

УДК 550.388, 520.16 + 523.31 + 523.9 : 520.86

И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов¹, С. А. Пазюра¹, С. В. Харитонова¹, Л. Ф. Черногор^{1,2}

¹ Институт ионосферы Национальной академии наук та Министерства освіти і науки України, Харків

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ В ТЕЧЕНИЕ ВЕСЬМА УМЕРЕННОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 20—21 ЯНВАРЯ 2010 г.

Наведено результати аналізу варіацій параметрів геокоосмічної плазми у період вельми помірної магнітної бурі 20—21 січня 2010 р. Магнітна буря супроводжувалася іоносферним збуренням з негативною фазою. Спостереження проведено за допомогою радара некогерентного розсіяння у Харкові. Знайдено кількісні показники збурень.

ВВЕДЕНИЕ

О воздействии геокоосмических бурь на технические, природные и биологические объекты известно давно. То разнообразие глобальных процессов, которое геокоосмическая буря приносит с собой на нашу планету, делает её интересной и актуальной для научного исследования. Сильные вариации магнитного поля Земли во время геокоосмических бурь создают наведенные токи на поверхности Земли, могут вызвать возрастание скорости конвекции плазмы, усиление магнитосферно-ионосферных электрических полей, развитие кольцевого тока и другие процессы. Геомагнитные возмущения сопровождаются возмущениями в верхней атмосфере, ионосфере и электрическом поле атмосферно-ионосферно-магнитосферного происхождения.

В результате геокоосмических бурь могут возникнуть сбои в работе систем навигации и радиосвязи, средств телекоммуникации, мощных энергосистем и др. Многообразие физических и химических процессов в периоды геокоосмических бурь и сложность их взаимодействия затрудняют прогнозирование состояния возмущенной ионосферы. По существу каждая буря является индивидуальной. Классификация бурь проводится по их интенсивности, характеру и величине

не относительных возмущений параметров среды [7, 8, 19 — 21, 25].

Радар в Харькове является единственной установкой некогерентного рассеяния (НР) в среднеширотной Европе, предназначенной для получения параметров ионосферы в невозмущенных и возмущенных условиях. Уже на протяжении трех циклов солнечной активности (СА) на этом радаре проводятся наблюдения состояния ионосферной плазмы и космической погоды [3, 5, 7, 11, 13]. Благодаря своему географическому положению (геомагнитная широта 45.4°, параметр Мак-Илвейна $L \approx 1.9$) он исключительно удачно дополняет мировую сеть радаров НР и дает возможность исследовать эффекты, связанные с процессами ионосферно-магнитосферного взаимодействия глубоко во внутренней плазмосфере, в том числе широтно-долготные эффекты в развитии бури.

Умеренные ионосферные бури возникают значительно чаще, чем сильные, но остаются менее изученными. Сильные ионосферные бури происходят сравнительно редко (как правило, вблизи периода максимальной СА и вскоре после него). Их исследованию уделялось и уделяется основное внимание. Эффекты умеренных ионосферных бурь остаются малоизученными.

Целью работы является сравнительный анализ динамических процессов в ионосфере в течение 20 — 21 января 2010 г. с динамическими

© И. Ф. ДОМНИН, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, С. А. ПАЗЮРА,
С. В. ХАРИТОНОВА, Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2011

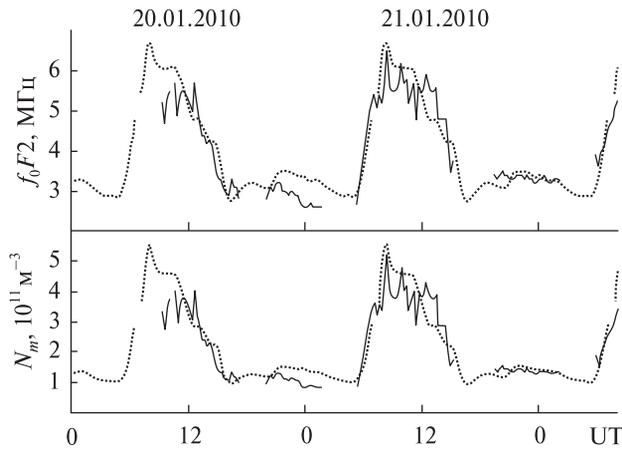


Рис. 2. Вариации критической частоты f_0F2 и концентрации электронов N_mF2 в максимуме слоя $F2$ в течение 20 — 21 января 2010 г. (линия) и в контрольный день (точки), полученные при усреднении данных за 13 — 14 декабря 2009 г.

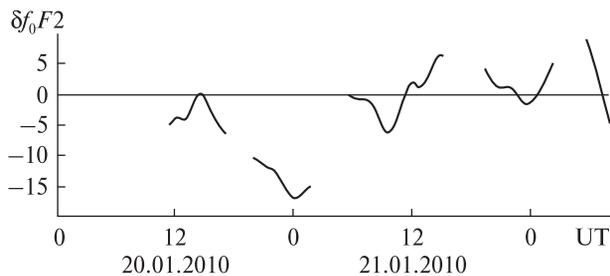


Рис. 3. Временная зависимость относительного отклонения критической частоты δf_0F2 во время ионосферного возмущения 20 — 21 января 2010 г.

процессами, сопровождавшими магнитные бури большой интенсивности. Магнитная буря (МБ) 20—21 января 2010 г. интересна тем, что она имела место вскоре после продолжительного минимума СА.

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Параметры, определяющие состояние космической погоды 20 — 22 января 2010 г., приведены на рис. 1. До 20 января геомагнитное поле было спокойным. Скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с. Примерно в 15:00 (здесь и далее UT) 20 января B_z -составляющая межпланетного магнитного поля (ММП) резко повернула к югу, достигла значения -8.3 нТл, оставаясь

отрицательной до 18:00. В этот период скорость солнечного ветра постепенно увеличивается до 400 км/с, а в 13:00 20 января наблюдается более резкое увеличение V_{sw} до 400 км/с. После этого продолжалось постепенное увеличение скорости до 500 км/с. 20 января зарегистрированы также увеличения температуры T (до $2.7 \cdot 10^5$ К), концентрации n_{sw} (до $36 \cdot 10^6$ м $^{-3}$) солнечного вещества и динамического давления p_{sw} , которое достигло 10 нПа. Значение энергии солнечного ветра, передаваемой магнитосфере Земли в единицу времени (функция Акасофу), было невелико ($\epsilon \approx 10 - 22$ ГДж/с). Результатом этих событий стало возникновение весьма умеренной (по классификации [4]) магнитной бури 20 — 21 января 2010 г. с экстремальными значениями индексов $AE = 680$ нТл, $D_{st} = -38$ нТл и $K_p = 4$. Буря началась внезапно 20 января около 13:30. Главная фаза продолжалась до 22:30 20 января, а фаза восстановления наблюдалась до конца периода измерений.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Радар некогерентного рассеяния. Наблюдения поведения основных параметров ионосферной плазмы проводились на харьковском радаре некогерентного рассеяния (НР), расположенного в обсерватории Института ионосферы (географические координаты: 49.6° N, 36.3° E, геомагнитные координаты: +45.4°, 117.7°). Подробное описание радара и режимов его работы дано в работах [9, 18].

20 — 22 января 2010 г. радар НР работал в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 130 и 660 мкс на частотах f_1 и $f_1 \pm 100$ кГц, где $f_1 \approx 158$ МГц. Применение такого режима работы обеспечивает высотное разрешение примерно 20 и 100 км в диапазонах высот $h = 100 \dots 400$ и $h = 200 \dots 1000$ км соответственно.

Ионозонд «Базис». С помощью ионозонда получают ионограммы вертикального зондирования, которые применяются для измерения критической частоты f_0F2 слоя $F2$ ионосферы, калибровки получаемого методом НР профиля электронной концентрации и оперативного анализа состояния космической погоды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариации критической частоты. На рис. 2 изображены временные вариации критической частоты f_0F2 и электронной концентрации N_mF2 в максимуме слоя $F2$ в течение 20 — 21 января 2010 г., которые получены из ионограмм через 15-мин интервалы. Значения для контрольного дня были получены при усреднении данных в магнитоспокойные сутки 13 — 14 декабря 2009 г. Кривая для контрольного дня построена скользящим усреднением на интервале 45 мин с шагом в 15 мин. Для 20 — 22 января график критических частот сглажен на интервале 45 мин с шагом в 15 мин.

20 января, когда началась магнитная буря, зарегистрировано уменьшение концентрации электронов N_mF2 до 30 %, а во время отрицательной фазы слабого возмущения значения N_mF2 уменьшились примерно на 34 %. 21 января уже наблюдается восстановление концентрации электронов, и уменьшение составило до 1.1 — 1.2 раз (см. рис. 2).

Относительное отклонение критической частоты рассчитано по формуле:

$$\delta f_0F2 = \frac{f_0F2 - f_0^0F2}{f_0^0F2} \cdot 100\%,$$

где f_0F2 — критическая частота в максимуме слоя $F2$ во время магнитной бури, а f_0^0F2 — в спокойный день. Временная зависимость относительного отклонения критической частоты во время ионосферного возмущения 20 — 21 января изображена на рис. 3. Изменения δf_0F2 были рассчитаны с применением скользящего усреднения отклонения критической частоты на интервале 315 мин с шагом в 15 мин. Из рис. 3 видно, что в ночь с 20 на 21 января наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение с максимальным отклонением критической частоты до 17 %.

Вариации концентрации электронов. Концентрация электронов N_e в максимуме области $F2$ в дневное время, как известно, определяется тремя основными процессами: ионизацией, рекомбинацией и переносом плазмы (за счет амбиполярной диффузии, термосферного ветра и дрейфа в

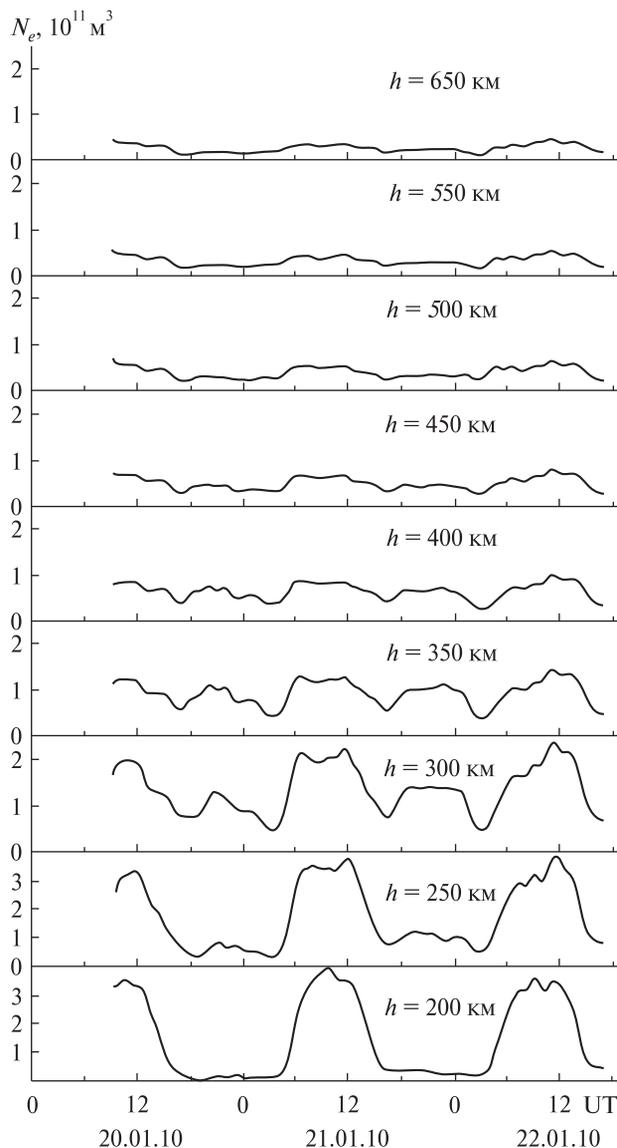


Рис. 4. Временные вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах

скрещенных электрическом и геомагнитном полях), а в ночное время N_e поддерживается за счет нисходящего потока плазмы из протоносферы.

Временные вариации концентрации электронов, измеренные радаром НР в диапазоне высот $h = 200 \dots 600$ км, представлены на рис. 4. Во время ионосферного возмущения, в ночь с 20 на 21 января, на высотах 200 — 250 км (где находился в этот период максимум слоя $F2$) уменьшение N_e составило 32 — 37 %. А 21 января уже нача-

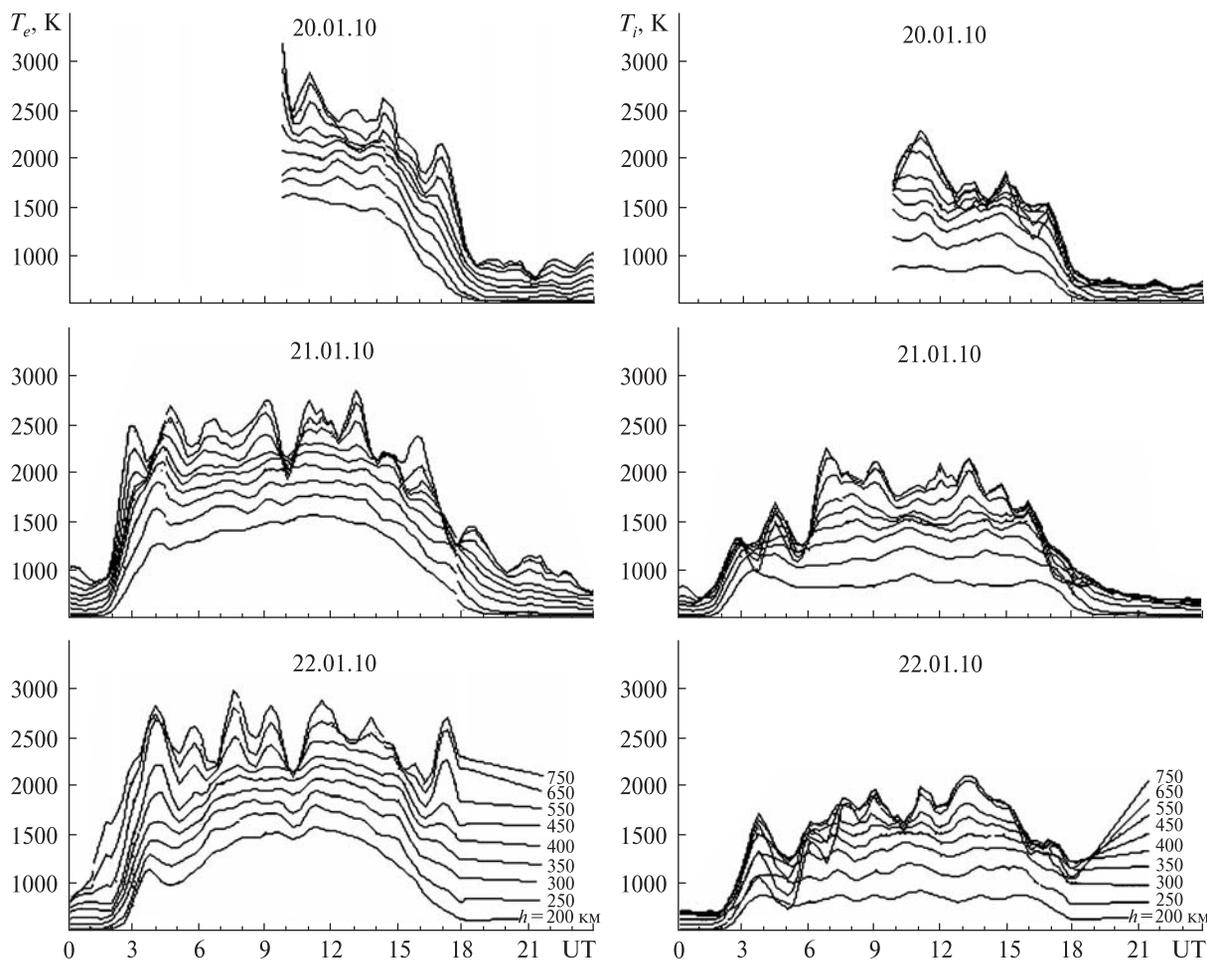


Рис. 5. Вариации температур электронов T_e (слева) и ионов T_i (справа) в период с 20 по 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

лось постепенное восстановление, которое продолжалось до конца измерений.

Вариации температуры электронов и ионов. В минимуме СА в спокойной ионосфере изменения температуры электронов T_e характеризуются быстрым увеличением во время восхода Солнца, уменьшением T_e около полудня (за счет увеличения скорости передачи тепла от электронов к ионам, которая пропорциональна N_e^2) и снижением T_e после захода Солнца. В целом температуры электронов и ионов испытывают значительные суточные и сезонные вариации в период минимума солнечной активности [14].

На рис. 5 представлены временные вариации температур электронов и ионов с 20 по 22 янва-

ря 2010 г. Во время возмущения в ночь с 20 на 21 января наблюдалось увеличение температуры электронов по сравнению с последующей ночью. На высоте 200 км T_e увеличилась всего лишь на несколько градусов, а на $h = 750$ км — до 200 К. Около полудня 20 января на высоте 200 км температура электронов составила 1650 К, а 21 и 22 колебалась около 1500 К. Видно, что T_e претерпевала значительные суточные вариации, но характерный локальный минимум около полудня был достаточно хорошо выражен [14].

Во время возмущения температура ионов T_i изменялась незначительно. Максимальное увеличение до 50 К зафиксировано на высоте 750 км. T_i увеличивалась с восходом Солнца, в дневные

часы достигла максимальных значений и после захода Солнца уменьшилась. В околополуденные часы ионосферные возмущения слабо повлияли на нагрев ионов.

Из рис. 4 и 5 видно, что в течение отрицательного ионосферного возмущения (ночью с 20 на 21 января) уменьшение концентрации электронов N_e сопровождалось увеличением температуры электронов T_e и ионов T_i . Такой необычный нагрев плазмы в средних широтах – редкое явление.

Вариации скорости движения ионосферной плазмы. На рис. 6 представлены временные вариации вертикальной составляющей скорости ионосферной плазмы V_z для ряда высот ионосферы в период с 20 по 22 января 2010 г. Видно, что на этих высотах движение плазмы было в основном нисходящим ($V_z < 0$) в течение всего периода измерений. Во время ионосферного возмущения 20 и 21 января наблюдались флуктуации скорости V_z . Первое отклонение скорости в сторону увеличения ее абсолютного значения имело место приблизительно с 15:00 до 17:30 – 18:00 на высоте 308 км и выше. Например, на высоте 308 км значение V_z изменилось с -61 м/с в 15:00 до -69 м/с в 16:00, а затем восстановилось в 17:15 до ожидаемого в это время в отсутствие возмущения значения -50 м/с. Начало отклонения близко к моменту поворота B_z -составляющей межпланетного магнитного поля к югу. Можно предположить, что есть корреляция вариаций V_z и B_z -компонента межпланетного магнитного поля. Отметим, однако, что для зимней ионосферы приблизительно в это же время обычно начинает проявляться вечерний экстремум скорости (увеличение модуля отрицательных значений V_z).

Уменьшение модуля скорости нисходящего движения плазмы, а затем его восстановление наблюдалось на всех высотах с 21:00 до 23:00. С увеличением высоты эффект проявлялся отчетливее.

Наибольший эффект имел место при переходе от ночного к утреннему времени. На фоне обычного утреннего изменения V_z (приблизительно с 01:30 до 08:00 с экстремумом около 06:00) наблюдалось заметное увеличение абсолютной ве-

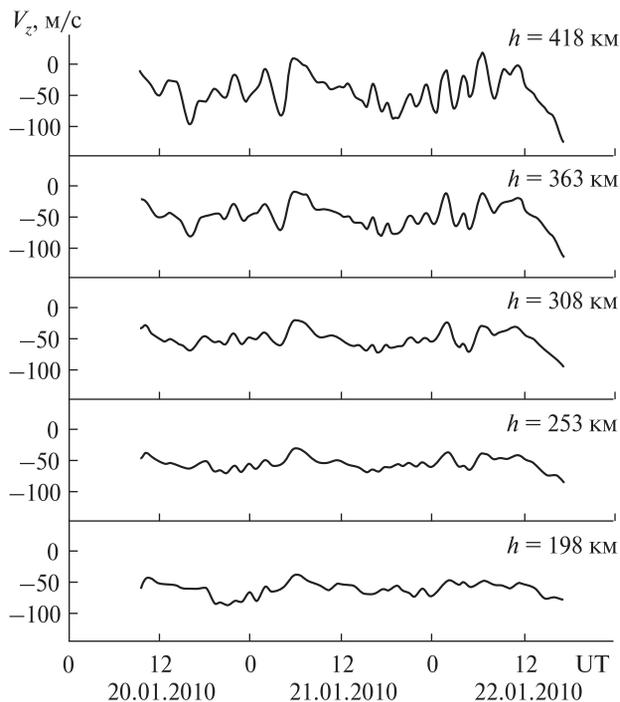


Рис. 6. Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z на фиксированных высотах в период 20 – 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

личины скорости нисходящего движения плазмы с 01:45 до 03:45, а затем ее уменьшение до достижения приблизительно в 06:00 характерных для данного времени значений скорости от -40 до $+11$ м/с для $h = 198 \dots 418$ км (см. рис. 6). Наблюдаемое изменение скорости симметрично относительно экстремума ее отклонения, величина которого увеличивается с высотой (если на высоте 198 км амплитуда колебания V_z составляла 18 м/с, то на высоте 418 км она достигла величины 82 м/с). На малых высотах максимальное по модулю отклонение V_z возникало раньше, чем на больших: для высот 253 км и 418 км отличие во времени составляет 30 мин. Подобное, но уже менее выраженное отклонение наблюдалось и утром 22 января приблизительно в такое же время. В дневное время 20, 21 и 22 января флуктуации V_z незначительны, а поведение скорости характерно для зимней дневной среднеширотной ионосферы [15, 16].

В табл. 1 приведены значения скорости V_z и вычисленные значения плотности потока плазмы $\Pi = V_z \cdot N_e$ для высоты 300 км в характерные моменты времени: в 12:00 до возмущения (20 января) и на разных этапах фазы восстановления (21 и 22 января), в 20:00 20 января во время главной фазы бури и в такое же время 21 января на фазе восстановления, а также в 00:00 21 января при максимальном по модулю значении отклонения критической частоты $\delta f_0 F2 \approx -17\%$ (см. рис. 3) и в 00:00 22 января при $\delta f_0 F2 \approx -2\%$. Из табл. 1 видно, что вблизи полудня отличия скорости незначительны, величина плотности потока ионов в первые сутки фазы восстановления изменилась всего на 17%, а во вторые сутки достигла уровня, который был до наступления бури. В ночное время отличия скорости были также незначительны, при этом абсолютная величина скорости плазмы во время главной фазы и в начале фазы восстановления на 6–7 м/с меньше модуля V_z в последующие сутки (ближе к концу фазы восстановления). Плотность потока ионов при этом отличалась на 45% для 20:00 и на 74% для 00:00 в основном за счет отличия значений концентрации электронов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Подвод энергии к электронам. Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \leq 350$ км) из-за малости длины свободного пробега носит локальный характер. Выше 200 км основными механизмами охлаждения электронного газа являются

кулоновские соударения с ионами, а также возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [1, 33]. Уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае для диапазона высот 200–350 км в системе СИ имеет вид [24, 25]

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

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

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

где Q — энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода, $N(O)$ — концентрация этих атомов.

Результаты расчетов энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, и составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e и нейтралами L_e/N_e представлены на рис. 7. При расчетах использовались значения температур электронов T_e и ионов T_i , концентрации электронов N_e , полученные методом НР. Температура нейтралов T_n и концентрация атомов кислорода $N(O)$ взяты из модели NRLMSIS-00 [28].

Вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был разным для каждого дня (см. рис. 7). 21 января, когда уже закончилась главная фаза МБ и началась фаза восстановления, вблизи местного полудня наблюдалось небольшое уменьшение (до 1.2 раз)

Таблица 1. Значения вертикальной составляющей скорости V_z и плотности потока Π плазмы на высоте 300 км в характерные моменты времени 20–21 января 2010 г.

UT	12:00			20:00		0:00	
Дата, январь 2010	20	21	22	20	21	21	22
Фаза бури и условия	Спокойное состояние	Фаза восстановления	Фаза восстановления	Главная фаза	Фаза восстановления	Фаза восстановления $\delta f_0 F2 \approx -17\%$	Фаза восстановления $\delta f_0 F2 \approx -2\%$
V_z , м/с	–49	–50	–41	–54	–60	–47	–54
N_e , 10^{11} м^{-3}	1.92	2.21	2.33	1.08	1.40	0.88	1.36
Π , $10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	–9.4	–11.0	–9.6	–5.8	–8.4	–4.2	–7.3

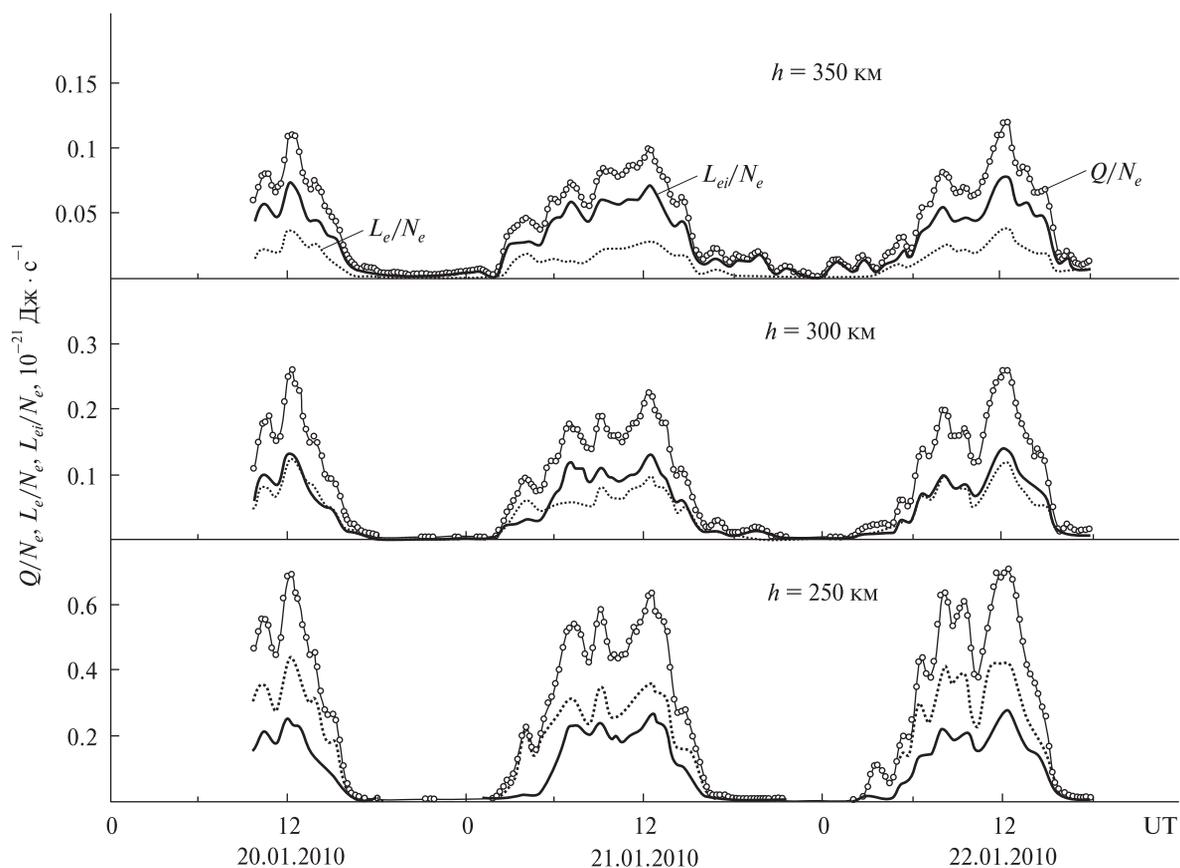


Рис. 7. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа (Q/N_e) и теплообмена электронов с ионами (L_{ei}/N_e) и атомами кислорода (L_e/N_e) в период 20 — 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами. В результате этого подвод энергии к электронному газу Q/N_e тоже немного уменьшился, что характерно для всего диапазона высот в этот день. Тогда же в дневное время на высоте $h = 250$ км превышение составляющей L_e/N_e над L_{ei}/N_e уменьшилось по сравнению с предыдущим и последующим днями. Вообще такое преобладание происходит за счет высокой разности температур $T_e - T_i$ при малых значениях N_e , что характерно для условий невысокой СА. В это же время на высоте $h = 300$ км составляющие потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e стали преобладать над составляющими потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами L_e/N_e , хотя 20 и 22 января вклад

этих двух механизмов был практически равен за счет падения с высотой концентрации атомов кислорода $N(O)$ и увеличения L_{ei}/N_e . На высоте $h = 350$ км составляющая L_{ei}/N_e явно преобладает над составляющей L_e/N_e , только для 21 января все параметры немного меньше, чем в остальные дни.

Концентрация нейтралов. Нейтральная атмосфера оказывает влияние на поведение ионосферной плазмы как в спокойных, так и в возмущенных условиях. На рис. 8 приведены вариации концентраций $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ основных компонентов нейтральной атмосферы — молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода — на высоте 300 км в течение 20 — 22 января 2010 г. соответственно. Для расчета нейтрального состава использовалась термо-

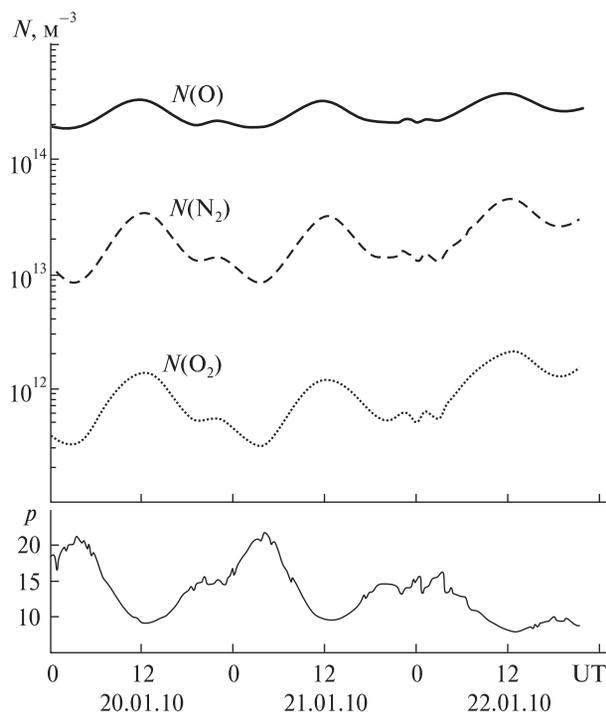


Рис. 8. Временные вариации концентрации азота, кислорода (см. текст) нейтральной атмосферы и параметра $p = N(\text{O})/(N(\text{N}_2) + N(\text{O}_2))$ на высоте 300 км в период 20 – 22 января 2010 г. (из расчета по модели NRLMSISE-00)

сферная модель NRLMSIS-00 [28]. Процессы, которые происходят в ионосфере (перенос плазмы, фотоионизация, изменение электронной концентрации), зависят и определяются именно составом нейтральной атмосферы.

На рис. 8 также приведены временные вариации параметра $p = N(\text{O})/(N(\text{N}_2) + N(\text{O}_2))$. Этот параметр характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов O^+ и пропорционален концентрации электронов в области F ионосферы.

20 января, когда началась ионосферная буря, концентрации $N(\text{O}_2)$, $N(\text{N}_2)$ и $N(\text{O})$ не изменялись. Но во время отрицательного возмущения (в минимуме провала) отмечалось уменьшение концентрации молекулярного азота и кислорода всего лишь на 13 и 11 % соответственно. Результатом этих событий стало увеличение параметра p на 7 %. Концентрация атомарного кислорода на протяжении этого периода изменилась очень слабо.

Значения параметра $p_1 = N(\text{O})/N(\text{N}_2)$ по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED для широты города Харькова составляли $p_1 = 0.48, 0.55$ для 20 и 21 января 2010 г. Параметр p_1 20 января уменьшился примерно на 13 %.

На примере данного возмущения, сравнивая данные, полученные при помощи прибора GUVI TIMED и из модели NRLMSISE-00, видно, что модель NRLMSISE-00 не полностью соответствует не только конкретным геофизическим условиям, но и географическому положению харьковского радара НР. Поэтому данные этой модели (нейтральный состав атмосферы) необходимо корректировать не только во время магнитных бурь, но и в слабо возмущённых условиях, и даже в магнитоспокойных условиях. Такой же вывод сделан и в работах [17, 30].

Температура нейтрального газа. Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, сопровождающий магнитную бурю. Температура нейтралов T_n вычислялась на основе уравнения теплового баланса ионного газа [1, 22, 33] по методике [31, 32]. Для расчета T_n использовались ионосферные параметры, измеренные методом НР. Временные вариации T_n в период с 20 по 22 января 2010 г. на высотах $h = 250 \dots 450$ км представлены на рис. 9. Здесь же для сравнения приведены данные $T_{n\text{MSIS}}$, рассчитанные по модели NRLMSISE-00, а также T_i .

Анализ результатов расчета T_n показал, что в данном цикле измерений высота термобаузы (где атмосфера становится изотермичной) составила около 300 км. Выявлено, что как и во время отрицательной фазы возмущения, так и после нее значения дневных и ночных температур нейтралов оставались практически одинаковыми. Можно утверждать, что слабое отрицательное возмущение не повлияло на поведение температуры нейтрального газа. Подтверждено, что модель NRLMSISE-00 в дневное время дает заниженные значения T_n по сравнению с расчетными величинами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитная буря, проходившая с 20 на 21 января 2010 г., была весьма умеренной. Над Харьковом

она сопровождалась слабым ионосферным возмущением с отрицательной фазой. Как известно, слабые возмущения мало изучены, и поэтому требуют дальнейшего детального рассмотрения и сравнения с более сильными МБ и ионосферными возмущениями.

Проведем сравнительный анализ динамических процессов в ионосфере для весьма умеренной МБ и сильнейших геомагнитных бурь 25 сентября 1998 г., 30 — 31 мая 2003 г. и 7 — 10 ноября 2004 г., описанных подробно в работах [2, 3, 6, 9, 10, 12, 13, 24, 26, 27].

Магнитная буря 25 сентября 1998 г. Причиной, вызвавшей сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г., послужила межпланетная ударная волна, связанная со вспышкой на Солнце класса М6/3В 23 сентября 1998 г. [9, 24, 26, 27]. После прихода ударной волны составляющая межпланетного магнитного поля B_z резко повернула к югу и достигла минимального значения -18 нТл. Параметры солнечного ветра (температура, радиальная скорость, динамическое давление и энергия, передаваемая магнитосфере) тоже изменились. Во время главной фазы индекс D_{st} уменьшился до -202 нТл, а максимальное значение индекса K_p составило 8+. Ионосферная буря носила отрицательный характер. Отрицательное ионосферное возмущение в ночное время, скорее всего, было вызвано смещением к экватору главного ионосферного провала [9]. Обнаружено уменьшение $N_m F_2$ во время главной фазы бури в максимуме области F_2 до 3 — 3.5 раз.

Буря 25 сентября 1998 г. сопровождалась сильными эффектами в ионосфере. Обнаружен дополнительный нагрев ионосферной плазмы около 02:00 на высоте 500 км: T_e составляла около 840 К, а T_i — 500 К. Дополнительный нагрев обусловлен усилением ионосферных токов за счет проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты, высыпания энергичных частиц и фрикционного нагрева в результате ион-нейтрального трения. В целом температура электронов T_e увеличилась на 100 ... 500 К, а ионов — 100 ... 150 К. Выявлено увеличение температуры нейтральной атмосферы T_n во время бури до 360 К на высоте $h = 300$ км, который объясняется как высокоширотным нагре-

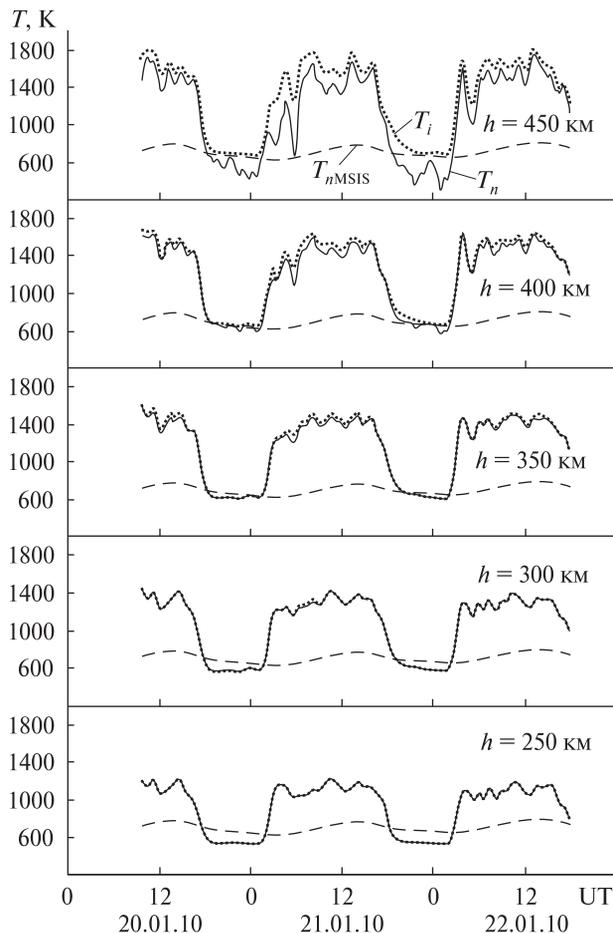


Рис. 9. Временные вариации измеренных температур ионов T_i (точки) и рассчитанных температур нейтралов T_n по данным радара HP (сплошные линии), а также T_{nMSIS} по модели NRLMSISE-00 (пунктир) в период с 20 по 22 января 2010 г.

вом термосферы и переносом тепла из высоких широт в средние широты за счет усиления направленного к экватору меридионального ветра, так и локальным джоулевым нагревом в результате проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты [9, 24].

Магнитная буря 29 — 30 мая 2003 г. С 29 на 30 мая 2003 г. в результате высокой вспышечной активности на Солнце произошла сильнейшая магнитная буря ($K_p = 8+$) [2, 12]. Главная фаза бури протекала с 23:00 29 мая до 03:00 30 мая с минимальным значением индекса $D_{st} = -131$ нТл и B_z -компонента, равного -15 нТл. Затем составляющая B_z повернула на север, и началась фаза

восстановления ($B_{\text{зmax}} = 20$ нТл 30 мая). Индексы A_p с 29 по 31 мая равнялись 89, 49 и 17 соответственно.

Магнитная буря сопровождалась интенсивной отрицательной ионосферной бурей. В течение главной фазы МБ концентрация электронов N_m уменьшилась до 4 раз, при этом уменьшение N_m сопровождалось сильным нагревом плазмы. На высотах 320 — 770 км температура электронов T_e превысила 2200 — 3300 К, а ионов T_i — 1200 — 2400 К.

30 мая 2003 г. отмечено необычное явление вблизи восхода Солнца. С 02:00 до 03:15 критическая частота f_0F2 увеличилась с 3.0 до 3.8 МГц, а затем на протяжении часа она неожиданно начала уменьшаться до 3.4 МГц, потом снова увеличилась. Внезапный провал f_0F2 произошел при снижении слоя $F2$ ионосферы из-за резкого скачка высоты максимума слоя $F2$ вниз, а затем вверх [12].

Магнитная буря 7 — 10 ноября 2004 г. Сильнейшая геокоsmическая буря 7 — 10 ноября 2004 г. представляла собой последовательное наложение двух сильнейших магнитных возмущений 7 — 8 и 9 — 10 ноября [3, 6, 13, 25]. Эти возмущения были вызваны высокой активностью Солнца, которая связана с быстрым развитием на его диске активной области 696. С приходом ударных волн максимальное отклонение B_z -компонента ММП составляло -42 нТл и -25 нТл в периоды возмущений 7 — 8 ноября и 9 — 10 ноября соответственно. Максимальное значение K_p индекса для этих периодов было одинаково и достигло 9—. Индекс D_{st} при этом достигал значений -373 и -289 нТл соответственно, а индекс A_p — 198 и 181. Скорость солнечного ветра увеличилась с 310 до 700 км/с 7 ноября и с 675 до 825 км/с 9 ноября.

В период геокоsmической бури 7 — 10 ноября 2004 г. были обнаружены эффекты сильного отрицательного ионосферного возмущения. Во время главной фазы бури 8 ноября отмечено уменьшение $N_m F2$ в 6—7 раз, а 10 ноября — в 4 раза.

Сильнейшая геокоsmическая буря 7 — 10 ноября 2004 г. также вызвала ряд интересных эффектов [3, 6, 13, 25]. Ночной нагрев плазмы в этот период достигал дневных значений температур $T_i = 1300 \dots 2000$ К и $T_e = 1600 \dots 3000$ К на высотах $h =$

$= 250 \dots 750$ км. Зарегистрировано увеличение T_e на 500...1100 К 8 ноября и на 250... 800 К 10 ноября и T_i на 100... 350 К и 50... 250 К соответственно. Над Харьковом при $D_{st} = -289$ нТл днем наблюдались когерентные отражения сигналов радара на расстоянии 700... 1000 км и ионограммы вертикального зондирования с диффузным рассеянием. Такие эффекты косвенно свидетельствовали о кратковременном смещении экваториальной границы аврорального овала на широту, достаточно близкую к Харькову.

Данные геокоsmические бури иллюстрируют тесную взаимосвязь явлений на Солнце, в ближнем космосе, ионосфере и термосфере. Они вызвали существенные возмущения в среднеширотной ионосфере и атмосфере, а также ряд необычных для средних широт явлений.

Магнитные бури 1998, 2003 и 2004 гг. по категории классификации одинаковы, но отличаются друг от друга своей интенсивностью. Для сравнения четырех рассматриваемых бурь в табл. 2 представлены значения основных параметров, описывающих коsmическую погоду (минимальное значение B_z -компонента, максимальная величина функции Акасофу ϵ и индексов AE , K_p , минимальное значение индекса D_{st}), вертикальная скорость переноса плазмы V_z в день начала возмущения в 12:00 на высоте $h = 300$ км, плотность потока плазмы Π ($h = 300$ км в 12:00), плотность потока тепла Π_T , переносимого электронами из протоносферы в ионосферу ($h = 300$ км в 12:00), и относительные изменения концентрации электронов $N_m F2 / (N_m F2)_0$, температуры электронов T_e / T_{e0} и ионов T_i / T_{i0} для трех рассматриваемых бурь. Сравнение температур ионов и электронов проводилось для диапазона высот 200 — 750 км.

Магнитная буря 20 — 21 января 2010 г. сопровождалась ионосферным возмущением с отрицательной фазой. Уменьшение концентрации электронов $N_m F2$ в максимуме слоя $F2$ до 34 % могло быть вызвано рядом факторов, основным из которых является возмущение нейтрального состава [28, 29]. Другие случаи развития отрицательных возмущений различной интенсивности подробно рассмотрены в работе [23]. Температура электронов во время бури до высоты 450 км

увеличилась лишь незначительно, а выше — на 50 ... 200 К. Температура ионов немного увеличилась, только на высоте $h = 750$ км она увеличилась на 50 К. На поведение температуры нейтрального газа слабое отрицательное ионосферное возмущение не повлияло.

Данная весьма умеренная буря в целом качественно не повлияла на суточные вариации скорости V_z . Как обычно, наблюдался утренний экстремум (уменьшение модуля скорости нисходящей плазмы на высотах до 380 км и в сторону увеличения положительных значений V_z на больших высотах), обусловленный процессами амбиполярной диффузии и переноса плазмы нейтральным ветром в условиях усиления процессов фотоионизации по сравнению с процессом потерь ионов O^+ и изменения направления движения меридионального компонента термосферного ветра. Как и в условиях невозмущенной ионосферы, имели место повышенные (на 10 — 15 м/с) значения нисходящей скорости плазмы (около -50 м/с днем) по сравнению с летними значениями. Наблюдались также и необычные

отдельные отклонения скорости в сторону отрицательных значений V_z во время главной фазы бури вечером (с 15:00 до 17:30 — 18:00 в зависимости от высоты) и в начале фазы восстановления при переходе от ночи к утру (с 01:45 до 05:45) с амплитудой, увеличивающейся с увеличением высоты. Вызванные бурей вариации плотности потока плазмы определялись в значительной степени вариациями концентрации электронов и составляли 15 — 80 %.

Из табл. 2 видно, что параметры, описывающие космическую погоду в течение весьма умеренной магнитной бури 20 — 21 января 2010 г. и сильнейших бурь 1998, 2003 и 2004 гг. значительно отличаются. Во время весьма умеренной МБ максимальное значение K_p -индекса достигало 4, D_{st} отклонилось только до -38 нТл, а B_z — до -8.3 нТл. Уменьшение концентрации электронов в максимуме области F2 было незначительным (всего лишь в 1.6–1.7 раза) по сравнению с сильнейшими бурями (уменьшение в 3 — 7 раз). T_e увеличилась не более чем на несколько сот кельвин, тогда как при сильных МБ — до 1000 К

Таблица 2. Значения основных параметров магнитных и ионосферных бурь 20 — 21 января 2010 г., 25 сентября 1998 г., 29 — 30 мая 2003 г. и 7 — 10 ноября 2004 г.

Параметры	Весьма умеренная геомагнитная буря 20 — 21 января 2010 г.	Сильнейшая геомагнитная буря 25 сентября 1998 г.	Сильнейшая геомагнитная буря 29 — 30 мая 2003 г.	Сильнейшая геомагнитная буря 7 — 10 ноября 2004 г.	
				Возмущение с 7 на 8 ноября	Возмущение с 9 на 10 ноября
$B_{z\min}$, нТл	-8.3	-18	-15	-45	-25
ϵ_{\max} , ГДж/с	22	100	75	450	150
AE_{\max} , нТл	680	2500	2500	2500	2500
$K_{p\max}$	4	8+	8+	9-	9-
$D_{s\min}$, нТл	-38	-202	-131	-373	-289
$N_m F2 / (N_m F2)_0$	0.66	0.3	0.3	0.1 — 0.2	0.3
$\Delta T_e = T_e - T_{e0}$, К	3 — 210	250–500	250 — 1100	15 — 1100	250 — 800
T_e / T_{e0}	1 — 1.3	1.1 — 1.2	1.3 — 2.7	1 — 1.6	1 — 1.4
$\Delta T_i = T_i - T_{i0}$, К	3 — 50	100 — 150	15 — 900	150–300	150 — 250
T_i / T_{i0}	1 — 1.1	1.1 — 1.2	1 — 1.8	1 — 1.4	1 — 1.3
V_z , м/с (12:00, $h = 300$ км)	-50	-25	-40	Не измерялась	
Π , 10^{12} м ⁻² ·с ⁻¹ (12:00, $h = 300$ км)	-11.0	-17.8	-16.0	Не вычислялась	
Π_T , 10^{-5} Вт/м ² (12:00, $h = 300$ км)	-0.2	-1.25	-0.75	-0.5	-1.15

и более. T_i вообще увеличилась лишь до 50 К, а в других случаях изменение температуры ионов составляет 900 К.

Сравнение вариаций скорости V_z в рассматриваемый период с данными, полученными в другие периоды возмущений, показало ряд особенностей. Результаты измерений скорости 20 — 22 января 2010 г. кардинально отличаются от данных, полученных во время крайне сильной магнитной бури 24 — 25 сентября 1998 г. (индекс $A_p = 28$ и 121 соответственно) [4, 11]. Во время бури 1998 г. положительные значения V_z значительно увеличились, достигнув на высоте 300 км значения +10 м/с около 19:00 24 сентября и +55 м/с около 3:00 25 сентября. Магнитной буре сопутствовало изменение процесса ионосферно-плазмосферного взаимодействия. На высотах 200—500 км в возмущенный день вертикальная составляющая скорости движения плазмы $V_z \approx 20 \dots 60$ м/с, плотность потока плазмы $\Pi \approx (1 \dots 5) \cdot 10^{10}$ м⁻²с⁻¹, в то время как в невозмущенный день $V_z \approx -10 \dots -40$ м/с, $\Pi \approx -(5 \dots 8) \times 10^{10}$ м⁻²с⁻¹. Инверсия знака имела место с 21:00 24 сентября до 02:00 25 сентября.

Во время ионосферной бури 20 марта 2003 г. ($A_p = 21$, $F_{10.7} = 108$) вблизи захода Солнца наблюдалось квазипериодическое изменение V_z примерно от +10 м/с до -35 м/с и далее до +20 м/с на высоте 300 км в интервале времени 17:00—19:00 [11]. Таким образом, отклонение V_z в сторону отрицательных значений составляло приблизительно 50 м/с. В рассматриваемый день 20 января 2010 г. аналогичное изменение V_z на высоте 300 км наблюдалось несколько ранее, с 15:00 до 18:00, а его амплитуда составляла 14 м/с. Такое отличие можно объяснить умеренностью рассматриваемой бури по сравнению с бурей 20 марта 2003 г. различием сезона и солнечной активности.

В отличие от рассматриваемой, сверхсильная магнитная буря 29 — 31 мая 2003 г. ($A_p = 89, 49, 17$, $F_{10.7} = 142, 120, 116$ соответственно) сопровождалась значительными вариациями скорости V_z [2]. В частности, в районе полудня 30 мая скорость на высоте 300 км изменилась в сторону отрицательных значений на 52 м/с по сравнению со спокойным днем. Отметим, что в возмущенный день 30 мая 2003 г. наблюдалось изменение V_z в

восходный период (около 02:00 — 05:00), которое накладывалось на утреннее поведение скорости V_z и изменяло ее знак с положительного на отрицательный. Отклонение V_z на высоте 300 км достигло 38 м/с. В восходный период рассматриваемой бури 21 января 2010 г. на этой же высоте максимальное отклонение V_z в сторону отрицательных значений составило приблизительно 30 м/с. Отличие результатов измерений в мае 2003 и январе 2010 гг. состоит также в том, что в 2003 г. наблюдалось запаздывание экстремума возмущения V_z в утренний период при уменьшении высоты (на высоте 600 км экстремум V_z был зарегистрирован в 02:40, на высоте 300 км — в 02:50, на высоте 200 км — в 03:15), а в аналогичный период в 2010 г. наблюдалось обратное (на высоте 418 км экстремум V_z был зафиксирован в 04:00, на высотах 363 и 308 км — в 03:45, на высоте 253 км — в 03:30). Еще одной особенностью наблюдений в возмущенный день 30 мая 2003 г. являлся нисходящий поток плазмы после полудня, величина плотности которого на высоте 308 км, равная $-1.6 \cdot 10^{13}$ м⁻²с⁻¹, превышала значение в период захода Солнца, чего не наблюдалось в январе 2010 г. (см. табл. 1).

Как и ожидалось, весьма умеренная магнитная буря сопровождалась незначительными изменениями параметров ионосферы по сравнению с сильнейшими геокоsmическими бурями.

ВЫВОДЫ

В работе изложены результаты исследования и моделирования динамических процессов в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20 — 21 января 2010 г. Основные итоги работы сводятся к следующему.

1. Обнаружено, что 20 — 21 января 2010 г. над Харьковом наблюдалось слабое отрицательное ионосферное возмущение с максимальным отклонением критической частоты до 17 %.

2. Зарегистрировано уменьшение концентрации электронов $N_m F_2$ до 34 % в период отрицательного возмущения. В начале МБ уменьшение $N_m F_2$ составило около 30 %, а уже 22 января началась фаза восстановления.

3. Обнаружено относительно небольшое уменьшение (до 50 — 200 К) дневных температур

электронов T_e во время бури. Выявлены значительные суточные вариации температуры электронов и ее локальный минимум около полудня, что характерно для минимума SA. Температура ионов T_i изменялась незначительно (не более чем на 50 K). В околополуденные часы ионосферные возмущения слабо повлияли на температуру ионов.

4. Обнаружены отклонения временных вариаций вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z во время бури в вечернее и ночное время, а также на фоне обычно регистрируемого утреннего экстремума V_z . Амплитуда отклонений V_z увеличивалась с высотой. На высоте около 300 км отклонение V_z в сторону отрицательных значений достигло 14 м/с в 16:00 20 января 2010 г. и 30 м/с — в 03:45 21 января. На протяжении периода наблюдений в основном сохранились характерные особенности суточных вариаций скорости V_z , что объясняется весьма умеренным характером бури. На разных стадиях наблюдений в одинаковое время суток днем различие значений V_z не превышало 9 м/с. Вызванные бурей вариации плотности потока плазмы составляли величину 15 — 80 %.

5. Установлено, что слабое отрицательное ионосферное возмущение не повлияло на поведение температуры нейтрального газа. Высота термпаузы, где ионосфера становится изотермичной, составила около 300 км. Подтверждено, что модель NRLMSISE-00 дает заниженные значения T_n по сравнению с расчетными величинами в дневное время.

6. Моделирование показало, что во время слабого отрицательного возмущения концентрации молекулярного азота $N(N_2)$ и кислорода $N(O_2)$ немного уменьшились (примерно на 13 и 11 % соответственно), а параметр p увеличился приблизительно на 7 %.

7. Расчеты теплового режима ионосферы показали преобладание потерь энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами над потерями, связанными со столкновениями электронов с нейтралами, днем 21 января на высоте $h = 300$ км. 22 января (после бури) вклад двух механизмов охлаждения электронов сравнялся. 21 января скорости нагрева электронного газа

и теплообмена электронов с ионами и атомами кислорода уменьшились.

8. Весьма умеренная магнитная буря, как и следовало ожидать, сопровождалась в целом незначительными изменениями параметров ионосферы.

1. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИ-ЭР. — 1969. — 57, № 3. — С. 6—30.
2. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А. и др. Возмущения ионосферной плазмы во время сверхсильной магнитной бури 29—31 мая 2003 года: результаты наблюдений на радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. — 2005. — № 4. — С. 21—39.
3. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 — 10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 4. — С. 62—76.
4. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в ионосфере, сопутствующих геомагнитной буре 25 сентября 1998 г., при помощи радара некогерентного рассеяния в Харькове // Распространение радиоволн: Тр. XX Всероссийской науч. конф. — Нижний Новгород, 2002. — С. 56—57.
5. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 1. — С. 4—11.
6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7—10 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэронаука. — 2007. — 47, № 6. — С. 761—779.
7. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 5. — С. 58—76.
8. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 5. — С. 77—96.
9. 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.
10. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 1. — С. 12—25.

11. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 20—23 марта 2003 года: результаты измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — **11**, № 3/4. — С. 4—19.
12. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Сильнейшая геокоsmическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — **11**, № 3/4. — С. 56—67.
13. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокоsmической бури 7—10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждений // *Космічна наука і технологія*. — 2007. — **13**, № 4. — С. 77—90.
14. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // *Космічна наука і технологія*. — 2008. — **14**, № 1. — С. 44—56.
15. Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляров И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F-ионосферы на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* — 2004. — Вып. 136. — С. 102—108.
16. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 190 с.
17. Павлов А. В., Павлова Н. М., Макаренко С. Ф. Изучение теплового баланса ионосферы и плазмосферы средних широт по данным станции «Миллстоун-Хилл» с 14 по 17 января 1986 г. // *Геомагнетизм и аэрoномия*. — 2004. — **44**, № 2. — С. 204—215.
18. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэрoномия*. — 2001. — **41**, № 5. — С. 659—666.
19. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокоsmоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59—106.
20. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // *Нелинейный мир*. — 2007. — **5**, № 4. — С. 198—231.
21. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
22. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // *Солнечно-земная физика: Сб.* — М.: Мир, 1969. — С. 292—352.
23. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., et al. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100A**, N 8. — P. 14,673—14,691
24. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lazorenko S. V., Taran V. I. Wave Disturbances in the Ionosphere Accompanying the Solar Flare and the Strongest Magnetic Storm of September 25, 1998 // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2003. — **43**, N 6. — P. 718—735.
25. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., and Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.* — 2007. — **7**, G13001 — doi: 10.1029/2005GI000125.
26. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quast-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // *Eos Trans. Am. Geophys. Union*. — 2000. — **81**, N 48. — Fall Meeting. — F 947.
27. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. I. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event September 25, 1998 // *Eos Trans. Am. Geophys. Union*. — 2001. — **82**, N 20. — Spring Meeting. — S 291.
28. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107**, N 12. — P. 1468—1483.
29. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2* / Ed. by H. Volland. — Boca Raton, Fla., CRC Press, 1995. — P. 195—248.
30. 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. — **99A**, N 12. — P. 23,359—23,365.
31. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // *Space Res.* — 1973. — **13**. — P. 267—286.
32. Salah J. E., Evans J. V., Alcaydè D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin // *Ann. Geophys.* — 1976. — **32**. — P. 257—266.
33. 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.

Надійшла до редакції 10.12.10

I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, S. A. Pazura,
S. V. Kharytonova, L. F. Chernogor

DYNAMIC PROCESSES IN THE IONOSPHERE DURING THE VERY MODERATE MAGNETIC STORM ON 20—21 JANUARY 2010

We present some results of our analysis of variations of ionospheric plasma parameters for the very moderate magnetic storm on 20—21 January 2010. The magnetic storm was accompanied by an ionosphere storm with negative phase. The observations was performed with the Kharkiv incoherent scatter radar. Numerical indices of perturbations are derived.