

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, В. Н. Лысенко¹, С. А. Пазюра¹,
В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Институт ионосферы НАНУ і МОНУ, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года

Надійшла до редакції 15.10.03

Наведено результати дослідження двофазної іоносферної бурі 20—21 березня 2003 р., найсильнішу негативну фазу якої можна віднести до аномальної, оскільки вона протікала на фоні помірного збурення геомагнітного поля ($A_p = 29$, $K_p = 5$). Особлива увага приділена діагностиці процесів, що супроводжували зміну фаз бурі, які відбулися в період заходу Сонця протягом 17:00—18:00 UT. Докладно розглянуті механізми формування глибокого негативного іоносферного збурення.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная буря проявляется как глобальное возмущение параметров ионосферы, вызываемое геомагнитной бурей. Вследствие многообразия характера взаимодействия различных процессов в геокосмосе каждая буря индивидуальна, и прогнозировать ее развитие сложно. Изучение каждой бури дает новую информацию для понимания формирующих ее процессов. Большими возможностями в их диагностике располагают радары некогерентного рассеяния (НР), позволяющие проводить комплексные исследования параметров ионосферной плазмы в широком диапазоне высот.

Целью работы является изучение двухфазной ионосферной бури 20—21 марта 2003 г., сильнейшую отрицательную фазу которой можно отнести к аномальной, поскольку она протекала на фоне умеренного возмущения геомагнитного поля ($A_p = 29$, $K_p = 5$). Измерения проводились на харьковском радаре НР 19—23 марта в соответствии с международным календарем координированных наблюдений методом НР по программе Storms/TIMED/LTCS. Радар работал в режиме двухимпульсного зондирования, в диапазоне высот 100—550 км с высотным разрешением около 10 км. Подробное описание радара и режимов его работы даны в работе [8].

Представлены результаты исследования динамических процессов в ионосфере, сопровождавших смену фаз бури. Ценность этих результатов определяется тем, что вопрос о характере чередования фаз бури изучен мало из-за недостатка наблюдательных данных. Подробно рассмотрены механизмы, контролирующие начало и развитие глубокого отрицательного ионосферного возмущения. Буря сопровождалась генерацией волновых возмущений в ионосфере. Исследованы также ионосферные возмущения, связанные с проникновением в средние широты магнитосферных электрических полей.

Результаты настоящей работы кратко описаны в работе [3].

СОСТОЯНИЕ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Магнитной буре предшествовала серия интенсивных рентгеновских вспышек на Солнце, которые сопровождалась выбросами корональной массы, но геоэффективность возмущений на Солнце была невысокой. Их результатом явилась умеренная (по классификации [9]) магнитная буря 20—21 марта 2003 г. с индексами $A_p = 21$ и 29 , $K_p = 5$, $D_{st} = -57$ нТл. Буря началась внезапно 20 марта около 04:00 (здесь и далее UT). Начальной фазе соответствовало увеличение индекса D_{st} , который характе-

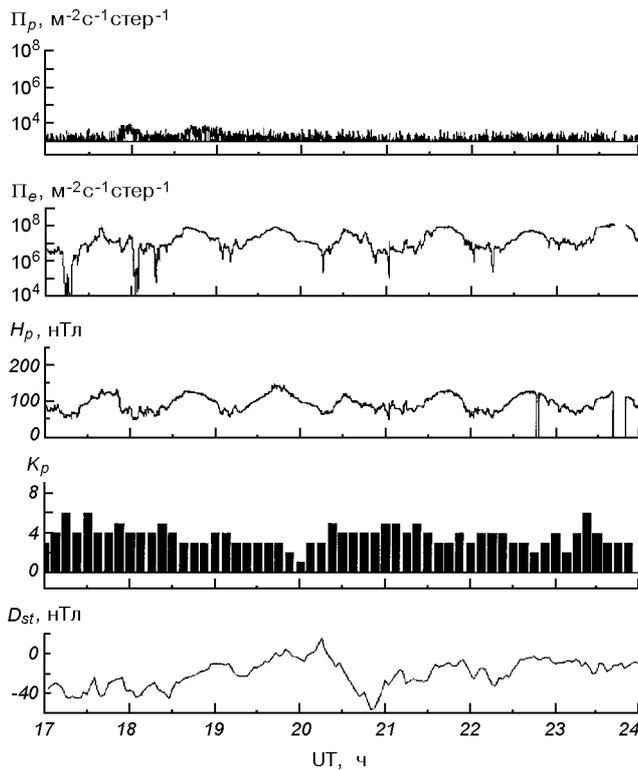


Рис. 1. Временные вариации потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_p -составляющей геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), K_p - (Air Force Weather Agency) и D_{st} -индексов (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) в период 17—23 марта 2003 г. [<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>]

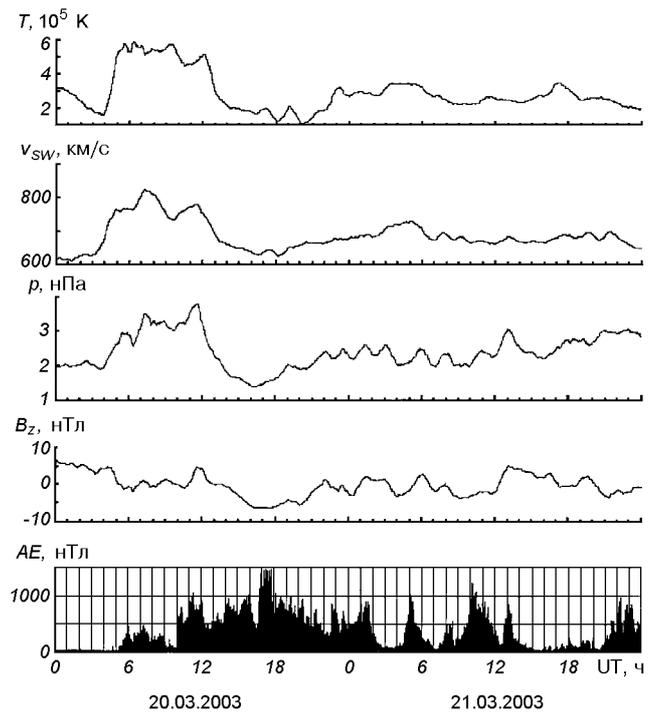


Рис. 2. Временные вариации параметров солнечного ветра: температуры T , радиальной скорости v_{sw} и динамического давления ρ (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor); а также составляющей B_z межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer) и AE -индекса 20—21 марта 2003 г. (WDC Kyoto)

ризует изменения магнитного поля на Земле, от -1 нТл в 03:00 до 15 нТл в 06:00, после чего началась главная фаза бури с понижением D_{st} до -57 нТл в 20:00, а затем фаза восстановления с постепенным нарастанием D_{st} до конца цикла измерений. Началу бури предшествовал скачок параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), в том числе рост скорости СВ от ~ 600 км/с до максимальной величины более 800 км/с. Этот поток СВ, сжимающий магнитосферу, ответственен за начальную фазу магнитной бури. Вскоре после начала бури произошел поворот вектора ММП к югу с максимальным отклонением B_z около -6 нТл после 16:00. С вариациями B_z и D_{st} коррелировали значения аврорального индекса AE . Они достигли значения 1500 нТл 20 марта около 18:00 и характеризовали усиление авроральных электроструй во время последовательности суббурь. Солнечная активность

(СА) в период измерений была средней: индекс $F_{10.7}$ изменялся от 108 до 89 ед., среднемесячное значение $F_{10.7}$ составляло около 132 ед. Основные параметры геокосмической обстановки приведены на рис. 1 и 2. Ежедневные данные об активности Солнца и потоках частиц, полученные из интернета (<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>), приведены в табл. 1 и 2.

МОРФОЛОГИЯ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

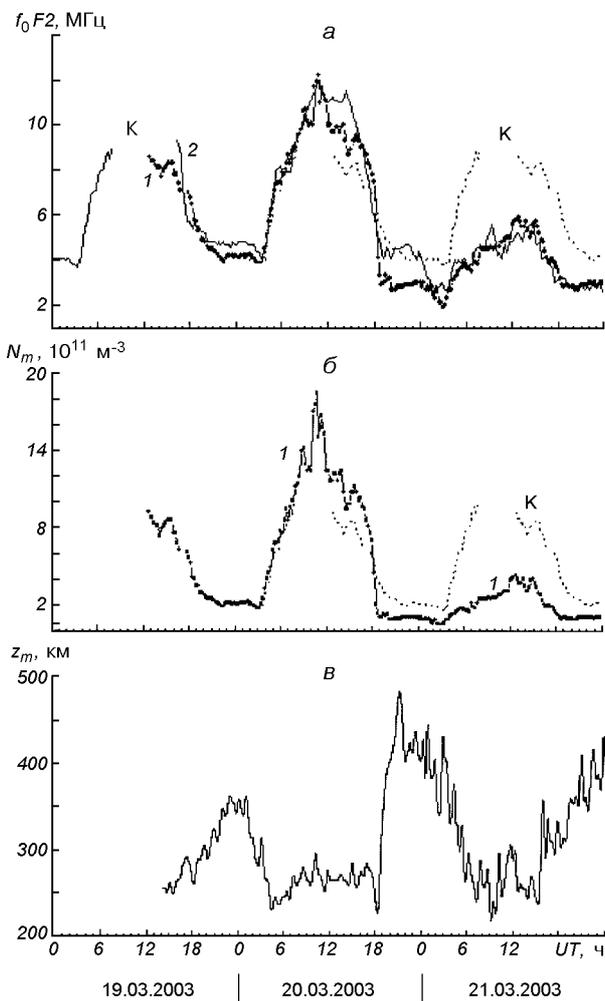
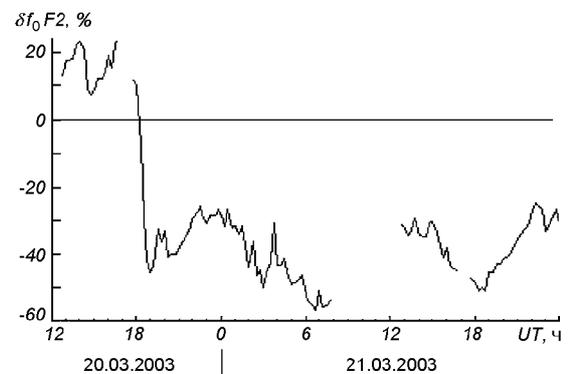
Магнитная буря вызвала двухфазную ионосферную бурю. Положительная фаза носила характер длительной (примерно в течение 6 ч) возмущения с наибольшим отклонением δf_0F2 около $+20\%$ (см. рис. 4). Смена фаз произошла в течение 17:00—18:00. Отрицательная фаза была более интенсивной, максимальное отклонение δf_0F2 составило -60% , ее

Таблица 1. Данные о солнечной активности

| Дата Март 2003 г. | $F_{10.7}$ | Число солнечных пятен | Площадь солнечных пятен (10^{-6}) | Рентгеновский фон | Количество рентгеновских вспышек | | | Количество оптических вспышек | | | | |
|----------------------|------------|-----------------------------|--|----------------------|-------------------------------------|---|---|----------------------------------|---|---|---|---|
| | | | | | C | M | X | S | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 17 | 125 | 80 | 1080 | B 3.0 | 6 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 118 | 64 | 1010 | B 4.2 | 10 | 2 | 1 | 5 | 4 | 1 | 0 | 0 |
| 19 | 108 | 53 | 650 | B 3.6 | 16 | 4 | 0 | 6 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 20 | 97 | 45 | 400 | B 2.1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 91 | 40 | 200 | B 1.6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 89 | 40 | 70 | B 1.4 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 93 | 43 | 110 | B 1.3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 2. Данные о потоках протонов и электронов с энергиями E_p и E_e

| Дата, март 2003 г. | Потоки протонов, $10^7 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ | | | Потоки электронов, $10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ |
|--------------------------|---|--------------------|---------------------|---|
| | $E_p > 1 \text{ МэВ}$ | $> 10 \text{ МэВ}$ | $> 100 \text{ МэВ}$ | $E_e > 2 \text{ МэВ}$ |
| 17 | 2300 | 15 | 2.3 | 0.84 |
| 18 | 4000 | 22 | 2.4 | 1.9 |
| 19 | 2800 | 15 | 2.4 | 2.2 |
| 20 | 3400 | 12 | 2.1 | 1.3 |
| 21 | 7000 | 11 | 2.4 | 2.5 |
| 22 | 8400 | 12 | 2.7 | 1.6 |
| 23 | 5500 | 12 | 2.7 | 3.5 |

Рис. 3. Вариации значений f_0F2 , N_m и z_mF2 19—21 марта в Харькове (1), Сан-Вито (2) и в контрольный день 19 марта — Сан-Вито и Харьков (К)Рис. 4. Вариации отклонения критической частоты δf_0F2 в течение двухфазной ионосферной бури 20/21 марта 2003 г.

запаздывание относительно начала магнитной бури составило около 14 ч. На рис. 3, а показаны вариации критических частот f_0F2 , полученных из ионограмм станции вертикального зондирования «Базис» в Харькове и станции в Сан-Вито (географические координаты: 40° N , 17° E). Последние привлечены для выбора контрольных (невозмущенных) суток (19 марта). В Харькове в течение

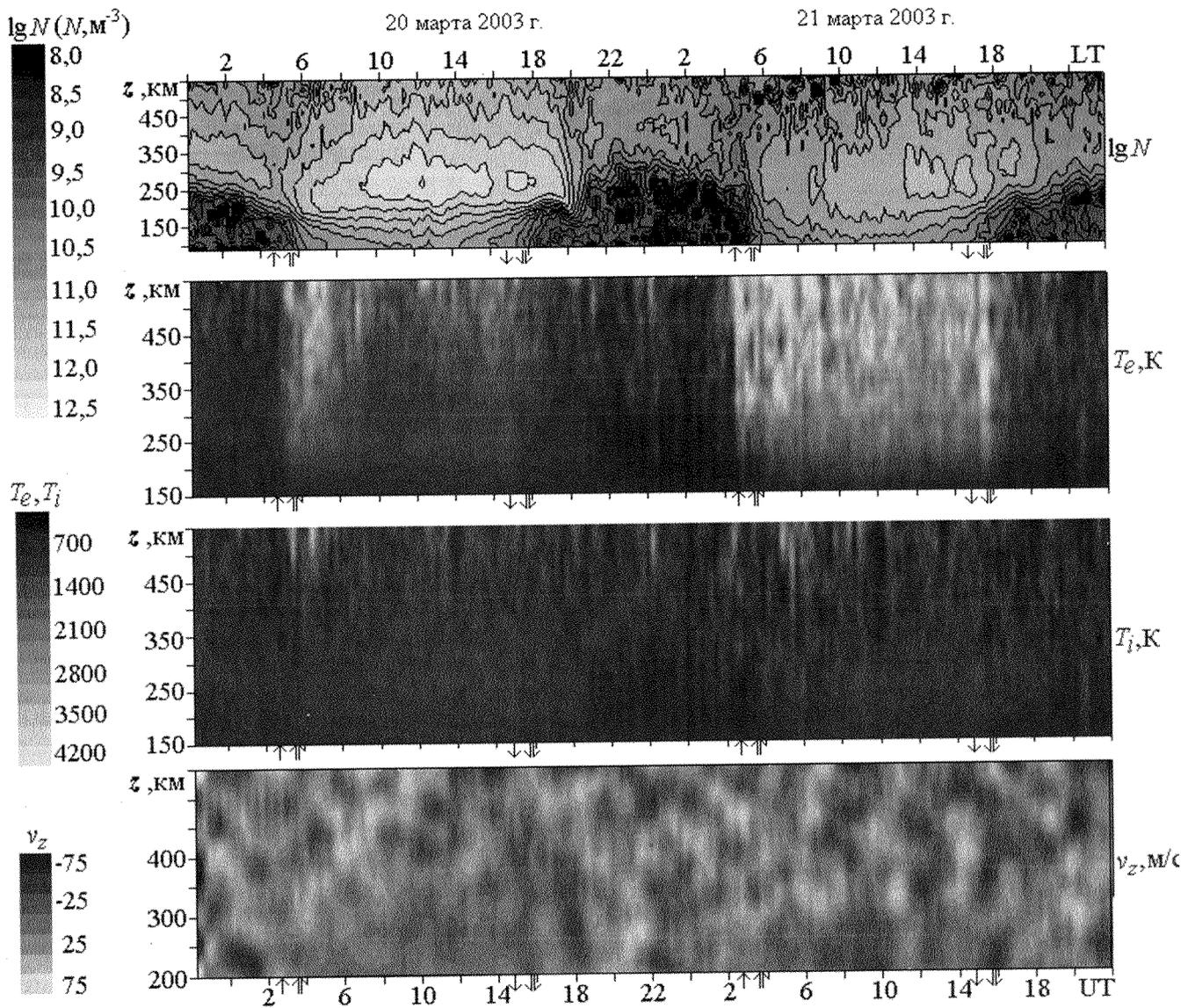


Рис. 5. Вариации параметров ионосферы 20/21 марта 2003 г. по данным харьковского радара НР. Панели сверху вниз: логарифм концентрации электронов ($\lg N$); температуры электронов T_e и ионов T_i ; вертикальная составляющая скорости переноса плазмы v_z

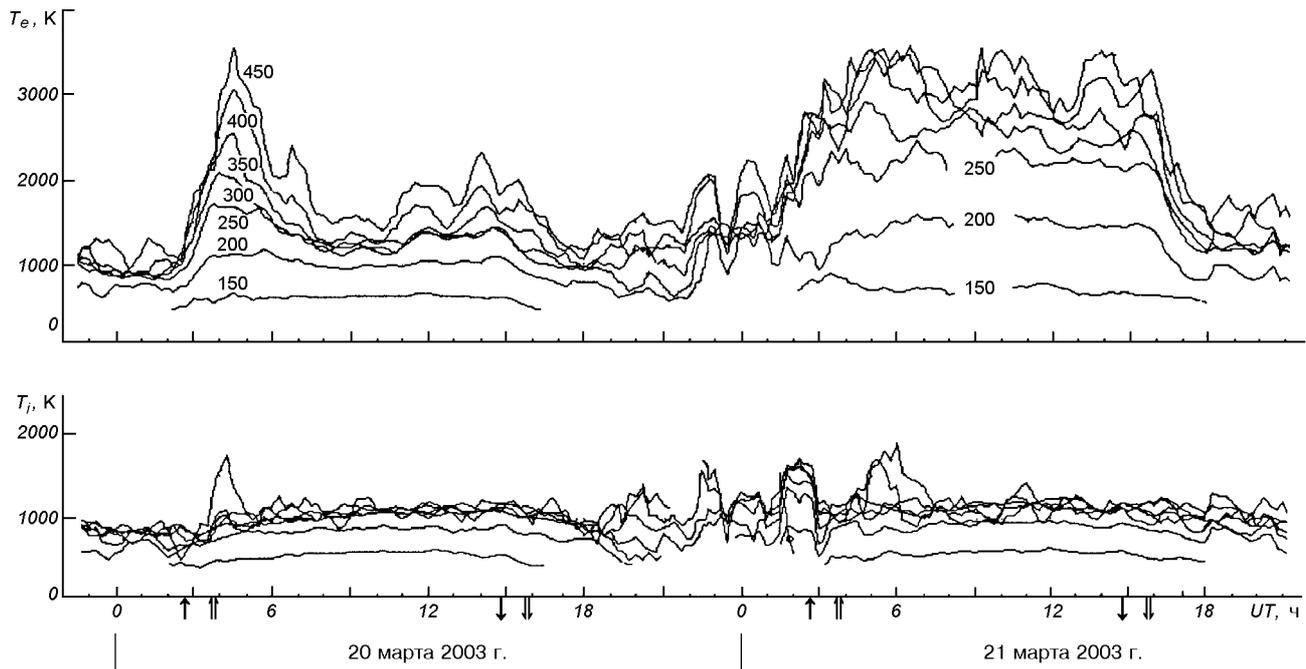


Рис. 6. Температуры T_e и T_i 20/21 марта 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

отрицательной фазы бури электронная концентрация N_m в максимуме области F уменьшилась примерно в 2—5 раз (рис. 3, б и 5). Рис. 5 дает наглядную картину поведения основных параметров ионосферы в диапазоне высот 100—550 км во время бури. Рис. 4 иллюстрирует вариации отклонения критической частоты δf_0F2 в течение двухфазной ионосферной бури 20—21 марта 2003 г. (по сравнению с контрольным днем 19 марта).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Положительная фаза сопровождалась увеличением f_0F2 на 1.6 МГц, что соответствовало увеличению N_mF2 примерно в 1.5 раза (рис. 3, б и 5). При этом высота максимума слоя z_mF2 возросла по сравнению с контрольным днем 19 марта (по данным харьковского радара) примерно на 40 км (рис. 3, в). Температура электронов на высоте 300 км в 14:00 составляла $T_e = 1300$ К, тогда как в спокойный день $T_e = 1700$ К. Значения температуры ионов $T_i = 1000...1050$ К практически совпадали в возмущенные и контрольные сутки (рис. 5 и 6).

Отрицательная фаза началась 20 марта около 18:00 и интенсивно развивалась в течение 21 марта и первой половины дня 22 марта. Максимальное

уменьшение f_0F2 по сравнению с контрольным днем наблюдалось 21 марта около 07:00 и составило 5.1 МГц, что соответствовало уменьшению N_mF2 в 5.3 раза (рис. 3, б и 5). Уменьшение N отмечалось во всем диапазоне высот 100—550 км. На рис. 3, в приведены временные вариации высоты z_mF2 . С 14:00 19 марта и почти до полудня 20 марта поведение z_mF2 было характерным для слабо возмущенной среднеширотной ионосферы: ночью значения $z_mF2 \approx 340$ —350 км превышали дневные значения, равные примерно 250 км.

В возмущенные дни 20—21 марта наблюдалось увеличение z_mF2 по сравнению с контрольным периодом 19—20 марта примерно на 100—130 км около местной полуночи и на 100 км вблизи восхода Солнца. В спокойный день в 14:00 на высоте 300 км $T_e = 1700$ К, в отрицательную фазу бури (21 марта) $T_e = 2400$ К. Значения температуры ионов $T_i = 1000...1050$ К практически совпадали с контрольным днем (рис. 5 и 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Положительная фаза наблюдаемой бури относится к категории Long Duration Positive Storm Effects [11]. Физические механизмы, которые поддержи-

вают длительную положительную фазу, и особенности ее проявления изучены недостаточно. В свете современных представлений возможны следующие причины положительных возмущений [4, 5, 11]. Одной из них может быть дрейф слоя F2 вверх, в область более низкой рекомбинации, за счет усиления меридиональных ветров, направленных к экватору. Усиление ветра происходит в результате крупномасштабных возмущений термосферной циркуляции, связанных с высокоширотным нагревом термосферы (в авроральной зоне) [4, 7]. Другим механизмом может быть изменение состава нейтральной атмосферы, которое в отличие от отрицательной фазы протекает с увеличением содержания атомарного кислорода и отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ за счет возмущения термосферной циркуляции, приводящего к оседанию легких компонентов газа в низких и средних широтах. Согласно работе [18] первый механизм наиболее эффективен в дневное время, когда интенсивно протекают процессы ионообразования, тогда как роль второго механизма более существенна ночью. Значительный вклад в положительную фазу может вносить также высыпание мягких частиц с энергиями $E \leq 1$ кэВ в область дневного каспа, где они поглощаются на высотах области F (200—300 км), вызывают ее разогрев и меридиональную циркуляцию, которая переносит газ, обогащенный атомарным кислородом, к экватору [5]. Взаимодействие этих механизмов, связанных с двумя разными каналами передачи энергии солнечного ветра в полярную ионосферу, может создавать большое разнообразие ионосферных бурь.

Рассмотрена возможность реализации первого механизма в нашем случае, т. е. дрейфа слоя F2 вверх за счет усиления меридионального ветра к экватору. Сравнение результатов измерений с данными для спокойных суток, в качестве которых выбраны сутки 22—23 сентября 1998 г. [13] с близкими гелиогеофизическими параметрами (равноденствие, средняя солнечная активность, но на восходящей ветви 23-го солнечного цикла), показало разные значения v_z : -13 м/с во время возмущения на высоте 300 км около полудня 20 марта 2003 г. и -25 м/с на этой же высоте в спокойный день 22—23 сентября 1998 г. Если допустить, что в течение умеренной магнитной бури дополнительные электрические поля в средних широтах были незначительными, а также пренебречь изменением нейтрального состава при $A_p = 21$, тогда из v_z можно получить, что во время возмущения меридиональная составляющая скорости ветра v_{nx} увеличилась примерно на 30 м/с. Это привело к увеличению высоты $z_m F2$ примерно на 50 км. Эти оценки

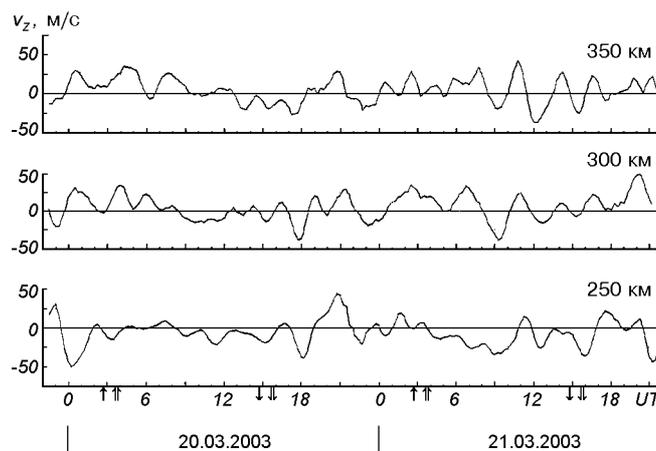


Рис. 7. Вариации скорости v_z во время бури (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

близки к результатам эксперимента: $z_m F2$ имела значения около 280 и 240 км в возмущенный и спокойный день соответственно.

Отрицательная фаза относится к числу аномальных, поскольку она сопровождалась уменьшением в 2—5 раз электронной концентрации N на фоне магнитного возмущения умеренной интенсивности. Исследования показали, что модель MSIS-86 не может объяснить столь заметное уменьшение $N_m F2$ только за счет изменения нейтрального состава так же, как и во время бури 25 сентября 1998 г. [13]. Возможные механизмы формирования отрицательного возмущения ионосферы рассмотрены ниже.

Процессы, сопровождавшие смену фаз бури. Смена фаз бури произошла примерно с 17:00 до 18:00. Метод НР позволяет осуществить диагностику этого явления на основе рассмотрения сопутствующих процессов. Анализ показал, что смена фаз сопровождалась быстрым уменьшением высоты $z_m F2$ на 50 км, а затем увеличением почти на 200 км. Уменьшение $z_m F2$, по-видимому, могло быть связано с усилением поля над Харьковом при значении зональной составляющей $E_y \approx -15$ мВ/м, направленной на запад [1, 14, 15]. Увеличение $z_m F2$ могли вызвать следующие причины. Одна из них — регулярное обращение меридионального термосферного ветра v_{nx} к экватору в заходный период, аналогично спокойным условиям [1, 6]. Сравнение с контрольными датами [13] показало, что оно дало увеличение $z_m F2$ на 50 км, которое обеспечила скорость $w = 32$ м/с при значении меридиональной

составляющей $v_{nx} \approx 90$ м/с (здесь w — суммарная скорость вертикального переноса плазмы за счет ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа). Вторым фактором остается дополнительное усиление ветра v_{nx} примерно на 30 м/с, которое произошло в предшествующие часы и явилось одной из обсуждавшихся причин начальной, положительной фазы бури. Оно дало увеличение высоты $z_m F2$ еще на 50 км. Оставшийся подъем слоя F2 примерно на 100 км мог быть вызван увеличением скорости w за счет электромагнитного дрейфа $v_{i\perp z}$. Оценки дали значение $v_{i\perp z} \approx 60$ м/с, при этом зональная составляющая поля над Харьковом должна была иметь значение $E_y \approx 15...20$ мВ/м [1]. Итак, перепад высоты $z_m F2$ вниз на 50 км, а затем вверх на 200 км мог быть связан с проникновением магнитосферного поля в средние широты с зональной составляющей, изменяющей направление с запада на восток и имеющей значения -15 мВ/м и $+15...+20$ мВ/м. При этом вариации $z_m F2$ коррелировали с изменениями скорости v_z от -40 м/с до $+20$ м/с на высоте 300 км (рис. 7, данные усреднены) в течение 17:00—19:00. Эффект, очевидно, был вызван импульсом магнитосферного электрического поля во время суббури, которая сопровождалась увеличением индекса AE в 17:00 и затем спадом его около 18:00 (рис. 2). При $AE = 1200...1500$ нТл усиление поля в высоких широтах составило $E \approx 80...100$ мВ/м [6, 7]. Такое поле, проникнув в средние широты, могло достичь там рассчитанной величины $|E_y| \approx 15...20$ мВ/м и внести изменения в $z_m F2$.

Процессы, контролирующие начало и развитие отрицательного возмущения. Смена фаз бури произошла в заходный период, когда в спокойный день 19 марта в течение 17:00—18:00 критическая частота $f_0 F2$ уменьшилась от 7.1 до 6.5 МГц, т. е. на 0.6 МГц. В возмущенный день 20 марта $f_0 F2$ уменьшилась от 8.3 до 6.0 МГц, т. е. на 2.3 МГц. При этом уменьшение $f_0 F2$ сопровождалось необычным уменьшением высоты $z_m F2$ на 50 км в течение одного часа. Именно оно могло положить начало отрицательной бури, вызвав уменьшение N в 1.9 раза за счет увеличения скорости рекомбинации при снижении высоты слоя, на который наложилось завершение процессов ионообразования в заходный период. После резкого увеличения $z_m F2$ на 200 км процесс падения N нарастал, достигнув значения около 5 раз в утренние (с 06:00) и дневные часы 21 марта. Увеличению интенсивности отрицательной бури, по-видимому, способствовали эффекты высокоширотного джоулева нагрева атмосферы, вы-

званного магнитной бурей. Таких эффектов два: перестройка глобальной термосферной циркуляции и изменение нейтрального состава [4, 7, 10, 21]. Возмущенная циркуляция обычно формирует раннюю, положительную фазу бури, если магнитная буря начинается днем, как в нашем случае [11]. Перестройка состава происходит под действием возмущенной циркуляции и начинается позже. Она сопровождается повышением содержания молекулярных компонентов термосферы $N(N_2)$ и $N(O_2)$ в высоких и средних широтах, что увеличивает коэффициент рекомбинации, ускоряет потери ионов O^+ и способствует дальнейшему углублению отрицательной бури в ночное время.

С восходом Солнца 21 марта на фоне низких значений N и малой теплопередачи от электронов к ионам, которая пропорциональна N^2 , происходил быстрый нагрев плазмы. Температура электронов к 05:00 достигла дневных значений $T_e = 2000...3500$ К на высотах 250...450 км. При таких условиях в дневное время включается еще один механизм — колебательного возбуждения молекул N_2 [11, 16, 17, 19—21], который становится существенным при значениях $T_e \geq 1500$ К [1, 2, 20, 22]. Увеличивается вклад этих молекул в увеличение коэффициента рекомбинации, что ведет к развитию глубокой депрессии N на высотах F-области, наибольшего значения она достигла в предположенные часы.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты исследования двухфазной ионосферной бури 20—21 марта 2003 г. Показано, что возможной причиной быстрой смены фаз бури явился импульс электрического поля над Харьковом с составляющей $E_y \approx \mp 15$ мВ/м, связанный с проникновением магнитосферного электрического поля в средние широты во время суббури с индексом $AE = 1200...1500$ нТл. Импульс электрического поля над Харьковом, по-видимому, вызвал необычное в заходный период уменьшение высоты $z_m F2$ на 50 км и внес вклад в последовавший быстрый подъем слоя F2 на 200 км. В последнем событии на эффект поля наложились регулярное обращение меридионального термосферного ветра v_{nx} к экватору в заходный период и дополнительное увеличение v_{nx} за счет высокоширотного джоулева нагрева атмосферы во время магнитной бури. Показано, что уменьшение электронной концентрации N за счет уменьшения высоты $z_m F2$ при смене фаз могло положить начало аномальной отрицательной ионосферной бури. Дальнейшее развитие депрессии N

было связано с изменением нейтрального состава в ночное время, к которому с восходом Солнца и увеличением температуры T_e до 2000...3500 К добавился вклад колебательно-возбужденных молекул N_2 в увеличение скорости рекомбинации. Особенностью данной бури были также квазипериодические колебания высоты $z_m F2$, коррелирующие с вариациями скорости v_z (см. также [12]).

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1987.—528 с.
2. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6—30.
3. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г. // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Казивели, Крым, 2003.—С. 113.
4. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
5. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация.—1985.—25, № 5.—С. 768—772.
6. Кринберг И. А., Тащилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.—189 с.
7. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация.—1982.—22, № 5.—С. 776—781.
8. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
9. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоаэронавигация.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
10. 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.
11. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
12. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Ionospheric wave-like disturbances (WLD) following the September 23, 1998 solar flare from Kharkiv incoherent scatter radar observations // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17—24 August 2002a. P. 2278.
13. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the Sep-

- tember 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 2002b. P. 2280.
14. 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. 26359—26366.
15. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26367—26372.
16. Mikhailov A. V., Fürster M. Some F2-layer Effects During the January 06—11, 1997 CEDAR Storm Period as Observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Facility // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 249—261.
17. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime Thermosphere Above Millstone Hill During Severe Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17275—17282.
18. Mikhailov A. V., Skoblin M. G., Fürster M. Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes // Ann. Geophys.—1995.—13.—P. 532—540.
19. 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.
20. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., et al. 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.
21. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., et al. Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A12.—P. 23359—23365.
22. 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.

ANOMALOUS IONOSPHERIC STORM ON 21 MARCH 2003

Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, S. A. Paziura,
V. I. Taran, L. F. Chernogor

Our results of the study of the two-phase ionospheric storm on 20—21 March 2003 are presented. The strongest negative phase of the storm can be considered as anomalous one because it was proceeding on the background of moderate geomagnetic disturbance ($A_p = 29$, $K_p = 5$). Special attention is paid to the diagnostic of processes accompanying the change of storm phase that occurred during sunset period (17:00—18:00 UT). The mechanisms forming a deep negative ionospheric disturbance are discussed in detail.