

УДК 550.388; 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, Д. А. Дзюбанов¹, В. Н. Лысенко¹,
В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАНУ и МОНУ, Харків

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Магнитная, ионосферная и атмосферная бури большой интенсивности в сентябре 1998 года: сравнение результатов измерений и моделирования

Надійшла до редакції 14.02.03

Спостереження за допомогою радара некогерентного розсіяння в Харкові однієї з найсильніших магнітних бур 25 вересня 1998 р. показали значні зміни поведінки середньоширотної іоносфери, яка належить до внутрішньої області плазмосфери (геомагнітна широта радара 45.7° ; $L = 1.9$). Розглядаються деякі особливості яскраво вираженої негативної іоносферної бури. До них належать: значні зменшення електронної концентрації, збільшення висоти максимуму шару F2, збільшення температури заряджених та нейтральних компонентів атмосфери. Вони пояснюються в термінах термосферних збурень, джоулівського нагрівання, проникнення магнітосферних електрических полів в середні широти, а також іншими ефектами. Порівнюються результати вимірювань і моделювання атмосферних та іоносферних процесів під час збурення.

ВВЕДЕНИЕ

Вспышки на Солнце и выбросы корональной массы — самые мощные проявления его активности. Они сопровождаются усилением электромагнитного излучения светила и потока корпускул (солнечных космических лучей), увеличением интенсивности солнечного ветра, генерацией ударной волны и появлением межпланетных выбросов. Их энергетика велика [12—13].

В результате вспышек в геокосмосе развиваются процессы с малым (около 8 мин), средним (10—200 мин) и большим (30—40 ч) запаздыванием, которые вызваны соответственно усилением электромагнитного излучения, потоков корпускул и солнечного ветра. Увеличение интенсивности последнего приводит к генерации значительных возмущений геомагнитного поля (до 10^3 нТл), параметров ионосферы (электронная концентрация N увеличивается до двух раз или уменьшается в 2—10 раз) и атмосферы (температура газа T_n увеличивается на сотни кельвин). Указанные возмущения в геокос-

мосе именуются магнитными, ионосферными и атмосферными бурами. Они представляют собой проявление единого процесса — геокосмической бури.

Геокосмическим (часто называемым магнитными) бурям посвящены десятки книг и многие сотни научных статей, в частности книга [41] и обзоры [17, 22].

Исследования геокосмических бурь проводятся в рамках грандиозных проектов. Несмотря на затрачиваемые усилия, в настоящее время нет полного понимания физических процессов, сопутствующих геокосмическим бурям. Еще хуже дело обстоит с моделированием и прогнозом этих процессов в глобальных масштабах во всех областях околоземного пространства.

Исследование геокосмических бурь и их последствий является актуальным ввиду их большого общенаучного и прикладного значения. В частности, интенсивные бури могут сопровождаться сбоями (авариями) в работе мощных линий электропередач, систем интернета, радионавигации, телекоммуникации, изменениями траекторий низкоорбиталь-

тальных космических аппаратов и т. д. Кроме того, геокосмические бури опосредованно влияют на самочувствие и здоровье людей, а также состояние биосферы Земли в целом.

Наблюдение каждой геокосмической бури позволяет продвинуться в понимании сложной и многогранной картины физических процессов, сопровождающих бури.

Целью данной работы является сравнение результатов измерений и моделирования вариаций параметров ионосферы и атмосферы, сопровождавших уникальную магнитную бурю 25 сентября 1998 г.

Для наблюдения процессов в ионосфере (атмосфере) использовался единственный в Украине радиорадар некогерентного рассеяния (НР), размещенный в Ионосферной обсерватории вблизи г. Харькова (геомагнитные координаты: 45.7° , 117.8° ; географические координаты: 49.6° с. ш., 36.3° в. д.). Его основные параметры следующие: импульсная мощ-

ность передающего устройства 3.6 МВт (средняя мощность 100 кВт), коэффициент усиления антенны около 12700 (диаметр антенны 100 м, ее эффективная площадь около 3700 м^2 , ширина луча диаграммы направленности около 1°), рабочая частота 158 МГц. В зависимости от режима работы передающего устройства измерения ведутся в диапазоне высот 100–1500 км. Для уменьшения статистической погрешности использовался интервал обработки 1.5–15 мин для отношения сигнал/шум на входе системы 10–0.2. При этом относительная погрешность определения параметров ионосферы (концентрации электронов N , температуры электронов T_e и ионов T_i) не превышала 3–10 %. Параметры нейтральной атмосферы вычислялись по полученным параметрам ионосферы.

Моделирование пространственно-временных вариаций параметров ионосферы и атмосферы осуществлялось на основе моделей IRI-90 и MSIS-86 [15, 23].

Таблица 1. Данные о солнечной активности

Дата, сентябрь 1998 г.	F10.7	Число солнечных пятен	Площадь солнечных пятен, 10^{-6}	Рентгеновское излучение (фон)	Число рентгеновских вспышек			Число оптических вспышек				
					C	M	X	S	2	4	1	0
21	138	151	910	B 3.5	4	0	0	4	1	0	0	0
22	141	154	720	B 3.5	3	0	0	5	0	0	0	0
23	143	162	760	B 5.3	4	1	0	8	0	0	1	0
24	135	156	800	B 4.1	2	0	0	5	1	0	0	0
25	139	118	680	B 3.7	4	0	0	6	0	0	0	0
26	136	115	770	B 5.3	4	0	0	8	0	0	0	0
27	127	87	620	B 4.0	5	0	0	7	3	0	0	0

Таблица 2. Данные о потоках протонов и электронов с энергиями ε_p и ε_e

Дата, сентябрь 1998 г.	Потоки протонов, $10^9 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$			Потоки электронов, $10^{10} \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$
	$\varepsilon_p > 1 \text{ МэВ}$	$\varepsilon_p > 10 \text{ МэВ}$	$\varepsilon_p > 100 \text{ МэВ}$	
21	1.5	0.17	0.038	1.4
22	1.4	0.17	0.039	2.5
23	4.5	0.33	0.041	5.6
24	130	1.2	0.039	8.7
25	1100	3.4	0.024	52
26	53	0.21	0.022	62
27	43	0.22	0.024	120

МАГНИТНАЯ БУРЯ

Характеристика космической погоды. Ежедневные данные об основных фактах, определяющих космическую погоду, представлены в интерне-

те (<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>). Ежедневные данные об активности Солнца и потоках частиц приведены в табл. 1 и 2. Из табл. 1 видно, что 23 сентября произошла вспышка на Солнце класса M6/3B. Она началась в 06^h44^m, а закончилась в

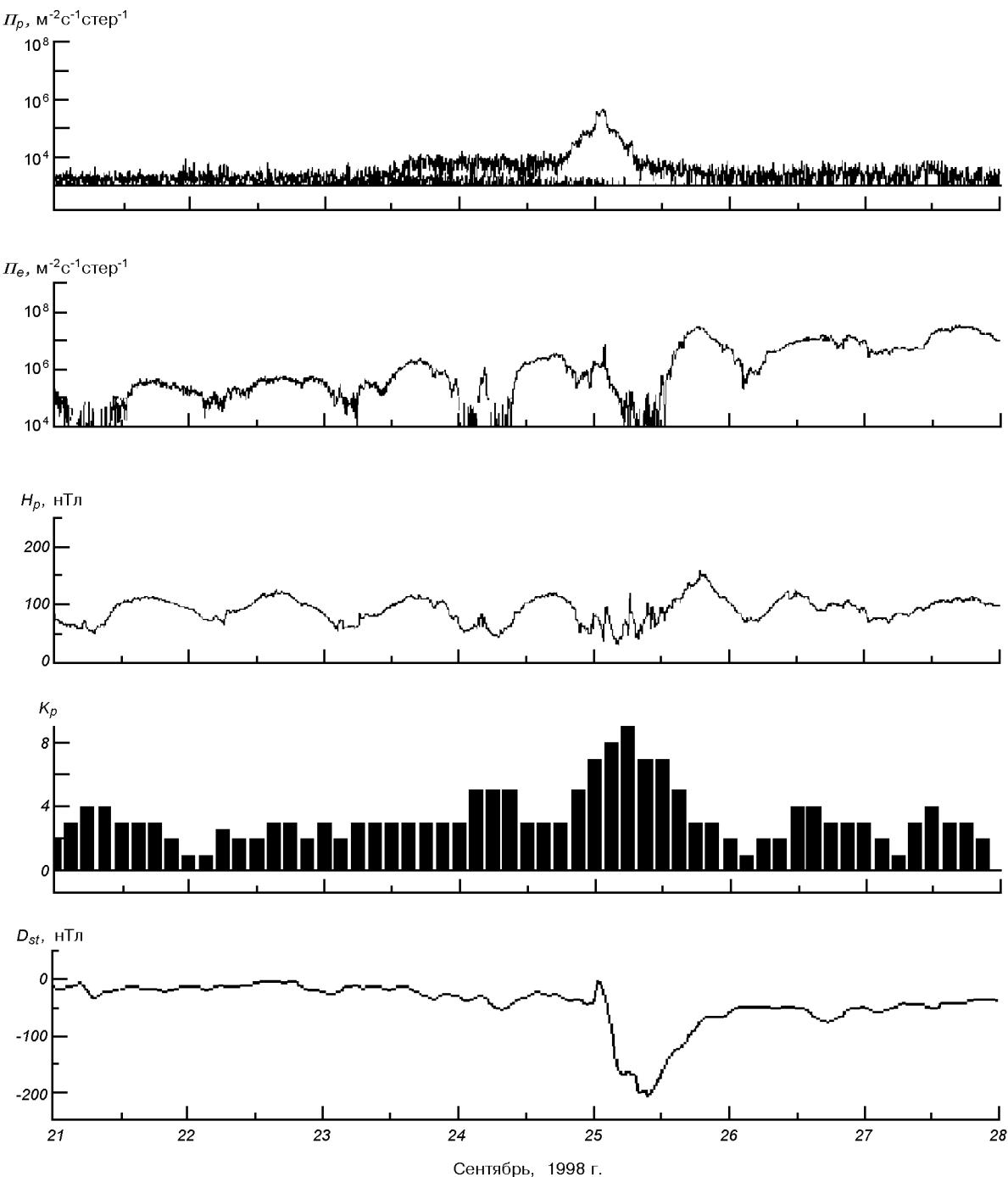


Рис. 1. Временные вариации потоков протонов и электронов, H_p -составляющей геомагнитного поля, K_p - и D_{st} -индексов в течение 21–28 сентября 1998 г. [<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>]

10^{10} – 10^{11} кр. единиц, достигнув максимальной интенсивности в 07^h06^m UT. Плотность потока мощности рентгеновского излучения в диапазоне длин волн $\lambda\lambda$ 0.1–0.8 нм достигла значений $6.9 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² (класс M6.9).

Временные зависимости потоков протонов и электронов, а также H_p -составляющей геомагнитного поля (H_p -составляющая параллельна оси спутника, которая почти параллельна земной оси) показаны на рис. 1. Измерения выполнены на спутнике GOES-8. Значения потоков и H_p усреднены на интервале времени 5 мин. На этом же рисунке указаны K_p -индексы.

Из рис. 1 видно, что 22 и 23 сентября 1998 г. были магнитоспокойными днями. В первой половине следующего дня (24 сентября) наблюдалась умеренная буря ($K_p = 5$), которая к 25 сентября перешла в интенсивную магнитную бурю ($K_p = 5..9$, суммарный индекс $\Sigma K_p = 51$). Им соответствовали флюктуации H_p со средними амплитудами 3–5 и 30 нТл и продолжительностью около 9 и 21 ч соответственно.

Зависимость индекса D_{st} от времени показана на том же рис. 1. Видно, что около 01^h имело место увеличение индукции магнитного поля на 33 нТл, а затем ее уменьшение на 203 нТл примерно до 10 ч. В интервале времени 10^h–18^h индекс D_{st}^* увеличился на 122 нТл. В течение времени 01^h–10^h наблюдалась основная фаза магнитной бури, фаза восстановления ее продолжалась нескольких суток, вплоть до 13^h 30 сентября.

Энергетика магнитной бури. Энергия бури E_{ms} определяется значением $D_{st min}$ [22]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_M \frac{|D_{st}^*|}{B_0}, \quad (1)$$

где $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Тл — значение индукции магнитного поля на экваторе, $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — энергия дипольного магнитного поля Земли. Скорректированное значение

$$D_{st}^* = D_{st} - bp^{1/2} + c.$$

Здесь $b = 5 \cdot 10^5$ нТл/(Дж·м⁻³)^{1/2}, $c = 20$ нТл, $p = N_p m_p v_{sw}^2$, N_p и m_p — концентрация и масса протонов, v_{sw} — скорость солнечного ветра.

Энергия магнитной бури 25 сентября, оцениваемая по формуле (1), при значении $D_{st min}^* \approx -300$ нТл, составила величину $1.2 \cdot 10^{16}$ Дж. Максимальное значение мощности бури в интервале времени 02^h–04^h приблизилось к $1.4 \cdot 10^{12}$ Вт. По классификации [14] данная бури относится к крайне сильным, а значит

универсальным. Некоторые ее эффекты по наблюдениям на радаре НР в Харькове описаны в работах [5, 8–11, 20, 39]. Здесь мы остановимся на них подробнее.

ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ

Результаты измерений. Электронная концентрация и высота максимума области F. Сильнейшая ионосферная буря началась после полуночи и продолжалась по крайней мере до полудня 25 сентября (при значениях $K_p \geq 7$). На рис. 2, *a* и *б* показаны вариации критической частоты f_0F2 , полученной по ионограммам через 15-минутные интервалы времени, и соответствующих значений электронной концентрации N_m в максимуме слоя F2.

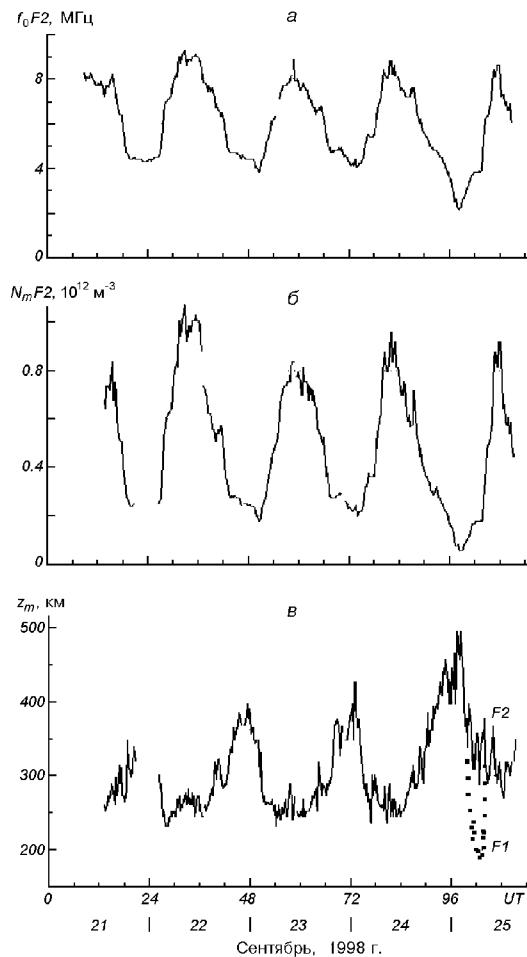


Рис. 2. Параметры максимума области F ионосферы в период 21–25 сентября 1998 г.: *а* — критическая частота f_0F2 , *б* — электронная концентрация N_m ; *в* — высота максимума z_m

Видно, что понижение f_0F2 , характерное для отрицательной ионосферной бури, началось после полуночи и интенсивно прогрессировало. Разница частот по сравнению со спокойным периодом с 13^h 22 сентября до 13^h 23 сентября ($A_p = 10, 14$), который можно рассматривать как контрольный день, достигла 1.7 МГц около 02^h и 3.3 МГц около 07^h30^m. При этом значение N_m уменьшилось в 3 и 3.5 раза соответственно. Примерно с 06^h30^m до 7^h30^m, т. е. во время главной фазы бури, в результате глубокой депрессии электронной концентрации на высотах слоя F2 основной максимум N_m сместился в область доминирующих молекулярных ионов (ниже 200 км). Слой F2 был экранирован слоем F1 (рис. 2, в), на ионограммах вертикального зондирования зафиксировано так называемое условие G .

Значительное уменьшение N наблюдалось во всем интервале высот 250—500 км (рис. 3). Минимальной величины N достигла в период главной фазы бури, точнее в интервале времени 02^h—07^h. На высоте 300 км в указанном интервале времени уменьшение N по сравнению со спокойным днем варьировало от девяти до трех раз. С увеличением высоты уменьшение значений N уменьшалось. Например, на высоте 400 км оно составило 2.8—1.6 раза. Этот эффект, по-видимому, можно объяснить увеличением приведенной плазменной высоты во время возмущения за счет нарастающего с высотой дополнительного нагрева плазмы.

На рис. 2, в приведены временные вариации высоты максимума z_m области F. В контрольный день поведение высоты максимума характерно для спокойной среднеширотной ионосферы: ночью значение $z_m F2 \approx 390$ км, что превышало дневные значения (250—260 км). С восходом Солнца наблюдалось уменьшение $z_m F2$, обусловленное суточными вариациями фотохимических процессов и термосферных ветров: меридиональная составляющая термосферного ветра ночью направлена к экватору и способствует подъему слоя на более высокие уровни, а днем она обращен к полюсу, что обеспечивает понижение $z_m F2$. После захода Солнца высота $z_m F2$ увеличивалась к характерным ночных значениям. В возмущенный день 25 сентября, как видно из рисунка, наблюдалось увеличение значений $z_m F2$ по сравнению с контрольным днем примерно на 100 км около полуночи и на 50 км вблизи полудня.

На рис. 4 показаны высотные профили электронной концентрации в последовательные моменты времени (через 15 мин) в период отрицательной ионосферной бури. Видно, что в интервале времени

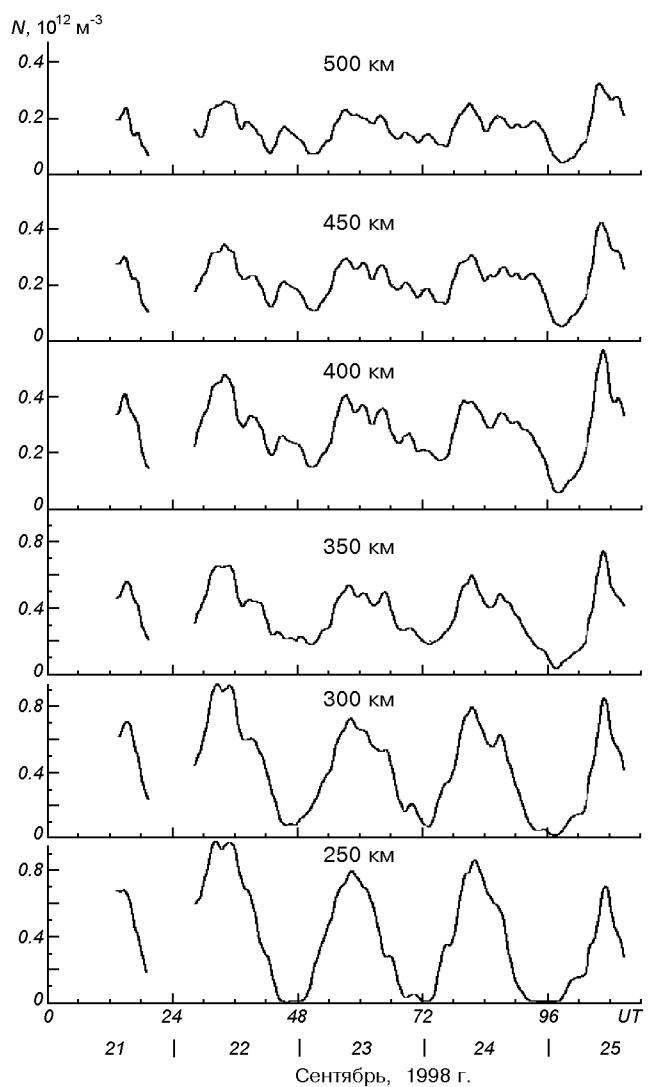


Рис. 3. Временные вариации электронной концентрации N на фиксированных высотах

04^h30^m—08^h30^m увеличение концентрации $N_m F2$ замедлилось, высота $z_m F2$ увеличилась, толщина слоя увеличилась. Высотные профили существенно деформировались. Концентрация N в области F1 изменялась мало, так что отношение $N_m F2 / N_m F1$ уменьшилось, и в интервале времени 06^h30^m—07^h30^m стало меньше единицы.

Температуры электронов и ионов. Рис. 5 иллюстрирует вариации температур электронов и ионов в период 21—25 сентября. Суточная зависимость температуры электронов T_e характеризуется быстрым увеличением во время восхода Солнца,

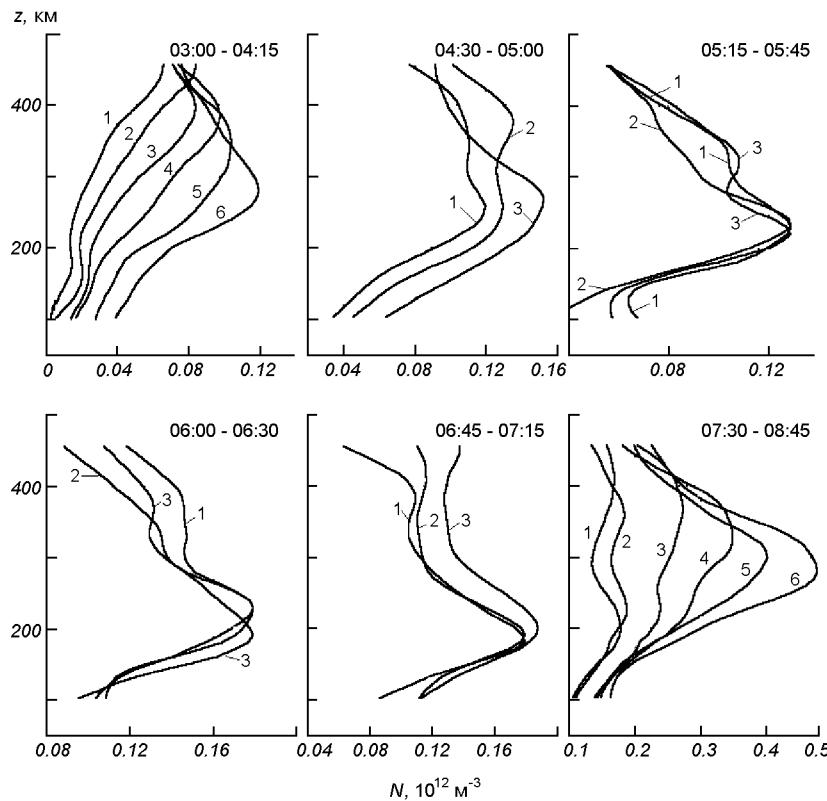


Рис. 4. Высотные профили электронной концентрации N в возмущенный день 25 сентября 1998 г. Числы у кривых означают последовательность моментов времени (через 15 мин)

уменьшением T_e вблизи полудня за счет увеличения теплопередачи от электронов к ионам, которая пропорциональна N^2 , и снижением T_e после захода Солнца. Во время бури имел место дополнительный нагрев электронного газа, который наблюдался после начала бури и до восхода Солнца. Максимальное превышение T_e по сравнению с контрольным днем отмечалось около 02^h , оно увеличивалось с высотой, достигнув примерно 800 К на высоте 500 км.

После восхода Солнца поведение T_e изменилось: на высотах 250—350 км T_e уменьшилась по сравнению с контрольным днем и восстановила свое значение только к местному полудню, т. е. к концу главной фазы бури. Наибольшее уменьшение T_e , почти на 500 К, отмечалось на высоте 250 км, с увеличением высоты оно уменьшалось. Выше 400 км температуры электронов в возмущенный и контрольный день практически совпадали. Следует отметить [5, 20], что уменьшение T_e во время бури сопровождалось изменением направления вертикальной скорости плазмы v_z , которая на высотах

250—350 км достигла значений 50—35 м/с около 03^h . В это же время в спокойный день 23 сентября скорость составила $v_z \approx -(20—30)$ м/с.

Из рис. 5 видно также, что суточные изменения T_i в спокойный день 22—23 сентября невелики, с восходом Солнца температура T_i увеличилась от ночных значений 900—960 К в интервале высот 300—450 км до дневных величин около 1200 К, вечером наблюдалось снижение T_i и переход к ночным условиям. Во время бури на всех высотах вплоть до конца наблюдений (15^h) отмечался дополнительный нагрев ионного газа по сравнению со спокойным днем. Максимальное превышение T_i составляло 450—500 К на высотах 400—450 км в интервале времени $02^h—05^h$.

Результаты моделирования. Концентрация электронов и высота максимума F2-слоя. Данные параметры ионосферы рассчитаны с привлечением Международной справочной модели ионосферы IRI [15]. К числу входных параметров модели относятся индексы, описывающие уровень солнечной и геомагнитной активности. Остановимся под-

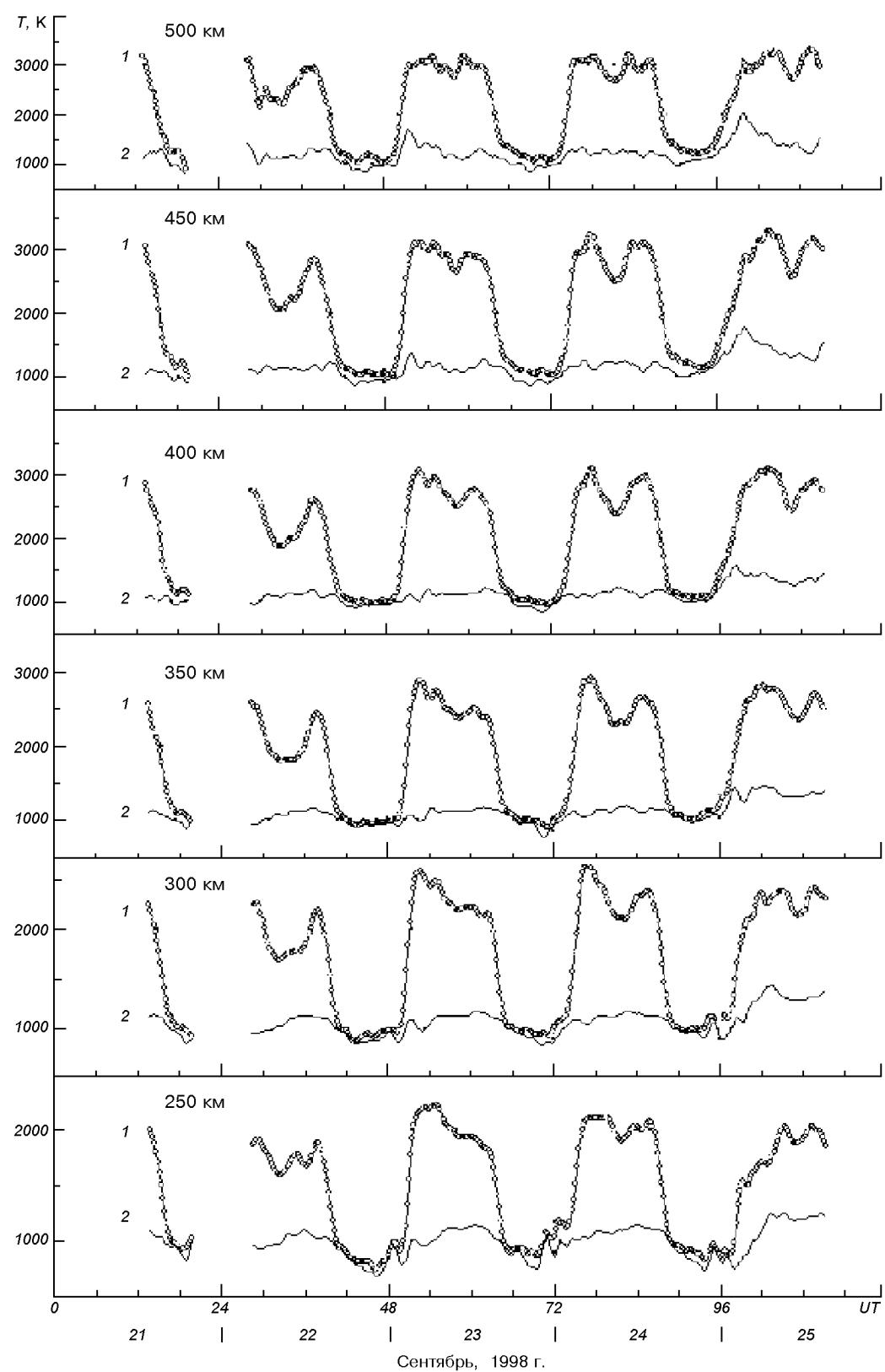


Рис. 5. Временные вариации температур электронов T_e (1) и ионов T_i (2) на фиксированных высотах 21—25 сентября 1998 г.

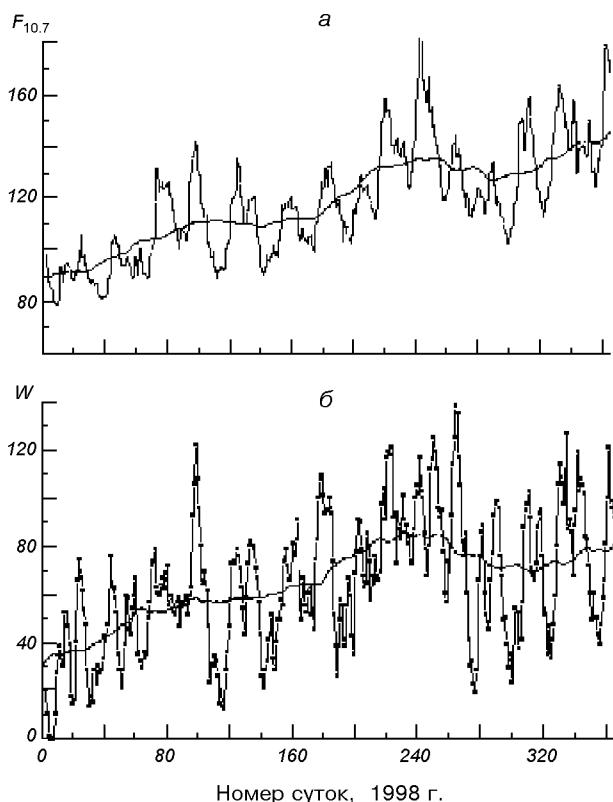


Рис. 6. Вариации потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ (а) и числа Вольфа W (б)

робнее на состоянии гелиофизической обстановки в 1998 г. Как известно, солнечная активность характеризуется числом Вольфа W и плотностью потока радиоизлучения $F_{10.7}$ на длине волн 10.7 см. Первый индекс является традиционным для описания активности Солнца, второй же более удобен для постоянного мониторинга, поскольку неблагоприятные погодные условия не препятствуют его регистрации. Кроме того, наблюдения $F_{10.7}$ объективны. Подсчет солнечных пятен и их группировка, напротив, субъективны.

Различные модели верхней атмосферы используют в качестве входного параметра первый либо второй индекс. В частности, термосферная модель MSIS использует индекс $F_{10.7}$, а модель ионосферы IRI — число Вольфа. На рис. 6, а приведены изменения ежедневных значений $F_{10.7}$. Сплошная линия соответствует скользящему усреднению индекса за три солнечных оборота ($F_{10.7A}$). При этом 22, 23, 24 и 25 сентября значения $F_{10.7}$ равнялись 142, 144, 136 и 139, среднее значение $F_{10.7A}$ состав-

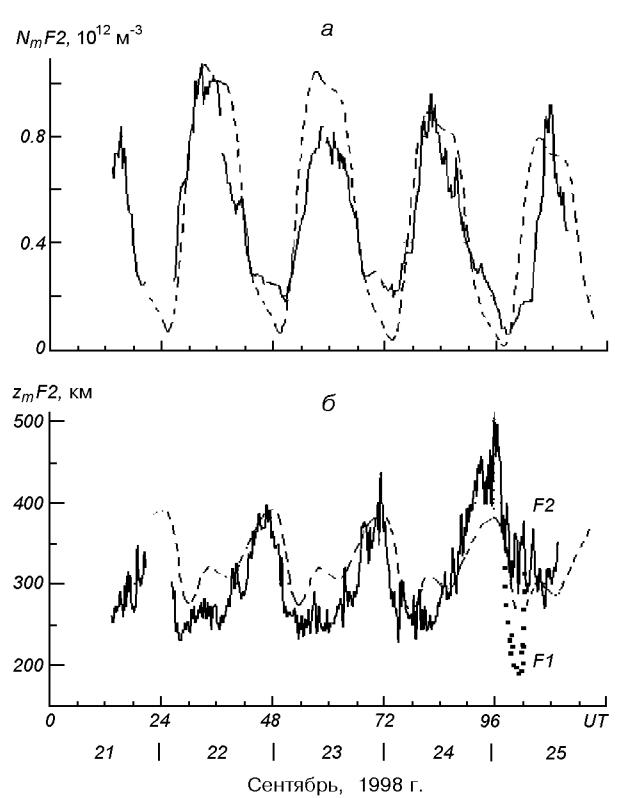


Рис. 7. Значения электронной концентрации N_m (а) и высоты $z_m F_2$ максимума слоя F2 (б): сплошная линия — измерения, штриховая — расчет по модели IRI-90

ляло 131. Видно, что для указанных дат индексы $F_{10.7}$ имеют близкие значения, поэтому модельные расчеты, использующие эти значения, также должны иметь близкие результаты. На рис. 6, б приведены ежедневные значения числа Вольфа W , а также усредненные значения по периоду времени, равному трем солнечным оборотам. Указанным датам соответствуют значения $W = 138, 135, 117$ и 105, среднее значение (за три оборота Солнца) составляло 77. Поэтому при использовании этих параметров ожидаются различия в модельных расчетах.

Для моделирования состояния ионосферы в магнитоспокойный период, предшествующий магнитной буре, была использована версия IRI-90, поскольку более поздние версии модели, начиная с IRI-95, производят расчет ионосферных параметров непосредственно для интересующей даты, используя скользящее годовое усреднение заранее подготовленного массива чисел Вольфа. Поскольку здесь рассматриваются четыре соседние даты (22, 23, 24 и 25 сентября), очевидно, что среднегодовые значе-

ния числа Вольфа будут для них практически одинаковыми, как и результаты модельных расчетов. Поэтому, чтобы видеть различие соседних дней, была выбрана модель IRI-90, допускающая введение значения W в качестве входного параметра.

Результаты расчета N и $z_m F2$ приведены на рис. 7. Параметры главного максимума F-области соответствуют характеру суточных вариаций. При значительных (до порядка величины) изменениях N_m вариации $z_m F2$ в течение суток доходят до 100 км. Увеличение высоты максимума слоя обусловлено восходящим движением ионосферной плазмы вдоль магнитных силовых линий под действием термосферного ветра, направленного ночью от полюса к экватору. Уменьшение $z_m F2$ в утренние и дневные часы связано как с изменением направления скорости переноса плазмы, так и с началом процесса ионизации в остывшей за ночь атмосфере. Увеличение $z_m F2$ в дневное время вызван нагревом нейтральной атмосферы, приводящим к увеличению концентрации атомарного кислорода, а также к увеличению коэффициента линейной рекомбинации.

В ночное время N_m , как известно, поддерживается за счет нисходящего потока плазмы из протоионосферы, а в дневное время определяется тремя основными процессами: ионизацией, рекомбинацией и переносом плазмы за счет амбиополярной диффузии, термосферного ветра и дрейфа в скрещенных электрическом и геомагнитном полях. В целом при сопоставлении рассматриваемых дат друг с другом видно уменьшение интенсивности ионизирующего излучения Солнца, проявляющееся как некоторое уменьшение N_m от дня ко дню.

Температуры электронов и ионов. Результаты расчета по модели IRI-90 электронной и ионной температур на высоте 300 км иллюстрирует рис. 8. Поведение электронной температуры T_e обусловлено, с одной стороны, нагревом электронного газа сверхтепловыми электронами, с другой стороны — охлаждением за счет передачи тепла ионам и нейтральным частицам. В дневное время вариации T_e в области F2 ионосферы отражают также изменения концентрации электронов, поскольку скорость передачи тепла ионам прямо пропорциональна N^2 . Температура ионов T_i занимает промежуточное положение между температурой электронов и температурой нейтральных частиц. Однако в силу более интенсивного теплообмена с нейтральными частицами, чем с электронами, температура ионов в большей степени характеризует тепловой режим нейтральной верхней атмосферы. Разность температур ионов и нейтральных частиц составляет

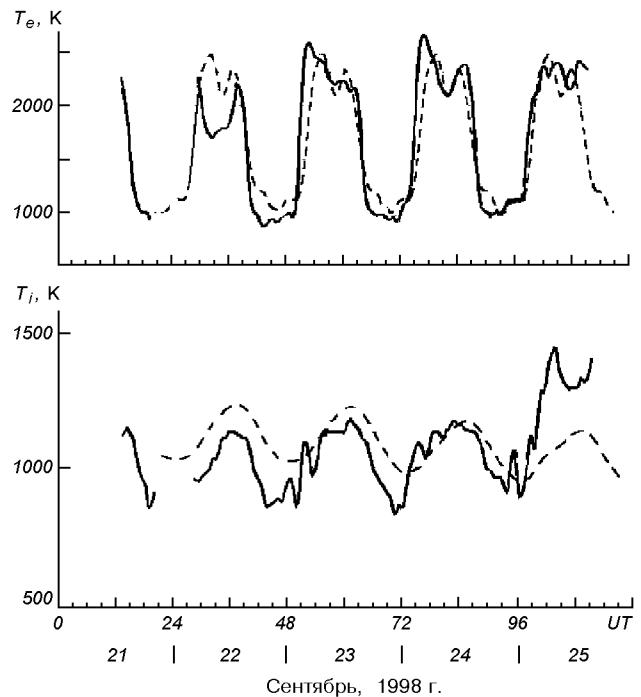


Рис. 8. Значения температуры электронов T_e (а) и ионов T_i (б): сплошная линия — измерения, штриховая — расчет по модели IRI-90 на высоте 300 км

на высотах F2-области несколько десятков градусов. С увеличением высоты степень ионизации плазмы увеличивается, и значения температуры ионов стремятся к значениям электронной температуры.

Соответствие результатов наблюдений и моделирования. Электронная концентрация N_m в максимуме слоя и высота максимума $z_m F2$. На базе модели MSIS-86, данных радара и методики [6] было проведено сравнение измеренных и расчетных значений электронной концентрации в максимуме слоя и высоты этого максимума для спокойного и возмущенного дней.

Использовались следующие соотношения, полученные в работе [6] из аналитического решения уравнения непрерывности для случая дневной стационарной среднеширотной ионосферы и аппроксимации результатов численных расчетов (в системе СИ):

$$\begin{aligned} \lg N_m = & 1.08 \lg N(O) - 0.65 \lg \beta + \\ & + 9 \cdot 10^{-3} w + \lg(I/I_{144}) - 6.28, \end{aligned}$$

Таблица 3. Сравнение значений N_m и $z_m F2$ для спокойных (23 сентября) и возмущенных (25 сентября 1998 г.) суток по данным радара НР в Харькове и модельным расчетам

Дата, сентябрь 1998 г.	Время, UT	$N(O) \cdot 10^{-14}, m^{-3}$	$N(N_2) \cdot 10^{-14}, m^{-3}$	$N(O_2) \cdot 10^{-12}, m^{-3}$	T_n, K	$w, m/c$	$\beta(O^+) \cdot 10^{-4}, c^{-1}$	$N_m \cdot 10^{-11}, m^{-3}$		$z_m F2, km$	
								расчет	экспер.	расчет	экспер.
День											
23	07 ^h	8.0	1.8	7.0	1120	-10	2.8	8.7	7.3	266	260
25	07 ^h	9.0	2.7	19.0	1440	20	7.0	12.6	5.0	351	330
Ночь											
22	21 ^h	5.5	1.3	4.5	930	50	1.5	—	—	360	375
24	21 ^h	6.0	2.4	12.0	980	40	3.5	—	—	365	450

$$z_m F2(km) = 50 \lg N(O) + 50 \lg \beta + 1.55w - 270.$$

Значения параметров нейтральной атмосферы взяты из модели MSIS-86 на высоте 300 км, I/I_{144} — отношение полного потока солнечного ионизирующего излучения к потоку при индексе солнечной активности $F_{10.7} = 144$, коэффициент рекомбинации β и константы реакций $\gamma_1(O^+, N_2)$ и $\gamma_2(O^+, O_2)$, входящих в β , определялись из выражений [24]:

$$\begin{aligned}\beta(O^+) &= \gamma_1 N(N_2) + \gamma_2 N(O_2), \\ \gamma_1 &= 8.0 \cdot 10^{-20} (T_n/300)^2, \\ \gamma_2 &= 2.0 \cdot 10^{-17} (300/T_n)^{0.4}.\end{aligned}$$

Для ночных условий высота максимума ионизации находилась из выражения

$$z_m F2(km) = 40 \lg N(O) + 40 \lg \beta + w - 128.$$

Расчеты проведены для дня и ночи местного времени. Результаты расчетных и измеренных параметров N_m и $z_m F2$ для спокойных (23 сентября) и возмущенных (25 сентября) суток приведены в табл. 3. Видно, что расчеты по упрощенным выражениям, предложенным в работе [6], показали хорошее согласие модельных и экспериментальных данных для случая стационарной F2-области в магнитоспокойных условиях. Отличия параметров N_m и $z_m F2$ лежат в пределах ± 0.1 для $\lg N_m$ и 6–15 км для z_m .

Рис. 7, а иллюстрирует сопоставление временных вариаций электронной концентрации в максимуме области F, полученных с помощью радара в Харькове и рассчитанных по модели IRI-90. Видно, что модельные расчеты отслеживают изменения уровня солнечной активности (параметра W) в рассматриваемый период наблюдения и обнаруживают удов-

летворительное согласие (до 25 %) с дневными экспериментальными результатами в спокойные даты. В то же время вочные часы модель занижает значения N_m в несколько раз. В возмущенный день, в период главной фазы бури, модельные значения N_m превышают измеренные до четырех раз.

На рис. 7, б приведены высоты максимума F2-области ионосферы, полученные по результатам эксперимента и расчета по модели IRI-90. Видно, что в спокойные даты модельные $z_m F2$ превышают измеренные значения на 25–50 км, при этом ночные результаты согласуются несколько лучше. В магнитовозмущенных условиях модель дает существенно заниженные значения $z_m F2$: днем на 25–50 км, ночью — на 80–100 км.

Итак, модельные расчеты параметров ионосферы N_m и $z_m F2$ по методике [6] показали в целом хорошее согласие с экспериментальными данными в условиях спокойной ионосферы. Расчеты по модели IRI-90 не всегда отражают особенности поведения ионосферы украинского региона даже в спокойных условиях. В периоды магнитных возмущений использование этой модели для описания или оперативного прогноза поведения ионосферы, как показывает сравнение, не правомерно. Целью сравнения была оценка сверху погрешности, допускаемой при использовании модели IRI-90 в магнитовозмущенных условиях. Это необходимо, прежде всего, специалистам в области распространения радиоволн и телекоммуникаций, которые применяют доступную им модель IRI-90.

Температуры заряженных компонентов атмосферы. На рис. 8 приведены временные вариации температур электронов T_e и ионов T_i на высоте 300 км, полученных экспериментально и из модели

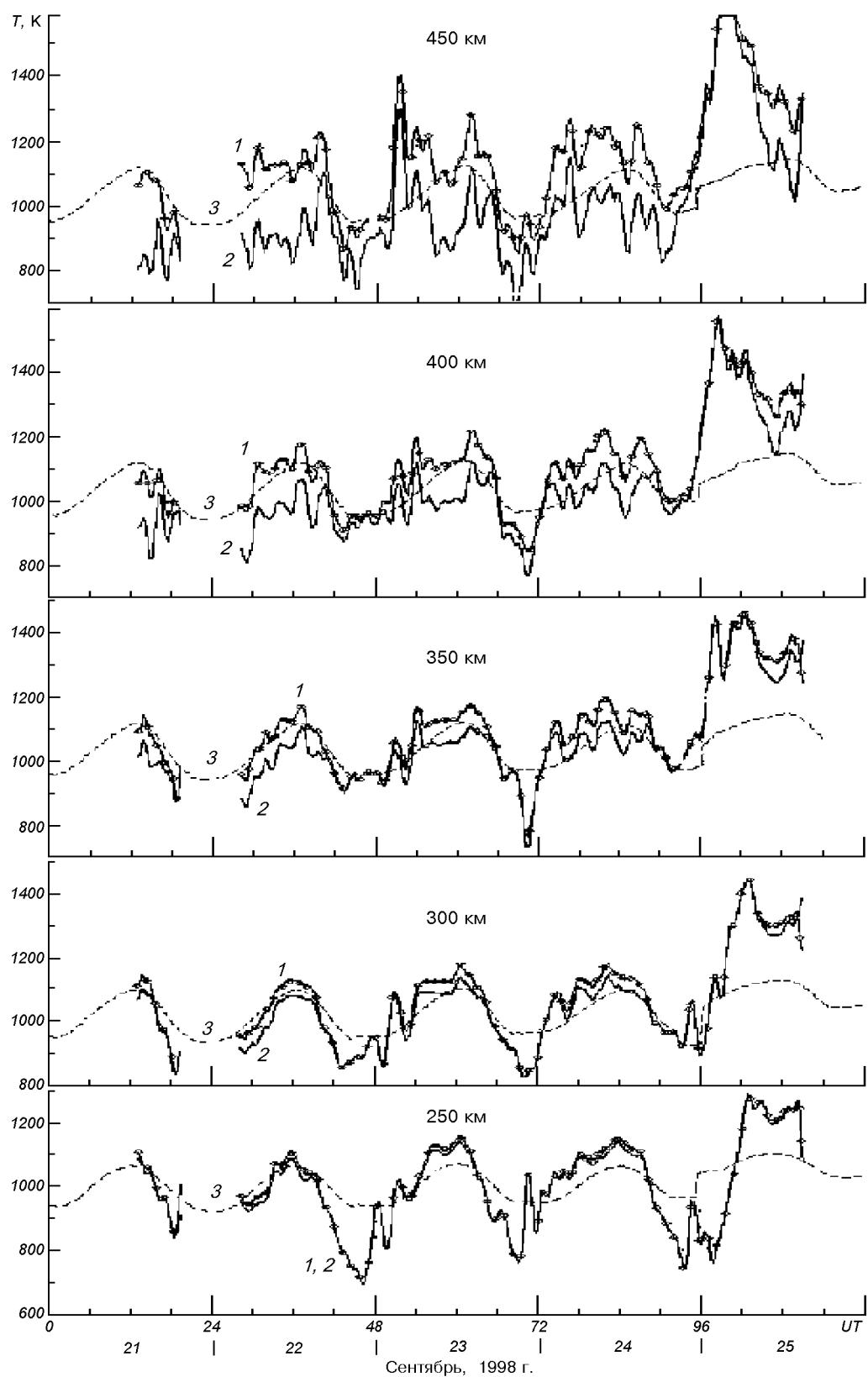


Рис. 9. Измеренные температуры ионов T_i (1) и рассчитанные температуры нейтралов T_n по данным НР (2) и $T_{n\text{MSIS}}$ по модели MSIS-86 г

IRI-90. Видно, что модель в общем неплохо описывает поведение T_e как в спокойных, так и возмущенных условиях. Наибольшее различие наблюдалось 22 сентября, значения T_e представляются завышенными для модельных величин N_m , рассчитанных для этой даты. Наибольшее отличие T_i отмечалось в период возмущения, когда модель дает заниженные значения T_i примерно на 400 К.

АТМОСФЕРНАЯ БУРЯ

Результаты вычислений. Температура нейтралов. Известно, что нейтральная атмосфера существенно влияет на поведение ионосферной плазмы как в спокойных, так и возмущенных условиях. К числу важных параметров, определяющих состояние верхней атмосферы, относятся температура нейтрального газа, его состав и скорость ветра. Эти параметры методом НР непосредственно не измеряются. Температуру нейтралов и скорость ветра рассчитывают из измеренных методом НР параметров ионосферы N , T_e , T_i , нейтральный состав определяют из термосферной модели. Температура нейтральных компонентов T_n вычислялась из уравнения теплового баланса ионного газа [3, 38] с привлечением термосферной модели MSIS-86 [23]. При этом полагалось, что в среднеширотной области F2 в квазистационарных условиях на высотах, где теплопроводностью газа можно пренебречь, скорость нагрева ионов O^+ за счет теплообмена с электронами можно приравнять скорости охлаждения за счет передачи тепла нейтральным частицам. Условие квазистационарности выполняется с большим запасом, так как время становления температуры газа за счет локальных процессов намного меньше времени ее становления за счет динамических процессов. К тому же, характерное время магнитоионосферных возмущений составляет единицы часов и более. Для этого случая уравнение теплового баланса можно записать в виде [35, 36]:

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

Здесь $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ — концентрации молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода, рассчитанные из термосферной модели MSIS-86. Температура T_n вычислялась по методике [36].

Зависимости $T_n(t)$ в период измерений на высотах 250—450 км приведены на рис. 9. Видно, что

во время бури на высоте 300 км T_n увеличилась в среднем на 200 К (отдельные отклонения составляли до 360 К) по сравнению с контрольным днем и отслеживала вариации температуры ионного газа. Эти данные хорошо согласуются с существующими представлениями и результатами, полученными, например, в работах [16, 19, 34].

Особенности высотного поведения T_n . К ним относятся следующие: 1) в спокойные дни T_n при переходе от 250 к 300 км мало изменилась, достигнув, по-видимому, значения температуры экзосфэры; 2) выше 300 км с увеличением высоты расчетное значение T_n уменьшалось, что подтверждает некорректность принятой методики расчета для больших высот, где следует учитывать теплопроводность ионного и нейтрального газов; 3) в спокойные сутки (22—23 сентября) T_n на высоте 300 км изменялась примерно от 850 К ночью до 1150 К днем. В период бури (25 сентября) температура нейтралов увеличилась до 950 К ночью и до 1450 К днем; 4) в возмущенный день T_n увеличивалась с высотой, отслеживая увеличение T_i , вплоть до высоты 450 км, что свидетельствует о нагреве нейтральной атмосферы, ее расширении и увеличении экзосферной температуры. Увеличение T_n по сравнению со спокойным днем составляло в

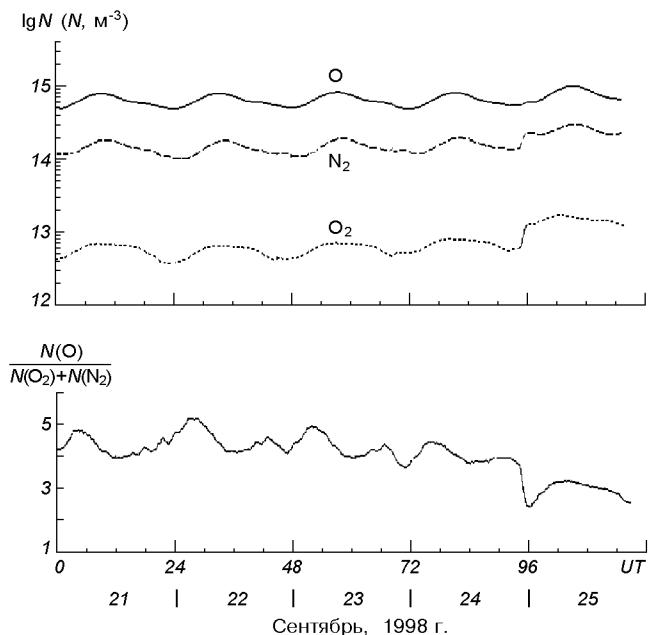


Рис. 10. Временные вариации концентрации основных компонент нейтральной атмосферы, а также параметра $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ на высоте 300 км в период 21—25 сентября 1998 г. (из расчета по модели MSIS-86)

главную фазу бури 250, 360, 430, 520 и 720 К на высотах 250, 300, 350, 400 и 450 км соответственно; 5) модель MSIS-86 не отражает реальных значений T_n в магнитовозмущенных условиях, давая заниженную величину температуры. Максимальные отличия T_n , рассчитанной из данных радара, по сравнению с модельными значениями днем составляли 190, 320, 340, 470, 670 К на высотах 250, 300, 350, 400, 450 км соответственно; 6) обнаружено запаздывание приходящего сверху возмущения T_n , которое составляло около 3.5 ч в диапазоне высот 250—450 км.

Результаты моделирования. Концентрация нейтральных составляющих. На рис. 10 показаны изменения концентрации основных составляющих нейтральной атмосферы $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ на высоте 300 км, которые, как известно, определяют скоростиphotoхимических процессов в ионосфере и поведение N . Данные получены с привлечением модели нейтральной атмосферы MSIS-86, к числу входных параметров которой относятся поток солнечного излучения $F_{10.7}$ и суточный индекс геомагнитной активности A_p . Здесь же приведен параметр $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов O^+ . Во время магнитной бури наибольшее изменение N наблюдалось около 02^h. В это время, согласно модели, концентрация $N(N_2)$ на высоте 300 км увеличилась по сравнению с контрольным днем в 1.9 раза, $N(O_2)$ — в 2.8 раза и $N(O)$ — в 1.2 раза. В результате отношение $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ уменьшилось в 1.7 раза.

Соответствие результатов наблюдений и моделирования. Температура нейтралов. Временные вариации температуры нейтралов T_n на высотах 250—450 км, полученной из данных радара и модели MSIS-86, приведены на рис. 9. Сравнение показало, что в спокойные сутки 22—23 сентября температура T_n на высоте 300 км, определяемая из модели, удовлетворительно согласуется с результатами расчета по данным НР; их различие составляет около 50 К как ночью, так и днем. Во время возмущений рассчитанные для высоты 300 км по модели MSIS-86 значения T_n ниже определяемых в среднем на 260 К, с максимальным отклонением до 320 К в главную фазу бури. С увеличением высоты расхождение модельных и определяемых значений увеличивается, достигая 670 К на высоте 450 км. Такое отличие связано, по-видимому, с тем, что модель MSIS ориентирована в основном на прогнозирование среднемесячных медианных значений параметров F2-области в магнитоспокойных условиях, хотя геомагнитные эффекты включены в

модель. Эти эффекты, очевидно, отражены недостаточно. Неадекватность модели условиям термосферных возмущений также отмечалась в ряде работ [16, 25, 34].

ОБСУЖДЕНИЕ

Электронная концентрация. Остановимся на причинах наблюдаемого значительного уменьшения N на высотах F2-области. Объяснение отрицательной ионосферной бури за счет изменения нейтрального состава, связанного с высокоширотным нагревом и перестройкой глобальной термосферной циркуляции, было предложено задолго до того, как оно было обнаружено с помощью масс-спектрометрических измерений на спутниках и вошло в стандартные модели нейтральной атмосферы. Расчеты, выполненные по модели MSIS-86, показали, что около 02^h, когда отмечалось наибольшее уменьшение N , концентрация $N(N_2)$ на высоте 300 км увеличилась по сравнению с контрольным днем в 1.9 раза, $N(O_2)$ — в 2.8 раза и $N(O)$ — в 1.2 раза. В результате параметр $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который характеризует соотношение процессов ионобразования и рекомбинации, уменьшился в 1.7 раза. Видно, что результаты расчета не могут объяснить наблюдаемое на этой высоте падение N более чем в девять раз, т.е. модель MSIS-86 дает заниженные изменения нейтрального состава. Этот вывод согласуется с результатами, полученными в работах [16, 19, 37]. Заметим также, что в работах [25, 26, 29, 30, 37] показано, что уменьшение N на порядок величины, а также разрушение слоя F2, требуют более значительного уменьшения отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, чем это следует из модели MSIS, в том числе уменьшения концентрации $N(O)$ до шести раз. Кстати, эти данные согласуются с последними результатами масс-спектрометрических измерений на спутниках, представленными в работе [31]. Установлена также существенная роль в увеличении скорости потерь ионов O^+ таких факторов, как нагрев атмосферы, усиление электрических полей, возбуждение колебательных уровней молекул $N_2(v)$ и $O_2(v)$ [16, 25, 26, 28, 29, 34]. Учет $N_2(v)$ в модельных расчетах в ряде случаев позволяет уменьшить расчетное значение N_mF2 в два раза, а учет $O_2(v)$ — еще примерно в 1.3 раза [29] и существенно улучшить согласие с измеренными значениями N . Известно [2, 3, 29, 38], что для среднеширотной F-области ионосферы источником возбуждения колебательных уровней молекул N_2 и O_2 могут быть высокие значения

температуры электронов ($T_e > 1500$ К) и потоки высыпающихся из магнитосферы энергичных частиц. Оба фактора имели место во время рассматриваемой бури. Дополнительный нагрев электронного газа наблюдался после начала бури и до восхода Солнца. Высыпания энергичных электронов были зафиксированы спутником GOES-8 после 02^h и продолжались вплоть до полуночи 25 сентября.

Следует отметить, что после полуночи одной из вероятных причин отрицательного ионосферного возмущения, наблюдаемого с помощью харьковского радара, могло быть смещение к экватору главного ионосферного провала. Действительно, этот эффект был обнаружен при исследовании глобальной картины крупномасштабных ионосферных возмущений во время рассматриваемой бури [1]. Авторы этой работы проводили анализ глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС), построенных по данным навигационной системы GPS. Было установлено, что в европейском секторе на фазе развития бури, вочные и предутренние часы 25 сентября 1998 г., экваториальная стенка главного ионосферного провала сместилась до географической широты 40°. В соответствии с картами глобального распределения ПЭС в северном полушарии, которые приведены в работе [1], минимум провала был близок к Харькову, по крайней мере в период времени 03^h—05^h, а отрицательное возмущение на широте Харькова наблюдалось с 01^h до 09^h. Подобный эффект смещения к экватору главного ионосферного провала наблюдался ранее неоднократно, например по данным внешнего зондирования со спутника «Интеркосмос-19» [7], по результатам наблюдений магнитных бурь в марте 1990 г. и в ноябре 1993 г. на среднеширотном радаре НР в Миллстоун-Хилле (геомагнитная широта около 53°, $L \approx 3.2$) и спутнике DMSP [21, 34] и т. д. Интересен тот факт, что смещение провала отмечено на харьковском радаре (геомагнитная широта 45.7°), т. е. на геомагнитной широте, которая соответствует $L \approx 1.9$. Такая L -оболочка принадлежит внутренней плазмосфере. Это свидетельствует о том, что нами действительно наблюдалась крайне сильная магнитная буря.

Следует отметить, что механизм формирования ионосферных возмущений и физическая схема их развития сложны и требуют учета многих факторов (см., например, схему физических процессов во время геокосмической бури в работе [14]). Исследование вклада каждого фактора проводится с помощью постепенно совершенствующихся глобальных моделей ионосферы, таких как FLIP [32, 33, 40], модели IZMIRAN [29] и др. Результаты наблюдения каждой новой бури дают материал для их

уточнения и развития.

Высота максимума области F. Измерения на радаре в Харькове показали увеличение $z_m F2$ во время бури примерно на 100 км ночью и на 50 км днем. Подъем слоя F объясняется рядом факторов [16, 18, 34]. Среди них расширение термосферы и перестройка термосферной циркуляции за счет усиления высокоширотного источника нагрева нейтрального газа. В результате меридиональный компонент ветра, направленный к полюсу днем, уменьшается и препятствует снижению слоя F2. Ночью он направлен к экватору и складывается с дополнительным ветром из высоких широт, поднимая слой на более высокие уровни. Определенный вклад в подъем высоты $z_m F2$ могут вносить также магнитосферные электрические поля, проникающие во время возмущений в средние и низкие широты. Так, электрическое поле, направленное на восток, вызывает подъем F2-слоя. Хотя в проведенном эксперименте эффекты термосферного ветра и электромагнитного дрейфа разделить нельзя, тем не менее можно предположить, что именно их совместный вклад вызвал наблюдаемое необычное увеличение скорости эквивалентного [34] ветра w [5, 20], которое способствовало увеличению $z_m F2$. Амплитуда w увеличилась после 00^h 25 сентября, достигла значения 100 м/с после 03^h на высоте 300 км и почти до полуночи превышала соответствующие значения в спокойный день. Главная буря 25 сентября развивалась на достаточно возмущенном фоне предшествующего дня, когда также наблюдался подъем слоя F2. Он имел место после 18^h, т. е. до начала главной бури, сопровождался увеличением скорости w и, вероятно, был связан с волновыми возмущениями, генерируемыми в ночь 24—25 сентября серией интенсивных магнитосферных суббурь. Авроральный индекс AE после 18^h (24 сентября) увеличивался от уровня 300 нТл, достиг значения 1500 нТл около 22^h и 2000 нТл — около 24^h.

Температуры заряженных и нейтральных компонентов атмосферы. Во время бури увеличение температуры электронного газа нарастало с высотой, достигнув $\Delta T_e \approx 800$ К на высоте 500 км около 02^h. После восхода Солнца оно сменилось уменьшением T_e на высотах 250—350 км. На высоте 250 км уменьшение T_e составило почти 500 К. Этот процесс сопровождался изменением направления вертикальной скорости плазмы на тех же высотах 250—350 км при наибольших значениях $v_z \approx 50$ м/с [5, 20]. Известно, что увеличение T_e во время бури объясняется джоулевым нагревом, связанным с проникновением магнитосферных

электрических полей в средние широты и высыпанием энергичных частиц, которые приводят к усилению ионосферных динамо-токов, а также с уменьшением охлаждения электронного газа из-за низких значений концентрации электронов, наблюдавшихся в предутренние часы [16]. Это эффекты локального характера. Охлаждение электронного газа, которое наблюдалось после восхода Солнца, могло быть вызвано изменением направления движения плазмы и выносом ее вверх со скоростью $v_z \approx 50$ м/с [5, 20]. По-видимому, увеличение кинетической энергии направленного движения электронов привело к снижению энергии их теплового движения и уменьшению T_e .

Нагрев ионного газа во время бури отмечался на всех высотах вплоть до конца наблюдений. Максимальное увеличение T_i составило 450—500 К на высотах 400—450 км. Увеличение T_i объясняется теми же процессами джоулевой диссипации ионосферных токов, которые вызвали увеличение T_e . Определенный вклад может вносить также фрикционный нагрев за счет трения быстро движущихся под действием электрических полей ионов о нейтральный газ [16, 34]. Эти источники нагрева усиливаются в периоды возмущений.

Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, связанных с магнитной бурей. Установлено, что в возмущенный день температура T_n увеличивалась с высотой, отслеживая увеличение T_i , вплоть до высоты 450 км. Увеличение T_n по сравнению со спокойным днем увеличивалось с высотой и составляло в главную фазу бури $\Delta T_n = 250—720$ К в диапазоне высот 250—450 км. Эти данные согласуются с результатами [16, 19, 34]. Увеличение T_n во время бури вызывают ряд процессов [3, 25]. Среди них существенны высокоширотный нагрев термосферы за счет джоулевой диссипации магнитосферных электрических полей и высыпающихся энергичных частиц, а также фрикционный нагрев за счет ион-нейтрального трения. Последний обусловлен разностью скоростей нейтрального ветра и $E \times B$ -дрейфа ионов [16] и может привести к увеличению T_n во время бури на несколько сотен градусов [16, 19, 38]. Известно, что полярные эффекты влияют на среднеширотную ионосферу как некоторые глобальные возмущения нейтрального состава, температуры и термосферной циркуляции. Они сопровождаются генерацией внутренних гравитационных волн и более длиннопериодных приливных гармоник с горизонтальными масштабами порядка нескольких тысяч километров, источником которых являются магнитосферные суббури и бури. Возму-

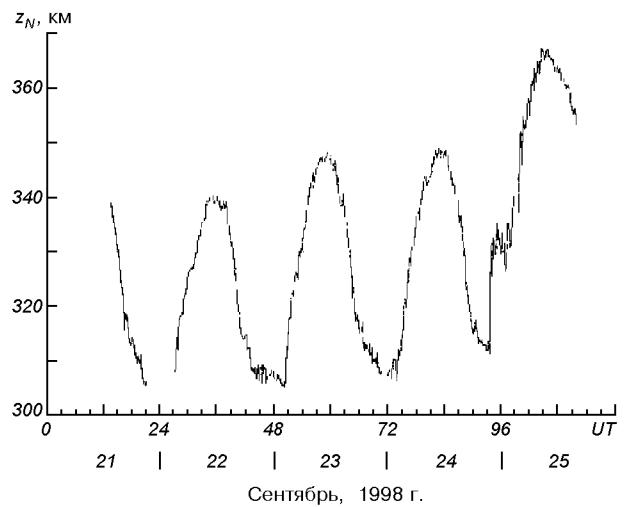


Рис. 11. Временные вариации высоты z_N — нижней границы области диффузии, где $\tau_{\text{хим}} = \tau_{\text{диф}}$ в период 21—25 сентября 1998 г.

щения нейтрального состава и температуры переносятся из высоких широт в средние за счет усиления меридионального ветра к экватору. Этот перенос является нелокальным источником нагрева среднеширотной термосферы. С другой стороны, проникновение магнитосферных электрических полей в средние широты и высыпание энергичных частиц из магнитосферы являются источником локального джоулева нагрева термосферы. Совместное действие этих факторов, очевидно, наблюдалось в нашем случае и подтверждалось все той же положительной волной ветра и в главную фазу бури 25 сентября [5, 20].

Следует отметить, что во время бури было зарегистрировано увеличение T_n , по крайней мере до высоты 450 км, где T_n достигла значения 1770 К. Это значит, что высота термопаузы, выше которой атмосфера становится изотермичной, увеличилась от 300 км в спокойный день до 450 км и более во время бури. Нагрев термосферы сопровождался изменением нейтрального состава и увеличением концентрации тяжелых компонентов нейтрального газа. Это привело к увеличению высоты z_N (рис. 11), на которой сравниваются характерные времена фотохимических процессов и диффузии. Видно, что в возмущенный день величина z_N увеличилась более чем на 15 км. Расчет z_N выполнен по данным нейтрального состава из термосферной модели MSIS-86, которая, как упоминалось, дает заниженные значения концентрации нейтральных компонентов в период возмущений. Можно ожи-

дать, что реальные значения z_N были выше. Как видно из рис. 11, амплитуда суточных колебаний z_N и среднее за сутки значение этой высоты продолжает увеличиваться и после окончания магнитной бури. Из этого следует, что буря вызывает в атмосфере, а возможно, и в геокосмосе, и более инерционные, чем описанные, процессы.

Вариации T_n во времени имели волновой характер. Максимум нагрева нейтральных частиц наблюдался сначала на больших высотах (около 03^h), а затем на меньших высотах (около 06^h—07^h), т. е. нагретый газ опускался вниз. Запаздывание приходящего сверху возмущения T_n составляло 3—4 ч в диапазоне высот 250—450 км.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. С помощью радара НР в Харькове проведены комплексные наблюдения отклика ионосферы на крайне сильную магнитную бурю 25 сентября 1998 г. Хотя основные магнитосферно-ионосферные процессы проходят, как правило, в полярных широтах, тем большую ценность представляют сведения о вызванном бурей мощном возмущении среднеширотной ионосферы, связанной с внутренней плазмосферой (геомагнитная широта 45.7°, $L = 1.9$). Данна интерпретация эффектов бури в свете современных представлений, проведено сравнение результатов измерений и моделирования вариаций параметров ионосферы и термосферы во время бури.

2. Обнаружено и объяснено уменьшение электронной концентрации, которое в главную фазу бури (02^h—08^h) составило 3—3.5 раза в максимуме области F и от 9 до 3 раз на высоте 300 км. В результате глубокой депрессии слой F2 оказался экранированным слоем F1. Показано, что привлечение рассчитанного по модели MSIS-86 изменения нейтрального состава, связанного с высокоширотным нагревом термосферы и перестройкой глобальной термосферной циркуляции, не может объяснить наблюдаемое глубокое падение N и разрушение слоя F2 и требует корректировки модели, а также учета других факторов (колебательно-воздушных молекул $N_2(v)$ и $O_2(v)$, влияния электрических полей на коэффициент рекомбинации и т. д.).

3. В ночное время отрицательное ионосферное возмущение, по-видимому, было вызвано смещением к экватору главного ионосферного провала, что подтверждает анализ глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС), построенных по данным навигационной системы GPS.

4. Зарегистрирован подъем высоты максимума электронной концентрации $z_m F2$ в среднем на 100 км ночью и на 50 км днем. Он вызван расширением термосферы и перестройкой глобальной термосферной циркуляции за счет усиления высокоширотного источника нагрева.

5. Отмечен рост температур электронов T_e и ионов T_i продолжительностью 6 и 16 ч соответственно. Около 02^h на высоте 500 км увеличение T_e составило около 800 К, а T_i — 500 К. Дополнительный нагрев ионосферной плазмы обусловлен усилием ионосферных токов за счет проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты и высыпания энергичных частиц, джоулевой диссипацией их энергии, а также фрикционным нагревом за счет ион-нейтрального трения.

6. Обнаружено уменьшение T_e (до 500 К) после восхода Солнца на высотах 250—350 км, которое сопровождалось инверсией скорости вертикального переноса плазмы на этих же высотах. Охлаждение T_e можно объяснить, по-видимому, изменением направления движения плазмы и выносом ее вверх со скоростью $v_z \approx 50$ м/с, что привело к снижению энергии теплового движения электронного газа.

7. Обосновано, что во время бури имело место увеличение температуры нейтральной атмосферы на 360 К на высоте 300 км. Модель MSIS-86 для возмущенных условий занижает значения T_n примерно на 320 К на этой же высоте. Увеличение T_n объясняется как высокоширотным нагревом термосферы, переносимым из высоких широт в средние широты за счет усиления меридионального ветра к экватору, так и локальным джоулевым нагревом, связанным с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты. Получены данные об увеличении T_n во время бури по крайней мере до высоты 450 км. При этом ΔT_n составило 250—720 К в диапазоне высот 250—450 км. Это свидетельствует о том, что высота термопаузы увеличилась от 300 км в спокойный день не менее чем до 450 км во время бури.

8. Моделирование атмосферных и ионосферных процессов с использованием моделей MSIS-86 и IRI-90 показало, что в спокойные даты результаты моделирования и измерения в целом неплохо согласуются, в магнитовозмущенных условиях различия достигали сотен процентов для N , десятков процентов для T_e и T_i . В возмущенные периоды моделирование ионосферных процессов требует использования моделей типа FLIP, позволяющих исследовать вклад различных физико-химических процессов в состояние ионосферы.

Наблюдения уникальной магнитной бури 25 сентября 1998 г. иллюстрируют тесную взаимосвязь явлений на Солнце, в ближнем космосе, ионосфере и термосфере, которые характеризуют состояние космической погоды. Геокосмические бури могут вызывать существенные возмущения в среднеширотной ионосфере и атмосфере, что является важным фактором, оказывающим влияние на технологическую деятельность человека и «здоровье» всей планеты.

Авторы выражают глубокую признательность Л. Я. Емельянову и И. Б. Склярову за проведение трудоемких измерений на радаре НР, А. В. Болибок за выполнение сложных компьютерных вычислений.

1. Афраймович Э. Л., Косогоров Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 4.—С. 491—498.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1987.—528 с.
3. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6—30.
4. Бэнкс П. М. Источники энергии в высокомагнитной верхней атмосфере // Полярная верхняя атмосфера. — М.: Мир, 1983.—С. 121—133.
5. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдений процессов в ионосфере, сопутствующих геомагнитной буре 25 сентября 1998 года при помощи радара некогерентного рассеяния в Харькове // Тр. XX Всерос. конф. по распространению радиоволн. — Нижний Новгород: Талам, 2002.—С. 56—57.
6. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.—190 с.
7. Индюков А. Е., Климов Н. Н., Васильев Г. В., Флигель М. Д. О положении главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физ. Солнца.—1985.—Вып. 71.—С. 58—61.
8. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
9. Таран В. И., Григоренко Е. И. Ионосферно-протоносферные процессы во время естественных возмущений по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния // Сб. тр. Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — Киев: АДЕФ-Украина, 2001.—С.119—124.
10. Таран В. И., Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пуляев В. А. Ионосферные эффекты магнитных бурь по наблюдениям на радаре некогерентного рассеяния в Харькове // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. тр. ХГПУ.—1999.—Вып. 7, ч. 3.—С. 381—383.
11. Таран В. И., Лысенко В. Н., Григоренко Е. И. Особенности процессов переноса плазмы и ионосферно-протоносферного взаимодействия во время магнитных бурь // Вестник нац. технич. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. науч. тр.—2001.—Вып. 4.—С. 261—264.

12. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. — М.: Сов. энциклопедия, 1986.—783 с.
13. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 38—47.
14. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
15. Bilitza D. International reference ionosphere-status 1995/1996 // Adv. Space Res.—1997.—20(9).—P. 1751—1754.
16. 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.
17. Buonsanto M. J. Ionospheric storms – A review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—501.
18. Buonsanto M. J., Gonzalez S. A., Pi X., et al. Radar chain study of the May, 1995 storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 233—248.
19. Buonsanto M. J., Pohlman L. M. Climatology of neutral exospheric temperature above Millstone Hill // J. Geophys. Res.—1998.—103, N A10.—P. 23.381—23.392.
20. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // Programme Poster Presentations International Union of Radio Science XXVIIth General Assembly. — Maastricht the Netherlands, 2002.—P. 2280.
21. Foster J. C., Rich F. J. Prompt mid-latitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.367—26.372.
22. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A4.—P. 5771—5792.
23. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res.—1987.—92, N 5.—P. 4649—4662.
24. McFarland M., Albritton D. L., Fehsenfeld F. C., et al. Flow-drift technique for ion mobility and ion-molecule reaction rate constant measurements. II. Positive ion reactions of N^+ , O^+ and N_2^+ with O_2 and O^+ with N_2 from thermal to 2 eV // J. Chem. Phys.—1973.—59, N 12.—P. 6620—6628.
25. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17.275—17.282.
26. 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.
27. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. Using steady-state vibrational temperatures to model effects of N_2^* on calculations of electron densities // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 26.941—26.945.
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., 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.
30. Prölss G. W. Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes // Planet. Space Sci.—1987.—35.—P. 807—811.
31. Prölss G. W., Craven J. D. Perturbations of the FUV dayglow and ionospheric storm effects // Adv. Space Res.—1998.—22(1).—P. 129—134.
32. Richards P. G., Fennelly J. A., Torr D. G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomical calculations // J. Geophys.

- Res.—1994.—99.—P. 8981—8992.
33. Richards P. G., Torr D. G. Ratios of photoelectron to EUV ionization rates for aeronomics studies // J. Geophys. Res.—1988.—93.—P. 4060—4066.
34. 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. 23.359—23.365.
35. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // Space Res.—1973.—13.—P. 267—286.
36. Salah J. E., Evans J. V., Alcayde D., et al. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Saintin // Ann. Geophys.—1976.—32, N 3.—P. 257—266.
37. Schlesier A. C., Buonsanto M. J. The Millstone Hill ionospheric model and its application to the May 26–27, 1990 ionospheric storm // J. Geophys. Res.—1999.—104, N A10.—P. 22.453—22.468.
38. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // Rev. Geophys. and Space Phys.—1978.—16, N 3.—P. 355—399.
39. Taran V. I., Grigorenko Ye. I., Kiyashko G. A. The F region ionosphere response on the severe magnetic storm on September 25, 1998 // Space Plasma physics: Космічна наука і технологія. Додаток до журналу.—2001.—7, N 2.—P. 42—46.
40. Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G., et al. Mid- and low-latitude model of thermospheric emissions, 1. O⁺(²P)₇₃₂₀ Å and N₂ (²P)₃₃₇₁ Å // J. Geophys. Res.—1990.—95.—P. 21.147—21.168.
41. Tsurutani B. T., Gonzales W. D., Kamide Y., et al. Magnetic Storms. Geophysical Monograph 98. — Washington, D.G., American Geophysical Union, 1997.—348 p.

SEVERE MAGNETIC, IONOSPHERIC AND ATMOSPHERIC STORMS IN SEPTEMBER 1998: THE COMPARISON OF MEASUREMENT AND MODELING RESULTS

Ye. I. Grigorenko, D. A. Dzyubanov, V. N. Lysenko,
V. I. Taran, L. F. Chernogor

The Kharkiv IS radar observations during the 25 September 1998 severe magnetic storm showed significant changes in the behavior of the midlatitude ionosphere related to the inner plasmasphere (geomagnetic latitude of the radar is equal to 45.7°, $L = 1.9$). Some features of a pronounced negative ionosphere storm are considered. Among them are a considerable electron density depletion, uplifting in the peak height $z_m F2$, increase in plasma and neutral temperatures. They can be explained in terms of thermosphere disturbances, the Joule heating, the penetration of magnetospheric convection electric fields into midlatitudes, and other effects. A comparison of the measured and modeled ionosphere and atmosphere responses to the magnetic storm is presented.