

**ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НА ИОНОСФЕРУ  
НА ФОНЕ УМЕРЕННЫХ ГЕОКОСМИЧЕСКИХ БУРЬ:  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИОНОЗОНДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

<sup>1</sup>В.В. Барабаш, <sup>2</sup>Л.Ф. Черногор

**EFFECTS OF POWERFUL RADIO WAVE ACTION  
ON THE IONOSPHERE DURING MODERATE GEOSPACE STORMS:  
RESULTS OF IONOSOND OBSERVATIONS**

<sup>1</sup>V.V. Barabash, <sup>2</sup>L.F. Chernogor

Приведены результаты наблюдений за вариациями критической частоты  $f_oF_2$  на трех разнесенных по широте и долготе ионозондах, сопровождавших воздействие мощным радиоизлучением на ионосферу нагревного стенда СУРА. Удаление ионозондов от стенда составляло 560, 960, и 2200 км. Во время включений стенда с временем запаздывания 10–15 мин возникали аperiodические всплески  $f_oF_2$  величиной от 0.07 до 0.41 МГц. Их продолжительность равнялась 10–15 мин, относительные увеличения концентрации электронов составляли от 2 до 13 %.

The observation results of the variations of the critical frequency  $f_oF_2$  for three spaced in latitude and longitude ionosondes were presented. Variations were caused by action of powerful radio waves from the SURA heater. Distance from ionosondes to heater was 560, 960, and 2,200 km. Aperiodic bursts in  $f_oF_2$  having values from 0.07 to 0.41 MHz are occurred during heater-on periods with time delay of 10–15 min. Their duration is 10–15 min, the relative increase in the electron concentration ranged from 2 to 13 %.

**Введение**

Среди активных экспериментов важнейшее место занимает модификация геокоsmической плазмы мощным радиоизлучением [Гармаш, 1998; Черногор, 2012; 2014]. При этом, как правило, исследуются локализованные процессы, возникающие в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда [Gurevich, 1978; Тепловые..., 1979; Борисов и др., 1986; Митяков и др., 1989].

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения пространственного распределения аperiodических крупномасштабных (~1000 км) возмущений в F-области ионосферы, которые сопровождали воздействие на геокоsmическую плазму мощного радиоизлучения стенда СУРА 20–28 августа 2013 г.

**Средства и методы исследований**

*Нагревный стенд.* Возмущение ионосферной плазмы радиоизлучением стенда СУРА осуществлялось с 20 по 28 августа 2013 г. Стенд расположен вблизи Н. Новгорода (Россия). Режимы работы стенда приведены в табл. 1.

*Средства наблюдения.* Для наблюдения за возмущениями в ионосфере, вызванных воздействием мощного радиоизлучения, использовались три цифровых ионозонда («Москва», «Харьков» и «Прухониц»). Частота съема ионограмм – 1 ионограмма/15 мин (в Харькове – 1 ионограмма/5 мин). Расстояние от стенда СУРА до ионозондов изменялось от 560 до примерно 2200 км.

*Состояние космической погоды.* 20, 21 и 27 августа 2013 г. наблюдалось резкое увеличение примерно на порядок концентрации частиц в солнечном ветре продолжительностью около 10 часов, вызвавшее магнитные бури с энергией  $\sim 10^{15}$  Дж и мощностью  $\sim 10^{11}$  Вт. В течение измерительной кампании имели место как положительные, так и отрицательные ионосферные бури. Для первых значение критической частоты  $f_oF_2$  и концентрация электронов  $N$  в максимуме слоя F2 увеличивались по сравнению со значениями  $N_0$  в контрольный день 25 августа

2013 г., а для вторых – уменьшались. Увеличение  $N$  не превышало 50 %, а ее уменьшение – 40 %.

**Результаты наблюдений**

Для примера опишем результаты наблюдений для 22 августа 2012 г. Режим работы нагревного стенда приведен в таблице.

*Временные вариации  $f_oF_2$  вблизи Харькова.* Утром наблюдался слой  $E_s$ , который почти все время экранировал область F-ионосферы. В интервале времени 06:00–15:00 регулярные вариации  $f_oF_2$  не превышали 0.6 МГц (рисунок). На них накладывались ее всплески величиной 0.10–0.15 МГц и продолжительностью 10–15 мин.

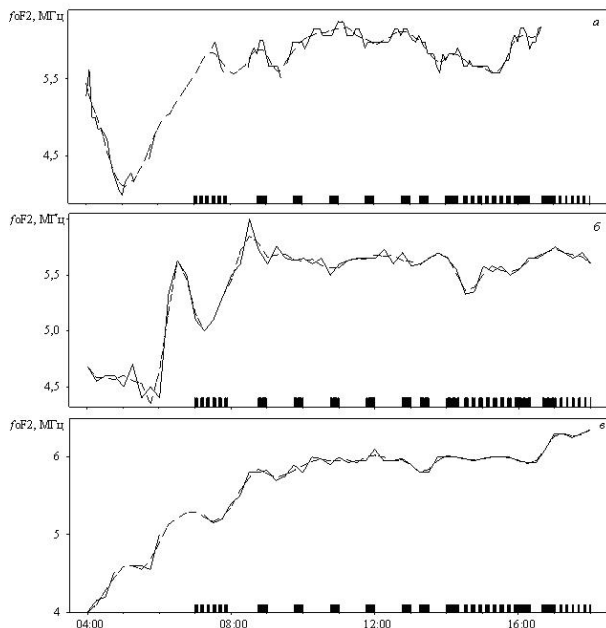
*Временные вариации  $f_oF_2$  вблизи Москвы.* С 06:00 до 07:30 наблюдался скачок  $f_oF_2$  от 4.6 до 5.7 МГц (см. рис.). В интервале 07:30–08:00  $f_oF_2 \approx 5$  МГц. Затем наступило резкое увеличение  $f_oF_2$  от 5 до 5.9 МГц. С 09:00 до 18:00 сглаженные значения  $f_oF_2$  изменялись слабо. На монотонные изменения  $f_oF_2$  накладывались ее всплески величиной 0.12–0.18 МГц продолжительностью около 15 мин.

*Временные вариации  $f_oF_2$  вблизи Прухониц.* С 04:30 до 05:45, с 05:45 до 07:45 и с 08:00 до 09:30 наблюдался рост  $f_oF_2$  на 0.3, 0.5 и 0.3 МГц соответственно (см. рис. 1). Примерно с 09:30 до 18:00 сглаженные значения  $f_oF_2$  практически не изменялись и были близки к 6.0 МГц. Медленные вариации  $f_oF_2$  сопровождалась ее всплесками величиной 0.12–0.18 МГц и продолжительностью около 15–30 мин.

**Параметры ионосферных возмущений**

*Частота появления всплесков  $f_oF_2$ .* В контрольный день относительная частота появления всплесков  $f_oF_2$  оказалась равной 50, 58 и 58 % для ионозондов «Харьков», «Москва» и «Прухониц» соответственно. Эти значения свидетельствуют о том, что события появления «всплесков» и «провалов» практически равновероятны. Для ионозонда «Харьков» относительная частота появления всплесков, следовавших за включением стендов в пределах первых 15 мин, составляла 76 %, а для ионозондов «Москва» и «Прухониц» – 68 %.

Интервал времени	Частота, кГц	Эффективная мощность, МВт	Режим работы
07:00–08:00	4785	100	[+5 мин, –5 мин]
08:46–09:01	4785	100	несущая
09:46–10:01	4785	100	несущая
10:46–11:01	4785	100	несущая
11:46–12:01	4785	100	несущая
12:46–13:01	4785	100	несущая
13:16–13:30	4785	100	несущая
14:00–14:20	4785	100	[+1 мин, –1 мин]
14:30–16:00	4785	100	[+6 мин, –6 мин]
16:00–16:20	4785	45	[+1 мин, –1 мин]
16:40–17:00	4785	45	[+1 мин, –1 мин]
17:00–18:30	4785	45	[+3 мин, –7 мин]
18:40–19:00	4785	45	[+1 мин, –1 мин]



Временные вариации критической частоты области F2-ионосферы: а – вблизи Харькова; б – вблизи Москвы; в – вблизи Прухониц.

Время запаздывания и продолжительность всплесков  $f_oF2$ . Всплески возникали с временем запаздывания близким, к 5 мин, реже – 10–15 мин, и продолжались 10–15 мин.

В контрольный день продолжительность всплесков изменялась от 5 до 30 мин, а их «время запаздывания» – от 5 до 30 мин на интервале времени в 30 мин.

Амплитуда всплесков концентрации электронов. Значения  $\delta_N$  в периоды работы стенда обычно изменялись от 3–4 до 10–13 %. В контрольные дни они были несколько меньше: от 1.7 до 7.5 %. Наибольшие (5.7–8.4 %) значения  $\delta_N$  обычно имели место для ионозонда «Москва», наименьшие (4.2–6.8 %) – для ионозонда «Прухониц». Для ионозонда «Харьков» среднее значение  $\langle \delta_N \rangle \approx 3.8–7.5$  %.

### Выводы

1. Во временных вариациях критической частоты слоя F2 обнаружены аperiodические всплески величиной 0.1–0.4 МГц, сопровождавшие воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением длительностью 15 мин. Время запаздывания возмущений по отношению к моменту включения нагревного стенда составляло 5–15 мин, а его продолжительность 10–15 мин. Горизонтальный размер возмущенной области

ионосферы был не менее 2200 км. Величина возмущений с увеличением расстояния от нагревного стенда несколько уменьшалась.

2. В ряде случаев наблюдался «эффект накопления» возмущений, когда аperiodические всплески возникали при работе стенда в режиме [+5; –5 мин].

3. Обнаруженные всплески критической частоты эпизодически маскировались волновыми возмущениями естественного и искусственного происхождения. В последнем случае они генерировались мощным радиоизлучением, о чем свидетельствует их скорость распространения (около 300–500 м/с), наблюдаемая в [Черногор, Фролов, 2012].

4. Аperiodические всплески критической частоты свидетельствуют об увеличении на 1–10 % концентрации электронов в области F ионосферы, вызванные, скорее всего, высыпанием высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли, находящегося в метастабильном состоянии. Такое состояние могло быть подготовлено слабыми и умеренными геокоsmическими бурями, имевшими место в период измeрительной кампании.

Авторы благодарны В.Л. Фролову за возможность проведения экспериментов со стендом СУРА.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1986. 184 с.
- Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90–110.
- Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. 1989. Т. 9. С. 1–140.
- Тепловые нелинейные явления в плазме. Сб. науч. трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. 220 с.
- Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014. 448 с.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика, 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14–36.
- Gurevich A.V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. New York, Heidelberg, Berlin: Springer – Verlag, 1978. 465 p.

<sup>1</sup>Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков, Украина  
<sup>2</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина