

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, В. Н. Лысенко¹, В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН і МОН України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1

Надійшла до редакції 15.11.05. Після переробки 26.01.06

Наведено результати порівняльного аналізу іоносферно-термосферних ефектів двох найсильніших геокосмічних бур, які відрізняються інтенсивністю та характером протікання. Виявлено особливості цих бур, які можна використати для класифікації бур. Спостереження іоносферних збурень виконано за допомогою радара некогерентного розсіяння у Харкові.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные бури в конечном итоге вызываются нестационарными процессами на Солнце, к которым относятся солнечные бури, солнечные вспышки, выбросы корональной массы (coronal mass ejection, или SME) и магнитных облаков (плазмоидов), усиление динамического давления солнечного ветра, изменение конфигурации межпланетного магнитного поля (ММП) и др. Эти возмущения, охватывая систему Солнце — межпланетная среда — геокосмос — атмосфера — Земля*, изменяют процессы во всех составляющих этой системы. На Земле возмущения вызывают сбои в работе мощных энергетических систем, систем навигации и дальней радиосвязи, влияют на погоду, здоровье людей и состояние биосферы. Исследованиям проявлений геокосмических бурь посвящено большое количество работ [2, 6—9, 12, 17—19, 22, 23, 26—30, 32—36, 39 и др.]. Накопленный материал свидетельствует о многообразии и сложном взаимодействии процессов, формирующих бури. Это делает каждую бурю уникальной и затрудняет прогнозирование возмущений в ионосфере. Особенность ионосферных бурь состоит в их глобальности.

Они охватывают всю ионосферу от высоких широт до экватора. Однако характер их протекания зависит от многих геофизических факторов, в том числе от времени суток и от местоположения пункта наблюдения. Анализ каждой бури дает ценную информацию для дальнейшего исследования и моделирования физических процессов в системе Солнце — Земля, а также для прогнозирования реакции ионосферы конкретного региона на возмущения на Солнце и состояние космической погоды.

Целью данной работы является исследование общих закономерностей и особенностей развития ионосферных возмущений в средних широтах восточноевропейского региона на базе наблюдений пяти геокосмических бурь, отличающихся интенсивностью и характером протекания. Результатом анализа стала предложенная классификация ионосферных возмущений.

В первой части работы рассмотрены эффекты двух геокосмических бурь, сопровождавшихся сильнейшими магнитными бурами и ионосферными возмущениями.

Наблюдения космической погоды с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) в Харькове проводятся на протяжении трех циклов

* Подразумеваются внутренние оболочки планеты. Внешние оболочки, являющиеся предметом исследования, вычленены отдельно.

солнечной активности [5, 10]. Известно, что радиус корреляции крупномасштабных ионосферных возмущений достигает 1000 км. Поэтому измерения возле г. Харькова (который находится в центре Европы) фактически можно распространить на всю среднеширотную Европу.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Геокосмическая буря представляет собой совокупность геомагнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь [13–16]. Разумеется, речь идет прежде всего о бурях в верхней атмосфере.

Как известно, магнитной бурей (МБ) называют возмущения в магнитной оболочке Земли, которые сопровождаются быстрыми и сильными изменениями вектора индукции геомагнитного поля. Для количественной оценки уровня геомагнитной активности часто используются индексы K , K_p , A_p и D_{st} . Первый изменяется от 0 до 9 и пропорционален логарифму амплитуды флуктуаций магнитного поля, измеряемой в 10 среднеширотных обсерваториях за 3-часовой интервал времени. Обычно используют обще-планетарный K_p -индекс, полученный усреднением индексов K . Индекс A_p представляет собой суточную сумму 3-часовых индексов a_p . Индексы a и a_p получают переводом по специальным таблицам индексов K и K_p обратно в эквивалентные им амплитуды колебаний магнитного поля.

Индекс D_{st} характеризует возмущения геомагнитного поля на поверхности Земли, связанные с симметричным кольцевым током. Увеличение интенсивности этого тока вызывает уменьшение северной составляющей геомагнитного поля, наблюдавшееся во время главной фазы магнитной бури. Индекс D_{st} определяют с помощью магнитометрических станций, расположенных вблизи экватора. В высоких широтах для описания возмущения используется индекс AE , который характеризует интенсивность авроральной электроструи.

Магнитные бури сопровождаются рядом эффектов: усилением магнитосферно-ионосферных электрических полей, увеличением скорости конвекции, развитием кольцевого тока, сбросом энергичных частиц из магнитосферы и др. Эти эффекты вызывают цепь ионосферно-атмосферных возмущений, а также воздействуют на технологические системы и самочувствие людей. Классификация МБ проводится по их интенсивности, характеру и значениям относительных возмущений параметров среды. В табл. 1 приведена классификация МБ по уровню геомагнитной активности и значениям энергетических параметров, предложенная в работе [13, 15]. Магнитным бурям соответствуют значения $K_p \geq 3$. Индексы $K_p < 2$ соответствуют магнитным возмущениям.

В табл. 2 дана характеристика МБ по классификации NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Space Weather Scales [<http://www.sec.noaa.gov>]. Она введена с целью

Таблица 1. Примерные характеристики магнитных возмущений и магнитных бурь по классификации Л. Ф. Черногора [13]

K_p	ΔB , нТл	Δt , ч	ΔE_M , 10^{14} Дж	P_M , 10^{10} Вт	Качественная характеристика
0	2.5	1.0	1.3	3.7	крайне слабое возмущение
1	5	1.4	2.7	5.4	сверхслабое возмущение
2	10	1.6	5.3	9.3	очень слабое возмущение
3	20	1.8	11	16	слабая буря
4	40	2.0	21	30	весыма умеренная буря
5	70	2.5	34	38	умеренная буря
6	120	3.0	64	59	сильная буря
7	200	4.0	110	74	очень сильная буря
8	330	5.0	180	97	сверхсильная буря
9	500	6.0	270	130	крайне сильная буря

Примечание: ΔB — возмущение индукции магнитного поля, Δt — средняя продолжительность главной фазы МБ, ΔE_M — возмущение энергии геомагнитного поля, P_M — средняя мощность МБ. МБ соответствуют $K_p \geq 3$.

Таблица 2. Характеристики магнитной бури по классификации NOAA Space Weather Scales

Тип МБ	Название МБ	Эффекты МБ (краткое описание воздействия МБ на системы жизнеобеспечения людей)	K_p	Количество МБ в цикле СА (их продолжительность)
G5	Крайне сильная (Extreme)	Выход из строя линий электропередач, нарушения траектории КА, сбои в работе систем радиосвязи, спутниковой навигации, смещение экваториальной границы полярного сияния до геомагнитной широты $\Phi = 40^\circ$	9	4 (4 сут)
G4	Очень сильная (Severe)	Выход из строя систем контроля и защиты энергетических сетей, нарушение траектории и ориентации КА, сбои в работе систем радиосвязи, спутниковой навигации, смещение экваториальной границы полярного сияния до $\Phi = 45^\circ$	8, включая 9—	100 (60 сут)
G3	Сильная (Strong)	Нарушения в работе устройств защиты и сигнализации энергетических систем, дополнительное торможение низкоорбитальных КА, сбои в работе систем радиосвязи и навигации, вероятность наблюдения полярного сияния до $\Phi = 50^\circ$	7	200 (130 сут)
G2	Умеренная (Moderate)	Сбои в работе высоколатитных энергетических систем, необходимость коррекции орбиты КА из-за дополнительного торможения, замыкания ВЧ радиосигналов в высоких широтах, вероятность наблюдения полярного сияния до $\Phi = 55^\circ$	6	600 (360 сут)
G1	Слабая (Minor)	Небольшие нарушения в работе электрических сетей, слабые воздействия на системы КА, воздействие МБ этого уровня и более высоких уровней на поведение мигрирующих животных, вероятность наблюдения полярного сияния в высоких широтах.	5	1700 (900 сут)

оповещения общественности о состоянии космической погоды и ее воздействии на людей и технологические системы. Каждому типу МБ присваивается уровень, аналогично ураганам, торнадо, землетрясениям. Рассматриваются воздействия МБ на энергетические системы, космические аппараты (КА) и другие системы. В классификации также указывается, как часто случаются МБ в 11-летнем цикле солнечной активности (СА).

ХАРАКТЕРНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НАД ХАРЬКОВОМ

Ионосферной бурей (ИБ) традиционно принято называть значительное отклонение критических частот слоя $F2$ от медианных значений в течение продолжительного времени (от полусуток до 2–3 сут), которое часто сопровождает магнитную бурю. В зависимости от знака отклонений ионосферные бури могут быть положительными или отрицательными. Буре сопутствуют часто существенные и достаточно быстрые, а иногда и резкие изменения атмосферного, ионосферного и магнитосферного электрических полей. Совокупность этих изменений именуют электриче-

ской бурей [13, 14]. Известно, что ионосферные и термосферные эффекты геокосмических бурь тесно связаны между собой [18].

Дадим краткое описание ионосферных и термосферных возмущений, сопровождавших две крайне сильные геомагнитные бури различного характера; одна из бурь началась в ночное время, вторая — в дневное время. Названия бурь соответствуют классификации [13] и табл. 1.

Крайне сильная магнитная буря 25 сентября 1998 г. Магнитная буря последовала за интенсивной вспышкой на Солнце класса M6/3B, которая произошла 23 сентября в 06:44–10:09 UT. Буря началась 24 сентября в 23:00 UT, при этом на спутнике ACE был зарегистрирован приход межпланетной ударной волны, за которым последовал поворот составляющей B_z межпланетного магнитного поля к югу с максимальным отклонением -27 нТл в 23:33 UT. Результатом этих событий стала МБ с индексами $D_{st\min} \approx -210$ нТл в 10:00, $A_p = 121$, $K_{p\max} = 8+$. Измерения проводились с 13:00 21 сентября до 13:00 25 сентября. Первые три суток относились к спокойным, а 24 и 25 сентября — соответственно к слабо и сильно возмущенным. В последний день наблюдений имела

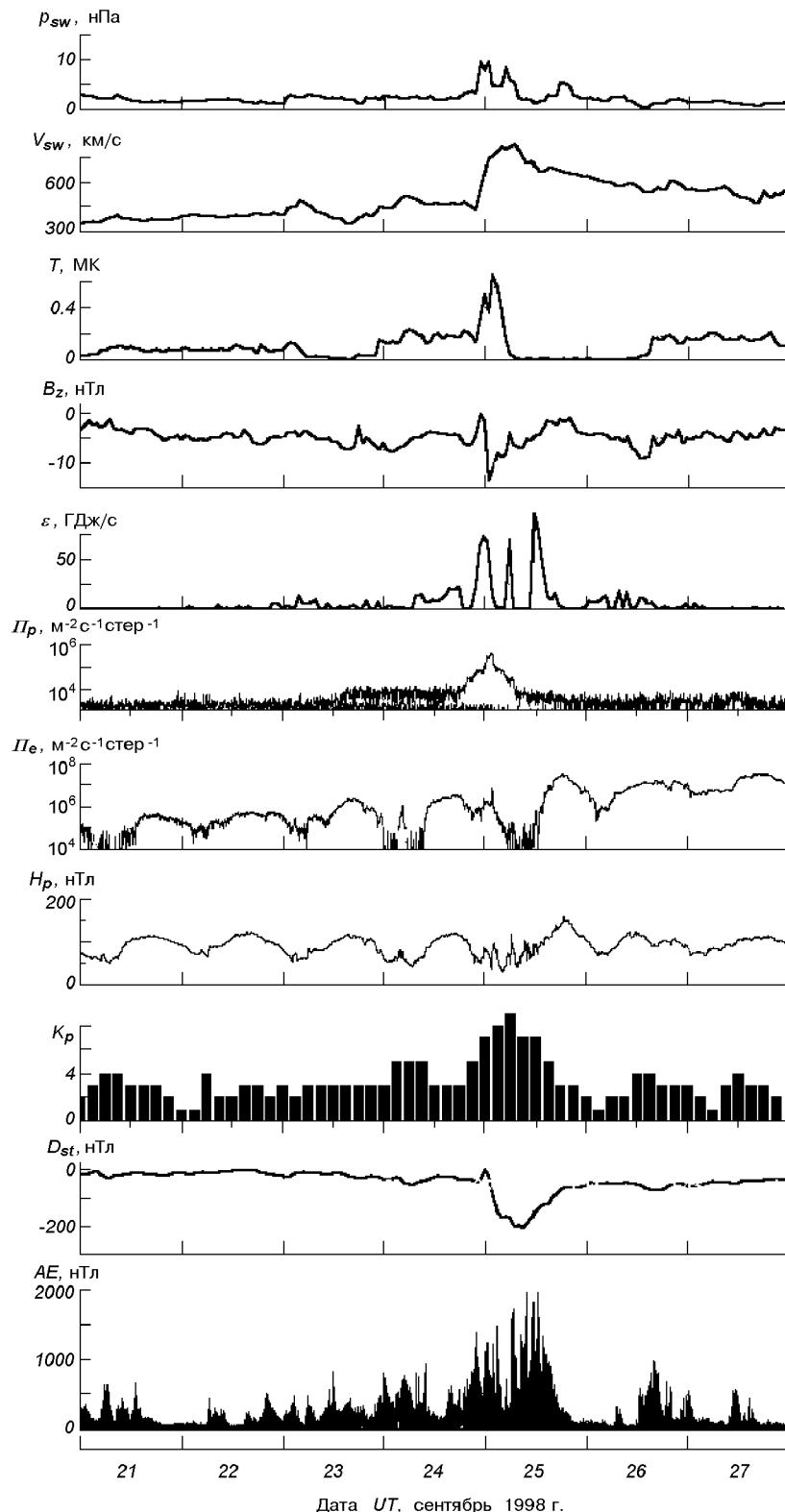


Рис. 1. Параметры солнечного ветра 21—27 сентября 1998 г.: динамическое давление p_{sw} , радиальная скорость V_{sw} , температура T (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -составляющая ММП (ACE Satellite — Magnetometer), рассчитанные значения энергии ε , передаваемой солнечным ветром в магнитосферу Земли в единицу времени, плотность потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-8), H_p -составляющая геомагнитного поля (ИСЗ GOES-8), индексы K_p (USAF 55th Space Weather Squadron), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto)

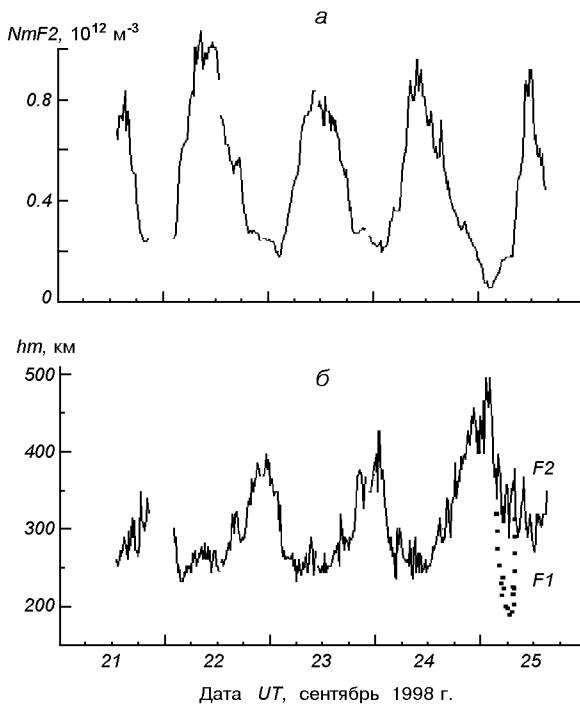


Рис. 2. Временные вариации электронной концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$ (а) и высоты максимума электронной концентрации hm (б) над радаром НР в Харькове 21–25 сентября 1998 г., начиная от полночи 21 сентября (высота hm менее чем 200 км приписывается слою $F1$). $LT \approx UT + 03^h 25^m$

место интенсивная ионосферная буря. Параметры, характеризующие состояние космической погоды, приведены на рис. 1. Результаты исследования этой бури подробно описаны в [4, 5, 10, 11, 20, 21, 28, 29]. Здесь мы остановимся кратко на основных результатах и их интерпретации.

Сильнейшая отрицательная ИБ началась вскоре после местной полуночи 25 сентября и продолжалась по крайней мере до конца измерений. В это время значения $K_p \geq 7$. Буря сопровождалась уменьшением электронной концентрации $NmF2$ в максимуме области $F2$ в 3–3.5 раза во время главной фазы бури по сравнению с контрольным днем, для которого взяты усредненные данные за предшествующие слабо возмущенные сутки 21–23 сентября. Высота максимума $hmF2$ слоя $F2$ увеличилась примерно на 100 км ночью и на 50 км вблизи полудня

(рис. 2). Утром во время главной фазы магнитной бури основной максимум электронной концентрации N_e опустился в область $F1$ (ниже 200 км).

Для исследования особенностей ИБ рассмотрим высотные профили N_e в последовательные моменты времени (через 15 мин) во время главной фазы МБ (рис. 3). В интервале времени 04:30–08:30 UT наблюдалась деформация профилей $N_e(h)$: уменьшение концентрации электронов в максимуме слоя $F2$, увеличение высоты максимума, изменение формы профилей. Такие эффекты могли свидетельствовать о перестройке глобальной термосферной циркуляции и состава термосферы. Перестройка связана с высокоширотным нагревом термосферы во время МБ за счет высыпания энергичных частиц и усиления магнитосферных электрических полей [7, 9]. Последние события нарастают при увеличении инжектируемой в магнитосферу энергии ε солнечного ветра (ε — энергетическая функция Акасофу). Изменения термосферного ветра и нейтрального состава могут передаваться в средние широты также посредством перемещающихся атмосферных возмущений (ПАВ), генерируемых суббурами в авроральных широтах [7, 18, 34–36]. Такие суббури с максимальными значениями индекса $AE = 1000$ – 1500 нТл были зарегистрированы в рассматриваемый период времени. В процессе деформации слоя $F2$ концентрация N_e в слое $F1$ изменялась мало, в результате отношение $NmF2/NmF1$ в течение 06:30–07:30 UT стало меньше единицы. Наступило так называемое условие G , когда на ионограммах слой $F2$ экранировался слоем $F1$ ($f_0F2 \leq f_0F1$). Подобный эффект описан в работах [17, 26].

Развитие глубокой депрессии N_e в области $F2$ ионосферы и разрушение слоя $F2$ (условие G), как показали расчеты по модели MSIS-86 [5], лишь частично могут быть объяснены за счет изменения нейтрального состава. Так, например, на высоте 300 км днем около 07:30 UT отношение концентраций $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ легких и молекулярных компонентов нейтральной атмосферы уменьшилось в 1.4 раза, тогда как N_e уменьшилось в три раза. Отсюда вытекает необходимость привлечения дополнительных факторов для объяснения депрессии N_e .

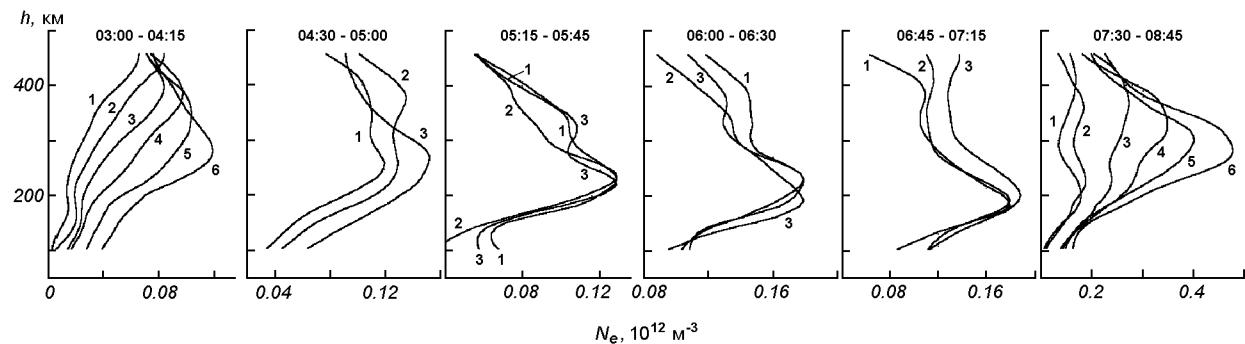


Рис. 3. Высотные профили электронной концентрации N_e в возмущенные сутки 25 сентября 1998 г. в последовательные моменты времени UT

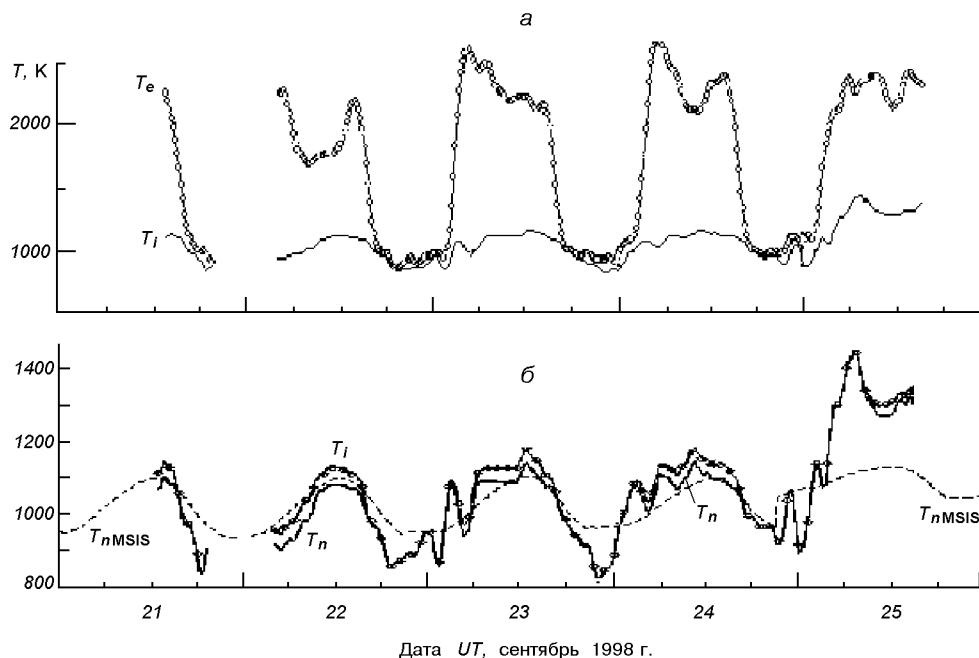


Рис. 4. Измеренные температуры электронов T_e , ионов T_i (а), а также рассчитанные температуры нейтралов T_n из данных радара HP и T_{nMSIS} из модели MSIS-86 на высоте 300 км (б)

Среди них корректировка состава термосферы, определяемого из модели MSIS-86, применительно к условиям магнитных возмущений и учет возможного вклада в увеличение скорости потерь ионов O^+ таких факторов, как нагрев атмосферы, усиление электрических полей, возбуждение колебательных уровней молекул N_2 (ν) и O_2 (ν) [17, 26, 27, 30—32, 36, 39].

Как известно, характер магнитных бурь определяется сложным взаимодействием комплекса процессов в геокосмосе. Поэтому следует ожи-

дать, что наблюдаемые особенности поведения возмущенной ионосферы являются результатом наложения эффектов от различных источников возмущения, вклад которых в процессе развития бури изменяется. Одним из таких источников, наряду с перечисленными выше, могло быть смещение главного ионосферного провала (ГИП) к экватору за счет усиления электрического поля магнитосферной конвекции во время главной фазы магнитной бури. Смещение ГИП подтверждает анализ карт глобального распреде-

ления полного электронного содержания (TEC) по данным навигационной системы GPS [2]. Из них следует, что 25 сентября в течение главной фазы бури низкоширотная стенка провала в европейском регионе достигала географической широты $\varphi = 40\text{--}50^\circ$, и радар в Харькове оказывался внутри провала (в ночном и утреннем секторах).

Временные вариации температур электронов T_e и ионов T_i показаны на рис. 4. В спокойных условиях температура электронов T_e в средних широтах определяется балансом между нагревом фотоэлектронами, теплопроводностью вдоль магнитных силовых линий, и охлаждением в процессе столкновений с ионами и нейтралами. После начала магнитной бури было зарегистрировано увеличение температуры T_e по сравнению со спокойным днем 23 сентября, которое нарастало с высотой и составило $\Delta T_e \approx 700$ К около 02:00 UT на высоте 500 км [5]. Увеличение T_e могло быть связано с джоулевым нагревом за счет проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты (см. далее) и высыпания энергичных частиц, а также с уменьшением скорости охлаждения при очень низкой электронной концентрации в утренние часы [17]. Смещение к экватору зоны высыпаний косвенно подтверждается максимальными значениями индекса POES Auroral Activity Level, равными 10, которые были зарегистрированы 25 сентября на спутниках NOAA POES-12, POES-14 и POES-15 в течение 00:15–12:55 UT [http://www.sec.noaa.gov/ftpdir/lists/hpi/power_1998.txt]. Статистическая картина, изображающая авроральный овал, присваивается индексу Activity Level, который определяется из мощности потока заряженных частиц, зарегистрированного во время прохождения полярного спутника. Значение 10 этого параметра могло свидетельствовать о смещении экваториальной границы овала до геомагнитных широт $\Phi \approx 45\text{--}51^\circ$ [<http://www.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>]. Таким образом, харьковский радар ($\Phi = 45.7^\circ$), который во время бури находился вблизи местной полуночи, мог оказаться внутри ГИП и даже внутри аврорального овала.

Особенностью поведения T_e явилось ее уменьшение после восхода Солнца (для радара в Харькове время восхода примерно 03:25 UT на поверхности Земли), которое составило пример-

но $\Delta T_e \approx 500$ К около 06:00 UT на высоте 250 км и уменьшалось с ростом высоты. Оно могло быть вызвано несколькими факторами, в том числе уменьшением потока высыпающихся энергичных частиц (см. рис. 1), увеличением скорости охлаждения электронного газа за счет начавшегося утреннего увеличения N_e (см. рис. 2) и др.

Во время бури увеличение температуры ионов T_i (примерно на 300 К около 06:00 UT на высоте 300 км по сравнению со спокойным днем 23 сентября) вплоть до конца измерений (см. рис. 4) могло быть связано с джоулевым и фрикционным нагревом за счет усиления ионосферных токов [17, 36].

Увеличение температуры нейтрального газа T_n , рассчитанной из данных НР путем решения уравнения теплового баланса [37, 38] с привлечением термосферной модели MSIS-86 [25], составило на высоте 300 км во время МБ в среднем 200 К [5]. Нагрев нейтралов может быть связан как с нелокальным источником тепла, переносимого из области высокоширотного нагрева термосферы [6, 9, 26], так и с локальным нагревом за счет проникновения магнитосферных электрических полей и высыпания энергичных частиц [26]. По-видимому, оба эффекта могли иметь место в ионосфере над Харьковом во время главной фазы бури. При этом [5] нелокальный нагрев имел преобладающее значение, поскольку возмущения T_n распространялись сверху вниз со скоростью около 50 м/с (запаздывание в интервале высот 400–250 км составляло примерно 50 мин), что могло соответствовать вертикальной составляющей скорости ВГВ, связанных с ПАВ. Некоторый вклад в увеличение T_n мог вносить также фрикционный нагрев при дрейфе ионов через нейтральный газ во время усиления электрического поля над радаром [17]. Следует отметить также, что модель MSIS-86 для магнитовозмущенных условий дает заниженные значения T_n (примерно на 320 К на высоте 300 км) по сравнению с расчетными величинами и требует их корректировки. Такое несоответствие (относительно модели MSIS-86) отмечалось и ранее [17, 27, 36].

Рассмотренные выше механизмы ионосферного возмущения можно привлечь для объяснения наблюдавшегося обращения скорости переноса плазмы и потока плазмы в течение главной

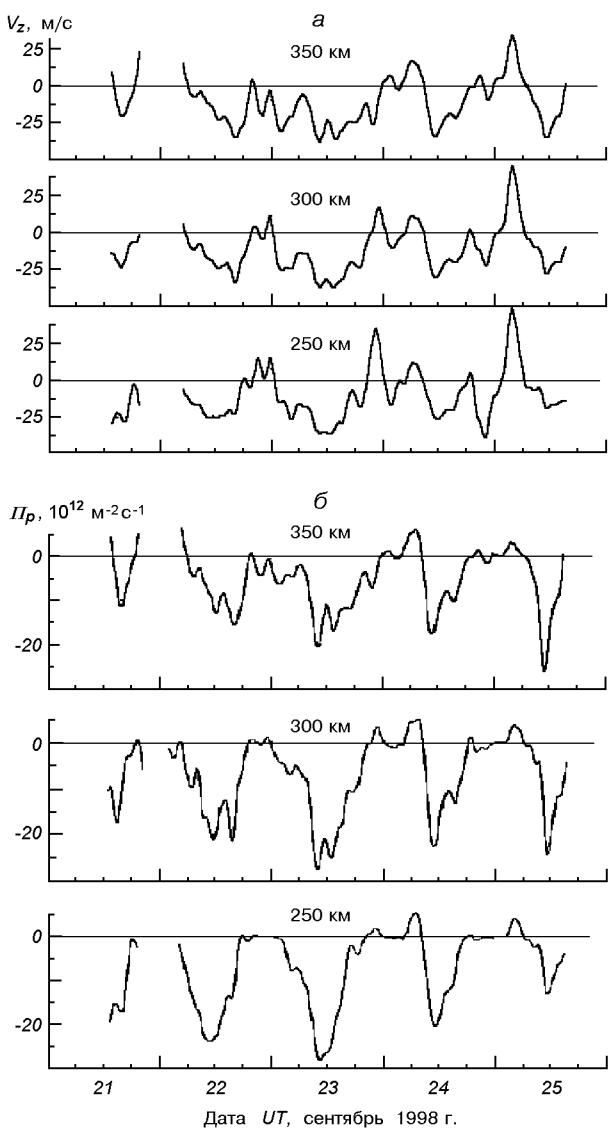


Рис. 5. Временные вариации измеренной вертикальной скорости V_z переноса плазмы (а) и рассчитанной плотности Π_p потока плазмы (б) на высотах 250—350 км 21—25 сентября 1998 г.

фазы МБ (рис. 5). В возмущенный день в утренние часы на высотах 200—500 км [5] скорость V_z составляла от 50 до 25 м/с, плотность потока плазмы $\Pi_p \approx (4...2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ соответственно, тогда как в спокойный день 23 сентября на тех же высотах $V_z \approx -(25...15)$ м/с, $\Pi_p \approx -(8...3) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

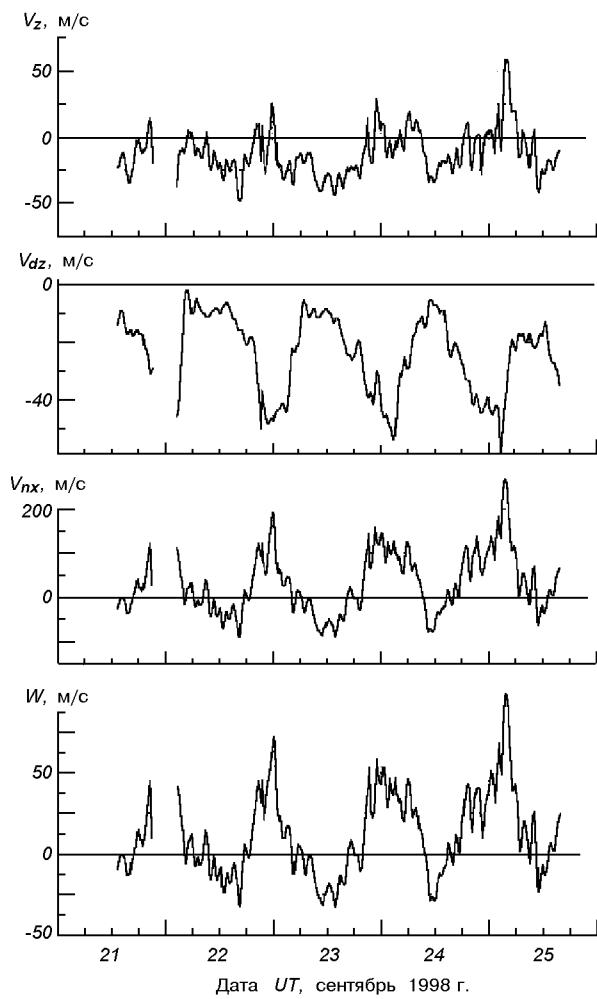


Рис. 6. Измеренная вертикальная скорость плазмы V_z (данные радара) и рассчитанная вертикальная составляющая скорости V_{dz} за счет диффузии, меридиональная составляющая V_{nx} нейтрального ветра (в пренебрежении электрическими полями) и скорость W на высоте 300 км

Из радарных измерений скорости V_z и расчета скорости V_{dz} диффузии ионов O^+ [5] в возмущенный день 25 сентября была обнаружена необычная для дневного времени положительная волна скорости $W = V_{nx} + V_{i\perp z}$, включающей эффекты ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа (рис. 6). Здесь V_{nx} — меридиональная составляющая скорости нейтрального ветра, положительная в северном полушарии в направлении на географический юг, $V_{i\perp z}$ — вертикальная составляющая скорости электромагнитного

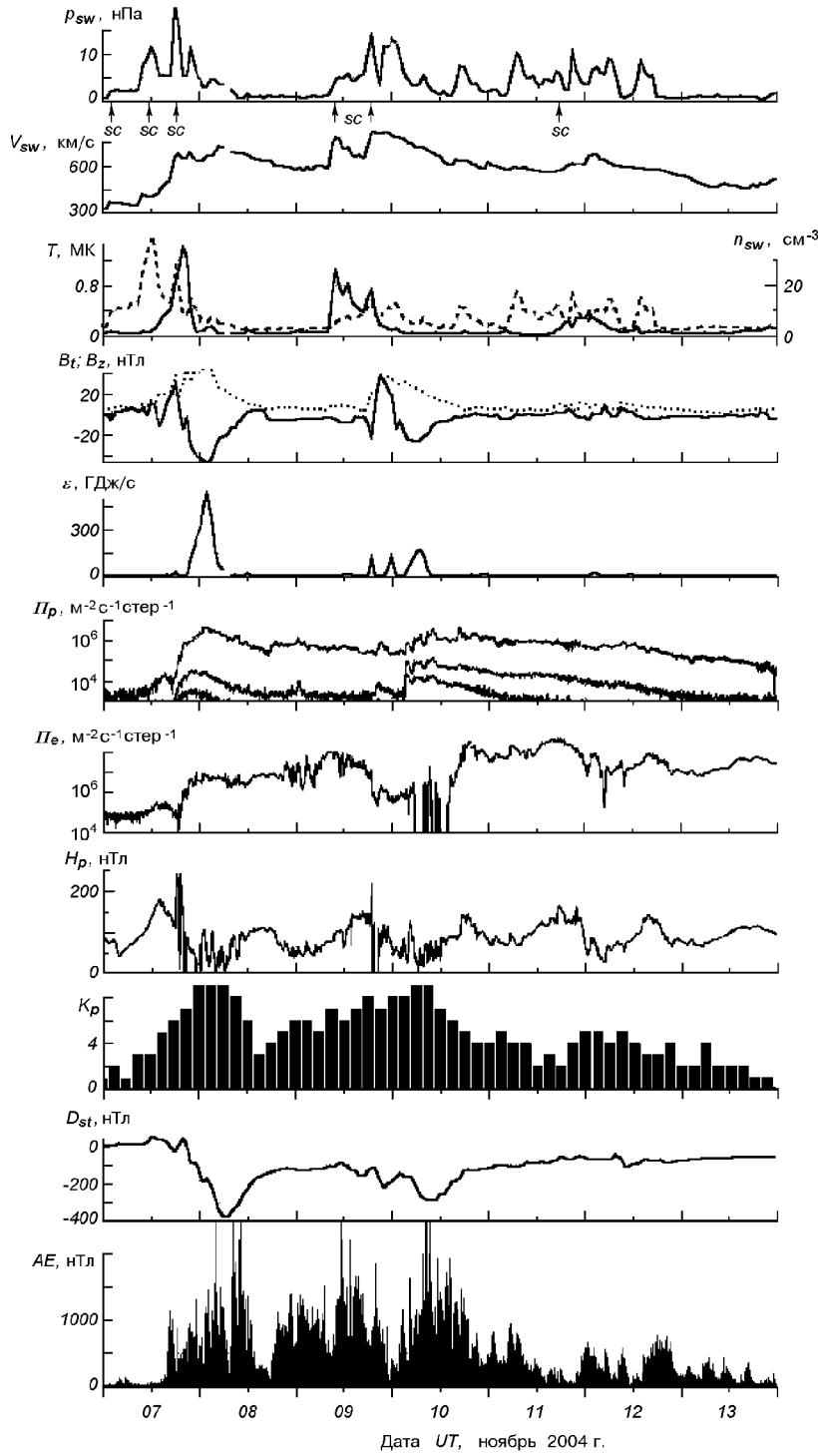


Рис. 7. Параметры солнечного ветра 7—13 ноября 2004 г.: динамического давления P_{sw} , радиальной скорости V_{sw} , температуры T и концентрации n_{sw} (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), модуля B_t (точки) и B_z -компоненты (линия) ММП (ACE Satellite — Magnetometer), рассчитанных значений энергии ε , передаваемой солнечным ветром в магнитосферу Земли в единицу времени, плотности потоков протонов Π_p с энергией более 10, 50 и 100 МэВ (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов Π_e с энергией более 2 МэВ (ИСЗ GOES-12), H_p -компоненты геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), индексов K_p (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto). Стрелками на горизонтальной оси отмечены моменты начала суббурь (SC)

дрейфа. Видно, что в утренние часы (около 04:00 UT) в возмущенный день 25 сентября $W = 100$ м/с на высоте 300 км, тогда как в спокойный день 23 сентября $W \approx 0$. Одной из причин такого возмущения W и V_z могла быть волна нейтрального ветра V_{nx} к экватору, связанная с высокоширотным нагревом и с ПАВ [17–19, 33–36]. Если пренебречь электрическими полями, что справедливо для слабовозмущенных условий (как в случае 21–23 сентября, когда $K_p \leq 4$), то меридиональная составляющая V_{nx} должна была иметь значение 270 м/с. Другой причиной могло быть проникновение в средние широты нестационарного магнитосферного электрического поля [3, 19, 22–24] с зональной составляющей $E_y = 12–17$ мВ/м (об определении E_y из радарных измерений $hmF2$ см. ниже), которое также могло обеспечить $W \approx V_{\perp z} \approx 100$ м/с. Этот случай является предельным. Он не учитывает эффекты нейтрального ветра и оценивает E_y и $V_{\perp z}$ сверху. По-видимому, оба фактора внесли свой вклад в увеличение W и V_z . В пользу эффектов импульса электрического поля в ионосфере над Харьковом свидетельствовала высокая суббуровая активность (в авроральной области индекс AE достигал значений 800–1200 нТл в интервале времени 03:00 UT – 03:40 UT), а также распространение возмущения V_z снизу вверх со скоростью около 100 м/с (запаздывание возмущения V_z в интервале высот 250–500 км составило около 40 мин [5]). Возмущение V_z могло быть вызвано локальным джоулевым нагревом атмосферы на высотах динамо-области (100–110 км), связанным с возмущением электрического поля в ионосфере средних широт, и движением газа вверх (аналогично высокоширотному источнику нагрева [27]).

Эффекты проникновения электрических полей могут быть одной из причин (наряду с усилением меридиональных ветров к экватору за счет высокоширотного нагрева термосферы и со смещением ГИП в средние широты) продолжительного увеличения высоты максимума $hmF2$ примерно на 100 км ночью и на 50 км вблизи полуночи по сравнению со спокойным днем 23 сентября (рис. 2, б). Однако эти эффекты, в отличие от рассмотренных выше, не связаны с нестационарностью магнитосферных

электрических полей. Они определяются длительным высыпанием энергичных частиц, зарегистрированным в течение бури (см. рис. 1). Высыпания частиц ведут к повышению проводимости нижележащей авроральной ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации, и способствуют проникновению магнитосферных электрических полей в средние широты [3, 24]. Оценки E_y были получены из отклонений $hmF2$ во время магнитных возмущений в соответствии с эмпирической зависимостью, приведенной в работе [3]. Они показали, что такие поля в ионосфере над Харьковом должны были быть направлены на восток, иметь значения $E_y \approx 17$ и 12 мВ/м ночью и днем соответственно и способствовать наблюдаемому подъему слоя $F2$. Эти эффекты можно трактовать как проявления электрической бури на ионосферных высотах.

Крайне сильная магнитная буря 7–10 ноября 2004 г. Наблюдения бури проводились 8–13 ноября в соответствии с международной программой LTCS-C/NOFS (Lower Thermosphere Coupling Study-Communications/Navigation Outage Forecasting System). В этот период были зарегистрированы два сильнейших магнитных возмущения 7–8 и 9–10 ноября. Они были вызваны высокой солнечной активностью, источником которой была активная область 696 на Солнце. Она произвела серию вспышек различного характера и интенсивности, в том числе очень интенсивные вспышки класса X2.0 7 ноября и класса X2.5 10 ноября. Последняя явилась самым значительным событием за время жизни активной области 696. Геоэффективность вспышек в рассматриваемом интервале времени была высокой. Вспышки сопровождались выбросами корональной массы (СМЕ) типа полного или частичного гало различной сложности и конфигурации, магнитных облаков, интенсивными всплесками радиоизлучения, высокоскоростными потоками плазмы, вытекающими из корональных дыр, изменениями динамического давления солнечного ветра (СВ), деформацией переносимого им межпланетного магнитного поля (ММП). Параметры, описывающие состояние космической погоды, приведены на рис. 7. Видно, что на спутнике ACE зарегистрирован приход шести межпланетных ударных волн, образованных СМЕ. Они привели к сильнейшей пер-

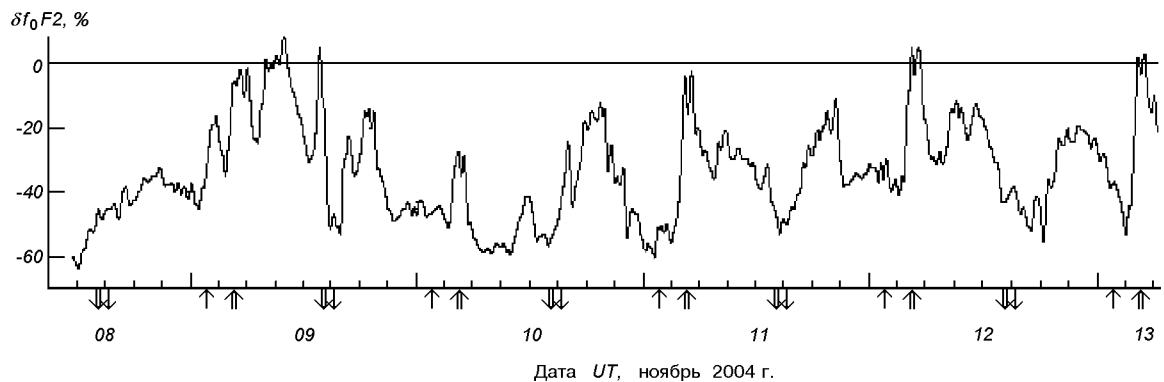


Рис. 8. Отклонения $\delta f_0 F_2$ критической частоты 8—13 ноября 2004 г. от данных в контрольный день (28—30 октября 2004 г.) по измерениям ионозонда в Харькове. Стрелки на горизонтальной оси здесь и далее обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца в Харькове (двойные) и в магнитосопряженной точке (одинарные) на поверхности Земли. Магнитосопряженная точка для Харькова расположена вблизи острова Мадагаскар

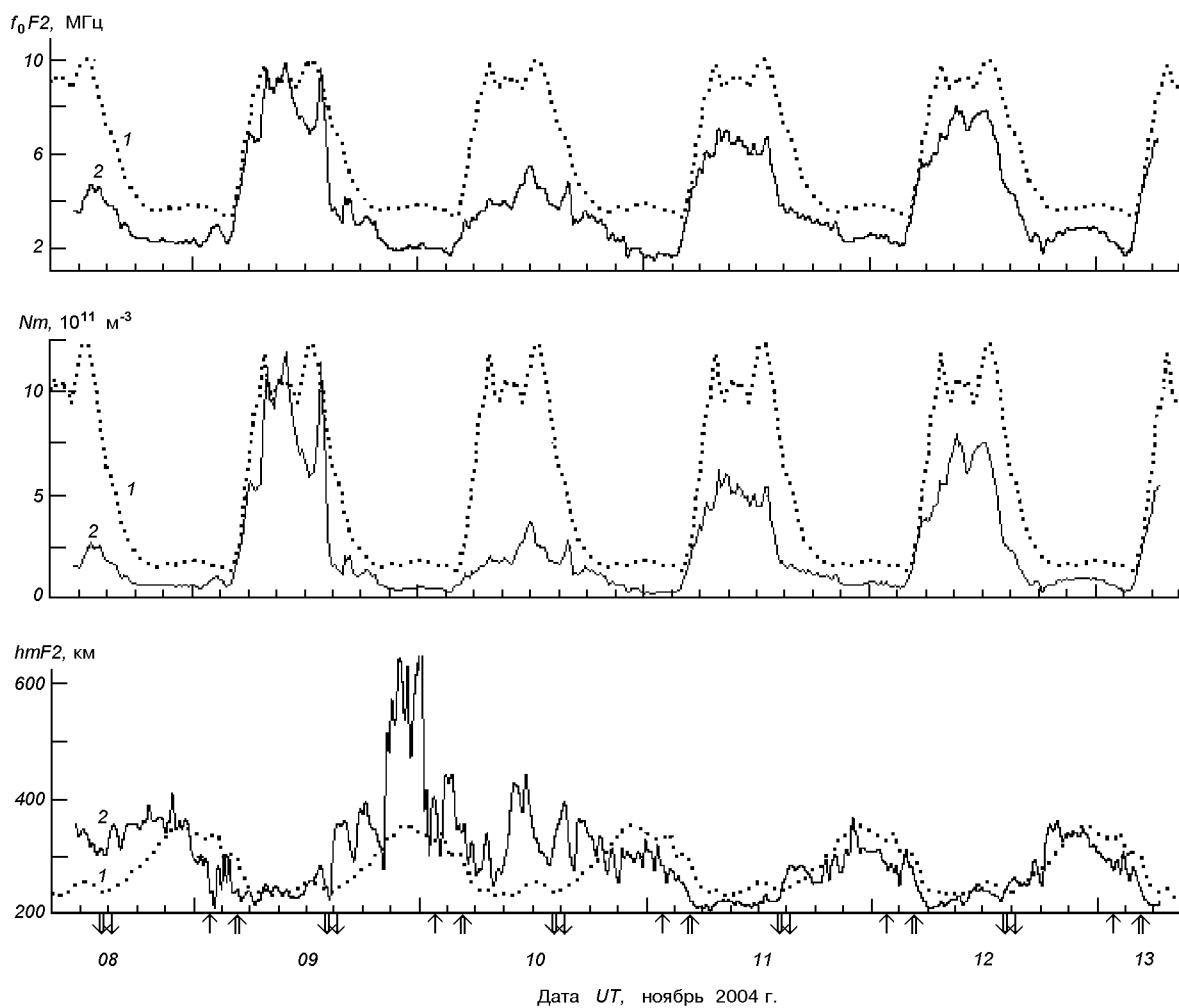


Рис. 9. Временные вариации критической частоты $f_0 F_2$ по измерению ионозонда в Харькове, электронной концентрации NmF_2 в максимуме слоя F_2 и высоты максимума hmF_2 по данным харьковского радара в контрольный магнитоспокойный день (1) и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (2)

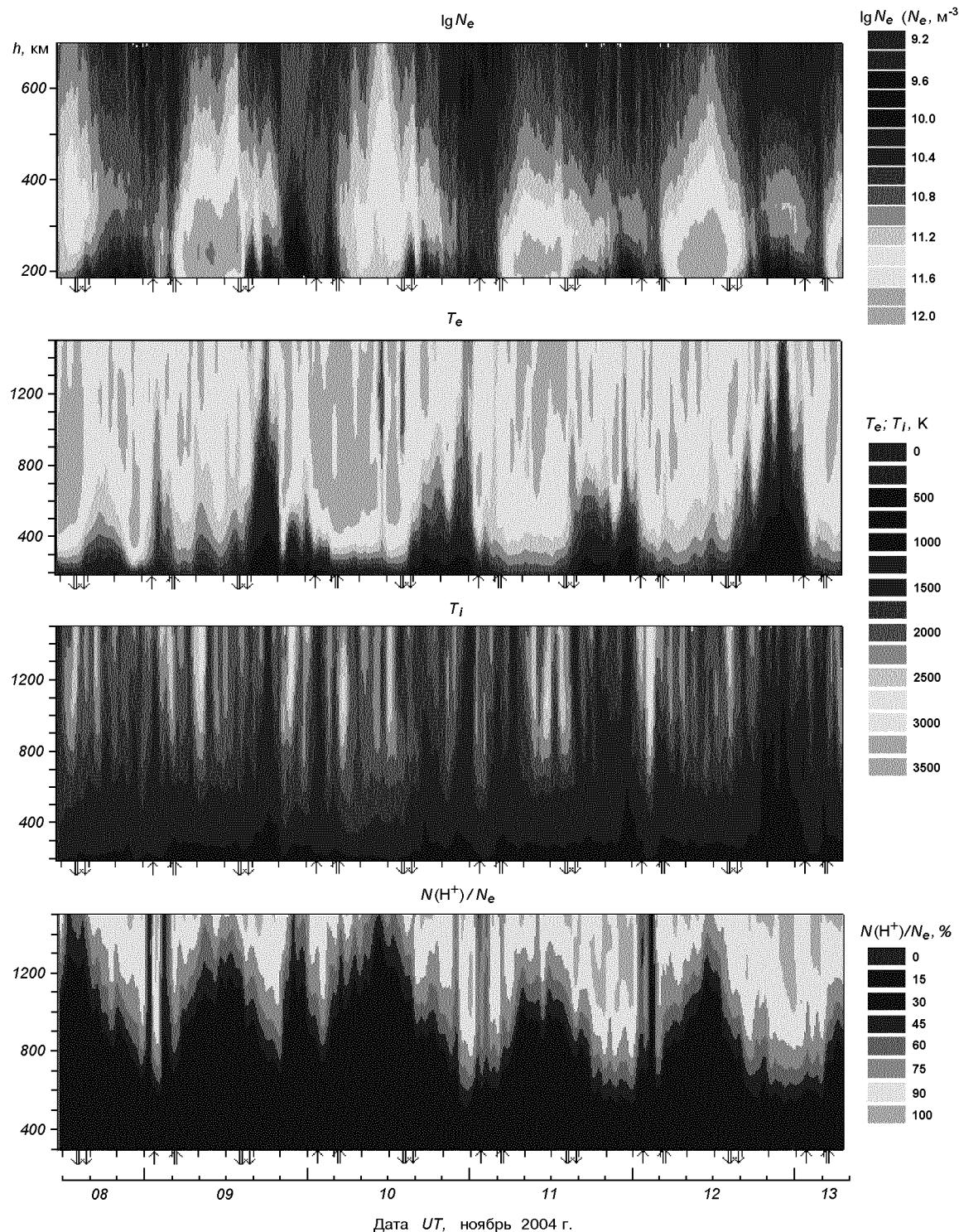


Рис. 10. Высотно-временные вариации параметров ионосферы: электронной концентрации N_e , температур электронов T_e и ионов T_i , относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ 8—13 ноября 2004 г.

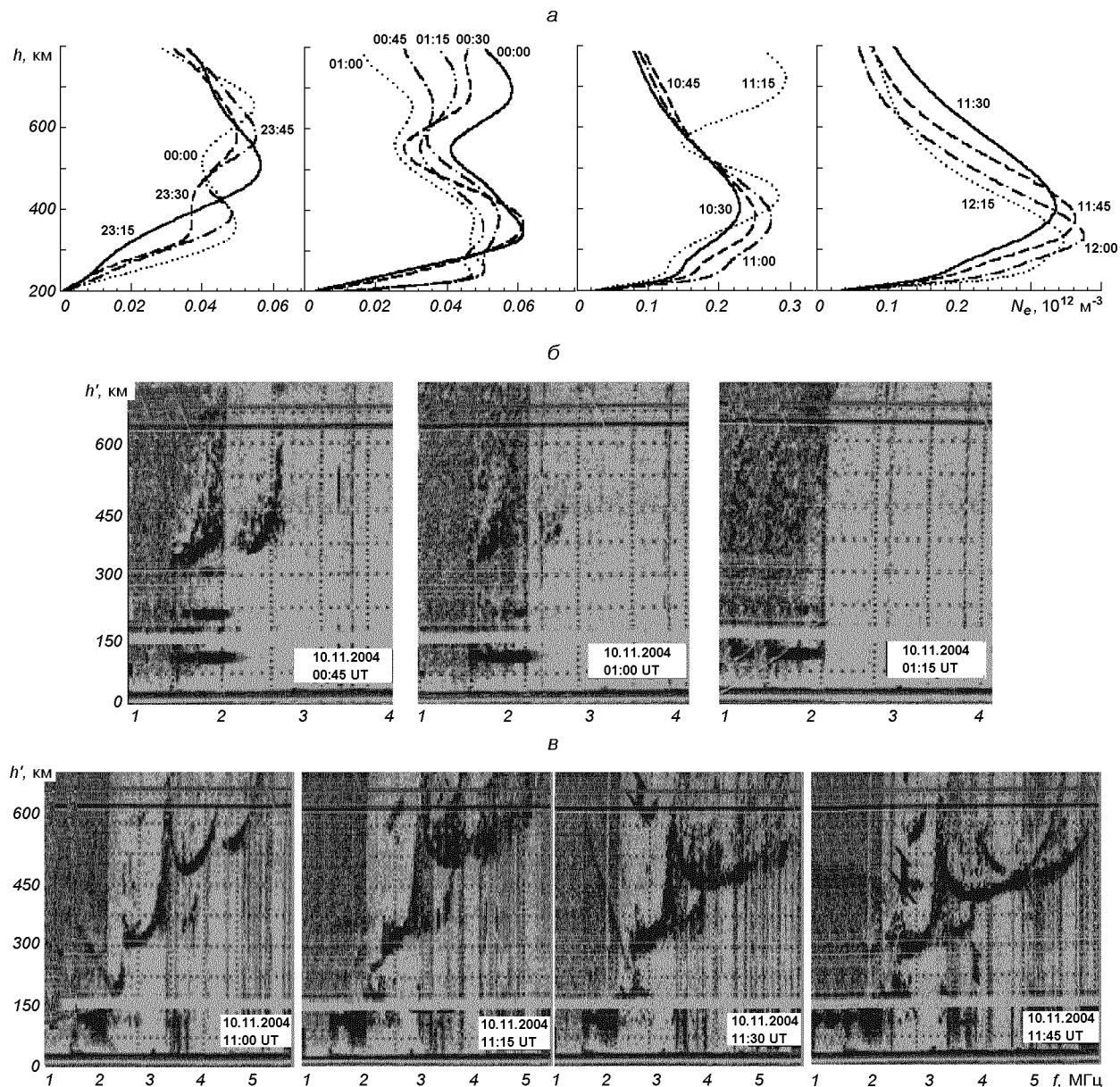


Рис. 11. Профили $N_e(h)$ (*a*) и данные ионозонда (*б*, *в*), полученные 9/10 ноября 2004 г. во время работы радара НР в Харькове в течение главной фазы второй магнитной бури (при $K_p = 8+$)

вой магнитной буре 7—8 ноября с минимальным значением индекса $D_{st} = -373$ нТл, зарегистрированным 8 ноября в 07:00 UT, значением $B_z = -45$ нТл 8 ноября в 02:00 UT и максимальным значением индекса $K_p = 9-$. Фаза восстановления первой бури началась 8 ноября после 07:00

UT (см. вариации D_{st} на рис. 7). На ее плавное течение наложилось начало следующей бури 9-10 ноября. Главная фаза второй бури протекала на фоне значительных флуктуаций параметров солнечного ветра, индекса D_{st} , величина которого достигла минимума -289 нТл 10 ноября

ря в 10:00—11:00 UT, при максимальном значении $K_p = 9-$. Активный период бури был продолжительным, значения индекса $K_p \geq 6$ наблюдались с 12:00 UT 9 ноября до 18:00 UT 10 ноября. Фаза восстановления продолжалась по крайней мере до конца измерений. Столь активная и сложная обстановка на Солнце относится к довольно редким явлениям в условиях перехода к низкой солнечной активности.

Ионосферная буря, которая сопровождала рассматриваемую магнитную бурю, была отрицательной, при этом интенсивность ее значительно изменялась (рис. 8, 9). Рис. 10 иллюстрирует поведение основных параметров ионосферы во время бури в диапазоне высот 200—1500 км. Наибольшее уменьшение $NmF2$ по сравнению с контрольным днем (28—30 октября 2004 г.) составило семь раз вблизи полудня 8 ноября, сразу после главной фазы первой бури при $K_p = 7.0$, шесть раз — в дневные часы 10 ноября на фоне главной фазы второй МБ при $K_p = 8+...9-$. Уменьшение $NmF2$ до 6 раз отмечалось также в ночь 10-11 ноября во время фазы восстановления второй бури при значениях $K_p = 5+...4.0$. Одной из причин уменьшения электронной концентрации в $F2$ -слое, наряду с рассмотренными выше перестройкой нейтрального состава с увеличением концентраций N_2 и O_2 , связанной с высокоширотным нагревом термосферы, с вкладом в увеличение скорости потерь ионов O^+ колебательно-возбужденных молекул $N_2(v)$ и $O_2(v)$ и т. д., могла быть деформация магнитосферы, сопровождаемая, по-видимому, смещением в средние широты ГИП. О последнем косвенно могут свидетельствовать максимальные значения индекса авроральной активности (Hemisphere Power Index), равные 10, которые регистрировались на спутнике NOAA POES с 18:30 UT 7 ноября до 12:49 UT 8 ноября почти непрерывно, а также с 10:44 UT 9 ноября до 17:30 UT 10 ноября с кратковременными эпизодическими уменьшениями этого индекса до значений 9 и еще реже 8 [<http://solar.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>]. Значение этого параметра, характеризующего мощность энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу аврорального овала, свидетельствовало о возможном смещении экваториальной границы овала до геомагнитных широт $\Phi \approx 45...51^\circ$. В таком случае овал мог приблизиться к расположению харьковского

радара (геомагнитная широта $\Phi = 45.7^\circ$), и радар мог оказаться внутри главного ионосферного провала или даже внутри аврорального овала в ночном секторе.

Смещение крупномасштабных образований высокоширотной ионосферы на широту радара в Харькове во время МБ подтверждает сопоставление профилей электронной концентрации, полученных из данных НР, с ионограммами вертикального зондирования, зарегистрированными там же. На рис. 11 приведены некоторые примеры таких сопоставлений. Они свидетельствуют о том, что во время МБ ионосфера средних широт приобретала свойства, характерные для высокоширотной ионосферы. К числу таких свойств относится, например, увеличение диффузности отраженного сигнала. Оно могло быть связано с рассеянием сигнала на мелкомасштабных ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях, генерируемых вблизи экваториальной границы аврорального овала во время сильной бури и имеющих большой пространственный масштаб (сотни и тысячи километров) [1, 12]. Такие рассеяния, типичные дляочных высокоширотных ионограмм, были зарегистрированы с помощью ионозонда над Харьковом ночью 10 ноября во время бури, когда одновременно наблюдалась сильнейшая деформация профилей $N_e(h)$ (рис. 11, а в 01:00 UT и 01:15 UT).

Редким для средних широт эффектом явились зарегистрированные в период главной фазы второй бури (ночью 9 ноября и в первой половине суток 10 ноября) наклонные когерентные отражения. По-видимому, эти эхо-сигналы принимались с северного направления боковыми лепестками диаграммы направленности антенны, которые под достаточно малыми углами ($5-10^\circ$) просвечивали область ионосферы. Известно, что отражение происходит на дальностях, где выполняются условия ракурсного рассеяния, и могут быть обусловлены рассеянием на неоднородностях электронной концентрации E -области, генерируемых двухпотоковой неустойчивостью ионосферной плазмы [1, 8]. Особый интерес представляют такие отражения, наблюдавшиеся вблизи полудня 10 ноября с 11:02 до 11:14 UT (рис. 11, б). В это время профили $N_e(h)$ (полученные с усреднением 1 мин) имели два дополнительных максимума (отражения) на высотах

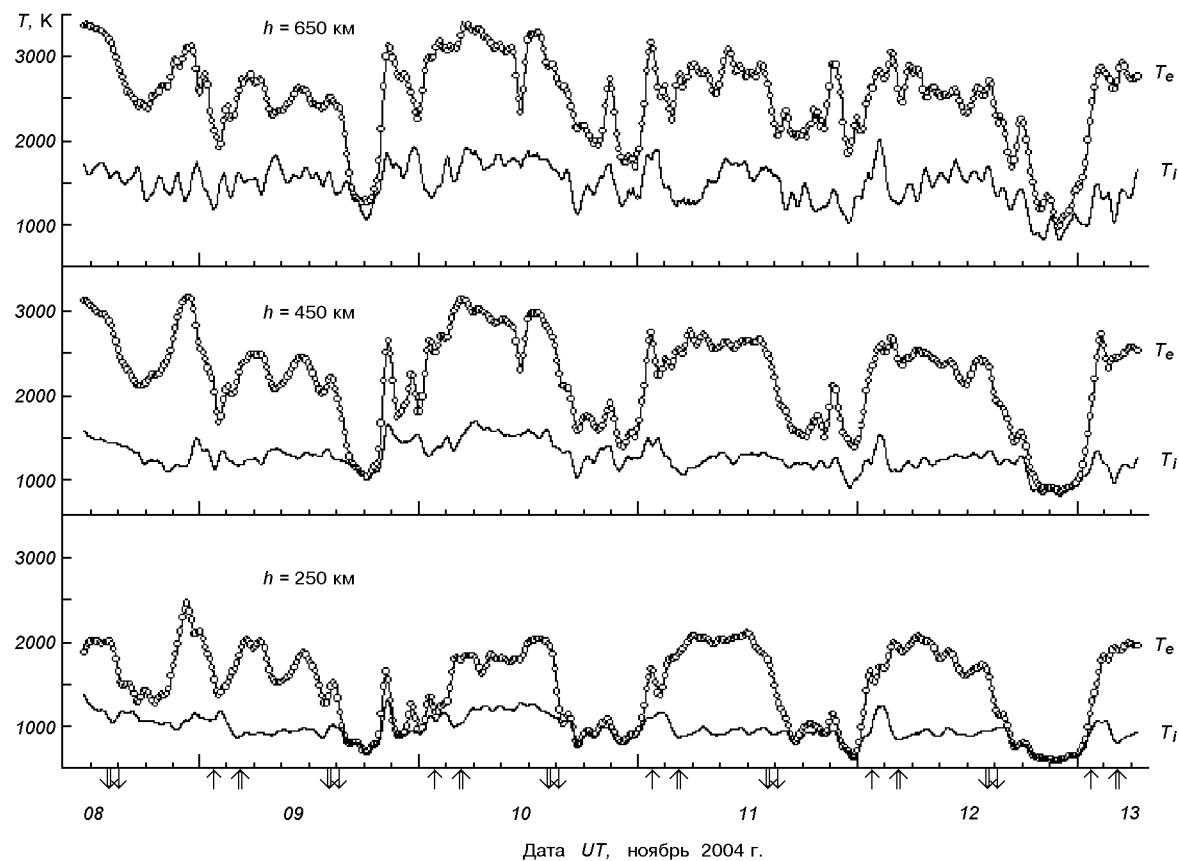


Рис. 12. Временные вариации температур ионов T_i и электронов T_e на фиксированных высотах 8—13 ноября 2004 г.

около 700 и 1100 км, соизмеримых с основным максимумом. Отражения возникли внезапно, наблюдались около 15 мин и так же внезапно исчезли. Одновременно на ионограмме ВЗ над Харьковом наблюдался диффузный след, который был виден также примерно 15 мин. Такие эффекты могли косвенно свидетельствовать о том, что в 11:15 UT произошло кратковременное (около 15 мин) смещение экваториальной границы аврорального овала на широту, достаточно близкую к Харькову. При этом рассеяние радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях в ионосфере над Харьковом дало диффузный след на ионограмме ВЗ. Область турбулизации плазмы, вероятно, простиралась к северу от радара, по крайней мере на расстояние 700—1100 км,

где выполнялись условия для обратного рассеяния радиоволн на неоднородностях E -области. Быстрый характер процесса мог быть связан с изрезанностью и/или быстрой изменчивостью авроральной зоны за счет нестационарности магнитосферной конвекции. Важно отметить, что столь редкое дневное событие наблюдалось, когда индекс D_{st} , характеризующий интенсивность магнитосферного кольцевого тока, имел экстремальное значение -289 нТл.

Во время магнитных возмущений ночью 8/9 и 9/10 ноября наблюдался необычный нагрев плазмы до дневных значений температур $T_i = 1300\ldots2000$ К и $T_e = 1600\ldots3000$ К на высотах 250—650 км (рис. 12). Нагрев, по-видимому, был вызван смещением горячей зоны плазмос-

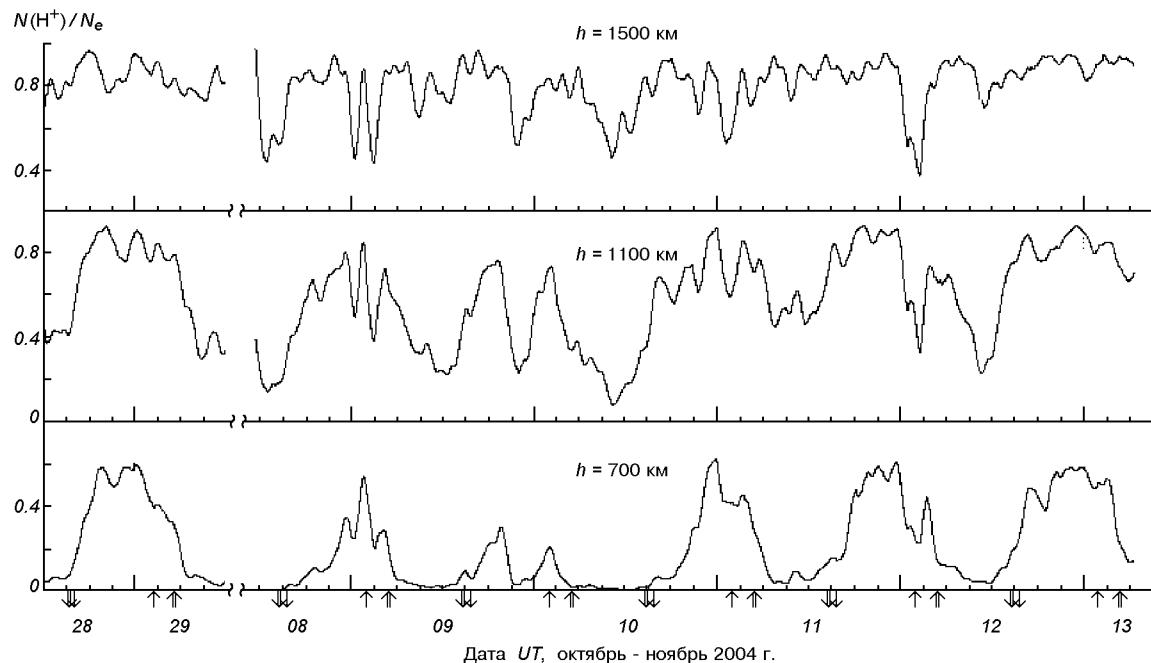


Рис. 13. Временные вариации относительной концентрации ионов водорода $N(\text{H}^+)/N_e$ на фиксированных высотах в контрольные сутки 28—29 октября 2004 г. и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г.

феры вместе с плазмопаузой на меньшие L -оболочки. Не исключена также возможность дополнительного локального нагрева плазмы, связанного с проникновением в средние широты магнитосферных электрических полей и смещением зоны высыпаний энергичных частиц, сопровождаемыми джоулевой диссипацией их энергии.

Зарегистрировано увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя $F2$, которое составило 50—80 км днем 8 ноября после главной фазы первой бури, достигло 300 км ночью 9-10 ноября во время главной фазы второй бури и 150—180 км в полдень 10 ноября (см. рис. 9 и 10). В качестве одной из причин подъема слоя $F2$, наряду с эффектами расширения термосферы, усиления меридиональной скорости термосферного ветра и смещения к экватору ГИП, могли стать эффекты проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (в течение нескольких суток) высыпания энергичных частиц [3, 24]. Оценка сверху зональной составляющей электрического поля E_y в ионосфере над Харьковом по величине

изменения $hmF2$ дала максимальные значения поля $E_y \approx 35...45$ мВ/м днем 10 ноября и 50 мВ/м ночью 9/10 ноября.

Во время бури ночью 8/9 и 9/10 ноября наблюдались уменьшения («провалы») значений относительной концентрации ионов водорода $N(\text{H}^+)/N_e$ на фиксированных высотах, которые составляли 1.5—3.5 раза (рис. 13). Они свидетельствовали об опустошении магнитной силовой трубы, проходящей над Харьковом, за счет деформации магнитосферы и смещения в средние широты ГИП и провала легких ионов. Нестационарность магнитосферной конвекции и неравномерность высыпания заряженных частиц делали картину распределения плазмы в субавроральной ионосфере (в том числе в ионосфере над Харьковом во время активного периода бури) нерегулярной и изменчивой.

Магнитная буря сопровождалась также сильнейшими возмущениями термосферы. Расчеты, выполненные по данным радара НР с привлечением термосферной модели MSIS-86, показали, что при высокой геомагнитной активности ($K_p =$

= 9-) температура нейтрального газа T_n вблизи полудня увеличилась на высоте 300 км более чем на 300 К. Вочные часы 8, 9 и 10 ноября, когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e , температура T_n , отслеживая поведение T_i , испытывала аналогичные увеличения (всплески) до значений дневных температур 1250, 1380 и 1280 К на высоте 300 км. В спокойные сутки ночные значения T_n не превышали 700 К. Нагрев термосферы привел к ее расширению и увеличению высоты термопаузы не менее чем до 400 км.

Рассматриваемой магнитной буре сопутствовали изменения теплового режима плазмы. Как показали расчеты, вблизи местного полудня на высоте 300 км подвод энергии Q/N_e к электронному газу в возмущенный день 10 ноября 2004 г. уменьшился в 1.3—1.5 раза по сравнению со спокойным днем, а плотность потока тепла Π_T , переносимого электронами из протоносферы в ионосферу, увеличилась в среднем в три раза. Особенностью теплового режима ионосферы стало увеличение Q/N_e и плотности потока Π_T в ночное время в возмущенные сутки 8—13 ноября 2004 г., тогда как в спокойных условиях ночью их значения близки к нулю. Это свидетельствовало о существенном изменении процессов, контролирующих тепловой баланс в системе ионосфера — плазмосфера, во время бури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные крайне сильные магнитные бури 25 сентября 1998 г. и 7—10 ноября 2004 г. ($K_{p\max} = 8+$ и 9-) сопровождались интенсивными ионосферными, атмосферными и электрическими бурами. Ионосферные бури были отрицательными. Первая магнитная буря началась около полуночи, вторая — в дневное время. Важно то, что активный период главной фазы бурь развивался в ночном либо утреннем секторе (для Харькова). Бури сопровождались деформацией магнитосферы, которая вызывала редкие для средних широт явления. Они связаны со смещением высокоширотных структур (ГИП, провала легких ионов, горячей зоны) на геомагнитные оболочки L , лежащие глубоко во внутренней плазмосфере (для Харькова параметр

Мак-Илвейна $L \approx 1.9$), а также авроральной зоны на широту, близкую к широте харьковского радара. Эти процессы привели к значительным изменениям структуры, динамики и теплового режима ионосферы и термосферы.

Вместе с тем ионосферные бури имели различия. Одно из них — их разная интенсивность, которая, аналогично магнитным бурам, коррелирует с энергией солнечного ветра, инжектируемой в магнитосферу за единицу времени (т. е. функцией Акасоуфы). Значение этой энергии 7—10 ноября 2004 г. было в 2—5 раз больше, чем 25 сентября 1998 г. Этим, вероятно, можно объяснить уменьшение электронной концентрации $NmF2$ в семь раз во время магнитной бури 7—10 ноября 2003 г. и в 3.5 раза — 25 сентября 1998 г., а также продолжительный ночной нагрев плазмы до дневных значений температур (2000—3000 К) во время первой бури и всего на несколько сотен кельвинов в течение нескольких часов во время второй бури. Эти и другие эффекты бурь, включая особенности ионограмм вертикального зондирования (диффузный след) и наклонные когерентные отражения, свидетельствовали, что смещение структур высокоширотной ионосферы (аврорального электроджета, аврорального овала, ГИП, горячей зоны и др.) во время магнитной бури 7—10 ноября 2004 г. происходило, по-видимому, до более низких широт, чем 25 сентября 1998 г.

Еще одна особенность рассмотренных ионосферных бурь касается процесса восстановления параметров ионосферы после бури и связана с продолжительностью магнитных бурь. Так, первая магнитная буря 25 сентября 1998 г. имела характер одинокого всплеска магнитной активности, ей сопутствовала крайне сильная ионосферная буря небольшой продолжительности с максимальным уменьшением $NmF2$ во время главной фазы и достаточно быстрым ее восстановлением после окончания активного периода бури [18]. Вторая рассмотренная магнитная буря 7—10 ноября 2004 г. представляла собой последовательность двух бурь, следующих одна за другой и протекающих на фоне высокой геомагнитной активности со значением индекса $D_{st} \leq -100$ нТл. Их общая продолжительность составляла более трех суток. Интенсивность ионосферной бури во время магнитных бурь 7—10 ноября сильно изменялась, но оставалась

высокой вплоть до конца наблюдений 13 ноября, тогда как главная фаза второй МБ закончилась 10 ноября в 11:00 УТ. Таким образом, восстановление параметров ионосфера, возмущенной во время крайне сильной и продолжительной магнитной бури, протекало медленно. Например, 12 ноября, через двое суток после окончания главной фазы второй МБ, концентрация $NmF2$ в дневное время увеличилась лишь на 25 % по сравнению с возмущенным днем 10 ноября и оставалась в четыре раза меньшей, чем в спокойный день.

1. Афраймович Э. Л., Астафьевая Э. И., Бернгардт О. И. и др. Среднеширотные амплитудные мерцания сигналов GPS и сбои функционирования GPS на границе аврорального овала // Изв. вузов. Радиофизика.—2004.—47, № 7.—С. 509—526.
2. Афраймович Э. Л., Косогоров Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и астрономия.—2002.—42, № 4.—С. 491—498.
3. Брюнелли Б. Е., Намгладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
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 астрономия.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
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. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (Обзор) // Геомагнетизм и астрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
7. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и астрономия.—1985.—25, № 5.—С. 768—772.
8. Куркин В. И., Пирог О. М., Полех Н. М. и др. Комплексные исследования ионосферных эффектов геомагнитных бурь в северо-восточном регионе России // Тр. XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. — Нижний Новгород, 2002.—С. 62—63.
9. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и астрономия.—1982.—22, № 5.—С. 776—781.
10. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и астрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
11. Таран В. И., Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пуляев В. А. Ионосферные эффекты магнитных бурь по наблюдениям на радаре некогерентного рассеяния в Харькове // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сб. науч. тр. ХГПУ.—1999.—Вып. 7, ч. 3.—С. 381—383.
12. Урядов В. Н., Куркин В. И., Вертугров Г. Г. и др. Особенности распространения KB сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика.—2004.—47, № 12.—С. 1041—1056.
13. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
14. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
15. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. Часть 1 // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
16. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. Часть 2 // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 198—231.
17. Buonsanto M. J. Millstone Hill incoherent scatter F region observations during the disturbances of June 1991 // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A4.—P. 5743—5755.
18. Buonsanto M. J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
19. Buonsanto M. J., Gonzalez S. A., Pi X., et al. Radar chain study of the May, 1995 storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 233—248.
20. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyurnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17 — 24 August 2002. P. 2280.
21. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyurnov 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, Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17—24 August 2002b. P. 2278.
22. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.359—26.366.
23. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.367—26.372.
24. Gonzales C. A., Kelley M. C., Behnke R. A., et al. On the latitudinal variations of the ionospheric electric field during magnetospheric disturbances // J. Geophys. Res.—1983.—88, N A11.—P. 9135—9144.
25. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res.—1987.—92, N A5.—P. 4649—4662.
26. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime thermosphere above

- Millstone Hill during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17.275—17.282.
27. Mikhailov A. V., Forster M. Some F2-layer effects during the January 6—11, 1997 CEDAR storm period as observed with the Millstone Hill incoherent scatter facility // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 249—261.
28. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // EOS Trans. AGU, 81 N 48. Fall Meeting. F 947, San Francisco, USA, 2000.
29. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998 // EOS Trans. AGU, 82 N 20. Spring Meeting. S 291, San Francisco, USA, May 15, 2001.
30. Pavlov A. V. The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the ionosphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 6—12 April 1990 // Ann. Geophys.—1998.—16.—P. 589—601.
31. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. Using steady-state vibrational temperatures to model effects of N_2^* on calculations of electron densities // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 26.941—26.945.
32. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. J. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5-11 June 1991 storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 263—279.
33. Prolss G. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 1—9.
34. Prolss G. W. Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes // J. Geophys. Res.—1993.—98, N A4.—P. 5981—5991.
35. Prolss G. W. Ionospheric F-region storms // Handbook of atmospheric electrodynamics / Ed. by H. Volland. — Roca Raton, Fla., CRC Press, 1995.—Vol. 2.—P. 195—248.
36. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurement // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A12.—P. 23.359—23.365.
37. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // Space Res.—1973.—13.—P. 267—286.
38. 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.
39. Schlesier A. C., Buonsanto M. J. The Millstone Hill ionospheric model and its application to the May 26—27, 1990, ionospheric storm // J. Geophys. Res.—1999.—104, N A10.—P. 22.453—22.468.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF IONOSPHERE STORMS AT THE MIDLATITUDES OF EUROPE. 1

*Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, V. I. Taran,
L. F. Chernogor*

The results of our comparison analysis of the ionosphere-thermosphere effects of two strong geospace storms that differ in the intensity and passing character are presented. The typical peculiarities of these storms that are used in part 2 of this work for their classification are revealed. The observations of ionosphere disturbances were carried out with the use of the Kharkiv incoherent scatter radar.