах.

Исследование геокосмических бурь имеет большую общенаучную и прикладную значимость [1–27]. Интенсивные бури могут сопровождаться сбоями (авариями) в работе мощных линий электропередач, ионосферного радиоканала, систем радионавигации и телекоммуникаций, низкочастотных радиотелескопов, а также изменениями траекторий низкоорбитальных космических ап-

паратов и т. д. Геокосмические бури опосредованно влияют на самочувствие и здоровье людей, а также на состояние биосферы Земли в целом.

Физические процессы, сопутствующие бурям, изучены недостаточно. Это затрудняет моделирование и прогнозирование космической погоды. Поэтому исследование каждой геокосмической бури является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – изложение результатов наблюдений на радаре некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы (г. Харьков) вариаций параметров ионосферы во время сверхсильной магнитной бури 5–6 августа 2011 г.

#### 2. Состояние космической погоды

Причиной возникновения геокосмической бури послужили вспышки класса M6.0 и M9.3, произошедшие 3–4 августа 2011 г., и сопутствовавшие им нестационарные процессы на Солнце.

Параметры космической погоды в период с 3 по 9 августа представлены на рис. 1. До начала геокосмической бури 3 и 4 августа концентрация частиц  $n_{sw}$  и скорость  $V_{sw}$  солнечного ветра составляли около  $(1 \div 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ , и 400 км/с соответственно. 5 августа после 15:00 (здесь и далее



буря началась внезапно 5 августа 2011 г. в 19:03 (по данным магнитной обсерватории “Львов”, координаты: 49.9° с. ш., 23.74° в. д.). Главная фаза бури имела место с 20:00 5 августа до 04:00 6 августа 2011 г.

Во время главной фазы магнитной бури энергия, передаваемая Солнцем магнитосфере Земли, возросла до 37 ГДж/с. Индекс геомагнитной активности был равен  $AE_{\max} = 1741$  нТл. Значение планетарного индекса  $K_p$  составляло 8–. Наибольшее отклонение индекса  $D_{st}$  до значения –113 нТл имело место 6 августа в 04:00. При этом максимальные значения планетарных индексов  $a_p$  и  $A_p$  составили 179 и 42 соответственно. Согласно классификации магнитных бурь, представленной в работах [6, 7], эта буря относится к сверхсильным. Фаза восстановления наблюдалась до конца периода измерений, т. е. до 16:45 7 августа. Магнитная буря сопровождалась ионосферной бурей, исследованию которой посвящена настоящая работа.

### 3. Средства и методы

Харьковский радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи г. Змиева (географические координаты: 49.6° с. ш., 36.3° в. д.). Подробное описание радара НР и режимов его работы приведено в работах [5, 28]. Радар НР Института ионосферы является единственным источником сведений о поведении основных параметров ионосферы в широком диапазоне высот в средних широтах центрально-европейского региона.

Максимальная мощность двухканального передатчика достигает 3.6 МВт (средняя мощность 100 кВт), коэффициент усиления параболической антенны составляет 12700 (диаметр антенны – 100 м, ее эффективная площадь – около 3700 м<sup>2</sup>, ширина луча диаграммы направленности – 1°).

3–7 августа 2011 г. радар работал в режиме излучения двухчастотного составного сигнала, состоящего из двух радиоимпульсов длительностью 660 и 130 мкс на частотах  $f_0$  и  $f_0 + 0.1$  МГц соответственно, где  $f_0 = 158$  МГц. Такой режим обеспечивает высотное разрешение примерно 20 и 100 км в диапазонах высот 100 ÷ 400 и 200 ÷ 1000 км соответственно.

Относительная погрешность определения параметров ионосферы обычно не превышает 10 %.

Наблюдения проводились скоординированно с мировой сетью радаров НР (в соответствии

с Международным геофизическим календарем) с 3 по 7 августа 2011 г.

Для общего контроля состояния ионосферы привлекались данные разнесенных по широте и долготе ионозондов.

### 4. Экспериментальные результаты

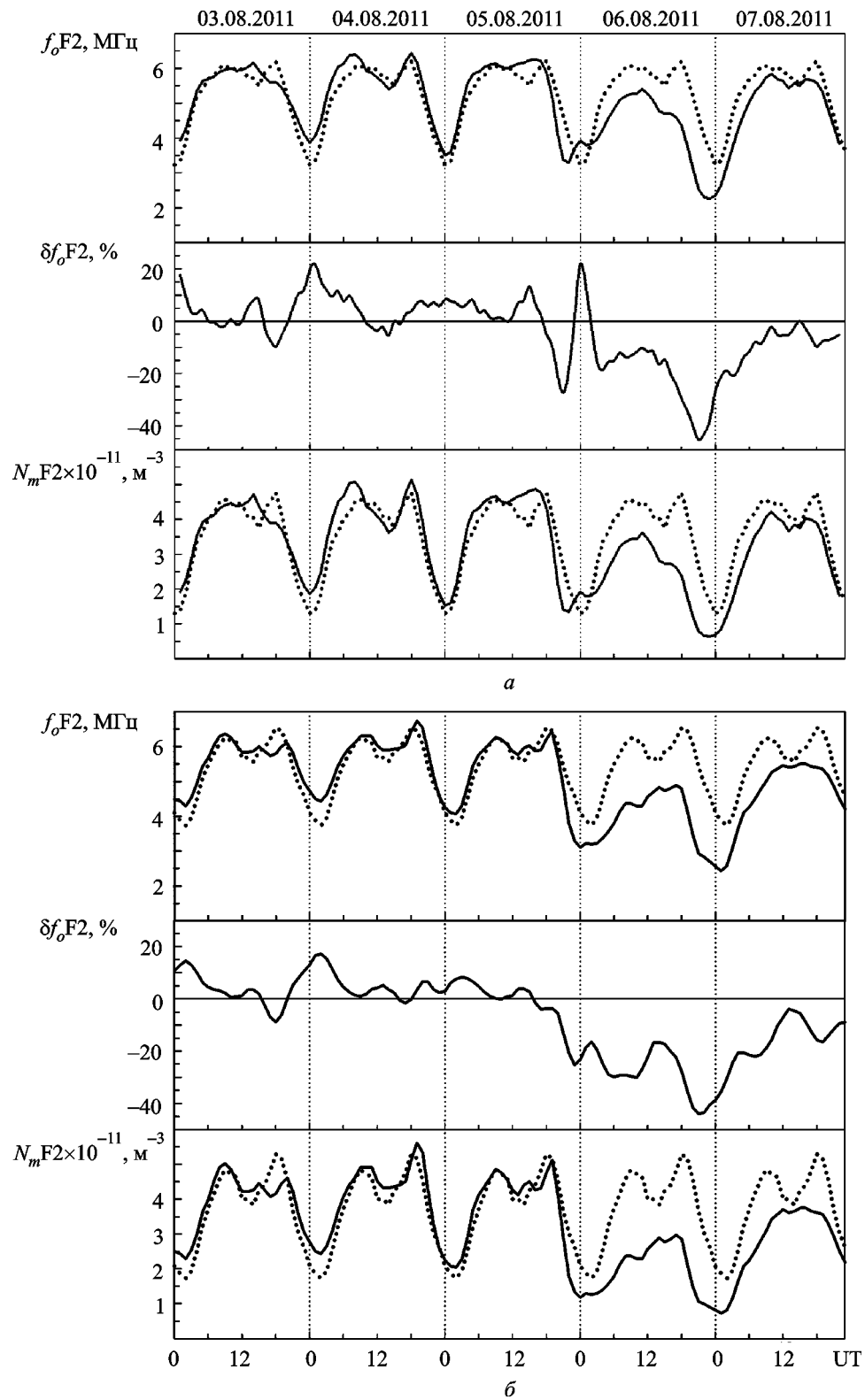
**Вариации критической частоты слоя F2.** Для исследования вариаций критической частоты  $f_oF2$  во время ионосферной бури использовались данные ионозонда “Москва” Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН) (г. Троицк, Россия) (см. рис. 2, а) (<http://www.izmiran.ru/services/iweather/dat1/11/mol108.txt>) и ионозонда обсерватории Прухонице (Чехия) (см. рис. 2, б) (<http://www.izmiran.ru/services/iweather/dat1/11/pq1108.txt>). На верхних панелях рис. 2, а, б представлены временные вариации  $f_oF2$  (сплошная линия). В качестве контрольных данных (пунктирная линия) взяты усредненные значения критической частоты  $\langle f_oF2 \rangle$  в условиях невозмущенной ионосферы в периоды с 30 июля по 3 августа и с 8 по 11 августа 2011 г.

На средних панелях на рис. 2, а, б представлены временные вариации относительного отклонения критической частоты в процентах,

$$\delta f_oF2 = \frac{f_oF2 - \langle f_oF2 \rangle}{\langle f_oF2 \rangle} \cdot 100.$$

Видно, что с началом магнитной бури (около 19:00 5 августа) критическая частота  $f_oF2$  начала быстро снижаться. В 21:00 относительное отклонение  $\delta f_oF2$  составило –25 %. Во время главной фазы магнитной бури по данным ионозонда “Москва” произошел всплеск  $f_oF2$  (рис. 2, а) до 4 МГц ( $\delta f_oF2$  увеличилось до 20 %). В это же время такого поведения  $f_oF2$  по данным ионозонда в Чехии не наблюдалось (рис. 2, б). Различие в вариациях критической частоты можно объяснить месторасположением ионозондов (ионозонд, расположенный в России, находится на 800 км севернее Харькова, а в Чехии – на 1500 км западнее Харькова).

В последующие сутки, 6 и 7 августа, наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение. 6 августа в 23:00  $\delta f_oF2$  было максимальным и составило –45 %, а  $f_oF2$  снизилась до 2.5 МГц (см. рис. 2, а). 7 августа после 12:00 критическая частота начала постепенно восстанавливаться,



**Рис. 2.** Вариации критической частоты  $f_oF2$  (верхняя панель, сплошная линия), ее относительного отклонения  $\delta f_oF2$  (средняя панель), концентрации электронов  $N_mF2$  в максимуме слоя F2 (нижняя панель, сплошная линия) в период измерений с 3 по 7 августа и данные при магнитоспокойных условиях (пунктирные линии): *a* – данные ионозонда “Москва” (Россия); *б* – данные ионозонда обсерватории Прухонице (Чехия)

увеличиваясь до значений, типичных для спокойных условий.

**Вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2.** Изменения критической частоты  $f_oF2$  отражают вариации концентрации электронов  $N_mF2$  в максимуме слоя F2 (см. рис. 2, а, б, нижние панели).

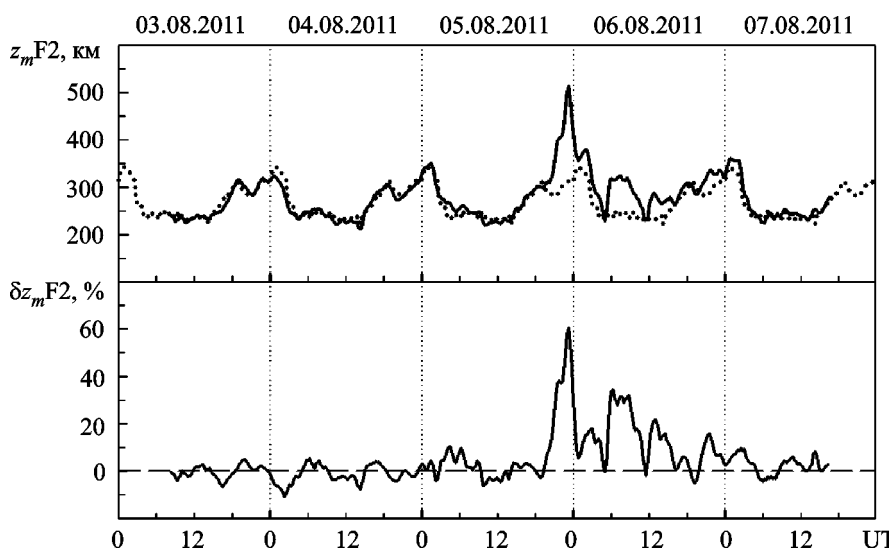
5 августа около 21:00 (рис. 2, а), во время главной фазы магнитной бури, величина  $N_mF2$  уменьшилась примерно в 2 раза до значения  $1.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (в спокойный день  $N_mF2$  составляла  $2.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ). Наиболее заметное уменьшение  $N_mF2$ , до 3.5 раз, имело место 6 августа в 21:00, концентрация электронов при этом равнялась  $0.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (в магнитоспокойный день  $2.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ). Постепенное восстановление  $N_mF2$  началось 7 августа после 12:00.

**Вариации высоты максимума слоя F2.** Изменение высоты максимума концентрации электронов в слое F2 ионосферы  $z_mF2$  в течение суток определяется как суточными вариациями фотохимических процессов, так и изменением направления термосферных ветров: меридиональная компонента ветра ночью направлена к экватору и поднимает слой, а днем она обращена к полюсу, что вызывает уменьшение  $z_mF2$ . На рис. 3 представлены временные вариации  $z_mF2$ , рассчитанные по данным радара НР. 4 августа поведение  $z_mF2$  было характерным для невозмущенной среднеширотной ионосферы.

С началом магнитной бури наблюдался рост  $z_mF2$ . Во время главной фазы бури в 23:00 высота максимума слоя F2 достигла 510 км (в спокойных условиях она составила 320 ÷ 340 км). Относительное отклонение высоты максимума слоя F2,  $\delta z_mF2$ , (по отношению к  $z_mF2$  в контрольный день) было максимальным и составило около 60%. 6 августа наблюдалось также увеличение высоты  $z_mF2$  до 320 км, тогда как в невозмущенных условиях она составляла 250 км. Отклонение  $\delta z_mF2$  периодически варьировалось, достигая 20 ÷ 30% и опускаясь до нуля. Восстановление значений высоты максимума слоя F2 до значений, характерных для спокойных условий, началось после 00:00 7 августа.

**Высотное распределение концентрации электронов слоя F2 ионосферы.** В спокойный день (4 августа) вариации концентрации электронов  $N$  подобны вариациям в среднеширотной ионосфере летом в период роста солнечной активности [6, 7, 23].

На рис. 4 представлены вариации  $N(t)$  3–7 августа 2011 г. в диапазоне высот 200 ÷ 700 км. Для сопоставления вариаций  $N$  в возмущенный период с вариациями в отсутствие возмущений точками показаны суточные зависимости концентрации электронов для 4 августа, выбранные в качестве контрольных. Из рисунка видно, что внезапное начало магнитной бури сопровождалось резким увеличением концентрации электронов



**Рис. 3.** Временные вариации высоты  $z_mF2$  (верхняя панель) с 3 по 7 августа (сплошная линия) и ее относительного отклонения  $\delta z_mF2$  (нижняя панель). Пунктиром показаны временные вариации  $z_mF2$ , полученные усреднением данных 3, 4 и 7 августа 2011 г. при магнитоспокойных условиях

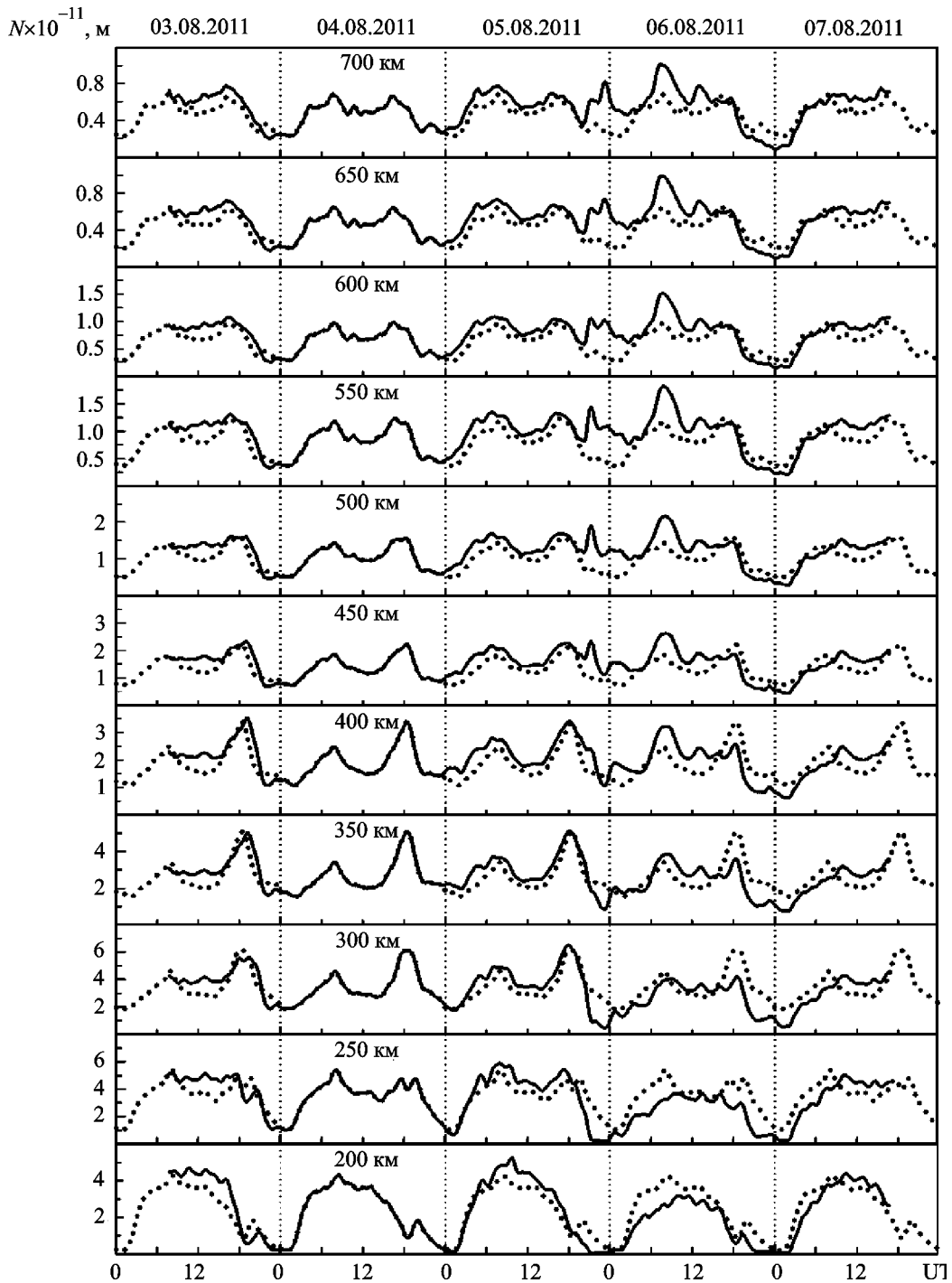


Рис. 4. Временные вариации концентрации электронов  $N$  на фиксированных высотах в период с 3 по 7 августа 2011 г. (сплошная линия) и в контрольный день 4 августа 2011 г. (пунктирная линия)

на высотах  $z \geq 450$  км. По сравнению с контрольным днем 4 августа зарегистрировано уменьшение  $N$  на  $91 \div 27\%$  в диапазоне высот  $200 \div 400$  км.

Во время отрицательного ионосферного возмущения 6 августа в 23:00 концентрация электронов уменьшалась во всем диапазоне исследуе-

мых высот. В частности, на высотах  $250 \div 350$  км  $N$  уменьшилась более чем в 2 раза.

На рис. 5 приведены высотные профили  $N$  во время главной фазы магнитной бури 5–6 августа. С 20:00 до 22:45 концентрация электронов постепенно уменьшалась. При этом максимум профи-

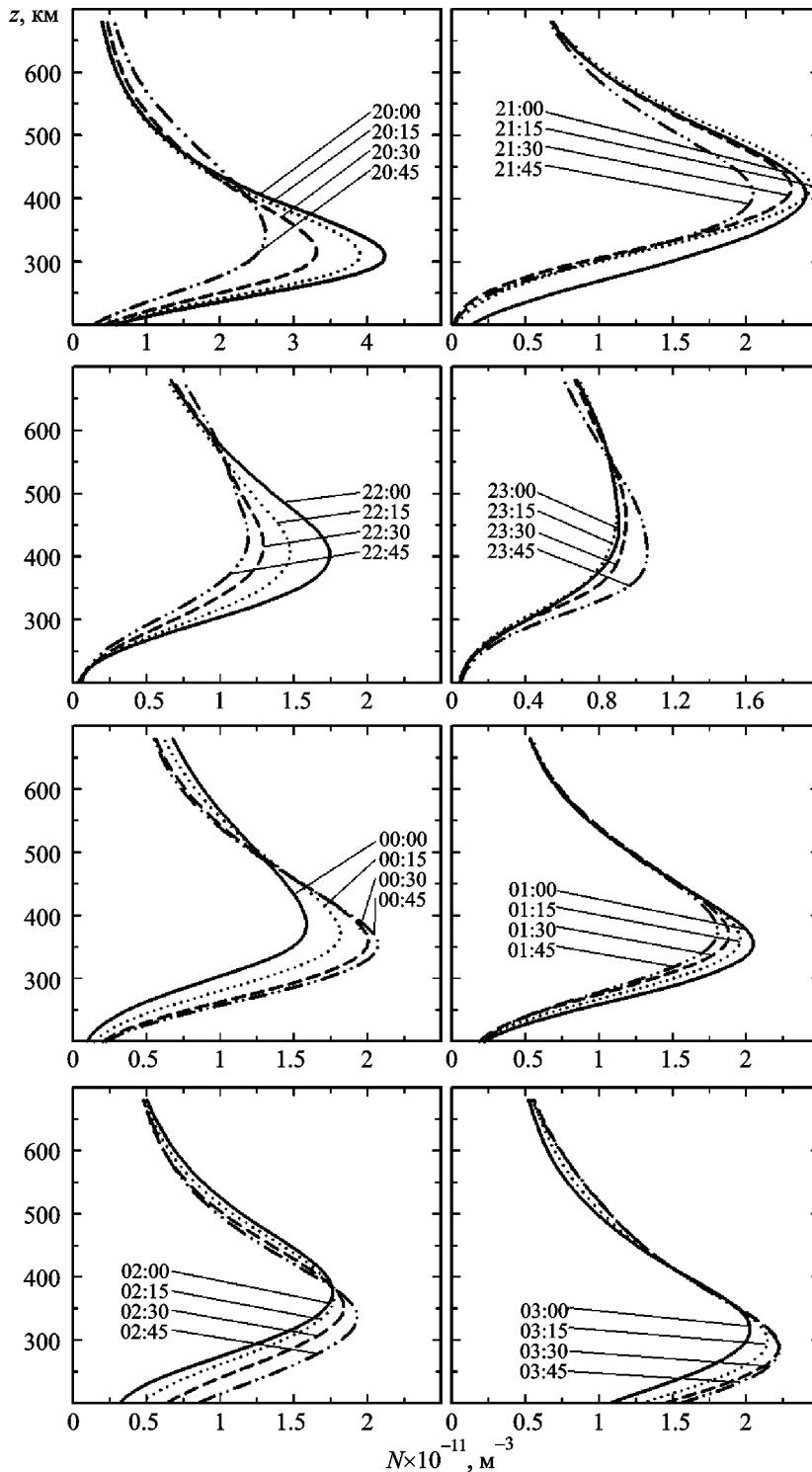


Рис. 5. Высотные профили концентрации электронов  $N$  в последовательные моменты времени (с интервалом 15 мин) в течение главной фазы магнитной бури (с 20:00 5 августа до 04:00 6 августа)

ля  $N$  поднялся до высоты 400 км, затем начал опускаться. Из рис. 5 видно, что в интервале времени с 23:00 до 23:45 профиль концентрации электронов был заметно деформирован. В 23:15

величина  $N$  достигла своего наименьшего значения  $9 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ , затем наблюдалось увеличение  $N$ . После 01:00 6 августа происходили периодические изменения  $N$  в сторону уменьшения и уве-

личения во всем рассматриваемом диапазоне высот.

**Вариации температур электронов и ионов.**

Вариации температур электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$  в период 3–7 августа приведены на рис. 6. В условиях невозмущенной ионосферы, в ночь с 4 на 5 августа, температура электронов составляла  $650 \div 1100$  К, а ионов –  $650 \div 950$  К в диапазоне высот  $200 \div 700$  км.

В возмущенный период с 5 по 7 августа имел место нагрев плазмы. Значительное увеличение

температур электронов и ионов, до 40 %, наблюдалось 5 августа около 22:30. В диапазоне высот  $200 \div 700$  км температура  $T_e$  составила  $800 \div 2500$  К, а  $T_i$  –  $800 \div 1500$  К. Температуры  $T_e$  и  $T_i$  в ночное время с 5 на 6 августа оставались более высокими, чем обычно. Во время отрицательного ионосферного возмущения в ночь с 6 на 7 августа имели место значительные изменения температур: значения  $T_e$  и  $T_i$  были выше, чем в невозмущенных условиях, наблюдались их отдельные всплески.

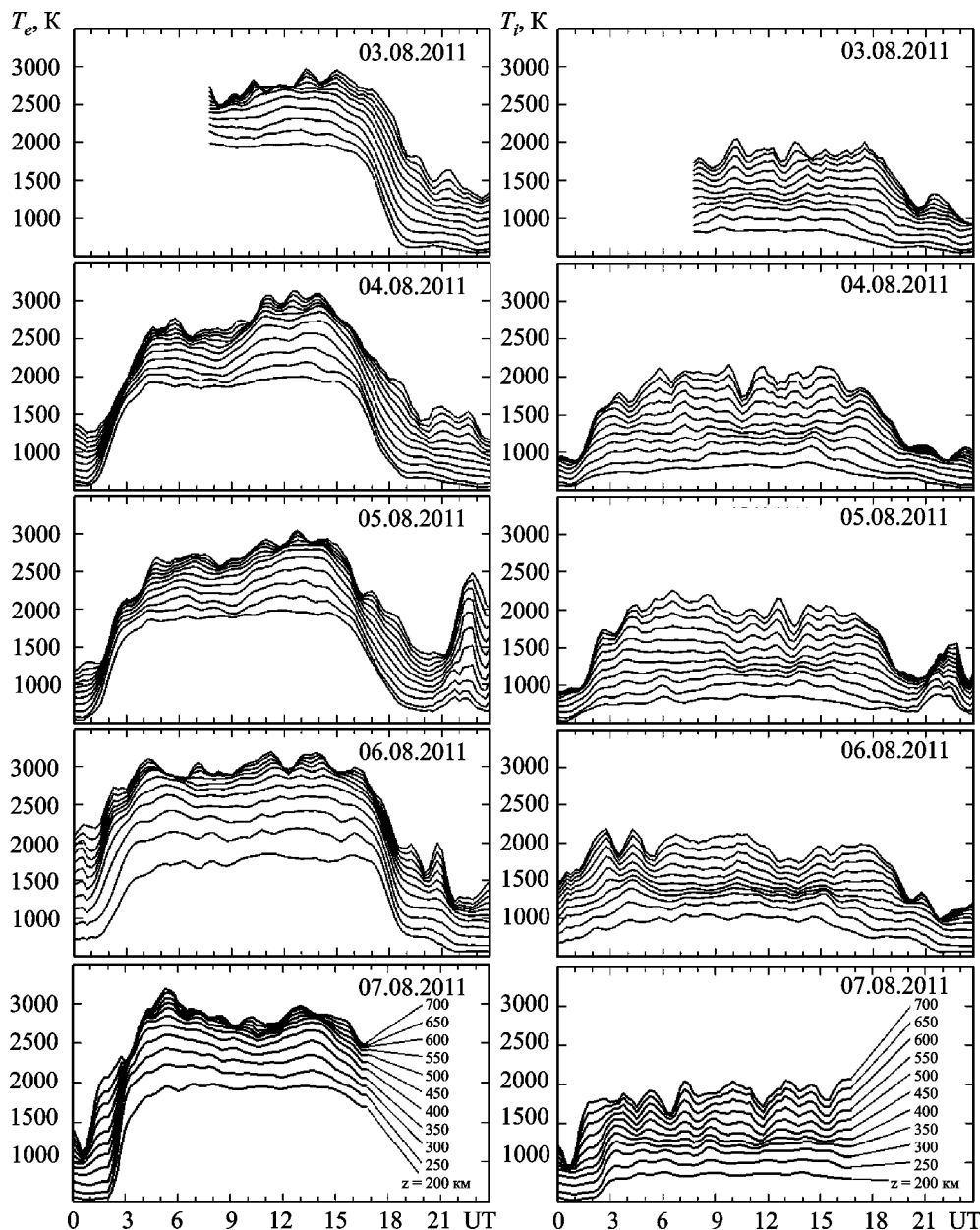


Рис. 6. Временные вариации температур электронов  $T_e$  (слева) и ионов  $T_i$  (справа) в период с 3 по 7 августа 2011 г. на фиксированных высотах



**Вариации скорости движения ионосферной плазмы.** Сверхсильная геомагнитная буря 5–6 августа 2011 г. вызвала существенные нарушения динамики ионосферы. На рис. 7 представлены временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной

плазмы  $V_z$  для ряда высот ионосферы в период с 3 по 7 августа 2011 г. Видно, что в спокойные дни 3 и 4 августа и до 20:00 5 августа, а также 7 августа движение плазмы было в основном характерным для летней среднеширотной ионосферы. Направление движения плазмы было пре-

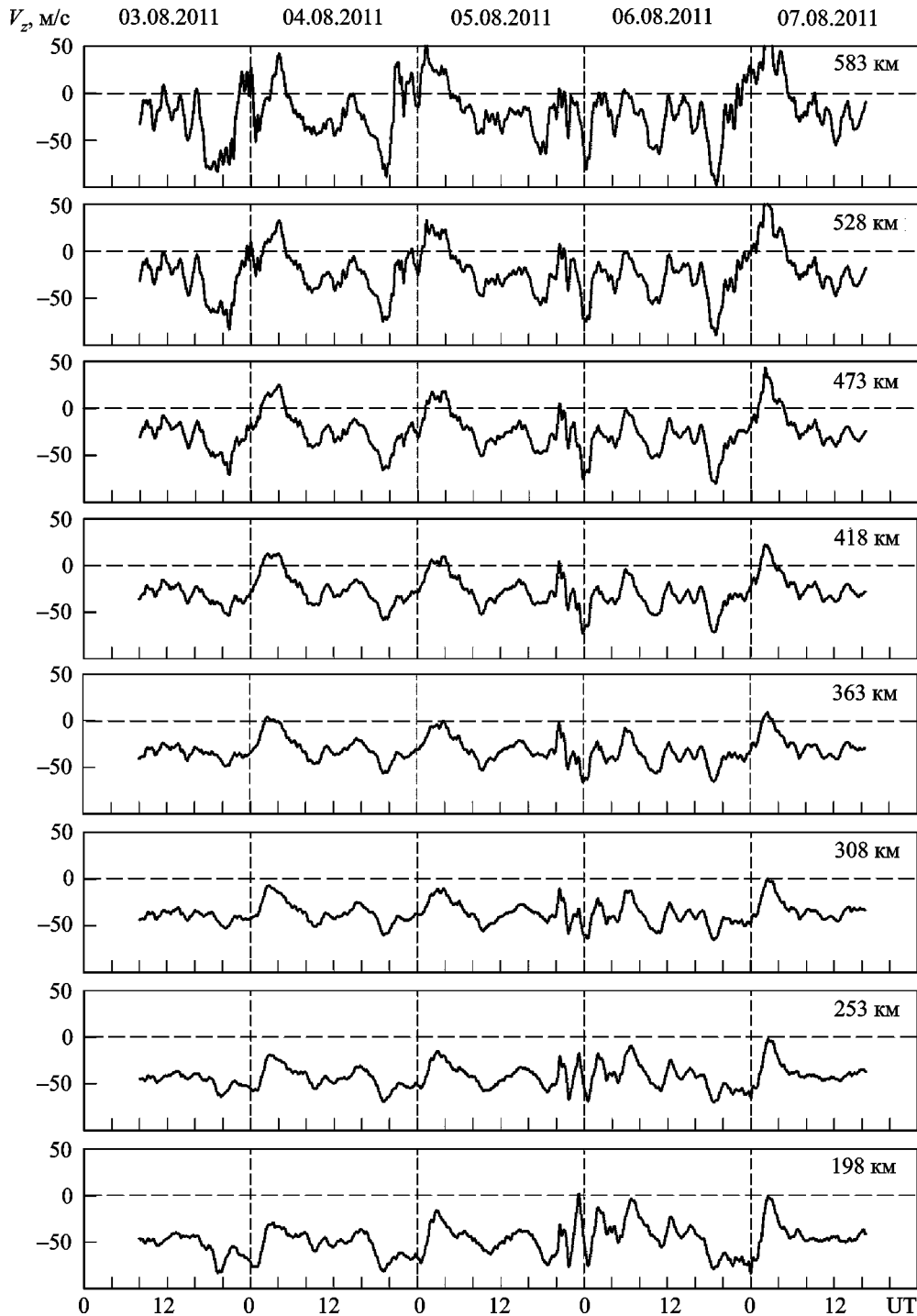


Рис. 7. Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  на фиксированных высотах в период 3–7 августа 2011 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

имущественно нисходящее ( $V_z < 0$ ). Как обычно, наблюдался утренний экстремум вариаций  $V_z$  (приблизительно с 00:00 до 08:00, когда на высотах  $z > 350$  км направление движения плазмы становилось восходящим ( $V_z > 0$ ), а на высотах  $z < 350$  км имело место уменьшение модуля скорости нисходящего движения плазмы). Наблюдался также вечерний экстремум (увеличение модуля отрицательных значений  $V_z$ ) приблизительно с 18:00 до 23:45.

Через 1 ч после начала геомагнитной бури (5 августа в 19:03) возникли значительные вариации скорости  $V_z$ . Первое отклонение скорости в сторону уменьшения ее абсолютного значения наблюдалось на всех высотах приблизительно с 20:00 до 21:15. Амплитуда вариаций  $V_z$  составляла  $30 \div 37$  м/с. Продолжительность изменения  $V_z$  от исходного значения до момента максимального отклонения и далее до значения, близкого к исходному, увеличивалась с ростом высоты (см. рис. 7). Первое отклонение  $V_z$  началось с опозданием приблизительно на час относительно момента начала резкого изменения геомагнитного индекса  $D_{st}$ , а также  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля. Во время возмущений 6 августа утренний экстремум был менее выражен, чем в спокойные дни. На всех приведенных высотах  $V_z < 0$ . Характер вечернего экстремума подобен наблюдавшемуся в спокойных условиях 3–5 августа.

Зарегистрированы колебания  $V_z$  с периодом около 2 ч 45 мин и амплитудой  $20 \div 37$  м/с в промежутке с 20:00 5 августа до 03:00 6 августа во время отрицательной фазы ионосферного возмущения. Эти колебания явно просматриваются на высотах  $z \leq 300$  км. На высотах  $z > 300$  км одно из этих колебаний с максимальным отклонением в область отрицательных значений  $V_z$  в 00:15 превалировало над остальными. Амплитуда этого колебания составляла около 44, 31, 21, 19, 34, 38, 48 и 63 м/с на высотах 198, 253, 308, 363, 418, 473, 528 и 583 км соответственно. Во время фазы восстановления 6 августа, с 11:30 до начала вечернего экстремума в 17:30, зарегистрированы колебания с изменяющимся периодом от 2 ч 45 мин до 2 ч и амплитудой  $4 \div 9$  м/с. Кроме этого, 6 августа с 20:00 до 23:30 наблюдались квазипериодические вариации  $V_z$  с периодом 45 мин и амплитудой  $2 \div 3$  м/с.

Таким образом, изменение космической погоды вызвало значительные вариации скорости переноса ионосферной плазмы, что повлияло на структуру ионосферы (изменились электронная концентрация, высота максимума слоя F2 и др.).

## 5. Обсуждение

Сверхсильная геомагнитная буря 5–6 августа 2011 г. сопровождалась существенными изменениями в поведении основных параметров ионосферы над Харьковом. С 6 по 7 августа имело место отрицательное ионосферное возмущение. Существует ряд факторов, вызывающих такое возмущение. Важную роль в появлении и развитии отрицательного ионосферного возмущения играют вариации параметров нейтральной атмосферы [21, 27], в частности, изменение нейтрального состава. Такое изменение, как известно, связано с высокоширотным нагревом термосферы за счет высыпания энергичных частиц и усиления авроральных токов, а также с перестройкой глобальной термосферной циркуляции [11]. При этом усиливаются ветры, направленные к экватору, которые переносят измененный газовый состав в средние и низкие широты.

Рассмотрим вариации высоты  $z_m F2$  максимума слоя F2 (см. рис. 3). Как показали измерения на радаре НР,  $z_m F2$  увеличилась во время главной фазы магнитной бури почти на 60 % (до 200 км) и на 30 % (до 100 км) днем 6 августа относительно значений в невозмущенных условиях. Подъем слоя F2 во время рассматриваемой сверхсильной бури, по-видимому, также объясняется совместным действием ряда факторов: расширением термосферы и перестройкой глобальной термосферной циркуляции за счет усиления высокоширотного источника нагрева нейтрального газа. Результатом возмущения циркуляции является дополнительный меридиональный ветер, направленный из высоких широт к экватору. Ночью он усиливает основную компоненту атмосферной циркуляции, поднимая слой на более высокие уровни, а днем ослабляет ее и препятствует снижению слоя. Временные вариации  $z_m F2$  в возмущенный период 5–7 августа имели сложный характер и значительно отличались от поведения  $z_m F2$  в спокойных условиях.

Вариации  $z_m F2(t)$  в период магнитной бури сопровождалась деформацией высотного профиля концентрации электронов в интервале вре-

мени 20:00–03:45 (рис. 5): уменьшением концентрации электронов в максимуме слоя F2 и увеличением толщины слоя. Такие эффекты свидетельствуют также о существенной перестройке глобальной термосферной циркуляции при увеличении скорости нейтрального ветра [21]. На это указывает, в частности, рост энергии  $\epsilon$ , инжектируемой в магнитосферу, и индекса авроральной активности  $AE$ .

Уменьшение концентрации  $N$  на высотах 200 ÷ 400 км (см. рис. 4) в ночь с 5 на 6 августа сопровождалось нагревом плазмы, что явно видно из рис. 6. Во время отрицательного ионосферного возмущения (в ночь с 6 на 7 августа) значения  $N$  уменьшились в 2 ÷ 3 раза во всем диапазоне высот 200 ÷ 700 км. Изменения в поведении  $N$  на высотах  $z \geq 450$  км выражены слабее, из-за того что с ростом высоты увеличивается влияние процесса диффузии на этих высотах [27, 29].

В течение главной фазы магнитной бури наблюдался необычный нагрев плазмы. При этом температура электронов в 22:30 5 августа превысила 700 и 2450 К, а ионов – 800 и 1500 К на высотах ~ 200 и ~ 700 км соответственно. Заметим, что ночной нагрев заряженных частиц в средних широтах наблюдается довольно редко – преимущественно во время сильных геокомических бурь. Подобные вариации температур ионосферной плазмы над Харьковом наблюдались, например, в течение сверхсильной магнитной бури 29–30 мая 2003 г. [1, 6, 7] (индексы геомагнитной активности составили  $A_{p\max} = 89$ ,  $K_{p\max} = 8$ ,  $D_{st\min} = -131$  нТл) и крайне сильной магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. [2, 4, 6, 7, 10] ( $A_{p\max} = 189$ ,  $K_{p\max} = 9$ ,  $D_{st\min} = -383$  нТл). Увеличение  $T_e$  можно объяснить рядом причин: джоулевым нагревом, связанным с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты, высыпанием энергичных частиц, которые приводят к усилению ионосферных динамоток, и уменьшением охлаждения электронов при низких значениях  $N$ . Этими же процессами можно объяснить и рост  $T_i$ , с учетом того, что определенный вклад может еще вносить фрикционный нагрев за счет трения быстро движущихся под действием электрических полей ионов о нейтральный газ [3, 5].

Магнитная буря значительно повлияла на суточные вариации вертикальной составляющей скорости  $V_z$ . В спокойные дни 3, 4, 5 августа

(до 20:00) и 7 августа движение плазмы было в основном характерным для летней среднеширотной ионосферы европейского региона. (Как обычно, наблюдался утренний экстремум, обусловленный процессами амбиполярной диффузии и переноса плазмы нейтральным ветром в условиях преобладания процесса фотоионизации над процессом потерь ионов  $O^+$  и изменения направления движения меридиональной компоненты термосферного ветра, а также имел место вечерний экстремум во временных вариациях  $V_z$  – увеличение по модулю скорости нисходящего движения плазмы, – в остальное время величина  $V_z$  изменялась плавно в пределах  $-80 \div +60$  м/с.) С 20:00 5 августа, т. е. через час после начала геомагнитной бури, возникли значительные флуктуации скорости  $V_z$ . Обнаружены квазигармонические колебания  $V_z$  с периодом около 2 ч 45 мин и амплитудой  $20 \div 37$  м/с в промежутке времени с 20:00 5 августа до 03:00 6 августа, а также во время фазы восстановления 6 августа, с 11:30 до начала вечернего экстремума в 17:30, зарегистрированы колебания с изменяющимся периодом от 2 ч 45 мин до 2 ч и амплитудой порядка  $4 \div 9$  м/с. Такие вариации  $V_z$  свидетельствуют о сложном поведении ионосферной плазмы во время магнитной бури. В частности, вариации  $V_z$  вызваны изменением составляющей скорости, обусловленной переносом плазмы нейтральным ветром, и значительным усилением скорости дрейфа плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях (обычно эта составляющая на средних широтах пренебрежимо мала).

Результаты измерений  $V_z$  5–6 августа 2011 г. кардинально отличаются от данных, полученных во время умеренной магнитной бури 20–22 января 2010 г. и крайне сильной магнитной бури 24–25 сентября 1998 г. [3, 5, 13].

## 6. Выводы

Проведенные наблюдения отклика ионосферы на сверхсильную магнитную бурю 5–6 августа 2011 г. дали следующие результаты.

1. Начало и главная фаза магнитной бури сопровождалась уменьшением значений критической частоты, относительное отклонение  $\delta f_oF2$  достигло  $-25\%$ . Концентрация электронов  $N_mF2$  при этом уменьшилась почти в 2 раза. С 6 по 7 августа имело место отрицательное ионосфер-

ное возмущение, при котором значение  $N_m F2$  уменьшилось почти в 3.5 раза.

2. В течение главной фазы магнитной бури высота слоя F2 увеличилась примерно на 60 % (от 310 до 510 км). Во время фазы восстановления эта высота, флуктуируя, постепенно уменьшалась от 400 до 270 км.

3. Значительные (десятки процентов) возмущения  $N$  на высотах 200 ÷ 700 км наблюдались с 20:00 5 августа до конца суток 6 августа.

4. Ионосферная буря вызвала существенные изменения формы высотных профилей концентрации электронов.

5. Уменьшение  $N$  во время главной фазы магнитной бури сопровождалось значительным нагревом плазмы. На высотах 200 ÷ 700 км температура электронов  $T_e$  увеличилась до 800 ÷ 2500 К, а температура ионов  $T_i$  – до 800 ÷ 1500 К.

6. Наибольшие вариации вертикальной составляющей скорости движения плазмы  $V_z$  наблюдались в течение главной фазы магнитной бури. Амплитуда колебаний  $V_z$  составляла 20 ÷ 40 м/с, квазипериод – около 3 ч.

7. Подтверждено, что ионосферная буря привела к значительным возмущениям параметров ионосферного канала распространения радиоволн.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Возмущения ионосферной плазмы во время сверхсильной магнитной бури 29–31 мая 2003 года: результаты наблюдений на радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №4. – С. 21–39.
2. 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. – Т. 13, №4. – С. 62–76.
3. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в ионосфере, сопутствующих геомагнитной буре 25 сентября 1998 г., при помощи радара некогерентного рассеяния в Харькове // Распространение радиоволн: Труды XX Всероссийской научн. конф. – Нижний Новгород (Россия). – 2002. – С. 56–57.
4. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэронаука. – 2007. – Т. 47, №6. – С. 761–779.
5. 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.
6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, №5. – С. 58–76.
7. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, №5. – С. 77–96.
8. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 20–23 марта 2003 года: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, №3/4. – С. 4–19.
9. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Сильнейшая геокосмическая буря 30–31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, №3/4. – С. 56–67.
10. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, №4. – С. 77–90.
11. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. – 1985. – Т. 25, №5. – С. 705–721.
12. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 44–56.
13. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Харитонова С. В., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20–21 января 2010 г. // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 26–40.
14. Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляр И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков: Харьковский нац. ун-т радиоэлектроники. – 2004. – Вып. 136. – С. 102–108.
15. Павлов А. В., Павлова Н. М., Макаренко С. Ф. Изучение теплового баланса ионосферы и плазмосферы средних широт по данным станции “Миллстоун-Хилл” с 14 по 17 января 1986 г. // Геомагнетизм и аэронаука. – 2004. – Т. 44, № 2. – С. 204–215.
16. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоаэронаука. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
17. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
18. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.

19. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // *Ann. Geophys.* – 1966. – Vol. 22. – P. 577–584.
20. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms – a Review // *Space Sci. Rev.* – 1999. – Vol. 88, No. 3-4. – P. 563-601.
21. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., Carignan G. R., and Roble R. G. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100, No. A8. – P. 14,673–14,691.
22. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lazorenko S. V., and Taran V. I. Wave Disturbances in the Ionosphere Accompanying the Solar Flare and the Strongest Magnetic Storm of September 25, 1998 // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2003. – Vol. 43, No. 6. – P. 718–735.
23. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., and Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.* – 2007. – Vol. 7, No. 3. – GI3001, doi: 10.1029/2005GI000125.
24. Dalgarno A. and Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // *Planet. Space Sci.* – 1968. – Vol. 16, Is. 1. – P. 125–132.
25. Mikhailov A. V. and Foster J. C. Daytime Thermosphere above Millstone Hill during Severe Geomagnetic Storms // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, No. A8. – P. 17,275–17,282.
26. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., Rich F. J., Schlegel K., and Taran V. I. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // *EOS Trans. Am. Geophys. Union Fall Meeting.* – 2000. – Vol. 81, No. 48. – P. F947.
27. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., and Taran V. I. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event September 25, 1998 // *EOS Trans. Am. Geophys. Union Spring Meeting.* – 2001. – Vol. 82, No. 20. – P. S291.
28. Taran V. I. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэронамия.* – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666.
29. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., and Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, No. A12. – P. 1468-1483.

*I. Ф. Домнин<sup>1</sup>, Л. Я. Ємельянов<sup>1</sup>, М. В. Ляшенко<sup>1</sup>, С. В. Харитонова<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Інститут іоносфери НАН і МОНМС України, вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

#### ІОНОСФЕРНІ ПРОЦЕСИ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ ГЕОКОСМІЧНУ БУРЮ 5–6 СЕРПНЯ 2011 Р.

Наведено результати дослідження відгуку іоносфери на надпотужну магнітну бурю 5–6 серпня 2011 р. Магнітна буря супроводжувалася негативним іоносферним збуренням над Харковом. Спостерігалось значне збільшення висоти максимуму шару F2 (від 310 до 510 км). Досліджено варіації параметрів іоносфери, отриманих за допомогою радару некогерентного розсіяння Інституту іоносфери (м. Харків).

*I. F. Domnin<sup>1</sup>, L. Ya. Emelyanov<sup>1</sup>, M. V. Lyashenko<sup>1</sup>, S. V. Kharytonova<sup>1</sup>, and L. F. Chernogor<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, 16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup> V. Kazarin National University of Kharkiv, 4, Svoboda Sq, Kharkiv, 61022, Ukraine

#### IONOSPHERIC PROCESSES DURING THE GEOSPACE STORM OF AUGUST 5–6, 2011

Results of the study of the ionosphere response to the severe magnetic storm of 5–6 August 2011 are presented. The magnetic storm was accompanied by negative ionospheric disturbance over Kharkiv. A significant increase in the F2 layer peak altitude (from 310 to 510 km) was observed. The variations of ionosphere parameters measured by the incoherent scatter radar of the Institute of Ionosphere, Kharkiv, were studied.

*Статья поступила в редакцию 10.07.2012 г.*