

УДК 550.388: 551.510.535

А. М. Гоков

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Особенности вариаций концентрации электронов в D-области ионосферы вблизи г. Харькова в период магнитной бури в декабре 2006 г.

Надійшла до редакції 20.02.2007

Експериментально за допомогою методу часткових відбиттів досліджено зміни концентрації електронів у середньоширотній D-області іоносфери в грудні 2006 р. під час магнітної бури. Розглянуто відгук D-області на початку та в кінці бури. Проведено порівняння із результатами, одержаними в грудні до і після магнітної бури в незбурених умовах. Виявлено квазіперіодичне збільшення електронної концентрації в D-області іоносфери протягом десятків хвилин більш ніж на 50—100 % з періодами $T \geq 30—60$ хв. Оцінено зміни швидкості іонізації. За експериментальними даними обчислено енергетичні характеристики потоків заряджених часток.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что магнитные бури (МБ), которые являются следствием нестационарных процессов на Солнце, таких как выбросы корональной массы (ВКМ) и солнечные вспышки (СВ), оказывают существенное влияние на состояние космической погоды в целом и динамику приземной ионосферной плазмы. При этом параметры каждой МБ сильно зависят от энергии нестационарных процессов на Солнце и от предшествующего ей состояния в системе Земля — Космос в целом. По этой причине каждая МБ является уникальной и сопровождается комплексом явлений в околосземной плазме, которые, кроме общих закономерностей, имеют особенности, вызывающие соответствующие характерные изменения ионосферных параметров. Исследования влияния магнитных бурь на околосземную плазму являются актуальными ввиду их большого научного и прикладного значения.

Начало магнитных бурь, которое, как известно, происходит через некоторое время после вспышек на Солнце, сопровождается вспышками рентгеновского (XRA), оптического (FLA) излучения, высыпаниями протонов (SPE) и электронов в ионосферу Земли. Эти события периодически продолжаются в течение от десятков часов до 5—10 сут (иногда более) в зависимости от величины (класса) магнитной бури. Высыпающиеся из радиационных поясов энергичные электроны с энергией $\varepsilon \geq 40$ кэВ являются существенным источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы (до широт 45—60°) на высотах $z = 80...100$ км [1, 2, 13, 16, 19, 23—25, 29—31, 35—37, 41—44]. Кроме того, в период солнечных вспышек и магнитных бурь в спутниковых измерениях регистрируются повышенные по сравнению с невозмущенными условиями (часто на несколько порядков) значения потоков протонов. Такие потоки протонов проникают до

высот нижней части D-области ионосферы ($z = 55\ldots75$ км) и могут вызывать заметное изменение ионизации в этой части ионосферы [3, 16, 22, 27, 30]. Однако есть большие трудности измерения потоков высывающихся заряженных частиц на средних широтах и получения правильных оценок их энергетического вклада на высотах $z < 90\ldots100$ км из спутниковых измерений, производимых на значительно больших высотах ($z > 200$ км).

Проявление МБ в средней и верхней ионосфере (выше 100 км) сравнительно хорошо изучено, однако реакция среднеширотной D-области ионосферы (ниже 100 км) на МБ носит сложный и неоднозначный характер и изучена недостаточно [1, 2, 13, 16, 19, 23—25, 29—31, 35—37, 42—44]. Обусловлено это в первую очередь разными физико-химическими процессами (и существенно большей сложностью процессов в D-области), протекающими в этих областях ионосферы [40], а также эпизодичностью прямых измерений с помощью ракетных методов и сложностями при использовании косвенных дистанционных методов, таких как метод частичных отражений (ЧО) и др. Поэтому есть необходимость продолжения экспериментальных исследований и накопления сведений для изучения этого вопроса.

Настоящая работа является продолжением исследований [13, 16, 19, 35—37]. В ней излагаются результаты экспериментальных исследований методом ЧО вариаций концентрации электронов $N(z)$ в среднеширотной D-области ионо-

сферы во время магнитной бури в декабре 2006 г., которые сравниваются с результатами, полученными до и после МБ в невозмущенных условиях.

СРЕДСТВА РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены в Радиофизической обсерватории Харьковского Национального университета имени В. Н. Каразина вблизи г. Харькова [45] (географические координаты: широта $49^{\circ}38' N$, долгота $36^{\circ}20' E$, магнитное наклонение $66^{\circ}36.8'$, магнитное склонение $6^{\circ}19.6'$, возвышение над уровнем моря 156 м) при помощи комплекса аппаратуры [21] методом ЧО. Технические параметры радара ЧО в период наблюдений: импульсная мощность передатчика $P = 150$ кВт, рабочая частота $f = 2.41$ МГц, длительность импульса 25 мкс, частота повторения импульсов $F = 10$ Гц, коэффициент усиления антенны $G \approx 50$, исследуемый диапазон высот 60—126 км.

СВЕДЕНИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Измерения амплитуд ЧО-сигналов и радиошумов выполнены в период магнитной бури в декабре 2006 г. Наблюдения проводились в течение ряда дней циклами до, в период и после магнитной бури. В табл. 1 приведены сведения об экспериментах (W — число солнечных пятен,

Таблица 1. Сведения об экспериментах

Дата, декабрь 2006	Время наблюдений (LT)	Время LT УСТ и ВСТ для $h = 85$ км	A_p (планетарный)	$F_{10.7}$, Ян ??	W
5	16:30—24:00	06:52	16:46	2	102
6	00:20—24:00	06:53	16:45	28	103
7	00:20—23:59	06:54	16:45	25	96
8	00:07—24:00	06:55	16:45	25	96
9	00:07—24:00	06:56	16:45	7	92
10	00:00—09:10	06:57	16:45	14	90
14	10:21—24:00	07:01	16:45	63	93
15	00:00—24:00	07:02	16:45	104	87
16	00:05—16:58	07:03	16:45	11	82
19	17:08—23:57	07:05	16:46	14	73
20	00:00—24:00	07:06	16:46	24	72
21	00:00—24:00	07:06	16:47	14	72
22	00:00—19:39	07:07	16:47	14	73

$F_{10.7}$ — поток радиоизлучения на длине волны $\lambda = 10.7$ см).

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Во время эксперимента регистрировались высотно-временные зависимости амплитуд смеси частично отраженного сигнала и радиошума $A_{so,x}(z, t)$ (где t — время, индексы «о» и «х» соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 22 высотных уровнями, начиная с 60 км через $\Delta z = 3$ км. Измерения $A_{so,x}(z, t)$ и $A_{no,x}(t)$ выполнялись непрерывными сеансами длительностью единицы-десятка часов. Для выделения амплитуд частично отраженных сигналов $A_{o,x}(z, t)$ записывались также амплитуды только радиошума $A_{no,x}(t)$ (две выборки в полосе частот 50 кГц) в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин интенсивностей ЧО-сигнала $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{nx,no}^2 \rangle$ осуществлялись по 600 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. Вычислялись высотно-временные зависимости $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ и $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$. Для анализа дополнительно применялось их сглаживание методом скользящего среднего на интервалах 10—30 мин со сдвигом 1—5 мин.

По полученным $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$ на фиксированных высотах с шагом $\Delta z = 3$ км вычислялось их отношение R (высотные профили $R(z)$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5$ и 10 мин), используемое далее для получения профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения с применением алгоритма регуляризации [4, 8]. При получении профилей $N(z)$ использовалась модель профиля $v(z)$ частот столкновений электронов с нейтральными молекулами [39]. Уточнение профилей $N(z)$ проводилось по методике [14]: высотные профили $R_{0,x}$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5$ и 10 мин, после чего проводилось их высотное сглаживание по трем точкам. Полученные таким образом зависимости $\langle R(z) \rangle$ использовались для получения профилей $N(z)$. Погрешность вычислений профилей $N(z)$ на интервалах усреднения в 10 или 5 мин не превышала 30 и 50 % соответственно.

Для оценки периодов достаточно медленных вариаций $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ или концентрации электронов $N(t)$ использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье на интервале времени 32, 64 или 128 мин. Временной ряд при этом образован из ежесекундных значений $A_{so,x}(z, t)$, $A_{o,x}(z, t)$ и $A_{no,x}(t)$. Анализировались высотно-временные вариации полученных зависимостей $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$ и $N(z, t)$.

СВЕДЕНИЯ О КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЕ

Приведем краткую характеристику периода наблюдений в декабре 2006 г. Сведения о космической погоде приведены на рис. 1. Этот период можно условно разделить на три: 1) 5—12 декабря, 2) 13—15 декабря, 3) после 15 декабря. Кратко охарактеризуем их на основе геофизических данных, полученных в мировых центрах данных ([<http://www.sec.noaa.gov/>, <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>]).

Сильной магнитной буре 14—15 декабря предшествовали процессы в области видимой части Солнца 930 (S05, $L = 010$). Эта область была самой большой и наиболее активной в видимой части Солнца в течение всего рассматриваемого периода наблюдений.

Для первого периода (5—12 декабря) характерно следующее.

Солнечная активность изменялась от очень низкой с начала месяца и до 5 декабря включительно до высокой 6 декабря вследствие того, что в видимой части Солнца в области 930 реализовались три большие солнечные вспышки (в табл. 2 приведены сведения об основных сильных солнечных вспышках в рассматриваемый период): X9/2п 5 декабря (интегральный поток составил $I = 0.710$ Дж/м²), M6/sf ($I = 0.130$ Дж/м²) и X6/3b ($I = 0.480$ Дж/м²) 6 декабря. 7 декабря активность Солнца уменьшилась до умеренной вследствие вспышки M2.0/1п ($I = 0.370$ Дж/м²) и затем оставалась очень низкой до 12 декабря включительно. В этот период произошли 31 слабая (класса C), четыре умеренных (класса M) и две сильных (класса X) рентгеновских вспышек. Геоэффективными были только отмеченные выше.

Геомагнитное поле изменялось от спокойного 5 декабря до слабо возмущенного состояния

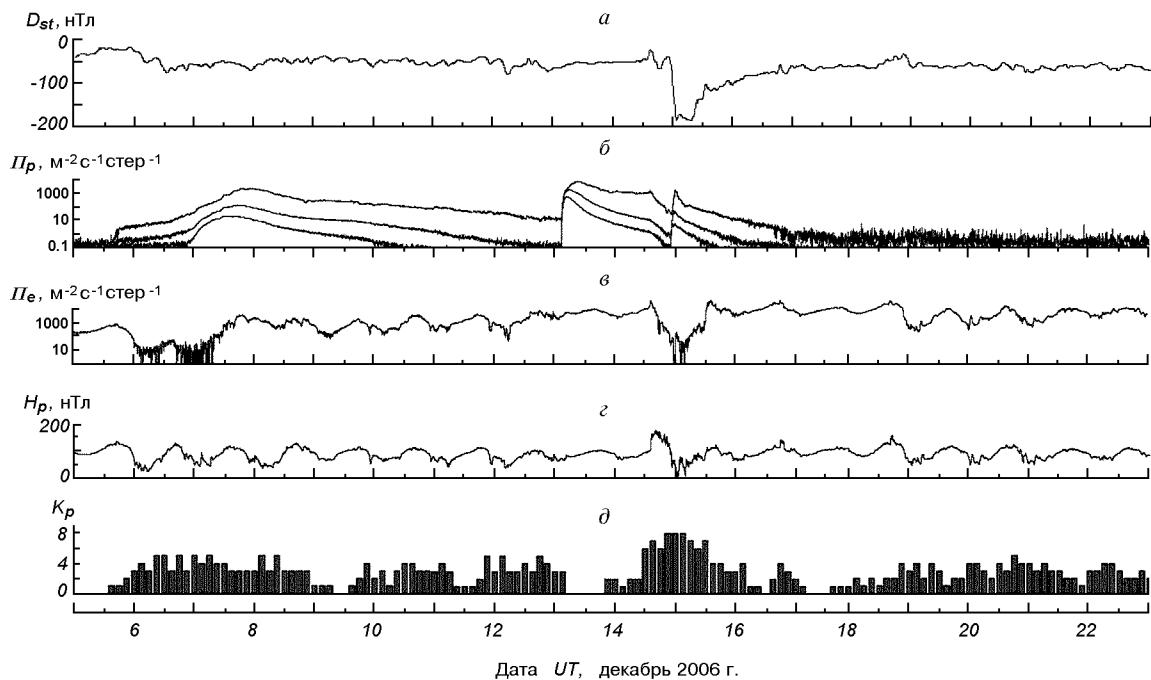


Рис. 1. Параметры космической погоды в декабре 2006 г. в период магнитных бурь: *а* — индекс геомагнитной активности D_{st} , *б* — усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/ $\text{см}^2\text{с}\cdot\text{ср}$), измеренные на спутнике GOES-8 (W75), *в* — потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12, *г* — усредненные за 5 мин значения H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12, *д* — значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p

6 декабря, после чего оставалось спокойным с небольшими возмущенными периодами (варiations D_{st} -индекса не превышали 10—20 нТл) до 14 декабря (примерно с 06:00 UT 6 декабря и до 11:00 UT 8 декабря после вспышки X9/2n реализовалась небольшая МБ. На рис. 1 хорошо видно, что в этот период наблюдались уменьшение значений индекса D_{st} примерно на 40—45 нТл и небольшие вариации H_p -составляющей геомагнитного поля; K_p -индекс в течение 3—6 ч увеличивался до значений 4—5. Характерно, что во время этой слабой МБ, как видно из рис. 1, *в*, потоки высокоэнергичных электронов уменьшились более чем на два порядка).

Увеличение потоков протонов с энергиями более 10 и более 100 МэВ было обусловлено протонной вспышкой X9.0/2n 5 декабря. Потоки с энергией более 10 МэВ сильно увеличились начиная с 15:55 UT 6 декабря, достигли максимального значения 1980 rfu 7 декабря в 19:30 UT и плавно уменьшались до 13 декабря,

оставаясь повышенными на 1-2 порядка по сравнению с невозмущенными (например, в первой половине суток 5 декабря). Увеличение потоков протонов с энергией более 100 МэВ началось 7 декабря в 15:40 UT, достигло максимального значения 19 rfu 7 декабря в 16:10 UT. Впоследствии в течение 7—9 декабря потоки плавно уменьшились до невозмущенных значений.

Потоки электронов с энергиями более 2 МэВ, измеренные на спутниках GEOS-8 и 12, в течение 7—10 декабря были повышенными по сравнению с невозмущенными. 6 декабря и в начале суток 7 декабря потоки высывающихся электронов, как видно из рис. 1, *в*, сильно флюктуировали.

Для второго периода (13—15 декабря) характерно следующее.

Солнечная активность 13—15 декабря возросла до высокой вследствие очень сильной вспышки X3/4b ($I = 0.519 \text{ Дж}/\text{м}^2$) в области видимой части Солнца 930, которая породила сложные

Таблица 2. Сведения о сильных вспышках на Солнце

Дата, декабрь 2006	LT	Тип	Интегральный поток, Дж/м ²	Максимальный поток радиоизлучения	
				245 МГц	2695 МГц
5	12:28—12:38(max)—13:00	X9.0/2п	0.710	210000	12000
6	10:02—10:23(max)—11:18	M6.0/sf	0.140	350	340
6	20:29—20:47(max)—23:35	X6.5/3б	0.480	30000	5800
7	20:41—21:03(max)—22:59	M2.0/1п	0.370	85	2600
13	04:20—04:34(max)—08:18	X3.4/4б	0.510	100000	44000
14	23:07—00:15(max)—00:21	X1.5/sf	0.120	99	620

ВКМ типа полного гало. 15 декабря в 00:15 LT в области Солнца 930 реализовалась другая сильная протонная вспышка X1.5 ($I = 0.12 \text{ Дж/м}^2$). Эта вспышка породила сложные ВКМ типа асимметричного полного гало. Обе вспышки были геоэффективными. Другие четыре слабые вспышки (класса C), имевшие место в этот период, не были геоэффективными.

Геомагнитное поле изменялось в этот период существенно: значения индекса D_{st} уменьшились в течение нескольких часов в конце суток 14 декабря и в первой половине 15 декабря от $-40\ldots-50$ (14 декабря) до $-185\ldots-187$ нТл в 06.00—08:00 UT с последующим плавным увеличением значений D_{st} . К концу суток они составили $D_{st} = -95\ldots-105$ нТл. По данным, полученным на спутнике, 14 декабря в 14:14 UT зафиксирован ВКМ, обусловленный внезапным импульсом (SI) в геомагнитном поле (по данным магнитометрической обсерватории в Boulder он составил 26 нТл) после протонной вспышки X3/4b 13 декабря. Вариации H_p -составляющей геомагнитного поля в рассматриваемый период были существенными и во второй половине 14 и первой половине 15 декабря превышали 100 нТл.

Существенное увеличение потоков протонов с энергиями более 10 и более 100 МэВ, как хорошо видно из рис. 1, б, имело место 13 декабря и было обусловлено вспышкой X3/4b. Потоки протонов с энергиями более 100 МэВ начали увеличиваться 13 декабря в 03:00 UT, достигли максимального значения 88.7 rfu в 05:25 UT и впоследствии потоки плавно уменьшались. Потоки протонов с энергией более 10 МэВ резко увеличились начиная с 03:10 UT 13 декабря, достигли максимального значения 698 rfu в 09:25 UT и впоследствии плавно уменьша-

лись до 15 декабря. Вспышка X1.5 вызвала дополнительный всплеск потоков протонов 15 декабря (рис. 1, б), после чего в течение этих суток потоки уменьшились до фоновых.

Потоки электронов с энергиями более 2 МэВ, измеренные на спутниках GEOS-8 и GEOS-12, в этот период были повышенными по сравнению с невозмущенными. 15 декабря и в конце суток 14 декабря потоки высыпающихся электронов, как видно из рис. 1, в, сильно flуктуировали.

Третий период (после 15 декабря) является типичным характерным невозмущенным. Для него характерно следующее.

Солнечная активность в течение 15—17 декабря уменьшилась до низкой, а затем до очень низкой и оставалась такой до конца периода наблюдений. В этот период геоэффективных событий не было (реализовалась лишь одна слабая вспышка класса C).

Геомагнитное поле изменялось в этот период мало. Значения индекса D_{st} изменились в целом плавно, за исключением 18 декабря, когда их вариации достигали 20—25 нТл. Вариации H_p -составляющей поля эпизодически в течение нескольких часов составляли 10—20 нТл.

Потоки протонов на орбите спутников регистрировались на уровне фоновых невозмущенных значений.

Потоки высыпающихся электронов различных энергий, измеренные на спутниках GEOS-8 и GEOS-12 [<http://www.sec.noaa.gov/>], в этот период оставались еще высокими (что, по-видимому, характерно для после буревого периода [13, 23—25, 29]) и значительно повышенными по сравнению с невозмущенными условиями.

В табл. 3 приведены суточные потоки протонов и электронов для энергий более 2 МэВ (для энергий более 4 и более 6 МэВ данных нет),

Таблица 3. Суточные потоки протонов и электронов в декабре 2006 г.

Дата, декабрь 2006	Потоки протонов, $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ср}^{-1}$			Потоки электронов, $10^6 \text{ см}^{-2} \text{сут}^{-1} \text{ср}^{-1}$
	$E > 1$ МэВ	> 10 МэВ	> 100 МэВ	> 2 МэВ
5	14	0.77	0.055	29
6	38	8.8	0.13	1.4
7	2400	670	9.8	78
8	7000	650	3.1	100
9	1200	180	0.55	50
10	660	86	0.097	100
11	220	35	0.029	120
12	510	8.9	0.030	200
13	440	270	18	460
14	4500	100	0.92	470
15	2200	22	0.36	540
16	140	1.8	0.034	1000
17	100	0.37	0.026	670
18	180	0.23	0.026	1100
19	130	0.22	0.029	270
20	110	0.18	0.038	380
21	110	0.16	0.039	450
22	110	0.17	0.044	580

полученные по данным спутников GEOS-8 и GEOS-12) [<http://www.sec.noaa.gov/>].

Как известно [5], индекс D_{st} описывает степень возмущения геомагнитного поля, и тем самым — интенсивность магнитных бурь. В период МБ 14—15 декабря индексы магнитной активности $A_{p\max}$ и $K_{p\max}$ составляли 107 и 8 соответственно. По одной из классификаций рассматриваемая магнитная буря относится к сильным или очень сильным [28]. Энергия E_m и мощность P_m таких магнитных бурь составляют около $6.5 \cdot 10^{15}$ Дж и $7.5 \cdot 10^{11}$ Вт соответственно. Величину E_m удобно оценивать по минимальному значению $D_{st\min}$ [28, 38]:

$$E_m = \frac{3}{2} E_M \frac{D_{st}^*}{B_0},$$

где $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — энергия дипольного геомагнитного поля у поверхности Земли, $B_0 = 30$ мк — значение индукции геомагнитного поля на экваторе; скорректированное значение $D_{st}^* = D_{st} - bp^{1/2} + c$. Здесь $b = 0.5 \text{ мТл}/(\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3})^{-1/2}$, $c = 20 \text{ нТл}$, $p = N_p m_p v_{sw}^2$, N_p и m_p — концентрация и масса протонов, v_{sw} — скорость солнечного ветра. Энергия магнитной бури, оцениваемая по этой

формуле, при значении $D_{st\min}^* \approx 187$ нТл составила $5.7 \cdot 10^{15}$ Дж, максимальная мощность (15 декабря) — $5.5 \cdot 10^{11}$ Вт ($\Delta t = 3$ ч).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основные особенности высотно-временных вариаций концентрации электронов, полученные в экспериментах в невозмущенных условиях и во время магнитной бури в декабре 2006 г. Важно также, что эксперименты проводились и в периоды прохождений утреннего и вечернего солнечного терминаторов (УСТ и ВСТ соответственно).

В эксперименте 5 декабря, который проводился в ночное время, (этот день можно отнести к невозмущенным: значения индекса K_p составляли 0—2) выраженных особенностей в высотно-временных вариациях ЧО-сигналов с высотных уровней 78—87 км и шумов не было установлено. Они отражали типичный ход этих характеристик для невозмущенных условий для этого времени года. Отношение ЧО-сигнал/помеха составляло $s(z, t) = \langle A_{x,of}^2 \rangle(z, t) / \langle A_{nx,no}^2 \rangle(t) \approx 1$. Высотно-временные вариации концентрации электронов $N(z, t)$ соответствовали типичным значениям для невозмущенных зимних условий (рис. 2).

Значения планетарного K_p -индекса 6 и 7 декабря увеличивались до 4—5. Как отмечалось выше, 6 декабря реализовалась небольшая МБ. В этот день в течение всего светлого времени суток отношение $s = 10—1000$ в высотном диапазоне 72—90 км. Характерно, что в ночное время довольно часто, как видно из рис. 3, $s = 10—100$. Концентрация электронов в этот день в D-области была несколько повышенной по сравнению с типичными невозмущенными условиями. Четко прослеживался суточный ход $N(z, t)$ (зависимость $N(z, \chi)$ от зенитного угла Солнца χ). Характерно также то, что в темное время суток, как видно из рис. 2, отмечались существенные вариации концентрации электронов, которых не было в предыдущие сутки. Такое поведение ЧО-сигналов и концентрации электронов, вероятнее всего, связано с МБ.

7 декабря в светлое время суток $s = 10—100$ в высотном диапазоне 60—90 км (см. рис. 3).

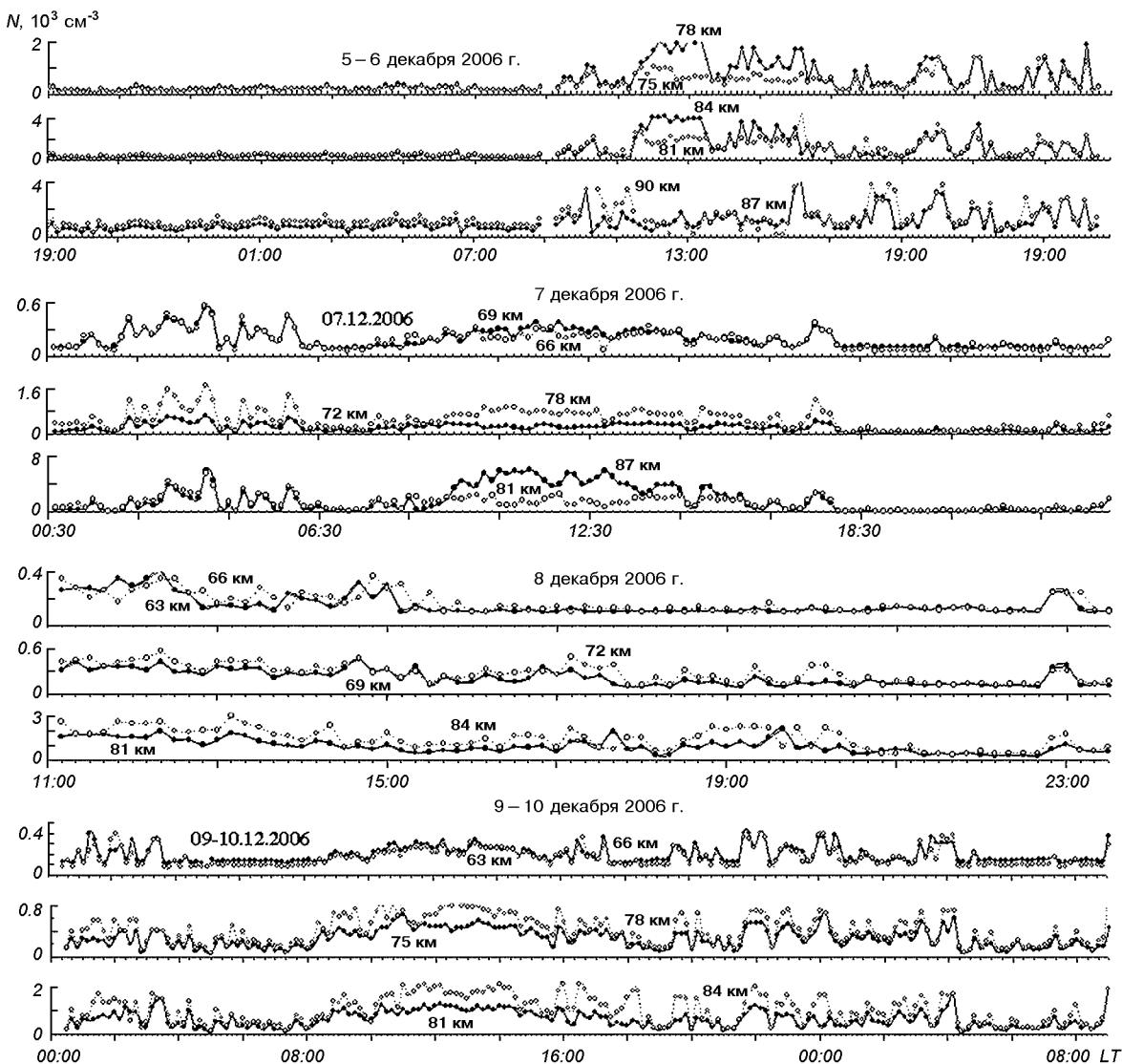


Рис. 2. Вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в среднеширотной D-области ионосферы 5—10 декабря 2006 г.

Характерно, что интенсивные ЧО-сигналы ($s = 10—70$) наблюдались в области высот $z < 70$ км. В обычных невозмущенных условиях ЧО-сигналы с $s > 1$ на нашей аппаратуре в этом пункте наблюдений регистрируются редко с высотой менее 70 км, что обусловлено малыми значениями концентрации электронов в этой области высот. В темное время суток почти во всей D-области ионосферы эпизодически регистрировались ЧО-сигналы с $s > 1—10$. Эти два факта свидетельствуют о том, что в эти сутки иониза-

ция в D-области, по-видимому, частично контролировалась потоками высывающихся протонов (по крайней мере — на высотах ниже 80 км, что не противоречит известным положениям [3, 22] из физики и химии ионосферы), которые, как отмечено выше были обусловлены вспышкой X9/2n и достигли максимального значения в эти сутки.

Вариации концентрации электронов 7 декабря показаны на рис. 2. Отчетливо видно, что значения концентрации электронов в эти сутки

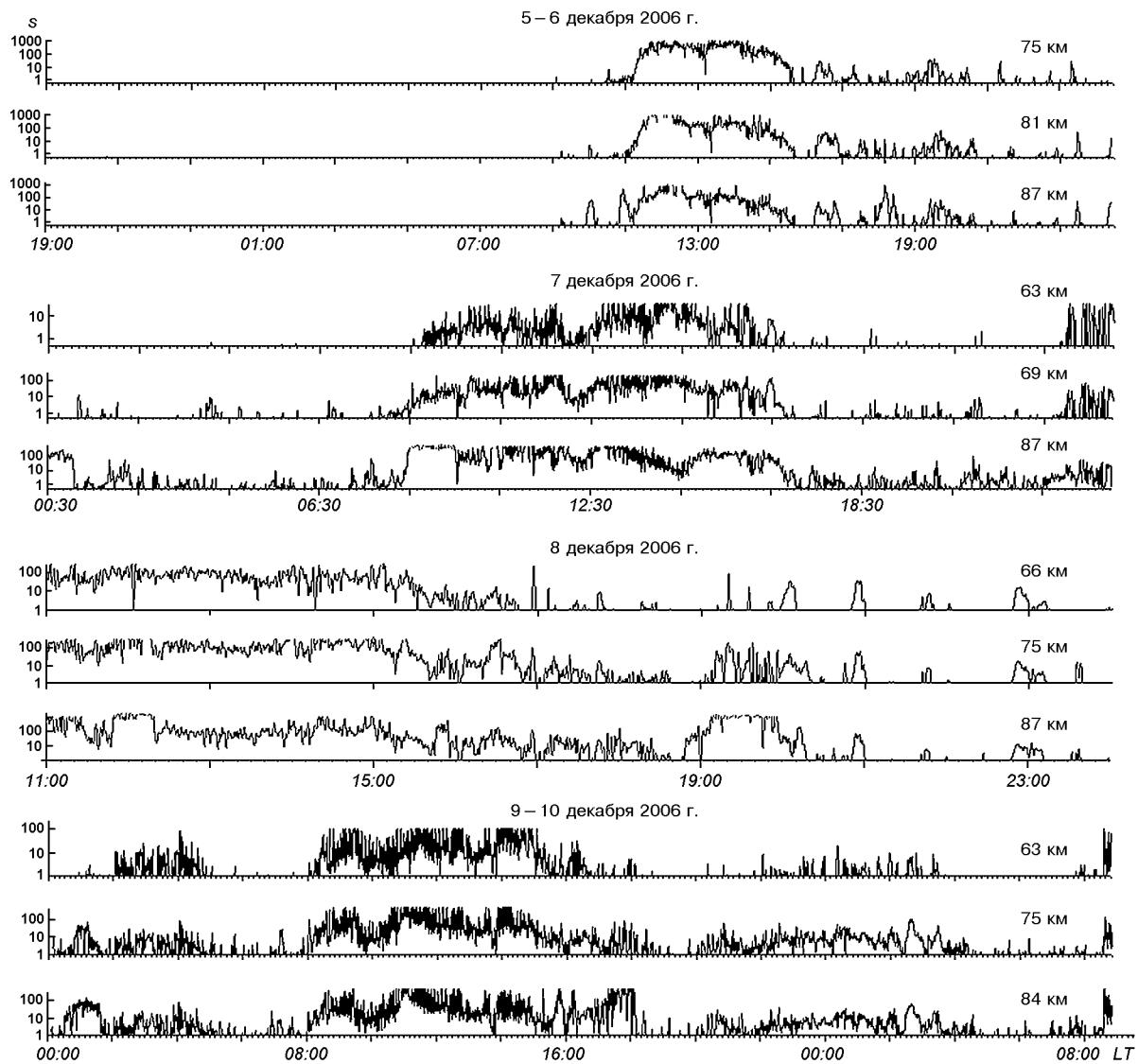


Рис. 3. Высотно-временные вариации отношения $s(z, t) = \langle A_x^2 \rangle(z, t) / \langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$ ЧО-сигнал/помеха в экспериментах 5–10 декабря 2006 г.

(примерно до 18 ч местного времени) в области высот 63–84 км были повышенными по сравнению с невозмущенными. (В темное время в первой половине суток имели место как значительное повышение концентрации электронов, так ее и квазипериодические вариации во всей D-области. Важно, что примерно такие же вариации $N(z, t)$ имели место в предыдущие часы в темное время в предыдущие сутки). Как отмечено выше,

ионизация в D-области, по-видимому, частично контролировалась потоками высывающихся протонов. Отметим также, что в темное время во второй половине суток значения концентрации электронов были на уровне типичных для этого времени года невозмущенных фоновых значений.

В эксперименте, проведенном 8 декабря, примерно между 00:30 и 10:00 LT регистрировался

сильный уровень помех, значения отношения s составляли 1—2, и надежные значения концентрации электронов не удалось получить. После 10:30 LT и в течение всего светлого времени суток $s = 10$ —300 в высотном диапазоне 63—90 км (рис. 3) как и в предыдущие сутки. В период прохождения ВСТ и в течение десятков минут после него значения $s(z, t)$ сравнительно плавно уменьшились до $s = 0.5$ —2. Характерно также то, что примерно через 20—120 мин (для высотных уровней 87—69 км) после прохождения ВСТ в течение 60—100 мин регистрировались интенсивные ЧО-сигналы, и значения s вновь увеличивались до $s = 10$ —300. Отметим, что такое поведение s бывает иногда характерным для среднеширотной D-области ионосферы [12, 18, 34]. Как видно из рис. 2, концентрация электронов в этот период увеличивалась на высотах 81—87 км на 50—100 %. Кроме того, в ночное время эпизодически $s = 10$ —80 в течение 15—50 мин. Пример вариаций концентрации электронов в этот день приведен на рис. 2. Видно, что в этот день отчетливо прослеживалась зависимость $N(z, \chi)$. В целом в темное время во второй половине суток значения концентрации электронов были на уровне типичных для этого времени года невозмущенных фоновых значений. Кратковременное увеличение значений $N(z, t)$ примерно в 22:35—23:00 LT (в этот период $s = 10$ —80), по-видимому, связано с кратковременным высыпанием заряженных частиц (как отмечалось выше, потоки протонов были еще очень высокими).

Рассмотрим далее кратко особенности вариаций $s(z, t)$ и $N(z, t)$ в эксперименте 9—10 декабря. Пример вариаций концентрации электронов в этот день приведен на рис. 2. В течение всего светлого времени суток 9 декабря $s = 10$ —500 на высотах 63—87 км. В темное время суток как утром (9 и 10 декабря), так и вечером отношение s составляет 1—50 в течение нескольких часов (рис. 3). В эти периоды имели место квазипериодические вариации $N(z, t)$ с амплитудой более 100 %, периодом $T \approx 40$ —50 мин и длительностью 1—3 периода. Характерно, что в утреннее время имело место $s < 1$ (т. е. случай, когда ЧО-сигналы почти отсутствовали) примерно за 60—10 мин до момента прохождения УСТ. Через 120—40 мин (63—87 км) после прохождения УСТ $s \gg 1$.

В период прохождения ВСТ и в течение десятков минут после него значения $s(z, t)$, как и в предыдущие сутки, сравнительно плавно уменьшились до $s = 0.5$ —2. Важно так же то, что в темное время суток через десятки-сотни минут (для высот 87—63 км) после прохождения ВСТ в течение примерно 3—8 ч (примерно до 04:30 LT 10 декабря) регистрировались интенсивные ЧО-сигналы (значения s увеличивались до $s = 10$ —50). Отметим, что такое поведение $s(z, t)$ не характерно для измерений на нашей аппаратуре (да и вообще для наблюдений в среднеширотной D-области ионосферы), поскольку, как правило, в ночные часы в невозмущенных условиях концентрация электронов намного меньше, чем в светлое время суток. Вследствие этого уровень ЧО-сигналов мал по сравнению с уровнем радиошумов, которые в темное время суток, как известно, заметно увеличиваются [12, 18, 34]. Одной из наиболее вероятных причин такого поведения ЧО-сигналов в этот день, по-видимому, были высыпания высокоэнергичных частиц после рассмотренной выше МБ, которые могли быть инициированы прохождением ВСТ (т. е. является результатом проявления повторного взаимодействия системы ионосфера — магнитосфера в средних широтах). Ранее отмечалось, что потоки протонов и электронов в этот день были еще высокими. В этот период, как видно из рис. 2, концентрация электронов увеличивалась на высотах 66—84 км более чем на 50—150 % по сравнению с невозмущенными фоновыми значениями. Сходные результаты получены нами и в других экспериментах. В работах [12, 18, 34] мы высказали предположение, что столь большое увеличение N вызвано высыпанием частиц из магнитосферы. Высыпание может возникнуть в результате перераспределения захваченных частиц по питч-углам, к чему приводят либо искривления конфигурации силовых линий поля (геомагнитных ловушек), либо уменьшение «поперечной» энергии ϵ_{\perp} заряженных частиц. Кроме того, в процессе становления и релаксации возмущений тензора проводимости ионосферной плазмы поле поляризации E_p обладает и вихревым компонентом E_r . Последний механизм рассмотрен в работах [6, 7, 9, 10]. При прохождении терминатора возможны существенные изменения тензора проводимости ионосферной плазмы и вариации составляющих

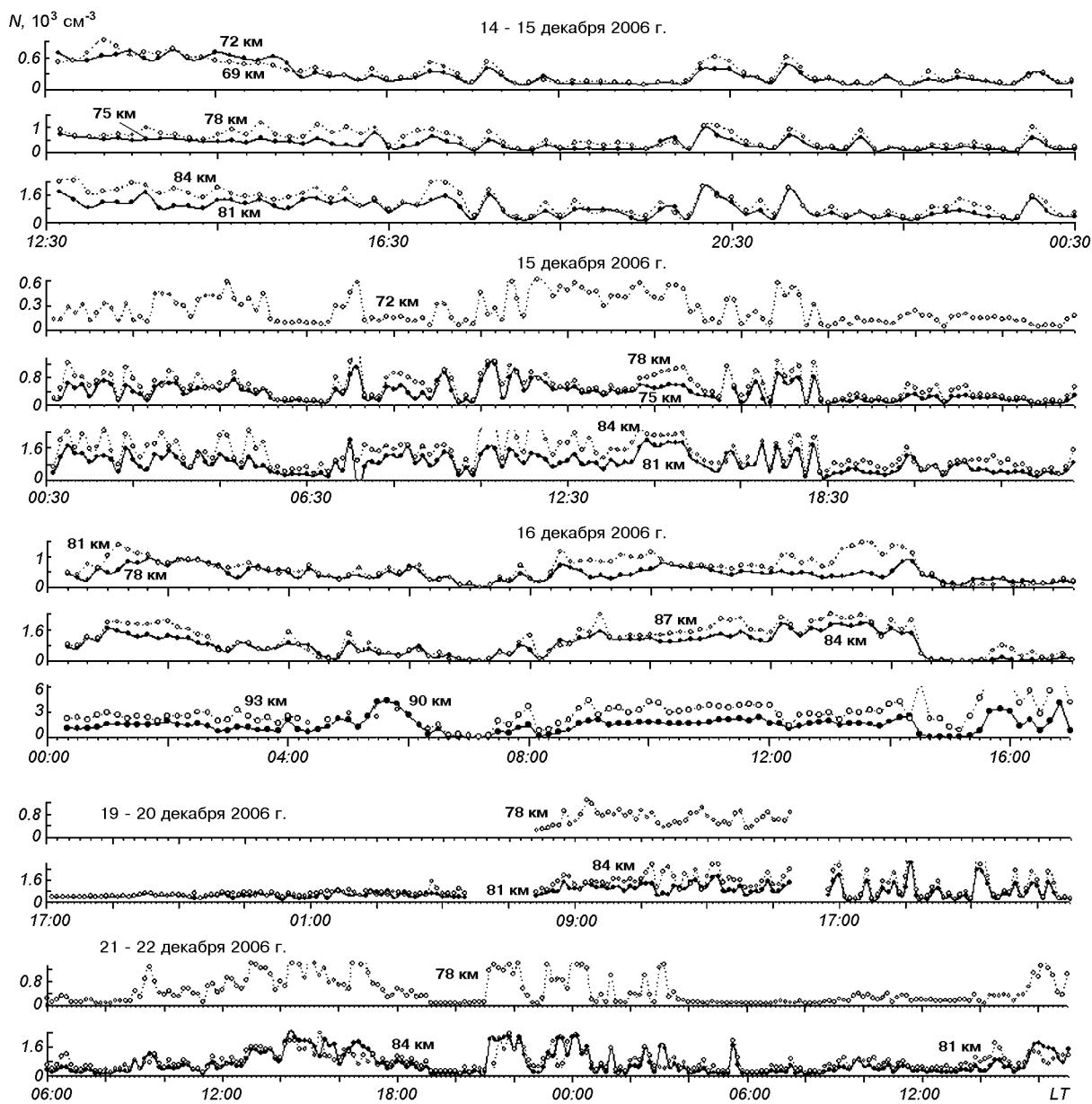


Рис. 4. То же, что на рис. 2 для 14—16 и 19—22 декабря 2006 г.

электрического поля E_p и E_r , а значит и ε_{\perp} . Основные звенья механизма стимуляции высываний электронов могут быть следующие. ВСТ вызывает уменьшение концентрации электронов на высотах динамо-области. Это приводит к генерации электрического потенциального поля

поляризации и вихревого поля. Проникая в магнитосферу, эти поля способны уменьшить «поперечную» энергию электронов и тем самым перевести их в конус потерь. Высыпание электронов приводит к ионизации нейтральных частиц на высотах 80—95 км. Для обеспечения

наблюдаемого увеличения N согласно расчетам [15, 30, 34] требуются потоки электронов с плотностью $p \sim 10^7 \dots 10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Такие значения p не представляются большими. Отметим, что как и в предыдущих экспериментах, в этот день отчетливо прослеживалась зависимость N от χ .

В эксперименте 14 декабря в светлое время интенсивные ЧО-сигналы регистрировались в интервале высот 69—87 км ($s = 1 \dots 1000$). Характерно, что ЧО-сигналы исчезли (или были меньше уровня шумов) за десятки минут до или сразу же после времени прохождения ВСТ (рис. 5). В темное время суток $s = 0.1 \dots 1$, эпизодически $s = 1 \dots 70$. Как и в предыдущих экспериментах, в дневное время отчетливо прослеживалась зависимость N от χ (пример высотно-временных изменений концентрации электронов приведен на рис. 4). В ночные часы эпизодически регистрировались всплески-увеличения $N(z, t)$ длительностью около 10—30 мин с периодом $T \approx 60$ мин. В эти часы продолжалась фаза развития МБ. Как отмечалось выше, все геофизические параметры, характеризующие состояние космической погоды, испытывали существенные изменения (см. рис. 1). Вероятной причиной таких вариаций концентрации электронов могли быть высыпания высокоэнергичных протонов или электронов. Не исключено, что эти вариации могли быть обусловлены акустико-гравитационными волнами (АГВ), одной из причин развития которых могли служить существенные вариации геомагнитного поля. На это указывает величина квазипериода, характерная для возмущений, вызываемых АГВ [20].

В 23:00 LT на космодроме Ванденберг (Флорида, расстояние от места наблюдения 9330 км) был произведен пуск космического аппарата «Дельта-2» среднего типа [17]. Полная масса КА — 230 т, начальная тяга — 3.6 МН, время работы 1(0), 2(1), 3(2) и 4(3) ступеней — 64(0), 256(1), 444(2), 88(3) с, мощность двигателей — 1—10 ГВт, энерговыделение — не менее 1 ТДж. После старта КА через $\Delta t \sim 10$ (на высотах 84—90 км) и 50 мин (на высотах 69—87 км) наблюдались кратковременные всплески-увеличения концентрации электронов на 50—150 % длительностью около 20—25 мин. Согласно [17] экспериментально обнаруженные возмущения концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы примерно через 10—15

минут после старта КА, исходя из времени задержки отклика, могут быть связаны с генерацией МГД-возмущений в ионосферной плазме. При определенных условиях, воздействуя на радиационные пояса Земли, они могут вызывать пульсирующие высыпания электронов высоких энергий. Последние, в свою очередь, могут вызывать наблюдаемые изменения концентрации электронов на больших удалениях от места старта КА. Подобный механизм ранее был предложен для объяснения результатов, полученных во время мощных удаленных землетрясений и сильных гроз [11, 32, 33]. Возмущения концентрации электронов через 45—50 мин после старта КА, по-видимому, связаны с включением корректирующих двигателей ракет. Маловероятно, что такие значительные возмущения связаны с распространением волн (в частности АГВ) в нижней ионосфере. Более вероятно, что эти возмущения концентрации электронов вызваны пульсирующими потоками частиц из магнитосферы. Эти процессы высыпаний могут быть стимулированы включением корректирующих двигателей ракет [17]. Оценки плотности потоков электронов для рассматриваемого эксперимента для высоты 84 км дают $p \approx 10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, что не противоречит результатам работы [17].

15 декабря в темное время суток утром примерно до 05:20 LT (в максимальной фазе МБ) в интервале высот 72—87 км регистрировались интенсивные ЧО-сигналы ($s = 1 \dots 200$, рис. 5). Концентрация электронов в этот период времени в два—четыре раза превышала типичные фоновые невозмущенные значения. Характерно, что как и в эксперименте 9 декабря, в утреннее время в интервале высот 72—81 км имело место $s < 1$ (т. е. случай, когда ЧО-сигналы почти отсутствовали) примерно за 40—20 мин до момента прохождения УСТ. На высотах 84—87 км $s > 1$ примерно за 20 мин до прохождения УСТ и впоследствии $s \gg 1$ после 08:10 LT в течение всего светлого времени суток.

В светлое время суток примерно до 12 ч, как и в эксперименте 6 декабря, наблюдались квазипериодические вариации $N(z, t)$ с примерным периодом $T \approx 60$ мин и амплитудой более 100 %. Возможной причиной таких вариаций могут быть высыпания заряженных частиц, однако остается неясным механизм стимуляции высыпаний.

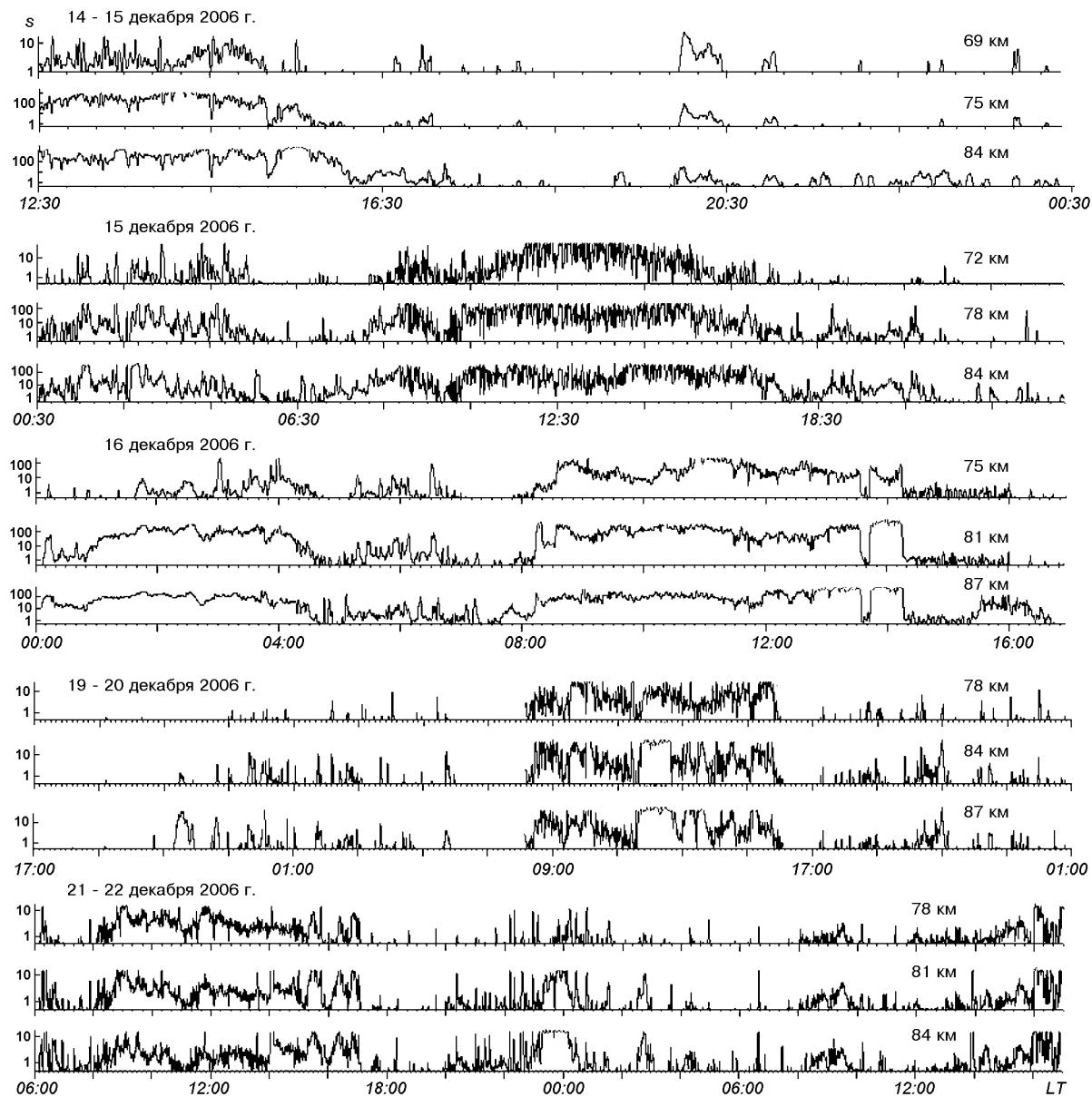


Рис. 5. То же, что на рис. 3 для 14—16 и 19—22 декабря 2006 г.

В течение примерно 4.5 ч после прохождения ВСТ в интервале высот 75—87 км $s \approx 1—50$, и концентрация электронов была повышенной по сравнению с типичными невозмущенными условиями для этого времени года (вариации $N(z, t)$ носили, как видно из рис. 4, квазипериодический характер с примерным периодом $T \approx 40—45$ мин), что не является типичным для наблю-

дений в средних широтах [12, 34] (обычно, как уже отмечалось ранее, ЧО-сигналы нами не наблюдаются из-за малых значений концентрации электронов в этот период). Наиболее вероятно, что такое поведение $s(z, t)$ и $N(z, t)$ в этот день было обусловлено высыпаниями заряженных частиц из магнитосферы после МБ. Высыпания электронов из магнитосферы могли быть

стимулированы прохождением солнечного терминатора. Потоки электронов, как видно из рис. 1, сильно возросли и флюктуировали, потоки же протонов оставались еще достаточно высокими. Важно, что квазипериодические вариации $N(z, t)$, как видно из рис. 4, начались примерно за 60—70 мин до момента прохождения ВСТ.

Отметим, что в рассмотренных экспериментах характерные вариации $s(z, t)$ и $N(z, t)$ в период прохождения ВСТ начинались за десятки минут до момента ВСТ и продолжались десятки-сотни минут после. Важно, что сходные вариации $s(z, t)$ и $N(z, t)$ наблюдались ранее как в невозмущенных (меньшей величины), так и возмущенных условиях [13, 15, 18, 34].

Как видно из рис. 5, до конца суток 15 декабря $s(z, t) < 1$. В эксперименте 16 декабря в ночные и утренние часы $s(z, t) \gg 1$ почти до времени прохождения УСТ. Концентрация электронов в этот период была существенно повышенной по сравнению с типичными для этого времени невозмущенными значениями. Примерно за 20 мин до времени прохождения УСТ и до 07:20 LT концентрация электронов была на уровне фоновых невозмущенных значений. После этого началось типичное дневное увеличение $N(z, t)$ с отчетливо выраженной зависимостью от зенитного угла Солнца $N(z, \chi)$. Отметим также, что характерное уменьшение $s(z, t)$ и $N(z, t)$ в этот день началось за десятки-сотни минут до времени прохождения ВСТ, что является типичным для этого времени года в невозмущенных условиях [12, 34].

Эксперименты 19—22 декабря проведены в типичных невозмущенных условиях. Как видно из рис. 1, потоки протонов в этот период почти отсутствовали, потоки электронов оставались еще высокими. В этих экспериментах в светлое время суток отношение s было равным 1—50, вариации концентрации электронов соответствовали типичным для этого времени года невозмущенным условиям. Отчетливо прослеживалась зависимость от зенитного угла Солнца $N(z, \chi)$ (см. рис. 4). В темное время суток $s(z, t) < 1$, эпизодически длительностью 10—20 мин $s = 1\dots 15$ (в эти периоды регистрировались всплески-увеличения концентрации электронов на 50—100 %). 21—22 декабря в интервале времени примерно 22:00—01:10 LT $s = 1\dots 50$ и

значения концентрации электронов превышали типичные фоновые значения примерно в 1.5—3 раза. Такие вариации $N(z, t)$, по-видимому, были обусловлены эпизодическими высыпаниями электронов после МБ, потоки которых, как отмечено выше, оставались высокими. Ранее отмечалось, что такие явления достаточно хорошо известны [1, 13, 16, 23—25, 29, 41—44].

По методике [30] на основе экспериментальных данных о вариациях концентрации электронов оценим энергетические характеристики потоков электронов. Результаты расчетов приведены в табл. 4. Результаты расчетов показывают, что наблюдаемые вариации N в нижней ионосфере могут быть вызваны потоками электронов и протонов с $p \sim 10^7\dots 10^9 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Такие значения потоков электронов сходны по величине с их значениями в периоды возмущений другой природы и не представляются большими в условиях среднеширотной ионосферы. В высоких широтах, как известно [26], значения p на несколько порядков больше.

Таким образом, основные особенности высотно-временных вариаций концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в рассматриваемый период во время магнитной бури сводятся к следующему.

- Почти во всех экспериментах в невозмущенных условиях в светлое время суток сохранялась отчетливая зависимость изменений концентрации электронов от зенитного угла Солнца $N(z, \chi)$.

- В дни геомагнитных возмущений также отчетливо прослеживалась зависимость $N(z, \chi)$. Значения $N(z)$ при этом превышали соответствующие значения концентрации электронов в невозмущенные дни.

- В рассмотренных экспериментах характерные существенные вариации $s(z, t)$ и $N(z, t)$ в период прохождения ВСТ начинались за десятки минут до момента ВСТ и продолжались в течение десятков-сотен минут после; периоды таких вариаций составляли, как правило, $T \approx 30\dots 40$ мин; величина возмущений концентрации — сотни процентов. В период МБ такие вариации были более выраженными, чем в невозмущенные дни.

- В темное время суток в период МБ и в течение нескольких дней после него эпизодически наблюдалось увеличение концентрации

Таблица 4. Параметры потоков электронов и протонов

Дата, декабрь 2006	z , км	LT	p , $10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Предполагаемый тип частиц
6	87	18:10—18:50	2.5	электроны
7	78	02:30—04:00	0.5	протоны
9	81	03:00—03:40	0.7	протоны
	84	19:20—19:50	1.7	электроны
10	81	03:40—04:20	1.5	протоны
14	72	20:00—20:30	0.9	протоны
15	78	17:10—17:50	4.5	электроны
21	84	21:00—22:20	4.1	электроны

электронов на 50—150 % и более длительностью в десятки—сотни минут.

5. В возмущенные дни после прохождения УСТ характерное увеличение значений концентрации электронов начиналось примерно на 10—50 мин раньше, чем в невозмущенные дни.

6. Наличие квазипериодических вариаций значений $N(z, t)$ с примерным периодом $T \approx \approx 60$ мин и амплитудой более 100 % в светлое время суток.

Характерной для среднеширотной нижней ионосферы особенностью рассматриваемых экспериментов оказалось то, что как во время МБ, так и в течение нескольких дней после них эпизодически регистрировались аномально высокие значения концентрации электронов в течение десятков минут. Такие явления не наблюдались нами в невозмущенных условиях.

Наблюдаемое в период магнитной бури увеличение N , как отмечалось выше, может быть вызвано ионизацией ионосферной плазмы в D-области средних широт потоками высыпающихся из магнитосфера энергичных заряженных частиц. В пользу гипотезы о высыпании заряженных частиц в среднеширотную ионосферу говорит и тот факт, что ранее [35, 37] мы неоднократно визуально наблюдали (в основном в ночные часы) во время магнитных бурь (например, в марте и апреле 2001 г., в октябре 2003 г., в апреле, июле и ноябре 2004 г., в январе и августе 2005 г.) характерное свечение атмосферы типа «полярного сияния» (имеются фотоснимки таких явлений) длительностью 20—60 мин.

Кроме того (см. [1, 2, 13, 16, 19, 23—25, 29—31, 35—37, 41—44]), в настоящее время

известно, что во время магнитных бурь и в течение примерно 5—14 дней после них высыпающиеся из радиационных поясов электроны с энергией $\epsilon \geq 40$ кэВ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт 45—60°. В этот период существенную роль в качестве источника ионизации в средних широтах играют также высокоэнергичные протоны. Роль корпуксуллярной ионизации среднеширотной D-области ионосферы подтверждена экспериментально: электроны и протоны могут играть заметную роль в ионизации нижней ионосферы на высотах 50—100 км ночью и в периоды возмущений различной природы естественного (солнечные вспышки, магнитные бури, грозы, солнечный терминатор, сильные землетрясения и т. д.) и искусственного характера (мощные взрывы, старты ракет, работа мощных нагревных стендов в радиочастотном диапазоне, излучение высоковольтных линий электропередач и т. д.).

Выше было отмечено, что как в утренние, так и в вечерние часы прохождения УСТ и ВСТ сопровождались квазипериодическими вариациями $N(z, t)$ почти во всех экспериментах. Величина возмущений концентрации — сотни процентов (в возмущенных условиях величина возмущений, как правило, в несколько раз больше, чем в невозмущенных). Характерно, что значения отношения скоростей ионизации в возмущенных и невозмущенных условиях q/q_0 при этом достаточно большие, они составляют для рассмотренных экспериментов $q/q_0 = 5\dots 46$. Причина таких изменений концентрации электронов пока неясна. Обусловлено это малой изученностью и большой сложностью процессов в этой части ионосферной плазмы. Естественно, что они связаны с изменением термодинамического режима. Но при этом совершенно не изучена роль волновых процессов и высыпаний высокоэнергичных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время рассмотренных периодов наблюдений в невозмущенных условиях и во время магнитных бурь в высотно-временных вариациях концентрации электронов установлены следующие основные особенности.

1. В невозмущенные дни высотно-временные вариации концентрации электронов соответствовали типичным невозмущенным условиям с отчетливо выраженной зависимостью $N(z, \chi)$.

2. В дни во время магнитных бурь отчетливо прослеживалась зависимость $N(z, \chi)$. Значения $N(z)$ при этом превышали соответствующие значения концентрации электронов в невозмущенные дни.

3. Наблюдаемое в период магнитной бури увеличение N может быть вызвано ионизацией ионосферной плазмы в D-области средних широт потоками высыпающихся из магнитосфера энергичных заряженных частиц.

4. Характерно, что в период МБ интенсивные ЧО-сигналы ($s = 10\ldots70$) наблюдались в области высот $z < 72$ км. В обычных невозмущенных условиях ЧО-сигналы с $s > 1$ на нашей аппаратуре в этом пункте наблюдений регистрируются редко с высот менее 72 км, что обусловлено малыми значениями концентрации электронов в этой области высот. Ионизация в этот период времени, по-видимому, в значительной мере контролировалась потоками высыпающихся протонов, которые были достаточно высокими. Оценки потоков, выполненные на основе экспериментальных данных, показали, что плотность потоков высыпающихся частиц была достаточно высокой и составляла $p \sim 10^7\ldots10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

5. Наличие квазипериодических вариаций $N(z, t)$ с примерным периодом $T \approx 60$ мин в светлое время суток в возмущенные дни. Возмущения N составляли 50—100 % и более.

6. В возмущенные дни после прохождения утреннего солнечного терминатора характерное увеличение значений концентрации электронов начиналось примерно на 10—50 мин раньше, чем в невозмущенные дни.

7. В период прохождения вечернего солнечного терминатора в возмущенные дни за десятки минут до момента его прохождения наблюдались существенные квазипериодические изменения $N(z, t)$. ВСТ сопровождался квазипериодическими вариациями $N(z, t)$ почти во всех экспериментах. Периоды таких вариаций, как правило, $T \approx 30\ldots50$ мин, длительность процесса — несколько часов, величина возмущений концентрации — сотни процентов. В период МБ величина возмущений, как правило, в несколько раз больше, чем в невозмущенных.

8. В периоды МБ и в ряде экспериментов после МБ в темное время суток почти во всей D-области ионосферы эпизодически регистрировались ЧО-сигналы с $s > 1\ldots10$, и наблюдалась эпизодические и квазипериодические вариации $N(z, t)$ до порядка величины в течение десятков — сотен минут с $T \approx 40\ldots50$ мин. Вероятно, такие возмущения $N(z, t)$ вызваны потоками высыпающихся заряженных частиц. Оценки потоков показали, что плотность потоков высыпающихся частиц была $p \sim 10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Автор благодарит А. И. Гритчина за помощь в экспериментах, К. П. Гармаша за программу расчета профилей концентрации электронов.

1. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Гришкевич Л. В. Ночная ионизация D-области ионосферы умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия.—1980.—20, № 3.—С. 547—548.
2. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гришкевич Л. В., Иванов В. А. Результаты измерений электронной концентрации в D-области ионосферы во время ионосферных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика.—1975.—18, № 8.—С. 1094—1097.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
4. Гармаш К. П. Регуляция обратной задачи в методе частичных отражений // Вестн. Харьк. госу-та. Радиофизика и электроника.—1991.—№ 355.—С. 61—64.
5. Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флуктуации магнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 3.—С. 253—264.
6. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Генерация и распространение электромагнитных волн, связанных с вариациями проводимости // Тез. докл. всесоюз. семинара «Распространение радиоволн в ионосфере». — М.: Радио и связь, 1989.—С. 70.
7. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Влияние вихревой компоненты низкочастотного электрического поля, генерируемого при нагреве ионосферы мощным радиоизлучением, на параметры взаимодействия волна-частица // Тез. докл. Междунар. симп. «Спутниковые исследования ионосферных и магнитосферных процессов» (Москва, 11—13 декабря 1995 г.). — М.: ИЗМИРАН, 1995.—С. 30—31.
8. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.
9. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной космической плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники.—1998.—№ 6.—

- С. 17—40.
10. Гармаш К. П., Шварцбург А. Б., Черногор Л. Ф. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением // Компьютерная оптика.—1988.—№ 6.—С. 62—71.
 11. Гоков А. М. К вопросу о реакции среднеширотной D-области ионосферы на удаленные сильные землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—31.—№ 4.—С. 532—536.
 12. Гоков А. М., Гритчин А. И. Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиошумов // Геомагнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 2.—С. 169—172.
 13. Гоков А. М., Гритчин А. И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Косм. исслед.—1996.—34, № 6.—С. 585—589.
 14. Гоков А. М., Пивень Л. А., Федоренко Ю. П. К определению электронной концентрации D-области ионосферы по амплитудным измерениям частично отраженных сигналов // Радиотехника.—1990.—Вып. 93.—С. 108—111.
 15. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Некоторые особенности динамики нижней ионосферы, обусловленные солнечным терминатором // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники.—2002.—№ 12.—С. 26—32.
 16. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события SPE // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 86—90.
 17. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Экспериментальные исследования методом частичных отражений отклика среднеширотной D-области ионосферы на удаленные старты и полеты космических аппаратов // Геомагнетизм и аэрономия.—2006.—46, № 5.—С. 690—697.
 18. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период магнитной бури 7—11 ноября 2004 г., обусловленные утренним солнечным терминатором // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 5/6.—С. 69—78.
 19. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации электронной концентрации в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 5/6.—С. 12—21.
 20. Григорьев Г. И. Акусто-гравитационные волны в атмосфере (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика.—1999.—42, № 1.—С. 3—24.
 21. Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестн. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника.—1988.—№ 318.—С. 21—24.
 22. Данилов А. Д. Популярная аэрономия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—230 с.
 23. Кнут Р., Вюрцберг И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэрономия.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
 24. Кнут Р., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1977.—17, № 5.—С. 854—861.
 25. Лаштовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпуксуллярного происхождения // Геомагнетизм и аэрономия.—1976.—16, № 6.—С. 1018—1025.
 26. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1988.—192 с.
 27. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.
 28. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 3.—С. 59—106.
 29. Belrose J. S., Thomas L. Ionization changes in the middle latitude D region associated with geomagnetic storms // J. Atmos. and Terr. Phys.—1968.—30.—Р. 1397—1413.
 30. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—3, № 2.—С. 191—197.
 31. Danilov A. D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron.—2001.—2, N 3.—Р. 209—224.
 32. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Experimental investigations of strong thunderstorms having effects on the middle latitude ionospheric D-region parameters // Telecommunications and Radio Engineering.—1999.—53, N 7-8.—Р. 6—12.
 33. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Experimental investigations of electron density variations in the middle latitude ionospheric D-region during remote strong earthquakes // Telecommunications and Radio Engineering.—2001.—55, N 5.—Р. 8—15.
 34. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Some features of lower ionosphere dynamics caused by the morning solar terminator // J. Atmos. Electricity.—2002.—22, N 1.—Р. 13—21.
 35. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Middle latitude ionospheric d-region responses to solar events as investigated by partial reflection technique // Telecommunications and Radio Engineering.—2003.—59, N 3 & 4.—Р. 114—134.
 36. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Experimental investigations of the middle latitude ionospheric D-region reaction to geomagnetic sudden storm commencements // J. Atmos. Electricity.—2003.—23, N 1.—Р. 21—29.
 37. Gokov A. M., Tyrnov O. F. The ionospheric D-region over Kharkiv during the 14—24 April 2002 magnetic storm // Telecommunications and Radio Engineering.—2005.—63, N 1.—Р. 63—74.
 38. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A4.—Р. 5771—5792.
 39. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. — New York: Springer, 1978.—366 p.
 40. Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere. middle atmosphere and troposphere // J.

- Atmos. and Terr. Phys.—1996.—58.—P. 831—843.
41. Lauter E. A. The post-storm ionization in the upper mesosphere. // J. Meteorol.—1977.—N 6.—P. 67—73.
42. Lauter E. A., Knuth R. Precipitation of high energy particles into the upper atmosphere at medium latitudes after magnetic storm // J. Atmos. and Terr. Phys.—1967.—29.—P. 411—417.
43. Peter W. B., Chevalier M. W., Inan U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—2006.—111. A03301, doi: 1029/2005JA011346.—P. 1—14.
44. Potemra T. A., Zmuda A. J. Precipitating energetic electrons as an ionization source in the midlatitude nighttime D region // J. Geophys. Res.—1970.—75, N 34.—P. 7161—7166.
45. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turkish J. Phys.—1994.—18.—P. 1260—1265.

SOME FEATURES OF THE ELECTRON DENSITY VARIATIONS IN THE IONOSPHERIC D-REGION NEAR KHARKOV DURING THE MAGNETIC STORM PERIOD IN DECEMBER 2006

A. M. Gokov

We investigated some changes of the electron density in the middle latitude ionospheric D-region during a magnetic storm in December 2006 using the partial reflection method. The response of D-region is considered at the beginning and at the end of the storm. Our results are compared with ones obtained in December 2006 before and after the magnetic storm in the undisturbed conditions. We revealed a quasi-periodic increase of electron density in the D-region of more than 50—100 % with periods $T \approx 30$ —60 min during tens of minutes. The ionization rate is estimated. On the basis of the experimental data on electron density changes over the electron and proton precipitation periods corresponding fluxes are found.