

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9;520.86

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

¹Інститут іоносфери НАН і МОН України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2

Надійшла до редакції 15.11.05. Після переробки 26.01.06

Наведено результати порівняльного аналізу іоносферно-термосферних ефектів трьох геокосмічних бур, які відрізняються за інтенсивністю та характером протікання. Спостереження іоносферних збурень виконано за допомогою радару некогерентного розсіяння у Харкові. Запропоновано класифікацію іоносферних збурень, в якій виділено три характерні групи. Описано фізичні схеми розвитку кожної групи збурень, які можуть бути застосовані для середньоширотної іоносфери над Європою.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части данной работы анализировались особенности крайне сильных магнитных бурь 25 сентября 1998 г. и 7—10 ноября 2004 г. [5]. Вторая часть посвящена анализу результатов наблюдений ионосферно-термосферных возмущений, сопровождавших еще три дополнительные рассматриваемые магнитные бури, которые отличались интенсивностью и характером протекания: 29—30 мая 2003 г., 17—20 апреля 2002 г. и 20—21 марта 2003 г. На основе анализа пяти геокосмических бурь предлагается классификация ионосферных возмущений с выделением трех наиболее характерных групп в соответствии с выявленными особенностями их развития.

ХАРАКТЕРНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НАД ХАРЬКОВОМ

Сверхсильная магнитная буря 29—30 мая 2003 г. Наблюдения бури проводились 30—31 мая в соответствии с международной программой Low/High Latitude. Магнитная буря

(МБ) 29—30 мая (индексы $A_p = 89$, $K_{p\max} = 8+$, $D_{st\min} \approx -131$ нТл) была вызвана приходом двух выбросов солнечной плазмы (СМЕ), которые наблюдались 29 мая в 11:50 UT и 18:30 UT и были связаны со вспышками класса X1.3 и класса X3.6 в ночь 27—28 мая. Магнитная буря имела внезапное начало 29 мая около 12:25 UT. Активный период главной фазы бури сопровождался быстрым уменьшением D_{st} до значения -131 нТл с 23:00 UT 29 мая до 03:00 UT 30 мая, после чего началась фаза восстановления, связанная с поворотом составляющей B_z межпланетного магнитного поля на север. Во время магнитной бури $B_{z\min} = -15$ нТл. Основные параметры геокосмической обстановки представлены на рис. 1.

Магнитная буря сопровождалась сильнейшей отрицательной ионосферной бурей, ее подробное описание по результатам наблюдений с помощью харьковского радара дано в работах [2, 6, 8, 9]. Обнаружены редкие для средних широт эффекты отрицательного ионосферного возмущения (рис. 2). Среди них уменьшение $NmF2$ до четырех раз во время главной фазы бури; необычный нагрев плазмы в ночь 29—30 мая с увеличением температуры ионов и электронов

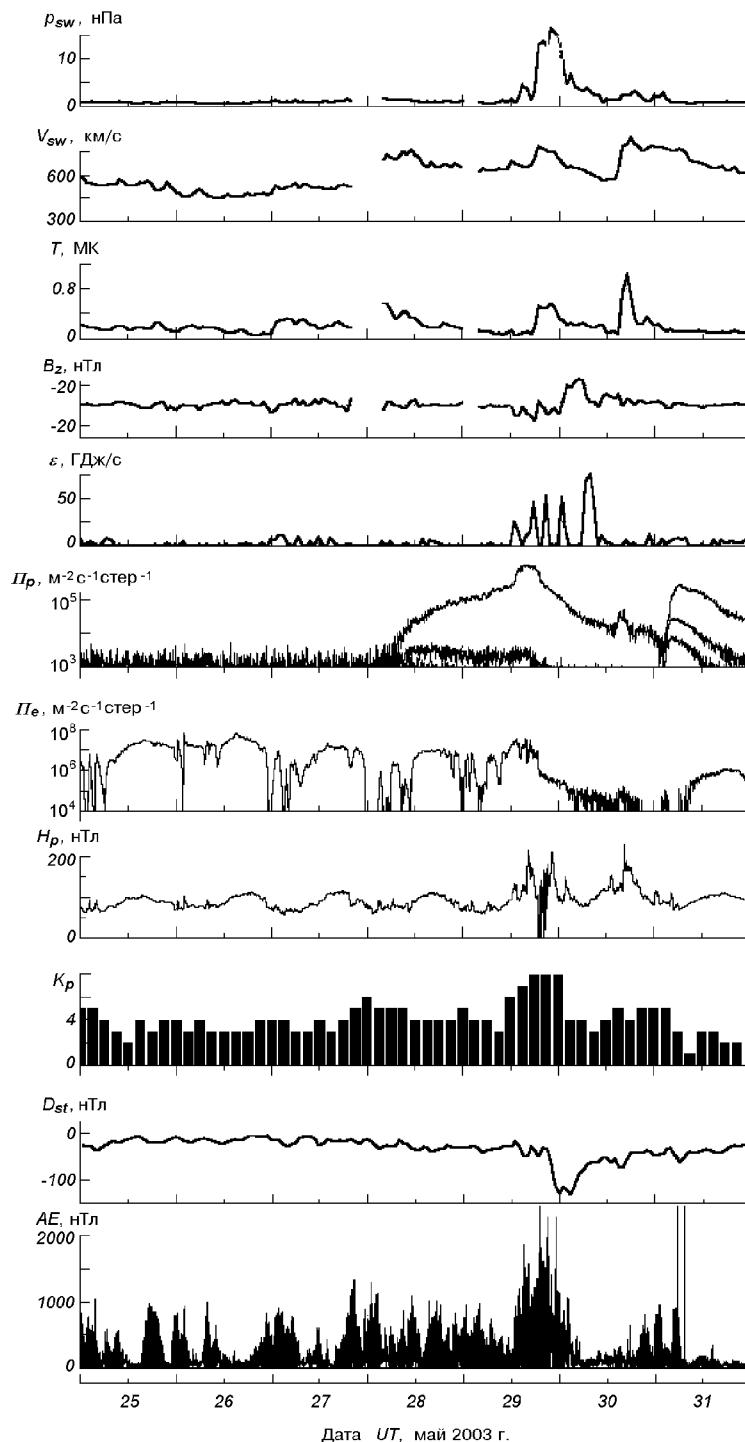


Рис. 1. Параметры солнечного ветра 25—31 мая 2003 г.: динамическое давление p_{sw} , радиальная скорость V_{sw} , температура T (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -компоненты ММП (ACE Satellite — Magnetometer), рассчитанные значения энергии ε , передаваемой солнечным ветром в магнитосферу Земли в единицу времени, плотности потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_p -компоненты геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), индексы K_p (Air Force Weather Agency), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto)

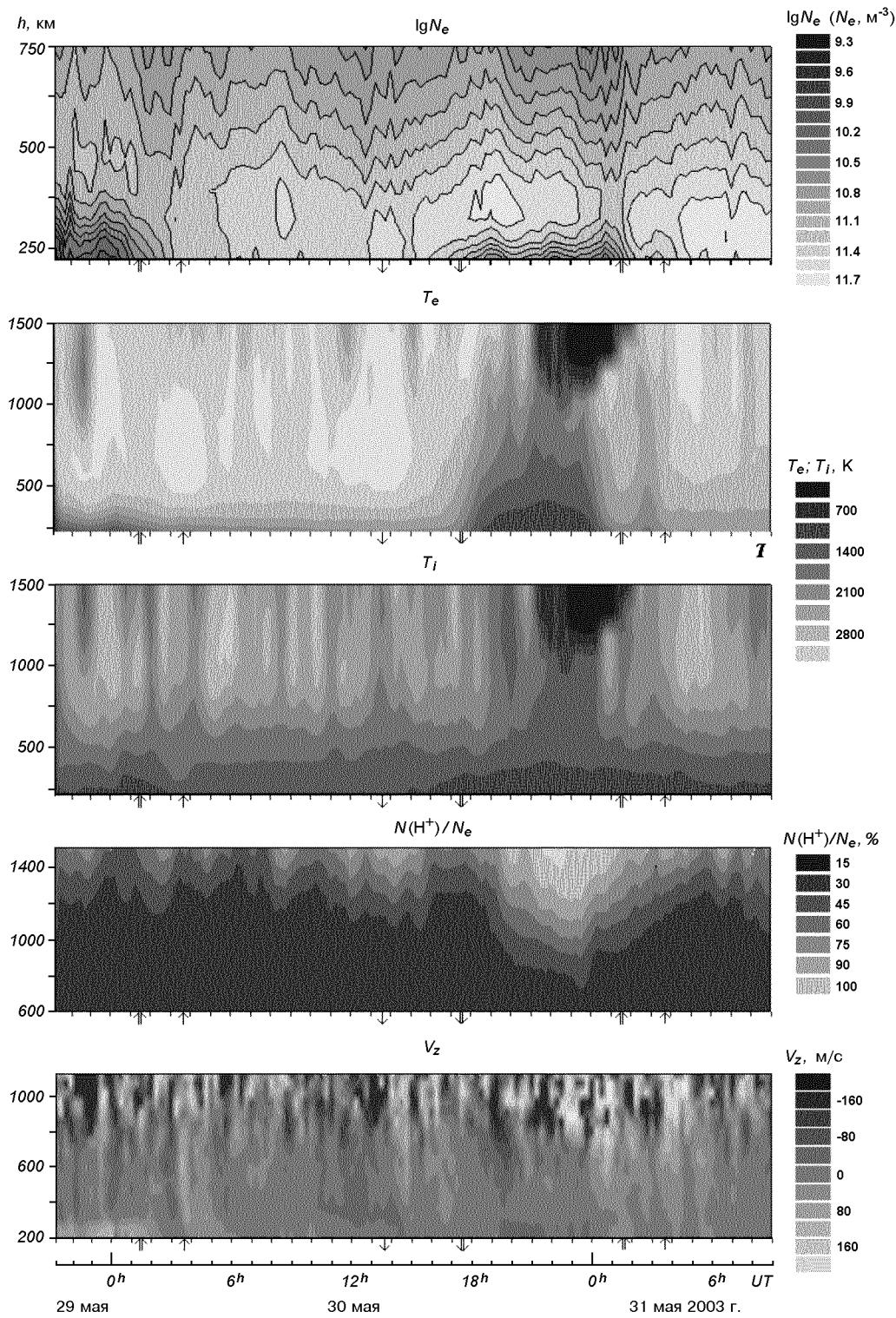


Рис. 2. Высотно-временные вариации параметров ионосферы 29–31 мая 2003 г.: $\lg N_e$, температур электронов T_e и ионов T_i , относительной концентрации ионов водорода $N(\text{H}^+)/N_e$, вертикальной скорости переноса плазмы V_z . Здесь и далее стрелки на горизонтальной оси обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца в Харькове (двойные) и в магнитосопряженной точке (одинарные) на поверхности Земли. Магнитосопряженная точка для Харькова расположена вблизи острова Мадагаскар

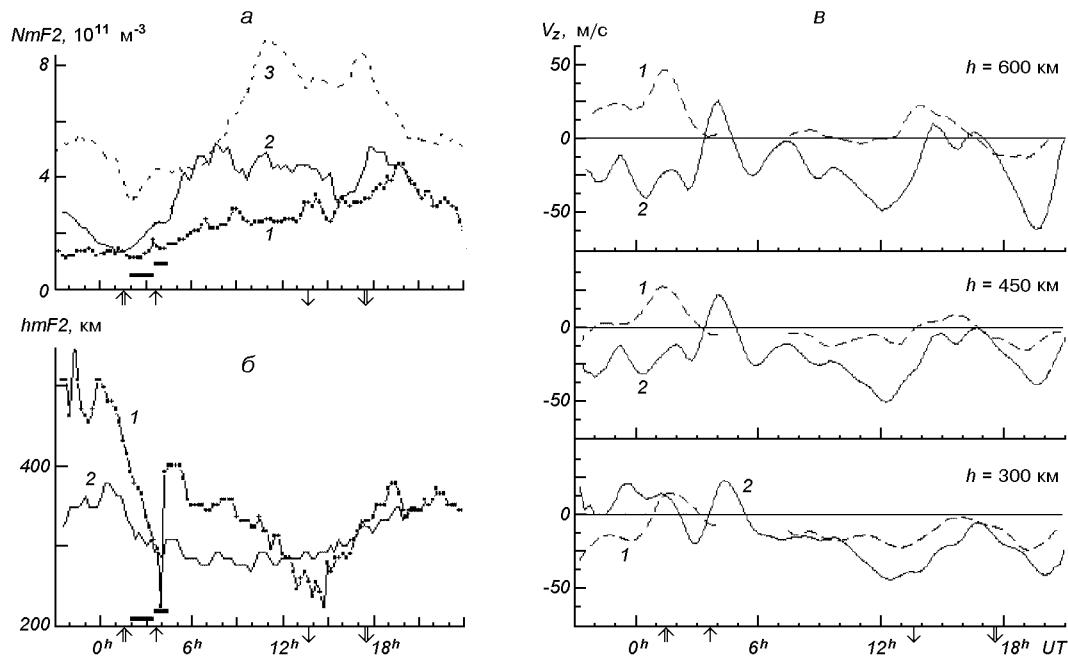


Рис. 3. Временные вариации: *a* — концентрации электронов $NmF2$ в Харькове в течение 29—30 мая 2003 г. (1), в магнитоспокойные сутки 26—27 мая 1998 г. (2) и в контрольные сутки 19—20 мая 2003 г. (по данным ионозонда в Сан-Вито, Италия) (3), *б* — высоты максимума $hmF2$ в Харькове 29—30 мая 2003 г. (1) и 26—27 мая 1998 г. (2), *в* — скорости V_z в спокойные сутки 23—24 июня 1998 г. (1) и возмущенные сутки 29—30 мая 2003 г. (2)

на высотах 300—800 км до дневных значений 1200—2400 К и 2000—3200 К соответственно, тогда как в спокойных условиях значения этих температур ночью составляли около 800 К; увеличение высоты $hmF2$ примерно на 150 км ночью во время главной фазы магнитной бури и на 70 км вблизи полудня (рис. 2 и 3, *б*). Основной причиной таких возмущений явилась, по-видимому, деформация магнитосферы во время бури, сопровождаемая смещением главного ионосферного провала (ГИП) в средние широты, а также горячей зоны вместе с плазмопаузой на меньшие L -оболочки [21—23, 33]. Такие события в ионосфере, относящейся к внутренней плазмосфере (для Харькова параметр Мак-Илвейна $L \approx 1.9$), развиваются редко. Смещение ГИП к экватору подтверждалось косвенно максимальными значениями индекса авроральной активности, равными 10, которые были зарегистрированы на спутнике NOAA POES [<http://www.sec.noaa.gov>] во время главной фазы маг-

нитной бури. Значения этого параметра характеризуют мощность энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу аврорального овала. Они свидетельствовали о смещении экваториальной границы овала до геомагнитных широт $\Phi \approx 45—51^\circ$. При этом овал мог охватывать область ионосферы над харьковским радаром, для которого $\Phi = 45.7^\circ$.

Подъем слоя $F2$ объясняется, по-видимому, воздействием нескольких факторов. Среди них эффекты расширения термосферы, увеличения меридиональной скорости термосферного ветра, направленной к экватору, и смещения к экватору ГИП. Наряду с ними существенный вклад, аналогично магнитной буре 25 сентября 1998 г., могло вносить также проникновение магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (более суток) высыпания энергичных протонов и электронов. Об этом косвенно свидетельствует увеличение плотностей потоков этих частиц, зарегистрированных

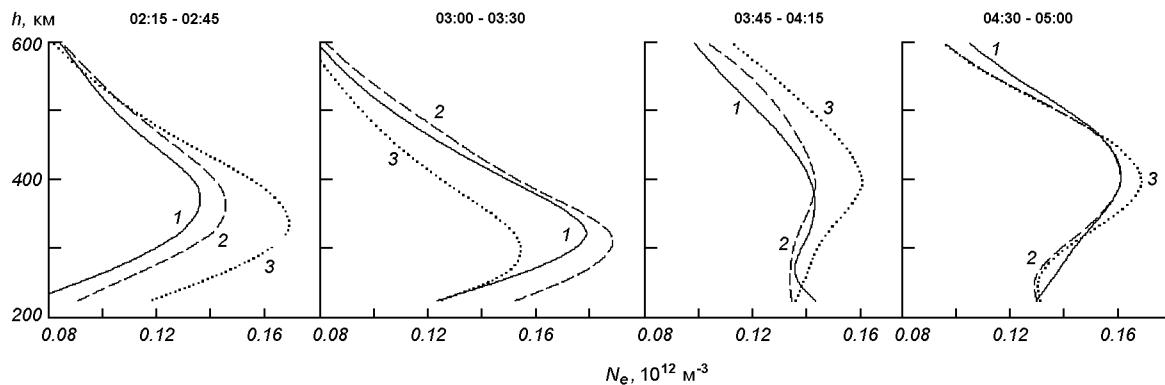


Рис. 4. Высотные профили электронной концентрации N_e в восходный период возмущенных суток 30 мая 2003 г. в последовательные моменты времени UT

на спутниках GOES-8 и GOES-12 (см. рис. 1). Оценка сверху зональной составляющей электрического поля E_y в ионосфере над Харьковом по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения проникающих в ионосферу над Харьковом полей $E_y \approx 25$ мВ/м ночью и 20 мВ/м днем. При этом для оценки E_y использовались соотношения из [1].

Обнаружены также ионосферные эффекты, связанные с нестационарностью магнитосферных электрических полей. К ним относится необычное квазипериодическое возмущение скорости V_z (рис. 3, в) на фоне нарушения утреннего нарастания $NmF2$, резкого перепада $hmF2$ вниз-вверх (на рис. 3, а и б время этих возмущений обозначено горизонтальными отрезками) и деформации слоя (рис. 4) (см. также [2, 6]). Одна из причин таких событий была связана, по-видимому, с проникновением в ионосферу средних широт импульса электрического поля с зональной составляющей $E_y \approx 20$ мВ/м, направленной на восток [24, 25]. Его источником в магнитосфере мог стать резкий поворот составляющей B_z межпланетного магнитного поля с юга на север и изменение динамического давления солнечного ветра (см. рис. 1).

Уменьшение относительной концентрации ионов водорода H^+ на высоте 1000–1500 км более чем на порядок величины во время главной фазы бури (в ночь 29/30 мая) с последующим увеличением ее днем 30 мая во время фазы восстановления (рис. 5) свидетельствовали о редких явлениях опустошения и последующего

заполнения геомагнитной силовой трубы [1, 13, 19, 27], расположенной глубоко во внутренней плазмосфере ($L \approx 1.9$), которая обычно мало подвержена влиянию магнитных возмущений. Такие эффекты связаны со смещением ГИП и провала легких ионов к экватору и сопровождаются перестройкой процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Магнитной буре сопутствовали термосферные возмущения. Расчеты по модели MSIS-86 показали, что 30 мая, например, в дневное время около 08:00 UT изменение нейтрального состава, при котором параметр $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ уменьшился в 1.4 раза, не могло обеспечить наблюдаемое в это время уменьшение $NmF2$ в 2.5 раза и, как в случае бури 25 сентября 1998 г., требовало корректировки модели либо привлечения других факторов, рассмотренных выше.

Температура нейтралов T_n в течение главной фазы МБ, как показали расчеты [2, 6], увеличилась на 200–350 К на высотах 220–470 км и составила 1000–1350 К (рис. 6). Нагрев термосферы привел к увеличению высоты термопаузы до 400 км в течение главной фазы МБ, тогда как в спокойный день ее высота составляла около 300 км.

Значительные изменения теплового режима плазмы сопутствовали рассматриваемой магнитной буре. Как показали расчеты [2, 6] по данным харьковского радара с привлечением модели MSIS-86, в возмущенный день вблизи полудня скорость нагревания электронного газа

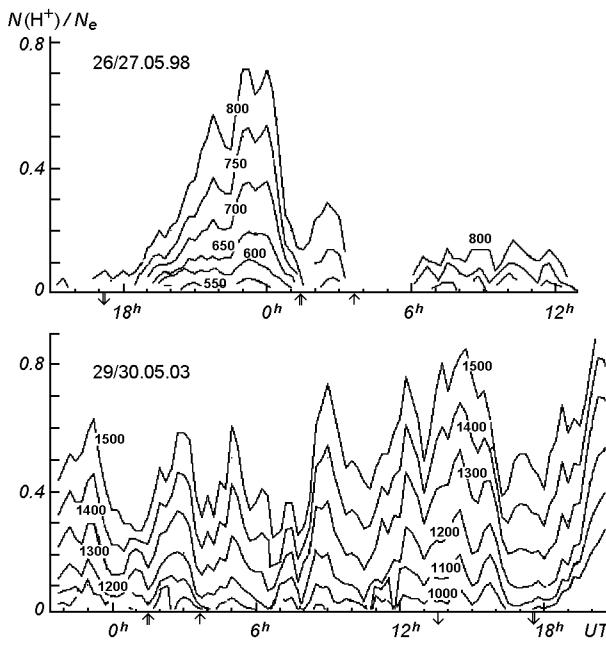


Рис. 5. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(\text{H}^+)/N_e$ на фиксированных высотах (числа у кривых) в контрольные сутки 26—27 мая 1998 г. и возмущенные сутки 29—30 мая 2003 г.

Q/N_e уменьшилась по сравнению со спокойным днем в 1.6 раза. На рис. 7 приведены результаты расчета энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, а также составляющих потерь энергии электронов в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e и нейтралами L_e/N_e . Видно, что в спокойных и возмущенных условиях вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был различным. Уменьшение Q/N_e привело к увеличению плотности теплового потока Π_T , переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов, в 1.2 раза (рис. 8). Расчеты Π_T по данным радара в Харькове представлены, например, в работах [2, 6]. Особенностью теплового режима ионосферы стало увеличение Q/N_e и плотности потока тепла Π_T во время главной фазы МБ (в ночь 29/30 мая). В спокойных условиях их значения ночью близки к нулю. Это свидетельствовало об изменении процессов, контролирующих тепловой баланс в системе ионосфера — плазмосфера во время МБ [20, 34].

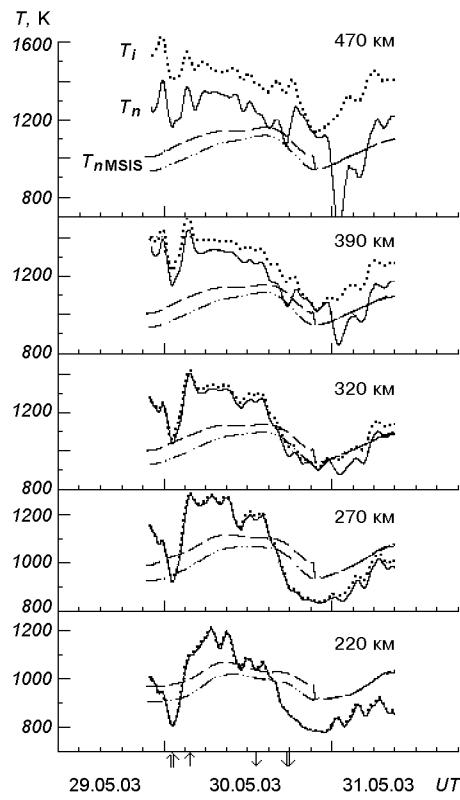


Рис. 6. Измеренные температуры ионов T_i (пунктир) и рассчитанные температуры нейтралов T_n по данным радара НР (сплошные линии) и T_{nMSIS} по модели MSIS-86 (штрихи) во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г. Приведены также значения T_{nMSIS} для спокойных суток 19 мая 2003 г. (штрих-пунктир)

Очень сильная магнитная буря 17—20 апреля 2002 г. по наблюдениям глобальной сети радаров НР. Радар в Харькове является единственной установкой НР в средних широтах европейского региона. Благодаря своему географическому положению он исключительно удачно дополняет мировую сеть радаров НР. С одной стороны, находясь на близкой географической широте с радарами Миллстоун Хилл (42.6°N) и Иркутска (52°N), радар в Харькове (49.6°N) вписывается в среднеширотную цепочку радаров, опоясывающую Западное и Восточное полушария. С другой стороны, радар в Харькове, расположенный на близкой геомагнитной долготе с обсерваторией EISCAT, образует европейскую цепочку радаров НР, которая аналогична

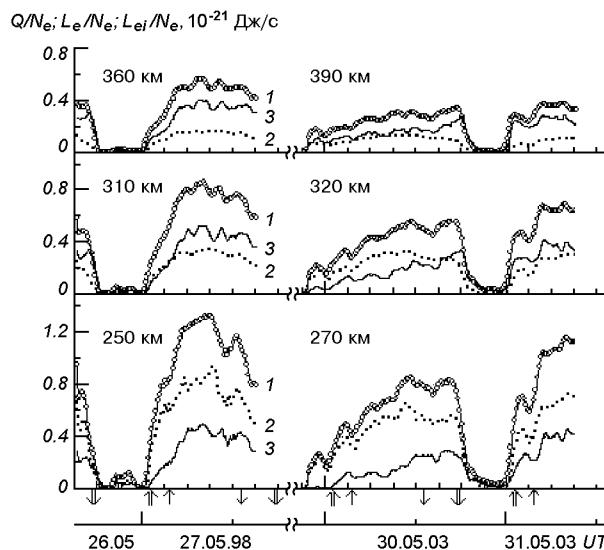


Рис. 7. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа (из расчета на один электрон) Q/N_e (1) и теплообмена электронов с атомами кислорода L_e/N_e (2) и ионами L_{ei}/N_e (3) в контрольные сутки 26—27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г.

цепочке американского континента. Такая сеть радаров позволяет исследовать глобальные процессы в ионосфере, в том числе широтно-долготные эффекты в развитии бури, и использовать их при разработке глобальных моделей ионосферы.

Измерения проводились в соответствии с международной программой координированных наблюдений проекта CEDAR [26]. Цель кампании состояла в исследовании глобальных эффектов магнитных бурь с привлечением обширной сети наземных исследовательских средств: приемников навигационной системы GPS, ионозондов и радаров НР. В этом эксперименте одновременно участвовала вся мировая сеть радаров НР. В нее входят восемь радаров, принадлежащих обсерваториям Сондрестром, Миллстоун Хилл, Аресибо, Джикамарка, EISCAT (два радара), Харькова и Иркутска.

Параметры, описывающие состояние космической погоды, приведены на рис. 9. В рассматриваемый период имели место две магнитные бури, которые протекали на фоне значительных вариаций B_z -составляющей ММП, индексов D_{st} и K_p . Бурам предшествовали две вспышки на

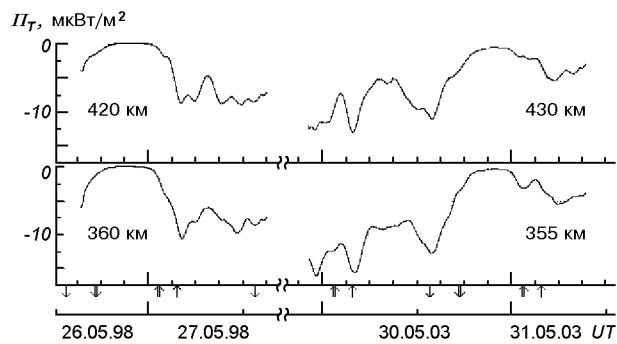


Рис. 8. Временные вариации плотности Π_T потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, в контрольные сутки 26—27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г.

Солнце класса M, которые произошли 15 и 17 апреля и сопровождались выбросами корональной массы (CME), направленными в сторону Земли. Приход первого облака солнечной плазмы зарегистрирован на спутнике ACE 17 апреля около 10:22 UT, за ним последовал поворот к югу B_z -составляющей ММП с максимальным ее значением -28 нТл. Приход второго облака CME зарегистрирован на ACE 19 апреля в 08:04 UT, при этом B_z достигала -17 нТл в течение 19 и 20 апреля. Индекс D_{st} сильно изменялся, достигая минимальных значений -105 нТл 17 апреля в 18:00 UT, -123 нТл 18 апреля в 08:00 UT, -120 нТл 19 апреля в 19:00 UT и -148 нТл 20 апреля в 07:00 UT. Максимальные значения индекса $K_p \approx 6, 7, 6$ и 7 в течение 17, 18, 19 и 20 апреля, а индекса $A_p = 41, 54, 44$ и 62 в те же дни соответственно.

Подробное описание отклика ионосферы на данную бурю в глобальном масштабе дано в работе [26]. Здесь приведена та часть результатов, которая была получена на радаре в Харькове до 16:00 UT 17 апреля, т. е. в течение главной фазы первой бури. Особенность ионосферной бури состояла в значительном уменьшении электронной концентрации в высоких широтах с постепенным ослаблением этого эффекта в направлении к средним широтам. В высоких широтах по данным радара EISCAT отрицательная фаза ионосферного возмущения развивалась очень быстро. Это свидетельствовало об

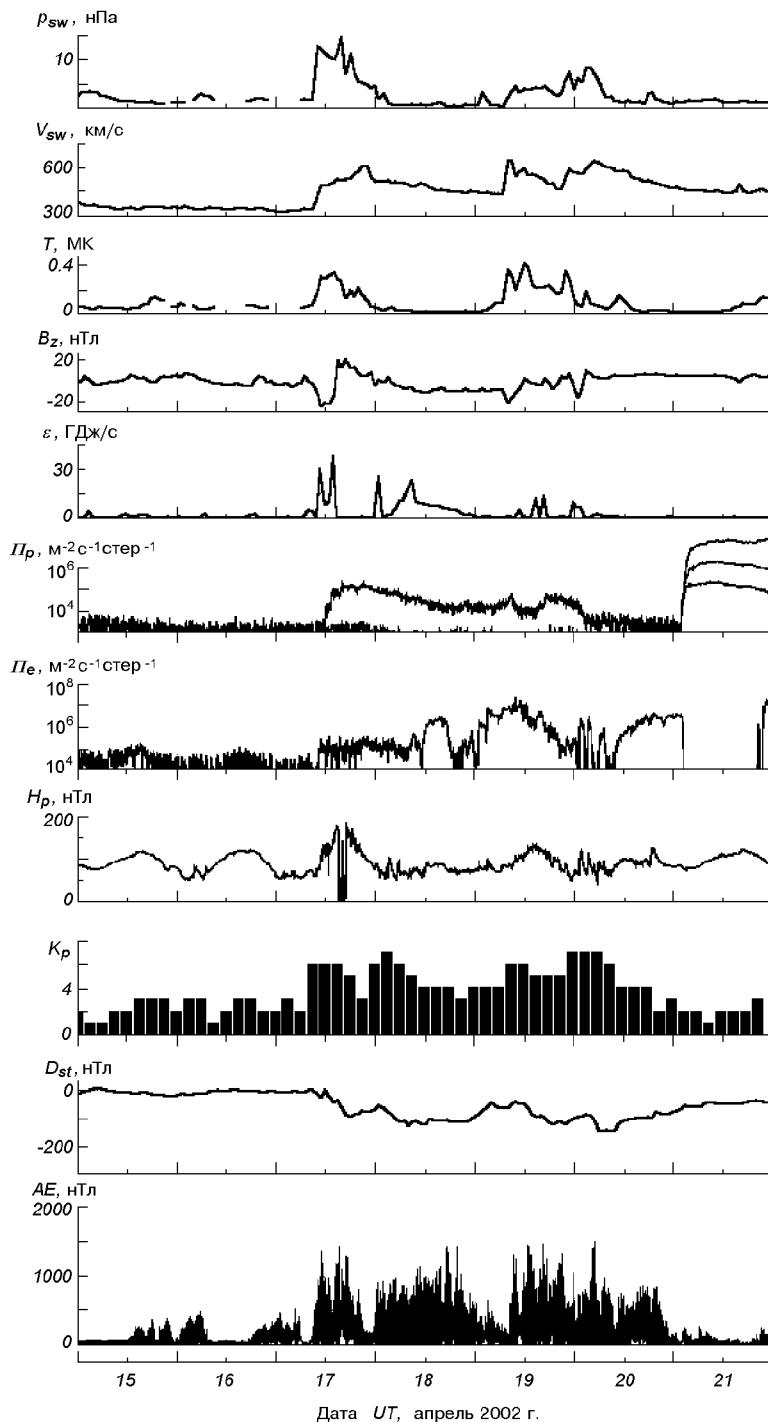


Рис. 9. Параметры солнечного ветра 15—21 апреля 2002 г.: динамическое давление p_{sw} , радиальная скорость V_{sw} , температура T (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -компоненты ММП (ACE Science Center), рассчитанные значения энергии ε , передаваемой солнечным ветром в магнитосферу Земли в единицу времени, плотности потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-8), H_p -компоненты геомагнитного поля (ИСЗ GOES-8), индексы K_p (Air Force Weather Agency), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto)

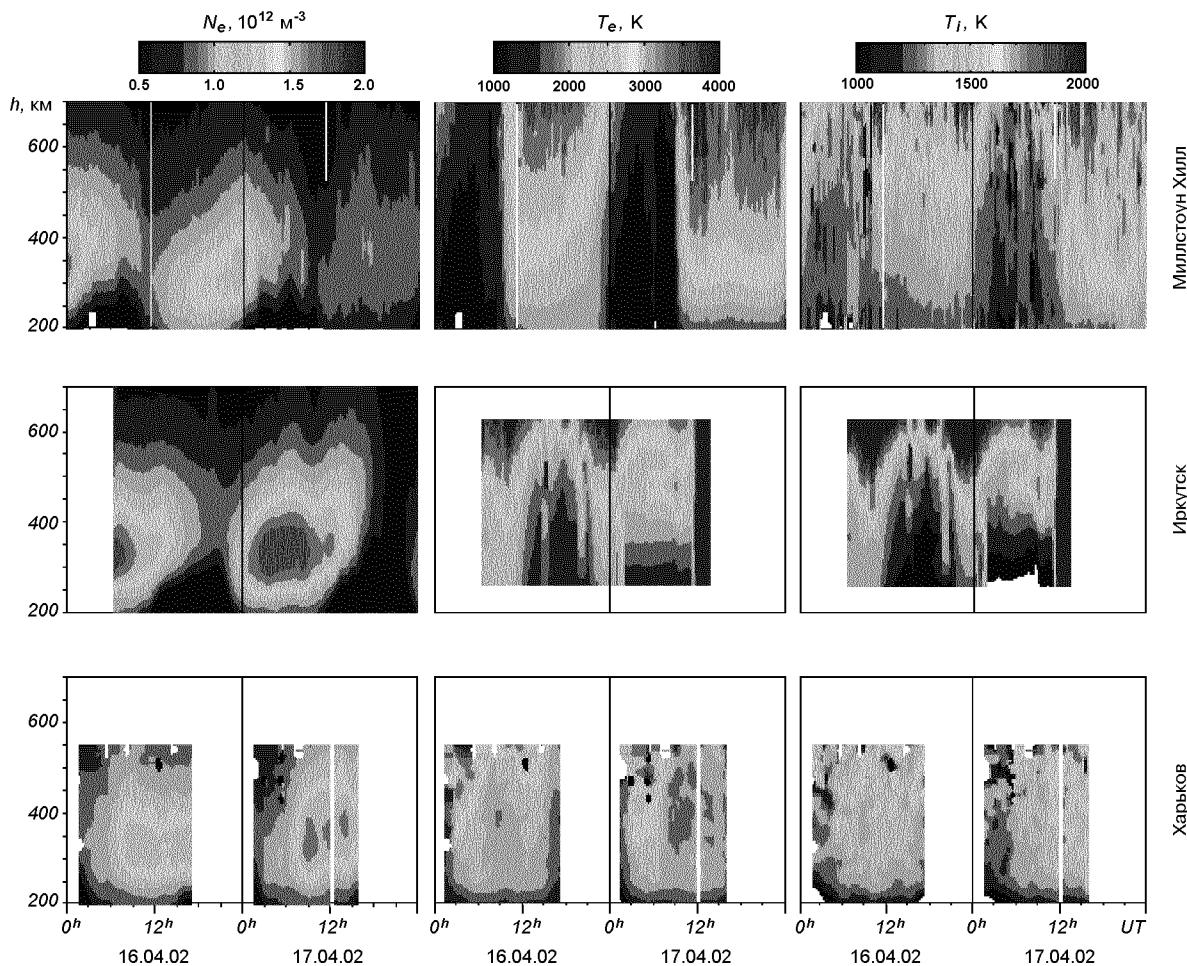


Рис. 10. Высотно-временные вариации электронной концентрации N_e (слева), температур электронов T_e (посередине) и ионов T_i (справа) 16—17 апреля 2002 г. по данным среднеширотных радаров НР Миллстоун Хилла, Иркутска и Харькова

усиления электрических полей в авроральном овале и быстрым изменением состава термосферы. Распространение отрицательной фазы к средним широтам проходило с задержкой, которая нарастала с уменьшением широты. Например, в Иркутске это запаздывание составило 6 ч, что соответствовало скорости распространения возмущения около 100 м/с. В субавроральной области (обсерватория Миллстоун Хилл) поведение ионосферы сочетало в себе особенности высоких и средних широт, с хорошо выраженным откликом ионосферы на начало бури и последующим углублением отрицательной фазы

(рис. 10). В дневном секторе средних широт восточного полушария (в Харькове) была зарегистрирована положительная фаза ионосферной бури с увеличением $NmF2$ на 15 % в интервале времени 12:00—14:00 UT, что можно объяснить преобладанием эффекта усиления направленного к экватору меридионального ветра, связанного с высокоширотным нагревом.

Значительный нагрев верхней атмосферы наблюдался в высоких широтах с преобладающим эффектом в утреннем секторе западного полушария (рис. 10). Более всего нагрев был выражен в районе радара Сондрестром (широта

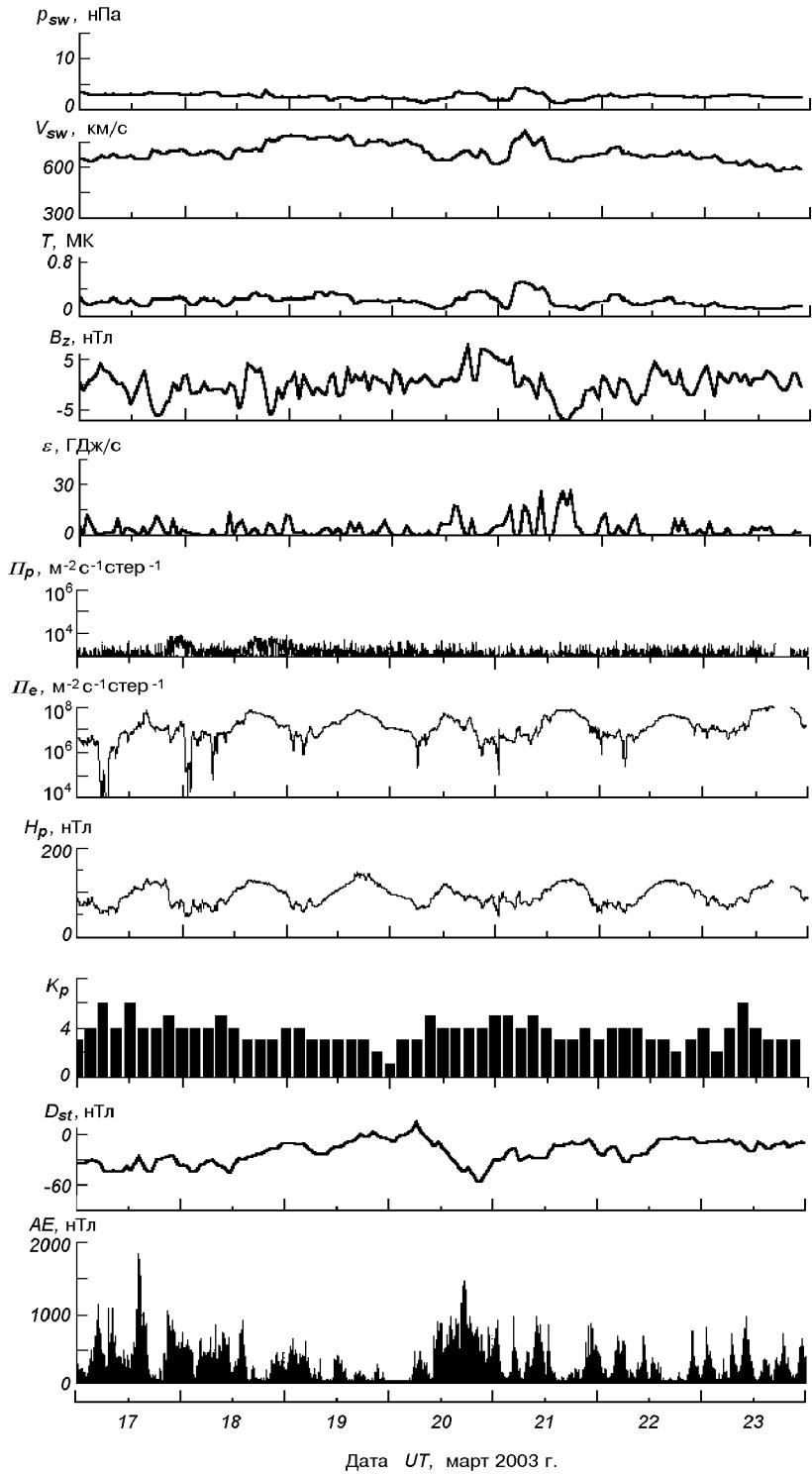


Рис. 11. Параметры солнечного ветра 17—23 марта 2003 г.: динамическое давление p_{sw} , радиальная скорость V_{sw} , температура T (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -компоненты ММП (ACE Satellite — Magnetometer), рассчитанные значения энергии ε , передаваемой солнечным ветром в магнитосферу Земли в единицу времени, плотности потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_p -компоненты геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), индексы K_p (Air Force Weather Agency), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto)

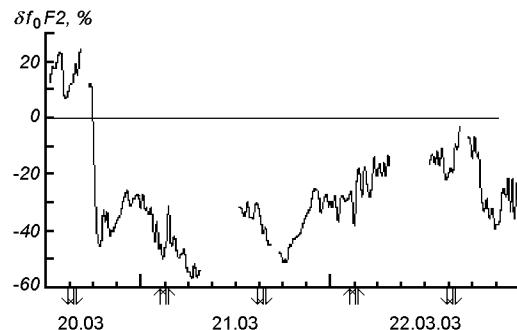


Рис. 12. Временные вариации отклонения $\delta f_0 F2$ критической частоты от значений в контрольные сутки в течение двухфазной ионосферной бури 20–22 марта 2003 г. по данным ионозонда в Харькове. В качестве контрольных взяты данные ионозондов в Харькове и в Сан-Вито за 19 марта 2003 г.

67° N), ослабевая в субавроральной области (обсерватория Миллстоун Хилл), где превышение T_i составило 200–300 K, и уменьшаясь до значения вариаций температур от дня ко дню в низких широтах (обсерватория Аресибо, широта 18.3° N). В Аресибо отклик ионосферы на бурю проявился как колебание высоты F -слоя в пределах 90 км. Зарегистрированы также эффекты проникновения магнитосферных электрических полей из высоких в низкие широты и необычное увеличение в дневное время меридионального термосферного ветра, направленного к экватору. В средних широтах увеличение скорости меридионального ветра привело к подъему слоя $F2$ (в Харькове примерно на 50 км), в низких широтах западного полушария (обсерватория в Джикамарке, широта 11.9° S) этот эффект был выражен слабо.

Умеренная магнитная буря 20–21 марта 2003 г. Наблюдения проводились 19–23 марта в соответствии с международной программой Storms/TIMED/LTCS. Радар работал в режиме двухимпульсного зондирования [14] в диапазоне высот 100–550 км с высотным разрешением около 10 км. Состояние космической погоды иллюстрирует рис. 11. Рассматриваемый период характеризовался высокой вспышечной активностью Солнца. Однако геоэффективность вспышек была небольшой, их результатом явилась умеренная МБ 20–21 марта 2003 г. с индексами $A_p = 21$ и 29 , $K_{p\max} = 5.0$, $D_{st\min} = -57$ нТл,

$B_{z\min} = -7$ нТл. Буря началась внезапно 20 марта около 04:45 UT, главная фаза продолжалась до 20:00 UT, а фаза восстановления — до конца наблюдений. Эффекты данной бури подробно описаны в работах [3, 4, 7, 10]. Здесь мы остановимся кратко на основных особенностях бури.

Магнитную бурю сопровождала двухфазная ионосферная буря (рис. 12, 13). Особенность этой бури состояла в том, что ее сильнейшая отрицательная фаза протекала на фоне умеренного возмущения геомагнитного поля (индекс $K_{p\max} = 5$). Зафиксированы максимальные значения $f_0 F2$, равные 11.3 МГц 20 марта и 5.8 МГц 21 марта, что соответствовало увеличению $NmF2$ примерно в 1.5 раза во время положительной фазы бури и уменьшению $NmF2$ до пяти раз — в течение отрицательной фазы по сравнению с контрольным днем. Поведение концентрации электронов N_e и других параметров ионосферы во время бури в диапазоне высот 100–550 км иллюстрирует рис. 14. Зарегистрировано большое отличие дневных значений температур электронов T_e во время положительной (1300 K на высоте 300 км) и отрицательной (2400 K) фаз бури, тогда как в спокойный день $T_e = 1700$ K. Отличия значений T_e в рассматриваемые дни объясняются разной скоростью охлаждения электронного газа при упругом теплообмене с ионами, которая пропорциональна N_e^2 . Увеличение температуры ионов T_i в дневное время на высотах 250–300 км составляло около 50 K 20 марта и 100–150 K 21 марта. Оно, по-видимому, определялось воздействием высокоширотного источника нагрева, который не был значительным во время умеренной МБ (см. зависимость $\varepsilon(t)$ на рис. 11), а также увеличенным теплообменом ионов с электронами за счет большой разности температур электронов и ионов 21 марта.

Положительная фаза 20 марта носила характер длительного (6 ч) возмущения. Ее причиной, по-видимому, было усиление меридионального ветра V_{nx} к экватору, связанное с высокоширотным нагревом термосферы [11, 12, 23]: оценки по результатам измерений дали увеличение V_{nx} на 25 м/с (рис. 15), что привело к наблюдаемому увеличению $hmF2$ примерно на 20 км [3, 4, 7, 10].

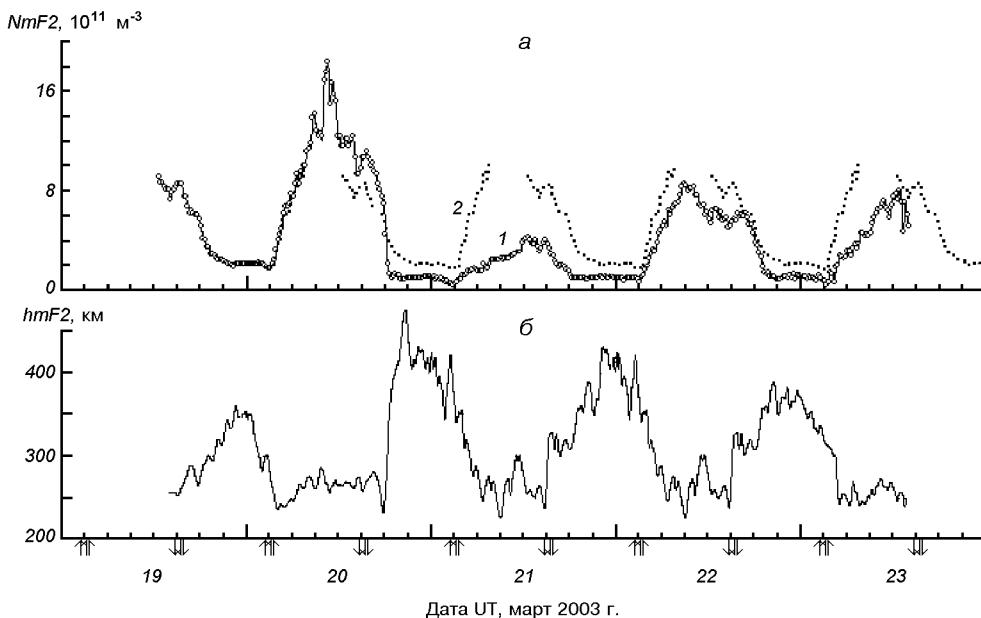


Рис. 13. Временные вариации: *а* — электронной концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$ (1 — измеренной в Харькове в течение 19—23 марта, 2 — в контрольные сутки), *б* — высоты максимума $hmF2$

Смена фаз бури произошла 20 марта при заходе Солнца (в интервале 17:00—18:00 UT). В этот период были зарегистрированы необычно быстрый перепад высоты $hmF2$ на 50 км вниз и затем вверх примерно на 200 км (рис. 13, *б*) на фоне уменьшения $NmF2$ в два раза при уменьшении $hmF2$ на 50 км и квазипериодического изменения вертикальной скорости плазмы V_z примерно от +10 до -35 м/с и далее до +20 м/с на высоте 300 км (см. рис. 15). Одной из основных причин быстро протекающих ионосферных эффектов мог быть импульс электрического поля в ионосфере над Харьковом с зональной составляющей E_y , изменяющей направление с запада на восток и имеющей значения около -10 и +15 мВ/м (при типичных невозмущенных значениях поля E_y около 1 мВ/м) [24, 25]. Импульс, по-видимому, был вызван проникновением магнитосферного электрического поля в средние широты во время интенсивной суббури с индексом $AE \approx 1500$ нТл, которая наблюдалась около 18:00 UT, т. е. с развитием электрической бури. Случай таких быстрых «переключений» восточно-западного направления электрического поля объясняются изменениями электродинамической обстановки во время магнито-

сферной суббури (градиентов проводимости, электрических полей и токов на краях западной авроральной электроструи), нестационарностью магнитосферной конвекции (см. [31, 32]). Именно импульс электрического поля в ионосфере, по-видимому, явился одной из причин смены фаз бури.

Еще один механизм внес существенный вклад в увеличение $hmF2$ в процессе смены фаз бури, а именно перемещающееся атмосферное возмущение (ПАВ) [30—32], которое, вероятно, было вызвано более ранней и менее интенсивной суббурой около 16:00 UT ($AE = 1000$ нТл). Эффекты ПАВ проявились в запаздывании возмущения скорости V_z , которое распространялось сверху вниз (рис. 15). Запаздывание составило 80 мин в интервале высот 400—200 км. Это соответствовало скорости около 40 м/с, значение которой характерно для вертикальной составляющей скорости внутренних гравитационных волн (ВГВ). Кроме того, амплитуда возмущения V_z нарастала до высоты 350 км, после чего стала уменьшаться. Такие особенности диссилиации энергии волн с увеличением высоты также типичны для ВГВ.

Началом сильного отрицательного возмуще-

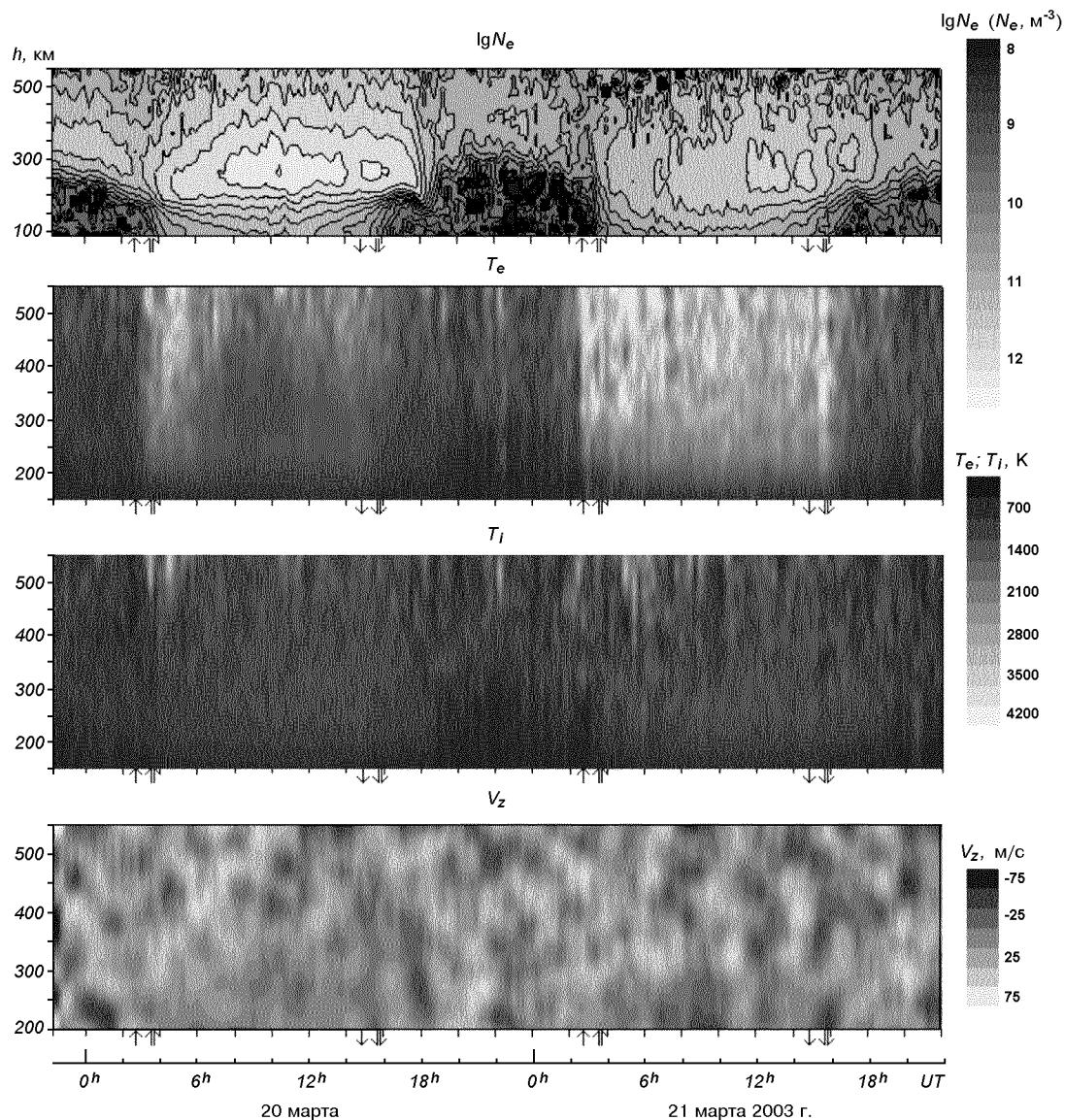


Рис. 14. Высотно-временные вариации параметров ионосферы 20—21 марта 2003 г.: $\lg N_e$, температур электронов T_e и ионов T_i , вертикальной скорости переноса плазмы V_z

ния послужило уменьшение $NmF2$ в два раза при смене фаз бури, тогда как в спокойный день оно составляло около 20 %. Оценки показали [3, 4, 7, 10], что уменьшение $NmF2$ произошло за счет увеличения нисходящей скорости переноса плазмы V_z (рис. 15) и изменения скорости W на -25 м/с вблизи максимума слоя $F2$ на фоне увеличения коэффициента потерь β (O^+)

почти в пять раз при снижении $hmF2$ примерно от 280 до 230 км (рис. 13, б). Дальнейшее развитие депрессии N_e , по-видимому, было связано с изменением нейтрального состава с максимумом в утреннем секторе [30, 31], к которому с восходом Солнца и увеличением температуры T_e до 2000—3500 К мог добавиться также вклад колебательно-возбужденных молекул

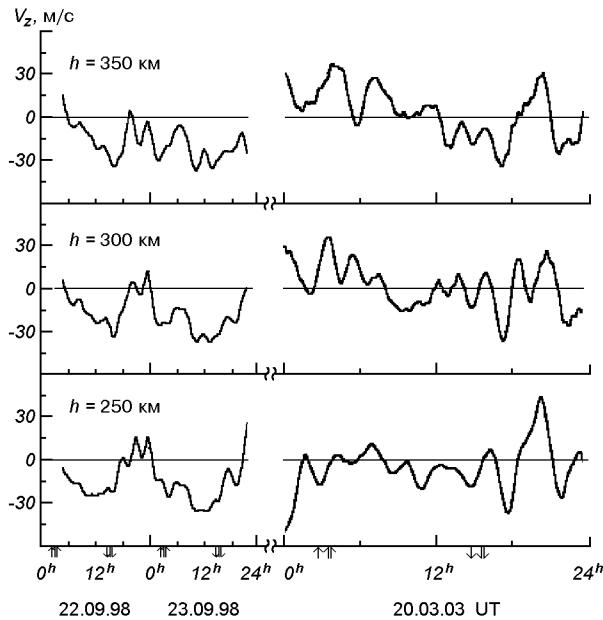


Рис. 15. Временные вариации вертикальной составляющей скорости V_z переноса плазмы: *a* — в спокойные сутки 22–23 сентября 1998 г., *б* — в возмущенные сутки 20 марта 2003 г.

$N_2(v)$ в увеличение потерь ионов O^+ [23, 28, 29].

Рассматриваемая умеренная магнитная буря не вызвала существенных термосферных возмущений. Расчеты показали [3, 4, 7, 10], что температура нейтралов T_n в дневное время увеличилась примерно на 50 и 100 К в течение положительной и отрицательной фаз ИБ, а высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, составляла около 300 км, как и в спокойный день. При этом установлено, что модель MSIS-86 дает заниженные значения T_n по сравнению с расчетными величинами в дневное время. В слабо возмущенных условиях 22 марта на высоте 300 км отличия составляли около 120 К, во время бури — до 150 К 20 марта и до 180 К 21 марта.

В то же время тепловой режим плазмы оказался очень чувствительным к ионосферным возмущениям. Расчеты показали, что подвод энергии к электронному газу Q/N_e около полудня во время отрицательной фазы бури (21 марта) превышал значение Q/N_e в течение положительной фазы (20 марта) в 2.5–4 раза, а в слабо возмущенные сутки (22 марта) — до двух раз (рис. 16). При этом во время отрицательной фазы отмечена также наибольшая по модулю величина плотности потока тепла Π_T , переноси-

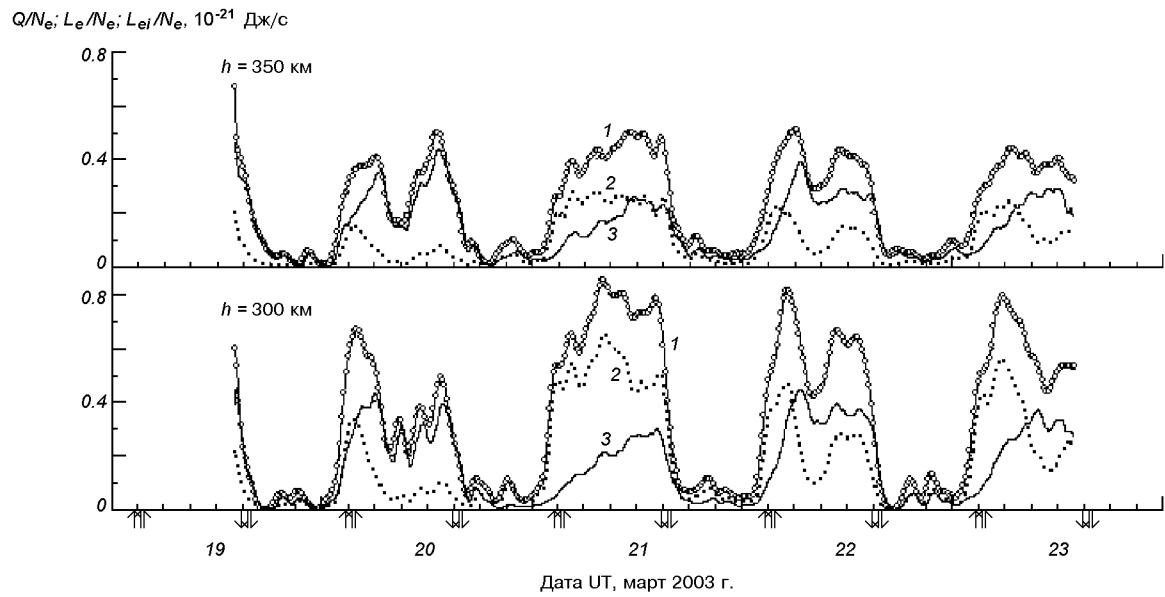


Рис. 16. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа (из расчета на один электрон) Q/N_e (*1*) и теплообмена электронов с атомами кислорода L_e/N_e (*2*) и ионами L_{ei}/N_e (*3*) в период 19–23 марта 2003 г.

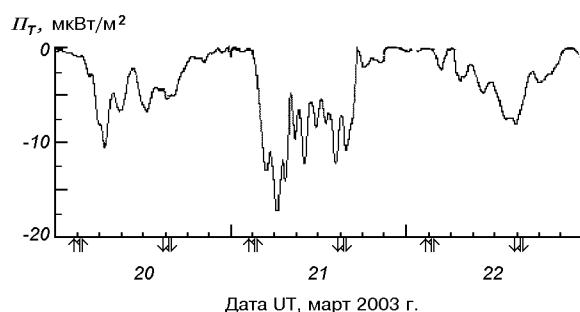


Рис. 17. Временные вариации плотности Π_T потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, на высоте 445 км в период 20–22 марта 2003 г.

мого электронами из плазмосферы (рис. 17). Это свидетельствовало о значительном изменении теплового баланса между ионосферой и плазмосферой во время бури.

ОБСУЖДЕНИЕ

На примере рассмотренных особенностей пяти магнитных бурь, которые охватывают около полуцикла солнечной активности, и сопутствующих им процессов в ионосфере над Харьковом (табл. 1) можно сформулировать основные закономерности этих процессов. Описанные ионосферные бури можно условно разделить на три группы.

К *первой группе* относятся интенсивные ионосферные бури, развивающиеся в периоды крайне сильных магнитных бурь ($K_{p\max} \geq 8$). К ним принадлежали магнитные бури 25 сентября 1998 г., 29–30 мая 2003 г. и 7–10 ноября 2004 г. Они имели продолжительные периоды (от 6–9 до 12 ч) высокой геомагнитной активности ($K_p \geq 8$), минимальные значения индекса $D_{st} = -210, -131$ и -383 нТл, активный период главной фазы бури протекал с высокими значениями производной $|D_{st} / dt| = 35–65$ нТл/ч, характеризующей скорость нарастания магнитосферного кольцевого тока, а значит и мощность МБ, и приходился на интервал времени, когда харьковский радар находился в ночном и предутреннем секторах. Сопровождающим их ионосферным бурям были присущи редкие для средних широт возмущения: уменьшение в течение

главной фазы МБ электронной концентрации $NmF2$ до 3.5–7 раз; подъем слоя $F2$ на 100–180 км днем и на 150–300 км ночью; ночное нагревание плазмы до 2400–3200 К; увеличение температуры нейтралов на 200–600 К и увеличение высоты термопаузы не менее чем до 400 км; изменение процессов, контролирующих тепловой баланс ионосферы и плазмосферы; значительное уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ во время главной фазы бури и ее последующее нарастание в фазе восстановления. Основной причиной возмущений является деформация магнитосферы, которая сопровождается смещением главного ионосферного провала, провала легких ионов и горячей зоны на геомагнитные оболочки L , лежащие глубоко во внутренней плазмосфере (для Харькова $L = 1.9$).

Деформация магнитосферы является результатом взаимодействия солнечного ветра и переносимого им ММП с геомагнитным полем, которое может приводить к пересоединению силовых линий геомагнитного и межпланетного магнитных полей при усилении южного компонента последнего, в рассматриваемых бурях $B_z \approx -15...-45$ нТл. Отметим, что для данной группы бурь величина инжектируемой в магнитосферу энергии солнечного ветра $\varepsilon \geq 75...450$ ГДж/с была значительной. Нестационарные возмущения магнитосферных электрических полей, сопровождающие усиление авроральных электроструй во время суббури на фоне бури, а также продолжительные высapsulationы энергичных частиц из магнитосферы могли приводить к проникновению магнитосферных электрических полей в средние широты и дестабилизировать состояние ионосферы. Результатом этих событий стали значительные изменения параметров ионосферы.

Ко *второй группе* относится интенсивная ионосферная буря, сопровождающая умеренную магнитную бурю 20–21 марта 2003 г. ($K_{p\max} = 5$). Последняя явилась откликом геомагнитного поля на малое поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу (энергетическая функция Акасофи $\varepsilon_{\max} \approx 30$ ГДж/с). Буря началась в утренние часы (04:45 UT), главная фаза развивалась медленно ($|D_{st} / dt| \approx 5$ нТл/ч), достигнув $D_{st\min} = -57$ нТл в 20:00 UT. Ионосферная буря имела двухфазный

Таблица 1. Основные параметры геокосмических бурь (индекс «0» относится к невозмущенным условиям, г. ф. МБ — главная фаза магнитной бури, о. ф. ИБ — отрицательная фаза ионосферной бури)

Параметр	7—10 ноября 2004 г.	25 сентября 1998 г.	29—30 мая 2003 г.	17 апреля 2002 г.	20—21 марта 2003 г.
$K_{p\max}$	9—	8+	8+	7	5
$D_{st\min}$, нТл	-373	-210	-131	-105	-57
$B_{z\min}$, нТл	-45	-17	-15	-24	-7
AE , нТл	2500	2000—2500	2000—2500	1500	1500
ε_{\max} , ГДж/с	450	100	75	40	30
$NmF2/(NmF2)_0$ (п. ф. ИБ)	—	—	—	1.15 (г. ф. МБ, день)	1.5 (г. ф. МБ, день)
$\Delta hmF2$, км (п. ф. ИБ)	—	—	—	50	20
$(NmF2)_0/NmF2$ (о. ф. ИБ)	6—7 (вблизи г. ф. МБ)	3.5 (г. ф. МБ, ночь)	4 (г. ф. МБ)	—	5
$\Delta hmF2$, км (о. ф. ИБ)	300 (ночь) 150—180 (день) (г. ф. МБ)	100 (г. ф. МБ, ночь)	160 (г. ф. МБ)	—	> 100 (ночь и утро после г. ф. МБ)
$\Delta T_e = T_e - T_{e0}$, К	1100	750	1400—2400	≈0	700
T_e/T_{e0}	2.6 (300 км г. ф. МБ, ночь)	1.5 (500 км, г. ф. МБ, утро)	2.75—4 (≈300—800 км, г. ф. МБ, ночь)	≈1 (300 км, г. ф. МБ, день)	1.4 (300 км, о. ф. ИБ, день)
$\Delta T_i = T_i - T_{i0}$, К	450	400	400—1400	≈0	100
T_i/T_{i0}	1.6 (300 км, г. ф. МБ, ночь)	1.4 (500 км, г. ф. МБ, утро)	1.5—3 (≈300—800 км, г. ф. МБ, ночь)	≈1 (300 км, г. ф. МБ, день)	≈1.1 (300 км, о. ф. ИБ, день)
$\Delta T_n = T_n - T_{n0}$, К	680	510	330	≈0	100
T_n/T_{n0}	≈ 2 (300 км, г. ф. МБ, ночь)	≈ 1.5 (400 км, г. ф. МБ)	≈ 1.4 (320 км, г. ф. МБ, ночь)	≈ 1 (300 км, г. ф. МБ, день)	≈ 1.1 (300 км, о. ф. ИБ, день)
$\Pi_{p\max}$, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	не вычислялся	$4 \cdot 10^{12}$ (300 км, г. ф. МБ, утро)	$5 \cdot 10^{12}$ (≈300 км, после г. ф. МБ, утро)	$-6 \cdot 10^{13}$ (350 км, г. ф. МБ, день)	не вычислялся
$(Q/N_e)/(Q/N_e)_0$	0.9 (300 км, г. ф. МБ, день)	≈ 0.5 (300 км, г. ф. МБ)	0.7 (≈300 км, о. ф. ИБ, день)	не оценивалось	1.3 (300 км, о. ф. ИБ, день)
Π_T/Π_{T0}	≈ 3 (350 км, г. ф. МБ, день)	1.9 (350 км, г. ф. МБ)	1.2 (355 км, о. ф. ИБ, день)	≈1	3.0 (445 км, о. ф. ИБ, день)
E_y , мВ/м	**35...45 (день) и 50 (ночь) (г. ф. МБ)	*13...17 (утро) **17 и 12 (г. ф. МБ)	*20 (утро) **25 (ночь) и 20 (день)	не зарегистрированы	*-10...+15 (период захода Солнца)

Примечание. * — Эффекты проникновения в ионосферу средних широт магнитосферных электрических полей с компонентой E_y , связанные с нестационарными возмущениями этих полей

** — Эффекты проникновения в ионосферу средних широт магнитосферных электрических полей с компонентой E_y , связанные с выбыпаниями энергичных частиц из магнитосферы

*** — Необычная волна меридионального ветра к экватору в дневное время

Таблица 2. Характеристики составляющих геокосмической бури (МБ — магнитная буря, ИБ — ионосферная буря, АБ — атмосферная буря, ЭБ — электрическая буря, ГИП — главный ионосферный провал)

Интенсивность бурь	Примеры	Эффекты ионосферной бури	Причины	Механизм
Интенсивная МБ Интенсивная ИБ Интенсивная АБ Интенсивная ЭБ	Бури 25.09.98, 29—30.05.03, 7—10.11.04	Уменьшение $NmF2$ в 3.5—7 раз. Ночной нагрев плазмы до 2400—3200 К. Подъем слоя $F2$ на 100—300 км. Уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на порядок величины с последующим восстановлением. Эффекты проникновения в средние широты магнитосферных электрических полей	Смещение аврорального овала, ГИП, провала легких ионов и горячей зоны в средние широты, опустошение магнитной силовой трубы. Магнитосферные суббури	Взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем, деформация магнитосферы. Высыпание энергичных частиц из магнитосферы
Умеренная МБ Интенсивная ИБ Интенсивная АБ Интенсивная ЭБ	Бури 20—21.03.03	Уменьшение $NmF2$ до пяти раз, сопровождаемое увеличением T_e в дневное время до 2700—3300 К на высотах 300—500 км, подъемом максимума слоя $F2$ более чем на 100 км в ночные часы. Эффекты проникновения в средние широты магнитосферных электрических полей и прохождения ПАВ	Смена фазы бури за счетdestabilizирующего воздействия импульса электрического поля с «переключением» направления компоненты E_y с запада на восток и ПАВ, генерируемых магнитосферными суббурами	Магнитосферные суббури, сопровождаемые генерацией ПАВ и нестационарными возмущениями магнитосферных электрических полей
Интенсивная МБ Умеренная ИБ Умеренная АБ Слабая ЭБ	Бури 17.04.02	Увеличение $NmF2$ на 15 %, подъем слоя $F2$ на 50 км, температура плазмы не изменилась	Перестройка глобальной термосферной циркуляции и нейтрального состава за счет нагрева высоколатитной атмосферы	Трансформация отрицательной ИБ в высоких широтах в положительную fazu в дневном секторе средних широт

характер и началась с положительной фазы. Отличительная особенность этой бури состояла в том, что ее отрицательная фаза, протекая на фоне умеренной магнитной активности, сопровождалась сильнейшим ионосферным возмущением с уменьшением $NmF2$ до пяти раз, увеличением температуры электронов в дневное время до 2400—3500 К на высотах 300—500 км, подъемом максимума слоя $F2$ более чем на 100 км в ночь 20—21 марта и вблизи восхода Солнца. Причиной смены фаз бури, которая произошла в течение менее одного часа в заходный период, по-видимому, явилось наложение эффектов двух дестабилизирующих факторов, генерируемых магнитосферными суббурами: проникновения импульса электрического поля в ионосферу над Харьковом с составляющей E_y , изменяющей направление с запада на восток и имеющей значения −10 и +15 мВ/м, и прохож-

дения ПАВ. Эффект проникновения импульса электрического поля с зональной составляющей $E_y \approx -10$ мВ/м, направленной на запад, мог положить начало отрицательной ионосферной бури.

Ионосферная буря *третьей группы*, которую мы отнесли к умеренным ионосферным бурам, развивалась во время очень сильной магнитной бури 17 апреля 2002 г. ($A_p = 41$, $K_{p\max} \approx 7$, $D_{st\min} = -106$ нТл), которая была вызвана сравнительно небольшим поступлением энергии в магнитосферу ($\epsilon_{\max} \approx 40$ ГДж/с). Наблюдения в Харькове характеризуют ионосферные эффекты главной фазы первой магнитной бури из серии последовательных геомагнитных возмущений с изменяющейся интенсивностью, которые происходили в течение 17—20 апреля. Особенность этой бури состояла в значительном уменьшении электронной концентрации и нагреве верхней

атмосферы в высоких широтах с постепенным ослаблением этих эффектов в направлении к средним широтам. В дневном секторе на широте радара в Харькове буря трансформировалась в небольшую положительную фазу (с увеличением $NmF2$ на 15 % и подъемом слоя на 50 км), без выраженного изменения теплового режима ионосферы. Эти данные характеризуют только начальную фазу ионосферных возмущений по наблюдениям в Харькове. Они, безусловно, имели дальнейшее развитие, не регистрируемое нами. Тем не менее, результаты представляют интерес как частный случай возмущения среднеширотной ионосферы в период главной фазы очень сильной магнитной бури, начавшейся в Харькове в дневное время.

На основе проведенного анализа предложена классификация ионосферных возмущений применительно к условиям среднеширотной ионосферы европейского региона. Она представлена в табл. 2. Выявленные особенности возмущений ионосферы над Харьковом позволяют построить морфологическую картину и физическую схему их развития. Таких схем представляется три.

1. Очень сильная магнитная буря, к которой относятся бури с $K_p \geq 7$, сопровождается интенсивными ионосферной, атмосферной и электрической бурями. Ионосферная буря является отрицательной. Интенсивной ионосферной бурей будем именовать бурю, для которой N_e уменьшается более чем в два раза. Магнитная буря может начинаться в дневное время (бури 29—30 мая 2003 г. и 7—10 ноября 2004 г.) либо около полуночи (буря 25 сентября 1998 г.). Важно то, что активный период ее главной фазы развивается в ночном либо утреннем секторах (для Харькова). Буря сопровождается деформацией магнитосферы, которая вызывает редкие для средних широт явления. Они связаны со смещением аврорального овала, ГИП, провала легких ионов и горячей зоны на геомагнитные оболочки L , лежащие глубоко во внутренней плазмосфере ($L \approx 1.9$). Эти процессы приводят к значительным изменениям структуры, динамики и теплового режима ионосферы и термосферы.

2. Умеренная магнитная буря, к которой относятся бури с $K_p = 5—6$, сопровождается интенсивными ионосферной, атмосферной и электрической бурями. Примером может служить маг-

нитная буря 21 марта 2003 г. при $A_p = 29$, $K_{pmax} = 5$, $D_{smin} = -57$ нТл. Ее начало приходится на утренние часы, максимум главной фазы развивается в вечернее время. Ионосферная буря имеет двухфазную структуру. Она начинается с положительной фазы, имеет сильно выраженную отрицательную фазу и сопровождается уменьшением $NmF2$ до пяти раз. Смена фаз зарегистрирована в заходный период. Причиной смены фаз бури могло быть дестабилизирующее воздействие двух факторов: импульса электрического поля с составляющей $E_y \approx -10...+15$ мВ/м, изменяющей направление, и ПАВ, генерируемых магнитосферными суббурями. Оказалось, что интенсивная отрицательная ионосферная буря в средних широтах может протекать на фоне магнитного возмущения умеренной интенсивности. На основе сопоставления эффектов электрических полей во время бурь 20 марта и 30 мая 2003 г. установлено, что смена фаз бури могла произойти в условиях нестационарной ионосферы заходного периода в сезон равноденствия.

3. Очень сильная магнитная буря ($K_p \geq 7$) сопровождается умеренными ионосферной, атмосферной и слабой электрической бурями. Под умеренной ионосферной бурей будем понимать такую бурю, когда N_e изменяется (уменьшается или увеличивается) на 10—50 %. Такой была магнитная буря 17 апреля 2002 г. ($A_p = 41$, $K_{pmax} \approx 7$, $D_{smin} = -106$ нТл). Буря этого типа началась в дневное время (для Харькова), сопровождалась быстрым развитием глубокого отрицательного ионосферного возмущения в высоких широтах, которое ослабевало при распространении в средние широты. На широте Харькова возмущение трансформировалось в небольшую положительную фазу, которая не привела к значительным изменениям в состоянии ионосферы.

выводы

1. Проведен сравнительный анализ результатов наблюдений пяти геокосмических бурь различной интенсивности, выполненных с помощью радара НР в Харькове. Показано, что бури существенно отличаются по своим проявлениям. Установлены особенности их развития.

2. Предложена классификация ионосферных возмущений с выделением трех характерных групп возмущений в соответствии с особенностями их развития:

- интенсивная магнитная буря сопровождается интенсивной ионосферной бурей;
- умеренная магнитная буря сопровождается интенсивной ионосферной бурей;
- интенсивная магнитная буря сопровождается умеренной ионосферной бурей.

3. Рассмотрена физическая схема развития каждой группы ионосферных возмущений над Харьковом, которая может быть применима для среднеширотного региона Европы. Показана взаимосвязь магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь. Эта взаимосвязь дополнительно свидетельствует о том, что магнитную, ионосферную, атмосферную и электрическую бури следует рассматривать как проявления единого сложного процесса — геокосмической бури [15—18].

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
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 харьковском радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 4.—С. 21—39.
3. 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.
4. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—45, № 6.—С. 789—802.
5. 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.
6. 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.
7. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 20—23 марта 2003 г.: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 3/4.—С. 4—19.
8. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Сильнейшая геокосмическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 3/4.—С. 20—37.
9. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И. и др. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 года // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—45, № 6.—С. 803—823.
10. Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 4.—С. 3—20.
11. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
12. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25, № 5.—С. 768—772.
13. Криберг И. А., Тацкин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука. 1984.—190 с.
14. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
15. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
16. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
17. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. Часть 1 // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
18. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. Часть 2 // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 198—231.
19. 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.
20. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577—584.
21. 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.
22. Buonsanto M. J. A case study of the ionospheric storm dusk effects // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A12.—P. 23857—23869.
23. Buonsanto M. J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
24. 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.
25. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26367—26372.
26. Goncharenko L., Salah J. E., Van Eyken A., et al.

- Observations of the April 2002 geomagnetic storm by the global network of incoherent scatter radars // Ann. Geophys.—2005.—23, N 1.—P. 163—181.
27. Naghmoosh A. A., Murphy J. A. A comparative study of H^+ and He^+ at sunspot minimum and sunspot maximum // J. Atmos. Terr. Physics.—1983.—45, N 10.—P. 673—682.
28. 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.
29. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. Using steady-state vibrational temperatures to model effects of N_2^* on calculations of electron densities // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 26941—26945.
30. Prölss G. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 1—9.
31. Prölss G. W. Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes // J. Geophys. Res.—1993.—98, N A4.—P. 5981—5991.
32. Reddy C. A., Nishida A. Magnetospheric substorms and nighttime height changes of the F2 region at middle and low latitudes // J. Geophys. Res.—1992.—97, N A3.—P. 3039—3061.
33. 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. 23359—23365.
34. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // Rev. Geoph. Space Physics.—1978.—16, N 3.—P. 355—399.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF IONOSPHERE STORMS AT THE MIDLATITUDES OF EUROPE. 2

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

The results of our comparison analysis for ionosphere-thermosphere effects of three geospace storms which differ in the intensity and passing character are presented. The observations of ionosphere disturbances were carried out with the use of the Kharkiv incoherent scatter radar. A classification of the ionosphere disturbances with the separation of three groups according to their peculiarities is suggested. The physical development schemes for each of the groups of the disturbances that can be applied for the midlatitude ionosphere over Europe are described.