

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

1944 Т. 34 № 2

МОСКВА • 1994

8. Banks P. M., Chappell C. R., Nagy A. F. A new model for the interaction of auroral electrons with the atmosphere: spectral degradation, back scatter, optical emission and ionization//J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 10. P. 1459.
9. Иванов-Холодный Г. С., Фирсов В. В. Спектр коротковолнового излучения Солнца при различных уровнях активности//Геоматизм и аэрономия. 1974. Т. 14. № 3. С. 393.
10. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. Солнце в ионосфере. М.: Наука, 1969. 456 с.
11. Stolarsky R. S., Johnstone N. P. Photoionization and photoabsorption cross section for ionospheric calculation//J. Atmos. Terr. Phys. 1972. V. 34. № 10. P. 1691.

Алтайский государственный
университет

Поступила в редакцию
16.07.93

После доработки
10.11.93

УДК 550.388.2

© 1994 г. А. М. Гоков, А. И. Гритчин

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА НА СРЕДНЕШИРОТНУЮ D-ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНО ОТРАЖЕННЫХ КВ-СИГНАЛОВ И РАДИОШУМОВ

На основе экспериментальных данных, полученных методом частичных отражений в Харьковском университете в 1983—1992 гг., рассмотрены характеристики акустико-гравитационных волн, генерируемых или усиливаемых солнечным терминатором в среднеширотной D-области ионосферы. Показано, что их периоды $2 \leq T \leq 40$ мин длительности волновых процессов $t \approx 10 - 120$ мин. Проанализирована их изменчивость в различные сезоны года. Описаны характерные особенности поведения частично отраженных сигналов и радишумов в восходно-заходные периоды.

1. Известно, что солнечный терминатор является мощным естественным источником различных пространственно-временных возмущений в ионосфере и атмосфере Земли [1]. Изучению этих явлений посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ (см., например, [2]). При этом теоретические исследования в основном опережают экспериментальные [2]. Наименее изучено влияние солнечного терминатора на параметры D-области ионосферы. Это объясняется в первую очередь трудностью проведения длительных (часы — сутки) систематических измерений параметров D-области известными методами. В работах [3—5] приведены результаты эпизодических исследований.

В настоящей статье в развитие работы [6] приведены результаты экспериментальных исследований влияния солнечного терминатора на D-область ионосферы. Рассмотрены характеристики частично отраженных радиосигналов и радишумов на частотах $f = 2 - 4$ МГц, полученные в систематических измерениях в средних широтах в различные времена года в 1983—1992 гг.

2. Измерения частично отраженных сигналов и радишумов выполнены вблизи г. Харькова ($\psi \approx 49,5^\circ$ N; $\lambda \approx 36,3^\circ$ E) на экспериментальной установке, описанной в работе [7]. Длительность сеансов регистраций в восходно-заходные периоды составляла 2—8 ч. Кроме того, проведено несколько круглосуточных сеансов наблюдений в различные сезоны года. В итоге общее число сеансов составило ~100, почти равномерно распределенных по сезонам. Основные параметры установки следующие: рабочие частоты $f = 2 - 4$ МГц, длительность зондирующих импульсов $\tau_{\mu} = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1 - 10$ Гц, эффективная излучаемая мощность $P_1 G_1 \approx 10$ МВт. Во время эксперимента через ЭВМ СМ-1420 на перфоленту или магнитную ленту регистрировались высотновременные зависимости амплитуд смеси частично отраженного сигнала и радишума $A_{o,n}^{c,m}(h, t)$, где h — высота над поверхностью Земли, t — время, индексы o и n соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям, с четырнадцатью высотными уровнями начиная с 45 или 60 км через 3 или 6 км. Для выделения частично отраженных сигналов записывались также амплитуды только радишума $A_{o,n}^{m}$ (две — шесть выборок),

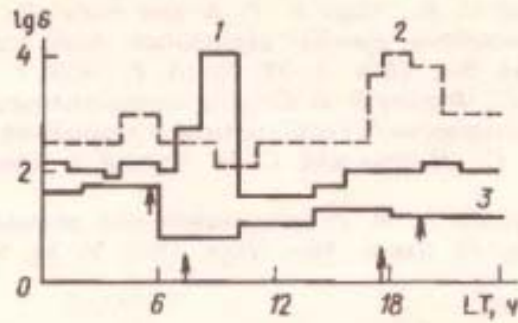


Рис. 1. Суточные вариации отдельных спектральных составляющих смешанных сигналов: $(A_{0,n}^{c+m})^2$: 1 — $h = 84$ км, $f = 2 \cdot 10^{-3}$ Гц; 2 — $h = 75$ км, $f = 8 \cdot 10^{-3}$ Гц, 20.12.1989 г.; 3 — $h = 84$ км, $f = 5 \cdot 10^{-3}$ Гц, 21.03.1989 г. Стрелками отмечены моменты восхода и захода Солнца

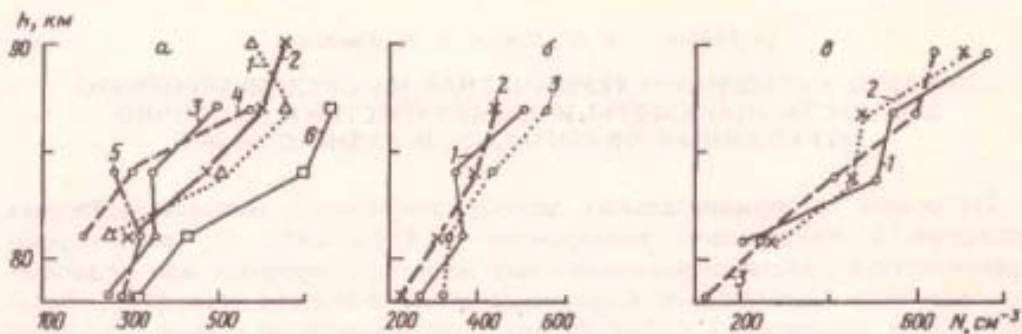


Рис. 2. Вариации профилей электронной концентрации во время прохождения солнечного терминатора. Сезонные (а): 1 — 20.01.1985; 2 — 24.01.1985; 3 — 27.06.1989; 4 — 18.10.1989; 5 — 22.03.1989 (утро); 6 — 26.06.1989 (вечер); утро 22.03.1989 (б); вечер 31.07.1981 (в). Кривые 1—3 для б и в вычислены через каждые последующие 9 мин после прохождения терминатора

в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Контроль за лежащими выше E- и F-областями ионосферы проводился методом вертикального зондирования.

Влияние солнечного терминатора на D-область рассмотрено по результатам анализа высотно-временных характеристик $(A_{0,n}^c)^2$, $(A_{0,n}^{c+m})^2$, $(A_{0,n}^m)^2$ (черта сверху означает осреднение за 30 или 60с), их дисперсий $D_{(A_{0,n}^c)^2}$, $D_{(A_{0,n}^m)^2}$, и коэффициентов взаимной корреляции $\rho_{(A_{0,n}^c)^2, (A_{0,n}^m)^2}$, $\rho_{(A_{0,n}^c)^2, (A_{0,n}^{c+m})^2}$, $\rho_{(A_{0,n}^m)^2, (A_{0,n}^{c+m})^2}$. Для получения параметров возмущений, генерируемых или усиливаемых в D-области, выполнялся спектральный анализ массивов данных $(A_{0,n}^c)^2$ и $(A_{0,n}^{c+m})^2$ методами Блэкмана — Тьюки и быстрого преобразования Фурье [8].

3. Отметим основные особенности частично отраженных сигналов. Анализ массивов данных $(A_{0,n}^c)^2$ показал, что в утренние часы при прохождении солнечного терминатора примерно в 50% случаев наблюдаются частично отраженные сигналы, от неоднородностей D-областей ионосферы. Это сигналы появляются, как правило, в течение 10—30 мин, затем исчезают и регистрируются вновь с тех же высот через 1,5—2,5 ч после прохождения терминатора (летом обычно на 1 ч раньше, чем зимой). Примерно в 70—75% случаев $A_{0,n}^c(h, t)$ и $A_{0,n}^{c+m}(h, t)$ на фиксированных высотах имеют квазигармонический характер; нижняя граница наблюдаемых частично отраженных сигналов опускается по высоте на несколько км (—5—7 км), высотный диапазон Δh , в котором возникают эти сигналы, обычно — 10—15 км, редко $\Delta h > 15$ км.

Отметим также, что частичные отражения от неоднородностей D-области на фиксированных высотах наблюдались с задержкой от единиц до десятков мин относительно времени прохождения утреннего терминатора. Заметных различий в поведении частично отраженных сигналов при прохождении утреннего терминатора в различные сезоны года не обнаружено.

Параметры волновых возмущений, вызываемых терминатором в D -области

Время года	T , мин	t , мин	T , мин	t , мин
		Утро		Вечер
Зима	3—5	20—25	7—15	35—50
Весна	4—6	25	2—3	15
			7—9	35—40
Лето	2—3	10—15	15—20	80—120
	6—10	60		
Осень	3—5	20—25	4—7	40

В вечерние часы перестройка в D -области начинается за $-1-1,5$ до прохождения терминатора. Интенсивность частично отраженных сигналов уменьшается и после захода Солнца в течение 30—60 мин нижняя граница существования частичных отражений поднимается на $-10-15$ км, рассеивающая область постепенно сужается до $\Delta h \leq 12-15$ км (верхняя граница поднимается на 8—12 км), а сигналы $A_{0,n}^c(h,t)$ и $A_{0,n}^{c+m}(h,t)$ на фиксированных высотах, как и утром, имеют квазигармонический характер.

По методике, изложенной в работе [9], в частично отраженных сигналах выделялись рассеянная $|E_{0,n}^p|^2$ и отраженная (френелевская) $|E_{0,n}^f|^2$ составляющие. Установлено, что в периоды прохождения утреннего терминатора в принимаемых сигналах доминирует составляющая $|E_{0,n}^p|^2$, отраженная же составляющая имела место редко и была малой интенсивности. В периоды прохождения вечернего терминатора (для $h \geq 85$ км) доля отраженной составляющей $|E_{0,n}^f|^2$ иногда достигала величины $\leq 50\%$.

Представляли также интерес изменения радиозумов в периоды восхода и захода Солнца, так как в отличие от частично отраженных сигналов они уверенно регистрируются круглосуточно. Во время прохождения утреннего терминатора интенсивность радиозумов обычно изменяется незначительно и примерно в 50% случаев отмечаются квазигармонические изменения $A_{0,n}^m(t)$ сразу же или с задержкой 1—10 мин после прохождения терминатора. Во время захода Солнца квазигармонические изменения $A_{0,n}^m(t)$ начинаются сразу же в момент прохождения терминатора или за единицы и даже десятки минут до него. При этом в обоих случаях время прохождения терминатора определялось относительно $h = 0$ км.

Анализ корреляционных характеристик радиозумов и частично отраженных сигналов в восходно-заходные периоды показал, что они в основном так же, как и дисперсии, повторяют вариации $(A_{0,n}^c)^2$ и $(A_{0,n}^m)^2$.

Отмеченные особенности изменения $A_{0,n}^c(h,t)$ и $A_{0,n}^{c+m}(h,t)$ позволяют предположить, что солнечный терминатор, по-видимому, генерирует или усиливает (а иногда и подавляет) в D -области ионосферы волновые возмущения. В качестве примеров на рис. 1 приведены суточные вариации отдельных спектральных составляющих смешанных сигналов $(A_{0,n}^{c+m})^2$, измеренных 20.12.1989 г. и 21.03.1989 г. Спектральный анализ всей совокупности данных измерений позволил определить характерные периоды T и длительности волновых возмущений (см. таблицу). Видно, что в D -области ионосферы периоды возмущений изменяются от -2 до -40 мин с наиболее вероятными значениями в интервале 4—15 мин. В некоторых случаях, например кривая 3 на рис. 1, солнечный терминатор подавляет волновые возмущения. Однако никакой закономерности этого эффекта выявить не удалось.

По известной методике дифференциального поглощения [10] в 25% случаев регистрации частично отраженных сигналов определены высотные профили электронной концентрации $N(h)$ в D -области. В качестве примеров на рис. 2а приведены профили для вечера. Видно, что утром электронная концентрация N не превышает $(5-7) \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$. После прохождения утреннего терминатора в течение 20—30 мин профили $N(h)$, вычисленные за каждые последующие 9 мин после прохождения, как правило, существенно не изменяются. Несколько иная картина имеет место в D -области во время прохождения вечернего терминатора. Электронная концентрация на фиксированных высотах часто ($\geq 50\%$ случаев) в 1,3—2,5 раза больше, чем утром (см. пример на рис. 2а, кривая б). За время $t = 30-50$ мин во время прохождения терминатора $N(h)$ -профиль испытывает большие изменения как по форме, так и по значениям N (см. пример на рис. 2а).

4. Полученные результаты позволяют сделать несколько замечаний. Метод частичных отражений оказался эффективным средством изучения влияния солнечного терминатора на D -область ионосферы, поскольку удалось провести длительные, непрерывные целенаправленные измерения. Факт, что во время восхода Солнца рассеянная составляющая $E_{\sigma, n}^{\text{р}}$ намного превышает отраженную $E_{\sigma, n}^{\text{ф}}$ составляющую, позволяет утверждать, что утренний терминатор, по-видимому, не вызывает резких градиентов концентрации электронов. Этот вывод подтверждается также данными об изменениях $N(h)$ -профиля в эти периоды (см., например, рис. 2). Менее определенно выглядит картина во время захода Солнца: градиенты N несколько больше, чем утром (см., например, рис. 2); доля отраженной составляющей $E_{\sigma, n}^{\text{ф}}$ в энергии частично отраженных сигналов иногда достигает 50%. Однако эти эффекты часто очень продолжительны по времени и в течение 1—1,5 ч предшествуют моменту заходного терминатора.

Волновые возмущения в D -области, выделенные во время прохождения солнечного терминатора, согласно существующим представлениям [1, 2], интерпретированы нами как акустико-гравитационные волны (АГВ).

Выводы

1. Экспериментальные исследования методом частотных отражений показали, что солнечный терминатор генерирует или усиливает в среднеширотной D -области ионосферы АГВ с периодами $2 \leq T \leq 40$ мин с наиболее вероятными значениями в интервале 4—15 мин. Длительности волновых процессов $t = 10$ —120 мин.

2. Как утром, так и вечером при прохождении терминатора $N(h)$ -профили изменялись незначительно. Следовательно, реакция D -области ионосферы на этот источник возмущения оказалась немгновенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.
2. Сомсиков В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 1991. Т. 31. № 1. С. 1.
3. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А. Искусственные периодические неоднородности в нижней части E -области на восходе и заходе Солнца // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26. № 5. С. 837.
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. 24. № 2. С. 134.
5. Ruohotemi J. M., Greenwald R. A., Villian J. P. et al. Coherent HF-radar backscatter from small-scale irregularities in the dusk sector of the subauroral ionosphere // J. Geophys. Res. 1988. V. 93A. № 11. P. 12871.
6. Гоков А. М., Гритчин А. И., Мисюра В. А. Исследование влияния солнечного терминатора на параметры нижней ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов. Харьков: Изд-во ХГУ, 1990. 14 с. — Деп. в ВИНТИ 23.04.90 № 2158—1390.
7. Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестн. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 21.
8. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 2. М.: Мир, 1971. 288 с.
9. Мисюра В. А., Пивень Л. А., Федоренко Ю. П. О природе частично отраженных сигналов // Ускорение частиц и плазменные эффекты в космосе. Киев, Наукова думка. 1976. С. 14.
10. Belrose J. S. Radiowave probing of the ionosphere by the partial reflection of radio waves (from heights below 100 km) // J. Atmos. Terr. Phys. 1970. V. 32. № 4. P. 567.

Харьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
26.05.93

После доработки
9.11.93