

УДК 550.388.2

ВОЗМУЩЕНИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СВЕРХСИЛЬНОЙ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 7–10 НОЯБРЯ 2004 г.

С.В. Панасенко

THE DISTURBANCES OF THE LOWER IONOSPHERE DURING THE EXTREME GEOSPACE STORM OF NOVEMBER 7–10, 2004

S.V. Panasenko

Исследовано влияние крайне сильной геокоsmической бури 7–10 ноября 2004 г. на процессы в нижней ионосфере. Обнаружено увеличение как средних значений электронной концентрации, так и ее максимальных значений в отдельных всплесках в период бури. Не выявлена корреляция между уровнем магнитной активности и параметрами волновых возмущений в нижней ионосфере.

The influence of extreme geospace storm of November 7–10, 2004 on the processes in the lower ionosphere is studied. Increase of mean values of electron concentration as well as its maximum values for individual bursts is detected during the storm. The correlation between the level of magnetic activity and parameters of wave disturbances in the lower ionosphere is not revealed.

Введение

Геокоsmические бури (ГБ) являются одним из важнейших проявлений вариаций коsmической погоды в системе Земля–ионосфера–геокоsmос. Они представляют собой совокупность магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь [1]. ГБ генерируется выбросами корональной массы Солнца и имеет значительную энергетику (порядка 10^{12} Дж в ионосфере [1]). Ее эффекты носят глобальный характер, хотя наиболее ярко выражены в высоких широтах. Кроме того, каждая буря является уникальным геофизическим явлением, воздействующим на целый комплекс физико-химических процессов, протекающих в живой и неживой природе. Поэтому изучение эффектов, сопровождающих геокоsmические бури, и их влияния на окружающую среду является актуальной задачей.

В средних широтах эффекты бурь обычно проявляются в виде изменения концентрации и температуры плазмы, возмущения преобладающих ветров и электрического поля, генерации и усиления волновых возмущений (ВВ) и др. Эти эффекты являются более существенными для средней и верхней ионосферы (выше 100 км). Однако при сильных и сверхсильных бурях ($K_p \geq 7$) они проявляются и в нижней ионосфере (60–90 км).

Изучению отклика среднеширотной нижней ионосферы на ГБ посвящено значительное число работ (см., например, обзоры [2, 3]). Большая часть из них относится к исследованию процессов в средней ионосфере [4, 5]. Проявления ГБ в среднеширотной мезосфере изучены достаточно слабо.

Целью настоящей работы является исследование параметров нижней ионосферы во время крайне сильной магнитной бури 7–10 ноября 2004 г.

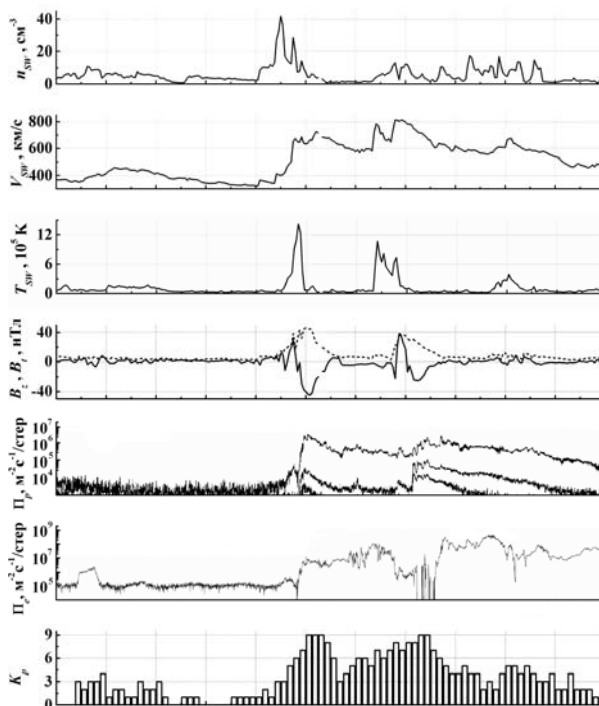
Краткие сведения о радаре и методике исследования

Исследование проводилось при помощи средне-частотного радара обратного рассеяния (ОР), рабочая частота которого составляла 2.2–2.5 МГц. Его технические характеристики подробно описаны в работах [6, 7]. Из исходных данных, представляющих собой временные ряды огибающих обыкновенной и необыкновенной компонент ОР-сигналов, были оце-

нены как значения электронной концентрации для ряда высот (использовался метод дифференциального поглощения), так и параметры (амплитуда, период и др.) ВВ в нижней ионосфере. Для выявления последних использовалась методика, описанная в работе [8]. Напомним, что сведения о ВВ извлекаются непосредственно из статистических характеристик огибающих обратно-рассеянных радиосигналов (активный метод) и радиопомех (пассивный метод).

Краткая характеристика геофизической обстановки

Результаты спутниковых и наземных наблюдений параметров системы Солнце – межпланетная среда – геокоsmос в период рассматриваемой ГБ, а также в предшествующий и последующий ей интервалы времени были получены из Интернет (<http://www.sec.noaa.gov/weekly>). Временные зависимости отдельных параметров отображены на рис. 1.



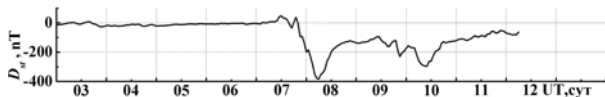


Рис. 1. Геокосмическая обстановка 3–13 ноября 2004 г.

Как видно из рисунка, ГБ была рекуррентной и состояла из двух магнитных возмущений и ряда суббурь. Максимальное значение концентрации частиц солнечного ветра (СВ) имело место 7 ноября 2004 г. и составило 41.8 см^{-3} . В этот же день наблюдался максимум температуры протонов СВ, равный $1.4 \cdot 10^6 \text{ К}$. Скорость СВ достигла максимальной величины 813 км/с 9 ноября в период второго магнитного возмущения. Минимальное значение южной компоненты межпланетного магнитного поля наблюдалось 8 ноября и составило -45.1 нТл . В конце 7 ноября примерно на три порядка возросла плотность потока протонов с энергией более 1 МэВ и примерно на порядок возросли плотности потоков протонов с энергией более 10 МэВ и электронов. Максимальное значение K_p -индекса равнялось 9. Абсолютный минимум D_{st} -индекса наблюдался 8 ноября и составил -383 нТл . Его минимальное значение в период второго магнитного возмущения равнялось -297 нТл .

Более подробное описание состояния космической погоды и ее связь с процессами на Солнце приведено в работе [9].

Поведение электронной концентрации

Временные зависимости электронной концентрации N на высотах $73\text{--}83 \text{ км}$ в период ГБ (9–10 ноября 2004 г.) представлены на рис. 2. Пропуски на временных данных связаны с возрастанием поглощения ОР-сигналов (особенно необыкновенной компоненты), что приводило к уменьшению отношения сигнал/помеха и не позволило с приемлемой погрешностью восстановить значения N .

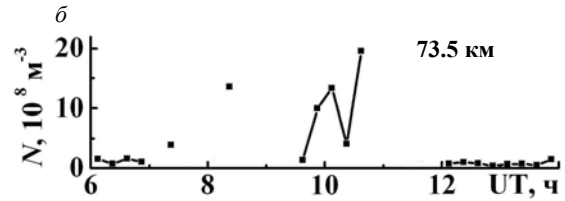
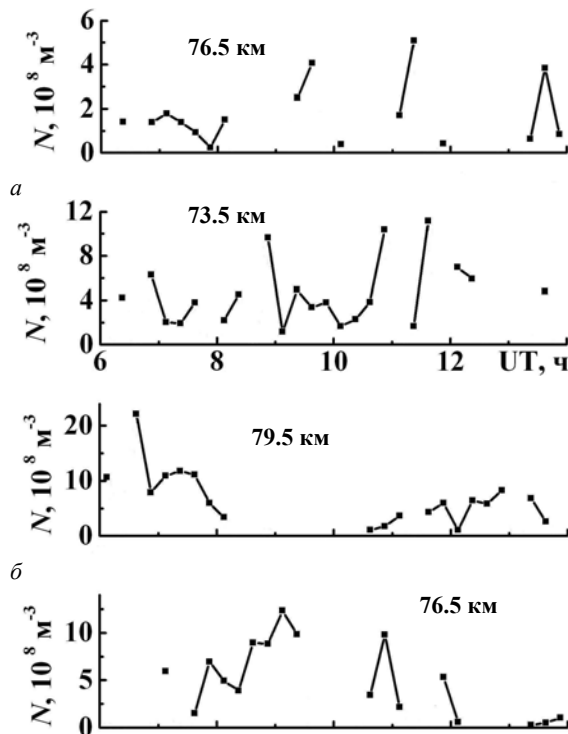


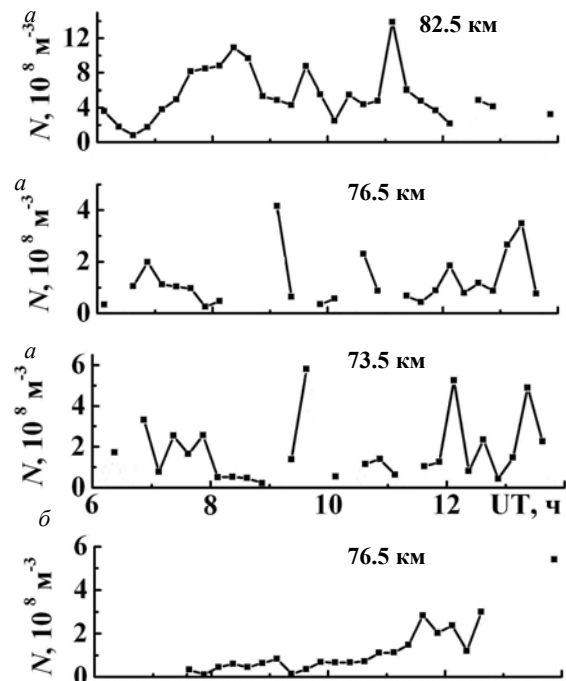
Рис. 2. Вариации электронной концентрации в нижней ионосфере во время протекания ГБ: 9 ноября 2004 г. (а), 10 ноября 2004 г. (б).

В период ГБ в основном имело место увеличение максимальных значений N и амплитуд ее вариаций. Так 9 ноября значение N в отдельные промежутки времени возрастало до $1.1 \cdot 10^9$ и $5.5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ на высотах 73.5 и 76.5 км соответственно (см. рис. 2, а). При этом значения N 3 и 13 ноября (дни со слабым магнитным возмущением) на высотах $73.5\text{--}76.5 \text{ км}$ обычно составляли $(1\text{--}4) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, а на высоте 82.5 км оно в среднем равнялось $7 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ (рис. 3).

Из рис. 2, б видно, что 10 ноября имели место всплески N в нижней ионосфере продолжительностью $1\text{--}2 \text{ ч}$, с максимальными значениями $2.1 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ на высотах 73.5 и 79.5 км и $1.5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ на высоте 76.5 км . Интересно, что время наблюдения максимальных значений увеличивалось с уменьшением высоты и составило около $06:35$, $09:05$ и $10:35$ для высот 79.5 , 76.5 и 73.5 соответственно.

Параметры волновых возмущений

Результаты исследования параметров ВВ в течение $8\text{--}10$ ноября 2004 г. приведены на рис. 4, 5. На рис. 4 видно достаточно хорошее подобие как временных зависимостей относительных вариаций электронной концентрации δ_N , так и спектров их амплитуд на высотах, отстоящих на $3\text{--}6 \text{ км}$. Временные вариации δ_N днем 9 ноября обычно не превышали 0.2 . В этот день наблюдались ВВ в широком диапазоне периодов от 25 до 180 мин , а значения δ_{Nm} обычно были меньше 0.08 .



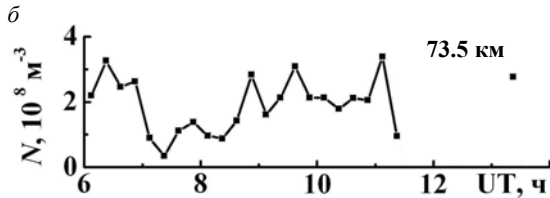


Рис. 3. Вариации электронной концентрации в нижней ионосфере при небольших магнитных возмущениях: 3 ноября 2004 г. (а), 13 ноября (б).

Днем 10 ноября поведение δ_N имело следующие особенности. Начавшееся около 07:00 колебание с $T \approx 80$ мин и $\delta_{Nm} \approx 0.11$ по истечении времени, примерно равного его периоду, сменилось квазипериодическим процессом с $\delta_{Nm} \approx 0.07-0.09$ и периодом, уменьшающимся от 60 до 30 мин. Этот процесс продолжался приблизительно до 11:00 (см. рис. 4, а). Описанные ВВ были менее заметны на высоте 87 км, что, вероятно, вызвано меньшим значением q . На этой высоте лучше прослеживается другое колебание с $T \approx 50-70$ мин, $\delta_{Nm} \approx 0.06$, которое началось после 11:00 и продолжалось около двух периодов. Максимальные отклонения значений δ_N 10 ноября составили около 0.3 и 0.4 на высотах 87 и 93 км соответственно.

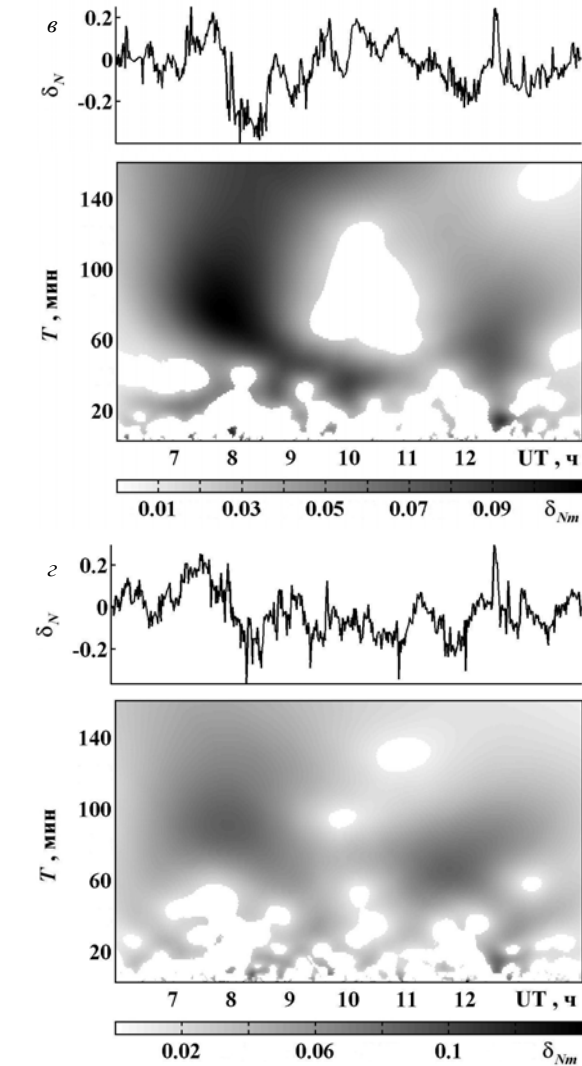
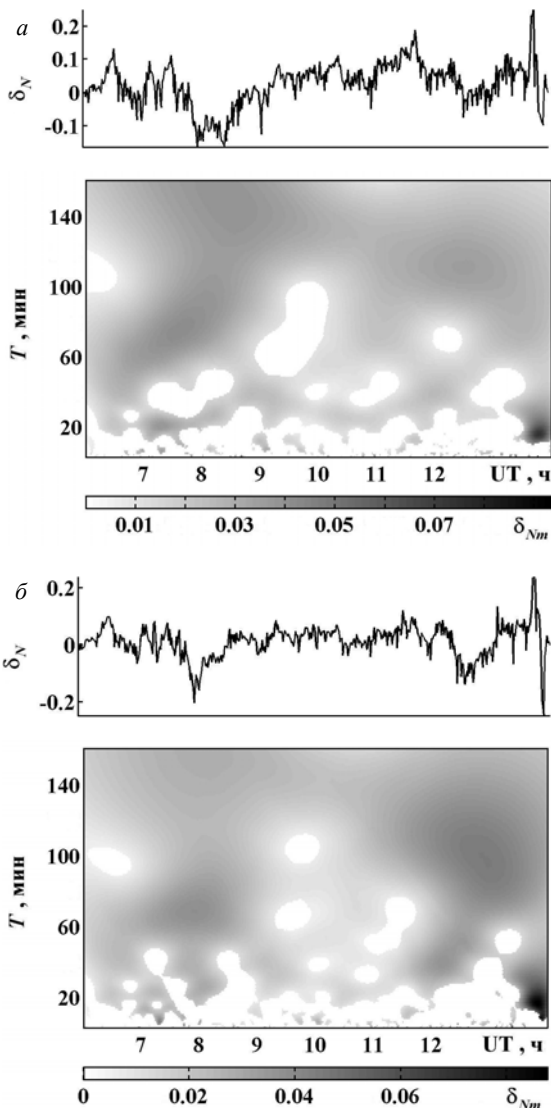


Рис. 4. Параметры ВВ электронной концентрации в период ГБ, полученные активным методом, 9 ноября 2004 г. на высотах 84 км (а) и 87 км (б), а также 10 ноября 2004 г. на высотах 87 км (в) и 93 км (г).

В ночное время 8–9 ноября значения δ_N обычно изменялись в пределах ± 0.1 (см. рис 5, а). Здесь следует отметить ВВ с $T = 40-50$ мин и $\delta_{Nm} \approx 0.03$, наблюдавшееся с 20:40 до 22:00, а также ВВ с $T = 15-20$ мин, $\delta_{Nm} \approx 0.03-0.04$, имевшие место около 01:00 и 02:00 9 ноября. Ночью 9–10 ноября абсолютные значения δ_N вначале не превышали 0.12, а к 01:00 возросли до 0.3 (см. рис. 5, б). Около 02:00 наблюдалось ВВ с $T \approx 18-25$ мин и $\delta_{Nm} \approx 0.12-0.14$. Относительные амплитуды ВВ с $T = 30-180$ мин обычно не превышали 0.06.

Обсуждение

Эффекты ГБ в среднеширотной нижней ионосфере часто вызваны высыпаниями высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли, которые имеют место во все фазы геомагнитной бури. С ними связаны заметные отклонения амплитуд и фаз СДВ-сигналов от фоновых значений [10], а также значительные вариации электронной концентрации и амплитуд обыкновенной и необыкновенной состав-

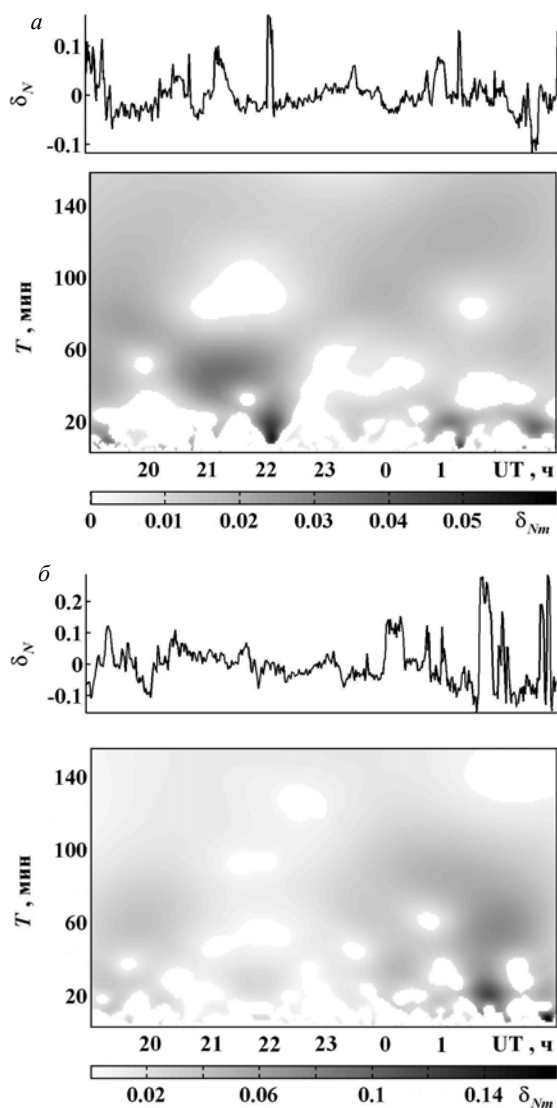


Рис. 5. Параметры ВВ электронной концентрации в период ГБ, полученные пассивным методом, 8–9 ноября 2004 г. (а) и 9–10 ноября 2004 г. (б).

ляющих ЧО сигналов [11]. Значительные высыпания электронов (так называемые послебуревые эффекты) имеют место в фазу восстановления магнитной бури (см., например, [12]). Потоки магнитосферных электронов в ионосферу, по-видимому, вызвали наблюдаемое нами существенное увеличение N в 1.5–2 раза днем 9 ноября (см. рис. 3) по сравнению с 3 и 13 ноября. Наиболее ярко такие эффекты были выражены 10 ноября, когда N в максимумах всплесков в 3–5 раз превышала фоновые значения, по-видимому, это можно объяснить следующим образом. Из рис. 1 видно, что с 06:00 до 12:00 10 ноября увеличивалась энергия высыпающихся электронов. При этом возмущения распространялись на меньшие высоты, с чем, вероятно, и связано увеличение временного запаздывания максимальных значений N с понижением высоты.

Вариации космической погоды обычно сопровождаются эффективной генерацией и усилением акустико-гравитационных волн (АГВ) с периодами $T \leq 3$ ч. Их источниками в период ГБ обычно являются вариации электромагнитного поля, плотностей

электрического тока и потоков заряженных частиц в высоких широтах и др. Такие волны распространяются в средние и низкие широты и вызывают существенные ВВ концентрации, температуры и скорости нейтральных и заряженных частиц. Другим источником ВВ в среднеширотной нижней ионосфере могут служить квазипериодические высыпания магнитосферных электронов. Наблюдавшееся нами в ночное время 9–10 ноября и днем 10 ноября увеличение амплитуд ВВ с $T = 20$ –100 мин может быть вызвано этими процессами. В целом для данной ГБ не обнаружена четкая корреляция между уровнем магнитной активности и параметрами ВВ в нижней ионосфере. По-видимому, в этой области преобладают АГВ, распространяющиеся из нижней атмосферы, а ГБ оказывают опосредованное влияние на параметры ВВ в нижней ионосфере.

Выводы

1. Проанализирован отклик нижней ионосферы на крайне сильную геомагнитную бурю 7–10 ноября 2004 г. Обнаружено повышение средних значений электронной концентрации в 1.5–2 раза на высотах 70–80 км, а также амплитуд вариаций (в отдельных всплесках в 3–5 раз) в период бури по сравнению со слабыми магнитными возмущениями.

2. Исследования параметров волновых возмущений в нижней ионосфере во время бури показали, что значения их относительных амплитуд обычно составляли 0.05–0.15. Имело место незначительное увеличение значений этих амплитуд в течение второго магнитного возмущения. Для данной геомагнитной бури не выявлена четкая взаимосвязь между уровнем магнитной активности и параметрами волновых возмущений в нижней ионосфере.

Автор выражает благодарность проф. Л.Ф. Черногору за ценные советы и помощь в интерпретации результатов экспериментальных данных; К.П. Гармашу и А.И. Гритчину за техническое обслуживание радара и проведение непрерывных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.
2. Карпачев А.Т., Деминова Г.Ф., Афонин В.В. Глобальный отклик верхней ионосферы на магнитосферную бурю 22–23 марта 1979 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45, № 6. С. 774–788.
3. Yermolaev Yu.L., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.A. Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review // Planetary and Space Science. 2005. V. 53, N 1–3. P. 189–196.
4. Field P.R., Rishbeth H. The response of ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data // J. Atmos. Sol-Terr. Phys. 1997. V. 59, N 2. P. 163–180.
5. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 9. С. 57–94.
6. 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. 21–24.

7. Гармаш К.П., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999. № 7. С. 3–15.

8. Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Выявление волновых возмущений в мезосфере при помощи СЧ–ВЧ-радаров // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 525–535.

9. Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 6. С. 723–763.

10. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Рожной А.А., Соловьева М.С. Вариации параметров СДВ-сигналов на радиотрассе Австралия–Камчатка во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 3. С. 385–393.

11. Гоков А.М., Черногор Л.Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11, № 5/6. С. 12–21.

12. Клицук В.П., Марченко С.Г., Соколов С.Н. Эффекты крупномасштабного высыпания релятивистских магнитосферных электронов во время и после геомагнитной бури 27–28 ноября 1990 г. по данным распространения СДВ // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, № 4. С. 93–100.

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
МОН Украины, Украина, Харьков,
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*