

УДК 550.388+520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, С. А. Пазюра¹, В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Институт ионосферы ИАН и МОН Украины, Харьков

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Сильнейшая геокосмическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования

Надійшла до редакції 14.10.04

Наведено результати спостереження та моделювання відгуку області F і зовнішньої іоносфери на потужну магнітну бурю 30—31 травня 2003 р. (максимальний індекс $Kp = 8$). Виявлено ефекти глибокого негативного іоносферного збурення, які рідко спостерігаються в іоносфері середніх широт, що розташована глибоко у внутрішній плазмосфері (для Харкова $L \approx 2$). Вони свідчать про зсув головного іоносферного провалу, провалу легких іонів та гарячої зони разом з плазмоспаузою на широту Харкова. Моделювання та дослідження ефектів термосферних збурень, а також теплового режиму нейтральних і заряджених компонентів верхньої атмосфери Землі виявили їхні значні зміни під час бурі. Спостереження виконано за допомогою радару некогерентного розсіяння у Харкові.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением работ авторов [2, 7], направленных на исследование отклика верхней атмосферы Земли на магнитную бурю (МБ) 29—31 мая 2003 г. ($Ap = 89, 49, 17$). Наблюдения эффектов бури проводились 30—31 мая в соответствии с международной программой Low/High Latitude. Радар работал в режиме зондирования одиночными 800-мкс импульсами, в диапазоне высот 220—1500 км с высотным разрешением около 120 км.

Расположение харьковского радара НР (геомагнитная широта 45.7° , $L \approx 2.0$) позволяет исследовать эффекты, связанные с процессами ионосферно-магнитосферного взаимодействия глибоко во внутренней плазмосфере. Эти эффекты становятся существенными во время сильных геокосмических возмущений, которые охватывают не только высокие широты, но проникают также в средние широты. К числу таких возмущений относится рассматриваемая сверхсильная магнитная буря. Отдельные результаты наблюдения этой бури описаны в работах [2, 7]. В них показано, что магнитная буря вызвала сильнейшую отрицательную ионосферную бурю (ИБ). Среди эффектов ионосферной бури зарегистрированы: депрессия концентрации электронов N_e и увеличение высоты $hmF2$ максимума

слоя $F2$ во время главной фазы магнитной бури; необычный нагрев плазмы в ночь 29—30 мая, опустошение магнитной силовой трубки, проходящей над Харьковом. Эти эффекты могут быть результатом деформации магнитосферы и редких для средних широт явлений смещения главного ионосферного провала и связанных с ним структур (провала легких ионов, горячей зоны) на широту г. Харькова.

Здесь мы представляем результаты моделирования и исследования эффектов термосферных возмущений, а также теплового режима нейтральных и заряженных компонентов верхней атмосферы Земли во время бури. Пересмотрены также некоторые результаты измерений работы [7]. Они представлены здесь в большем объеме и в более широком диапазоне высот и времени. Это позволило подробнее описать эффекты ионосферной бури по сравнению с выбранными контрольными (магнитоспокойными) днями.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ. ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

Сверхсильная магнитная буря 29—31 мая 2003 г. протекала на фоне высокой вспышечной активности Солнца. Результатом рентгеновских вспышек

класса X3.6 и X1.2 в ночь 27—28 мая стали два импульса плотности солнечной плазмы (CME), зарегистрированные спутником NASA/ACE 29 мая в 11:50 и 18:30 UT. Магнитная буря имела внезапное начало 29 мая около 12:25. Главная фаза с минимальным значением индекса $Dst = -131$ нТл развивалась интенсивно с 23:00 29 мая до 03:00 30 мая, после чего началась фаза восстановления, связанная с поворотом составляющей B_z межпланетного магнитного поля (ММП) на север. Индекс Ap имел значения 89, 49 и 17 соответственно 29, 30 и 31 мая. Начало измерений на радаре HP (с 21:00 29 мая) совпало с главной фазой магнитной бури и вторым из трех последовательных индексов $Kp = 8$. На спутнике GOES-8 (W75) были зарегистрированы два всплеска потока протонов с энергией более 10 МэВ. Один из них, усилившийся более чем в 200 раз в результате вспышек в ночь 27—28 мая, наблюдался с 28 по 30 мая. Другой поток был зарегистрирован 31 мая с 04:40 до 14:40. Он был связан со вспышкой класса M9.3, произошедшей в этот день. Его величина увеличилась почти в 70 раз. Основные параметры геокосмической обстановки приведены на рис. 1 и 2.

Оценим энергетику сверхсильной магнитной бури. Энергия бури E_{ms} определяется значением индекса Dst_{min} [29]:

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

где $B_0 = 30$ мкТл — значение индукции магнитного поля на экваторе, $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — энергия дипольного магнитного поля Земли. Скорректированное значение $D_{st}^* = Dst - b p_{sw}^{1/2} + c$. Здесь $b = 5 \cdot 10^5$ нТл/(Дж·м⁻³)^{1/2}, $c = 20$ нТл, $p_{sw} = N_p m_p V_{sw}^2$, N_p и m_p — концентрация и масса протонов, V_{sw} — скорость солнечного ветра. Для сверхсильной бури при $Dst_{min} \approx -130$ нТл, $N_p \approx 3 \cdot 10^7$ м⁻³, $V_{sw} \approx 820$ км/с имеем давление солнечного ветра $p_{sw} \approx 33$ нПа (рис. 2). При этом $D_{st}^* \approx -200$ нТл, $E_{ms} \approx 8 \cdot 10^{15}$ Дж. Энергия этой магнитной бури эквивалентна энергии 2 Мт ТНТ. Если длительность основной фазы $\Delta t = 4$ ч, то мощность бури $P_{ms} \approx 5.6 \cdot 10^{11}$ Вт. Такую мощность потребляют несколько высокоразвитых европейских стран с населением около 200 млн человек.

Магнитная буря вызвала интенсивную отрицательную ионосферную бурю. На рис. 3, а показаны вариации критической частоты f_oF2 , полученной из ионограмм станции вертикального зондирования «Базис» в Харькове. Здесь же приведены данные ионосферной станции в Сан-Вито (географические

координаты 40° N, 17° E). Последние привлечены для выбора контрольных (невозмущенных) суток и оценки характера ионосферного возмущения. В качестве контрольных данных взяты усредненные значения f_oF2 за 19 мая ($Ap = 12$, $Kp \leq 4$, $F_{10.7} = 115$) и 20 мая ($Ap = 12$, $Kp \leq 3$, $F_{10.7} = 117$). Этим датам предшествовали три спокойных дня ($Ap = 10$, 9, 9, $Kp \leq 3$). Из рис. 3, а видно, что 30 мая критическая частота f_oF2 отклонялась от своих значений в контрольный день примерно на -50 % ночью и -45 % днем; 31 мая отклонение уменьшилось ночью до -35 %, т. е. ионосферная буря начала затихать.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Вариации геомагнитного поля. На рис. 1 и 2 представлены вариации горизонтальных составляющих геомагнитного поля (H и D в направлениях север — юг и запад — восток соответственно), зарегистрированные магнитометром-флюксметром Харьковского национального университета. Высокое временное разрешение магнитометра позволило уточнить момент начала рассматриваемой магнитной бури — 29 мая в 12:25. Ему соответствовал четкий всплеск флуктуаций составляющих поля. Этому моменту предшествовал приход первого из двух облаков CME, связанных с двумя вспышками класса X в ночь 27—28 мая. Приборами ИСЗ NASA/ACE приход CME был зафиксирован в 11:50. По данным магнитометра-флюксметра был определен также момент реакции геомагнитного поля на приход второго облака CME, он отмечен в 19:00. На спутнике NASA/ACE прохождение этого облака было зарегистрировано в 18:30. С учетом расстояния от Земли до спутника (1.5 млн км) скорости распространения возмущений потоков солнечного ветра, связанных с приходом двух облаков CME, составили около 710 и 830 км/с соответственно. Эти значения скоростей ветра согласуются с данными, приведенными на рис. 2. По показаниям магнитометра-флюксметра во время бури отмечалось увеличение флуктуаций H - и D -составляющих поля в 7—8 и 5—7 раз соответственно по сравнению со спокойным днем 26 мая.

Вариации концентрации электронов. Вариации концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$ приведены на рис. 3, б. В спокойный день 19—20 мая они соответствовали характеру регулярного поведения среднеширотной ионосферы в летних условиях средней солнечной активности. Его отличительной чертой было наличие двух максимумов, вблизи полудня и в заходный период, причем вечерний

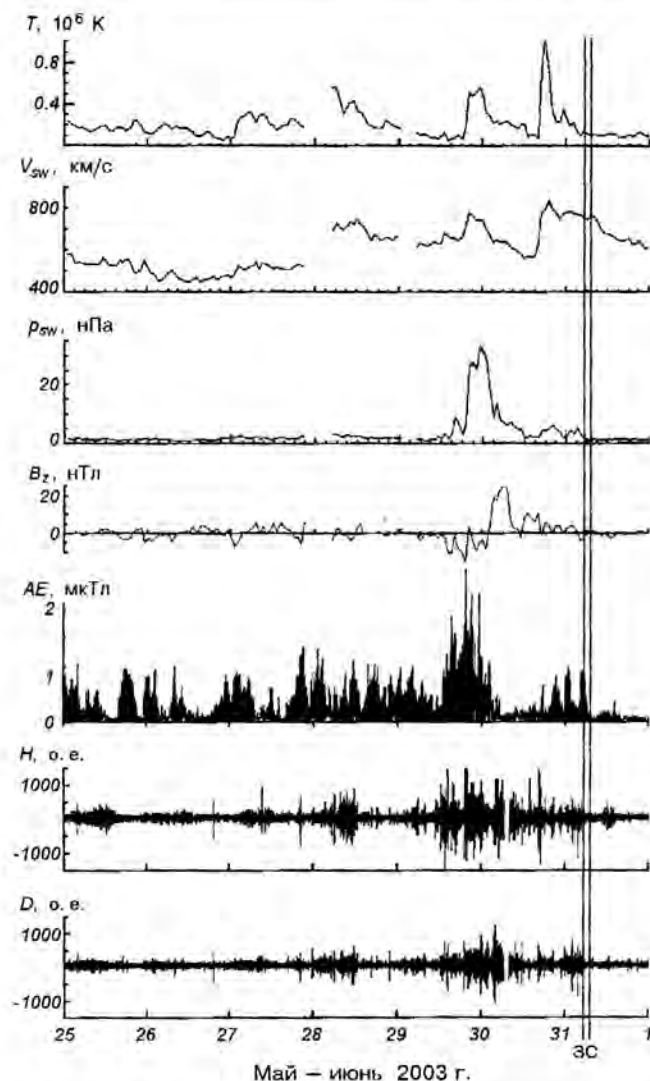


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: температуры T , радиальной скорости V_{sw} и динамического давления p_{sw} (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -составляющей межпланетного магнитного поля (ММП) (ACE Satellite — Magnetometer), AE -индекса (WDC Kyoto) и составляющих H , D геомагнитного поля (по данным магнитометра-флюксметра Харьковского национального университета) в период 25—31 мая 2003 г.

максимум ($f_0F2 \approx 8.3$ МГц) был сопоставим с дневным (8.5 МГц), что характерно для спада солнечной активности. В возмущенный день 30 мая концентрация $NmF2$ уменьшилась ночью, в течение главной фазы бури, примерно в четыре раза и вблизи полудня — в три раза (рис. 3, б и 4). Рис. 4 дает наглядную картину глубокой депрессии N_e в диапазоне высот 220—750 км, а также изменения основных параметров ионосферы во время ионосферной бури. Видно, что постепенное восстановле-

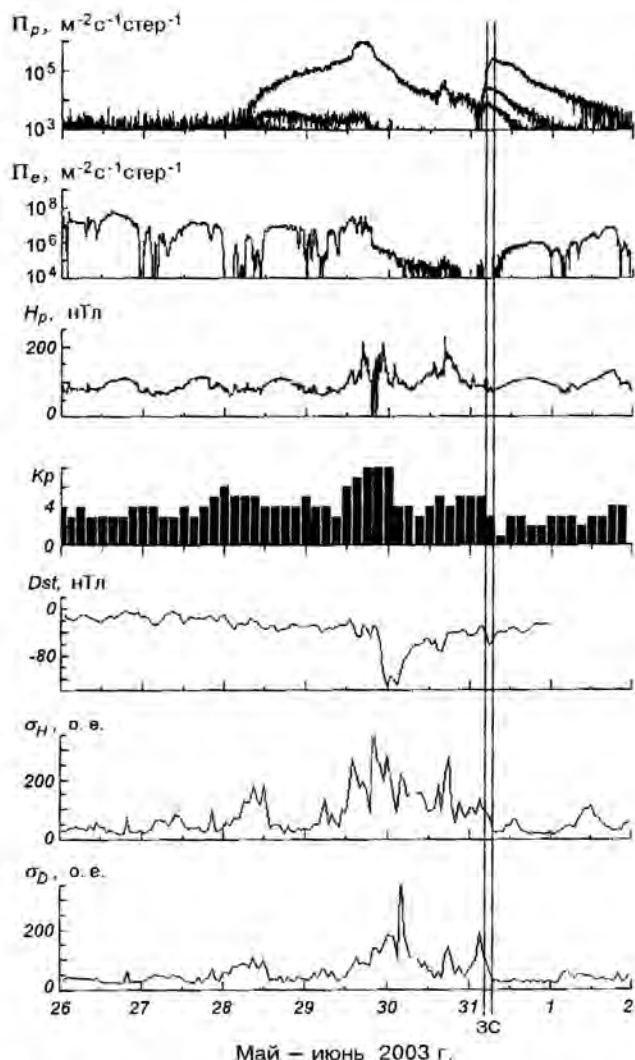


Рис. 2. Временные вариации потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_p -компонента геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), K_p -индекса (Air Force Weather Agency), Dst -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и стандартных отклонений составляющих H , D геомагнитного поля (с часовым усреднением) по данным магнитометра-флюксметра ХНУ в период 26 мая—1 июня 2003 г.

ние N_e началось 30 мая после 08:00 и продолжалось до конца измерений. Уменьшение N_e с постепенным восстановлением отмечалось в диапазоне высот 220—770 км (рис. 5). Однако выше максимума слоя $F2$ вариации N_e были выражены слабее из-за возрастающего влияния процессов диффузии на этих высотах.

Для исследования поведения других параметров ионосферы: электронной концентрации в диапазоне высот, высоты максимума слоя $F2$, температуры

электронов и ионов, ионного состава в период возмущения в качестве контрольных дат были выбраны магнитоспокойные сутки 26—27 мая 1998 г., а для сравнения скорости переноса плазмы — сутки 23—24 июня 1998 г. Эти даты по параметрам гелиогеофизической обстановки аналогичны рассматриваемому периоду (лето, средняя солнечная активность), но находятся на восходящей ветви 23-го солнечного цикла. Их привлечение позволило оценить особенности ионосферной и термосферной бури 29—31 мая 2003 г.

Следует отметить необычное явление, которое наблюдалось 30 мая вблизи восхода Солнца. В спокойный день 26—27 мая 1998 г. в утренние часы с началом процесса фотоионизации в атмосфере критическая частота слоя F_2 плавно увеличивалась от $f_0F_2 = 3.5$ до 5.6 МГц в интервале времени 02:00—05:00. (Здесь для контрольного дня 26—27 мая 1998 г., чтобы не загромождать рис. 3, а, вместо f_0F_2 приведены значения $NmF_2 = 1.24 \cdot 10^{10} (f_0F_2)^2$ (рис. 3, б), где f_0F_2 берется в МГц, а NmF_2 — в m^{-3}). В возмущенный день 30 мая 2003 г. f_0F_2 сначала увеличивалась от 3.0 до 3.8 МГц в интервале времени 02:00—03:15. Затем увеличение сменилось необычным уменьшением f_0F_2 до 3.4 МГц на протяжении около часа, после чего f_0F_2 снова продолжала увеличиваться (см. рис. 3, а и б). На рис. 3, б и в эти интервалы времени обозначены горизонтальными отрезками. Уменьшение f_0F_2 проходило на фоне утреннего снижения слоя F_2 ионосферы (рис. 3, в), на которое наложился резкий скачок высоты hmF_2 вниз и затем вверх (см. ниже).

Вариации высоты максимума слоя F_2 . Вариации высоты hmF_2 в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время ионосферной бури 29—30 мая 2003 г. приведены на рис. 3, в. В спокойный день hmF_2 изменялась примерно от 270 км днем до 370 км ночью (рис. 3, в). В возмущенный день 30 мая 2003 г. hmF_2 увеличилась почти на 160 км около местной полуночи, достигнув 530 км, и на 70 км вблизи полудня.

Рассмотрим особенности необычного явления, связанного с упомянутым выше уменьшением f_0F_2 в восходный период. Оно протекало на фоне утреннего снижения слоя F_2 , при котором hmF_2 в 03:15 достигла 320 км. В 03:45 произошла деформация высотного распределения N_e с расслоением профиля на два слоя и преобладанием нижнего слоя с максимумом на высоте 240 км. Это привело к уменьшению hmF_2 почти на 80 км. В течение следующих 15 мин концентрация N_e нижнего слоя уменьшилась, и главный максимум области F_2

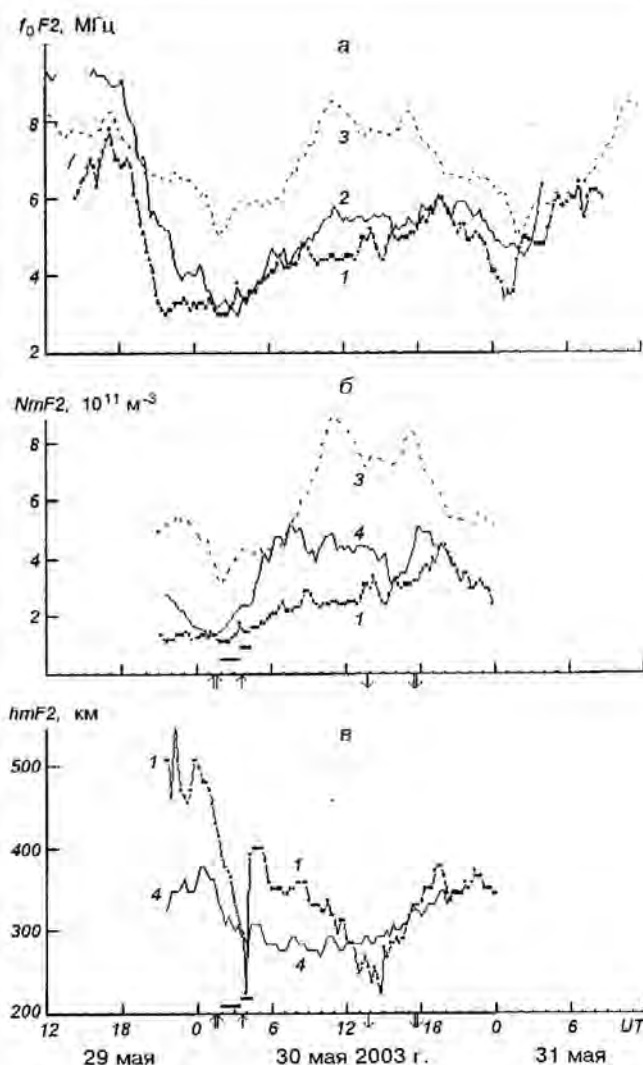


Рис. 3. Вариации параметров слоя F_2 29—31 мая: 1 — в Харькове, 2 — в Сан-Вито, 3 — в контрольный день 19—20 мая по данным ионозонда в Сан-Вито, 4 — в магнитоспокойный день 26—27 мая 1998 г. Здесь и далее стрелки обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца на поверхности Земли в Харькове (двойная стрелка) и в магнитосопреженной точке (одинарная)

восстановился на высоте 400 км. Расслоение и деформация профиля N_e , увеличение толщины слоя сохранялись по крайней мере до 05:00. Высотные профили электронной концентрации N_e в последовательные моменты времени (через 15 мин), демонстрирующие необычное поведение ионосферы с 02:00 по 05:00, приведены на рис. 6.

Вариации температуры электронов и ионов. Вариации T_e и T_i в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время бури 29—30 мая 2003 г.

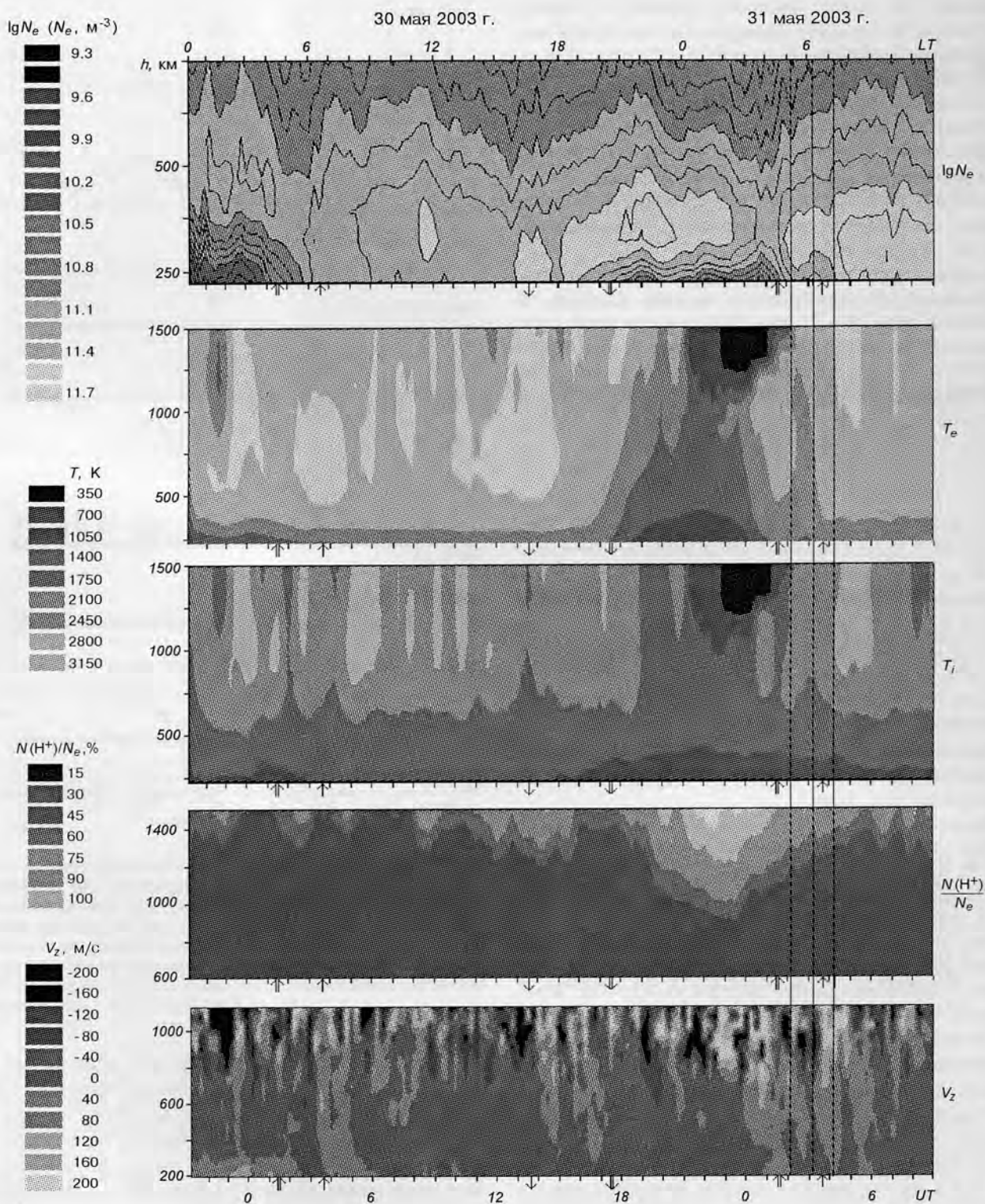


Рис. 4. Вариации параметров ионосферы 29—31 мая 2003 г. по данным харьковского радара НР: логарифм концентрации электронов ($\lg N_e$), температуры электронов и ионов, относительная концентрация ионов водорода $N(H^+)/N_e$, вертикальная составляющая скорости переноса плазмы V_z .

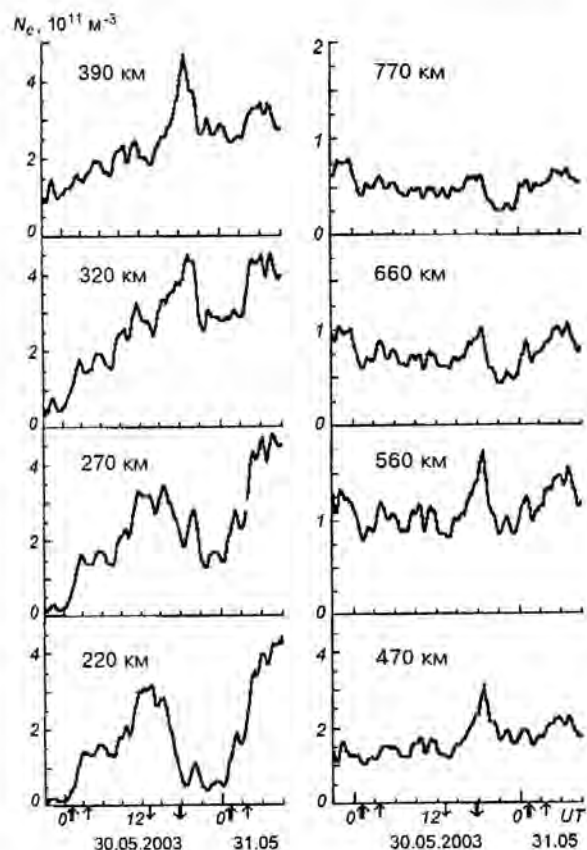


Рис. 5. Вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах 29—31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин, шаг скользящего 15 мин)

показаны на рис. 7. Видно, что в спокойный день на высотах примерно 250—700 км температура электронов T_e изменялась от ночных значений около 800 К до 2000—3000 К около полудня, а температура ионов T_i — от 800 К ночью до 1000—2200 К днем. В течение главной фазы магнитной бури, в ночь 29—30 мая, уменьшение $N_m F2$ до четырех раз сопровождалось необычным нагревом плазмы: температура T_e превысила 2200—3200 К, а T_i — 1200—2400 К на высотах 320—770 км (рис. 4 и 7). Такое явление в наших широтах наблюдалось крайне редко. На рис. 8 дано сравнение высотных профилей T_e и T_i в ночные и утренние часы спокойных суток 26—27 мая 1998 г. и возмущенных дат 29—30 мая 2003 г. Видно, что во время бури ночью высотные профили T_e и T_i были подобны дневным.

Вариации скорости переноса плазмы. Вариации V_z в возмущенный день 29—30 мая 2003 г. и спокойный день 23—24 июня 1998 г. на разных

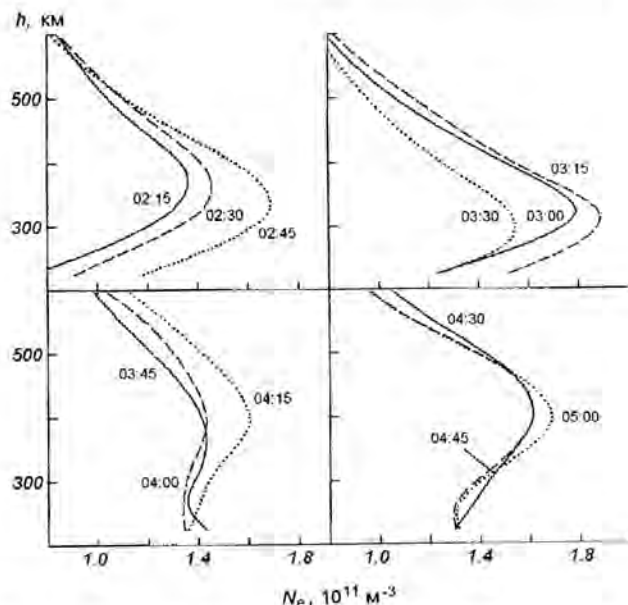


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации N_e в восходный период возмущенного дня 30 мая 2003 г.

высотах приведены на рис. 9. Видно, что характер суточных вариаций V_z в сравниваемые дни был достаточно близким. Утренний всплеск скорости V_z в спокойный день характеризует регулярные изменения V_z . Он связан с восходом Солнца, когда процессы фотоионизации начинают преобладать над потерями ионов O^+ в остывшей за ночь атмосфере, и избыток плазмы уносится вверх. В возмущенный день отмечалось увеличение модуля отрицательных значений V_z , а также необычное возмущение V_z в восходный период (около 02:00—05:00), которое накладывалось на утреннее поведение скорости V_z и изменяло ее знак (рис. 9). Так, около 02:00 скорость V_z в спокойный день составляла 5, 15, 25, 37 и 50 м/с на высотах 300, 400, 500, 600 и 700 км соответственно, а 30 мая на тех же высотах V_z имела значения 2, -10, -13, -20, -13 м/с. В 04:00 в возмущенный день наблюдался положительный всплеск V_z на всех высотах, тогда как в это же время в спокойный день значения V_z в основном были отрицательными. Квазипериодическое возмущение V_z сопутствовало вышеупомянутому нарушению утреннего роста $NmF2$ на фоне резкого уменьшения, а затем увеличения высоты $hmF2$ (рис. 3, б и в).

Вариации ионного состава. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах для спокойного и возмущенного дней показаны на рис. 10. Видно, что в

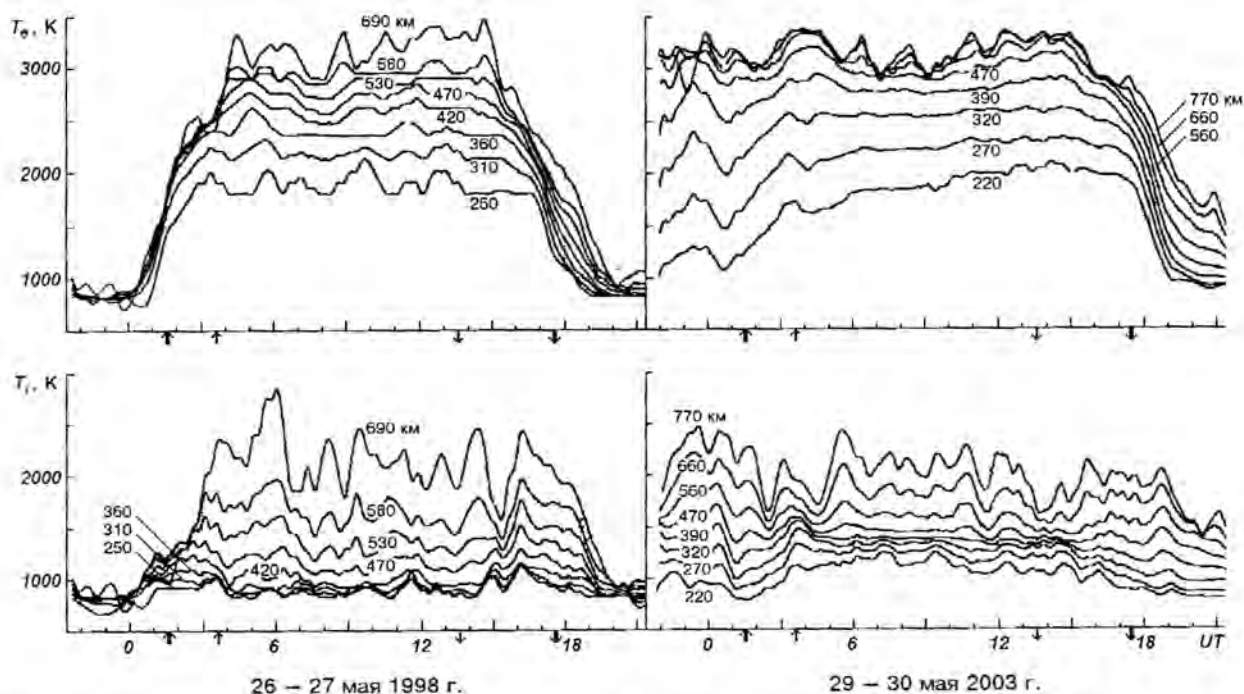


Рис. 7. Вариации T_e и T_i в спокойный день 26—27 мая 1998 г. и возмущенный день 29—30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

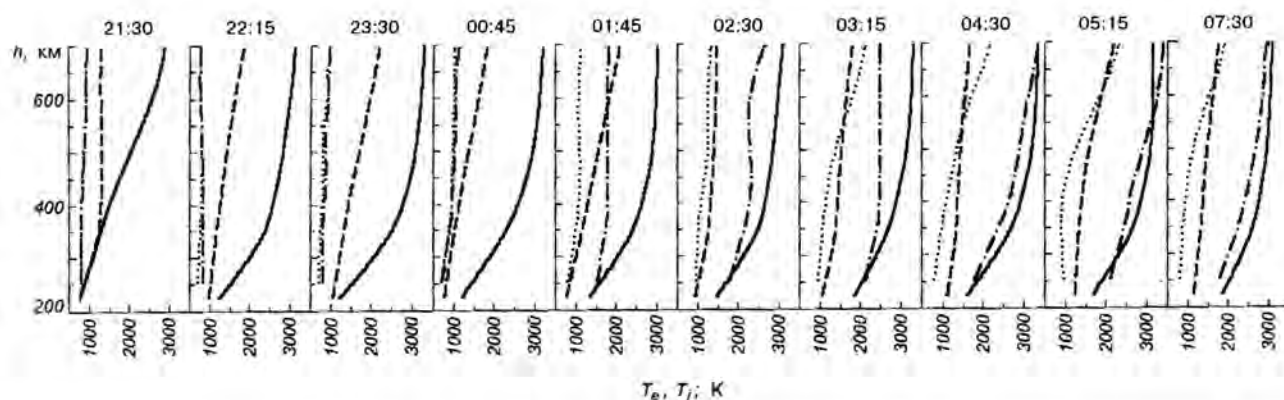


Рис. 8. Сравнение высотных профилей температур T_e и T_i во время магнитной бури 29—30 мая 2003 г. (сплошная линия — T_e , штриховая — T_i) и в спокойные сутки 26—27 мая 1998 г. (штрих-пунктирная — T_e , пунктир — T_i) в ночные и утренние часы (время UT)

спокойный день поведение $N(H^+)/N_e$ было типичным для летнего сезона периода средней солнечной активности. Относительная концентрация ионов H^+ нарастала после захода Солнца, достигла наибольшего значения перед восходом Солнца (около 23:00), когда атмосфера наиболее охлаждена, после чего начала уменьшаться. Например, на высоте 800 км максимальное значение $N(H^+)/N_e \approx 0.7$. Особенности регулярных сезонно-суточных и сол-

нечно-циклических вариаций $N(H^+)/N_e$ в ионосфере над Харьковом описаны нами в работах [3, 9, 15].

В возмущенный день поведение $N(H^+)/N_e$ имело сложный характер. Оно, по-видимому, отражало особенности вариаций во время магнитной бури концентрации ионов O^+ , температуры нейтралов, а также потока ионов H^+ на верхней границе и критического потока H^+ . При этом в течение глав-

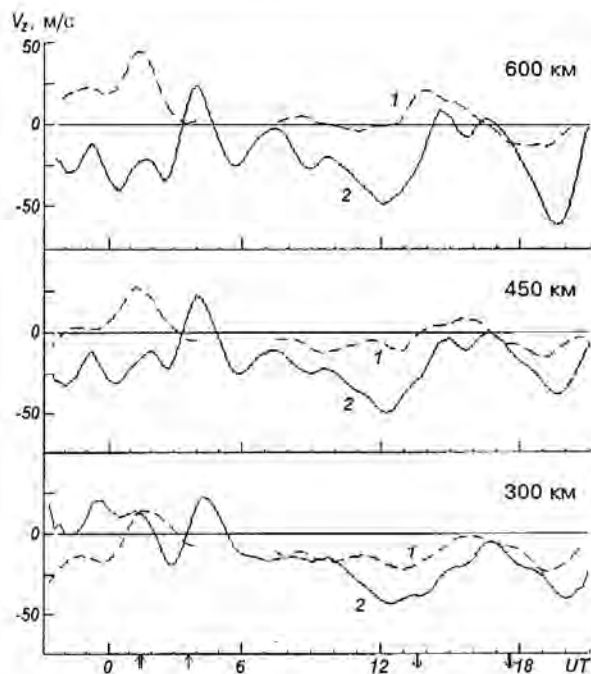


Рис. 9. Вариации скорости V_z : 1 — в спокойный день 23—24 июня 1998 г., 2 — в возмущенный день 29—30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

ной фазы магнитной бури ночью (около 23:00), например, на высоте 800 км наблюдалось уменьшение $N(H^+)/N_e$ более чем на порядок величины по сравнению со спокойной датой (рис. 4 и 10). Около местного полудня 30 мая на высотах 1200—1500 км отмечалось увеличение $N(H^+)/N_e$ до 0.2—0.7, что превысило ночные значения примерно в 1.2 раза. Значение $N(H^+)/N_e \approx 0.2$ в спокойные сутки наблюдалось днем на высоте около 800 км, т. е. гораздо ниже, чем 30 мая.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СОПУТСТВОВАВШИХ БУРЕ

Концентрация нейтралов. На рис. 11 приведены вариации концентраций основных компонентов нейтральной атмосферы $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ — молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода на высоте 300 км в спокойные дни и возмущенные дни 29 и 30 мая 2003 г. В качестве спокойных дней взяты даты 19 и 20 мая 2003 г. (рис. 11, а). Расчет концентрации нейтралов выполнен по модели нейтральной атмосферы MSIS-86 [30]. Дополнительно приводится параметр $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который в фотохимиче-

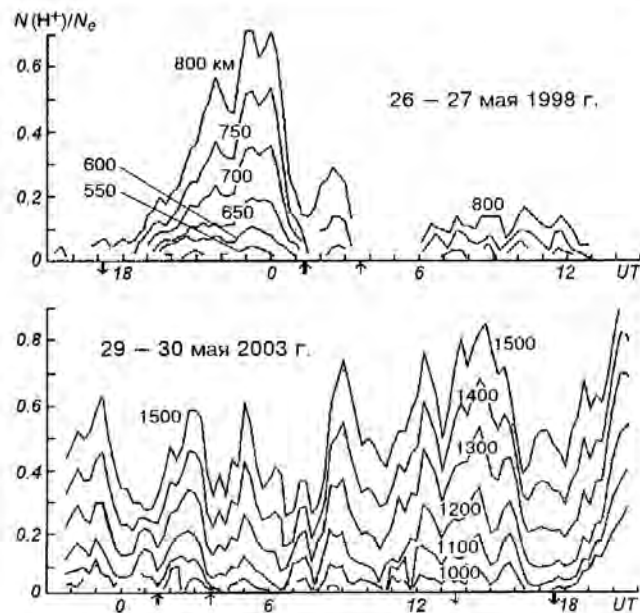


Рис. 10. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и возмущенный день 29—30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

ском приближении в стационарных условиях определяет соотношение процессов ионообразования и потерь ионов O^+ и примерно пропорционален $NmF2$.

Во время отрицательной ионосферной бури 30 мая $NmF2$ уменьшилась по сравнению со спокойными датами 19—20 мая в четыре раза ночью и в три раза днем. Посмотрим, как изменился при этом состав нейтральной атмосферы. Например, в дневное время около 08:00 согласно модели (рис. 11, б) концентрация $N(O)$ на высоте 300 км по сравнению с контрольным днем 19—20 мая почти не изменилась, $N(O_2)$ увеличилась примерно в 1.6 раза, а $N(N_2)$ — в 1.4 раза. В результате параметр p уменьшился в возмущенный день примерно в 1.4 раза. Такое изменение нейтрального состава не могло обеспечить уменьшения $NmF2$ в 2.5 раза, которое наблюдалось 30 мая в это время. Оно требует более значительного уменьшения p , чем это следует из модели MSIS-86, либо привлечения дополнительных механизмов, которые будут обсуждаться ниже.

Температура нейтралов и нагрев атмосферы. Температура нейтралов T_n вычислялась по методике [40, 41] на основе уравнения теплового баланса ионного газа [5, 42]:

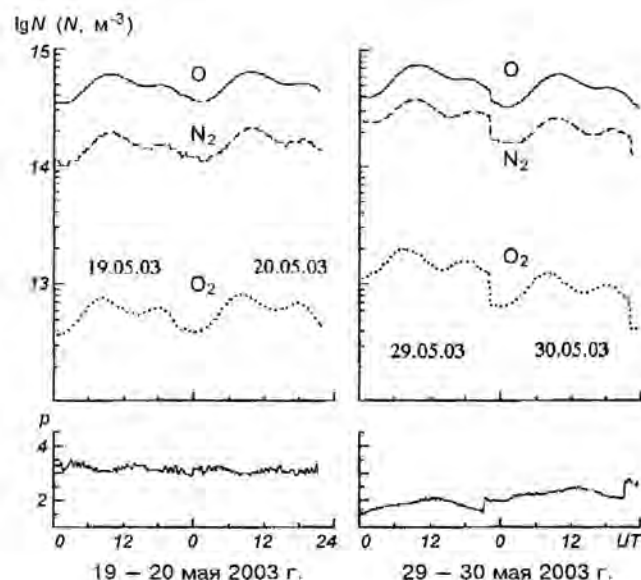


Рис. 11. Вариации концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы и параметра $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ на высоте 300 км в контрольные дни 19–20 мая 2003 г. и возмущенные дни 29–30 мая 2003 г. (из расчета по модели MSIS-86)

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

В расчете использовались параметры ионосферы N_e , T_e , T_i , измеренные методом НР. Концентрации нейтральных компонентов найдены из модели MSIS-86. Временные вариации T_n 29–31 мая 2003 г. на высотах 220, 270, 320, 390 и 470 км иллюстрирует рис. 12. Здесь же для сравнения приведены данные T_{nMSIS} , рассчитанные по модели MSIS-86, для возмущенных дней 29–31 мая и контрольных спокойных суток 19 мая 2003 г.

Анализ результатов расчета T_n из данных радара и T_{nMSIS} из модели MSIS-86 обнаружил следующие особенности в поведении T_n .

1. В течение главной фазы магнитной бури в ночь 29–30 мая 2003 г. T_n , отслеживая изменения температуры ионов T_i , увеличивалась с увеличением высоты по крайней мере до 400 км. Это свидетельствовало о нагреве и расширении нейтральной атмосферы.

2. Температура T_n на высоте 270 км 30 мая 2003 г. изменялась от ночных значений около 1150 К до 1250 К вблизи местного полудня.

3. Во время главной фазы магнитной бури ($Kp = 8$), когда наблюдался необычный нагрев

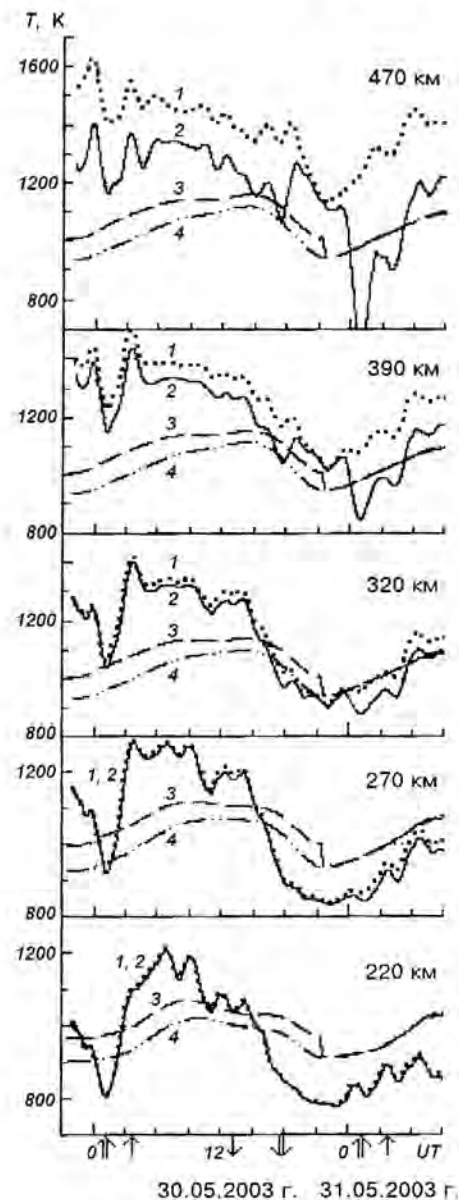


Рис. 12. Измеренные температуры ионов T_i (1) и рассчитанные температуры нейтралов T_n по данным радара НР (2) (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин) и T_{nMSIS} по модели MSIS-86 (3) во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. Приведены также значения T_{nMSIS} для спокойного дня 19 мая 2003 г. (4)

плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области $f T_n$ составляла 1000, 1150, 1250, 1350, 1350 К на высотах 220, 270, 320, 390 и 470 км. Для сравнения отметим, что в следующую ночь, во время фазы восстановления ($A_p = 17$, $Kp = 5$), значения T_n уменьшились примерно на 200, 300, 330, 350 и 350 К на этих же высотах.

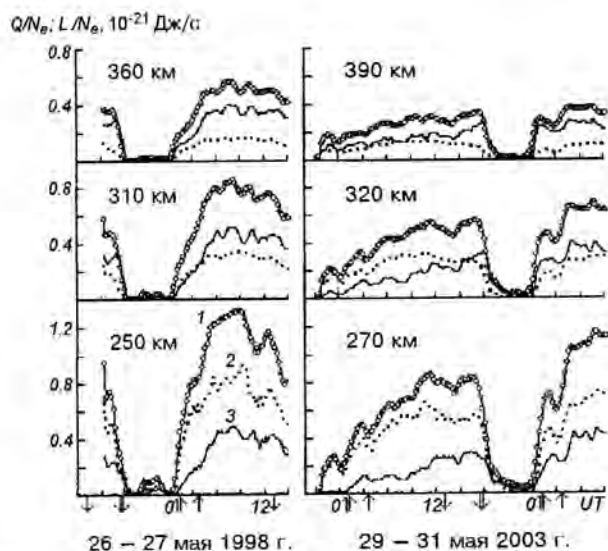


Рис. 13. Вариации скоростей нагрева электронного газа (из расчета на один электрон) Q/N_e (1), теплообмена электронов с атомами кислорода L_e/N_e (2) и ионами L_{ei}/N_e (3) в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

4. Вблизи местного полудня температура T_n увеличивалась от 1150 до 1330 К на высотах 220—470 км.

5. Во время главной фазы магнитной бури высота термпаузы, где атмосфера становится изотермичной, увеличилась не менее чем до 400 км, тогда как в спокойный день 19—20 мая 1998 г. она составляла около 300 км.

6. Модель MSIS-86 дает заниженные значения T_n в возмущенный день: 30 мая вблизи местного полудня значения T_n , рассчитанные по данным радара, отличались от модельных значений T_{nMSIS} на 80—190 К на высотах 220—470 км.

Подвод энергии к электронам. Эта энергия определяется из уравнения теплового баланса. Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \geq 300$ —350 км) из-за малости длин их свободного пробега носит локальный характер. На этих высотах основными механизмами охлаждения электронного газа являются кулоновские соударения с ионами и возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода [5, 42]. Тогда для стационарных условий уравнение баланса энергии электронов в системе СИ можно записать в виде [18, 25]:

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

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

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

где Q — отнесенная к единичному объему мощность, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — мощность, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — мощность, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода.

На рис. 13 приведены результаты расчета энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, а также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e и нейтралами L_e/N_e . В расчетах использовались значения T_e , T_i и N_e , полученные методом НР. Параметры T_n и $N(O)$ взяты из модели MSIS-86. Представлены данные, полученные в контрольный день 26—27 мая 1998 г. (рис. 13, а) и во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г. (рис. 13, б) на близких высотах. Видно, что в разные даты вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был различным. Например, в спокойный день 26—27 мая 1998 г. вблизи максимума слоя F_2 на высоте 250 км около местного полудня ($f_oF_2 \approx 6$ МГц) преобладали потери в процессе неупругого теплообмена электронов с нейтралами L_e/N_e за счет высокой разности температур $T_e - T_i$ при малых значениях N_e , что характерно для условий невысокой солнечной активности ($F_{10.7A} = 106$ ед.). На высоте около 300 км вклад двух механизмов охлаждения электронов, по-видимому, сравнялся. На высоте $h = 360$ км начали преобладать потери энергии электронов L_{ei}/N_e в кулоновских соударениях с ионами.

В возмущенный день 30 мая 2003 г. в условиях сильнейшей отрицательной ионосферной бури и депрессии $N_e(f_oF_2 \approx 4.5$ МГц вблизи полудня) потери L_{ei}/N_e были малы, они сравнялись со значениями L_e/N_e только на высоте 390 км, что объясняется также нагревом и расширением термосферы, при котором концентрация атомарного кислорода $N(O)$ уменьшается медленно.

В результате вблизи полудня на высотах 250—270 км подвод энергии к электронному газу Q/N_e составлял около $1.3 \cdot 10^{-21}$ Дж/с в спокойный день и $0.8 \cdot 10^{-21}$ Дж/с во время магнитной бури 30 мая 2003 г., т. е. превышал последний в 1.6 раза.

Особенностью теплового режима ионосферы стала значительная величина энергии Q/N_e во время

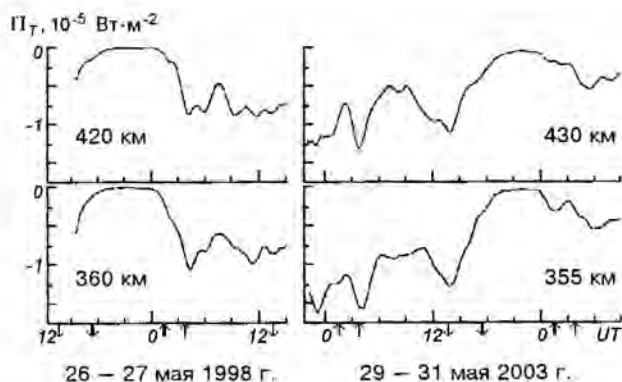


Рис. 14. Вариации потока тепла Π_T , переносимого электронами из протоносферы в ионосферу в контрольный день 26–27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

главной фазы магнитной бури, в ночь 29–30 мая (рис. 13, б). На высоте 270 км она составляла около $0.3 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, тогда как в спокойный день подвод энергии Q/N_e был близок к нулю. При этом в процессе охлаждения электронного газа основную роль играло, по-видимому, возбуждение тонкоструктурных уровней атомарного кислорода. Потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами были малы из-за низкой их концентрации.

Потоки тепла, переносимого электронами. Эти потоки характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. Вертикальная составляющая потока тепла равна

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

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

Результаты расчета Π_T на близких высотах в контрольный день 26–27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. приведены на рис. 14. Редко наблюдаемой в средних широтах особенностью теплового режима ионосферы стало высокое значение $\Pi_T = -1.6 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² на высоте 355 км в ночь 29–30 мая во время главной фазы магнитной бури (рис. 14, б). В спокойную дату он был близок к нулю. Максимальное значение Π_T 30 мая наблюдалось в утренние часы и составляло около $-1.5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Вблизи местного полудня $\Pi_T \approx -0.9 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² во время магнитной бури и

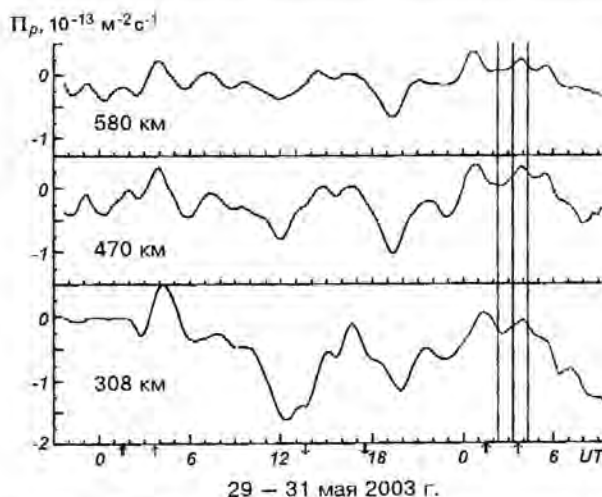


Рис. 15. Вариации потока плазмы Π_p по данным радара НР в Харькове во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

$-0.75 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² в спокойный день. Во время магнитной бури днем Π_T увеличился по сравнению с контрольным днем в среднем в 1.2 раза.

Потоки плазмы. Вертикальный поток плазмы $\Pi_p = N_e V_z$. Он вычисляется по измеренным значениям N_e и V_z . Вариации потока в верхней части области F2 характеризуют процессы ионосферно-протоносферного обмена плазмой и контролируют высотное распределение заряженных частиц. В дневное время Π_p направлен вверх под действием повышенного давления плазмы в области F2 ионосферы. Ночью, когда прекращается действие солнечного источника ионизации и давление плазмы уменьшается, поток направлен вниз и подпитывает F2-слой.

Вариации потока Π_p во время бури 29–31 мая (рис. 15) сохраняли основные черты суточного поведения. К ним относятся восходящий поток во время восхода Солнца и нисходящий в заходный период. Значения Π_p в указанные моменты на высоте 308 км составляли $+0.5 \cdot 10^{-13}$ м⁻²·с⁻¹ и $-1.2 \cdot 10^{-13}$ м⁻²·с⁻¹ соответственно. С увеличением высоты величина потока уменьшалась за счет падения N_e . Отличие от регулярного поведения Π_p заключалось в запаздывании утреннего восходящего потока относительно момента восхода Солнца. Запаздывание связано с упомянутым выше квазипериодическим возмущением скорости V_z на фоне необычного нарушения утреннего нарастания NmF2 и резкого переспада высоты hmF2. Возмущение V_z наложилось на восходящий утренний всплеск скорости и вызвало смену знака V_z .

ОБСУЖДЕНИЕ

Основные проявления и особенности геокосмической бури. Обобщим рассмотренные особенности геокосмической бури и процессы в области F ионосферы, связанные с нею.

1. Сверхсильная магнитная буря ($Kp = 8$) протекала на фоне высокой вспыхивающей активности Солнца. Магнитная буря началась внезапно около 12:25 UT, минимальное значение $Dst = -131$ нТл наблюдалось в ночь 29—30 мая; 29, 30 и 31 мая индекс Ap был равен 89, 49 и 17 соответственно.

2. Магнитная буря вызвала интенсивную отрицательную ионосферную бурю. Максимальное отклонение критической частоты δf_oF2 составило около -50% в ночь 29—30 мая и -45% днем 30 мая.

3. К числу эффектов бури относится уменьшение электронной концентрации $NmF2$ ночью, в течение главной фазы бури, примерно в четыре раза и вблизи полудня — в три раза. Постепенное восстановление N_e началось 30 мая после 08:00 и продолжалось до конца измерений.

4. Во время главной фазы магнитной бури, в ночь 29—30 мая, высота максимума электронной концентрации $hmF2$ увеличилась на 160 км около местной полуночи, достигнув примерно 530 км, и на 70 км вблизи полудня.

5. Необычный нагрев плазмы отмечался в течение главной фазы магнитной бури. При этом температура электронов в ночь 29—30 мая превысила 2000—3200 К, а ионов — 1200—2400 К на высотах 320—770 км. В спокойных условиях значения ночных температур составляли около 800 К. Такой нагрев в наших широтах наблюдался крайне редко.

6. Вблизи восхода Солнца зарегистрировано необычное явление, связанное с нарушением утреннего нарастания электронной концентрации $NmF2$ на фоне резкого перепада высоты максимума слоя $F2$ вниз — вверх и деформации слоя, которые сопровождались квазипериодическим возмущением скорости V_z .

7. Относительная концентрация ионов водорода $N(H^+)/N_e$ во время главной фазы бури ночью 29—30 мая уменьшилась по сравнению со спокойной датой более чем на порядок.

8. В дневное время $N(H^+)/N_e$ достигла значений 0.2—0.7 на высотах 1200—1500 км и превысила ночные значения в 1.2 раза, тогда как в спокойные сутки днем значения $N(H^+)/N_e$ уменьшились по сравнению с ночными более чем в четыре раза.

Физическое истолкование результатов наблюдений. Сначала обсудим вариации электронной концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$. Уменьшение $NmF2$ во время бури в четыре раза ночью и

в три раза днем только в некоторой степени можно объяснить изменением нейтрального состава и уменьшением параметра p . Днем это уменьшение составляло 1.4 раза. Изменение состава, как известно, связано с высокоширотным нагревом термосферы (за счет высыпания энергичных частиц и усиления авроральных токов) и перестройкой глобальной термосферной циркуляции [4, 8, 12]. Кроме изменения состава, следует учесть также вклад других факторов в увеличение скорости потерь ионов O^+ , например колебательное возбуждение молекул $N_2(v)$ [19, 36, 37, 39]. Как известно, этот вклад увеличивается при значениях $T_e \geq 1500$ К [4, 5, 37, 42]. В нашем случае $T_e = 2000...3200$ К, в том числе в ночное время, и роль возбужденных молекул азота должна быть существенна. Кроме того, около полуночи, в течение главной фазы магнитной бури, когда на протяжении трех 3-часовых интервалов индекс $Kp = 8$, весьма вероятно уменьшение $NmF2$ за счет смещения к экватору главного ионосферного провала (ГИП). Об этом косвенно может свидетельствовать максимальное значение индекса авроральной активности, равное 10, которое было зарегистрировано на спутнике NOAA POES примерно с 21:00 29 мая до 03:30 30 мая (<http://solar.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>). Значение этого параметра, характеризующего мощность энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу аврорального овала, подтверждает возможность смещения в указанный период времени экваториальной границы ГИП до геомагнитных широт 51.0° — 45.0° . Прохождение ГИП во время магнитной бури отмечалось неоднократно, например, на радаре в Миллстоун Хилле ($L = 3.3$). Так, оно наблюдалось в мае 1990 г. при максимальных значениях $Kp = 7$ [20], в июне 1991 г. при $Kp = 7$ [19]. В Харькове, где $L \approx 2.0$, подобное редкое для средних широт явление отмечалось после полуночи во время уникальной бури 25 сентября 1998 г. при $Ap = 121$, $Kp = 7, 8, 9$ [6, 24]. Оно было обнаружено при анализе глобальных карт полного электронного содержания (TEC), построенных по данным навигационной системы GPS [1]. И наконец, следует учитывать, что в реальных условиях во время магнитной бури действуют одновременно несколько факторов, эффекты которых могут накладываться.

Обсудим теперь вариации высоты $hmF2$ максимума слоя $F2$. Измерения на радаре в Харькове показали увеличение $hmF2$ во время бури примерно на 160 км ночью и на 70 км вблизи полудня по сравнению с контрольной датой 26—27 мая 1998 г. Подъем слоя $F2$ в условиях рассматриваемой сверхсильной бури, по-видимому, также объясняется совместным действием ряда факторов [19, 39].

Среди них расширение термосферы и перестройка 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 составляющую атмосферной циркуляции, поднимая слой выше, а днем ослабляет ее и препятствует снижению слоя. Возможной причиной увеличения $hmF2$ также может быть смещение к экватору ГИП. Ему сопутствует увеличение $hmF2$, за которым следует депрессия N_e в области F [19, 26, 27, 39].

Наряду с перечисленными причинами рассматривается также возможность вклада в увеличение $hmF2$ эффекта проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты [4, 20, 22, 26, 39] за счет необычно продолжительного (более суток) выпадения протонов и электронов с потоком около $10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. В результате выпадения повышается проводимость нижележащей ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации (II систему продольных токов) [4, 21, 28]. Следовательно, однозначная интерпретация увеличения $hmF2$ действием только одного источника возмущения затруднена, поскольку эффекты разных источников сходны. В случае преобладания эффектов электрических полей оценка сверху E_y по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения поля, примерно равные 25 мВ/м ночью и 20 мВ/м днем.

Исходя из значений AE в течение главной фазы магнитной бури, можно оценить напряженность электрического поля E магнитосферного происхождения в высоких широтах [10, 12]. Так, ночью 29—30 мая при $AE = 2000 \dots 2500 \text{ нТл}$ напряженность поля E могла усиливаться до 120—150 мВ/м. В средних широтах она могла достичь значения 25 мВ/м. Кроме того, зная величину $Bz \approx -15 \text{ нТл}$ и радиальной скорости солнечного ветра $V_{sw} \approx 700 \text{ км/с}$ во время главной фазы магнитной бури, получим напряженность межпланетного электрического поля $E_y \approx -V_{sw} Bz \approx -10 \text{ мВ/м}$. По оценке [35] этой величины E_y достаточно, чтобы усилить магнитосферную конвекцию и вызвать высокую геомагнитную активность, характеризующую приведенными выше значениями индексов AE и Dst .

Увеличение высоты $hmF2$ во время магнитной бури по сравнению с контрольным днем 26—27 мая 1998 г. наблюдалось от момента включения радара вблизи местной полуночи и до 13:00 UT (рис. 3, в). Как отмечалось выше, на фоне утреннего снижения слоя $F2$ зарегистрирован резкий перепад высоты $hmF2$ вниз — вверх вблизи восхода Солнца, кото-

рый составил около 160 км. Это необычное явление сопровождалось нарушением утреннего нарастания $NmF2$ (рис. 3, б), квазипериодическим возмущением скорости V_z (рис. 9) и деформацией профиля N_e (рис. 6). По-видимому, такие события также могли стать результатом наложения эффектов от различных источников в условиях геомагнитных возмущений [21]. К их числу можно отнести эффекты крупномасштабных термосферных возмущений, включая перестройку состава термосферы с увеличением содержания тяжелых компонентов (O_2 и N_2). Оно ведет к уменьшению концентрации N_e в районе максимума слоя $F2$ и расслоению профиля. Необходимо учитывать также усиление меридионального ветра к экватору за счет высокоширотного джоулева нагрева термосферы во время магнитной бури, которое влияет на высотное распределение концентрации заряженных компонентов. Деформация профиля N_e может быть связана также с прохождением перемещающихся ионосферных возмущений, обусловленных распространением внутренних гравитационных волн во время суббурь [4, 21, 34, 35]. Наконец, быстрые изменения высоты $hmF2$, V_z и $NmF2$ могут быть вызваны нестационарностью магнитосферных электрических полей и их проникновением в средние широты [26, 27]. Так, увеличение $hmF2$ примерно на 90 км в течение 03:30—04:00 (без учета изменения $hmF2$ за счет расслоения профиля N_e) могло быть вызвано импульсом электрического поля над Харьковом с зональной составляющей $E_y \approx 20 \text{ мВ/м}$, направленной на восток.

В магнитосфере этим событиям предшествовали высокая суббуревая активность вблизи полуночи 29—30 мая, а также поворот Bz к северу и резкий спад динамического давления солнечного ветра около 02:00.

Обратимся к вариациям T_e и T_i . В течение главной фазы магнитной бури наблюдался необычный нагрев плазмы. При этом температура электронов в ночь 29—30 мая превысила 2000—3200 К, а ионов — 1200—2400 К на высотах 300—800 км. Такое явление в наших широтах наблюдалось крайне редко, так как в спокойных условиях ночью $T_e \approx T_i \approx 800 \text{ К}$.

Известно, что увеличение T_e во время бури объясняется рядом причин. Среди них джоулев нагрев, связанный с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты, выпадение энергичных частиц, которые приводят к усилению ионосферных динамо-токов, и уменьшение охлаждения электронов при низких значениях N_e [4, 19]. О наличии этих факторов свидетельствовали высокая суббуревая активность в ночь 29—

30 мая, которая сопровождалась усилением авроральных электроструй и высокими значениями индекса $AE = 2000...2500$ нТл. Усиление потоков энергичных частиц (протонов и электронов) регистрировалось на спутниках GOES-8 и GOES-12 на протяжении более суток (рис. 1 и 2).

Увеличение T_i объясняется теми же процессами джоулевой диссипации ионосферных токов, которые вызвали увеличение T_e . Определенный вклад может вносить также фрикционный нагрев за счет трения о нейтральный газ ионов, быстро движущихся под действием электрических полей [19, 39]. Перечисленные эффекты, которые мы наблюдали, например, в течение бури 25 сентября 1998 г., могут объяснить нагрев плазмы на нескольких сотен кельвин [6, 13, 24].

Во время рассматриваемой бури ночью температура плазмы увеличилась более чем на 1000 К. Столь необычный нагрев плазмы, по-видимому, мог быть связан все с тем же смещением к экватору главного ионосферного провала, а вместе с ним приближением к Земле плазмопаузы и «горячей зоны», в которой температура плазмы повышена до нескольких тысяч кельвин. Приток тепла из горячей зоны вдоль силовых линий магнитного поля за счет теплопроводности электронов вызывает нагрев плазмы в $F2$ -области, где часть тепла расходуется, например, на возбуждение колебательных уровней молекул N_2 . Последнее, как отмечалось выше, также ускоряет потери ионов O^+ и способствует дальнейшему уменьшению электронной концентрации в $F2$ -слое. Смещению главного ионосферного провала и горячей зоны на меньшие L -оболочки, по-видимому, способствовала высокая геомагнитная активность, при которой в ночь 29—30 мая зарегистрированы подряд три 3-часовых периода со значением индекса $Kp = 8$.

Далее обсудим особенности необычного квазипериодического возмущения скорости V_z в восходный период. Отметим, что вариации V_z коррелировали с изменением высоты $hmF2$ с небольшим опережением (около 30 мин). Кроме того, наблюдалось запаздывание максимума возмущения V_z при уменьшении высоты. Так, на высотах 600, 300 и 200 км максимум был зарегистрирован в 02:40, 02:50 и 03:15 соответственно. Отметим также, что изменения V_z опережали вариации N_e приблизительно на 50 мин. Можно предположить, что возмущения V_z , $hmF2$ и N_e имели общую физическую природу. Их источником мог быть импульс электрического поля над Харьковом, связанный с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты во время бури [26—28]. Рис. 16 иллюстрирует

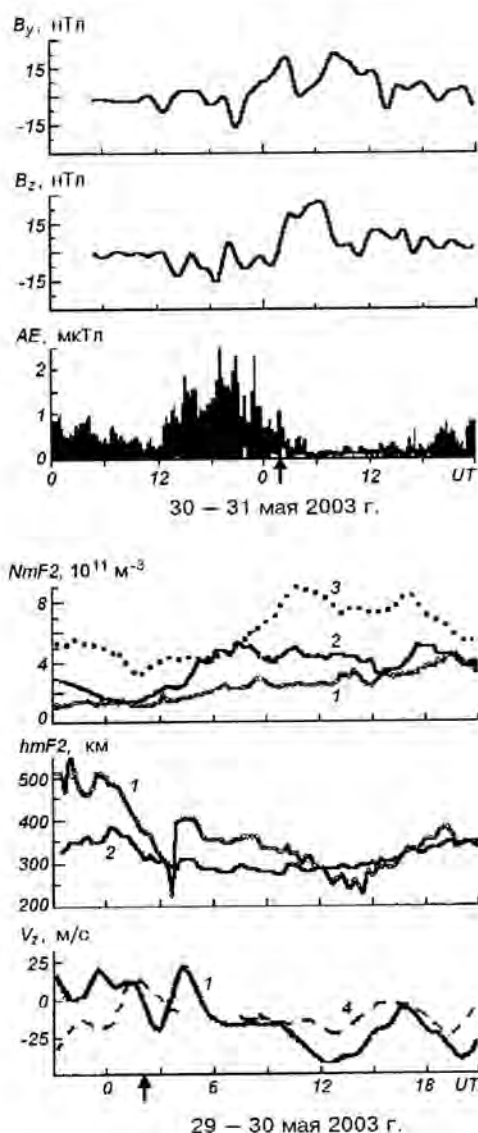


Рис. 16. Вариации B_y -, B_z -составляющих ММП, AE -индекса, а также параметров $NmF2$, $hmF2$ и V_z : 1 — во время магнитной бури 29—30.05.03, 2 — в магнитоспокойный день 26—27.05.98 в Харькове, 3 — в контрольный день, 4 — 23—24.06.98. Стрелкой отмечено время прохождения импульса электрического поля и его отклика в ионосфере

дестабилизирующие эффекты магнитосферных электрических полей в поведении параметров N_e , $hmF2$ и V_z ионосферы средних широт, а также их возможную связь с индексом AE и компонентами ММП. Следует учесть также вклад в величину запаздывания возмущения на разных высотах процессов образования, потерь и переноса плазмы.

Обсудим вариации относительной концентрации ионов H^+ . Особенностью поведения ионного состава во внешней ионосфере во время магнитной бури явилось уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ в течение главной фазы бури в ночь 29—30 мая более чем на порядок величины по сравнению со спокойной датой. Это уменьшение, по-видимому, связано с опустошением магнитной силовой трубки, проходящей над Харьковом, за счет деформации магнитосферы и смещения главного ионосферного провала вместе с провалом легких ионов в средние широты во время бури [4, 10, 17, 38]. Подобный эффект наблюдался нами, например, во время магнитной бури 18—19 февраля 1999 г. ($A_p = 54$, $K_p = 7$), когда ионы H^+ были зарегистрированы на высотах ниже 1000 км только после полуночи, и концентрация их была в 1.5 раза ниже, чем в спокойный день [14].

Днем 30 мая на высотах 1200—1500 км отмечалось увеличение $N(H^+)/N_e$ до значений 0.2—0.7, которое превысило ночные значения примерно в 1.2 раза. Увеличение $N(H^+)/N_e$ днем свидетельствовало о начавшейся стадии наполнения геомагнитной силовой трубки после главной фазы магнитной бури (фаза восстановления магнитной бури началась около 03:00) и постепенном росте концентрации ионов H^+ . В то же время в спокойный день значение $N(H^+)/N_e \approx 0.2$ наблюдалось примерно на высоте 800 км, т. е. гораздо ниже, чем 30 мая. Это значит, что днем $N(H^+)/N_e$ не достигла уровня, который предшествовал началу магнитной бури. Этого и следовало ожидать, поскольку процесс наполнения магнитных силовых трубок протекает медленно с характерным временем, пропорциональным L^4 [4, 10, 17]. В работе [11] показано, что время наполнения трубки до величины $N(H^+)$ в максимуме профиля порядка 80 % от предельного стационарного значения составляет около 10 ч для $L \approx 2.5$. Для $L \approx 2$ оно близко к 4 ч.

Обратимся к вариациям температуры нейтралов. Расчеты показали, что в течение главной фазы магнитной бури ($A_p = 89$, $K_p = 8$), когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F , на высотах 220—470 км $T_n \approx 1000$ —1350 К. В следующую ночь, во время фазы восстановления магнитной бури ($A_p = 17$, $K_p = 5$), на этих же высотах значения T_n уменьшились до 800—1000 К.

Увеличение T_n в период бури вызывают ряд процессов [32]. Один из них связан с высокоширотным нагревом термосферы за счет джоулевой диссипации магнитосферных электрических полей и высыпавшихся энергичных частиц в авроральной

зоне. Перенос нагретого нейтрального газа из высоких широт к экватору осуществляется за счет усиления меридиональной скорости термосферного ветра. Такой перенос тепла является нелокальным источником нагрева среднеширотной термосферы [8, 12, 32]. Другой процесс связан с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты и высыпанием энергичных частиц из магнитосферы. В этом случае нагрев нейтральной атмосферы носит локальный характер [32]. При этом существенную роль может играть фрикционный нагрев нейтрального газа за счет ион-нейтрального трения [19]. Последний обусловлен разностью скоростей нейтрального ветра и $E \times B$ -дрейфа ионов. Он может привести к увеличению T_n во время бури на нескольких сотен кельвин [19, 23, 33]. Кроме того, нагрев T_n может быть результатом притока тепла из горячей зоны плазмосферы.

Во время главной фазы магнитной бури 30 мая высота термпаузы увеличилась не менее чем до 400 км, тогда как в спокойный день 19—20 мая 1998 г. она составляла около 300 км. Это свидетельствует о нагреве и расширении нейтральной атмосферы.

Теперь обсудим вариации потоков тепла. Подвод энергии к электронному газу Q/N_e и поток тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, характеризуют особенности теплового режима разных областей ионосферы. Температура электронов в области F ионосферы определяется процессами нагрева, охлаждения и переноса потока тепла. Уравнение теплового баланса электронного газа в стационарных условиях имеет вид [5, 42]:

$$\sin^2 I \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \sum Q_e - \sum L_e = 0,$$

где $\sum Q_e$ — скорость нагрева тепловых электронов фотоэлектронами, $\sum L_e$ — суммарные потери энергии при упругих и неупругих столкновениях тепловых электронов с ионами и нейтралами.

В нижней части ионосферы ($h \leq 300$ км) длина свободного пробега сверхтепловых электронов гораздо меньше приведенной высоты нейтральной атмосферы, и они теряют свою энергию непосредственно в области образования. Здесь имеет место локальный нагрев тепловых электронов в процессе кулоновского взаимодействия с фотоэлектронами. Подвод энергии Q/N_e к электронному газу в этом случае рассчитывался из условия баланса нагрева тепловых электронов и потерь их энергии в упругих и неупругих столкновениях с ионами и нейтралами (атомами O).

В верхней части области F член с дивергенцией потока тепла Π_T начинает преобладать над осталь-

ными членами уравнения теплового баланса электронов. Тепло переносится в ионосферу из плазмосферы за счет теплопроводности электронного газа. Накопление тепла в плазмосфере происходит за счет термализации в ней сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования (ниже максимума слоя F) во внешнюю ионосферу.

Расчеты показали, что в возмущенный день вблизи полудня значение Q/N_e уменьшилось по сравнению со спокойным днем 26—27 мая 1998 г. почти в 1.6 раза (рис. 13). Уменьшение локального нагрева электронного газа привело к увеличению потока энергии, переносимой фотозлектронами из области F вдоль магнитных силовых линий в плазмосферу. Избыточная энергия, переносимая фотозлектронами, вызывает дополнительный нагрев плазмосферы и объясняет увеличение теплового потока Π_T в возмущенный день. Оно составляет примерно 1.2 раза по сравнению со спокойным днем (рис. 14). Эти результаты согласуются с другими данными [31, 33]. Они соответствуют также представлениям о взаимодействии процессов, контролирующих тепловой баланс ионосферы и плазмосферы во время бури [4, 10, 16].

Особенностью теплового режима ионосферы в период главной фазы магнитной бури (в ночь 29—30 мая) является увеличение значений скорости нагрева электронного газа Q/N_e и потока тепла Π_T , переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. В спокойный день эти значения близки к нулю. Такое явление связано с необычным нагревом плазмы в ночное время, когда в течение главной фазы магнитной бури температуры T_e и T_i достигли практически дневных величин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлены результаты наблюдения и компьютерного моделирования поведения внешней ионосферы и протоносферы над Харьковом во время сверхсильной магнитной бури 29—31 мая 2003 г. ($A_p = 89, 49, 17$), вызвавшей сильнейшую отрицательную ионосферную бурю. Результатом бури явились редкие для средних широт изменения структуры, динамики и теплового режима верхней атмосферы Земли, которые сводятся к следующему.

1. Выявлено значительное (до четырех раз) уменьшение электронной концентрации в области F ионосферы и необычный нагрев плазмы (ионов и электронов) до 2400—3200 К в течение главной фазы магнитной бури (в ночь 29—30 мая, $K_p = 8$). Одной из причин таких изменений могла быть

деформация магнитосферы, сопровождаемая, по-видимому, смещением главного ионосферного провала в средние широты, а также горячей зоны вместе с плазмопаузой на меньшие L -оболочки. Результатом необычного нагрева плазмы могло быть увеличение вклада колебательного возбуждения молекул $N_2(v)$ в ускорение реакции потерь ионов O^+ и уменьшение N_e в слое $F2$.

2. Зарегистрировано увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя $F2$, которое в главную фазу бури достигло 160 км. В качестве одной из причин подъема слоя $F2$, наряду с эффектами расширения термосферы, усиления меридиональной скорости термосферного ветра к экватору и смещения к экватору главного ионосферного провала, рассматриваются эффекты проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (более суток) усиления потоков протонов и электронов, которые имели значение около $10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Высыпания энергичных частиц могли привести к повышению проводимости нижележащей ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации. Оценка сверху зональной составляющей электрического поля E_y над Харьковом по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения поля 25 мВ/м ночью и 20 мВ/м днем.

3. Обнаружено уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ более чем на порядок величины ночью, в течение главной фазы бури, по сравнению со спокойной датой. Это уменьшение, вероятно, связано с опустошением магнитной силовой трубки, проходящей над Харьковом. Оно могло быть результатом смещения в средние широты главного ионосферного провала и провала легких ионов за счет усиления электрического поля магнитосферной конвекции.

4. Отмечено увеличение $N(H^+)/N_e$ до значений 0.2—0.7 на высотах 1200—1500 км в дневное время 30 мая, когда имела место уже фаза восстановления магнитной бури (она зарегистрирована с 03:00). Увеличение $N(H^+)/N_e$ свидетельствовало о начавшейся стадии наводнения геомагнитной силовой трубки после главной фазы магнитной бури и постепенном увеличении концентрации ионов H^+ . Сравнение со спокойной датой показало, что 30 мая дневное значение $N(H^+)/N_e$ не достигло уровня, который предшествовал началу магнитной бури.

5. Зарегистрировано необычное квазипериодическое возмущение скорости V_z в восходный период на фоне нарушения утреннего нарастания $NmF2$, резкого перепада высоты $hmF2$ вниз — вверх и деформации слоя. Эти события могли стать резуль-

татом наложения эффектов от различных источников в условиях геомагнитных возмущений. Одним из них могло быть проникновение в средние широты импульса электрического поля с составляющей $E_y \approx 20$ мВ/м, направленной на восток. Его источником в магнитосфере мог стать наблюдавшийся резкий поворот Bz -составляющей ММП с юга на север и изменение динамического давления солнечного ветра.

6. Расчеты показали, что в течение главной фазы магнитной бури, в ночь 29–30 мая ($Ap = 89$, $Kp = 8$), когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F , температура T_n составляла 1000–1350 К на высотах 220–470 км. В следующую ночь, во время фазы восстановления магнитной бури ($Ap = 17$, $Kp = 5$), значения T_n уменьшились на 200–350 К на этих же высотах. Нагрев термосферы привел к ее расширению и росту высоты термопаузы не менее чем до 400 км в течение главной фазы бури; в спокойный день ее высота составляла около 300 км.

7. Установлено на основе расчетов, что в возмущенный день вблизи полудня скорость нагрева электронного газа Q/N_e уменьшилась по сравнению со спокойным днем в 1.6 раза. Это привело к увеличению потока тепла Π_T в 1.2 раза. Особенностью теплового режима ионосферы во время главной фазы магнитной бури (в ночь 29–30 мая) стало увеличение значений Q/N_e и потока тепла Π_T , переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. В спокойных условиях эти значения в ночное время близки к нулю. Дана интерпретация этих эффектов в свете представлений о взаимодействии процессов, контролирующих тепловой баланс ионосферы и плазмосферы во время бури.

8. Сверхсильная геокоsmическая буря вызвала целый комплекс процессов, сопутствовавших возмущениям плазмы, электрических и магнитных полей в различных областях околоземного пространства. Эффекты этих возмущений, накладываясь друг на друга, создавали сложную и динамическую картину поведения параметров геомагнитного поля, ионосферы и термосферы.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, В. Н. Лысенко и И. Б. Складкову за проведение измерений.

1. Афраймович Э. Л., Косоголов Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2002.—42, № 4.—С. 491–498.

2. Боговский В. К., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Особенности вариаций параметров ионосферы во время геокоsmической бури 30 мая 2003 года // Сб. тез.: Третья Украинская конференция по перспективным коsmическим исследованиям. — Каптивели, Крым, 2003.—С. 142.

3. Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И. Солнечно-циклические вариации концентрации ионов водорода во внешней ионосфере // Коsmічна наука і технологія. Додаток до журналу.—2003.—9, № 2.—С. 164–172.

4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.

5. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6–30.

6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиопизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57–94.

7. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокоsmической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года. // Коsmічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 12–25.

8. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F_2 . Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация.—1985.—25, № 5.—С. 705–721.

9. Кияшко Г. А., Григоренко Е. И. Особенности высотного-временного распределения ионов водорода над Харьковом // Вестник ХГПУ.—2000.—103.—С. 45–47.

10. Крибберг И. А., Тацилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.—190 с.

11. Сасенко Ю. С., Клименко В. В., Намгаладзе А. А. Исследование процессов наполнения и опустошения плазменного трубопровода с учетом инерции ионов // Геомагнетизм и аэронавигация.—1982.—22, № 6.—С. 948–952.

12. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация.—1982.—22, № 5.—С. 776–781.

13. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация.—2001.—41, № 5.—С. 659–666.

14. Таран В. И., Григоренко Е. И. Ионосферно-протоионосферные процессы во время естественных возмущений по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния // Сб. тр. первой Украинской конференции по перспективным коsmическим исследованиям. — 2001.—С. 119–124.

15. Таран В. И., Григоренко Е. И., Кияшко Г. А. Особенности поведения ионов водорода во внешней ионосфере над Харьковом в период высокой солнечной активности // Вестник нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт». Сб. науч. тр.—2001.—Вып. 4.—С. 258–260.

16. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1968.—С. 292–352.

17. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. Calculated daily variations of O^+ and H^+ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results // J. Atmos. Terr. Phys.—1979.—41.—P. 471–482.

18. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577–584.

19. 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.

20. Buonsanto M. J. A case study of the ionospheric storm dual effects // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A12.—P. 23.857–23.869.

21. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci.

- Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
22. 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.
 23. Buonsanto M. J., Pohlman L. M. Climatology of neutral exospheric temperature above Millstone Hill // *J. Geophys. Res.*—1998.—103, N A10.—P. 23.381—23.392.
 24. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17—24 August 2002. P. 2280.
 25. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // *Planet. Space Sci.*—1968.—16.—P. 125—132.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.*—1994.—99, N A4.—P. 5771—5792.
 30. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // *J. Geophys. Res.*—1987.—92, N A5.—P. 4649—4662.
 31. Mahajan K. K., Pandey V. K. Model of electron temperature in the topside ionosphere for low and medium solar activity conditions // *J. Geophys. Res.*—1980.—85.—P. 213—216.
 32. 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.
 33. Mikhailov A. V., Furstner 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.
 34. 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.
 35. 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 No. 20. Spring Meeting. S 291, San Francisco, USA, May 15, 2001.
 36. 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.
 37. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5—11 June 1991 storm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*—1999.—61.—P. 263—279.
 38. Richards P. G., Torr D. D. Seasonal, diurnal and solar cyclical variations of the limiting H^+ flux in the Earth's topside ionosphere // *J. Geophys. Res.*—1985.—90, N A6.—P. 5261—5268.
 39. 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.
 40. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // *Space Res.*—1973.—13.—P. 267—286.
 41. Salah J. E., Evans J. V., Alcaydn D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin // *Ann. Geophys.*—1976.—32, fasc. 3.—P. 257—266.
 42. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // *Rev. Geophys. Space Phys.*—1978.—16, N 3.—P. 355—399.

THE SEVERE GEOMAGNETIC STORM ON 30—31 MAY 2003: RESULTS OF MEASUREMENTS AND SIMULATION

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

We present some results of observations and simulation of the F region and topside ionosphere response to the 30—31 May 2003 severe geomagnetic storm (maximum index $K_p = 8$). Effects of well-pronounced negative ionosphere disturbance are revealed which are rarely observed in the midlatitude ionosphere concerning to the inner plasmasphere ($L \approx 2$ for Kharkov). They point to the convection of the midlatitude trough, light ion trough and hot zone together with the plasmopause up to the latitude of Kharkov. Our simulation and study of the effects of thermospheric disturbances as well as the thermal regime of neutral and charged components of the upper Earth's atmosphere showed their significant changes during the storm. The observations are carried out with the Kharkov incoherent scatter radar.