

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9: 520.86

А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Экспериментальное исследование реакции среднеширотной D-области ионосферы на рентгеновские и оптические вспышки

Надійшла до редакції 11.11.2004

За допомогою радара часткових відбиттів досліджено реакцію D-області іоносфери на спалахи рентгенівського випромінювання (ХРА) і оптичні спалахи на Сонці. Встановлено, що через 15–25 хв після ХРА відбуваються зміни параметрів частково відбитих сигналів, радіошумів і електронної концентрації з характерною тривалістю близько 15–30 хв. Наводиться фізичне тлумачення результатів спостережень.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки сопровождаются увеличением интенсивности оптического, рентгеновского и корпускулярного излучений и в значительной мере определяют состояние космической погоды. Влияние этих явлений на D-область ионосферы неоднократно изучалось [3–8, 10–12, 14, 16]), однако подавляющая часть исследований относится к высокоширотной нижней ионосфере. Влияние рентгеновских и оптических вспышек на среднеширотную D-область ионосферы изучалось эпизодически, чего недостаточно для решения задач прогнозирования и моделирования проявлений космической погоды в нижней ионосфере. В связи с этим есть необходимость в продолжении экспериментальных исследований среднеширотной ионосферы с целью решения практических задач радиосвязи, радионавигации и др. В последние годы подобные процессы успешно исследуются в рамках международных и национальных программ типа Interball, Global Change Research Programs, CEDAR, Living with a Star.

Целью нашей работы являются экспериментальные исследования влияния вспышек рентгеновского излучения (ХРА) и слабых оптических вспышек (FLA) на характеристики радиошумов и частично отраженных радиосигналов, а также на параметры среднеширотной D-области ионосферы.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Зондирование нижней ионосферы проводилось в 1990–2003 гг. с помощью радара частичных отражений (ЧО) в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (ХНУ) [15]. Исследовался диапазон высот 45–109 км или 60–102 км с шагом по высоте 3 км вблизи г. Харькова ($\varphi = 49.5^\circ \text{ N}$, $\lambda = 36.3^\circ \text{ E}$). Рабочая частота радара составляла 2.31 МГц. Основные параметры радара следующие: рабочие частоты $f = 1.5\text{--}4.5$ МГц, импульсная мощность передатчика $P \approx 150$ кВт, длительность импульсов $\tau = 25$ мкс, частота повторения $F = 1\text{--}100$ Гц, коэффициент усиления антенны $G \approx 40\text{--}150$. Амплитуды $A_{\text{ср},\alpha}(z, t)$ смеси ЧО-сигнала и радиошума обыкновенной и необыкновенной поляризации (индексы o, x соответственно) после оцифровки записывались на магнитный носитель (здесь z — высота над поверхностью Земли, t — время). На их основе создан банк экспериментальных данных ХНУ. Для выделения частично отраженного сигнала на фоне шумов перед излучением каждого зондирующего импульса осуществлялось 2–6 выборок шума в полосе частот 50 кГц. Оценки средних значений интенсивностей ЧО-сигналов $\langle A_{\text{ср},\alpha}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{\text{ш},\alpha}^2 \rangle$ осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая

Сведения об экспериментах и вспышках

Дата	Тип вспышки	Начало, момент максимума и конец вспышки, UT	Время наблюдений, UT
XRA			
21.02.1997 г.	B1.3	10:15—10:19(max)—10:29	06:10—13:00
18.03.1998 г.	M1.0	10:50—11:12(max)—11:44	07:20—14:08
25.03.1998 г.	C1.2	11:45—11:49(max)—11:54	08:34—13:40
25.03.1998 г.	C5.3	12:31—12:35(max)—12:44	08:34—13:40
23.12.1998 г.	M1.1	08:13—08:16(max)—08:21	08:07—10:15
23.12.1998 г.	C5.0	11:57—12:06(max)—12:13	11:22—14:25
13.01.1999 г.	B4.6	08:32—08:35(max)—08:37	08:00—14:48
13.01.1999 г.	C1.0	12:38—12:49(max)—12:52	08:00—14:48
12.02.1999 г.	C1.7	09:52—09:56(max)—10:13	09:07—14:03
12.02.1999 г.	C2.0	10:44—10:49(max)—10:53	09:07—14:03
18.04.2001 г.	C1.2	18:13—18:21(max)—18:27	07:04—23:55
FLA			
25.03.1998 г.	SF	11:46—11:48(max)—11:51	08:34—13:40
13.11.1998 г.	SF	08:12—08:19(max)—08:26	08:28—10:36
14.01.1999 г.	SN	09:55—10:15(max)—11:17	08:00—14:00
15.01.1999 г.	SF	10:41—11:15(max)—11:20	08:24—14:22
10.02.1999 г.	SF	13:37—13:43(max)—14:00	10:03—14:30
12.02.1999 г.	SF	12:17—12:23(max)—12:32	09:07—14:03
12.02.1999 г.	SF	12:42—12:44(max)—12:51	09:07—14:03
08/09.06.2001 г.	ERU	02:13—02:14(max)—02:23	20:39—04:06
08/09.06.2001 г.	ERU	07:57—07:58(max)—08:04	07:07—10:33

погрешность этих оценок не превышала 10 %.

Для всех экспериментов на интервалах усреднения в 10 или 5 мин вычислялись высотно-временные зависимости $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ и $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$. По полученным профилям $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$ находилось их отношение $R(z) = \langle A_x^2 \rangle / \langle A_o^2 \rangle$, используемое далее для получения высотных профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения на основе алгоритма регуляризации [1]. При получении $N(z)$ -профилей использовалась модель профиля $\nu(z)$ частот столкновений электронов с нейтральными молекулами, приведенная в работе [13].

Профили $N(z)$ вычислялись на интервалах усреднения в 10 или 5 мин с погрешностью, не превышающей 30 и 50 % соответственно.

Для анализа из банка экспериментальных данных ХНУ были отобраны регистрации ЧО-сигналов, полученные во время 11 вспышек рентгеновского излучения и 9 оптических вспышек. Рассмотрены события, когда рентгеновские вспышки не сопровождались оптическими. Длительность регистраций составляла десятки минут — часы до и после вспышек. Данные о вспышках получены по интернету в WDC-A и по URL: www.solar.sec.noaa.gov. Сведения об экспериментах и вспышках приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ экспериментальных данных показал, что для обоих типов событий имеют место характерные особенности поведения ЧО-сигналов, радиошумов и концентрации электронов. Опишем их подробнее, используя данные, полученные в нескольких характерных экспериментах.

Рентгеновские вспышки. Рассмотрим результаты наблюдений, выполненных 13.01.1999 г., 21.02.1997 г., 25.03.1998 г. и 18.03.1998 г. во время вспышек рентгеновского излучения.

На рис. 1—4 приведены примеры наблюдаемых высотно-временных вариаций $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$, $R(z, t)$ и $N(z)$.

В первом эксперименте примерно через 24 мин после начала XRA почти во всей D-области ($z = 72—87$ км) интенсивности $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ увеличились в единицы-десятки раз; в 5—9 раз увеличилась и интенсивность радиошумов $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$ с запаздыванием на 15—17 мин относительно $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$; значения R увеличивались в 3—7 раз. Длительности этих процессов были примерно одинаковыми и составляли 10—12 мин. Электронная концентрация на высоте 84 км в течение примерно 10 мин увеличилась на 40—50 % с последующим резким

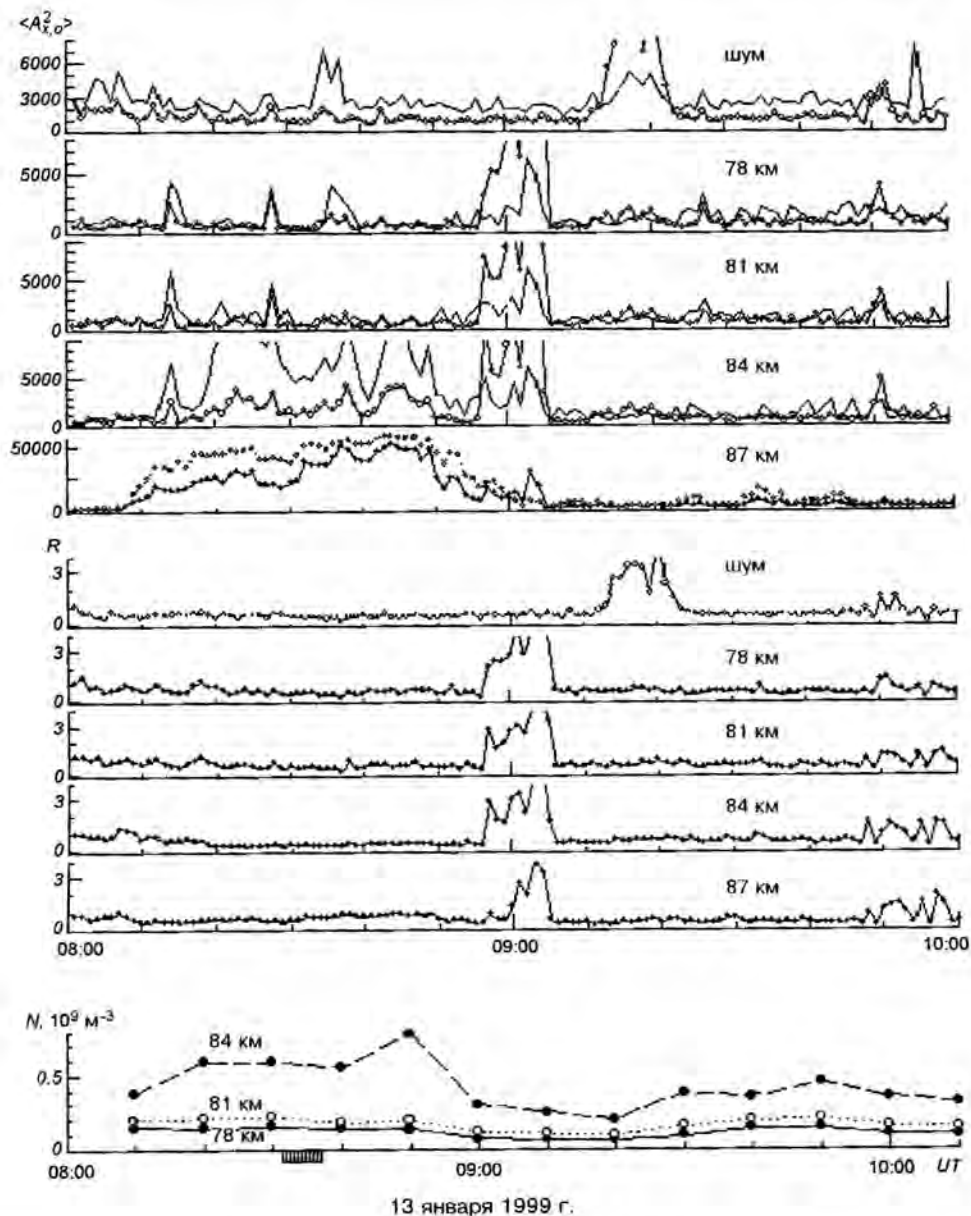
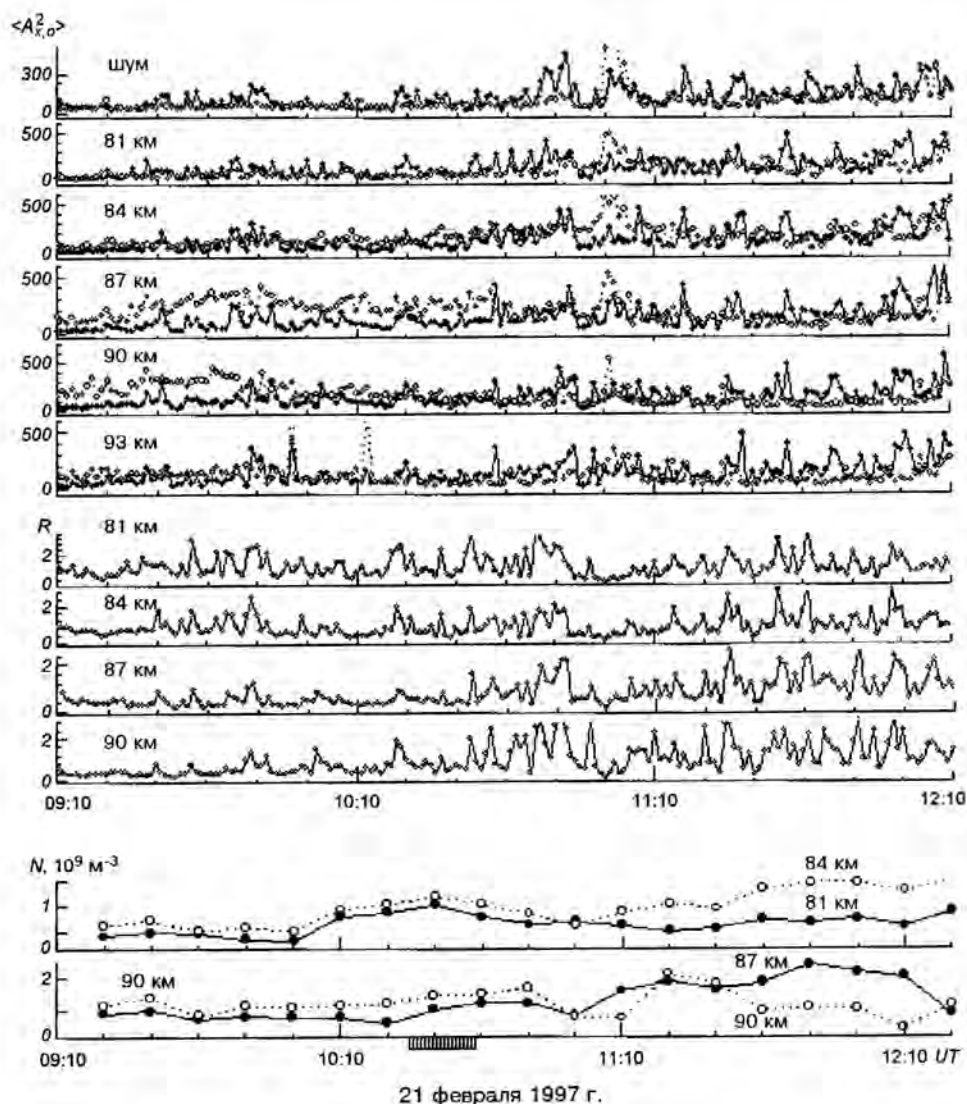


Рис. 1. Высотно-временные вариации $\langle A_{x,0}^2 \rangle(z, t)$, $R(z, t)$ и $N(z, t)$, полученные в эксперименте 13.01.1999 г. в период вспышки рентгеновского излучения класса В4.6. Время вспышки здесь и далее отмечено заштрихованной областью

уменьшением в течение получаса. Ниже 84 км имело место только отмеченное выше уменьшение значений N .

В эксперименте 21.02.1997 г. отчетливых изменений $\langle A_{x,0}^2 \rangle$, $\langle A_{xx,00}^2 \rangle$, связанных с XRA, не обнаружено, за исключением небольшого увеличения $\langle A_{x,0}^2 \rangle$ длительностью 15–20 мин на высотах 81–84 км через 20–22 мин после начала XRA. В тоже время

наблюдалось отчетливое увеличение интенсивностей радишумов $\langle A_{xx,00}^2 \rangle$ длительностью 10 мин с запаздыванием на 10 мин относительно $\langle A_{x,0}^2 \rangle$ и увеличение значений R в 1.5–3.5 раза. Концентрация электронов в интервале высот 81–90 км возросла на 50–100 % примерно через 10–20 мин после начала XRA. Возмущение N продолжалось примерно 30–40 мин.



21 февраля 1997 г.

Рис. 2 То же, что и на рис. 1 для вспышки класса B1.3 21.02.1997 г.

В третьем эксперименте примерно через 17–18 мин после XRA интенсивности $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ в интервале высот 81–90 км увеличивались в 20–30 раз в течение 10–15 мин, после чего на высотах 81–87 км они стали в 2–3 раза больше, чем до возмущения. Для величин R в интервале высот 81–90 км наблюдалось плавное уменьшение значений в течение примерно 40 мин, которое наступало через 15–18 мин после XRA. Через 10–20 мин после события на высотах 81–78 км имело место увеличение концентрации электронов более чем на 100 % в течение получаса. На других высотах определить значения N не удалось.

В эксперименте 18.03.1998 г. примерно через 45 мин после XRA на высотах 81–90 км интенсивности $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и $\langle A_{hx,000}^2 \rangle$ в течение получаса уменьшились в 1.5–3 раза с последующим заметным увеличением. В этот же промежуток времени в 1.5–4 раза уменьшились значения R после их 30-минутного увеличения примерно через 10 мин после вспышки. Последующие (после 12:00 UT) изменения также, по-видимому, связаны с XRA, поскольку вспышка была достаточно продолжительной. В высотном-временном ходе $N(z, t)$ характерным оказалось 30-минутное увеличение значений N на 50–100 % (и более) на высотах 81–84 км.

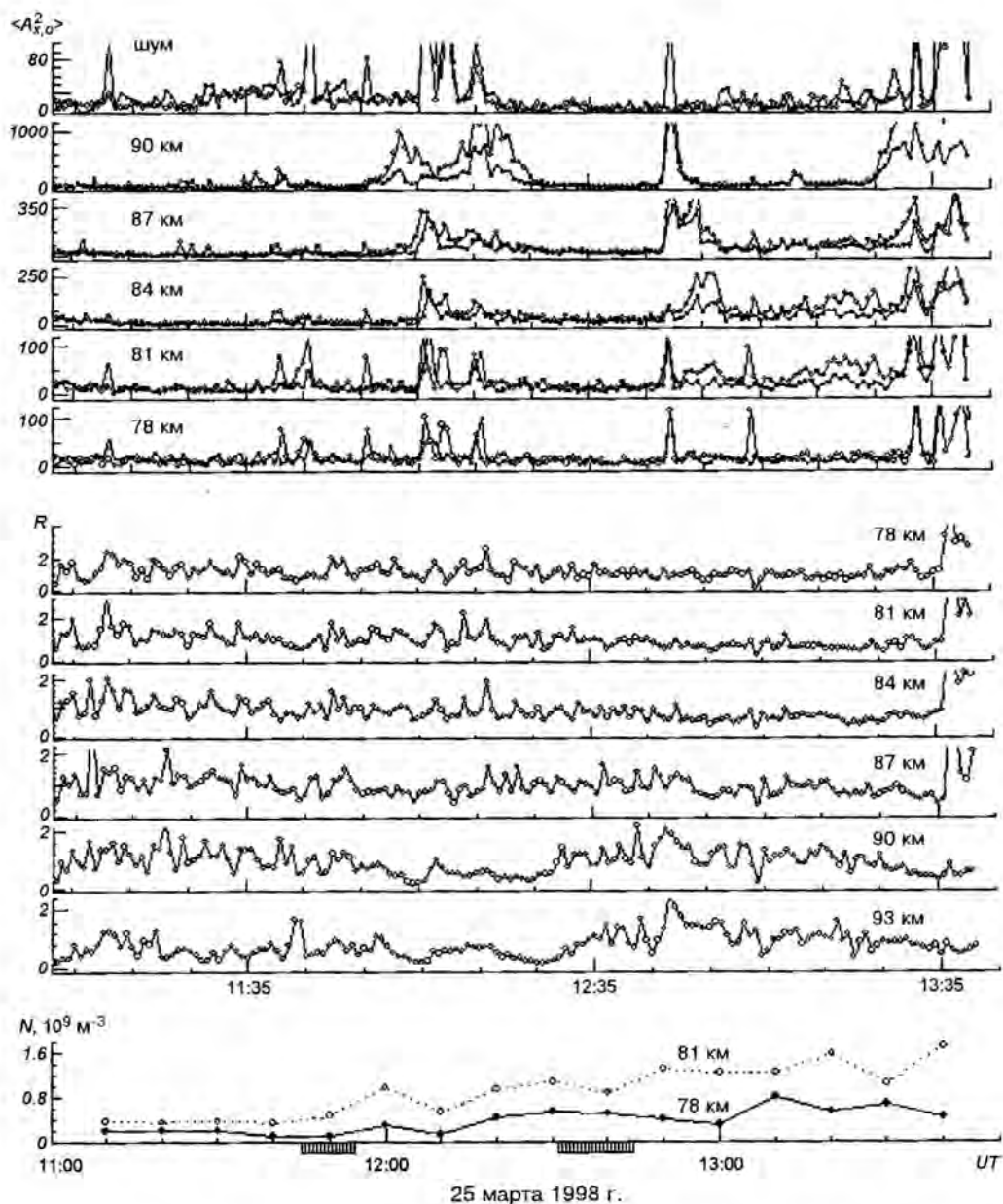


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для вспышек класса C1.2 (11:45–11:54 UT) и C.5.3 (12:31–12:34 UT) 25.03.1998 г.

Таким образом, основные особенности поведения ЧО-сигналов, радишумов и концентрации электронов таковы.

1. Примерно через 10–40 мин после ХРА интенсивность ЧО-сигналов на высотах 81–93 км на протяжении 10–20 мин увеличивается в десятки раз, после чего восстанавливается к исходным значениям в течение 30–70 мин. Иногда наблюдается почти полное исчезновение отражений от неоднородностей в D-области.

После этого, как правило, интенсивности ЧО-сигналов вновь увеличиваются в единицы-десятки раз, возвращаясь к типичному суточному ходу.

2. Интенсивности радишумов $\langle A_{r,o}^2 \rangle$ также увеличиваются на протяжении 10–20 мин, но с задержкой по времени на 15–20 мин относительно возмущения $\langle A_{r,o}^2 \rangle$.

3. В эксперименте 18.03.1998 г. почти сразу после

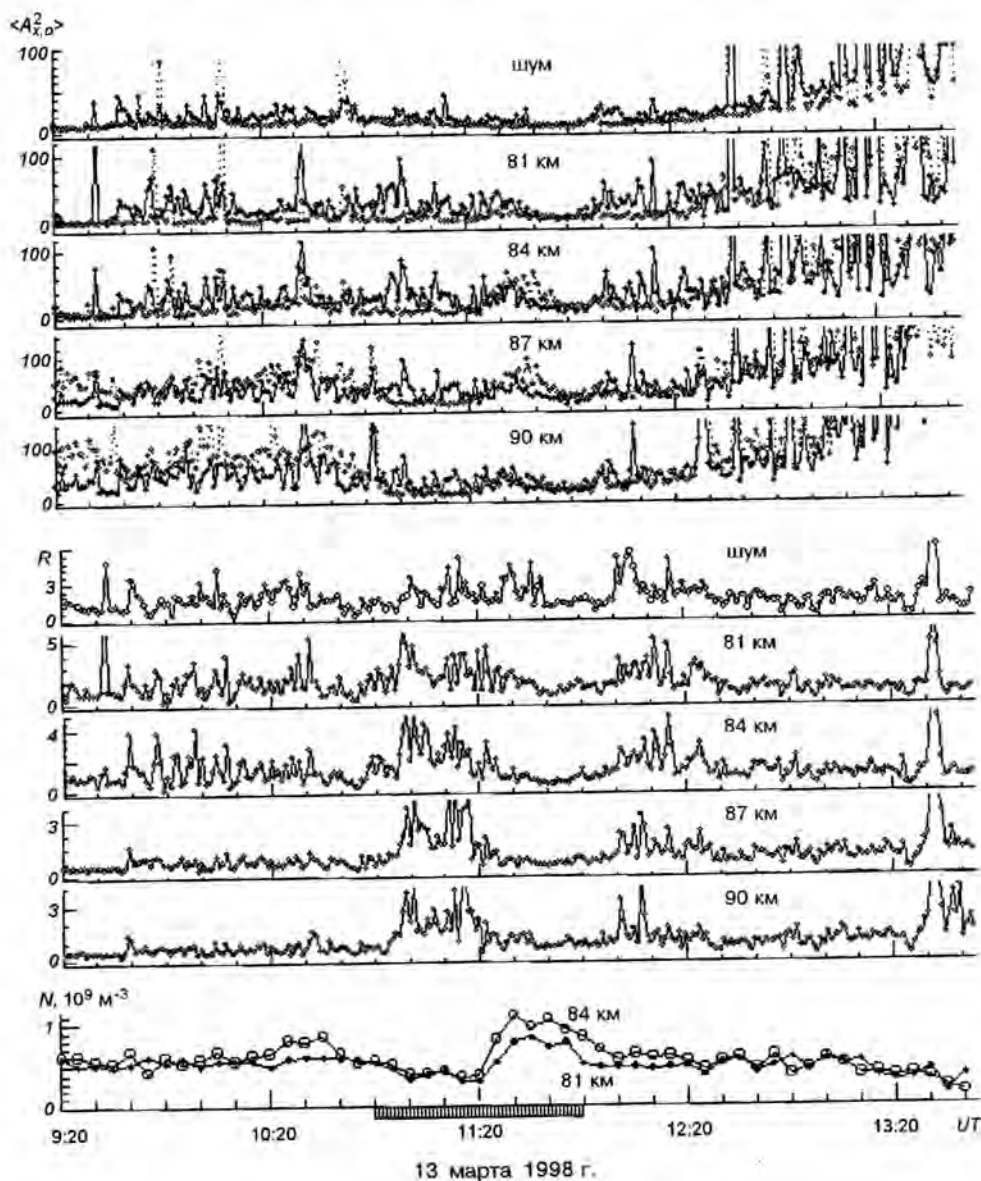


Рис. 4 То же, что и на рис. 1 для вспышки класса M1.0 18.03.1998 г.

окончания XRA интенсивности ЧО-сигналов $\langle A_{z,o}^2 \rangle$ уменьшались в несколько раз на высотах 81–90 км на протяжении 20–25 мин с последующим восстановлением суточного хода.

4. Значения величины R на высотах 78–90 км и ее дисперсия σ_R^2 увеличиваются в несколько раз через 5–25 мин после начала XRA с последующей релаксацией до невозмущенных значений.

5. Концентрация электронов увеличивается на

50–150 % в течение 30–35 мин на высотах 81–87 км примерно через 15–25 мин после начала XRA с последующей релаксацией. В эксперименте 13.01.1999 г. наблюдалось небольшое уменьшение N относительно суточного хода.

Оптические вспышки. Эти события имели в основном небольшую интенсивность. На рис. 5–8 приведены полученные для четырех экспериментов величины $\langle A_{z,o}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$, $R(z, t)$ и $N(z)$.

В эксперименте 13.11.1998 г. через 28 мин после вспышки на высотах 78—90 км значения $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$ увеличивались в десятки раз. Длительность таких возмущений составила 20 мин. Примерно на минуту раньше произошло кратковременное (длительностью около 5 мин) увеличение интенсивностей радишумов. На высотно-временных зависимостях $R(z, t)$ в этот период для высот 84—90 км значения R увеличились примерно в 2—4 раза (длительность 30 мин). На высотных уровнях 84—90 км отмечено кратковременное увеличение электронной концентрации примерно на 40—80 % (длительностью 10—20 мин).

В эксперименте 15.01.1999 г. во время достаточно продолжительной вспышки примерно через 25 мин после ее начала имело место увеличение интенсивностей $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$ в 8—15 раз в течение 15 мин. В это же время в несколько раз увеличились значения R и σ_R^2 . Через 20—30 мин после начала вспышки на высотах 84—90 км в течение примерно 10—20 мин имело место небольшое увеличение электронной концентрации.

Для эксперимента, проведенного 14.01.1999 г., характерным было кратковременное (около 10 мин) увеличение в десятки раз $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$ в конце вспышки и кратковременное (около 5—10 мин) увеличение значений N в это же время. Через 25—30 мин после окончания вспышки в течение 30—15 мин концентрация электронов на высотах 78—87 км увеличивалась до 100 %. Через час после начала вспышки в течение примерно 50 мин дисперсия σ_R^2 выросла в несколько раз.

В эксперименте 09.06.2001 г. через 60 мин после FLA зарегистрировано увеличение электронной концентрации на 50—200 % на высотах 87—90 км (в течение 25—30 мин). Через 20 мин после вспышки отмечалось кратковременное (10 мин) увеличение в несколько раз значений $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$. Более интенсивное и длительное увеличение имело место через 50—60 мин после FLA. В высотно-временном ходе R замечено плавное уменьшение значений примерно в два раза на высотах 84—93 км.

Примерно через 20 мин после начала вспышки 25.03.1998 г. также наблюдалось заметное увеличение интенсивностей $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$ и $\langle A_{\text{rx},\text{no}}^2 \rangle$ длительностью 20—30 мин почти во всей D-области.

Таким образом, для рассмотренных вспышек обнаружено несколько особенностей.

1. Увеличение в единицы-десятки раз интенсивностей $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$ длительностью 15—30 мин на высотах 81—93 км через 20—35 мин после начала вспышки.

2. Увеличение в несколько раз значений R и их дисперсия σ_R^2 .

3. Увеличение электронной концентрации примерно на 40—80 %.

4. В одном случае через 25—30 мин после окончания вспышки в течение примерно 30—15 мин концентрация N на высотах 78—87 км увеличилась до 100 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

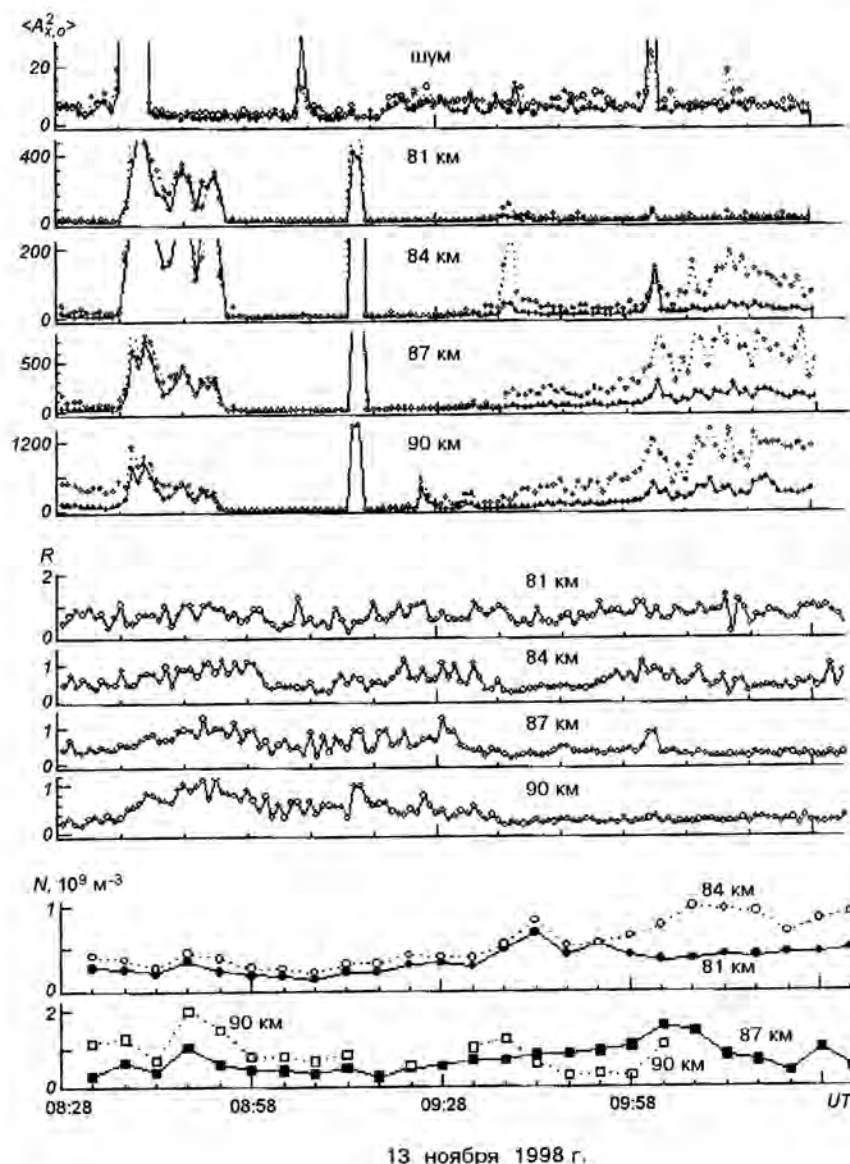
Рентгеновские вспышки. Увеличение интенсивности шума и ее дисперсии через некоторое время после XRA (важно, что это происходит на фоне уменьшения электронной концентрации, см. рис. 1) можно объяснить (см. [2]) следующим образом. Шум в диапазоне частот 2—3 МГц является результатом наложения сигналов от радиосредств. В период увеличения уровня шумов наблюдалось уменьшение концентрации электронов, что сопровождается уменьшением поглощения радиосигналов в ионосфере. Уменьшение поглощения приводит к увеличению уровня помех, принимаемых как основным, так и боковыми лепестками диаграммы направленности радара ЧО. Как показал анализ большого числа наблюдений, во время прохождения утреннего и вечернего терминаторов, такой же эффект, но более сильно, проявляется в предвечернее время.

Экспериментально установленные вариации (например, увеличение — в эксперименте 13.01.1999 г. и уменьшение в эксперименте 18.03.1998 г.) средних значений дисперсий и интенсивности ЧО-сигналов могут быть объяснены как в работе [2]. Из теории метода ЧО известно [9], что

$$\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle \propto \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\Omega_{\pm}^2 + \nu^2} \exp(-4K_{x,\sigma}), \quad (1)$$

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

После вспышки происходят следующие процессы: 1) изменение N , а значит, и $K_{x,\sigma}$; 2) значительные вариации $\langle \Delta N^2 \rangle$ (это возможно при усилении турбулизации среды, что может быть вызвано, например, увеличением потока рентгеновского излучения). Эти факторы могут объяснить наблюдаемые вариации $\langle A_{x,\sigma}^2 \rangle$. Нестационарность процессов в ионосферной плазме в период рассматриваемых событий приводит к заметному увеличению дисперсии $\sigma_{x,\sigma}$.



13 ноября 1998 г.

Рис. 5. Высотно-временные вариации $\langle A_{z,x}^2 \rangle(z, t)$, $R(z, t)$ и $N(z, t)$, полученные в эксперименте 13.11.1998 г. в период оптической вспышки класса SF

интенсивностей сигнала. Кроме того, известно [2], что неполное «вычитание» шумов также приводит к увеличению $\sigma_{x,o}$.

Для объяснения экспериментально обнаруженных вариаций отношения интенсивностей ЧО-сигналов R и его дисперсии $\sigma_{x,o}$ после XRA воспользуемся известной из теории метода ЧО зависимостью

$$R = \frac{\langle A_x^2 \rangle}{\langle A_o^2 \rangle} = \frac{\Omega_+^2 + \nu^2}{\Omega_-^2 + \nu^2} \exp[-4(K_x - K_o)l]. \quad (2)$$

Учтем, что на высотах 75–90 км обычно выполняются условия $\Omega_+^2 \gg \nu^2$, $\Omega_-^2 \gg \nu^2$. Тогда выражение (2) можно упростить к виду

$$R \approx \frac{\Omega_+^2}{\Omega_-^2} \exp[-4(K_x - K_o)l]. \quad (3)$$

Увеличение значений N сопровождается увеличением $K_{x,o}$, что приводит к уменьшению R . При уменьшении значений N уменьшается и $K_{x,o}$, а

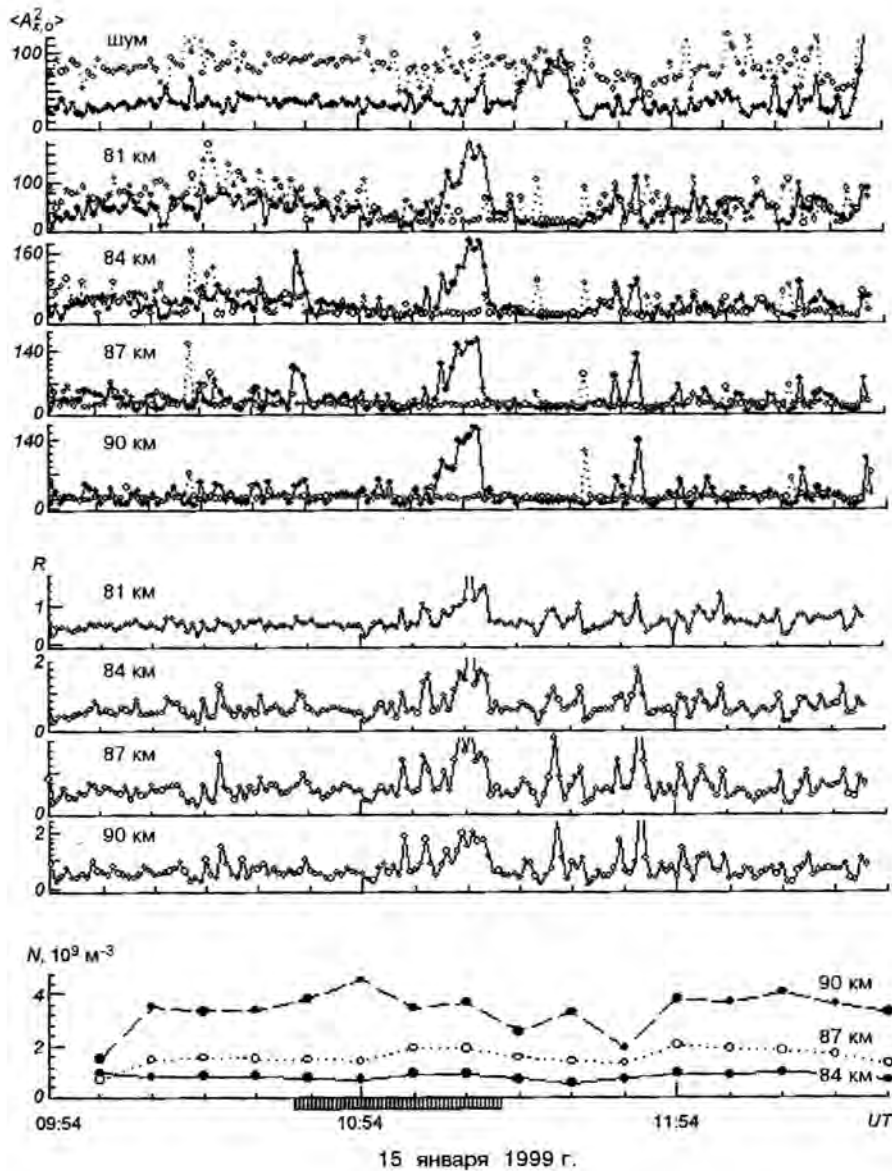


Рис. 6. То же, что и на рис. 5 для вспышки 15.01.1999 г.

следовательно, увеличивается R . Увеличение σ_R^2 , как и $\sigma_{x,0}^2$, связано с усилением нестационарности среды после вспышки.

Увеличение электронной концентрации на высотах примерно 81–87 км, по-видимому, связано с резким увеличением потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышки. Используя экспериментальные данные о временном изменении электронной концентрации, оценим изменение скорости образования электронов на этих высотах. Из уравнения баланса концентрации электронов в квази-

стационарном случае ($|dN/dt| \ll \alpha N^2$) имеем $q = \alpha N^2$, где q — скорость ионизации, α — эффективный коэффициент рекомбинации. Процессы переноса (ветер, амбиполярная и турбулентная диффузии) здесь не учитываются потому, что их характерные времена намного больше, чем $(\alpha N)^{-1}$. До вспышки $q_0 = \alpha_0 N_0^2$. Тогда, пренебрегая нагревом атмосферы, при $\alpha \approx \alpha_0$ имеем $N/N_0 = \sqrt{q/q_0}$. В этом случае, например, для эксперимента 18.03.1998 г. на высоте 81 км получено $N_0 \approx 0.4 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $N \approx 0.7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q/q_0 \approx 3.2$, а на

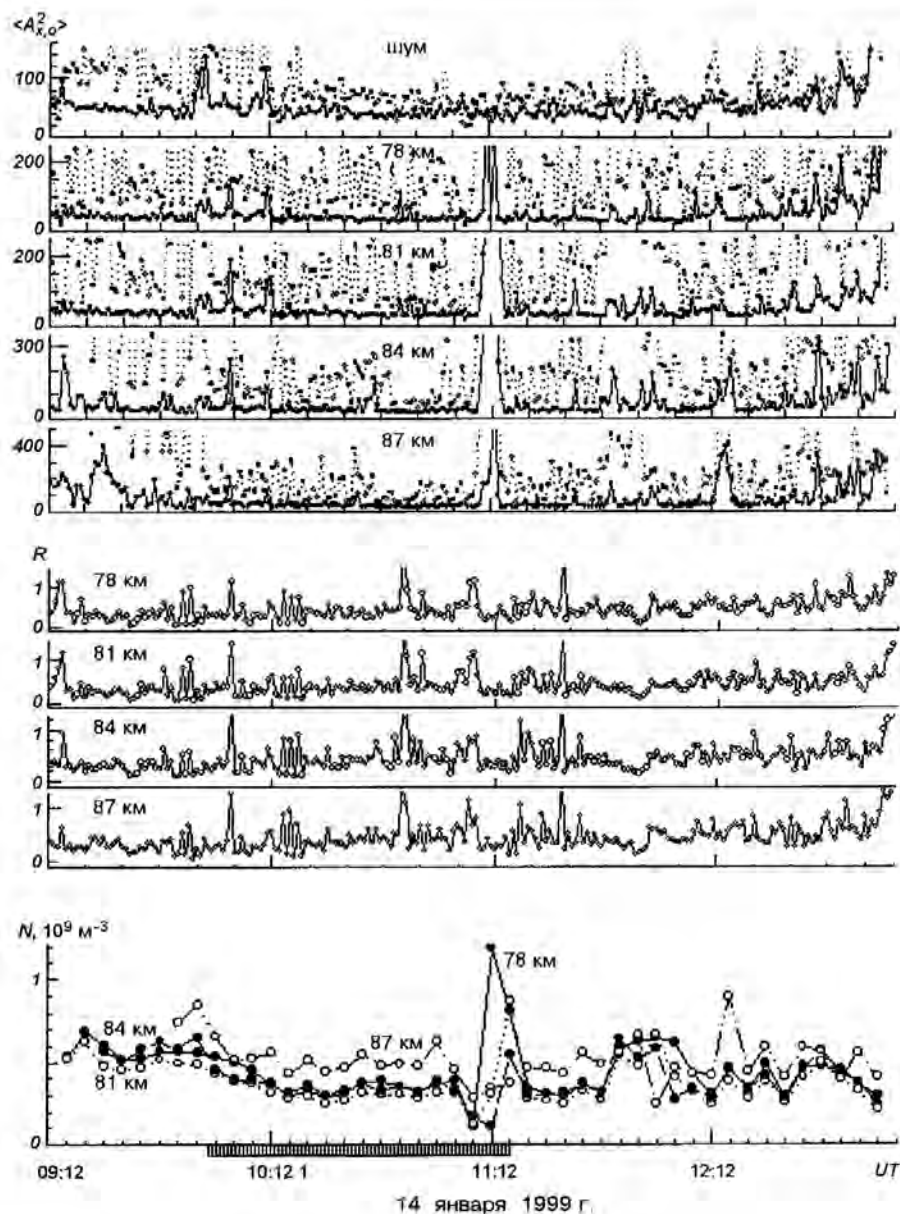


Рис. 7. То же, что и на рис. 5 для вспышки 14.01.1999 г.

высоте 84 км — $N_0 \approx 0.4 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $N \approx 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q/q_0 \approx 5.5$.

Оптические вспышки. Поскольку рассматриваемые вспышки не относятся к типу сильных, то вероятность наличия потоков протонов во время этих событий невелика. Поэтому во время описываемых событий нами не обнаружено никаких особенностей в поведении ЧО-сигналов, радишумов и концентрации электронов на высотах нижней части D-области ионосферы ($z < 78$ км). Перечисленные

выше особенности, на наш взгляд, косвенно связаны с оптическими вспышками. Вероятно, во время таких вспышек в ряде случаев происходило увеличение потока рентгеновского излучения Солнца не вспышечного характера. Это и приводило к появлению отмеченных особенностей, которые в целом сходны с рассмотренными особенностями во время XRA (к сожалению, наблюдательных данных о потоках рентгеновского излучения в эти периоды нет).

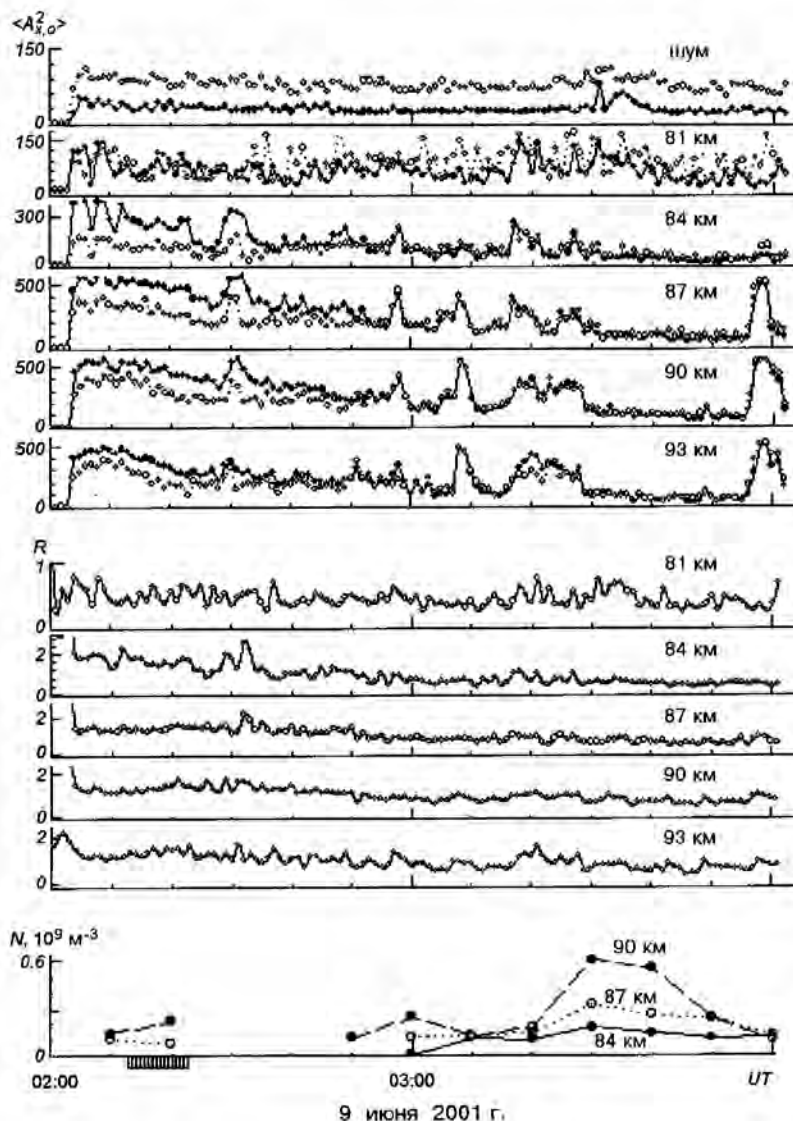


Рис. 8. То же, что и на рис. 5 для вспышек класса ERU 09.06.2001 г.

Выводы

1. Экспериментально изучено и объяснено увеличение в единицы-десятки раз средних интенсивностей ЧО-сигналов в D-области ионосферы и изменений интенсивности радишума, а также их дисперсий во время рентгеновских и слабых оптических вспышек.

2. Обнаружено и объяснено увеличение в единицы раз в эти периоды отношения средних интенсивностей необыкновенной и обыкновенной поляризацій, а также их дисперсий.

3. Обнаружено увеличение на 50–100 % и более концентрации электронов в среднеширотной D-области на высотах 81–87 км в течение примерно 15–35 мин через 15–25 мин после рентгеновских вспышек, которые вызываются, по-видимому, увеличением потока рентгеновского излучения во время XRA. Изменения скорости ионизации составили $q/q_0 \approx 3-5$.

4. Во время оптических вспышек класса SF обнаружен ряд особенностей высотно-временного поведения статистических характеристик ЧО-сигналов, радишумов и концентрации электронов в средне-

широтной D-области на высотах $z > 78$ км, которые часто сходны по характеру с особенностями во время XRA и поэтому, вероятно, обусловлены увеличением потока рентгеновского излучения не вспышечного характера во время ряда таких вспышек.

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

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектные соглашения №№ 1772 и 1773.

1. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэронавигация.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.
2. Гокв 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.
3. Кнут Р., Вюрцберг И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронавигация.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
4. 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.
5. Лангтовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэронавигация.—1976.—16, № 6.—С. 1018—1025.
6. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
7. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.
8. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды.

Перевод с английского под ред. А. Д. Данилова. — Л.: Гидрометеиздат, 1982.—351 с.

9. Черногор Л. Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного излучения // Изв. вузов. Радиофизика.—1985.—28, № 12.—С. 17—26.
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. 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.
12. Gokov A. M., Tyrnov O. F. The lower ionosphere response to some phenomena related to events on the Sun // Proc. of the Intern. Symp. from solar corona through interplanetary space, into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball ISTP satellites, and ground-based observations. Session 1—IV. February 1—4, 2000. Kyiv. — Kyiv., 2000.—P. 141—144.
13. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. — New York: Springer-Verlag, 1978.—366 p.
14. Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment. — New York: Cambridge Univ. Press, 1992.—420 p.
15. 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.
16. Wayne M. McRae, Thomson N. R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—2004.—66, N 1.—P. 77—87.

THE RESPONSE OF THE IONOSPHERIC D REGION TO X-RAY AND OPTICAL FLARES AS OBSERVED BY PARTIAL REFLECTION TECHNIQUE AT MID-LATITUDES

A. M. Gokov, O. F. Tyrnov, L. F. Chernogor

A possible response of the middle latitude ionospheric D region to X-ray and optical flares is studied by the partial reflection technique. The parameters of partial reflection signals, radio noise, and electron density are found to display characteristic features that appear in 15—25 min after X-ray bursts and last for about 15—30 min. We give a possible physical interpretation of the results of the observations with taking into account X-ray emission rates.