

УДК 550.388

А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период магнитной бури 7—11 ноября 2004 г., обусловленные утренним солнечным терминатором

Надійшла до редакції 22.02.2006

Наведено результати експериментальних досліджень методом часткових відбиттів варіацій концентрації електронів у середньширотній D-області іоносфери під час проходження ранішнього термінатора в період магнітної бурі 7—11 листопада 2004 р. Виявлено збільшення концентрації електронів приблизно на 450—700 % як в період проходження уранішнього термінатора, так і після нього. Для пояснення таких подій використана гіпотеза про висипання електронів з магнітосфери, стимульоване термінатором. Обговорюються основні характерні особливості, обумовлені сильним рентгенівським спалахом. Оцінено зміни швидкості іонізації.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что солнечный терминатор является мощным естественным источником различных возмущений в атмосфере и ионосфере Земли [1, 17—19]. В работах [2—4] на основе анализа данных о доплеровском смещении частоты низкочастотного передатчика во время прохождения терминатора через трассу распространения радиоволн было установлено, что терминатор обуславливает движущуюся вслед за ним квазипериодическую структуру электронной концентрации в ионосфере. В настоящее время подавляющая часть публикаций посвящена изучению параметров волновых возмущений в E- и F-областях ионосферы и генерации турбулентности атмосферы [18, 19]. Влияние терминатора на параметры нижней части ионосферы (D-области) изучено значительно меньше, что обусловлено трудностью проведения систематических

измерений на протяжении часов и суток. Известны лишь эпизодические экспериментальные исследования [5, 8, 10, 22, 23]. Среди прочих эффектов нами [10, 22, 23] обнаружено увеличение плотности электронов N в среднеширотной D-области в период прохождения утреннего терминатора. В утренние часы из-за быстрого увеличения потока солнечной радиации прохождение терминатора сопровождается рядом физических процессов в атмосфере. Их энергетика достаточно велика. В работе [23] показано, что энергия и мощность теплового источника возмущений, вызываемого утренним терминатором, весьма большие. Поэтому в период и после прохождения утреннего терминатора следует ожидать ряд характерных изменений в ионосферной плазме (волновые возмущения различных периодов и длительностей, изменения ветрового режима, динамики концентрации электронов и т. д.) не только в области тени или

полутени, но и далеко за их пределами, которые, в зависимости от условий в ионосфере, атмосфере и магнитосфере Земли, будут в целом повторяться ото дня ко дню, обнаруживая при этом новые особенности, обуславливаемые другими факторами (циклические и спорадические изменения геомагнитной и солнечной активностей, солнечные вспышки, магнитные бури и др.). Изучение таких изменений в ионосферной плазме важно как для решения большого числа прикладных задач распространения радиоволн, так и для исследования физических и химических процессов в ней, поскольку эта часть ионосферы все еще остается плохо изученной.

Целью работы является экспериментальное исследование методом частичных отражений изменений концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время прохождения утреннего терминатора в период магнитной бури 7—11 ноября 2004 г. Рассмотрена возможность выпадения электронов из магнитосферы, стимулированного утренним терминатором.

ТЕХНИКА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Зондирование D-области ионосферы выполнялось с помощью радара частичных отражений (ЧО) радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина [27]. Рабочая частота радара составляла $f = 2.31$ МГц, длительность зондирующих импульсов $\tau = 25$ мкс с частотой повторения $F = 10$ Гц, импульсная излучаемая мощность $P_1 = 150$ кВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 40$. Амплитуды смеси ЧО-сигнала и шума обыкновенной и необыкновенной поляризаций (A_{mo} , A_{mx}) после оцифровки с частотой 10 Гц и шагом по высоте 3 км записывались на магнитный носитель. Для выделения амплитуд сигнала A_o , A_x на фоне шумов перед излучением каждого зондирующего импульса осуществлялись две выборки шума A_{no} , A_{nx} в полосе частот 50 кГц.

Измерения A_{mo} , A_{mx} и A_{no} , A_{nx} выполнены для диапазона высот 60—126 км в период магнитной бури 7—11 ноября 2004 г. в следующие периоды местного времени: 01.41—14.30 8 ноября, 01.50—24.00 9 ноября, 00.00—24.00 10 ноября,

00.03—24.00 11 ноября, 14.07—24.00 12 ноября, 00.07—24.00 13 ноября. Выполнены также подобные ЧО-наблюдения в невозмущенных условиях 3, 17 и 24 ноября 2004 г. Обработке и анализу подверглись регистрации длительностью по 7 ч: с 05.00 до 12.00 LT (за 1—1.5 ч до момента прохождения утреннего терминатора в D-области ионосферы и несколько часов после него).

Оценки средних значений интенсивностей ЧО-сигнала $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{no,nx}^2 \rangle$ определялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. По экспериментальным значениям $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ на фиксированных высотах с шагом $\Delta z = 3$ км вычислялось их отношение $R(z) = \langle A_x^2(z) \rangle / \langle A_o^2(z) \rangle$, используемое далее для получения высотно-временных профилей плотности электронов $N(z, t)$ (z — высота над поверхностью Земли, t — время) по методике дифференциального поглощения на основе алгоритма регуляризации [6]. Профили $N(z)$ вычислялись на интервалах усреднения в 10 мин для всего периода наблюдений с погрешностью, не превышающей 30 %. Уточнение профилей $N(z)$ проводилось по методике [7]: высотные профили $R(z)$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5$ и 10 мин, после чего проводилось их высотное сглаживание по трем точкам. Полученные таким образом зависимости $\langle R(z) \rangle$ использовались для получения профилей $N(z)$.

Анализировались высотно-временные вариации $\langle A_{o,x}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{no,nx}^2 \rangle(z, t)$ и $N(z, t)$.

СВЕДЕНИЯ О КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЕ

До начала магнитной бури в период с 3 по 6 ноября 2004 г. по данным спутниковых наблюдений (<http://www.sec.noaa.gov/>) регистрировались плавные вариации параметров солнечного ветра. Значения концентрации, скорости и температуры частиц солнечного ветра изменялись в пределах $0.7\text{—}11 \text{ см}^{-3}$, $320\text{—}460 \text{ м/с}$ и $1.7\text{—}2.3$. Значения величины вектора индукции магнитного поля B изменялись в пределах $1.4\text{—}8.1 \text{ нТл}$, а его составляющая B_z изменялась от -7 до 6.5 нТл . Средние за сутки значения потоков протонов с энергиями, превышающими 1, 10 и 100 МэВ, составляли $(2\text{—}7) \cdot 10^4$, 2000—

4000 и 300—400 м⁻²с⁻¹стер⁻¹ соответственно, а электронов с энергией более 2 МэВ — (1—5) · 10⁵ м⁻²с⁻¹стер⁻¹. Индекс K_p принимал значения от 0 до 4, а индекс геомагнитной активности D_{st} изменялся от -24 до 2 нТл.

В рассматриваемый период на спаде 23-го цикла солнечной активности имели место две сильнейшие магнитные бури с главными фазами 8 и 10 ноября 2004 г.: первая началась примерно в 18 ч 7 ноября и продолжалась примерно до 16 ч 8 ноября; вторая — началась в 22 ч 8 ноября и продолжалась примерно до 14 ч 11 ноября. Значения индекса K_p были увеличены до 8—9, что сопровождалось большими вариациями геомагнитного поля и уменьшением значений индекса D_{st} от -24 до -400. Энергетика бурь была близка к предельной. Энергию магнитной бури E_m удобно оценивать по минимальному значению индекса геомагнитной активности D_{st} из выражения [25]

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

где $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — энергия дипольного геомагнитного поля у поверхности Земли, $B_0 =$

$= 30$ мкТл — значение индукции геомагнитного поля на экваторе; скорректированное значение

$$D_{st}^* = D_{st} - b\sqrt{N_p m_p} v_{sw} + c,$$

$b = 5 \cdot 10^5$ нТл · Дж^{-1/2} м^{3/2}, $c = 20$ нТл, N_p — концентрация протонов, m_p — масса протона, v_{sw} — скорость солнечного ветра. Энергия первой магнитной бури составила $1.7 \cdot 10^{16}$ Дж, (суммарная мощность $5.4 \cdot 10^{11}$ Вт); второй — $1.4 \cdot 10^{16}$ Дж ($1.3 \cdot 10^{12}$ Вт).

Начиная с 7 ноября более чем на 2—3 порядка увеличились потоки протонов и электронов. Повышенные по сравнению со спокойным периодом потоки высыпавшихся протонов регистрировались на спутнике GOES-8 до 17 ноября, а электронов (на спутнике GOES-12) — примерно до 20 ноября. Основные данные, характеризующие состояние космической погоды в этот период, приведены на рис. 1 (по данным www.solar.sec.noaa.gov); а — изменения индекса D_{st} , описывающие основные особенности геомагнитных бурь, и в первую очередь параметры кольцевого тока; б — усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/см²с · ср), измеренные на спутнике GOES-8

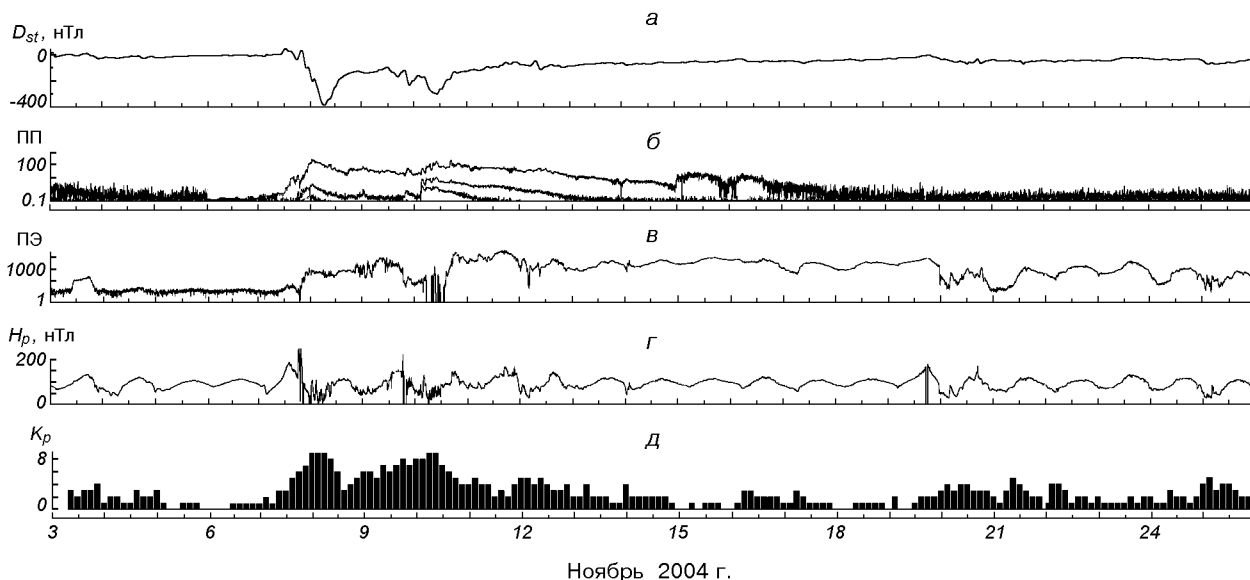


Рис. 1. Изменения параметров космической погоды в ноябре 2004 г.: а — изменения индекса геомагнитной активности D_{st} ; б — усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/см²с · ср), измеренные на спутнике GOES-8 (W75); в — потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; г — усредненные за 5 мин значения H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12; д — значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p

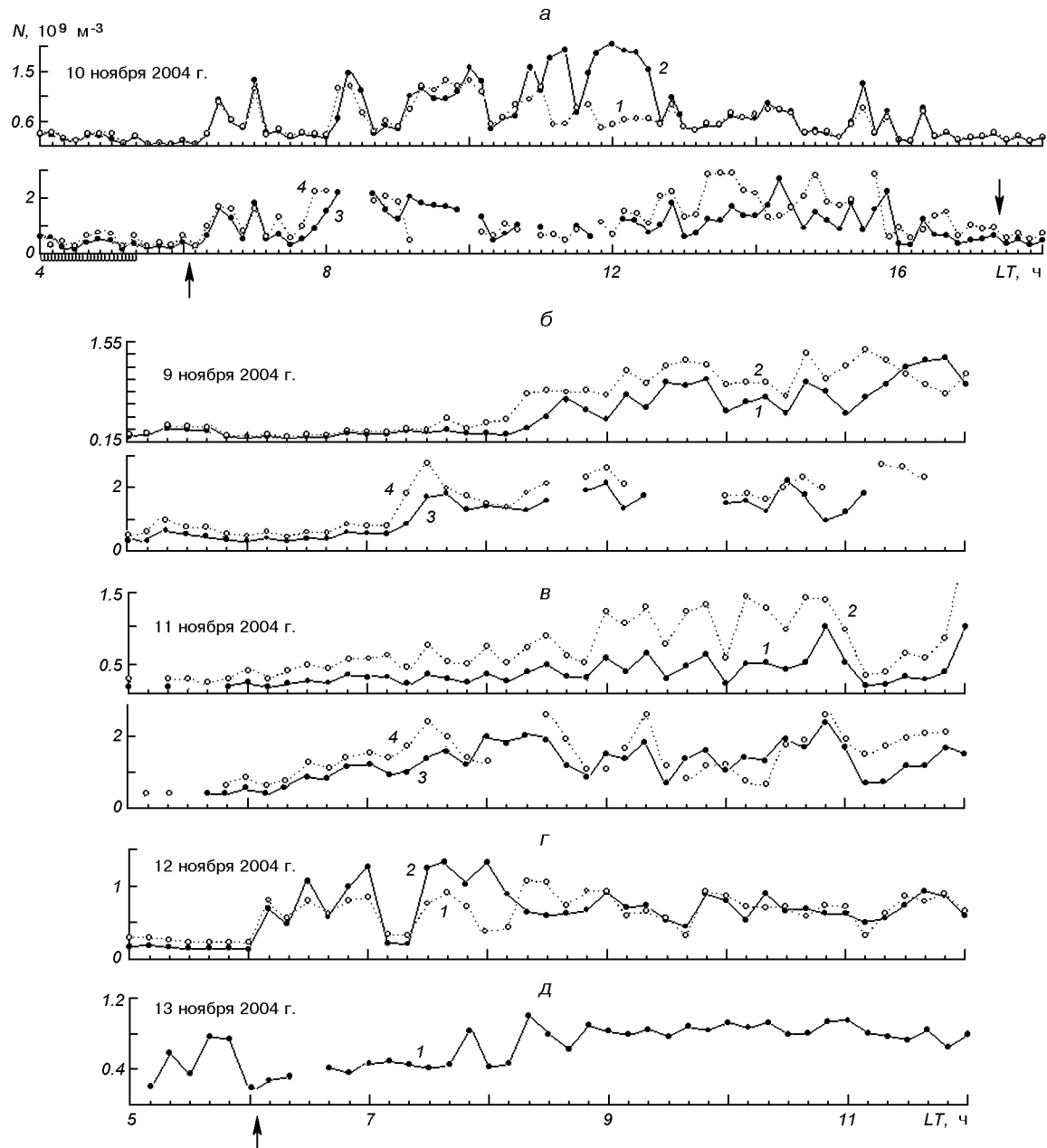


Рис. 2. Высотно-временные изменения концентрации электронов в период восхода Солнца в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь 9–13.11.2004 г.: кривая 1 — для высоты 78 км, 2 — 81 км, 3 — 84 км, 4 — 87 км. Заштрихованной областью на оси времени указано время рентгеновской вспышки X2.5. Стрелки — моменты восхода и захода Солнца на высоте 85 км

(W75); v — потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; z — усредненные за 5 мин значения H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12; d — значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p .

В течение второй фазы магнитной бури 10 ноября значение плотности частиц солнечного ветра не превышало 15 см^{-3} , их скорость и температура уменьшились до 600 км/с и $3 \cdot 10^4 \text{ К}$ соответственно. Величина B_z на протяжении большей части суток имела отрицательное значение с локальным минимумом. Индекс K_p достиг максимального значения 9 в 9–15 ч, а к концу суток его значения уменьшились до 4. Значения индекса D_{st} имели локальный минимум -297 нТл в 14 ч, после чего наблюдалось их увеличение, характеризующее наступление фазы восстановления магнитной бури. В последующие дни наблюдалось постепенное восстановление параметров к их значениям в невозмущенных условиях (рис. 1). После 11 ноября основные параметры солнечного ветра, геомагнитного поля (рассмотренные выше) по данным спутниковых наблюдений соответствовали невозмущенным условиям.

Магнитные бури сопровождалась рядом сильных вспышек: оптических (класса (1–3)п и 3b) и рентгеновских (класса M(2.3–8.9) и X2.5). Для нас интерес представляет сильнейшая рентгеновская вспышка класса X2.5 (она сопровождалась оптической вспышкой класса 3b), происшедшая 10 ноября в 04:04–04:10 (max) — 05:15 LT перед прохождением утреннего солнечного терминатора (восход Солнца на высоте 85 км имел место около 06:02 LT).

Для сравнения мы рассмотрим вариации концентрации электронов, полученные нами экспериментально на той же аппаратуре в невозмущенных условиях 3, 17 и 24 ноября 2004 г., а также во время магнитных бурь меньшей интенсивности 30–31 мая 2003 г. ($K_p \approx 5$) и 17 сентября 2003 г. ($K_p \approx 5$ –7).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены высотно-временные изменения концентрации электронов 9–13 ноября

2004 г. Значения концентрации электронов получены для высотных уровней 78–87 км (заметьте, что здесь и далее привязка по высоте соответствует заднему фронту отражения излученного импульса, т. е. к нижней границе рассеивающего объема). Рассмотрим их основные особенности. На рис. 2, а видны вариации $N(z, t)$ после сильнейшей рентгеновской вспышки класса X2.5. Вспышка окончилась за 45–50 мин до момента восхода Солнца на высотах D-области ионосферы (80–100 км). Во время вспышки эта часть ионосферной плазмы была еще не освещена Солнцем, и прямого попадания солнечного излучения не было. Квазипериодическое изменение концентрации электронов началось через 5–10 мин после момента прохождения солнечного терминатора. Увеличение N в течение 50–55 мин составляло в среднем 400–600 %; максимальная амплитуда составляла 800–1700 % на высотах 78 и 81 км и 450–550 % на высотах 84 и 87 км. Важно, что квазипериодические изменения N наблюдались в течение всего дня. В экспериментах 9, 11 и 13 ноября подобных изменений не было (рис. 2, б, в, д). В этих экспериментах отмечены в целом характерные для среднеширотной D-области ионосферы изменения концентрации электронов в период прохождения терминатора и после него (плавное или квазипериодические увеличения значений N через десятки минут) [8, 10, 22, 23]. В эксперименте 12 ноября квазипериодические изменения N в нижней части D-области начались, как видно из рис. 2, з, через несколько минут после момента прохождения терминатора в этой области ионосферы и продолжались более 180 мин.

Характерным для рассматриваемых экспериментов было то, что ЧО-сигналы часто регистрировались начиная с высоты 78 км (иногда — с 72 км), чего в обычных невозмущенных условиях мы не наблюдали. Вероятно, это может быть обусловлено увеличением обычно небольшой концентрации электронов и сильной турбулизацией (а также нестабильным состоянием) ионосферной плазмы в D-области ионосферы в период магнитной бури.

На рис. 3 приведены высотно-временные вариации концентрации электронов в период прохождения утреннего терминатора в среднеширотной D-области ионосферы до (3 ноября) и

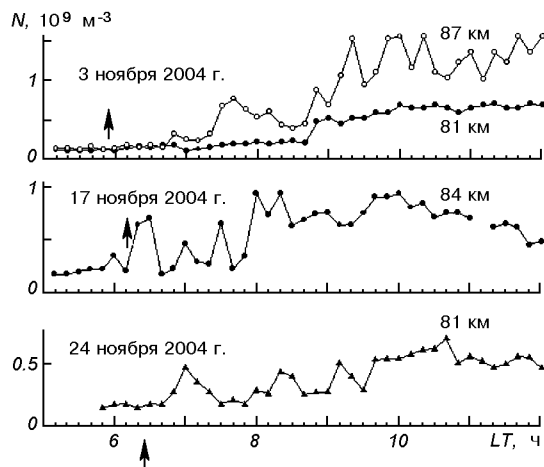


Рис. 3. Высотно-временные изменения концентрации электронов в период восхода Солнца 3, 17 и 24 ноября 2004 г. в среднеширотной D-области ионосферы. Стрелки — моменты восхода и захода Солнца на высоте 85 км

после (17 и 24 ноября) рассматриваемой магнитной бури. Видно, что 3 и 24 ноября поведение $N(z)$ соответствует типичному [8, 10, 22, 23]. 17 ноября через несколько минут после прохождения терминатора на высоте 84 км имело место увеличение концентрации электронов в среднем на 100—200 % (максимальная амплитуда 400 %) длительностью около 30 мин с последующими квазипериодическими изменениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работах [8, 10, 22, 23] было установлено, что примерно в 25 % случаев в невозмущенных условиях во время прохождения утреннего терминатора или вскоре после него (через 30—60 мин) в D-области ионосферы концентрация электронов увеличивается на 50—150 %. В эксперименте 17 ноября 2004 г. увеличение $N(z)$ было существенно большим (~400 %). Возможной причиной такого поведения $N(z)$ могли быть высыпания высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли. В пользу этой гипотезы говорит тот факт, что такие высыпания наблюдаются в течение 4—10 сут после магнитной бури [9, 26]. Анализ геофизических данных, приведенных на рис. 1, показывает наличие существенно повышенных значений потоков

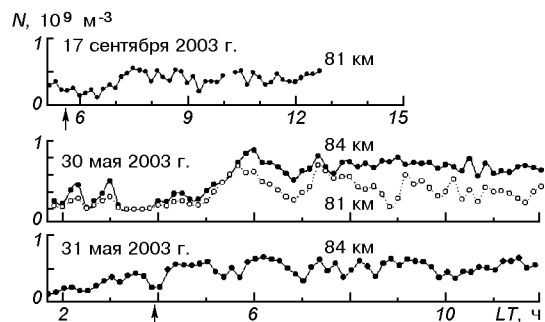


Рис. 4. Высотно-временные изменения концентрации электронов в период восхода Солнца во время магнитных бурь 30, 31 мая и 17 сентября 2003 г. в среднеширотной D-области ионосферы. Стрелки — моменты восхода и захода Солнца на высоте 85 км

высыпающихся электронов. Известно, что насыщенность радиационных поясов высокоэнергичными электронами в периоды магнитных бурь выше, чем в обычных условиях. Солнечный терминатор в этом случае выступает в качестве спускового механизма, инициирующего высыпания электронов из радиационного пояса. Другой вероятной причиной такого поведения $N(z)$ может служить передача возмущений в пространстве вследствие воздействия терминатора в предшествующей по времени и пространству (широте) области ионосферной плазмы.

В эксперименте 13 ноября (рис. 2, д) в нижней части D-области ионосферы наблюдались повышенные примерно на 200—400 % по сравнению с невозмущенными условиями значения $N(z)$ до времени прохождения утреннего терминатора. В последующее время поведение $N(z)$ соответствовало типичным невозмущенным условиям. Такое поведение $N(z)$, как и в предыдущем случае, могло быть вызвано высыпанием высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли после магнитной бури. В пользу этой гипотезы говорит тот факт, что в этот день мы часто регистрировали ЧО-сигналы, начиная с высотных уровней 72—75 км.

Анализ вариаций концентрации электронов во время двух других бурь (рис. 4) показал, что 17 сентября 2003 г. поведение $N(z)$ в D-области ионосферы было типичным — без выраженных изменений в период прохождения терминатора.

В другом случае, 31 мая 2003 г., наблюдалось квазипериодические всплески $N(z)$ в течение нескольких часов, начавшиеся примерно за 50—60 мин до момента прохождения терминатора. Максимальное увеличение $N(z)$ составляло 400—600 %.

Важно отметить, что увеличение концентрации электронов утром 10 ноября после мощной рентгеновской вспышки в несколько раз превысило увеличение $N(z)$ во время других рассмотренных магнитных бурь, а также в спокойные периоды.

Подсуммируем две основные особенности высотно-временных вариаций концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в период прохождения утреннего терминатора во время магнитной бури:

— после мощной рентгеновской вспышки во время прохождения терминатора утром концентрация электронов существенно увеличивается по сравнению с ее увеличением в невозмущенных условиях: максимальное увеличение N составило примерно 800—1700 % на высотах 78 и 81 км и 450—550 % на высотах 84 и 87 км;

— во время магнитных бурь прохождение терминатора сопровождается увеличением концентрации электронов в 2—4 раза по сравнению с невозмущенными условиями (когда значения N увеличиваются на протяжении десятков минут).

Перечислим кратко процессы в D-области ионосферы, сопутствующие прохождению терминатора и попытаемся оценить, какие из них могут быть ответственны за наблюдаемое при прохождении терминатора и после него — увеличение концентрации.

1. Ионизация молекул NO рассеянным излучением в линии L_{α} . При этом изменение концентрации электронов составляет $\Delta N \leq 10^7$ — 10^8 м^{-3} , что не может объяснить наблюдаемое увеличение N .

2. Ионизация молекул O_2 ($^1\Delta_g$) рассеянным солнечным излучением на длине волны 102.7—111.8 нм. При этом значение ΔN также не превышает 10^7 м^{-3} .

3. Движение областей больших градиентов параметров атмосферы в утренние часы. При этом изменение концентрации электронов может быть достаточно большим, но скорость пе-

редачи возмущений концентрации электронов по широте, по-видимому, недостаточна, чтобы обеспечивать наблюдаемые временные задержки.

4. Взаимодействие терминатора с неоднородностями атмосферы. Этот механизм достаточно инерционен и может обуславливать регистрируемые возмущения N с большой временной задержкой порядка десятков — сотен минут относительно момента прохождения терминатора. Отметим, что механизм еще очень мало изучен.

5. Радиационная неустойчивость, вызванная большим значением градиента потока радиации, который обусловлен «плоскостойкостью» коэффициента ее поглощения.

6. Усиление неустойчивости Рэлея — Тейлора в области терминатора.

7. Наличие магнитосопряженного терминатора, который вызывает поток фотоэлектронов из магнитосопряженной области.

8. Ионизация потоками энергичных электронов.

Из перечисленных причин наиболее вероятной причиной представляется поток электронов из радиационного пояса. Анализ данных о космической погоде (рис. 1) подтверждает эту гипотезу: в рассматриваемый период потоки выпадающих из магнитосферы высокоэнергичных частиц (электронов и протонов) были повышенными в несколько раз по сравнению с невозмущенными условиями.

Роль среднеширотного выпадения заряженных частиц из магнитосферы неоднократно обсуждалась. 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 $\varepsilon \geq 40 \text{ кэВ}$ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт 45—60° [13—15, 20, 21, 23]. 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 [11—15, 20, 21, 23, 24]. Электроны и протоны могут играть заметную роль в ионизации нижней ионосферы на высотах 50—100 км ночью и в периоды возмущений различной природы естественного (сол-

нечные 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 и т. д.).

Высыпание может возникнуть в результате перераспределения захваченных частиц по питч-углам, к чему приводят либо искривления конфигурации силовых линий поля (геомагнитных ловушек), либо уменьшение «поперечной» энергии $\varepsilon_{\perp}$ заряженных частиц. Кроме того, в процессе становления и релаксации возмущений тензора проводимости ионосферной плазмы поле поляризации E_p обладает и вихревым компонентом E_r . При прохождении терминатора возможны существенные изменения тензора проводимости ионосферной плазмы и вариации составляющих электрического поля E_p и E_r , а значит и $\varepsilon_{\perp}$.

Оценим параметры потоков на основе предложенного механизма о высыпании высокоэнергичных электронов из радиационного пояса.

По экспериментальным значениям концентрации оценим скорость ионизации в невозмущенных и возмущенных условиях: $q_0 = \alpha_0 N_0^2$ и $q = \alpha N^2$ соответственно. На высотах $z > 75$ км в D-области ионосферы при рекомбинации электронов преимущественно с ионами NO^+ и O_2^+ коэффициент α изменяется примерно от 10^{-11} до $2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ (далее полагаем $\alpha \approx \alpha_0$, т. е. пренебрегаем нагревом атмосферы при высыпании электронов). Плотность P_1 потока мощности P частиц с энергией ε определим как $P_1 \approx 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q = \varepsilon p$, где $\Delta q = q - q_0$, $\varepsilon_i \approx 35$ эВ — энергия одного акта ионизации, Δz — диапазон высот эффективного поглощения потока p электронов с данной энергией ε (это выражение

справедливо, если пренебречь распределением высыпающихся электронов по энергиям) [20, 21]. Мощность P и энергию E электронов, высыпающихся на площади S при длительности высыпаний Δt , можно оценить из соотношений $P = P_1 S$ и $E = P \Delta t$. В расчетах на основе анализа ЧО-сигналов и $N(z, t)$ полагали $S = 10^{14} \text{ м}^2$.

Результаты расчетов для обсуждаемых экспериментов приведены в таблице. Для удобства расчетов принималось $\Delta z = 10$ км, полагалось также, что энергия высыпающихся электронов $\varepsilon > 40$ кэВ, что вполне обоснованно. Расчеты показали, что значения потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время магнитных бурь составляли $p \approx (0.6-0.8) \cdot 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Значения потоков электронов 10 ноября после сильной рентгеновской вспышки оказались в несколько раз выше, чем в другие периоды. Результаты расчетов хорошо согласуются с известными данными о потоках электронов, полученными экспериментально или оцененными во время возмущений различной природы [9, 11, 13—15, 20, 21, 23, 24]. Плотности потоков электронов и их энергетические характеристики в соответствии с теоретическими расчетами [20] вполне могут обеспечить наблюдаемое увеличение концентрации электронов на высотах 78—87 км.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально обнаружено существенное по сравнению с невозмущенными условиями увеличение концентрации электронов в течение примерно 50—60 мин в среднеширотной D-области ионосферы примерно через 5—10 мин после момента прохождения утреннего термина-

Параметры потоков электронов

Дата	z , км	N_0 , 10^8 м^{-3}	N , 10^8 м^{-3}	q_0 , $10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$	q , $10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$	Δq , $10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$	P_1 , $\text{мкДж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	p , $10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	ε , МэВ	P , ГВт	E , 10^{-12} Дж	Δt , с
10.11.2004	81	1.3	10.5	0.17	11	10.8	37	1.7	0.15	3.7	13	3600
11.11.2004	87	4.5	20	2.0	40	38	129	8.8	0.1	12.9	46	3600
12.11.2004	84	2.5	14	0.6	19.6	19	65	2.9	0.15	6.5	23	3600
13.11.2004	78	1.8	7.6	0.3	5.6	5.3	18	0.8	0.15	1.8	4.3	2400
17.11.2004	84	1.8	7.6	0.3	5.6	5.3	18	0.8	0.15	1.8	8.6	4800
31.05.2003	84	1.5	6.5	0.23	4.23	4.0	14	0.6	0.15	1.4	5.0	3600

тора после мощной рентгеновской вспышки: максимальное увеличение N составило примерно 800—1700 % на высотах 78 и 81 км и 450—550 % на высотах 84 и 87 км.

2. В период магнитных бурь обнаружено увеличение значений концентрации электронов примерно в 2—4 раза по сравнению с невозмущенными условиями во время характерных для терминаторного периода изменений концентрации электронов (в периоды увеличения значений N в течение десятков минут).

3. В рамках гипотезы о высыпании электронов из магнитосферы в период магнитной бури оценены энергетические характеристики потоков заряженных частиц и показана возможность стимулированного терминатором высыпания электронов. Оказалось, что значения потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время магнитных бурь составляли $p \approx (0.6—8.8) \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Значения потоков электронов полученные для 10 ноября 2004 г. после сильной рентгеновской вспышки, оказались в несколько раз выше по сравнению с другими периодами. Полученные значения потоков хорошо согласуются с теоретическими оценками и с известными данными о потоках электронов, полученными экспериментально 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 с применением метода регуляризации.

1. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжев В. И. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1988.—26, № 5.—С. 837—841.
2. Безродный В. Г., Блюх П. В., Фалькович И. С. и др. О неоднородностях нижней ионосферы, движущихся за терминатором // Тез. докл. семинара КАПГ по физике страто-мезосферы и нижней ионосферы. — М.: Наука, 1977.—С. 52.
3. Белей В. С., Галушко В. Т., Ямпольский Ю. М. Экспериментальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений на параметры КВ радиосигнала. — Харьков, 1983.—16 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т радиоэлектроники; № 231).
4. Белей В. С., Галушко В. Т., Ямпольский Ю. М. и др. Распространение радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1983.—82 с.
5. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А. Искусственные периодические неоднородности в нижней части E-области на восходе и заходе Солнца // Геомагнетизм и аэронавигация.—1986.—26, № 5.—С. 837—841.
6. 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.
7. 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.
8. Гоков А. М., Гритчин А. И. Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиощумов // Геомагнетизм и аэронавигация.—1994.—34, № 2.—С. 169—172.
9. Гоков А. М., Гритчин А. И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Космические исследования.—1996.—34, № 6.—С. 585—589.
10. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Некоторые особенности динамики нижней ионосферы, обусловленные солнечным терминатором // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—2002.—№ 12.—С. 26—32.
11. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события SPE // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК.—2003.—9, № 2.—С. 86—90.
12. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации электронной концентрации в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 5/6.—С. 12—21.
13. Кнут Р., Вюрцбергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронавигация.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
14. 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.
15. Лаштовичка 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.
16. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
17. Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. — Алма-Ата: Наука, 1983.—192 с.
18. Сомсиков В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация.—1991.—31, № 1.—С. 1—12.
19. Сомсиков В. М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэронавигация.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.

- номия.—1992.—32, № 3.—С. 55—59.
20. 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, N 2.—P. 191—197.
 21. Danilov A. D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagnetism and Aeronomy.—1999.—1, N 3.
 22. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Some features of lower ionosphere dynamics caused by the morning solar terminator // J. Atmos. Electricity.—2002.—22, N 1.—P. 13—21.
 23. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Peculiarities of the middle latitude ionospheric d-region dynamics, caused by the solar terminator // Telecommunications and Radio Engineering.—2003.—59, N 3/4.—P. 159—172.
 24. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Middle latitude ionospheric d-region responses to solar events as investigated by partial reflection technique // Telecommunications and Radio Engineering.—2003.—59, N 3/4.—P. 114—134.
 25. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99A, N 4.—P. 5771—5792.
 26. Lauter E. A. The post-storm ionization in the upper mesosphere // J. Meteorol.—1977.—N 6.—P. 67—73.
 27. 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 STORM ON
7—11 NOVEMBER 2004, CONDITIONED BY MORNING
SOLAR TERMINATOR**

A. M. Gokov, O. F. Tyrnov

We present the results of experimental investigations of the electron density variations in the middle latitude ionospheric D-region during passing morning solar terminator in the period of magnetic storm on 7—11 November 2004 by the partial reflection radar. It is found an enhancement of the electron density of about 450—700 % both in the period of passing morning solar terminator and during tens minutes after this event. To explain such events, a hypothesis on electron precipitations from the magnetosphere stimulated by morning solar terminator is used. Estimation of the ionization rate is made. On the basis of the experimental data on electron density changes over the electron precipitation periods, the corresponding fluxes are estimated: $p \approx (0.6—8.8) \cdot 10^9 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.