

УДК 550.388

А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

## Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события spe

Під час подій spe експериментально виявлено збільшення електронної концентрації більш ніж на 50—100 % в нижній частині середньширотної D-області іоносфери ( $\approx 70$ —80 км) протягом десятків хвилин. Оцінено зміну швидкості іонізації. На основі експериментальних даних про зміни концентрації електронів у періоди висипань протонів оцінено відповідні потоки:  $10^6$ — $10^7$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, які добре узгоджуються з теоретичними розрахунками.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время роль корпускулярной ионизации среднеширотной D-области ионосферы подтверждена экспериментально [5, 7, 10, 11]. Высокоэнергичные электроны и протоны могут оказывать заметную роль в вариациях ионизации ионосферы на высотах над поверхностью Земли  $z < 90$ —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 (промышленные взрывы, старты ракет, работа мощных нагревных стендов в радиочастотном диапазоне, излучение высоковольтных линий электропередач и т. д.). 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 ( $z \approx 55$ ...75 км) и могут вызывать заметное изменение ионизации в ней [1, 4, 7, 10]. Однако есть большие трудности измерения потоков заряженных частиц на средних широтах и получения правильных оценок их энергетического вклада на высотах  $z < 90$ ...100 км из спутниковых измерений, производимых на больших высотах ( $z > 200$  км).

Сравнительно хорошо изучена роль высыпавшихся потоков протонов в высокоширотной D-области [4]. Влияние их на среднеширотную D-область изучена мало, имеются лишь эпизодические экспериментальные исследования [6, 10], и поэтому

необходимо продолжение экспериментальных исследований и накопление сведений для изучения этого вопроса с целью решения целого ряда теоретических и прикладных задач.

В работе рассматриваются экспериментальные результаты, полученные методом частичных отражений (ЧО) на средней широте во время событий высыпаний протонов в ионосферу Земли (solar proton event (spe)) в периоды вспышек на Солнце и магнитных бурь.

### ТЕХНИКА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Экспериментальные исследования выполнены при помощи комплекса аппаратуры [12] методом ЧО вблизи г. Харькова (геомагнитные координаты: 45.37° N, 118.7° E). Для анализа из банка экспериментальных данных отобраны регистрации ЧО-сигналов, полученные во время нескольких событий высыпаний протонов в ионосферу Земли. Во время эксперимента регистрировались высотное-временные зависимости амплитуд смеси ЧО-сигнала и радиошума  $A_{so,x}(z, t)$  (где  $t$  — время, индексы «o» и «x» соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 14 или 22 высотных уровней, начиная с 45 или 60 км через  $\Delta z = 3$  км. Для выделения амплитуд ЧО-сигналов  $A_{o,x}(z, t)$  записывались также амплитуды только радиошума  $A_{po,x}(t)$  (2—6 выборки в полосе частот 50 Гц), в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин интенсивностей

Таблица 1. Сведения об экспериментах и событиях *spe*

№	Дата	Время события <i>spe</i> , UT	Поток протонов, pfu	Время измерений, UT
1	24.01.2003	В течение дня	13	06:10:00—21:00:00
2	17.04.2002	12:00—15:40(max)—18:00	24	12:55:00—21:00:00
3	24.04.2002	05:50—06:50(max)—	16	01:30:10—18:30:00
4	17.03.2002	08:20—08:50(max)—	13	07:20:00—11:00:00
5	20.03.2002	15:10—15:25(max)—	19	02:00:00—19:32:00
6	20.02.2002	07:30—07:55(max)—	13	03:05:00—19:57:00
7	12.04.2001	В течение дня	28	07:30:00—16:20:00
8	17.05.1993	В течение дня	21	12:00:00—15:30:00

ЧО-сигнала  $\langle A_{x,o}^2 \rangle$  и шумов  $\langle A_{px,no}^2 \rangle$  осуществлялись по 60 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  $\langle A_{px,no}^2 \rangle(t)$ . По полученным  $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$  вычислялось их отношение  $R(z)$  (на фиксированных высотах с шагом  $\Delta z = 3$  км), используемое для получения профилей электронной концентрации  $N(z)$  по методике дифференциального поглощения [9, 13] (уточнение профилей  $N(z)$  проводилось по методике [11]). Погрешность вычислений профилей  $N(z)$  на интервалах усреднения в 10 или 5 мин не превышала 30 % и 50 % соответственно. Измерения  $A_{so,x}(z, t)$  и  $A_{no,x}(t)$  выполнялись сеансами длительностью единицы-десятки часов (до и после событий *spe*). Число наблюдений составило 8.

Сведения об экспериментах и событиях *spe* приведены в табл. 1 (информация о высыпаниях протонов получена по сети интернет в WDC по URL: [www://solar.sec.noaa.gov](http://www://solar.sec.noaa.gov)). Сравнение проводилось с данными, полученными в магнитоспокойные дни.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных показал, что для рассматриваемых событий имеют место характерные особенности как в поведении ЧО сигналов и радишумов, так и в высотно-временных вариациях плотности электронов. Рассмотрим их подробнее, используя данные, полученные в характерном эксперименте 24.04.2002.

На рисунке приведен пример высотно-временных вариаций  $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ ,  $\langle A_{px,no}^2 \rangle(t)$  и  $N(z)$ . В эксперименте (отметим, что высыпания протонов с энергией  $\epsilon > 10$  МэВ начались 21.04.02 и продолжались до 26.04.02) примерно через 5—10 мин после начала *spe* в течение 50—60 мин в высотном интервале

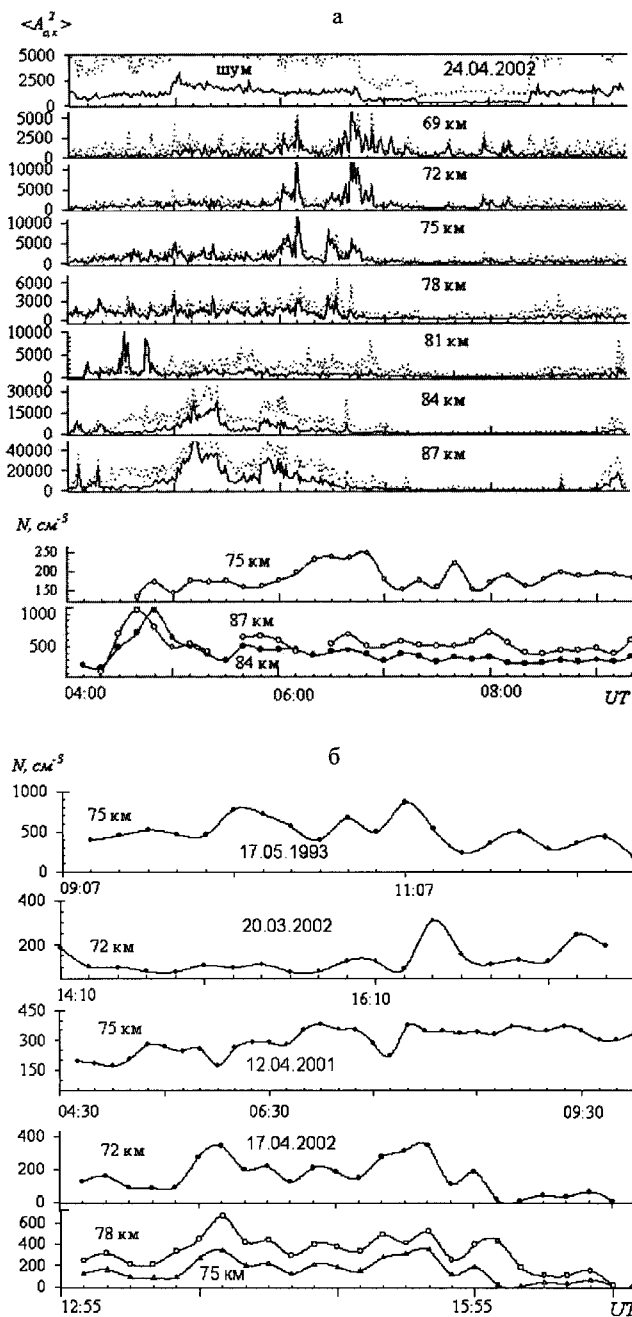
69—75 км регистрировались интенсивные ЧО сигналы (на  $z > 78$  км ЧО-сигналов не было), которые не наблюдались до события (значения  $\langle A_{x,o}^2 \rangle$  возросли в десятки раз). Важно отметить, что такие ЧО-сигналы не наблюдаются нами на средней широте на этих рабочих частотах в невозмущенных условиях. Подобные ЧО-сигналы от неоднородностей ионизации на  $z \leq 81$  км наблюдались во всех рассмотренных экспериментах через некоторое время после событий *spe*. Электронная концентрация в этом высотном интервале в этот период возросла примерно на 50 %. В других экспериментах увеличение  $N(z, t)$  составляло примерно 100—300 % (рисунок б). На  $z = 84, 87$  км в этот промежуток времени изменения соответствовали типичному суточному ходу (увеличение  $N(z)$  в 04.20—05.00 UT связано с высыпанием высокоэнергичных электронов после магнитной бури 12.04.2002 и здесь не обсуждается). Отметим также, что в период увеличения  $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$  и примерно в течение часа после интенсивность шумов и их дисперсия уменьшилась с последующим восстановлением к типичному суточному ходу.

Основные характерные особенности экспериментальных данных во время *spe* следующие:

- 1) появление интенсивных ЧО-сигналов (значения  $\langle A_{x,o}^2 \rangle$  возросли в единицы — десятки раз) с высот 69—81 км в течение десятков минут;
- 2) увеличение  $N(z, t)$  в этом высотном интервале более чем на 50—100 %;
- 3) уменьшение интенсивности шумов и их дисперсии с последующим восстановлением к типичному суточному ходу.

Рассмотрим перечисленные эффекты.

Уменьшение интенсивности шума и ее дисперсии после высыпания протонов можно объяснить так. Шум в диапазоне частот 2-3 МГц представляет собой наложение сигналов от радиосредств, работающих в этом диапазоне. В период уменьшения шумов наблюдалось увеличение  $N(z, t)$ , что сопровождается увеличением поглощения радиосигналов



Высотно-временные зависимости средних за минуту интенсивностей ЧО-сигналов  $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$  и шумов  $\langle A_{пх,o}^2 \rangle(t)$  и изменения концентрации электронов  $N(z, t)$  в нижней части среднеширотной D-области ионосферы, полученные во время высыпания протонов

в ионосфере на значительных площадях в несколько тысяч километров. Увеличение поглощения приводит к уменьшению помех, принимаемых основным и боковыми лепестками диаграммы направленности антенны радара ЧО, состоящей из ортого-

нальных вертикальных ромбов.

Для объяснения вариаций средних значений интенсивности ЧО-сигнала и ее дисперсии учтем, что (см. [8])

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

где  $\overline{\Delta N^2}$  — интенсивность флуктуаций  $N$ ,  $\Omega_{\pm} = \omega \pm \omega_L$ ,  $\omega_L = 2\pi f_L$ ,  $f_L = f_B \cos\theta \approx 1.3$  МГц,  $f_B$  — гирочастота электронов,  $\theta$  — угол между вертикалью и вектором индукции геомагнитного поля,  $K_{x,o}$  — интегральный коэффициент поглощения ЧО-сигнала. В период рассматриваемых событий имеют место следующие процессы: 1) увеличение и уменьшение  $N$ , а значит и  $K_{x,o}$ ; 2) значительные вариации  $\overline{\Delta N^2}$  (это возможно при сильной турбулентности среды, что может быть вызвано, например, увеличением потока протонов). Эти факторы могут полностью объяснить увеличение и уменьшение  $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ .

Увеличение дисперсии интенсивностей сигнала свидетельствует о нестационарности процессов и о неполном «вычитании» шумов. Увеличение  $N(z, t)$  на высотах 72–81 км, по-видимому, связано с высыпаниями протонов с энергиями больше 10 МэВ [4, 10].

Используя экспериментальные данные о временном изменении  $N(z, t)$  (см. рис. 1) оценим изменение скорости образования электронов на этих высотах. Из уравнения баланса концентрации электронов в квазистационарном случае ( $|dN/dt| \ll \alpha N^2$ ) имеем  $q = \alpha N^2$ , где  $q$  — скорость ионизации,  $\alpha$  — эффективный коэффициент рекомбинации. Процессы переноса здесь не учитываются (их характерные времена намного больше, чем  $(\alpha N)^{-1}$ ). До события высыпания протонов  $q_0 = \alpha_0 N_0^2$ . Тогда, пренебрегая нагревом атмосферы, при  $\alpha \approx \alpha_0$  имеем  $N/N_0 = \sqrt{q/q_0}$ . В этом случае для эксперимента 12.04.2001 г. для  $z = 75$  км  $N_0 \approx 160 \text{ см}^{-3}$ ,  $N \approx 380 \text{ см}^{-3}$ ,  $q/q_0 = 5.64$ ; для эксперимента 20.02.2002 г. при  $z = 72$  км  $N_0 \approx 100 \text{ см}^{-3}$ ,  $N \approx 400 \text{ см}^{-3}$ ,  $q/q_0 = 4.0$  и для  $z = 78$  км  $N_0 \approx 100 \text{ см}^{-3}$ ,  $N \approx 510 \text{ см}^{-3}$ ,  $q/q_0 = 26.01$ . По методике [10] на основе механизма о высыпании высокоэнергичных частиц (электронов, протонов) оценим параметры потоков протонов.

По величине электронной концентрации в невозмущенных  $N_0$  и возмущенных  $N$  условиях (рис. 1) оценивались скорости ионизации  $q_0, q$ . Для простоты, как и ранее, будем пренебрегать нагревом атмосферы при высыпании частиц и полагать  $\alpha \approx \alpha_0$ . Считается также, что на высотах  $z \leq 75...$

Таблица 2. Параметры потоков протонов

Дата	z, км	$N_0, 10^8 \text{ м}^{-3}$	$N, 10^8 \text{ м}^{-3}$	$\Delta q, 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$	$P_1, \text{ мкДж м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$p, 10^6 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	P, МВт	E, $10^{12}$ Дж	$\Delta T, \text{ с}$
17.05.93	75	4.5	8.5	5.2	18	6.0	1800	9.0	5000
17.03.02	72	1.0	1.7	0.19	0.98	0.33	98	0.49	5000
20.03.02	72	0.7	3.0	0.85	2.9	0.98	290	1.2	4000
12.04.01	75	1.6	3.8	1.1	3.7	1.3	370	5.6	15000
24.04.02	75	1.6	2.5	0.38	1.3	0.44	13	0.65	5000
20.02.02	72	1.0	4.4	1.8	6.2	2.1	620	4.5	7200
17.04.02	72	1.2	3.2	0.88	3.0	1.0	300	2.2	7200
24.01.03	75	1.2	5.0	2.3	7.8	2.7	780	3.1	4000

90 км в условиях слабо возмущенной ионосферы для дневного и ночного времени соответственно  $\alpha \approx 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  [10]. Если пренебречь распределением выпадающих частиц по энергиям, которое при наземных наблюдениях неизвестно, то плотность потока мощности частиц  $P_1 \approx 2\varepsilon_1 \Delta z \Delta q$ , где  $\Delta q = q - q_0$ ,  $\varepsilon_1 \approx 35 \text{ эВ}$  — энергия одного акта ионизации,  $\Delta z$  — диапазон высот, где эффективно поглощается поток частиц с энергией  $\varepsilon$ . Далее будем полагать, что  $\Delta z = 10 \text{ км}$ . С другой стороны, параметр  $P_1$  связан с потоком частиц  $p$ :  $P_1 = \varepsilon p$ .

Имея  $P_1$ , можно оценить мощность и энергию частиц, выпадающих на площади  $S$ :  $P = P_1 S$ ,  $E = P \Delta T$ , где  $\Delta T$  — длительность выпадений. Методика оценки параметров потока частиц сводится к вычислению величины  $\Delta q$ , затем —  $P_1$ ,  $p$ ,  $P$  и  $E$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 2 (в расчетах принимались значения  $\varepsilon = 20 \text{ МэВ}$ ,  $S = 10^{14} \text{ м}^2$ ). Они хорошо согласуются с известными данными о потоках протонов, полученными экспериментально или оцененными во время возмущений различной природы. К сожалению, нет возможности корректно сравнить полученные значения потоков протонов с их значениями в спутниковых измерениях, поскольку нет надежной методики пересчета потоков, полученных в спутниковых измерениях на высотах  $z > 200 \text{ км}$ , в их значения в нижней части ионосферы.

## ВЫВОДЫ

1. Обнаружено и объяснено увеличение в единицы-десятки раз средних интенсивностей ЧО-сигналов от неоднородностей в среднеширотной D-области ионосферы на высотах  $z \approx 70...80 \text{ км}$  и изменений радиошума и их дисперсий во время выпадений протонов.

2. Во время событий сре экспериментально обна-

ружено увеличение электронной концентрации более чем на 50—100 % в нижней части среднеширотной D-области ионосферы ( $\approx 70...80 \text{ км}$ ) в течение десятков минут. Сделаны оценки изменения скорости ионизации.

3. На основе экспериментальных данных об изменениях концентрации электронов в периоды выпадений протонов оценка соответствующих потоков составила величину порядка  $10^6—10^7 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Результаты расчетов потоков по экспериментальным данным хорошо согласуются с известными теоретическими расчетами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Украинского научно-технологического центра, проектные соглашения № 1772 и 1773.

Авторы благодарят А. И. Гритчина за помощь в проведении экспериментов и К. П. Гармаша за предоставленную программу расчета  $N(z)$ -профиля.

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
2. Гармаш К. П. Регуляция обратной задачи в методе частичных отражений // Вестник Харьковского госуниверситета. Радиофизика и электроника.—1991.—№ 355.—С. 61—64.
3. 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.
4. Данилов А. Д. Популярная аэронавигация. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—230 с.
5. Кнут Р., Вюрцберг И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронавигация.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
6. 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 аэронавигация.—1977.—17, № 5.—С. 854—861.
7. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.

8. Черногор Л. Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика.—1985.—28, № 12.—С. 17—26.
9. 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.
10. 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.
11. Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment. — New York: Cambridge Univ. Press, 1992.—420 p.
12. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turkish J. of Physics.—1994.—18.—P. 1260—1265.

---

**RESPONSE OF MIDLATITUDE D-REGION  
OF THE IONOSPHERE ON SPE PROTON EVENTS**

A. M. Gokov and O. F. Tyrnov