

ISSN 0373-2428

ЗР
АРУБЕЖНАЯ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
УСПЕХИ
СОВРЕМЕННОЙ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

№ 12
2002

<http://www.webcenter.ru/~iprzhr/>

*С Новым Годом
и Рождеством!*

Внимание!
С 2003 г.
журнал будет
выходить под названием
“Успехи современной радиоэлектроники”



Тел./факс: (095) 925-9241
E-mail: iprzhr@online.ru
<http://www.webcenter.ru/~iprzhr/>

Журнал переводится на английский язык
и издается компанией Begell House, Inc. под названием
TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70325 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА “РОСПЕЧАТЬ”: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

Некоторые особенности динамики нижней ионосферы, обусловленные солнечным терминатором

А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов

Экспериментально методом частичных отражений исследованы изменения плотности электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время прохождения утреннего солнечного терминатора. Обнаружено увеличение плотности электронов примерно на 50–150 % как во время прохождения терминатора, так и после него. Для объяснения таких событий предложена гипотеза о стимулированном терминатором выпадении электронов из магнитосферы.

Using the partial reflection technique, there are carried out experimental investigations of electron density variations in the middle latitude D-region of the ionosphere during the morning solar terminator passage. The electron density was found to increase by about 50–150% both during the terminator passage and after it. In order to explain such events, a hypothesis of electrons precipitating from the magnetosphere, which is caused by the solar terminator, was suggested.

Введение

Утренний солнечный терминатор (далее — терминатор) представляет собой движущуюся со скоростью вращения Земли область резких изменений равновесного состояния атмосферы, поэтому логично ожидать, что он является мощным естественным источником различных возмущений в атмосфере и ионосфере Земли. Изучению таких явлений посвящен ряд работ (например, [1–9]). Одни из первых работ, в которых экспериментально были обнаружены эффекты, обусловленные терминатором, — это [6–8]. В них на основе анализа данных о доплеровском смещении частоты низкочастотного передатчика во время прохождения терминатора через трассу распространения радиоволн установлено, что терминатор обуславливает движущуюся вслед за ним квазипериодическую структуру электронной концентрации в ионосфере. Последующие работы посвящены, в основном, изучению параметров волновых возмущений в E- и F-областях ионосферы и генерации турбулентности атмосферы (см. [2, 3]). Наименее изучено влияние терминатора на параметры нижней части ионосферы — D-области, что обусловлено трудностью проведения длительных непрерывных (часы-сутки) систематических измерений. Среди прочих эффектов нами в [5] было обнаружено увеличение плотности электронов N в D-области при прохождении терминатора.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований изменений плотности электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время прохождения терминатора, полученные на основе измерений, выполненных с помощью метода частичных отражений (ЧО) [10]. Рассмотрена возможность выпадения электронов из магнитосферы, стимулированного терминатором.

1. Общие сведения о терминаторе

Оптическая ширина терминатора, определяемая интервалом времени появления над горизонтом полного диска Солнца в оптическом диапазоне, составляет около 100 км, поэтому характерный период прохождения оптического терминатора примерно 5 мин. Переходные процессы в области терминатора, определяющие изменение температуры атмосферы, имеют больший период, что обусловлено характером высотного распределения поглощающих солнечную энергию компонент атмосферы и поэтому ширина области терминатора будет заметно больше ($L \sim 1000$ км) и характерное время прохождения в приэкваториальной области $\Delta t \sim 30$ мин [3]. В утренние часы из-за быстрого возрастания потока солнечной радиации прохождение терминатора сопровождается рядом физических процессов в атмосфере. Их энергетика достаточно велика. Подобно тому, как это сделано в [11] для затмения Солнца, оценим изменение внутренней энергии атмосферного газа объемом V и массой m :

$$\Delta E = C m \Delta T = C \rho V \Delta T = \frac{\pi}{4} C \rho d^2 \Delta z \Delta T.$$

Здесь ρ — плотность воздуха; Δz — толщина нагреваемого слоя воздуха; C — удельная теплоемкость воздуха.

Полагая, что у поверхности Земли $\rho = 1,3$ кг/м³, $d = 1000$ км, $C = 10^3$ Дж/(кг·К), $\Delta z = H = 8$ км (H — приведенная высота атмосферы), $\Delta T = 5$ К, получим $\Delta E = 4,1 \cdot 10^{15}$ Дж. Предположим, что увеличение температуры имеет место в течение времени Δt не менее 30 мин. При этом средняя мощность $P = \Delta E / \Delta t$ составляет около $2,3 \cdot 10^{15}$ Вт. Получен-

ная оценка ΔE превышает энергию 200-мега-тонной термоядерной бомбы, а оценка мощности P , более чем на порядок превышающая мощность, потребленную человечеством в 2000 г. Как видно из этих сравнений, энергия и мощность теплового источника возмущений, вызываемого утренним терминатором, весьма значительны.

Оценки изменений удельной внутренней энергии Δe и удельной мощности p этого источника дают $\Delta e = \Delta E/V \approx 4,5 \cdot 10^3$ Дж/м³ и $p = P/V = \approx 2,5$ Вт/м³. Примерно такие удельные характеристики имеют мощные шквалы и ураганы (тайфуны), хотя их энерговыделение связано с движением масс воздуха.

Приведенные оценки относятся к приэкваториальной области. В средних широтах размер возмущаемой терминатором области больше [3] вследствие наклона оси вращения Земли. Кроме того, существует зависимость параметров терминатора от сезона. Так, согласно [1], на определенной широте ширина области терминатора меняется примерно на 10% от лета к зиме. Так как различие температур по обе стороны поверхностей терминатора, т. е. в освещенной и затемненной областях, тоже зависят от сезона, амплитуда возмущения и другие его характеристики также должны заметно меняться в течение года.

Поскольку продолжительность Δt увеличения температуры воздуха — около 30–60 мин, продольный размер возмущенной области атмосферы составляет $L = V\Delta t$. Полагая, что в средних широтах скорость терминатора $V = 350$ м/с, получим $L = 1300$ км. Пусть поперечный размер этой области того же порядка. Тогда изменение внутренней энергии в области атмосферы радиусом $L/2 \approx 700$ км при среднем значении $\Delta T = 5$ К составляет $2 \cdot 10^{19}$ Дж. Ему соответствует средняя мощность $6 \cdot 10^{15}$ Вт. Примерно такую же энергию имеет крупнейший циклон [12], а его мощность — около $3 \cdot 10^{14}$ Вт, что более чем на порядок меньше приведенной выше мощности.

С увеличением высоты z энергетические характеристики уменьшаются пропорционально плотности газа $\rho \sim \exp(-z/H)$. Так, в озоносфере (средняя высота 45 км) ρ уменьшается на три порядка. При тех же ΔT и H энергетические характеристики процесса, связанного с терминатором, уменьшатся также на три порядка.

Таким образом, энергия, мощность и их удельные значения атмосферных процессов, вы-

званных утренним терминатором, имеют большую величину. Поэтому есть основания считать, что терминатор может вызывать возмущения в атмосфере не только в области тени или полутени, но и далеко за их пределами. Поскольку в области широт $\pm 45^\circ$ скорость терминатора больше звуковой, генерируется ударная волна плотности. Кроме того, при прохождении терминатора следует ожидать проявления (или усиления) атмосферно-ионосферно-плазмосферных связей.

2. Техника, методика измерений и обработки данных

Для зондирования D -области ионосферы во время прохождения терминатора использовался радар частичных отражений [13]. Основные параметры аппаратуры: рабочие частоты $f = 2 \dots 4$ МГц, длительность зондирующих импульсов $\tau = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1 \dots 10$ Гц, импульсная излучаемая мощность $P_1 = 150$ кВт, коэффициент усиления антенны $G = 40 \dots 150$. Амплитуды смеси ЧО сигнала и шума обыкновенной и необыкновенной поляризаций A_{co} , A_{ce} после оцифровки с частотой 1 Гц записывались на магнитный носитель. Для выделения амплитуд сигнала A_o , A_e на фоне шумов перед излучением каждого зондирующего импульса осуществлялись 2–6 выборок шума A_{no} , A_{ne} .

Измерения A_{co} , A_{ce} и A_{no} , A_{ne} выполнены в диапазоне высот 60–111 км в различные сезоны вблизи г. Харькова ($\varphi = 49,5^\circ N$, $\lambda = 36,3^\circ E$) в период 1990–2000 гг. Длительность непрерывных измерений составляла не менее 5–8 ч (по 2–4 ч до и после прохождения терминатора). Общее число сеансов наблюдений — около 200.

Оценки средних величин интенсивностей ЧО сигнала $\langle A_o^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{no,ne}^2 \rangle$ осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10%. По экспериментальным данным об $\langle A_o^2 \rangle$ вычислялось их отношение $R = \langle A_o^2 \rangle / \langle A_{no,ne}^2 \rangle$, используемое далее для получения высотно-временных профилей плотности электронов $N(z, t)$ (z — высота (км) над поверхностью Земли, t — время) по методике дифференциального поглощения с применением алгоритма регуляризации [14] по Тихонову [15]. Профили $N(z)$ вычислялись на интервалах усреднения в 10 мин для всего периода наблюдений с погрешностью, не превышающей 30 %.

Для оценки медленных вариаций $\langle A_{\text{от}}^2 \rangle$ или $N(z, t)$ использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье на интервале времени 64 или 128 мин.

3. Экспериментальные результаты

Анализ данных о $N(z, t)$ показал, что примерно в 25% случаев во время прохождения терминатора или вскоре после него (через 30–60 мин) имеет место увеличение плотности электронов на 50–150 %.

В качестве типичного примера рассмотрим два эксперимента, в которых наблюдалось необычное поведение как характеристик ЧО сигналов и шумов, так и плотности электронов в верхней части D -области ионосферы.

На рис. 1,а и б приведены временные зависимости $\langle A_{\text{от}}^2 \rangle$, на рис. 2,а и б — соответствующие им зависимости $R(t)$, а на рис. 3 — примеры высотно-временных изменений N (момент прохо-

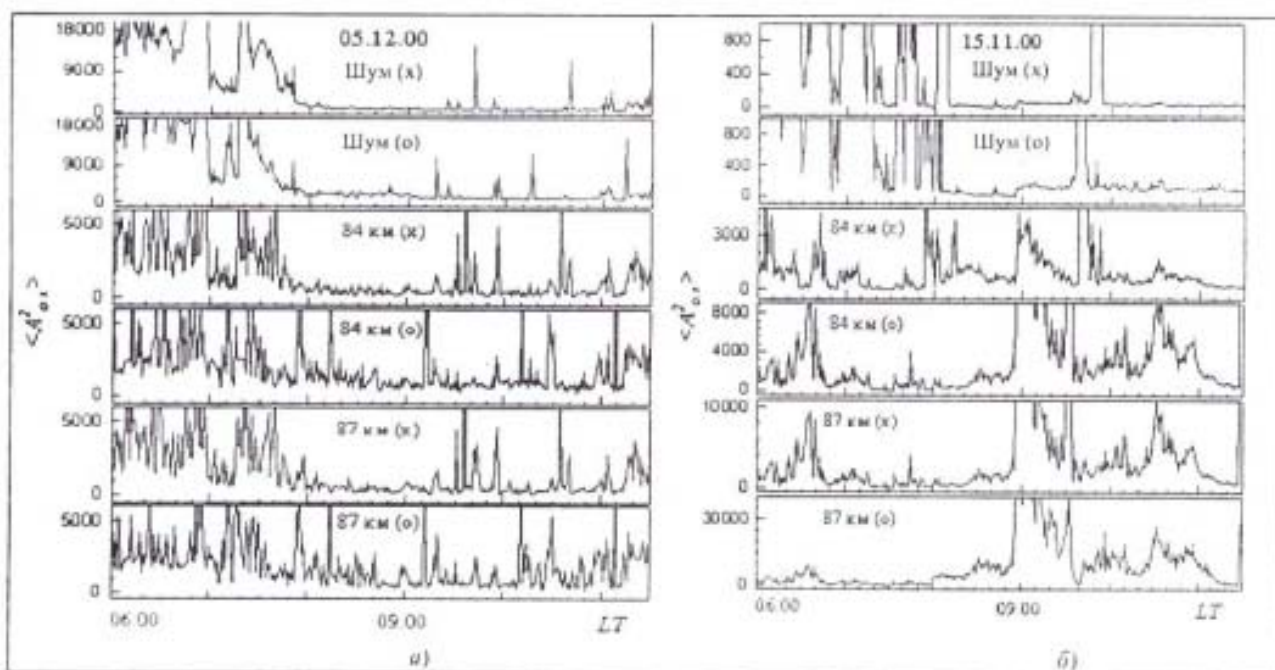


Рис. 1. Высотно-временные зависимости $\langle A_{\text{от}}^2 \rangle$ во время прохождения терминатора

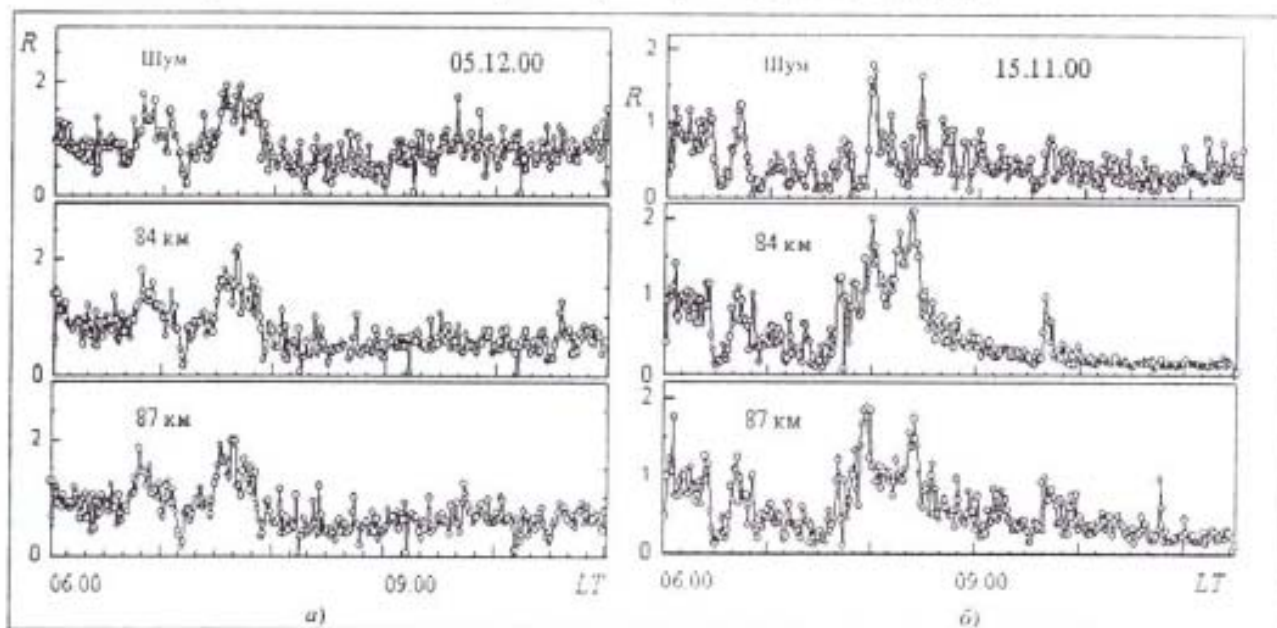


Рис. 2. Высотно-временные зависимости R во время прохождения терминатора

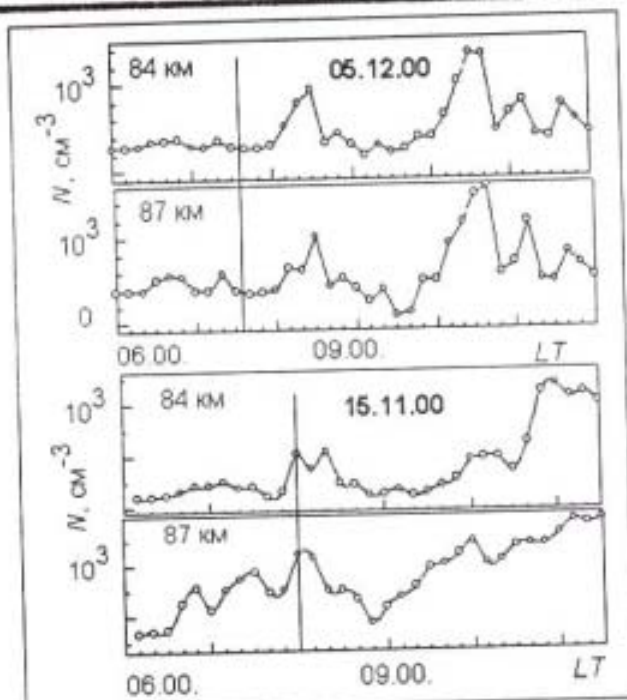


Рис. 3. Высотно-временные вариации плотности электронов во время прохождения терминатора

ждения терминатора отмечен вертикальной линией).

Отметим основные их особенности, которые характерны и для других экспериментов.

1. Уменьшение в несколько раз интенсивности шума и ее дисперсии. Этот процесс начинается сразу после начала прохождения терминатора или за некоторое время (~ 30 мин) до него.

2. Увеличение средних интенсивностей ЧО сигнала и его дисперсии сразу после (иногда через 10–30 мин) или примерно за 20–30 мин до прохождения терминатора длительностью 30–90 мин.

3. Уменьшение в 1,5–2 раза отношения R после и наличие квазипериодов в зависимостях $R(t)$ до момента прохождения терминатора.

4. Рост N во время прохождения терминатора (в эксперименте 15.11.2000 рост N наблюдается вблизи момента прохождения терминатора, а 05.12.2000 — примерно через 40 мин после него). Длительность таких событий составляет 30–90 мин.

На рис. 4 приведен пример профилей $N(z)$, полученных в измерениях 22.03.1989 после прохождения терминатора (кривые 1–3 получены последовательно в течение 30 мин). Из рисунка видно, что за этот промежуток времени профили $N(z)$ во всем интервале высот существенно не менялись.

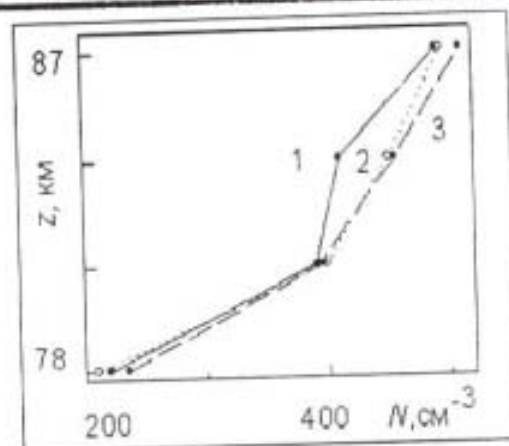


Рис. 4. Профили плотности электронов, полученные во время прохождения терминатора 22.03.89

4. Результаты расчетов

Обсудим процессы в D -области ионосферы, сопутствующие прохождению терминатора.

Уменьшение средних значений интенсивности шума и ее дисперсии можно объяснить так. Шум в диапазоне частот порядка 2–3 МГц представляет собой наложение сигналов от радиосредств, работающих в этом диапазоне. Прохождение терминатора сопровождается ростом концентрации электронов и поглощения радиосигналов в ионосфере на значительных площадях с характерным размером L в несколько тысяч километров. 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 в предвечернее время.

Для объяснения увеличения средних значений интенсивности ЧО сигнала и ее дисперсии учтем, что (см., например, [16])

$$\langle A_{\text{ш}}^2 \rangle > \frac{\overline{\Delta N^2}}{\Omega_{\pm}^2 + \nu^2} \exp\{-4K_{\text{ш},\alpha}\},$$

где $\overline{\Delta N^2}$ — интенсивность флуктуаций N ; $\Omega_{\pm} = \omega \pm \omega_L$; $\omega_L = 2\pi f_L$; $f_L = f_B \cos \alpha = 1,3$ МГц; f_B — гирочастота электронов; α — угол между вертикалью и вектором индукции геомагнитного поля; ν — частота соударений электронов с нейтралами; $K_{\text{ш},\alpha}$ — интегральный коэффициент поглощения ЧО-сигнала χ - и σ -поляризации.

Прохождение терминатора приводит к следующим процессам: 1) увеличению N , а значит и

K_{x0} ; 2) увеличению температуры газа, а значит и v ; 3) к значительному увеличению $\overline{\Delta N^2}$ (см. [16]).

Все три фактора не могут полностью объяснить увеличение $\langle A_{x0}^2 \rangle$. Для этого необходимо, чтобы вклад последнего был большим, нежели первых двух. Это возможно только при сильной турбулизации среды, что может быть вызвано, например, потоками выпадающих заряженных частиц. Рост же дисперсии интенсивностей сигнала свидетельствует о нестационарности процессов, а также о неполном "вычитании" шумов. Дисперсия шумов в те же интервалы времени также увеличивалась.

Третий эффект состоит в уменьшении отношения интенсивностей R и ее дисперсии σ_R после прохождения терминатора. Поскольку

$$R = \frac{\langle A_x^2 \rangle}{\langle A_0^2 \rangle} = \frac{\Omega_+^2 + v^2}{\Omega_-^2 + v^2} \exp\{-4(K_x - K_0)\}$$

и $\Omega_+^2 \gg v^2$, $\Omega_-^2 \gg v^2$ в значительной части D -области ионосферы ($z = 75 - 90$ км),

$$R = \frac{\Omega_+^2}{\Omega_-^2} \exp\{-4(K_x - K_0)\}.$$

При прохождении терминатора увеличивается N , а значит и K_{x0} . Это приводит к уменьшению R . Добавим, что уменьшение R в 2 раза во время прохождения терминатора свидетельствует об увеличении N в среднем на 30 % на высотах 70–80 км. Рост σ_R связан с усилением нестационарности среды.

Наблюдаемый при прохождении терминатора и после него рост N может быть вызван следующими причинами:

1) ионизацией молекул NO рассеянным излучением в линии Лайман- α . При этом изменение плотности электронов составляет $\Delta N \leq 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-3}$, что не может объяснить наблюдаемый рост N ;

2) ионизацией молекул $O_2(^1\Delta_g)$ рассеянным солнечным излучением на длине волны 102,7 — 111,8 нм. При этом значение $\Delta N \leq 10^7 \text{ м}^{-3}$, т. е. оно также мало;

3) движением областей больших градиентов параметров атмосферы в утренние часы;

4) взаимодействием терминатора с неоднородностями атмосферы;

5) радиационной неустойчивостью, вызванной большим значением градиента потока радиа-

ции, который обусловлен плоскостойкостью коэффициента ее поглощения;

6) усилением неустойчивости Релея–Тейлора в области терминатора;

7) наличием магнитосопреженного терминатора, который вызывает поток фотоэлектронов из магнитосопреженной области;

8) ионизацией потоками энергичных электронов.

Из перечисленных источников наиболее вероятным представляется поток электронов из радиационного пояса. Роль среднеширотного выпадания частиц неоднократно обсуждалась (см., например, [11, 17–26]). Выпадание 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 ϵ_{\perp} заряженных частиц. Кроме того, в процессе становления и релаксации возмущений тензора проводимости ионосферной плазмы поле поляризации E_p обладает и вихревой компонентой E_r . Последний механизм рассмотрен в [27–30]. При прохождении терминатора возможны существенные изменения тензора проводимости ионосферной плазмы и вариации компонент электрического поля E_p и E_r , а значит и компонент ϵ_{\perp} .

На основе предложенного механизма о выпадании высокоэнергичных электронов из радиационного пояса оценим параметры потоков подобно тому, как это сделано в [17, 26] для источников возмущений в ионосфере другой природы: старты ракет, магнитная буря, нагрев ионосферы мощным радиоизлучением. По экспериментальным значениям $N(z,t)$ в невозмущенных N_0 и возмущенных N условиях оценим скорость ионизации $q_0 = \alpha_0 N_0^2$ и $q = \alpha N^2$ (индекс 0 соответствует невозмущенным условиям). На высотах $z > 75$ км в D -области ионосферы, если рассматривать в качестве основных рекомбинацию электронов с ионами NO^+ и O_2^+ (что вполне оправдано [31]), α изменяется примерно от 10^{-11} до $2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ (далее будем полагать $\alpha = \alpha_0$, т.е. пренебрегаем нагревом атмосферы при выпадании электронов). Плотность потока P_1 мощности P частиц с энергией ϵ определим как (см., например, [15]) $P_1 = 2\epsilon_i \Delta z \Delta q = \epsilon p$, где $\Delta q = q - q_0$, $\epsilon_i \approx 35$ эВ — энергия одного акта ионизации, Δz — диапазон высот эффективного поглощения потока p электронов с данной энергией ϵ (это выражение справедливо, если пренебречь распределением выпадающих электронов по энергиям).

Мощность P и энергию E электронов, высыпавшихся 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 $\Delta t = 1,2 \cdot 10^3$ с.

Результаты расчетов для обсуждаемых экспериментов приведены в таблице. Для удобства расчетов брали $\Delta z = 10$ км; полагали также, что энергия высыпавшихся электронов $\epsilon > 40$ кэВ, что вполне обосновано (см., например, данные для солнечных вспышек, магнитных бурь и других источников в [17, 26, 27]). Результаты расчетов не противоречат известным из литературы данным о потоках электронов, полученных экспериментально (или оцененных) во время возмущений различной природы. Плотности потоков электронов и их энергетические характеристики в соответствии с теоретическими расчетами [17, 26] вполне могут обеспечить наблюдаемый рост концентрации электронов N на высотах 81–87 км. Оценки E_p и E_r по методике [27, 28] с учетом приведенных расчетов показали, что обсуждаемый механизм может быть использован для объяснения наблюдаемых изменений N .

Параметр	Дата			
	05.12.2000		15.11.2000	
z , км	84	87	84	87
N_p , м ⁻³	$3,5 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^8$
N_r , м ⁻³	$7,5 \cdot 10^9$	$8,0 \cdot 10^9$	$4,8 \cdot 10^9$	$8,0 \cdot 10^9$
q_p , м ⁻³ с ⁻¹	$0,7 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$
q_r , м ⁻³ с ⁻¹	$3,4 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$
P_1 , Дж м ⁻² с ⁻¹	$1,9 \cdot 10^7$	$5,1 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$
p , Дж м ⁻² с ⁻¹	$1,8 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^7$	$9,4 \cdot 10^7$
ϵ , МэВ	0,1	0,04	0,1	0,04
S , м ²	10^{14}	10^{14}	10^{14}	10^{14}
P , Вт	$2,9 \cdot 10^8$	$5,1 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$
E , Дж	$3,1 \cdot 10^{11}$	$6,1 \cdot 10^{10}$	$4,9 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$
Δt , с	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$

Выводы

1. Экспериментально обнаружено увеличение плотности электронов на 50–150 % как при прохождении утреннего солнечного терминатора, так и после него.

2. В рамках гипотезы о высыпании электронов из магнитосферы проведены расчеты и показана возможность стимулированного высыпания электронов утренним терминатором.

3. Оценены плотности потоков высыпавшихся электронов с энергиями 40–80 кэВ, величины которых составили 10^7 – 10^8 м⁻²с⁻¹.

Работа выполнена при поддержке УНЦ. Проектное соглашение № 1773.

Литература

1. Салсыков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. — Алма-Ата: Наука, 1983.
2. Салсыков В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1991, т. 31, № 1, с. 1–12.
3. Салсыков В.М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1992, т. 32, № 3, с. 55–59.
4. 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, т. 26, № 5, с. 837–841.
5. Гокон А.М., Гринчин А.И. Влияние солнечного терминатора на среднширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиопомех. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1994, т. 34, № 2, с. 169–172.
6. Безродный В.Г., Блюх П.В., Фалькович И.С. и др. О неоднородностях нижней ионосферы, движущихся за терминатором. — Тезисы докл. семинара КАПГ по физике страто-мезосферы и нижней ионосферы. Ростов-на-Дону. — М.: Наука, 1977.
7. Белей В.С., Гатушко В.Т., Ямтальский Ю.М. Экспериментальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений на параметры КВ-радиосигнала. Препринт № 231. — Харьков: ИРЭ АН УССР, 1983.
8. Белей В.С., Гатушко В.Т., Ямтальский Ю.М. и др. Распространение радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1983.
9. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Искусственные периодические неоднородности в нижней части E-области на восходе и заходе Солнца. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1986, т. 26, № 5, с. 837–841.
10. Belrose J.S. Radio Wave Probing of the Ionosphere by the Partial Reflection of Radio Waves (from Heights Below 100 km). J. Atmos. Terr. Phys., 1970, vol. 32, no. 4, pp. 567–596.
11. Гокон А.М., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. — Радиофизика и радиоастрономия, 2000, т. 5, № 4, с. 348–360.
12. Черногор Л.Ф. Современная наука о природе. Интегрирующий курс естествознания. — Харьков, 1998.
13. Turun, O.F., Garmash, K. P., Gokov, A. M., et al., The Radio-physical Observatory for Remote Sounding of the Ionosphere, Turkish J. of Physics, 1994, vol. 18, no. 2, pp. 1260–1265.
14. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1996, т. 36, № 2, с. 75–79.

15. Тихонов А.Н., Гамбаровский А.В., Степанов В.В. и др. Численные методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1990.
16. Черногор Л.Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного радионизлучения. — Изв. вузов, сер. Радиофизика, 1985, т. 28, № 12, с. 17–26.
17. Chernogor, L.F., Garmash, K.P., and Kozimitchko, V.T., Flux Parameters of Energetic Particles Affecting the Middle Latitude Lower Ionosphere. — Радиофизика и радиоастрономия, 1998, vol. 3, no. 2, с. 191–197.
18. Ляцкий В.Б., Мазычев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.
19. Харрисон Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. — Л.: Гидрометеониздат, 1982.
20. Кнут Р., Вайрибергер Н. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий. — Геомагнетизм и аэронаука, 1976, т. 16, № 4, с. 666–673.
21. Лаштовичка Я., Федорова Н.И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение кортесулярного происхождения. — Геомагнетизм и аэронаука, 1976, т. 16, № 6, с. 1018–1025.
22. 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 аэронаука, 1977, т. 17, № 5, с. 854–861.
23. Гогов А.М., Гритчин А.И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек. — Космические исследования, 1996, т. 34, № 6, с. 585–589.
24. Гармаш К.П., Косирин Л.С., Ротуненко В.Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури. — Геомагнетизм и аэронаука, 1999, т. 39, № 1, с. 72–78.
25. Gokov, A.M. and Tyurin, O.F., Partial Reflection Technique Investigation of the Lower Ionosphere Response to Strong Remote Earthquakes. Journal of Atmospheric Electricity, 2000, vol. 20, no. 2, pp. 63–73.
26. Черногор Л.Ф. Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства. — Радиофизика и радиоастрономия, 1997, т. 2, № 4, с. 463–472.
27. Гармаш К.П., Шварцбург А.Б., Черногор Л.Ф. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радионизлучением. — М.: Компьютерная оптика, 1988, № 6, с. 62–71.
28. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Эффекты в околоземной космической плазме, стимулированные воздействием мощного радионизлучения. — Зарубежная радиозлектроника. Успехи современной радиозлектроники, 1998, № 6, с. 17–40.
29. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Влияние вихревой компоненты низкочастотного электрического поля, генерируемого при нагреве ионосферы мощным радионизлучением, на параметры взаимодействия волны-частица. — Международный симпозиум "Спутниковые исследования ионосферных и магнитосферных процессов". Москва, ИЗМИРАН, 11–13 декабря 1995, Тезисы докладов. — Москва, 1995, с. 30–31.
30. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Генерация и распространение электромагнитных волн, связанных с вариациями проводимости. Всесоюзный семинар "Распространение радиоволн в ионосфере". Тезисы докладов. — М.: Радио и связь, 1989, с. 70.
31. Давыдов А.Д. Популярная аэронаука. — Л.: Гидрометеониздат, 1989.

Поступила 15 августа 2001 г.



Гогов Александр Михайлович — канд. техн. наук, ст. научн. сотр. кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Область научных интересов: физические процессы в нижней ионосфере Земли, изменения в ионосферной плазме под действием возмущений естественного характера.

Тырин Олег Фёдорович — канд. техн. наук, доц. зав. кафедрой космической радиофизики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Область научных интересов: физические процессы в верхней ионосфере Земли, изменения в ионосферной плазме под действием возмущений различного характера.

