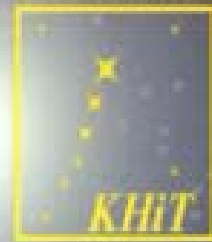


КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ISSN 1561-8889



НАЦІОНАЛЬНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ



ТОМ 13

№ 6

2007

В НОМЕРІ:

- Космічні шиб та апарати
- Дослідження навколишнього космічного простору

UDC 530.388: 531.510.535

А. М. Гогов

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.

Надійшло до редакції 29.02.2007

Експериментальне за допомогою мережі частотних радіотехнічних дальнометрів зміни концентрації електронів у середньширотній D-області іоносфери в грудні 2006 р. під час магнітної бури. Розглянуто вплив D-області на попитку та в кінці бури. Проведено порівняння із результатами, отриманими в грудні до і після магнітної бури в небурних умовах. Вказано експериментальне збільшення електронної концентрації в D-області іоносфери протягом декількох годин після початку на 30–100 % з періодами $T \approx 30$ –60 хв. Оцінено зміни амплітуди іонізації. За експериментальними даними встановлено особливі характеристики потоку заряджених частинок.

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 околоземной плазме, которые, кроме общих закономерностей, имеют особенности, влияющие соответственно характерные изменения ионосферных параметров. Исследования влияния магнитных бурь на околоземную плазму являются детальной 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, высвобождением 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. Высвобождающиеся из равноионных пучков энергичные электроны с энергией $\epsilon \geq 40$ кэВ являются существенным источником дополнительной ионизации среднширотной 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 ($z = 55...75$ км) и могут вызывать заметное изменение ионизации в этой части ионосферы [3, 16, 22, 27, 30]. Однако есть большие трудности измерения потоков высматриваемых заряженных частиц на средних широтах и получении правильных оценок их энергетического вклада на высотах $z < 90-100$ 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 имеет 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 запоздалостью 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 $G = 50$, исследуемый диапазон высот 60—126 км.

СВЕДЕНИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Измерения амплитуд ЧО-сигналов и радиошумов выполнялись 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 (N — число солнечных витов,

Таблица 1. Сведения об экспериментах

Дата, декабрь 2006	Время наблюдений (UTC)	Время LT: FOT и MCT для $z = 40$ км	A_p (солнечный)	F_{min}	n
5	16:30—24:00	06:52 16:46	3	102	59
6	00:30—24:00	06:53 16:47	26	103	44
7	00:30—23:59	06:54 16:47	25	96	48
8	00:07—24:00	06:57 16:47	25	96	32
9	00:07—24:00	06:56 16:47	7	92	13
10	00:00—09:10	06:57 16:47	14	90	23
14	10:21—24:00	07:01 16:47	63	93	23
15	00:00—24:00	07:02 16:47	104	87	19
16	00:03—16:38	07:03 16:47	11	82	20
19	17:08—23:37	07:05 16:46	14	73	0
20	00:00—24:00	07:06 16:46	24	72	0
21	00:00—24:00	07:06 16:47	14	72	0
22	00:00—19:39	07:07 16:47	14	73	0

$F_{\text{св.т}}$ — поток радионезлучения на длине волны $\lambda = 10,7$ см).

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Во время эксперимента регистрировалась высотнo-временные зависимости амплитуд смеси частично отраженного сигнала и радиопшума $A_{\text{св.т}}(z, t)$ (где t — время, индекс «о» и «с» соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 22 высотных уровней, начиная с 60 км через $\Delta z = 3$ км. Измерения $A_{\text{св.т}}(z, t)$ и $A_{\text{св.т}}(f)$ выполнялись непрерывными сеансами длительностью с половиной-десятью часов. Для выделения амплитуд частично отраженных сигналов $A_{\text{св.т}}(z, t)$ записывались также амплитуды только радиопшума $A_{\text{св.т}}(f)$ (две выборки в полсе частот 50 кГц) в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин интенсивностей ЧО-сигнала ($A_{\text{св.т}}^{\text{с}}(z, t)$) и шумов ($A_{\text{св.т}}^{\text{ш}}(f)$) осуществлялись по 600 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. Вычислялись высотнo-временные зависимости $(A_{\text{св.т}}^{\text{с}})(z, t)$ и $(A_{\text{св.т}}^{\text{ш}})(f)$. Для анализа допустительно применялось их сглаживание методом скользящего среднего на интервалах 10–30 мин со сдвигом 1–5 мин.

По полученным $(A_{\text{св.т}}^{\text{с}})(z)$ 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 $n(z)$ частот столкновений электронов с нейтральными молекулами [39]. Уточнение профилей $N(z)$ проводилось по методике [14]: высотные профили $R_{\text{св.т}}$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5$ и 10 мин, после чего проводилось их высотное сглаживание по трем точкам. Полученные таким образом зависимости $(R(z))$ использовались для получения профилей $N(z)$. Погрешность вычисленной профилей $N(z)$ на интервалах усреднения в 10 или 5 мин не превышала 30 и 50 % соответственно.

Для оценки периодов достаточно медленных вариаций $(A_{\text{св.т}}^{\text{с}})(z, t)$ или концентрации электронов $N(z, t)$ использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье на интервале времени 32, 64 или 128 мин. Временной ряд при этом образован из ежесекундных значений $A_{\text{св.т}}^{\text{с}}(z, t)$, $A_{\text{св.т}}^{\text{ш}}(z, t)$ и $A_{\text{св.т}}^{\text{ш}}(f)$. Анализировались высотнo-временные вариации полученных зависимостей $(A_{\text{св.т}}^{\text{с}})(z, t)$, $(A_{\text{св.т}}^{\text{ш}})(f)$ 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://wdcswwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dsdir/index.html>]).

Сильной магнитной бурей 14–15 декабря проявлялись 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): X9/2b 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 M2.0/1n ($I = 0.370$ Дж/м²) и затем оставалась очень низкой до 12 декабря включительно. В этот период проявились 31 слабая (класса C), четыре умеренных (класса M) и две сильные (класса X) рентгеновских вспышек. Геоэффективными были только отмеченные выше.

Геомагнитное поле изменялось от спокойного 5 декабря до слабо возмущенного состояния

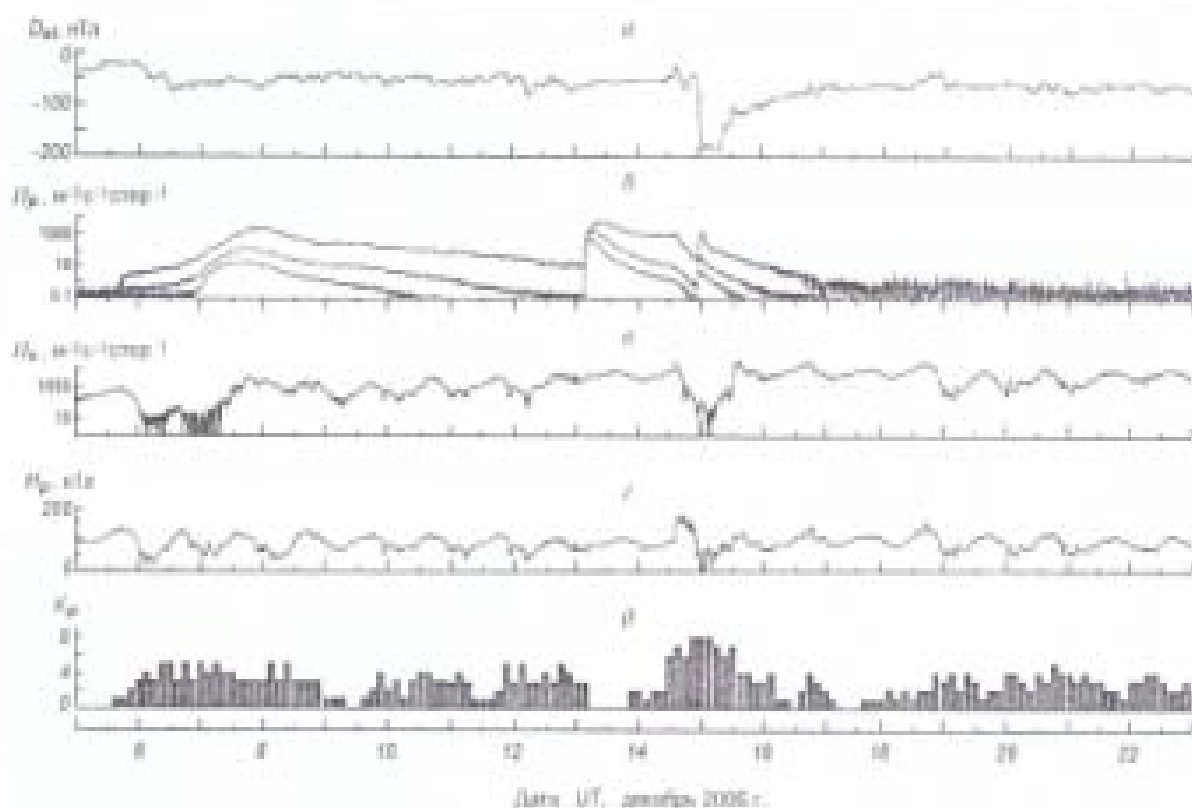


Рис. 1. Параметры космической погоды в декабре 2006 г. в период магнитных бурь: *a* — индекс геомагнитной активности D_{st} ; *b* — усреднение за 3 мин потоков протонов 10, 30 и 100 МэВ (частиц/см²·с·ср), измеренные на спутнике GOES-8 (875); *c* — потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; *d* — усреднение за 3 мин значения H -составляющей геомагнитного поля на экваторе на спутнике GOES-12; *e* — значения геомагнитного индекса K_p .

6 декабря, после чего оставалось спокойным с небольшими возмущенными периодами (вариации 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 X9/2p 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_x -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 на рис. 1, *a*, потоки высокоэнергичных электронов уменьшались более чем на два порядка).

Увеличение потоков протонов с энергиями более 10 и более 100 МэВ было обусловлено протонной вспышкой X9.0/2p 5 декабря. Потоки с энергией более 10 МэВ сильно увеличились начиная с 15:55 UT 6 декабря, достигли максимального значения 1980 pfu 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 pfu 7 декабря в 16:10 UT. Впоследствии в течение 7–9 декабря потоки плавно уменьшались до невозмущенных значений.

Потоки электронов с энергиями более 2 МэВ, измеренные на спутниках GOES-8 и 12, в течение 7–10 декабря были повышенными по сравнению с невозмущенными. 6 декабря и в начале суток 7 декабря потоки высокоэнергичных электронов, как видно на рис. 1, *c*, сильно флуктуировали.

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

Солнечная активность 13–15 декабря возросла до высокой вследствие очень сильной вспышки X3/4b ($U = 0.519$ Дж/м²) в области видимой части Солнца 930, которая породила сложные

Таблица 2. Сведения о сильных вспышках на Солнце

Дата, время UT	LT	T _{max}	Максимальный класс	Максимальный класс размысленно	
				247 МГц	297 МГц
3	12:24—12:18(max)—13:00	X9.0/Z6	0.710	210000	12000
6	10:02—10:24(max)—11:18	M6.0/M	0.140	350	340
6	20:29—20:47(max)—22:25	X6.5/Z6	0.480	30000	5000
7	20:41—21:03(max)—22:59	M2.0/1+	0.170	65	2600
13	04:20—04:34(max)—04:18	X3.4/4b	0.210	100000	44000
14	23:07—00:13(max)—00:21	X1.5/M	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 ($I = 0.12$ Дж/м²). 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_p уменьшились в течение нескольких часов в конце суток 14 декабря и в первой половине 15 декабря от $-40...-50$ (14 декабря) до $-185...-187$ нТл в 06:00—08:00 UT с последующим плавным увеличением значений D_p . К концу суток они составили $D_p = -95...-105$ 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, в, 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 рфв 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 рфв 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 уменьшались до фоновых.

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

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

Солнечная активность в течение 15—17 декабря уменьшалась 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_p изменялись 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 высыпавшихся электронов различных энергий, измеренные на спутниках GEOS-8 и GEOS-12 (<http://www.scc.powa.gov/>), в этот период оставались еще высокими (что, по-видимому, характерно для после бурового 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.

День, декабрь 2006	Поток протонов, $10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$			Поток электронов, $10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$
	$< 10 \text{ МэВ}$	$> 10 \text{ МэВ}$	$> 100 \text{ МэВ}$	$> 2 \text{ МэВ}$
3	14	0.77	0.053	29
6	28	8.8	0.13	1.4
7	2400	670	9.8	78
8	7000	600	3.1	180
9	1200	180	0.55	50
10	660	86	0.097	100
11	220	25	0.029	120
12	310	8.9	0.030	220
12	440	270	18	480
14	4300	100	0.92	670
15	2200	22	0.36	540
16	140	1.3	0.034	1000
17	100	0.37	0.028	670
18	180	0.21	0.028	1100
19	130	0.22	0.029	270
20	110	0.13	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.ksc.nasa.gov/>).

Как известно [5], индекс D_s описывает степень возмущения геомагнитного поля, и тем самым — интенсивность магнитных бурь. В период МБ 14–15 декабря индексы магнитной активности A_{max} и K_{max} составляли 107 и 8 соответственно. По одной из классификаций рассматриваемая магнитная буря относится к сильной или очень сильной [28]. Энергия E_m и мощность P_m таких магнитных бурь составляют около $6.5 \cdot 10^{11}$ Дж и $7.5 \cdot 10^7$ Вт соответственно. Величину E_m удобно оценивать по минимальному значению D_{min} [28, 38]:

$$E_m = \frac{3}{2} E_m \frac{D_{min}^2}{R_0^2},$$

где $E_m = 8 \cdot 10^7$ Дж — энергия дипольного геомагнитного поля у поверхности Земли, $R_0 = 30 \text{ МэВ}$ — значение индукции геомагнитного поля на экваторе; скорректированное значение $D_{min}^2 = D_{min}^2 - b r^{1.2} + c$. Здесь $b = 0.5 \text{ нТл} / (\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2})^{1/2}$, $c = 20 \text{ нТл}$, $r = N_p m_p v_{sw}$, N_p и m_p — концентрация и масса протонов, v_{sw} — скорость солнечного ветра. Энергия магнитной бури, оцениваемая по этой

формуле, при значении $D_{min}^2 = 187 \text{ нТл}$ составила $5.7 \cdot 10^{11}$ Дж, максимальная мощность (15 декабря) — $5.5 \cdot 10^7$ Вт ($M = 3$).

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 прохождения 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) выразились особенностями 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/шумов составляло $\kappa(z, t) = (K_{min}^2(z, t) / (K_{min}^2(t))) = 1$. Высота-временные вариации концентрации электронов $N(z, t)$ соответствовали типичным значениям для невозмущенных земных 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 $\kappa = 10$ –1000 в высотном диапазоне 72–90 км. Характерно, что в ночное время довольно часто, как видно на рис. 3, $\kappa = 10$ –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 азимутного угла Солнца χ). Характерно также то, что в темное время суток, как видно на 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 $\kappa = 10$ –100 в высотном диапазоне 60–90 км (см. рис. 3).

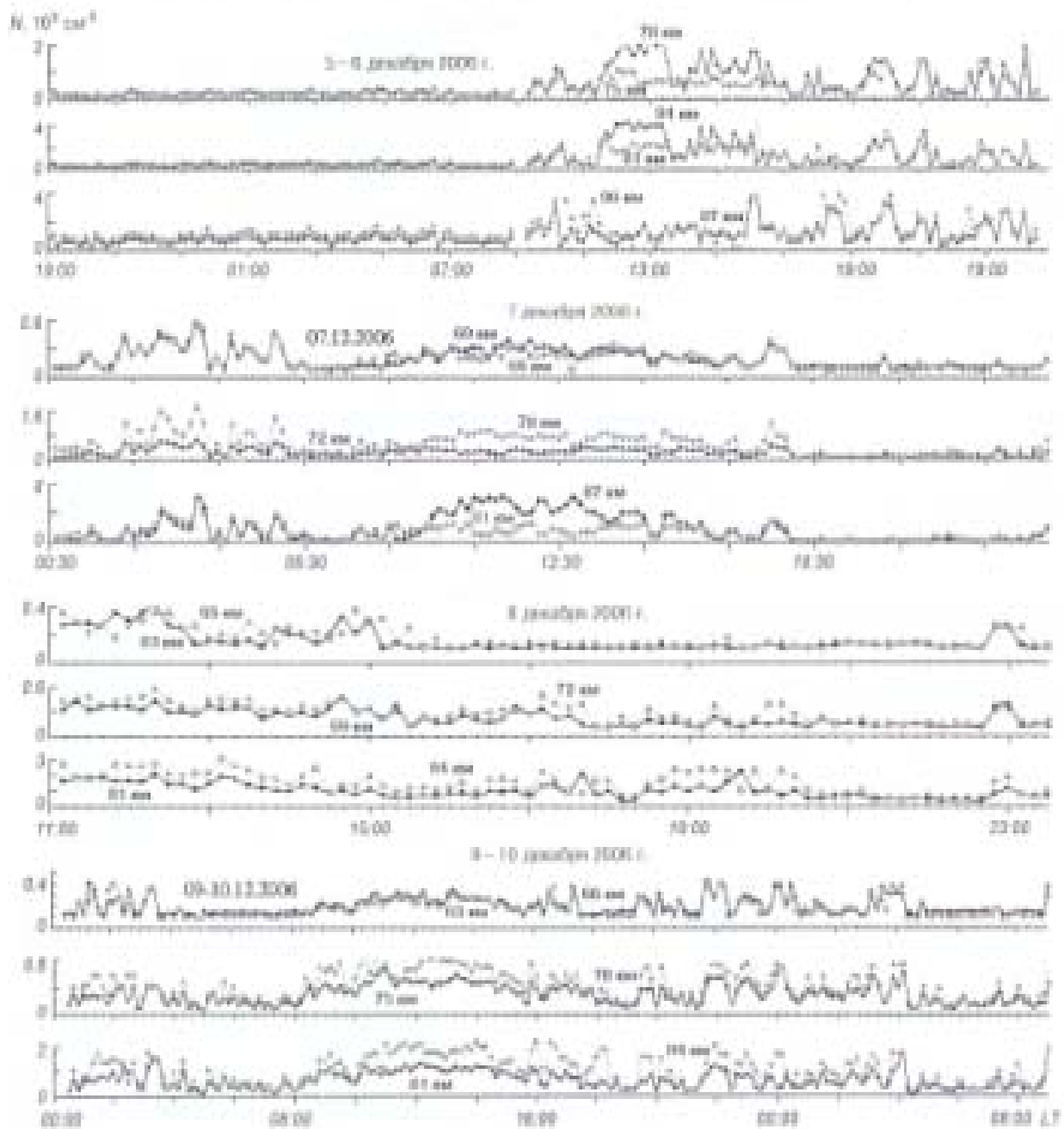


Рис. 2. Вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в среднеширотной D-области ионосферы 5–10 декабря 2006 г.

Характерно, что интенсивные ЧО-сигналы ($\lambda = 10–70$) наблюдались в области высот $z \leq 70$ км. В обычных невозмущенных условиях ЧО-сигналы с $\lambda > 1$ на нашей аппаратуре в этом пункте наблюдений регистрируются редко с высот 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 $\lambda > 1–10$. Эти два факта свидетельствуют о том, что в эти сутки конста-

ция в D-области, по-видимому, частично контролировалась потоками высвобождаемых протонов (по крайней мере — на высотах ниже 80 км, что не противоречит известным положениям [3, 22] по физике и химии ионосферы), которые, как отмечено выше, были обусловлены вспышкой X9/2h 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

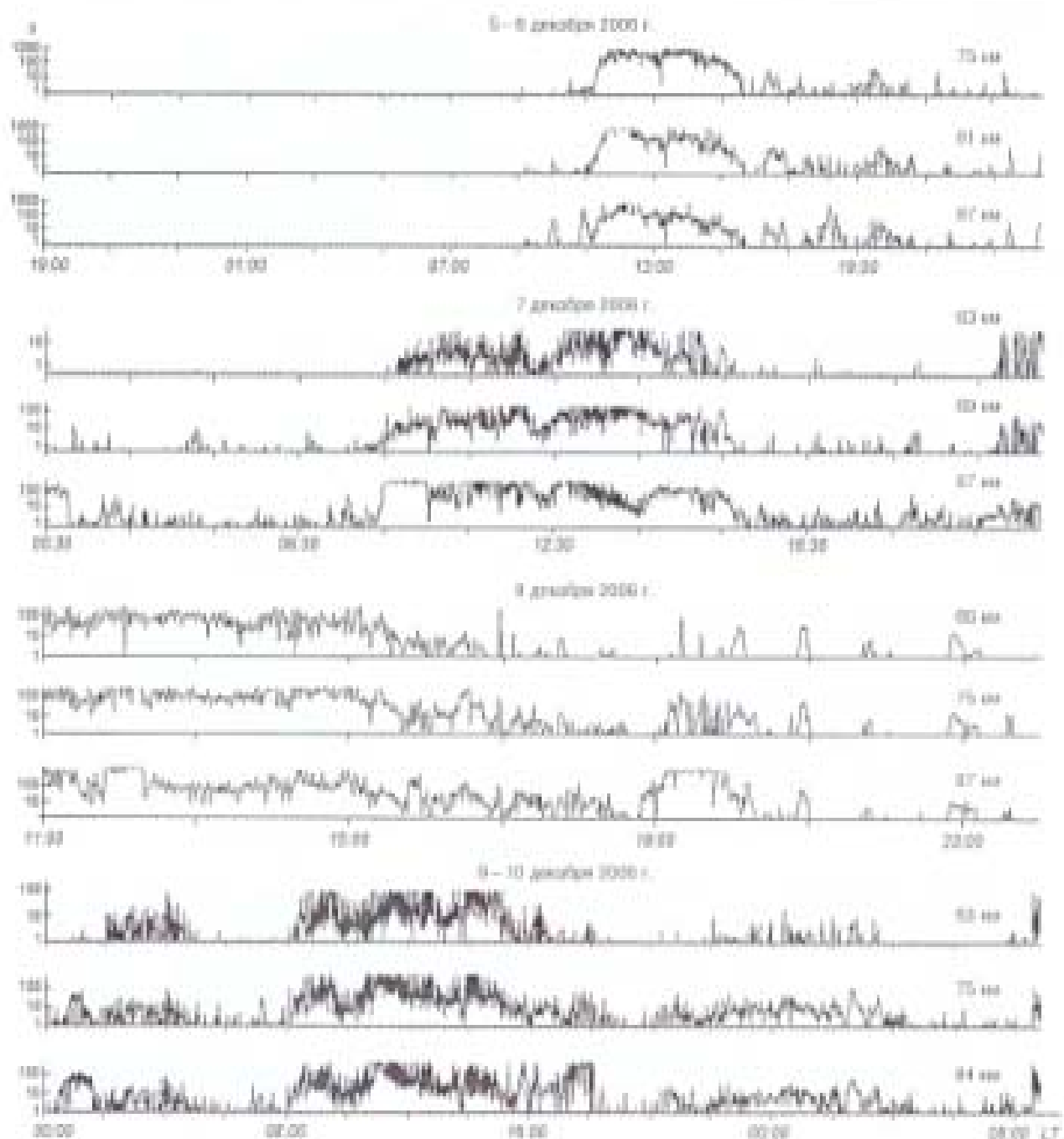


Рис. 3. Высота-временные вариации отношения $(N(z, t) - (N_{\text{min}}^2(z)) / (N_{\text{max}}^2(z))) \cdot 10^{12}$ электр./см³ в экспериментах 5–10 декабря 2009 г.

(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 же 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 отмече-

но выше, ионизация в D-области, по-видимому, частично контролировалась потоками высыпавшихся 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 α составляли 1–2, и отдельные значения концентрации электронов не удалось получить. После 10:30 LT и в течение всего светлого времени суток $\alpha = 10$ –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 $\alpha(z, t)$ сравнительно плавно уменьшались до $\alpha = 0.5$ –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 α вновь увеличивались до $\alpha = 10$ –300. Отметим, что такое поведение α 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 $\alpha = 10$ –80 в течение 15–30 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 $\alpha = 10$ –80), по-видимому, связано с кратковременным высвобождением заряженных частиц (как отмечалось выше, потоки протонов были еще очень высокими).

Рассмотрим далее кратко особенности вариаций $\alpha(z, t)$ 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 $\alpha = 10$ –500 на высотах 63–87 км. В темное время суток как утром (9 и 10 декабря), так и вечером отношение α составляет 1–50 в течение нескольких часов (рис. 3). В эти периоды имели место квазипериодические вариации $N(z, t)$ с амплитудой более 100 %, периодом $T = 40$ –50 мин и длительностью 1–3 периода. Характерно, что в утреннее время имело место $\alpha < 1$ (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 $\alpha \geq 1$.

В период прохождения ВСТ и в течение десятков минут после него значения $\alpha(z, t)$, как и в предыдущие сутки, сравнительно плавно уменьшались до $\alpha = 0.5$ –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 α увеличивались до $\alpha = 10$ –50). Отметим, что такое поведение $\alpha(z, t)$ не характерно для измерений на нашей аппаратуре (да и вообще для наблюдений в среднеширотной D-области ионосферы), поскольку, как правило, в темные часы в невозмущенных условиях концентрация электронов намного меньше, чем в светлое время суток. Вследствие этого уровень ЧО-сигналов мал по сравнению с уровнем рэпозумов, 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 высвобождения низкоэнергетичных частиц после рассмотренной выше МВ, которые могли быть ионизированы 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. Следные результаты получены нами и в других экспериментах. В работах [12, 18, 34] мы высказали предположение, что столь большое увеличение N вызвано высвобождением частиц из магнитосферы. Высвобождение может возникнуть в результате перераспределения захваченных частиц по итчи-углам, к чему приводят либо искривления конфигурации силовых линий поля (геомагнитных локонгов), либо уменьшение «поперечной» энергии ϵ_{\perp} заряженных частиц. Кроме того, в процессе становления и релаксации возмущений тензора проводимости ионосферной плазмы поле поляризации E_z обладает и вихревым компонентом E_{ϕ} . Последний механизм рассмотрен в работах [6, 7, 9, 10]. При прохождении терминатора возможны существенные изменения тензора проводимости ионосферной плазмы и вариации составляющих

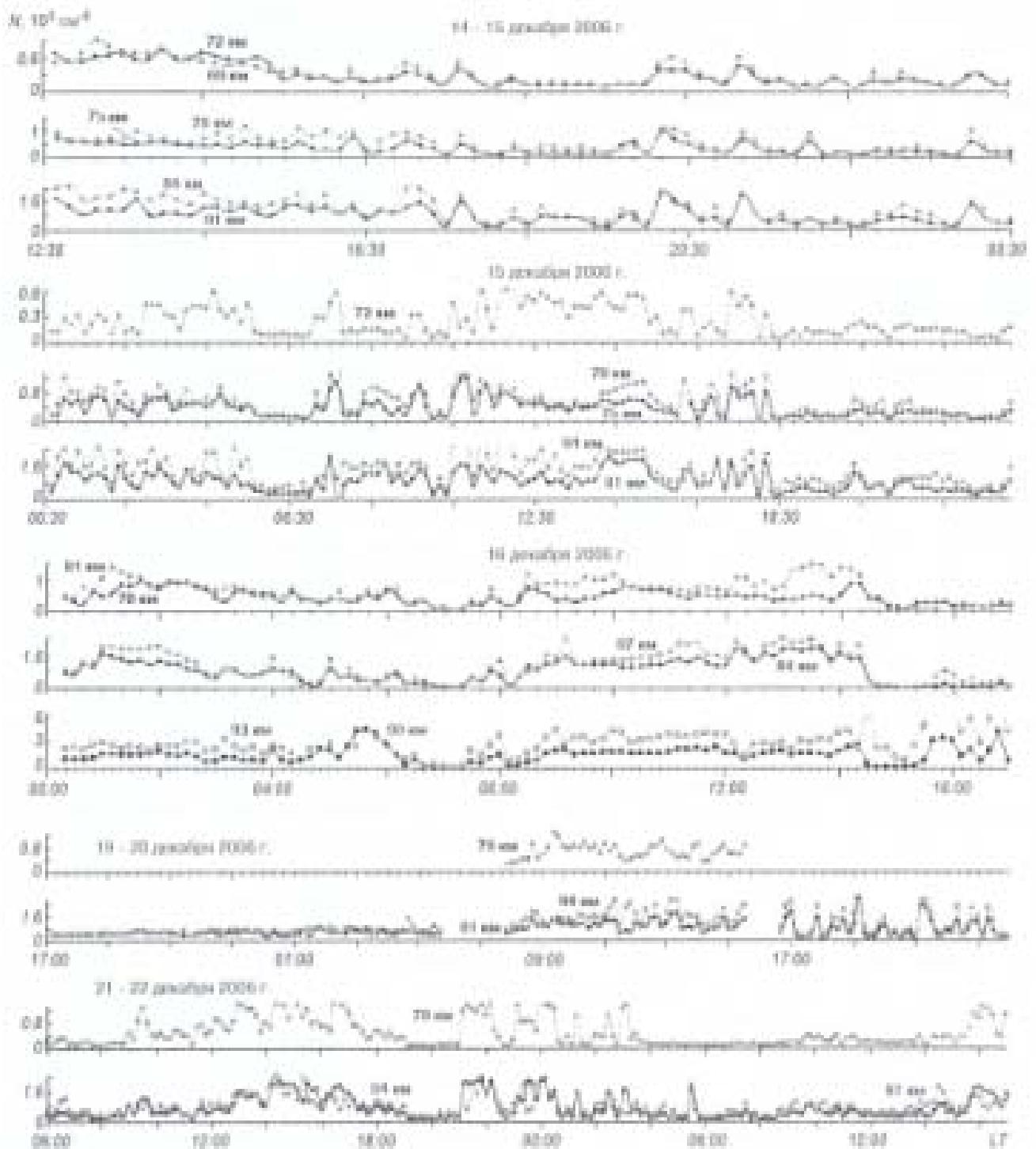


Рис. 4. То же, что на рис. 2 для 14–15 и 19–22 декабря 2005 г.

электрического поля E_z и E_x , а значит и ϵ_z . Основные звенья механизма стимуляции высыпаний электронов могут быть следующие. ВСТ вызывает уменьшение концентрации электронов на высотах литано-область. 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 понижению нейтральных частиц на высотах 80–95 км. Для обеспечения

наблюдаемого увеличения N согласно расчетам [15, 30, 34] требуется поток электронов с плотностью $p \sim 10^7 \dots 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Такие значения p не представляются большими. Отметим, что как и в предыдущих экспериментах, в этот день отчетливо прослеживалась зависимость N от z .

В эксперименте 14 декабря в светлое время интенсивные ЧО-сигналы регистрировались в интервале высот 69–87 км ($z = 1 \dots 1000$). Характерно, что ЧО-сигналы нечелси (или были меньше уровня шумов) за десятки минут до или сразу же после времени прохождения ВСТ (рис. 5). В темное время суток $z = 0.1 \dots 1$, эпизодически $z = 1 \dots 70$. Как и в предыдущих экспериментах, в дневное время отчетливо прослеживалась зависимость N от z (пример высотво-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 $T = 60$ 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), 236(1), 444(2), 88(3) с, мощность двигателей — 1–10 ГВт, энерговыделение — не менее 1 ТДж. После старта КА через $\Delta t = 10$ (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 среднелатитной 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 вызвать 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 новых удаленных землетрясений и сильных гроз [11, 32, 33]. Возмущения концентрации электронов через 45–90 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]. Оценка плотности потоков электронов для рассматриваемого эксперимента для высоты 84 км дает $p = 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, 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 ($z = 1 \dots 200$, 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 $z < 1$ (т. е. случай, когда ЧО-сигналы почти отсутствовали) примерно за 40–20 мин до момента прохождения УСТ. На высотах 84–87 км $z > 1$ примерно за 20 мин до прохождения УСТ и впоследствии $z \geq 1$ 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 $T = 60$ мин и амплитудой более 100 %. Возможной причиной таких вариаций могут быть высыпания захваченных частиц, однако остается неясным механизм стимуляции высыпаний.

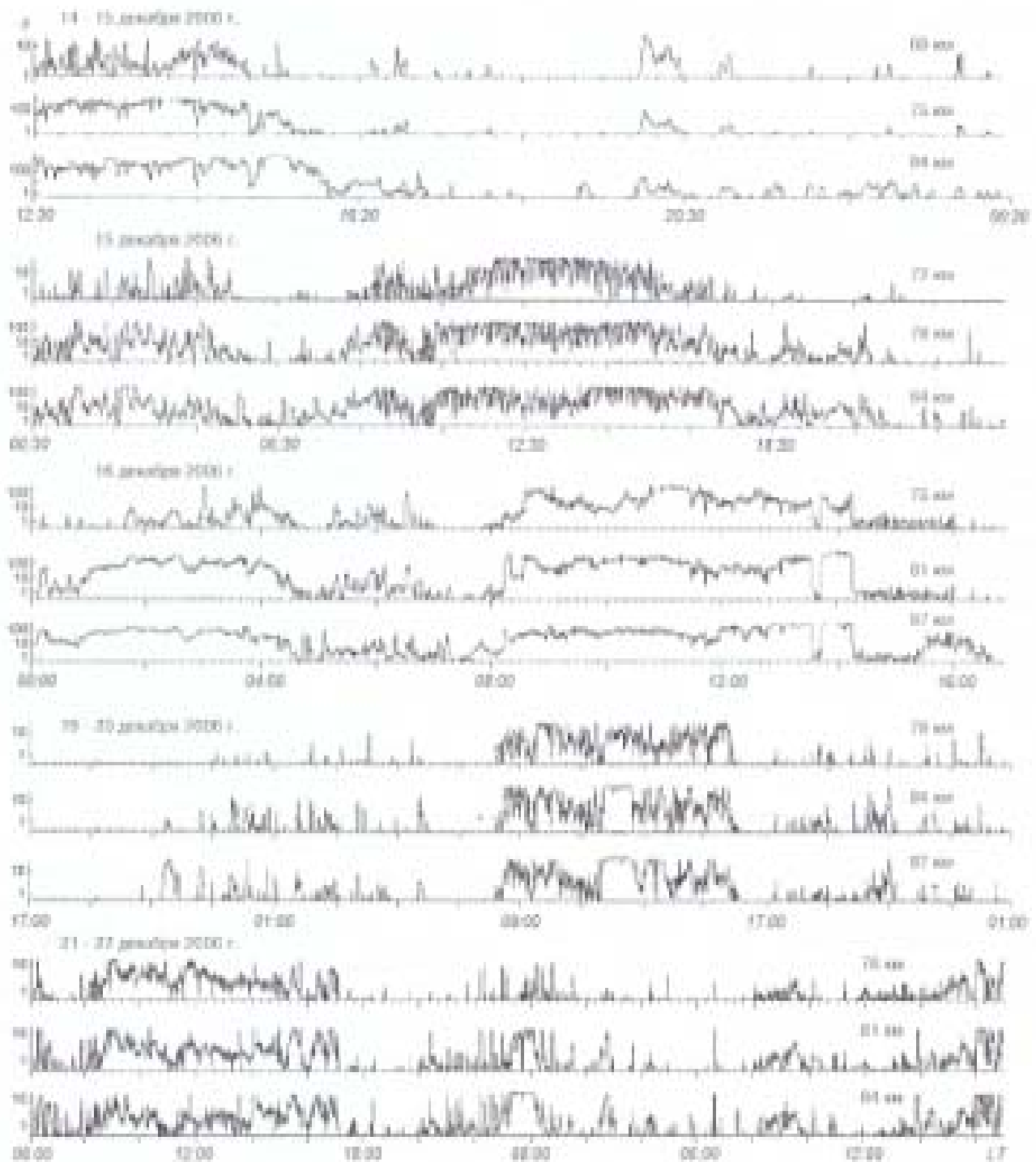


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для 14–16 и 19–22 декабря 2006 г.

В течение примерно 4,5 ч после прохождения ВСТ в интервале высот 75–87 км $z = 1–50$, и концентрация электронов была повышенной по сравнению с типичными возмущенными условиями для этого времени года (вариации $N(z, f)$ носили, как видно из рис. 4, квазипериодический характер с примерным периодом $T = 40–45$ мин), что не является типичным для возмущений

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 $n(z, f)$ и $N(z, f)$ в этот день было обусловлено высыпанием заряженных частиц из магнитосферы после МП. Высыпание электронов на магнитосферу могли быть

стимулированы прохождением солнечного термистатора. Потoki электронов, как видно из рис. 1, сильно выросли и флуктуировали, 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 $n(z, t)$ 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 $n(z, t)$ 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 $n(z, t) < 1$. В эксперименте 16 декабря в ночные и утренние часы $n(z, t) \geq 1$ 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 $n(z, t)$ 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 λ 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 $n(z, t) < 1$, эпизодически длительностью 10–20 мин $\lambda = 1...15$ (в эти периоды регистрировались всплески-увеличения концентрации электронов на 50–100 %). 21–22 декабря в интервале времени примерно 22:00–01:10 LT $\lambda = 1...50$ и

значения концентрации электронов превышали типичные фоновые значения примерно в 1.5–3 раза. Такие вариации $N(z, t)$, по-видимому, были обусловлены эпизодическими высываниями 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 оценены энергетические характеристики потоков электронов. Результаты расчетов приведены в табл. 4. Результаты расчетов показывают, что наблюдаемые вариации N в ионосфере могут быть вызваны потоками электронов и протонов с $\rho = 10^7...10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. 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 ρ 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 следующим.

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

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

3. В рассмотренных экспериментах характерные существенные вариации $n(z, t)$ 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, $T = 30\text{--}40$ мин; величина возмущенной концентрации — сотни процентов. В период МБ такие вариации были более выраженными, чем в невозмущенные дни.

4. В темное время суток в период МБ и в течение нескольких дней после нее эпизодически наблюдалось увеличение концентрации

Таблица 4. Параметры потоков электронов и протонов

Дни, январь-апрель	α , %	Δt	β , $\frac{A_{e, p}}{A_{e, p, 0}}$	Преобладающий тип частиц
6	87	18:10—18:50	2.5	электроны
7	79	01:30—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	79	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—30 мин раньше, чем в невозмущенные дни.

6. Наличие квазипериодических вариаций значений $N(z, t)$ с примерным периодом $T = 60$ 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 эмпирически регистрировались аномально высокие значения концентрации электронов в течение десятков минут. Такие явления не наблюдались ни при невозмущенных условиях.

Наблюдаемое в период магнитной бури увеличение N , как отмечалось выше, может быть вызвано повышенной ионосферной плазмой в D-области средних широт потоками высылающимися из магнитосферы 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 высылающиеся из радиационных поясов электроны с энергией $\epsilon \geq 40$ кэВ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт $45\text{--}60^\circ$. В этот период существенную роль в качестве источника ионизации в средних широтах играют также высокоэнергетичные протоны. Роль корпускулярной 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 вариации, старты ракет, работа мощных нагревных стелсов 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 сопровождалась квазипериодическими вариациями $N(z, t)$ почти во всех экспериментах. Величина возмущенной 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 $q/q_0 = 5\text{--}46$. 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 возмущенные дни высотво-временные вариации концентрации электронов соответствовали типичным возмущенным условиям с отчетливо выраженной зависимостью $N(z, t)$.

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

3. Наблюдаемое в период магнитной бури увеличение N может быть вызвано повышенной ионосферной плазмой в D-области средних широт потоками высвобождаемых из магнитосферы эвергентных заряженных частиц.

4. Характерно, что в период МБ интенсивные ЧО-сигналы ($t = 10...70$) наблюдались в области высот $z < 72$ км. В обычных возмущенных условиях ЧО-сигналы с $t > 1$ на нашей аппаратуре в этом пункте наблюдений регистрируются редко с высот менее 72 км, что обусловлено малыми значениями концентрации электронов в этой области высот. Изменения в этот период времени, по-видимому, в значительной мере контролировались потоками высвобождаемых протонов, которые были достаточно высокими. Оценки потоков, выполненные на основе экспериментальных данных, показали, что плотность потоков высвобождаемых частиц была достаточно высокой и составляла $p = 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

5. Наличие квазипериодических вариаций $N(z, t)$ с примерным периодом $T = 60$ мин в светлое время суток в возмущенные дни. Возмущения N составляли 30–100 % 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, $T = 30 - 50$ 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 квазипериодически регистрировались ЧО-сигналы с $t > 1 - 10$, и наблюдались квазипериодические и квазипериодические вариации $N(z, t)$ по порядку величин в течение десятков — сотен минут с $T = 40 - 50$ мин. Вероятно, такие возмущения $N(z, t)$ вызваны потоками высвобождаемых заряженных частиц. Оценки потоков показали, что плотность потоков высвобождаемых частиц была $p = 10^7 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

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

1. Исмаилов В. В., Бендаштов Е. А., Валери В. Д., Гривин Д. В. Потоки ионизации D-области ионосферы умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавтика—1980—20, № 3—С. 547–548.
2. Исмаилов В. В., Бендаштов Е. А., Гривин Д. В., Панаев В. А. Результаты измерений электронной концентрации в D-области ионосферы во время ионосферных помех // Изв. вузов. Радиофизика—1975—18, № 4.—С. 1054–1067.
3. Кравцов Б. Г., Намсалаев А. А. Физика ионосферы.— М.: Наука, 1988.—528 с.
4. Гармаз К. П. Результаты обратной задачи в методе частотных срезов // Вестн. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника—1991—№ 213—С. 61–64.
5. Гармаз К. П., Дикростов С. В., Пазара Е. А., Чернотор Д. Ф. Физические механизмы ионизации ионосферы в период большой геомагнитной бури 1999 г. // Геомагнетизм и аэронавтика—2003—8, № 2.—С. 253–264.
6. Гармаз К. П., Чернотор Д. Ф. Генерация и распространение эвстремальных волн, связанных с вариациями проводимости // Тез. докл. всесоюз. семинара «Распространение радиоволн в ионосфере».— М.: Радиотехника, 1989.—С. 70.
7. Гармаз К. П., Чернотор Д. Ф. Влияние ионной концентрации на частотность электрического поля, генерируемого при нагреве ионосферы мощным радиополем, на параметры когерентности волн-частиц // Тез. докл. Междунар. совещ. «Современные исследования ионосферных и магнитосферных явлений» (Москва, 11–13 декабря 1985 г.).— М.: ИВМРАН, 1985.—С. 30–31.
8. Гармаз К. П., Чернотор Д. Ф. Профиль электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частотных срезов // Геомагнетизм и аэронавтика—1986—26, № 2.—С. 75–81.
9. Гармаз К. П., Чернотор Д. Ф. Эффекты в ионизированной ионосферной плазме, стимулированные когерентным маломощным радиополем // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи теории, радиоэлектроника—1998—№ 6—

- С. 17–40.
10. Гарман К. П., Шарыбур А. Б., Чернов Д. Ф. Влияние ионной крупномасштабной возмущенности в ионосфере, инициируемая мощным неоднородным радиоизлучением // *Космические лучи*.—1988.—№ 6.—С. 62–71.
 11. Гокон А. М. К вопросу о реакции среднелатитной D-области ионосферы на удаленные сильные возмущения // *Геомагнетизм и аэронавтика*.—2001.—31.—№ 4.—С. 532–536.
 12. Гокон А. М., Гринин А. Н. Влияние солнечного терминатора на среднелатитную D-область ионосферы и характеристики частотно-отраженных СВ-сигналов в радиопуть // *Геомагнетизм и аэронавтика*.—1994.—34, № 2.—С. 169–172.
 13. Гокон А. М., Гринин А. Н. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // *Косм. исслед.*—1996.—34, № 4.—С. 282–289.
 14. Гокон А. М., Пинев Л. А., Федорова Ю. П. К определению электронной концентрации D-области ионосферы по амплитудным измерениям частотно-отраженных сигналов // *Радиотехника*.—1990.—Вып. 93.—С. 108–111.
 15. Гокон А. М., Турнов О. Ф. Некоторые особенности динамики нижней ионосферы, обусловленные солнечным терминатором // *Заруб. радиотехника. Ученые труды, радиотехника*.—2002.—№ 12.—С. 26–32.
 16. Гокон А. М., Турнов О. Ф. Отклик среднелатитной D-области ионосферы на протонные события SEP // *Космич. науки и техника. Доклады*.—2003.—9, № 2.—С. 86–90.
 17. Гокон А. М., Турнов О. Ф. Экспериментальные исследования методов частотной отстройки отклика среднелатитной D-области ионосферы на удаленные старты и остановки космических аппаратов // *Геомагнетизм и аэронавтика*.—2006.—48, № 2.—С. 690–697.
 18. Гокон А. М., Турнов О. Ф. Вариации концентрации электронов в среднелатитной D-области ионосферы в период магнитной бури 7–11 ноября 2004 г., обусловленные ударом солнечным терминатором // *Космич. науки и техника*.—2006.—12, № 3/4.—С. 69–76.
 19. Гокон А. М., Чернов Д. Ф. Вариации электронной концентрации в среднелатитной D-области ионосферы во время магнитных бурь // *Космич. науки и техника*.—2005.—11, № 3/4.—С. 12–21.
 20. Гринин А. Н. Акустико-гравитационные волны в атмосфере (Обзор) // *Изв. вузов. Радиотехника*.—1999.—42, № 1.—С. 3–24.
 21. Гринин А. Н., Диринга В. Л., Козырева Л. Г. и др. Стандартный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частотной отстройки // *Вестн. Караг. ун-та. Радиотехника и электроника*.—1988.—№ 318.—С. 21–24.
 22. Давидов А. Д. *Популярная астрономия*. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—230 с.
 23. Карт Р., Шарыбур Н. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // *Геомагнетизм и аэронавтика*.—1976.—16, № 4.—С. 666–673.
 24. Карт Р., Федорова Ю. Н. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Выделение энергичных частиц во время बहुлобразного возмущения среднелатитной D-области ионосферы // *Геомагнетизм и аэронавтика*.—1977.—17, № 5.—С. 854–861.
 25. Лаптевская М., Федорова Ю. Н. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Избыток среднелатитной ионосферной возмущенности крупнопериодом приходящими // *Геомагнетизм и аэронавтика*.—1978.—18, № 6.—С. 1018–1025.
 26. Лашин В. Б., Мальцев Ю. П. *Малыгосферно-ионосферное взаимодействие*. — М.: Наука, 1985.—192 с.
 27. Митра А. *Воздействие солнечной активности на ионосферу Земли*. — М.: Мир, 1977.—270 с.
 28. Чернов Д. Ф. Физика Земли, атмосферы и ионосферы в свете системы парадигмы // *Радиотехника и радиостроение*.—2002.—4, № 2.—С. 24–106.
 29. Reine J. S., Thomas L. Ionization changes in the middle latitude D region associated with geomagnetic storms // *J. Atmos. and Terr. Phys.*—1968.—30.—P. 1397–1413.
 30. Schenaga I. F., Garman K. P., Kuznetsov V. T. New parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // *Радиотехника и радиостроение*.—1995.—3, № 2.—С. 191–197.
 31. Danilov A. D., Lashin V. B. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Int. J. Geomagn. Aeron.*—2001.—2, № 3.—P. 209–224.
 32. Gokan A. M., Turnov O. F. Experimental investigations of strong thunderstorms having effects on the middle latitude ionospheric D-region parameters // *Telecommunications and Radio Engineering*.—1999.—59, № 7–8.—P. 6–12.
 33. Gokan A. M., Turnov O. F. Experimental investigations of electron density variations in the middle latitude ionospheric D-region during remote strong earthquakes // *Telecommunications and Radio Engineering*.—2001.—59, № 5.—P. 8–15.
 34. Gokan A. M., Turnov O. F. Some features of lower ionosphere dynamics caused by the morning solar terminator // *J. Atmos. Electricity*.—2002.—22, № 1.—P. 13–21.
 35. Gokan A. M., Turnov O. F. Middle latitude ionospheric E-region responses to solar events as investigated by partial reflection technique // *Telecommunications and Radio Engineering*.—2001.—59, № 3 & 4.—P. 114–134.
 36. Gokan A. M., Turnov O. F. Experimental investigations of the middle latitude ionospheric D-region reaction to geomagnetic sudden storm commencement // *J. Atmos. Electricity*.—2003.—23, № 1.—P. 21–29.
 37. Gokan A. M., Turnov O. F. The ionospheric D-region over Kharkiv during the 14–24 April 2002 magnetic storm // *Telecommunications and Radio Engineering*.—2005.—63, № 1.—P. 63–74.
 38. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.*—1984.—89, № A4.—P. 5771–5792.
 39. Garriott A. V. *Nonlinear phenomena in the ionosphere*. — New York: Springer, 1978.—266 p.
 40. Lashin V. B. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere // *J.*

- Atmos. and Terr. Phys.—1996.—58.—P. 831—843.
41. Luster E. A. The post-storm ionization in the upper mesosphere. // *J. Meteorol.*—1977.—N 6.—P. 67—73.
42. Luster E. A., Knuth R. Precipitation of high energy particles into the upper atmosphere at medium latitudes after magnetic storm // *J. Atmos. and Terr. Phys.*—1987.—29.—P. 411—417.
43. Peter W. B., Chevalier M. W., Iran U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*—2006.—111. A03301, doi: 10.29/2005JA011346.—P. 1—14.
44. Piomta T. A., Zmuda A. J. Precipitating energetic electrons as an ionization source in the midlatitude night-time D region // *J. Geophys. Res.*—1970.—75, N 34.—P. 7161—7166.
45. Тирнов О. Ф., Гармаш К. П., Голков А. М., 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. Golov

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 30–100 %, with periods $T = 20–60$ 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.