

УДК 550.385.4,  
550.358:550.388И. Ф. ДОМНИН<sup>1</sup>, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, С. В. КАЦКО<sup>1</sup>,  
Л. Ф. ЧЕРНОГОР<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт ионосферы НАН и МОН 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 ЭФФЕКТЫ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 13–14 НОЯБРЯ 2012 г.

Приведены результаты исследования отклика области  $F$  и внешней ионосферы на сильную магнитную бурю 13–14 ноября 2012 г. ( $K_p \text{max} = 6+$ ). Наблюдения проведены с помощью радара некогерентного рассеяния, расположенного вблизи г. Харькова. Магнитная буря сопровождалась ионосферной бурей со знакопеременными фазами. Особенностью данной бури является наличие двух положительных и одной отрицательной фаз возмущения.

Ключевые слова: геокосмическая буря, фазы ионосферной бури, ионосфера, некогерентное рассеяние

### 1. Введение

Исследование зависимости состояния ионосферы от уровня гелиофизической активности является одной из важнейших задач геофизики.

Геокосмические бури относятся к проявлениям возмущений космической погоды. Их вызывают нестационарные процессы на Солнце: солнечные бури, которые сопровождаются выбросами корональной массы и магнитных облаков, усилением динамического давления солнечного ветра, изменением параметров межпланетного магнитного поля и др. Эти возмущения, охватывая систему Солнце – Земля, изменяют процессы в различных областях геокосмоса. На Земле бури вызывают сбои в работе мощных энергетических систем, систем навигации и дальней радиосвязи, возможно, влияют на погоду, здоровье людей и состояние всей биосферы [1].

Исследованиям проявлений геокосмических бурь посвящено большое количество работ (см., например, [2–5]). Накопленный материал свидетельствует о многообразии и сложном взаимодействии процессов, формирующих бури, что делает каждую бурю уникальной и затрудняет прогнозирование возмущений в ионосфере. Особенность ионосферных бурь состоит в их глобальности. Они охватывают всю ионосферу, от высокоширотной до экваториальной. Однако характер их протекания зависит от многих геофизических фак-

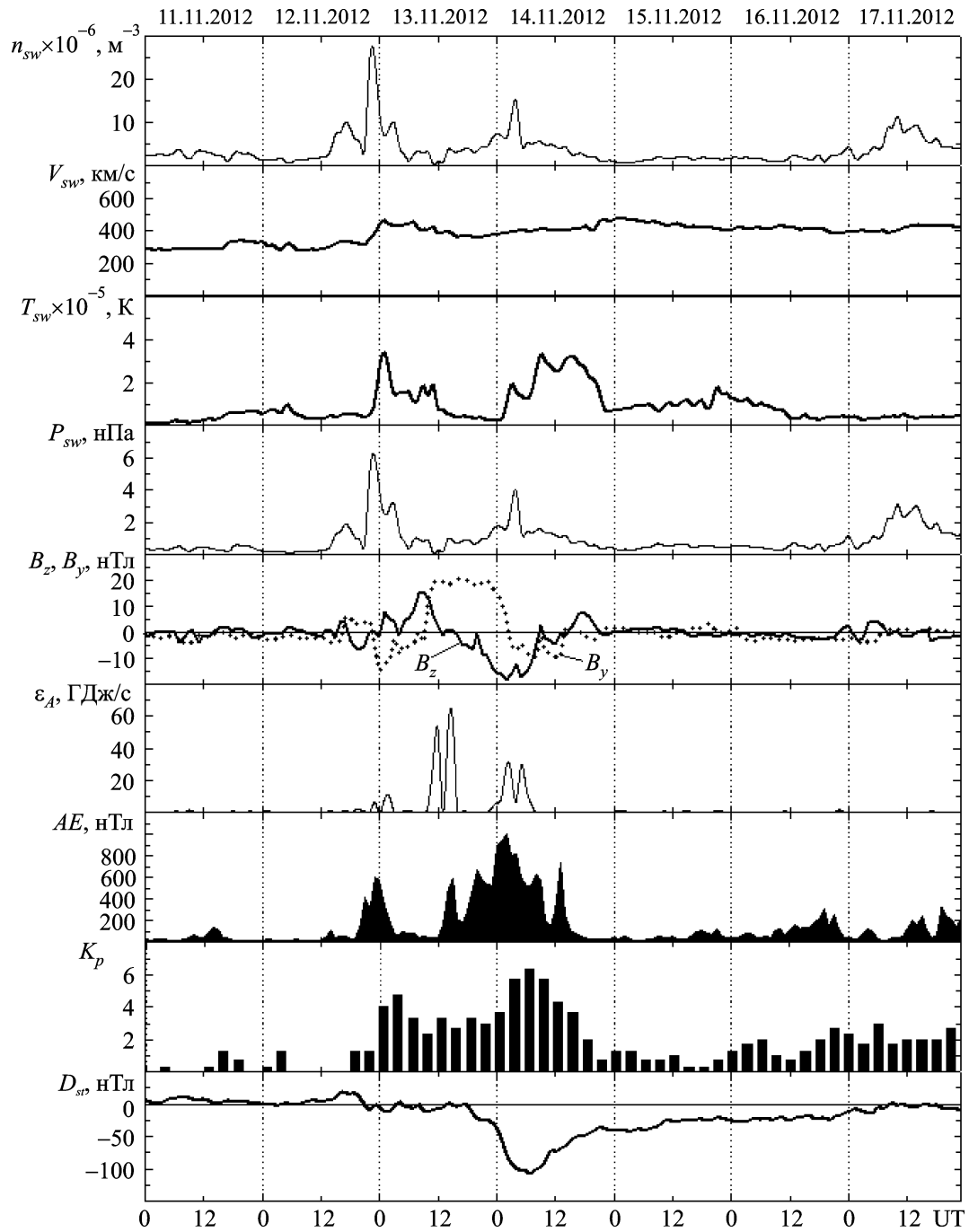
торов. Сложность и изменчивость физических процессов, формирующих ионосферную бурю, зависимость вклада различных физических механизмов от географического региона приводят к большому многообразию наблюдаемых явлений в различных регионах Земли. Анализ каждой бури дает ценную информацию для дальнейшего исследования и моделирования физических процессов в системе Солнце – межпланетная среда – геокосмос – атмосфера – Земля, а также для прогнозирования реакции ионосферы конкретного региона на возмущения на Солнце [1].

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния вариаций параметров ионосферы во время сильной магнитной бури 13–14 ноября 2012 г. Отдельные предварительные результаты исследований были изложены в работах [6, 7].

### 2. Состояние космической погоды

Геомагнитная буря протекала на фоне умеренной активности Солнца (в период с 11 по 17 ноября значения индекса  $F_{10.7}$  находились в пределах  $135 \div 146$ ). Причиной возникновения бури послужили выбросы корональной массы 9 и 10 ноября 2012 г., направленный в сторону Земли. Основные параметры, описывающие геокосмическую обстановку с 11 по 17 ноября 2012 г., представлены на рис. 1.

До 12 ноября геомагнитное поле было спокойным. Скорость солнечного ветра не превышала 300 км/с. Лишь после 12:00 (здесь и далее всемирное время UT) 12 ноября концентрация час-



**Рис. 1.** Временные вариации параметров солнечного ветра (концентрации  $n_{sw}$ , радиальной скорости  $V_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$  и рассчитанных значений динамического давления  $p_{sw}$ ),  $B_y$  - (пунктирная линия) и  $B_z$  -компоненты (сплошная линия) межпланетного магнитного поля, рассчитанных значений энергии  $\epsilon_{sw}$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, а также параметров геомагнитной активности:  $AE$ -индекса (WDC, Киото, Япония),  $K_p$ -индекса (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>),  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2, Киото, Япония) – в течение 11–17 ноября 2012 г.

тиц солнечного ветра  $n_{sw}$  начала расти. Примерно в 18:00  $B_z$ -компонента межпланетного магнитного поля резко повернула к югу и, оставаясь отрицательной до 01:00 13 ноября, достигла минимального значения, равного  $-6.5$  нТл. В этот

период значения параметров солнечного ветра резко увеличились: концентрация  $n_{sw}$  до  $\sim 24.8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ , скорость  $V_{sw}$  до  $\sim 430$  км/с, температура  $T_{sw}$  до  $\sim 30 \cdot 10^5$  К, динамическое давление  $p_{sw}$  до  $\sim 6$  нПа. Значение энергии  $\epsilon_A$ ,

передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, было относительно невелико:  $\epsilon_A \approx 6 \div 10$  ГДж/с. Около полуночи индекс  $AE$  вырос до  $\sim 600$  нТл, а  $K_p$  – до 4.7.

13 ноября компонента  $B_z$ , после того как около 10:00 достигла своего максимума, равного 15.7 нТл, начала уменьшаться. В это время функция Акасофу  $\epsilon_A$  резко увеличилась до  $50 \div 56$  ГДж/с. С 16:00 13 ноября до 10:00 14 ноября  $B_z$ -компонента была отрицательной, а в промежутке с 00:00 до 06:00 ее значения были близки к минимуму и составляли  $-(17 \div 18)$  нТл. В свою очередь функция Акасофу снова возросла и составила вблизи максимума  $26 \div 30$  ГДж/с. Как видно из рис. 1, геомагнитная буря началась 13 ноября около 15:00.

Главная фаза магнитной бури имела место с 18:00 13 ноября до 06:00 14 ноября. 14 ноября на протяжении всего дня наблюдалась высокая температура солнечного ветра:  $T_{sw} \approx (15 \div 33) \cdot 10^4$  К. Скорость  $V_{sw}$  составляла около 400 км/с.

За главной фазой последовала фаза восстановления, которая продолжалась несколько суток вплоть до 17 ноября (см. рис. 1, нижнюю панель). Экстремальные значения индексов геомагнитной активности во время магнитной бури составили  $AE_{max} = 1009$  нТл,  $K_{p\ max} = 6+$  и  $D_{st\ min} = -108$  нТл. По классификации [1, 6] буря 13–14 ноября 2012 г. относится к сильным бурям.

Оценим энергию магнитной бури  $E_{ms}$ , которая определяется значением индекса  $D_{st\ min}$  [3]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_M \left| \frac{D_{st}^*}{B_0} \right|,$$

где  $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$  Тл – значение индукции магнитного поля на экваторе,  $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$  Дж – энергия дипольного магнитного поля Земли. Скорректированное значение  $D_{st}^* = D_{st\ min} - bp^{1/2} + c$ . Здесь  $b = 5 \cdot 10^5$  нТл/(Дж·м<sup>-3</sup>)<sup>1/2</sup>;  $c = 20$  нТл;  $p = n_p m_p V_{sw}^2$ ,  $n_p$  и  $m_p$  – концентрация и масса протонов. Энергия сильной магнитной бури при  $|D_{st}^*| \approx 127$  нТл составляет  $\sim 5 \cdot 10^{15}$  Дж (см. также [7, 8]).

### 3. Средства и методы

Наиболее полными диагностическими возможностями в исследовании ионосферных и термосферных эффектов геокосмических бурь обладает ме-

тод некогерентного рассеяния, который позволяет с высокой точностью и в широком интервале высот одновременно измерять основные параметры ионосферы.

Харьковский радар некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы расположен в Ионосферной обсерватории вблизи г. Змиева (географические координаты: 49.6° с. ш., 36.3° в. д.). Подробное описание радара НР и режимов его работы приведено в работах [1, 5]. Харьковский Радар НР является единственным источником сведений о поведении основных параметров ионосферы в широком диапазоне высот в среднеширотной Европе.

Максимальная мощность двухканального передатчика достигает 3.6 МВт (средняя мощность 100 кВт), коэффициент усиления параболической антенны 12700 (диаметр антенны 100 м, ее эффективная площадь около 3700 м<sup>2</sup>, ширина луча диаграммы направленности 1°). Относительная погрешность определения параметров ионосферы обычно не превышает 10 %.

С 13 по 15 ноября 2012 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.

Наблюдения проводились в соответствии с Международным геофизическим календарем с 13 по 15 ноября 2012 г.

## 4. Экспериментальные результаты

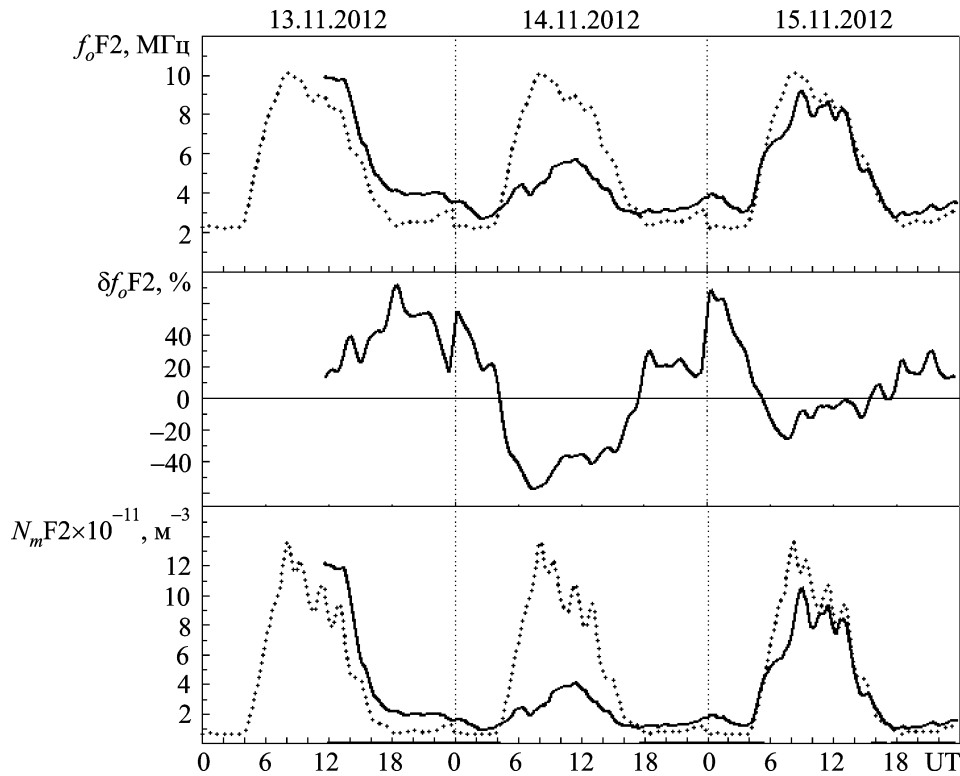
### 4.1. Вариации критической частоты слоя F2

На рис. 2 приведены временные вариации критической частоты  $f_oF2$  и ее относительного отклонения  $\delta f_oF2$ .

Относительное отклонение критической частоты в процентах определяется по формуле [9]:

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

где  $f_oF2$  – значение критической частоты, измеренной во время эксперимента;  $\langle f_oF2 \rangle$  – усредненные значения критической частоты в условиях невозмущенной ионосферы.



**Рис. 2.** Временные вариации критической частоты  $f_oF2$  (верхняя панель, сплошная линия), ее относительного отклонения  $\delta f_oF2$  (средняя панель) и концентрации электронов  $N_mF2$  в максимуме слоя F2 (нижняя панель, сплошная линия) в период измерений с 13 по 15 ноября 2012 г. Пунктирными линиями для сравнения приведены данные для магнитоспокойных условий (22 ноября 2012 г.)

В качестве контрольного дня выбран магнитоспокойный день 22 ноября 2012 г. ( $K_p = 0 \div +1$ ). На рис. 2 показаны также вариации концентрации электронов  $N_mF2$  в максимуме слоя F2, которая рассчитана по известной формуле

$$N_mF2 = 1.24 \cdot 10^{10} (f_oF2)^2,$$

где  $f_oF2$  выражается в мегагерцах.

Магнитная буря сопровождалась ионосферной бурей со знакопеременными фазами (см. рис. 2, верхнюю и среднюю панели). Особенностью этой ионосферной бури было наличие двух положительных фаз возмущения.

Первая фаза носила характер длительного (от начала измерений в 11:30 13 ноября до 04:00 14 ноября) положительного возмущения с наибольшим относительным отклонением  $\delta f_oF2$  около +70% в 18:30. При этом концентрация электронов в максимуме слоя F2,  $N_mF2$ , увеличилась в 3.1 раза.

После 00:15 14 ноября критическая частота  $f_oF2$  стремительно уменьшилась, что говорит о смене положительной фазы ионосферной бури на

отрицательную фазу, которая продолжалась до 17:30 14 ноября. Максимальное отклонение  $\delta f_oF2$  при этом составило приблизительно –60% в 07:30. В это же время  $N_mF2$  уменьшилась почти в 5.3 раза.

Вторая положительная фаза бури с наибольшим отклонением  $\delta f_oF2$  около +70% (в 00:30 15 ноября) продолжалась до 04:00 15 ноября, после чего последовала фаза восстановления параметров ионосферной плазмы к значениям, характерным для невозмущенных условиях. Во время второй положительной фазы ионосферной бури концентрация  $N_mF2$  увеличилась в 2.8 раза.

#### 4.2. Вариации высоты максимума слоя F2

На рис. 3 приведены временные вариации высоты максимума слоя F2,  $z_mF2$ . В контрольный день 22 ноября вариации высоты  $z_mF2$  характерны для невозмущенной среднеширотной ионосферы в это время года: ночью значения  $z_mF2 \approx 340 \div 350$  км, а днем  $z_mF2 \approx 240$  км.

Из рис. 3 видно, что 13 ноября до начала и в течение восьми часов после начала магнитной

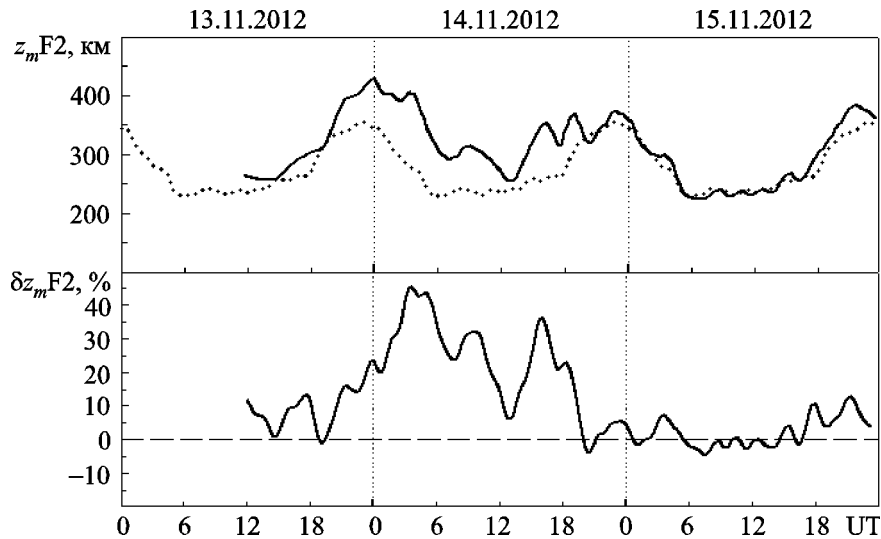


Рис. 3. Временные вариации высоты максимума слоя F2,  $z_mF2$ , (верхняя панель, сплошная линия), а также ее относительно отклонения  $\delta z_mF2$ , % (нижняя панель) с 13 по 15 ноября 2012 г. Пунктирная линия на верхней панели – данные в контрольный день 22 ноября 2012 г.

бури относительное отклонение высоты  $\delta z_mF2$  изменялось от 0 до 20 %, что находится в пределах типичных флуктуаций.

Во время бури  $z_mF2$  начала увеличиваться относительно значений в невозмущенные сутки, что связано с отклонениями от регулярных временных вариаций нейтрального состава, фотохимических процессов и термосферных ветров. Максимальное отклонение  $\delta z_mF2 \approx 45\%$  наблюдалось 14 ноября около 03:30 в период главной фазы магнитной бури и смены положительной фазы ионосферной бури на отрицательную фазу. При этом высота  $z_mF2$  увеличилась до  $\sim 400$  км, тогда как в магнитоспокойных условиях 22 ноября 2012 г. она была близка к 275 км. Следующее существенное увеличение  $z_mF2$  имело место в 09:30 ( $\delta z_mF2 \approx 30\%$ ) и 16:00 ( $\delta z_mF2 \approx 35\%$ ) 14 ноября во время отрицательной фазы ионосферной бури.

При последующей смене фаз (отрицательной на положительную) отклонение  $\delta z_mF2$  начало уменьшаться. 15 ноября отклонение  $\delta z_mF2$  составляло  $0 \div 10\%$  – наступила фаза восстановления.

#### 4.3. Высотное распределение концентрации электронов

Временные вариации концентрации электронов  $N$  на фиксированных высотах 200 ÷ 650 км представлены на рис. 4.

В возмущенный день 14 ноября значения концентрации  $N$  на высотах до 350 км были ниже, чем при невозмущенных условиях. Самое существенное уменьшение  $N$ , более чем в 5 раз, наблюдалось на высотах 200 и 250 км. На высоте  $z \approx 300$  км  $N$  уменьшалась почти в 3.5 раза, а на 350 км – в 2 раза.

Выше 400 км, из-за увеличения влияния процессов диффузии, вариации концентрации  $N$  выражены слабее. 15 ноября наступила фаза восстановления.

#### 4.4. Вариации температур электронов и ионов

Временные вариации температур электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$  на фиксированных высотах в период с 13 по 15 ноября 2012 г., а также 22 ноября 2012 г. представлены на рис. 5.

Из сравнения этих температур в невозмущенных условиях и во время ионосферной бури видно, что 14 ноября наблюдался нагрев плазмы. В течение всей отрицательной фазы бури имело место увеличение температур  $T_e$  и  $T_i$ . Вблизи местного полудня 14 ноября  $T_e$  увеличилась на 200 ÷ 300 К соответственно на высотах 200 ÷ 700 км, а  $T_i$  – на 100 ÷ 200 К относительно значений в контрольный день 22 ноября.

В течение второй положительной фазы бури значения температур начали уменьшаться – наступила фаза восстановления.

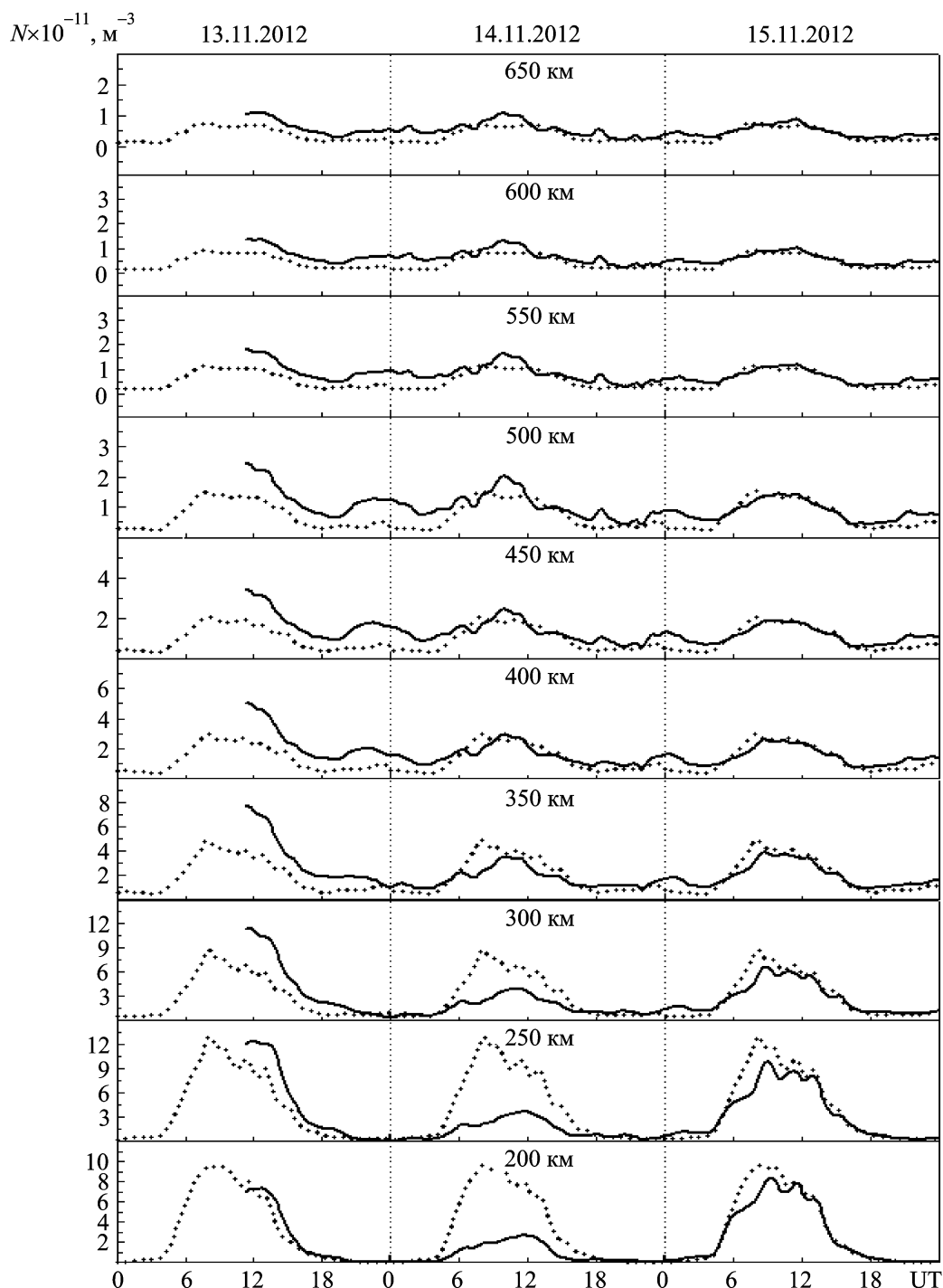


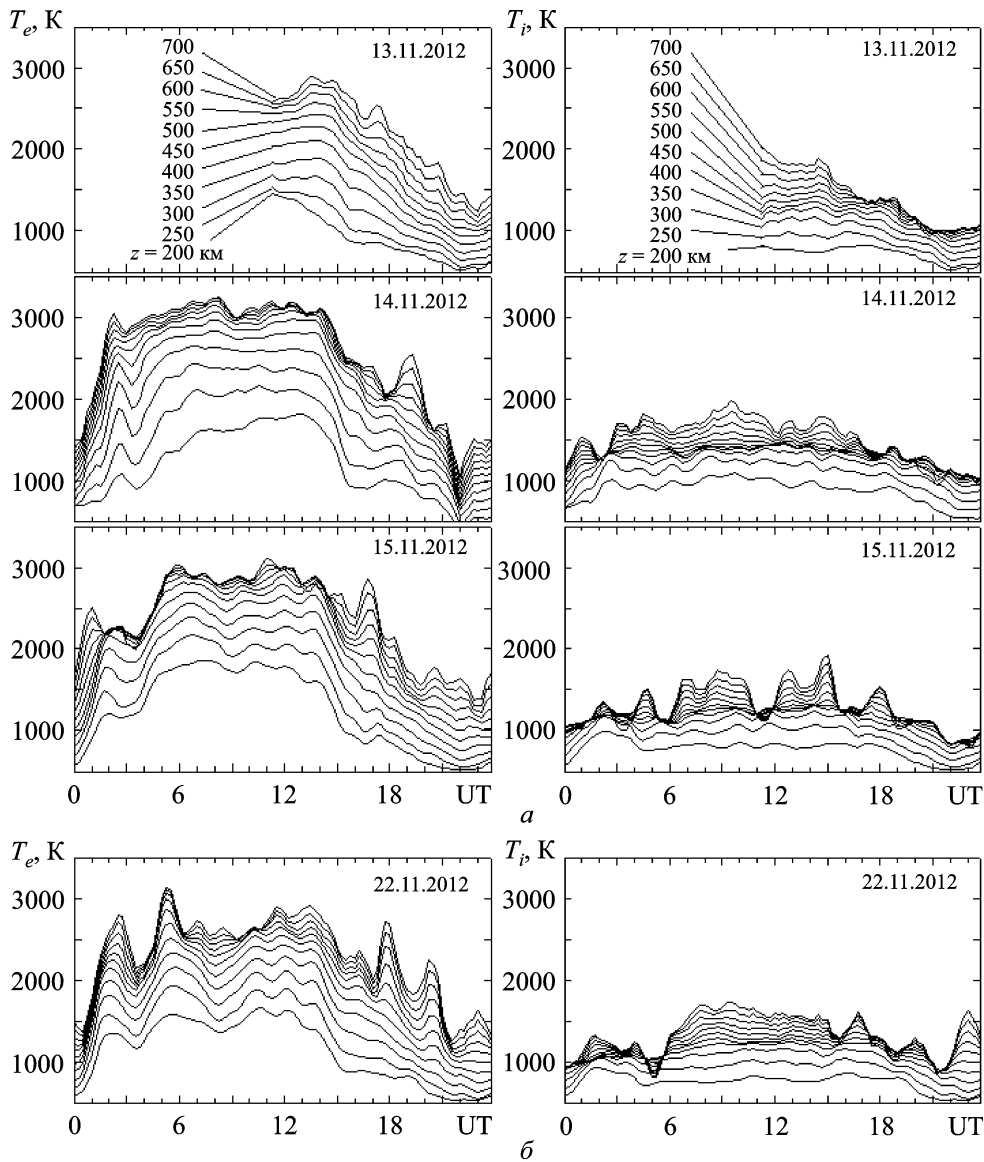
Рис. 4. Временные вариации концентрации электронов  $N$  на фиксированных высотах в период с 13 по 15 ноября 2012 г. (сплошные линии) и в контрольный день 22 ноября 2012 г. (пунктирные линии).

#### 4.5. Вариации вертикальной составляющей скорости переноса ионосферной плазмы

Геомагнитная буря 13–14 ноября 2012 г. вызвала изменения во временных вариациях вертикальной составляющей скорости движения ионосферной

плазмы  $V_z$  (рис. 6). Около полуночи с 13 на 14 ноября возникли колебания в вариациях  $V_z$ .

Начало колебательного процесса совпало с началом главной фазы геомагнитной бури. Амплитуда колебаний возрастала с увеличением высоты с 12 м/с на высоте  $z = 198$  км до  $30 \div 39$  м/с

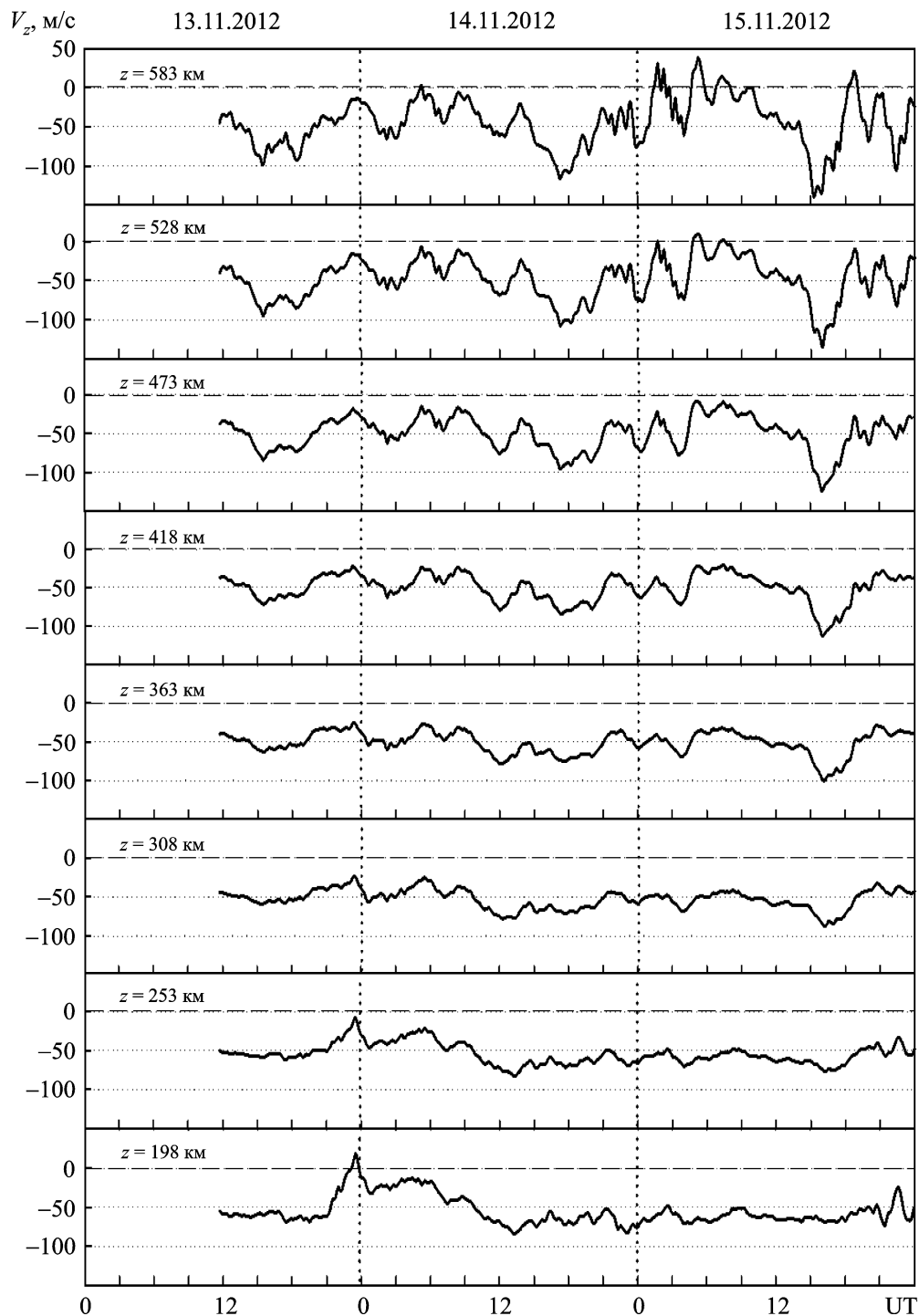


**Рис. 5.** Временные вариации температур электронов  $T_e$  (слева) и ионов  $T_i$  (справа) с 13 по 15 ноября 2012 г. (а) и 22 ноября 2012 г. (б) на фиксированных высотах

на  $z = 470 \div 580$  км. Квазипериод колебаний изменялся одинаково на разных высотах в пределах от 3 ч 30 мин до 5 ч 15 мин.

Вечерний минимум  $V_z$  во время геомагнитных возмущений 13 и 14 ноября, характеризующихся повышенными значениями индекса  $K_p = 3 \div 4$ , был выражен меньше по сравнению с минимумом  $V_z$  15 ноября во время затухающей фазы. Так, на высоте 418 км изменение  $V_z$  в промежутке с 14:30 (начало вечернего уменьшения  $V_z$ ) до момента достижения экстремального значения составило 38 и 51 м/с 14 и 15 ноября соответственно. При этом 14 ноября скорость  $V_z$  изменялась от  $-46$  м/с

(в 14:30) до экстремума  $-84$  м/с (в 17:00), а 15 ноября – от  $-59$  м/с (в 14:30) до экстремального значения  $-110$  м/с (в 15:45), опять достигнув первоначального значения в 18:45, тогда как 14 ноября первоначальное значение ( $-46$  м/с) было достигнуто на два часа позже (около 20:45) из-за колебательного процесса. Окончание вечернего уменьшения  $V_z$  было зарегистрировано на данной высоте 14 ноября в 21:15 ( $V_z = -37$  м/с), а 15 ноября – в 20:15 ( $V_z = -36$  м/с). На высотах ниже 418 км 14 ноября и на всех высотах 13 ноября изменения  $V_z$  в этом же промежутке времени находились на уровне статистических флуктуаций.



**Рис. 6.** Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  на фиксированных высотах в период 13–15 ноября 2012 г.

С 22:15 13 ноября по 00:15 14 ноября на высотах 185 ÷ 270 км зарегистрировано отклонение скорости нисходящего движения плазмы ( $V_z < 0$ ) в сторону уменьшения абсолютного значения  $V_z$ . Следует отметить, что в это время отношение

мощности НР сигнала, принятого с указанных высот, к мощности шума было меньше или близко к 0.1. При таком отношении сигнал/шум данные о скорости плазмы становятся недостоверными.



## 5. Обсуждение

Из результатов эксперимента видно, что сильная магнитная буря 13–14 ноября 2012 г. ( $K_p \text{ max} = 6+$ ) сопровождалась интенсивной ионосферной бурей над Харьковом со знакопеременными фазами и вызвала ряд существенных изменений в ионосферной плазме. Главной особенностью этой бури является наличие двух положительных фаз. Подобная смена фаз уже наблюдалась на харьковском радаре НР во время умеренной магнитной бури 4–6 апреля 2006 г. ( $K_p \text{ max} = 5$ ) [1].

В табл. 1 проводится сравнение фаз ионосферного возмущения во время обеих геомагнитных бурь. Видно, что эффекты сильной бури 13–14 ноября 2012 г. были значительно выразительней, чем умеренной бури 4–6 апреля 2006 г.

Существенные изменения концентрации электронов (почти в 5.3 раза) во время бури 13–14 ноября 2012 г. сопровождалась незначительными изменениями температур плазмы – на  $100 \div 200$  К. На временные вариации вертикальной составляющей скорости  $V_z$  геомагнитная буря 13–14 ноября также оказала незначительное влияние. В относительно спокойный день 15 ноября (на фазе восстановления) движение плазмы было в основном характерным для осенне-зимней среднеширотной ионосферы европейского региона. Отмечались квазигармонические колебания  $V_z$  с изменяющимся периодом от 3 ч 30 мин до 5 ч 15 мин и амплитудой  $12 \div 39$  м/с в промежутке с 23:50 13 ноября до 16:30 14 ноября во время главной фазы магнитной бури.

Далеко не все вопросы, касающиеся морфологии и физики положительной фазы, решены к настоящему времени. В отличие от отрицательной фазы, положительная фаза вызывает много споров [10, 11].

Физические механизмы, которые поддерживают длительное существование положительной фазы, и особенности ее проявления изучены до настоящего времени еще недостаточно. Возможны следующие механизмы положительных возмущений [3, 12]. Первый из них связан с подъемом слоя F2 вверх, в область более низкой рекомбинации, за счет усиления меридионального ветра, направленного к экватору. Согласно работе [3] этот механизм более эффективен в дневное время, когда главенствуют процессы ионообразования.

Второй механизм связан с изменением состава нейтральной атмосферы за счет оседания легких компонент газа в низких и средних широтах. Роль этого механизма более существенна ночью. Причиной таких крупномасштабных возмущений термосферной циркуляции и нейтрального состава является высокоширотный нагрев термосферы во время магнитной бури [3].

Для обоих механизмов воздействие солнечного ветра происходит по следующему каналу: граничный слой хвоста магнитосферы – плазменный слой – продольные токи – джоулев нагрев – изменение термосферной циркуляции и нейтрального состава (см., например, [3, 12, 13]). Высыпание мягких частиц с энергиями  $E \leq 1$  кэВ в область дневного каспа также может вносить зна-

Таблица 1. Параметры, характеризующие геокосмические бури

Фаза	Умеренная магнитная буря 4–6 апреля 2006 г. ( $K_p \text{ max} = 5$ )	Сильная магнитная буря 13–14 ноября 2012 г. ( $K_p \text{ max} = 6+$ )
Первая положительная	$\delta f_o F2_{\text{max}} = +30\%$ $N_m F2$ увеличилась в 1.4 раза $z_m F2$ увеличилась на $30 \div 40$ км	$\delta f_o F2_{\text{max}} = +70\%$ $N_m F2$ увеличилась в 3.1 раза $z_m F2$ увеличилась на $100 \div 120$ км
Отрицательная	$\delta f_o F2_{\text{max}} = -25\%$ $N_m F2$ уменьшилась в 1.8 раз $z_m F2$ увеличилась на $80 \div 100$ км	$\delta f_o F2_{\text{max}} = -60\%$ $N_m F2$ уменьшилась в 5.3 раза $z_m F2$ увеличилась на $60 \div 75$ км
Вторая положительная	$\delta f_o F2_{\text{max}} = +30\%$ $N_m F2$ увеличилась в 1.4 раза $z_m F2$ увеличилась на 30 км	$\delta f_o F2_{\text{max}} = +70\%$ $N_m F2$ увеличилась в 2.8 раза $z_m F2$ увеличилась на $80 \div 95$ км

чительный вклад в эффекты положительной фазы бури. Энергия частиц поглощается на высотах области F ( $200 \div 300$  км), вызывая ее разогрев, а также меридиональную циркуляцию, что способствует переносу обогащенного атомарным кислородом газа к экватору [14]. 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, обуславливая разнообразие ионосферных бурь [1].

Рассмотрим возможность реализации первого механизма. Сравнение результатов измерений высоты  $z_m F2$  с данными спокойного дня, в качестве которого выбраны сутки 22 ноября, показало, что высота максимума слоя  $z_m F2$  возросла на  $50 \div 120$  км во время первой положительной фазы бури 14 ноября и на 30 км во время второй положительной фазы в этот же день. Таким образом, подъем слоя F2 за счет усиления меридионального ветра к экватору в дневных условиях 14 ноября мог стать причиной формирования положительных фаз бури.

Для рассмотрения роли второго механизма, т. е. изменения состава нейтральной атмосферы, необходимо проведение дополнительных расчетов и детальное моделирование, что будет сделано в другой работе. Напомним, что изменение нейтрального состава является одним из главных факторов, ответственных за уменьшение концентрации электронов (см., например, [1, 3, 5]).

Таким образом, результаты настоящей работы свидетельствуют, что как при сильных, так и при умеренных геокосмических бурях эффекты взаимодействия подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера становятся определяющими [1, 6–8, 15, 16].

## 6. Выводы

Представлены результаты исследования ионосферной бури со знакопеременными фазами 13–14 ноября 2012 г. Рассмотрены основные механизмы, формирующие развитие положительных

и отрицательных фаз бури. Основные итоги работы сводятся к следующему.

1. Обнаружено, что концентрация  $N_m F2$  во время первой положительной фазы бури увеличилась по сравнению со значением в контрольные сутки примерно в 3.1 раза, уменьшилась в 5.3 раза в отрицательной фазе бури и снова увеличилась в 2.8 раза во время второй положительной фазы. Относительное отклонение  $\delta f_o F2$  при этом составляло +70, –60 и +70 % соответственно.

2. Обнаружено значительное уменьшение концентрации  $N$ : более чем в 5 раз на высотах  $200 \div 250$  км, почти в 3.5 раза на высоте 300 км, почти в 2 раза на высоте 350 км.

3. Установлено, что изменения в вариациях температур электронов и ионов в результате магнитной бури были относительно незначительными: в диапазоне высот  $200 \div 700$  км  $T_e$  увеличилась на  $200 \div 300$  К, а  $T_i$  – на  $100 \div 200$  К.

4. Выявлено, что магнитная буря оказала незначительное влияние на временные вариации вертикальной составляющей скорости движения плазмы  $V_z$ . Обнаружены квазигармонические колебания  $V_z$  с изменяющимся периодом от 3 ч 30 мин до 5 ч 15 мин и амплитудой  $12 \div 39$  м/с в промежутке с 23:50 13 ноября до 16:30 14 ноября во время главной фазы бури.

5. Количественное определение роли обсуждаемых механизмов формирования положительных и отрицательных бурь требует детального физико-математического моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 408 с.
2. 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. – id. GI3001.
3. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms: A Review // Space Sci. Rev. – 1999. – Vol. 88, No. 3–4. – P. 563–601.
4. Mikhailov A. V. and Foster J. C. Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res: Space Phys. – 1997. – Vol. 102, Is. A8. – P. 17275–17282.
5. Danilov A. D. F2 region response to geomagnetic disturbances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2001. – Vol. 63, Is. 5. – P. 441–449.

6. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Кацко С. В., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты магнитной бури 13–15 ноября 2012 г. // Сб. тез. докл. 13-й украинской конф. по космическим исследованиям. – Евпатория (Украина). – 2013. – С. 52.
7. Кацко С. В. Геокосмическая буря 14 ноября 2012 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Сб. тез. докл. конф. ИОН-2013 “Дистанционное радиозондирование ионосферы”. – Малый Маяк, Крым (Украина). – 2013. – С. 46.
8. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
9. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
10. Бархатов Н. А., Бархатова О. М. Выявление классов ионосферной возмущенности по многолетним данным о критической частоте слоя F2 // Геомагнетизм и аэронаука. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 510–518.
11. Mikhailov A. V., Skoblin M. G., and Forster M. Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes // Ann. Geophys. – 1995. – Vol. 13, No. 5. – P. 532–540.
12. 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.
13. Кринберг И. А., Тацillin А. В. Ионосфера и плазмосфера. – М.: Наука, 1984. – 190 с.
14. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэронаука. – 1985. – Т. 25, № 5. – С. 768–772.
15. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 225–246.
16. Chernogor L. F. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes // Int. J. Remote Sens. – 2011. – Vol. 32, No. 11. – P. 3199–3218.

I. Ф. Домнин<sup>1</sup>, Л. Я. Емельянов<sup>1</sup>, С. В. Кацко<sup>1</sup>,  
Л. Ф. Черногор<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт ионосферы НАН і МОН України,  
вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

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

#### ИОНОСФЕРНИ ЕФЕКТИ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 13–14 ЛИСТОПАДА 2012 Р.

Наведено результати дослідження відгуку F-області та зовнішньої іоносфери на сильну магнітну бурю 13–14 листопада 2012 р. ( $K_p \text{max} = 6+$ ). Спостереження виконано за допомогою радара некогерентного розсіяння, розташованого поблизу м. Харкова. Магнітна буря супроводжувалася іоносферною бурею зі змінними фазами. Особливістю даної бурі є наявність двох позитивних та однієї негативної фази збурення.

I. F. Domnin<sup>1</sup>, L. Ya. Emelyanov<sup>1</sup>, S. V. Katsko<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 of Ukraine,  
16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

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

#### IONOSPHERIC EFFECTS OF GEOSPACE STORM OF NOVEMBER 13–14, 2012

The results of studying the F region and topside ionosphere response to the strong magnetic storm of November 13–14, 2012 ( $K_p \text{max} = 6+$ ) are presented. The observations are carried out by the Kharkiv incoherent scatter radar. The magnetic storm was accompanied by the ionospheric storm with sign-variable phases. This storm was featured by the presence of two positive and one negative phases of disturbance.

Стаття постуила в редакцію 14.02.2014