

**ОСОБЕННОСТИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ
В ПЕРИОД УМЕРЕННЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ,
СОПРОВОЖДАВШИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ
НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ПЛАЗМУ**

А.Н. Вовк, Л.Ф. Черногор

**FEATURES OF LARGE IONOSPHERE DISTURBANCES
IN A PERIOD OF MODERATE MAGNETIC STORMS ACCOMPANIED BY
THE ACTION OF HIGH POWER RADIATION AT THE NEAR-EARTH PLASMA**

A.N. Vovk, L.F. Chernogor

Приведены результаты экспериментальных исследований аperiодических и квазипериодических возмущений в ионосфере, последовавших за воздействием мощным радиоизлучением стенда «Сура» на геокосмическую плазму в спокойных и магнитовозмущенных условиях. Для диагностики использовался доплеровский радар вертикального зондирования, расположенный на расстоянии 960 км от нагревного стенда.

We present the results of the experimental investigations of aperiодic and quasiperiodic disturbances in the ionosphere followed by the action of high power radiation from the “Sura” heater on geospace plasma in the quiet and magnetic disturbed conditions. Vertical-sounding Doppler radar was used for diagnosis. The distance from the heater to the Doppler radar is 960 km.

Введение

Воздействие мощным радиоизлучением на ионосферную плазму оказывается удобным инструментом для исследования взаимодействия подсистем в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, генерации и распространения возмущений далеко за пределы диаграммы направленности антенны [Гармаш, 1998; Черногор и др., 2011, 2012].

Усиление взаимодействия подсистем в средних широтах ожидается в течении слабых и умеренных магнитных бурь, когда система Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера «активируется», становится метастабильной и ее легче перевести в нестабильное состояние, воздействуя потоками мощного радиоизлучения [Черногор, 2014; Черногор и др., 2014].

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения крупномасштабных аperiодических и квазипериодических возмущений в ионосфере, сопровождавших воздействие мощным радиоизлучением на околоземную плазму 20–28 августа 2013 г. на фоне ряда умеренных геомагнитных бурь, имевших место 20, 21 и 27 августа 2013 г. Для возмущения ионосферы использовался нагревный стенд «Сура», расположенный в 100 км восточнее Н. Новгорода (Россия). Для диагностики ионосферных возмущений использовался доплеровский радар вертикального зондирования, дислоцируемый вблизи Харькова (Украина) на расстоянии 960 км от нагревного стенда.

Результаты наблюдений

Для примера приведем результаты наблюдений 22 августа 2013 г. После включения нагревного стенда в 07:00 (здесь и далее UT) в режиме [+5 мин, –5 мин] с эффективной мощностью $PG=80$ МВт и частотой $f=4785$ кГц с временем запаздывания $\Delta t \approx 28$ мин на частоте 4.2 МГц появилось квазипериодическое колебание доплеровского смещения частоты (ДСЧ) f_d с периодом около 10 мин, которое в интервале времени 07:45–08:25 сменилось колебанием с периодом $T=20$ мин (рис. 1). Сигнал на ча-

стоте 3.2 МГц при этом экранировался слоем E_s . Начиная с 08:46 и до 13:00, ионосфера возмущалась непрерывным радиоизлучением длительностью посылки, равной 15 мин. С временем запаздывания Δt не более 20 мин возникали всплески ДСЧ длительностью ΔT характерной формы: два положительных выплеска f_{d+} , разделенные, как правило, более «глубоким» отрицательным всплеском f_{d-} . Примерно такие же всплески в этот день наблюдались также в интервалах времени 14:12–14:30 и 14:48–15:02 после включения стенда в других режимах. Всего имело место 8 событий, похожих друг на друга. Такое количество событий позволило вычислить статистические характеристики всплесков:

$$\overline{\Delta t} = 14.5 \pm 2.7 \text{ мин}, \quad \overline{\Delta T} = 18.2 \pm 0.8 \text{ мин}, \\ \overline{f_{d+}} = 0.10 \pm 0.01 \text{ Гц}, \quad \overline{f_{d-}} = -(0.21 \pm 0.02) \text{ Гц}.$$

В 14:30 имело место включение стенда в режиме [+6 мин, –6 мин]. Примерно с 15:05 на частоте 4.2 МГц наблюдалось колебание с $\Delta t \approx 35$ мин, $T=12$ мин, $f_{da}=0.08$ Гц и $\Delta T=60$ мин (см. рис. 1). На частоте 3.2 МГц подобное колебание отмечалось с 15:17 до 16:20. С 16:00 и до 19:00 стенд излучал на частоте 4785 кГц с $PG=45$ МВт. В интервалах времени 16:00–16:20, 16:40–17:00 и 18:40–19:00 был режим [+1 мин, –1 мин], а с 17:00 до 18:30 – режим [+3 мин, –7 мин]. В интервале времени 16:15–17:45 на частоте 4.2 МГц регистрировалось колебание с $T \approx 24$ мин и $f_{da}=0.15$ Гц. После 17:50 на обеих частотах имели место длиннопериодические ($T \approx 70$ мин) колебания f_d (см. рис. 1).

Выводы

1. На фоне умеренных магнитных бурь 21–23 августа 2013 г. обнаружены знакопеременные всплески доплеровского смещения частоты, сопровождавшие включения нагревного стенда в режиме несущей и имеющие среднее время запаздывания 14.5 ± 2.7 мин, длительность 18.8 ± 0.8 мин, амплитуду доплеровского смещения частоты 0.1–0.2 Гц и $\delta_N \approx 1.4\text{--}2\%$. Такие всплески в магнитоспокойных усло-

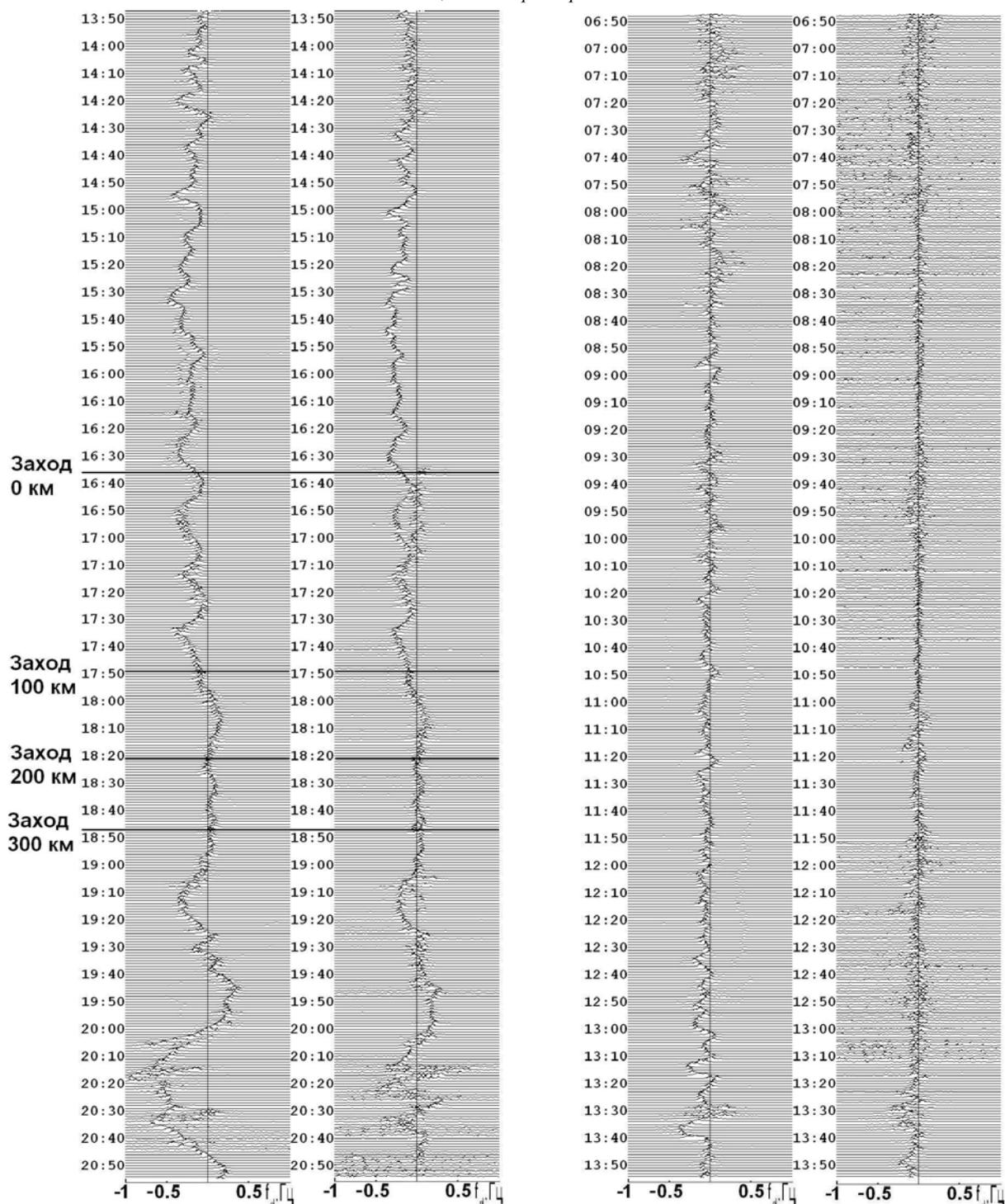


Рис. 1. Временные вариации доплеровских спектров 22 августа 2013 г. на частоте 4.2 МГц (слева) и 3.2 МГц (справа), соответствующие диапазону действующих высот 300–375 км. Горизонтальными линиями отмечены моменты захода Солнца.

виях не отмечались. Причиной их появления, скорее всего, является накопление высокоэнергичных (1–10 кэВ) электронов во внешнем радиационном поясе в процессе бурь и их высыпание в ионосферу.

2. В ряде случаев включение мощного радиоизлучения с частотой, близкой к учетверенной гирочастоте электронов, сопровождалось генерацией (усилением) слоя E_s . Время развития процесса не превышало единиц минут.

3. Подтверждено, что волновые возмущения, генерируемые мощным радиоизлучением, становятся заметными на расстоянии около 1000 км при эффективной мощности не менее 40 МВт. Увеличение

эффективной мощности вызывало усиление интенсивности волновых возмущений.

4. Подтверждено, что мощное периодическое радиоизлучение приводит к генерации волновых возмущений с периодом, равным длительности цикла нагрева.

5. В ряде случаев мощное радиоизлучение приводило к усилению естественных волновых возмущений, хотя период возмущений и длительность цикла нагрева не совпадали.

6. Магнитная буря могла приводить к усилению волновых возмущений, вызванных движением вечернего солнечного терминатора. Влияние

умеренных магнитных бурь на эффективность генерации искусственных волновых возмущений не обнаружено. Этого и следовало ожидать при слабых и умеренных бурях. Влияние сильных магнитных бурь на упомянутую эффективность требует специальных исследований.

Авторы благодарны В.Л. Фролову за организацию и проведение исследований с нагревным стендом СУРА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1998. № 6. С. 17–40.

Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014. 448 с.

Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф., Панасенко С.В., Урядов В.П. Аперiodические крупномасштабные возмущения в Е-области ионосферы, стимулированные мощным радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 3. С. 173–185.

Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Барабаш В.В. Аперiodические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере: результаты ионозондовых наблюдений // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57, № 2. С. 110–128.

Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Пушин В.Ф. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2011. Т. 54, № 2. С. 81–96.

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина