

ВОЗМУЩЕНИЯ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Гоков А.М., Тырнов О.Ф., ХГУ, Харьков, Украина

Аннотация. Экспериментально с помощью метода частичных отражений изучены характеристики квазиволновых возмущений в D-области ионосферы и вариации параметров ионосферной плазмы (плотность электронов N , скорость дрейфа V мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности) во время магнитных бурь и внезапных ионосферных возмущений.

I. Введение. Для разработки надежной динамической модели нижней ионосферы необходимо детальное изучение пространственно-временных изменений D-области ионосферы под воздействием возмущений различной природы. Наиболее важными являются естественные источники, такие как мощные землетрясения, извержения вулканов, сильные грозы, солнечные вспышки, магнитные бури, солнечный терминатор, стратосферные потепления и т.п. Воздействие солнечных вспышек и магнитных бурь сравнительно широко исследовано в ряде работ (см., например, [1-4]). Однако для решения задачи моделирования имеющихся в литературе данных о влиянии этих источников недостаточно. Поэтому необходимо проведение направленных исследований, накопление экспериментальных данных. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния солнечных вспышек (на примере внезапных ионосферных возмущений - ВИВ) и магнитных бурь (МБ) на среднеширотную D-область ионосферы, выполненных в Харьковском университете методом частичных отражений (ЧО).

II. Методики эксперимента и обработки данных. Экспериментальные исследования выполнены в средних широтах вблизи г. Харькова. Основные параметры аппаратуры были следующие: рабочие частоты $f = 2-4$ МГц, длительность зондирующих импульсов $t_1 = 25$ мкс с частотой повторения 1-10 Гц. Регистрация амплитуд смеси ЧО сигналов и радишумов $A_{o,x}(z,t)$ и амплитуд радишумов $A_{o,xn}(t)(z$ - высота над поверхностью Земли, t - время) обыкновенной "о" и необыкновенной "х" поляризации проводилась с помощью ЭВМ с 15 высотных уровней, начиная с 45 или 60 км через 3 или 6 км. Длительность регистраций $A_{o,xn}(t)$ и $A_{o,x}(z,t)$, выполненных во время 8 солнечных вспышек в 1983-1990 гг., составляла $\sim 10 - 100$ мин. Отдельно рассмотрены 4 события ВИВ длительностью $t < 30$ мин и 4 ВИВ с $t > 30$ мин. В 1984-1987 гг. выполнены измерения $A_{o,xn}(t)$ и $A_{o,x}(z,t)$ в периоды 8 магнитных бурь. В главной фазе МБ проведены непрерывные измерения в течение нескольких часов. До и после МБ в течение ряда дней (> 10) выполнены измерения длительностью $t = 10-20$ мин при фиксированных зенитных углах Солнца. Расчет высотных профилей плотности электронов $N(z)$ проведен по известной методике дифференциального поглощения [5]. Спектральная обработка массивов $A_{o,xn}(t)$ и $A_{o,x}(z,t)$ проводилась по методу Фурье.

III. Экспериментальные результаты. Солнечные вспышки. Влияние солнечных вспышек на D-область ионосферы и характеристики ЧО сигналов исследовано на примере ВИВ. Проанализированы изменения $A_{o,xn}(t)$, $A_{o,x}(z,t)$ (а также их статистических характеристик) и параметров D-области во время 8 ВИВ. Анализ

$A_{o,xn}(t)$ и $A_{o,x}(z,t)$ показал, что во время коротких ВИБ ($t < 30$ мин) и примерно в течение 10-20 мин после него наблюдаются квазипериодические затухающие изменения $A_{o,xn}(t)$ и $A_{o,x}(z,t)$. В результате спектральной обработки массивов $A_{o,xn}(t)$ и $A_{o,x}(z,t)$ (длительность выборок до и после события ВИБ составляла $t = 30$ мин) получено, что во время ВИБ в D-области генерируются или усиливаются волновые возмущения с периодами $T < 5$ мин., которые затухают в течение примерно 20-25 мин. При $t > 30$ мин волновые возмущения выражены меньше или не отмечаются вообще. На рис. 1,а приведен пример спектров для зависимости $A_o(z,t)$ ($z=81$ км), полученной в эксперименте 16.10.1987 г., где отчетливо видно увеличение во время ВИБ спектральной плотности G составляющей с периодом $T < 5$ мин ($T=4,8$ мин) с последующим уменьшением после события ВИБ (на рисунке кривые: 1 - $T=8,5$ мин, 2 - $T=3,4$ мин, 3 - $T=4,8$ мин). Возможной причиной такого поведения ЧО сигналов от неоднородностей D-области может быть генерация или усиление акустико-гравитационных волн в результате резкого усиления интенсивности рентгеновского излучения Солнца во время ВИБ. Отметим, что подобные результаты (волновые возмущения с $T \sim 5$ мин) получены в [2] по регистрациям геомагнитного поля во время ВИБ.

Интересным оказалось поведение радишумов во время ВИБ: величина $k = A_{xn}/A_{on} > 1$ во время ВИБ, в то время как до и после него $k < 1$. Следует отметить, что подобное изменение k сравнительно часто наблюдалось нами и при других возмущениях как искусственных, так и естественных. Удовлетворительного объяснения этого явления пока нет.

Подобно [6] во время всех событий ВИБ нами проведено исследование природы ЧО сигналов: для 10 минутных регистраций во всем высотном диапазоне вычислены средние энергии рассеянной $\langle E_{o,xs}^2 \rangle$ и отраженной $\langle E_{o,xk}^2 \rangle$ составляющих ЧО сигналов. Каких-либо существенных отличий в высотно-временном распределении $\langle E_{o,xs}^2 \rangle$ и $\langle E_{o,xk}^2 \rangle$ во время ВИБ по сравнению с невозмущенными условиями и результатами работы [6] нами не обнаружено ни в период коротких, ни в период длительных ВИБ: соотношение между $E_{o,xs}$ и $E_{o,xk}$ оставалось типичным для невозмущенной нижней ионосферы, т.е. образования или усиления неоднородностей типа "резкая граница" не отмечалось.

Аналогично [4] исследованы изменения высотного профиля $N(z)$ во время ВИБ. Как и в [4], в наших измерениях отмечено заметное (в 1,5-4 раза) увеличение N на $z = 70 - 85$ км во время ВИБ. Профили $N(z)$, вычисленные за каждые последующие 3-4 мин во время ВИБ, отличались как по форме, так и по значениям N (на фиксированных высотах), после события значения N в D-области, в основном, восстанавливались в течение нескольких минут примерно к тем же величинам, что и до ВИБ. Пример таких изменений $N(z)$ приведен на рис. 1,б: кривые 1-3 получены во время короткого ВИБ в 12.30-12.40 LT 26.III.1986 г. через каждые 3,5 мин соответственно, кривая 4 - получена в 11.30 - 11.40 LT до события ВИБ.

Магнитные бури. Измерения методом ЧО выполнены во время 8 МБ: 16.XI.1984 г., 23.I.1985 г., 13.XI.1985 г., 13.XII.1985 г., 18.XII.1985 г., 13.III.1986 г., 2.X.1986 г. и 20.II.1987 г. Характерным для всех измерений во время МБ оказалось наличие интенсивных ЧО сигналов от области высот $z = 45-70$ км, превышающих уровень шумов в 5-15 раз. Электронная концентрация на этих высотах возрастала до значений $N \sim (2-8)10^2 \text{ см}^{-3}$. На рис. 1,в приведен пример изменений ионизации в нижней

части D-области ионосферы во время двух МБ (кривые 1,2; измерения $N(z)$ выполнены при зенитном угле Солнца $77,5^\circ$). Дополнительная ионизация на $z < 65$ км во время МБ, по-видимому, вызвана высыпанием заряженных частиц, а вариации $N(z)$ - изменениями их интенсивности и спектра. Сравнивая экспериментальные $N(z)$ с характерными для данного сезона невозмущенными (например, по модели [7]), оценим дополнительную скорость ионообразования: $q_i \sim 1 - 4 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ для $z = 50-65$ км. Полагая, что на этих высотах основной вклад в q_i вносит ионизация высыпаящимися протонами с энергиями $E \sim 15-50$ МэВ, по методике [8] оценим поток высыпаящихся частиц во время МБ: $I_p \sim 0,05-0,12 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

После магнитных бурь в течение примерно 5-10 суток с высот $z \sim 55-65$ км в 7 случаях из 8 зарегистрированы ЧО сигналы, также превышающие уровень радишумов в несколько раз. Замечено, что такие события хорошо коррелируют с высыпанием заряженных частиц из магнитосферы, которые регистрировались с помощью ИСЗ (о высыпаниях заряженных частиц в ионосферу в течение ряда дней после МБ сообщалось и в других работах, см., например, [9]). На рис. 1, в (кривая 3) приведен экспериментальный $N(z)$ -профиль, полученный методом ЧО в районе г.Харькова 15.VI.1983г. (в этот период времени, по данным ИСЗ "Метеор", зарегистрирован поток протонов $77,2 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ с энергиями $E \sim 15$ МэВ) после МБ. Здесь же дана характерная зависимость $N(z)$ (кривая 4) в невозмущенных условиях, сравнение с которой позволяет оценить увеличение скорости ионообразования за счет высыпания высокоэнергичных протонов в 40-10 раз соответственно для $z = 57-63$ км.

Нами исследованы изменения ионизации в дневной D-области ионосферы во время МБ на $z > 75$ км (в работе [3] сходные исследования проведены для ночных условий). На рис. 1, г изображены $N(z)$ -профили в D-области на средних широтах, полученные при фиксированном зенитном угле Солнца 78° до начала МБ (кривые 1-4) и в период МБ (кривые 5,6) в начале активного периода. Отчетливо видно, что в период МБ на $z = 78-90$ км значения N в 1,5-6 раз больше, чем до МБ. Аналогичная картина в изменениях $N(z)$ в D-области на средних широтах отмечена нами и во время других МБ. Похожие изменения $N(z)$ в верхней части D-области во время МБ наблюдались в [3] в ночное время.

Нами исследованы изменения $N(z)$ -профилей, полученных методом ЧО по измерениям в высоких широтах (вблизи г. Мурманска) зимой и весной 1974 г. в периоды МБ (регистрировались всплески геомагнитного поля, которые хорошо коррелировали с появлением интенсивных ЧО сигналов с высот нижней части D-области ионосферы). Характерным, как и в среднеширотных измерениях, оказалось наличие слоев повышенной ионизации на $z = 48-75$ км с $N < 10^3 \text{ см}^{-3}$. При этом в высокоширотных измерениях значения $N(z)$ в нижней части D-области обычно больше, чем в среднеширотных, что объясняется большей интенсивностью потоков высыпаящихся частиц на высоких широтах как в дневные, так и в ночные часы. Отметим, что приведенные выше результаты совместно с данными работ [1,3] дают сравнительно ясную картину качественных и количественных изменений $N(z)$ в D-области ионосферы во время МБ, что важно для решения задач моделирования.

Следует отметить, что в периоды измерений во время МБ (как и в период ВИБ), обсуждаемых здесь, почти всегда было $k > 1$. Интересным оказалось также то, что в регистрациях ЧО сигналов во время МБ имело место одновременное существование отраженной $E_{o,xk}$ и рассеянной $E_{o,xs}$ составляющих ЧО сигналов (для $z = 75-85$ км),

причем доля $E_{o,xk}$ достигала 30 % (во время ВИБ соотношение между $E_{o,xk}$ и $E_{o,xs}$ оставалось таким же, как и в невозмущенных условиях, - существенно преобладала составляющая $E_{o,xs}$).

IV. Выводы.

В работе экспериментально получено:

а) в периоды коротких ВИБ во время солнечных вспышек в D-области ионосферы наблюдались квазиволновые возмущения амплитуд радиошумов и частично отраженных сигналов с периодами $T < 5$ мин, которые, вызываются, вероятно, усилением или генерацией акустико-гравитационных волн;

б) в нижней части D-области ионосферы ($z < 70$ км) во время МБ и в течение 5-10 суток после них регистрировались слои повышенной ионизации с величинами $N \sim (2-8) \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$, которые, вероятно, обуславливаются высыпанием заряженных частиц из магнитосферы;

в) в верхней части D - области ионосферы ($z > 70$ км) электронная концентрация возрастает в 2-6 раз днем в период МБ по сравнению с невозмущенными условиями.

V. Список литературы

1. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977. 370 с.
2. Метелкин Е.В., Сорокин В.М., Федорович Г.В. О природе колебаний геомагнитного поля, генерируемых солнечными вспышками // Геомагнетизм и аэрномия. 1982. Т. 22. N 5. С.803.
3. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Г., Гришкевич Л.В. Ночная ионизация D-области ионосферы умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэрномия. 1980. Т. 20. N 3. С. 547.
4. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гришкевич Л.В. и др. Результаты измерения электронной концентрации в D-области ионосферы во время внезапных ионосферных возмущений // Изв.вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. N 8. С. 1094.
5. Belrose J.S., Burke M.J. Study of the lower ionosphere using partial reflections // J.Geophys.Res. 1964. V.32. N 4. P.2799.
6. Гоков А.М., Гритчин А.И. Экспериментальные исследования некоторых механизмов, описывающих природу частично отраженных сигналов // Геомагнетизм и аэрномия. 1993. Т. 33. N 4. С. 170.
7. Козин И.Д., Рубинштейн Б.М., Сайфутдинов М.А. и др. Адаптивная модель среднеширотной нижней ионосферы. Ионосферные исследования. М.: Наука, 1988. N 44. С. 119.
8. Харгривс Дж.Е. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Пер. с английского. М.: Мир, 1982. 332 с.
9. Lauter E.A. The post-storm ionization in the upper mesosphere. J. Meteorol. 1977. N 6. P.67.

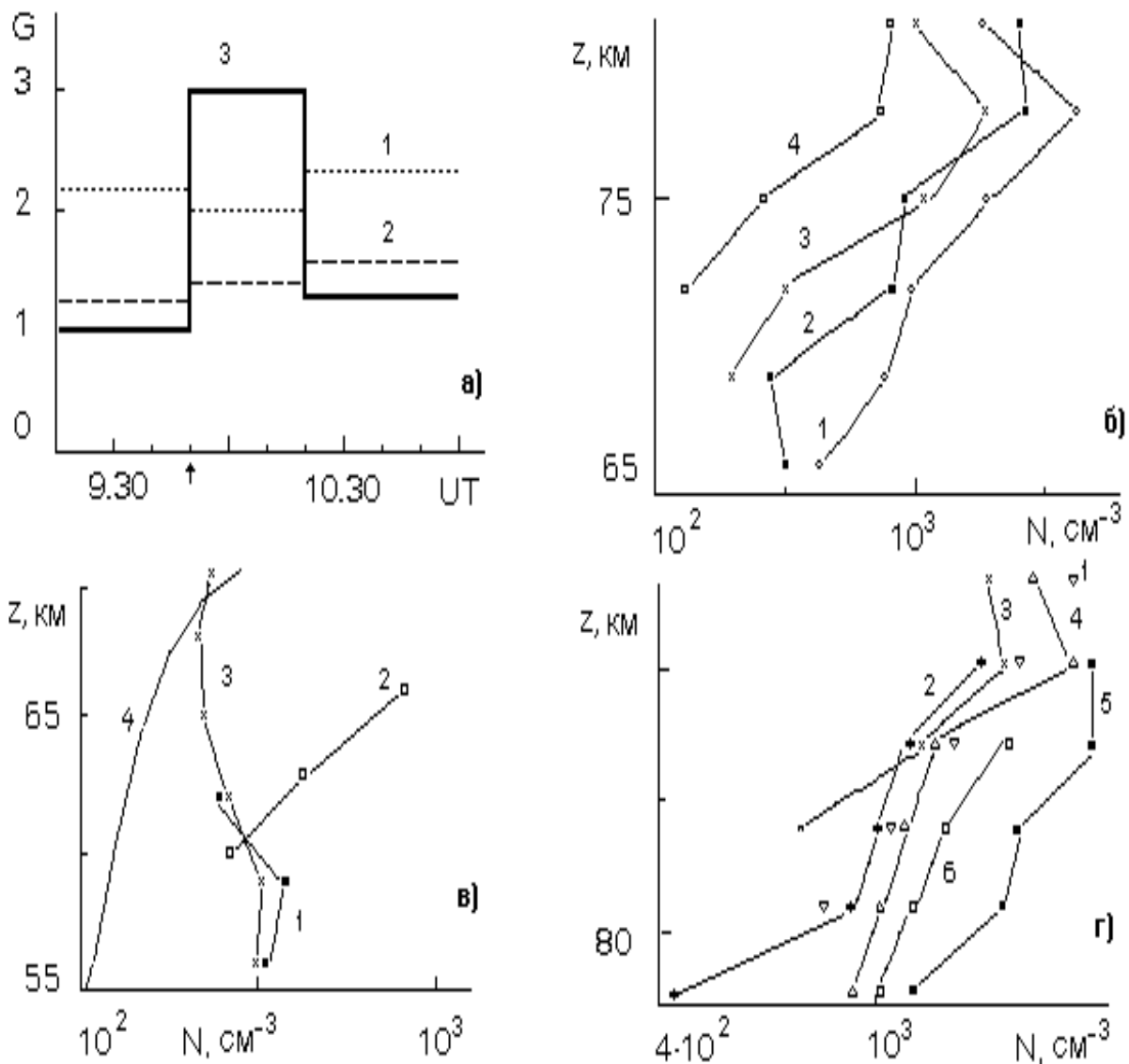


Рис. 1 Примеры спектров зависимостей $A_o(z,t)$ и плотности электронов в среднеширотной области D-ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек:

а) - пример спектров для зависимости $A_o(z,t)$ ($z = 81$ км), полученной в эксперименте 16.10.87 г.; кривые: 1- $T = 8,5$ мин, 2- $T = 3,4$ мин, 3- $T = 4,8$ мин;

б) - вариации $N(z)$ в D-области в период ВИБ: кривые 1-3 получены во время короткого ВИБ, кривая 4 - до события ВИБ;

в) изменения ионизации в нижней части D- области ионосферы во время магнитных бурь (кривые 1 - 3). Кривая 4 - модельный профиль $N(z)$.

г) изменения ионизации в верхней части дневной среднеширотной D -области ионосферы во время магнитной бури (при фиксированном зенитном угле Солнца 78° , кривые 5,6). Кривые 1 - 4 получены до начала МБ в течение нескольких дней.