

УДК 550.388; 520.16+523.31+523.9:520.86

А. М. Гоков, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь

Надійшло до редакції 11.11.2004

Наведено результати експериментальних досліджень методом часткових відбиттів варіацій концентрації електронів у середньовиротній D-області іоносфери під час одинадцяти магнітних бурь. Розглянуто відгук D-області на початку та в кінці бурь. 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

Есть три основных вида солнечного излучения, которые влияют на процессы в атмосфере Земли и приводят к вариациям космической погоды: рентгеновское излучение, протоны с энергией 1–100 МэВ и низкоэнергичная плазма [10, 11]. Солнечные вспышки, сопровождающиеся увеличением интенсивности оптического, рентгеновского и корпускулярного излучений, и выбросы корональной массы формируют состояние космической погоды. Обычно они обуславливают геокосмические бури. Геокосмическая буря представляет собой совокупность магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь [16]. Известно, что приход солнечного ударного фронта, который сопровождают, как правило, внезапные геомагнитные начала *ssc*, вызывает в первый момент усиление выпадания магнитосферных заряженных частиц, которые после *ssc* быстро перемешиваются с вторгающейся из межпланетного пространства магнитосферной плазмой. Это солнечное плазменное облако затем является причиной второй фазы геомагнитной бури, во время которой возможно распространение аномальных явлений в ионосфере (ионосферной бури) до средних широт. В настоящее время уже не вызывает

сомнений, что во время магнитных бурь и в течение примерно 5–14 сут после них выпадающие из радиационных поясов энергичные электроны с энергией $\epsilon \geq 40$ кэВ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт 45–60° [9–11, 21, 28]. В этот период существенную роль в качестве источника ионизации в средних широтах играют также высокоэнергичные протоны. Роль корпускулярной ионизации среднеширотной D-области ионосферы подтверждена экспериментально [1, 3–5, 7–13, 16, 18–24, 26–28]. 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.).

Исследование влияния геокосмических бурь на околоземную плазму является актуальной проблемой ввиду большого научного и прикладного значения. Каждая геокосмическая буря является уникальной и сопровождается комплексом явлений в

околосемной плазме. Кроме общих закономерностей, буре присущи индивидуальные особенности. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на геокосмические бури носит сложный и неоднозначный характер. Известные результаты экспериментов пока не позволяют выявить многие особенности отклика и построить их физико-математические модели. Поэтому есть необходимость продолжения экспериментальных исследований и накопления сведений для изучения упомянутой проблемы.

Целью настоящей работы является изложение результатов экспериментальных исследований методом частичных отражений вариаций концентрации электронов $N(z)$ в среднеширотной D-области ионосферы во время одиннадцати магнитных бурь. Рассмотрен отклик D-области на начало и окончание бури.

ТЕХНИКА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Экспериментальные исследования выполнены в 2003 г. методом частичных отражений (ЧО) [17] при помощи комплекса аппаратуры [29] вблизи г. Харькова в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Ее координаты следующие: возвышение над уровнем моря $h = 156$ м, географические широта и долгота — $49^{\circ}38' N$, $36^{\circ}20' E$, геомагнитные широта и долгота — 45.37° и 118.7° соответственно, магнитное склонение — $66^{\circ}36.8'$, магнитное склонение — $6^{\circ}19.6'$ (W), $L \approx 2.0$. Для анализа из банка экспериментальных данных университета были отобраны регистрации ЧО-сигналов, полученные в период магнитных бурь. Сведения об экспериментах приведены в табл. 1. Информация о геомагнитных данных взята на сайте по URL: www://solar.sec.noaa.gov.

Таблица 1. Сведения об экспериментах

Дата, 2003 г.	A_p	K_p	Время измерений, ЦТ
31 марта	31	33346644	11.43—22.33
27 мая	26	44334345	07.31—24.00
28 мая	36	65554444	00.00—07.41
29 мая	89	54436788	22.36—24.00
30 мая	49	84434545	00.00—24.00
31 мая	17	55313322	00.00—12.20
17 сентября	61	55577445	01.52—21.00
15 октября	42	34764444	04.14—20.40
29 октября	189	43987798	10.51—21.50
30 октября	162	87655899	07.38—24.00
31 октября—01 ноября	93	87766544	00.00—13.00 (01 ноября)

Основные параметры комплекса частичных отражений при проведении исследований были следующими: зондирующие частоты $f = 2.21$ и 2.31 МГц, длительность импульсов $\tau = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1$ Гц, импульсная мощность $P = 150$ кВт, коэффициент усиления антенны $G = 40$. Во время эксперимента регистрировались высотно-временные зависимости амплитуд смеси ЧО-сигнала и радишума $A_{\text{mix}}(z, t)$ (где t — время, индексы «о» и «х» соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 14 или 22 высотных уровней, начиная с 45 или 60 км через 3 км. Для выделения амплитуд ЧО-сигналов $A_{\text{ch}}(z, t)$ записывались также амплитуды радишума $A_{\text{rx}}(t)$ (2—6 выборок в полосе частот 50 кГц) в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин интенсивностей ЧО-сигнала $\langle A_{\text{ch}}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{\text{rx}}^2 \rangle$ осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. Вычислялись высотно-временные зависимости $\langle A_{\text{ch}}^2 \rangle(z, t)$ и временные зависимости $\langle A_{\text{rx}}^2 \rangle(t)$. По полученным $\langle A_{\text{ch}}^2 \rangle(z)$ на фиксированных высотах с шагом 3 км находилось их отношение $R(z)$, используемое далее для получения высотных профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения [17] с применением метода регуляризации исходного интегрального уравнения [2]. Профиль частот столкновений электронов с нейтральными молекулами задавался модельным [25]. Погрешность вычислений профилей $N(z)$ на интервалах усреднения в 10 мин не превышала 30 %. Продолжительность измерений $A_{\text{ch}}(z, t)$ и $A_{\text{rx}}(t)$ составляла единицы-десятки часов. Сравнение проводилось с данными, полученными на той же аппаратуре в магнитоспокойные дни (в контрольные дни).

Для оценки периодов медленных вариаций $\langle A_{\text{ch}}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{\text{rx}}^2 \rangle(t)$ и $N(z, t)$ использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Основные данные, характеризующие состояние космической погоды в период рассматриваемых магнитных бурь, приведены на рис. 1; усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/ $\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$), измеренные на спутнике GOES-8 (W75) и электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; кривая H_p получена усреднением за 5 мин H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12. Здесь же приведены значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p и временные изменения индекса D_{st} .

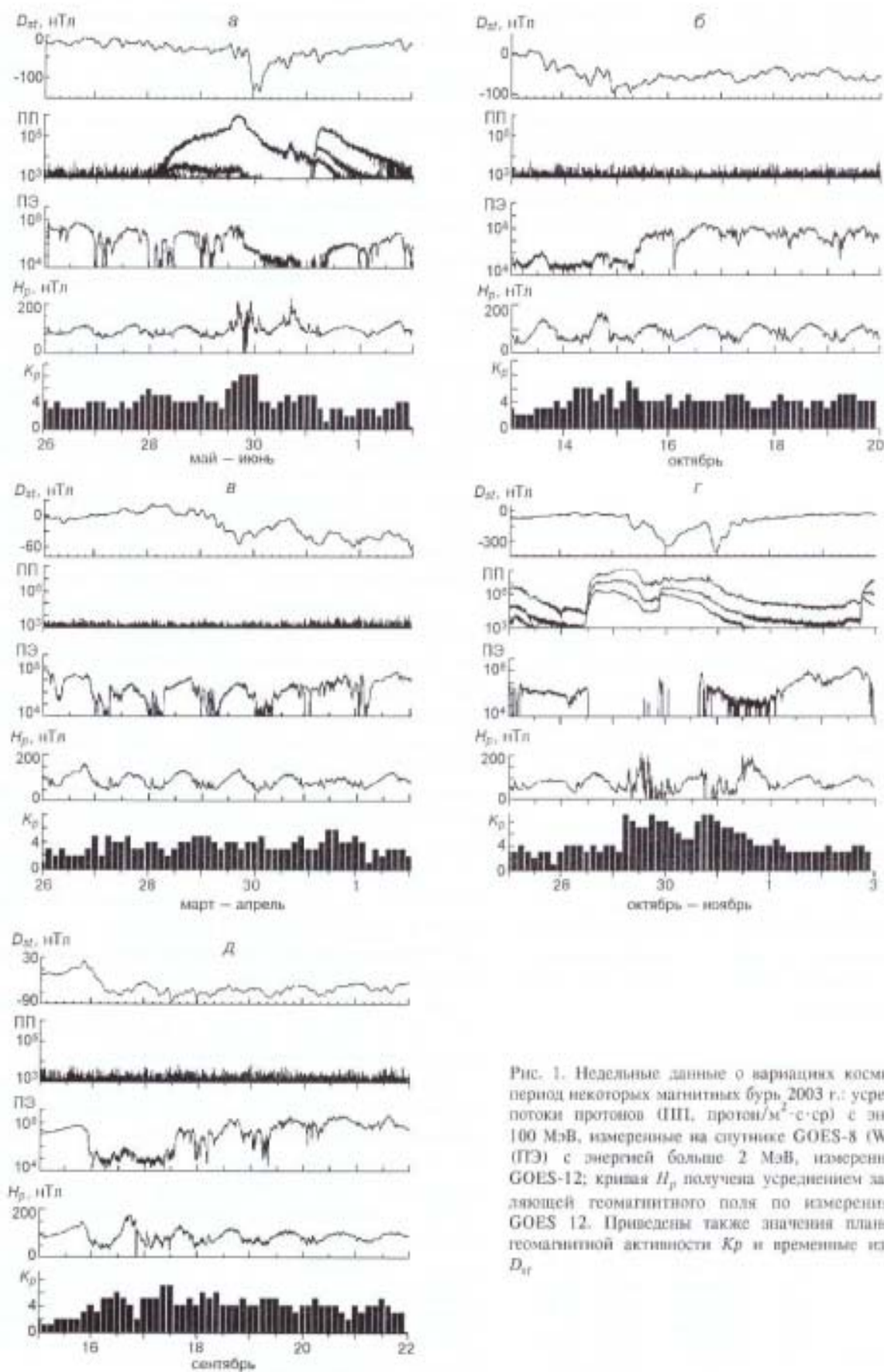


Рис. 1. Недельные данные о вариациях космической погоды в период некоторых магнитных бурь 2003 г.: усредненные за 5 мин потоки протонов (ПП, протон/ $m^2 \cdot c \cdot sr$) с энергией 10, 50 и 100 МэВ, измеренные на спутнике GOES-8 (W75) и электронов (ПЭ) с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; кривая H_p получена усреднением за 5 мин H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES 12. Приведены также значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p и временные изменения индекса D_{st} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В период 27—31 мая 2003 г. была зарегистрирована магнитная буря (см. табл. 1 и рис. 1, а). В этот период времени значения индекса Kp увеличились до 5—8. Их увеличение сопровождалось большими вариациями геомагнитного поля и уменьшением значений индекса D_{st} в интервале значений от -40 до -140 нТл (наибольшие изменения имели место 29—30 мая). Начиная с 28 мая более чем на 2-3 порядка увеличились потоки протонов, которые регистрировались на спутнике и в течение нескольких дней после магнитной бури. Потоки высыпавшихся из магнитосферы электронов носили квазипериодический характер с периодом около суток. 30—31 мая значения потоков электронов уменьшились на 1-2 порядка.

В эксперименте 27—28 мая наблюдения проведены в начале магнитной бури. Отметим основные особенности в поведении $\langle A_{0,z}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{no,z}^2 \rangle(t)$, $R(z, t)$ и $N(z, t)$. Пример изменений $N(z, t)$ на двух высотных уровнях приведен на рис. 2, а. Увеличение индекса Kp почти синхронно сопровождалось заметным ростом интенсивности радишумов, увеличением в единицы-десятки раз интенсивностей ЧО-сигналов, регистрировавшихся с высотных уровней $z \geq 87$ км в ночное время. Отметим, что в невозмущенных условиях в такие периоды времени ЧО-сигналы, как правило, имеют очень малую интенсивность или отсутствуют вообще. Дифференциальное поглощение ЧО-сигналов увеличилось, при этом отмечены существенные квазипериодические изменения $R(z, t)$ в указанном выше высотном интервале с квазипериодом $T \geq 1$ ч. Ниже 87 км и в радишумах особенностей не обнаружено. Дисперсия величины $R(z, t)$ увеличилась в несколько раз. Электронная концентрация в этот период изменялась квазипериодически примерно с тем же периодом, вариации N составляли примерно 100—200 %.

Период основной фазы магнитной бури 29—30 мая (значения индекса Kp увеличились до 8) пришелся на ночное время в пункте наблюдений. Уровень радиопомех в этих измерениях был высоким. Значения N удалось восстановить на высотных уровнях 81 и 84 км (рис. 2, б). Характерным оказалось квазипериодическое, длительностью около 25 мин, увеличение значений N более чем на 100—150 % в интервале времени 22:55—00:05 UT. Квазипериодическое увеличение значений N на 200—500 % после 01:50 UT 30 мая совпало с уменьшением индекса геомагнитной активности и моментом прохождения солнечного терминатора в этой области высот. Поскольку солнечный термина-

тор, как и магнитная буря, может вызывать подобные изменения N на таких высотах [24], то однозначно интерпретировать полученные данные о вариациях N трудно.

Окончание магнитной бури по данным www://solar.sec.noaa.gov сопровождалось отдельным сильным возмущением геомагнитного поля 30 мая в интервале времени 15:00—18:00 UT (см. зависимость $H_p(t)$ на рис. 1, а; при этом индекс Kp увеличился от 3 до 5). В этот период и до окончания магнитной бури наблюдались интенсивные ЧО-сигналы обыкновенной поляризации с высотных уровней 81—87 км. Амплитуды этих сигналов периодически уменьшались в течение десятков минут до невозмущенных значений. Увеличение $\langle A_0^2 \rangle(z, t)$ составляло 100—1000 % и более, значения $R(z, t)$ в этот период уменьшались в несколько раз. Электронная концентрация (рис. 2, б) на этих высотах в течение часа увеличилась на 200—400 % с последующим кратковременным (около 20 мин) восстановлением к невозмущенным условиям и квазипериодическими увеличениями с периодом $T \geq 60$ мин до окончания магнитной бури (вариации N составляли примерно 100—400 %).

Важно отметить, что в эксперименте 31 мая (после магнитной бури) отмеченных выше характерных особенностей не обнаружено, изменения концентрации электронов в интервале высот 81—87 км соответствовали типичным невозмущенным условиям (рис. 2, б).

Перейдем к описанию следующего события.

Эксперимент 31 марта 2003 г. был проведен сразу после окончания главной фазы небольшой магнитной бури, которая началась 27 марта (рис. 1, б). Значения индекса Kp во время магнитной бури увеличились с 2 до 4-5; потоки протонов наблюдались на уровне фоновых значений ($2 \cdot 10^3$ протон \cdot м $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$); потоки электронов, значения которых были повышенными по сравнению с невозмущенными условиями, как и в предыдущем случае, имели квазипериодический характер, их период составлял около суток; значения D_{st} -индекса во время магнитной бури уменьшились примерно до 60 нТл. 31 марта имело место нарушение суточного хода $H_p(t)$ — днем значения H_p уменьшились на 50 нТл.

На рис. 2, в приведены изменения $N(z, t)$, полученные в этом эксперименте. Во время этой магнитной бури в темное время суток с высотных уровней $z \geq 72$ км эпизодически в течение 5—10 мин регистрировались ЧО-сигналы, превышающие уровень радишумов в 2—6 раз (выше было отмечено, что в невозмущенных условиях в такие

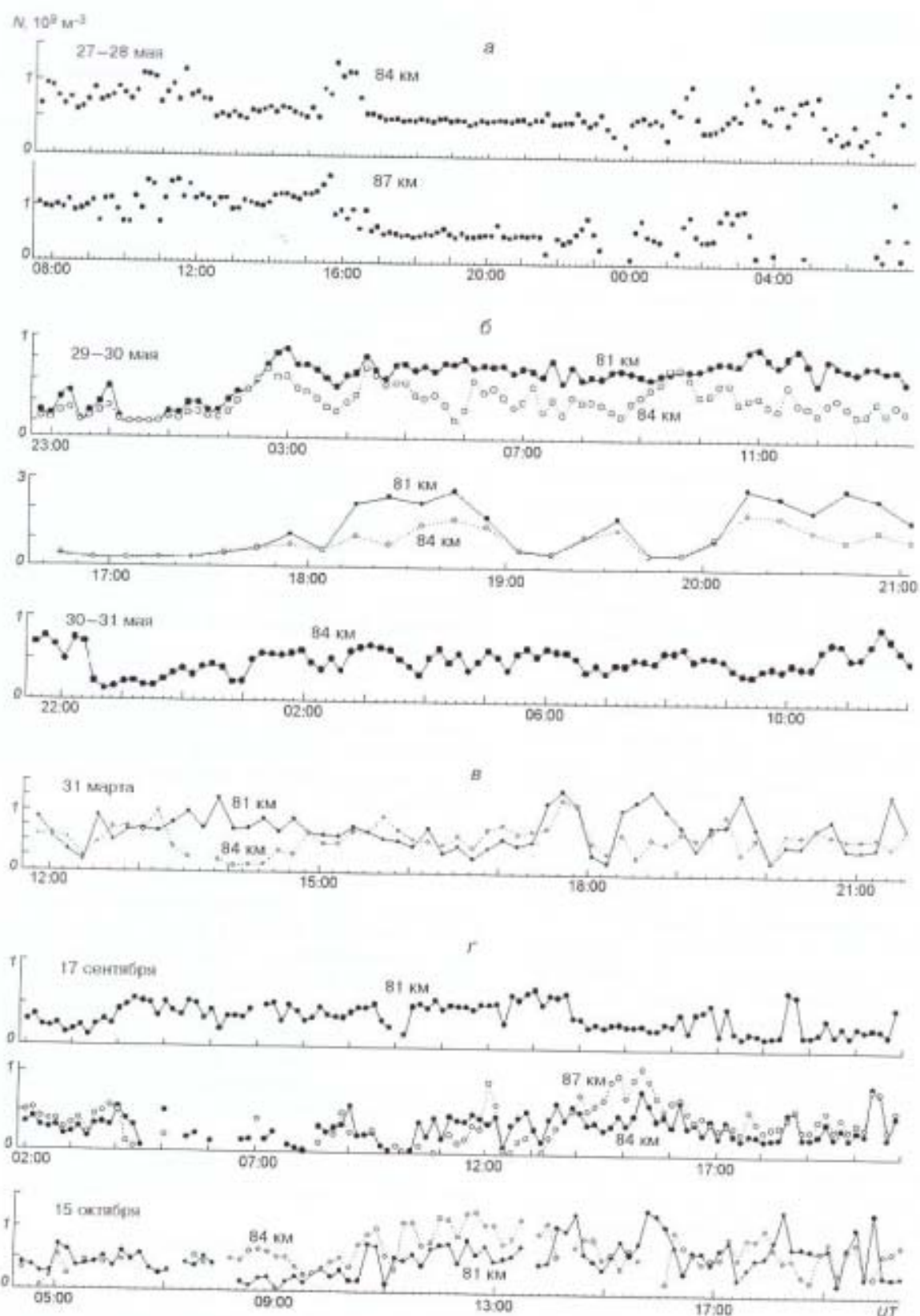


Рис. 2. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы: а, б — в начале и в конце магнитной бури 29—31 мая 2003 г., в, г, з — во время магнитных бурь 31 марта, 17 сентября и 15 октября 2003 г.

периоды времени ЧО-сигналы, как правило, наблюдаются очень малой интенсивности или отсутствуют вообще). Дисперсия отношения $R(z, t)$ при этом увеличилась в несколько раз. Значения N на высотах, меньших 81 км, восстановить не удалось. Оценки показали, что, возможно, имели место кратковременные (порядка 10 мин) увеличения N на 100—150 %. В конце магнитной бури, примерно после 16:30 UT, значения $R(z, t)$ в интервале высот 81—90 км изменялись квазипериодически с периодом $T \geq 60$ мин. Концентрация электронов на этих высотах в это время периодически увеличивалась более чем на 100—150 % с примерным периодом 50—60 мин.

В период магнитных бурь 17 сентября и 15 октября (рис. 1, а, з) отмечены отчетливые квазипериодические вариации $N(z, t)$; в области высот 78—87 км эти изменения составляли 50—150 % (рис. 2, з). Отметим, что во время этих магнитных бурь значения индекса Kp увеличились с 2 до 5—7; потоки протонов наблюдались на уровне фоновых значений; потоки электронов были повышенными по сравнению с невозмущенными условиями, значения D_{st} -индекса во время магнитных бурь уменьшились примерно до -80 нТл.

Рассмотрим кратко результаты, полученные в эксперименте 29—31 октября 2003 г. В этот период зарегистрирована очень сильная магнитная буря (рис. 1, б). Значения индекса Kp увеличились с 2-3 до 8-9, они сопровождались большими (более 100 %) вариациями геомагнитного поля и уменьшением значений индекса D_{st} в интервале значений до -440 нТл. Начиная примерно с 12:00 UT 28 октября более чем на три порядка увеличились потоки протонов, которые регистрировались на спутнике и в течение нескольких дней после магнитной бури. Значения потоков высыпавшихся из магнитосферы электронов во время магнитной бури уменьшились на несколько порядков.

По данным визуальных наблюдений ночью (примерно с 23:20 до 00:40 LT) 29 и 30 октября периодически наблюдались отчетливые полярные сияния, поглощение радиосигналов на частоте 2.31 МГц было высоким (почти полным). Уровень радишумов был низким, ЧО-сигналы от неоднородностей нижней ионосферы почти не наблюдались из-за сильного поглощения (отношение сигнал/помеха было меньше 1). В дневное время поглощение радиоволн также было высоким. После начала магнитной бури 29 октября на высотах $z \geq 75$ км в течение нескольких часов в светлое время суток непрерывно регистрировались отчетливые ЧО-сигналы, превышающие уровень радиопомех в единицы-десятки раз. Отметим, что в

невозмущенных условиях на этой рабочей частоте ЧО-сигналы обычно наблюдаются в интервале высот 80—90 км. В темное время суток, исключая период высокого (полного) поглощения, эпизодически наблюдались ЧО-сигналы не меньшей интенсивности длительностью единицы-десятки минут. Подобное поведение ЧО-сигналов и радишумов имело место и в эксперименте 30 октября. На рис. 3 приведены примеры высотно-временных изменений концентрации электронов в этих экспериментах (отметим, что не во всем интервале наблюдений удалось восстановить значения N с требуемой точностью). На рис. 3, б показаны также изменения $R(z, t)$. Как 29 октября, так и 30 октября электронная концентрация во всей D-области ионосферы изменялась квазипериодически с периодом 30—60 мин. Вариации $N(z, t)$ составляли 50—550 %.

Они могли быть вызваны квазипериодическими пульсирующими высыпаниями высокоэнергичных электронов из радиационных поясов во время магнитной бури. Но более вероятной является модуляция N генерируемыми в процессе магнитной бури акустико-гравитационными волнами, о чем свидетельствует величина квазипериода.

Сходный характер поведения $\langle A_{z, \text{rad}}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{\text{ext, rad}}^2 \rangle(t)$ и $N(z, t)$ имел место и 31 октября.

Заметим, что во время всех описанных экспериментов по данным спутника GOES-8 (W75) (www://solar.sec.noaa.gov) эпизодически наблюдались высыпания электронов и протонов различных энергий.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения средних значений интенсивности шума и ее дисперсии во время рассмотренных событий можно объяснить так. Известно, что шум на частотах порядка 2-3 МГц представляет собой наложение сигналов от радиосредств, работающих в этом диапазоне. Магнитные бури, как показали экспериментальные результаты, сопровождаются увеличением концентрации электронов и поглощения радиосигналов в ионосфере высоких и средних широт. Увеличение поглощения приводит к ослаблению помех, принимаемых как основным, так и боковыми лепестками диаграммы направленности антенной системы радара ЧО, состоящей из ортогональных вертикальных ромбов. Противоположный эффект проявляется при уменьшении значений $N(z, t)$ (такой эффект, но более сильно выраженный, имеет место при прохождении вечернего терминатора).

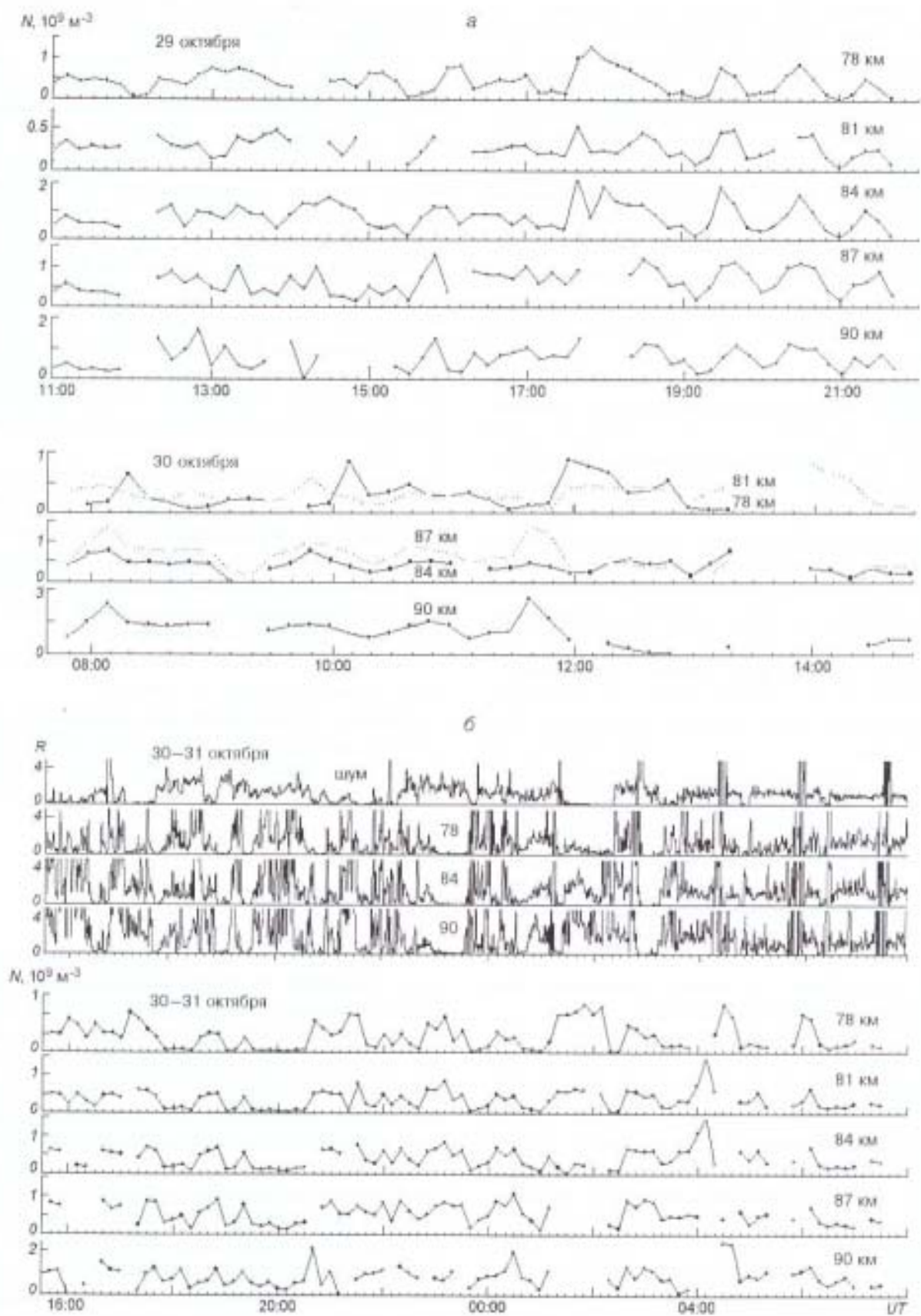


Рис. 3. Высота-временные изменения концентрации N электронов и отношения R средних интенсивностей ЧО-сигналов в период магнитной бури 29–30 октября (а) и 30–31 октября 2003 г. (б)

Для объяснения вариаций средних значений интенсивности ЧО-сигнала и ее дисперсии учтем, что [14]

$$\langle A_{\chi,\sigma}^2 \rangle \propto \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\Omega_{\pm}^2 + \nu^2} \exp(-4K_{\chi,\sigma}),$$

где $\langle \Delta N^2 \rangle$ — интенсивность флуктуаций N , $\Omega_{\pm} = \omega \pm \omega_L$, $\omega_L = 2\pi f_L$, $f_L = f_B \cos \alpha = 1.3$ МГц, f_B — гирочастота электронов, α — угол между вертикалью и вектором индукции геомагнитного поля, ν — частота соударений электронов с нейтралами, $K_{\chi,\sigma}$ — интегральный коэффициент поглощения ЧО-сигнала χ - и σ -поляризаций.

Во время рассмотренных событий происходили следующие процессы:

- 1) вариации N , а значит, и $K_{\chi,\sigma}$;
- 2) значительные вариации $\langle \Delta N^2 \rangle$ (это возможно при сильной турбулизации среды, что может быть вызвано, например, потоками высыпавшихся заряженных частиц).

Эти факторы могут полностью объяснить вариации $\langle A_{\chi,\sigma}^2 \rangle$, обнаруженные экспериментально. Увеличение же дисперсии интенсивностей сигнала свидетельствует о нестационарности процессов, а также о неполном «вычитании» шумов.

Наблюдаемые вариации отношения интенсивностей R и ее дисперсии σ_R^2 могут быть объяснены на основе анализа известной из теории метода ЧО зависимости для R . Поскольку на $z \approx 75...90$ км в D-области ионосферы выполняются условия $\Omega_{\pm}^2 \gg \nu^2$, $\Omega_{\pm}^2 \gg \nu^2$, то

$$R = \frac{\langle A_{\sigma}^2 \rangle}{\langle A_{\chi}^2 \rangle} = \frac{\Omega_{+}^2 + \nu^2}{\Omega_{-}^2 + \nu^2} \exp[-4(K_{\chi} - K_{\sigma})] = \frac{\Omega_{+}^2}{\Omega_{-}^2} \exp[-4(K_{\chi} - K_{\sigma})].$$

При увеличении N увеличивается $K_{\chi,\sigma}$, это приводит к уменьшению R . При уменьшении N (восстановлении к фоновым значениям) уменьшается $K_{\chi,\sigma}$ и увеличивается R . Увеличение σ_R^2 связано с усилением нестационарности среды.

Наблюдаемое в период магнитной бури увеличение N может быть вызвано ионизацией ионосферной плазмы в D-области потоками высыпавшихся из магнитосферы энергичных электронов. Ранее такой механизм использовался для объяснения результатов экспериментальных исследований [4, 6, 9—12, 15, 21, 28].

По методике [19] на основе механизма о выпадении высокоэнергичных частиц оценим параметры их потоков. По величине электронной концентрации в невозмущенных и возмущенных условиях (N_0 и N) оценивались скорости ионизации $q_0 = \alpha_0 N_0^2$, $q = \alpha N^2$, где α_0 и α — соответствующие коэффициенты рекомбинации. Далее методика оценки параметров потока частиц сводится к вычислению величины $\Delta q = q - q_0$. Если пренебречь распределением высыпавшихся частиц по энергиям, которое при наземных наблюдениях неизвестно, то плотность потока мощности частиц равна $\Pi = 2e_i \Delta z \Delta q$, где $e_i \approx 35$ эВ — энергия, затрачиваемая на один акт ионизации, Δz — диапазон высот, где эффективно поглощается поток частиц данной энергии ϵ . Можно полагать, что $\Delta z \approx 10$ км. С другой стороны, параметр Π связан с потоком частиц p : $p = \Pi/\epsilon$. Зная Π , можно оценить мощность и энергию частиц, высыпавшихся на площади S : $P = \Pi S$, $E = P \Delta T$, где ΔT — длительность высыпаний.

При расчетах полагалось, что $S = 10^{14}$ м², $\Delta T = 1200—2400$ с, энергия высыпавшихся электронов $\epsilon > 40$ кэВ. В табл. 2 приведены результаты расчетов параметров потоков заряженных частиц для отдельных характерных периодов во время рассмотренных магнитных бурь. Расчеты показали, что величина потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время магнитных бурь составляла $p = 4 \cdot 10^8—5 \cdot 10^9$ м⁻²с⁻¹.

В целом результаты расчетов хорошо согласуются с известными данными о потоках электронов и протонов, полученными экспериментально или оцененными во время возмущений различной природы [4, 6, 9—12, 15, 21, 28].

Таблица 2. Параметры потоков электронов

Дец. 2003 г.	z , км	N_0 , 10^8 м ⁻³	N , 10^8 м ⁻³	q_0 , 10^6 м ⁻³ с ⁻¹	q , 10^6 м ⁻³ с ⁻¹	Δq , 10^6 м ⁻³ с ⁻¹	Π , 10^{-5} Дж м ⁻² с ⁻¹	p , 10^9 м ⁻² с ⁻¹	ϵ , МэВ	P , 10^9 Вт	E , 10^{12} Дж	ΔT , с
31 марта	81	6	16	4	26	22	7.5	3.4	0.15	7.5	14	1800
30 мая	84	5	15	2.5	23	20	7.8	3.5	0.15	7.8	19	2400
17 сентября	87	3	10	0.9	10	9.9	3.4	2.3	0.1	3.4	8.2	2400
15 октября	84	6	14	4	20	16	5.4	2.4	0.15	5.4	9.7	1800
30 октября	87	5	15	2.5	23	20	7.8	5.2	0.1	7.8	14	1800

выводы

Отклик среднеширотной D-области ионосферы на магнитные бури имеет сложный характер, поскольку магнитные бури сопровождаются целым рядом явлений (оптические и рентгеновские вспышки разной интенсивности, высыпания электронов и протонов, возмущения геомагнитного поля и др.), которые часто совпадают во времени, и вклад их в изменения в нижней части среднеширотной ионосферы трудно или невозможно разделить. Относительно небольшое число надежных экспериментов пока не позволяет выявить все (или большую часть) особенностей отклика. Среди рассмотренных нами отметим следующие.

1. Обнаружено, что увеличение индекса геомагнитной возмущенности K_p в начале магнитной бури (без внезапного начала) сопровождался характерным, отличным от невозмущенных условий, увеличением интенсивности радиошумов, увеличением в единицы-десятки раз интенсивностей ЧО-сигналов на высотах более 87 км в ночное время и квазипериодическими (период не менее 60 мин) изменениями концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы. Изменения концентрации электронов составляли десятки-сотни процентов. Дисперсия величины $R(z, f)$ увеличилась в несколько раз.

2. В течение фазы восстановления магнитных бурь обнаружены квазипериодические (период не менее 60 мин) длительностью несколько часов изменения концентрации электронов на высотах 81—90 км. Увеличение концентрации электронов при этом составляло 100—400 %. Важно, что это имело место как при заметном возмущении геомагнитного поля, так и без такого возмущения.

3. На основе гипотезы о высыпании электронов в период магнитной бури по экспериментальным данным о вариациях концентрации электронов выполнены оценки энергетических характеристик потоков заряженных частиц. Оказалось, что $p = 4 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Эти значения хорошо согласуются с теоретическими оценками и с известными данными о потоках электронов, полученными во время возмущений различной природы.

Авторы благодарят А. И. Гритчина за помощь в проведении экспериментов и К. П. Гармаша за предоставленную программу расчета концентрации электронов.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1772.

1. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавтика.—1999.—39, № 1.—С. 72—78.
2. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профиль электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэронавтика.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.
3. Гоков А. М. К вопросу о реакции среднеширотной D-области ионосферы на удаленные сильные землетрясения // Геомагнетизм и аэронавтика.—2001.—41, № 4.—С. 532—536.
4. Гоков А. М., Гритчин А. И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Космич. исслед.—1996.—34, № 6.—С. 585—589.
5. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Экспериментальные исследования влияния сильных гроз на параметры среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронавтика.—1998.—38, № 1.—С. 184—188.
6. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события SPE // Космич. наука и технология. Дополн.—2003.—9, № 2.—С. 86—90.
7. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 348—360.
8. Давидов А. Д. Популярная аэронавтика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—230 с.
9. Кнут Р., Вюрриберг И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронавтика.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
10. Кнут Р., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бурнообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронавтика.—1977.—17, № 5.—С. 854—861.
11. Лаптовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэронавтика.—1976.—16, № 6.—С. 1018—1025.
12. Ляцкий В. Б., Малышев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
13. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.
14. Черногор Л. Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного радиовлучения // Изв. вузов. Радиофизика.—1985.—28, № 12.—С. 17—26.
15. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 371—375.
16. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
17. Belrose J. S., Burke M. J. Study of the lower ionosphere using partial reflection. 1. Experimental technique and method of analysis // J. Geophys. Res.—1964.—69, N 13.—P. 2799—2818.
18. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms. A review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
19. 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.
20. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F. On the possibility of energetic particle precipitation from the magnetosphere into the middle latitude ionosphere // *Ann. Geophys. Part III. Space and Planetary Sciences*.—1998.—Supplement L.—Vol 16.—P. 839.
21. Danilov A. D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Int. J. Geomagnet. and Aeronomy*.—1999.—1, N. 3.
22. Feldman W. C., Symbalisty E. M. D., Roussel-Dupre R. A. Hard X ray survey of energetic electrons from low-Earth orbit // *J. Geophys. Res.*—1996.—101.—P. 5195—5209.
23. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Experimental investigations of the middle latitude D-region ionosphere responding to events related to proton precipitations // *Telecommun. and Radio Engineering*.—2002.—57, N 10—11.—P. 110—122.
24. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Some peculiarities of the lower ionosphere dynamics, caused by the morning solar terminator // *J. Atmos. Electricity*.—2002.—22, N 1.—P. 13—21.
25. Gurevich A. V. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. — New York: Springer-Verlag, 1978.—366 p.
26. Hargreaves J. K. *The Upper Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics. An introduction to the aerospace environment*. — Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 1979.—352 p.
27. Hargreaves J. K. *The Solar-Terrestrial Environment*. — New York: Cambridge Univ. Press, 1992.—420 p.
28. Lastovicka J. Effects of Geomagnetic Storms in the Lower Ionosphere, Middle Atmosphere and Troposphere // *J. Atmos. and Terr. Phys.*—1996.—58.—P. 831—843.
29. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // *Turk. J. Phys.*—1994.—18.—P. 1260—1265.

ELECTRON DENSITY VARIATIONS IN THE IONOSPHERIC D REGION AT MID-LATITUDES DURING MAGNETIC STORMS

A. M. Gokov, L. F. Chernogor

Our results of electron density measurements made by the partial reflection radar in the ionospheric D region at mid-latitudes during eleven magnetic storms are presented. The response of the D region to magnetic storms at their onset and during the recovery phase is considered. Quasi-periodic increases in the D-region electron density by more than 50—100 % are revealed to last for tens of minutes with the periods $T \approx 30—60$ min. The ionization rates are estimated, and the parameters of the energetic particle fluxes are calculated.