

## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

*Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения крупномасштабных (~ 560 км) возмущений в нижней ионосфере, которые могут быть результатом взаимодействия подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. До настоящего времени исследовались в основном эффекты, возникающие в пределах диаграммы направленности антенны. Для возмущения ионосферной плазмы использовался нагревной стенд “Сура” (г. Нижний Новгород), для диагностики возникающих возмущений – ионозонд (г. Москва). Установлено, что включение/выключение стенда приводило к увеличению минимальной наблюдаемой частоты на ионограммах на 1.2 и 1.6 МГц в ночное и дневное время соответственно. Увеличение этой частоты обусловлено ростом поглощения зондирующей радиоволны в результате роста концентрации электронов в нижней ионосфере. Последнее, скорее всего, является результатом высыпания высокоэнергичных (~ 100 кэВ) электронов из магнитосферы в нижнюю ионосферу. Оцененная плотность потока электронов оказалась порядка  $10^7 \div 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Подтверждено существование эффектов накопления, переключения и ударного возмущения.*

*Ключевые слова:* мощное радиоизлучение, крупномасштабные возмущения, нижняя ионосфера, высыпание электронов, система ЗАИМ, взаимодействие подсистем

### 1. Введение

#### 1.1. Актуальность работы

Качественно новое изучение физических процессов в геокосмосе началось после того, как были сформулированы основные положения системной парадигмы [1–6]. В соответствии с этой парадигмой при изучении влияния потоков энергии “снизу” целесообразно планету и геокосмос рассматривать как систему Земля (внутренние оболочки) – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ), а при изучении влияния потоков энергии “сверху” – как систему Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (СМСМИАЗ).

В этих системах имеют место прямые и обратные связи между подсистемами. Для исследования взаимодействия подсистем удобными и эффективными оказываются активные эксперименты, когда место и время воздействия, а также параметры источника энергии заведомо известны. Среди активных экспериментов в геокосмосе особая роль отводится воздействию на ионосферную плазму мощного радиоизлучения, которому последние сорок лет уделяется значительное внимание, – опубликованы сотни статей,

несколько монографий, сборников статей и тематических выпусков журналов (см., например, [7–13]). Подавляющее число работ посвящено изучению эффектов в пределах диаграммы направленности нагревного стенда (локализованным возмущениям) и преимущественно в F-области ионосферы. В отличие от упомянутых трудов в настоящей работе обсуждаются крупномасштабные (~ 560 км) возмущения и только в нижней ионосфере.

#### 1.2. Постановка задачи

Еще в 1972 г. нами были обнаружены эффекты, свидетельствующие об увеличении концентрации электронов  $N$  в нижней ионосфере с временем запаздывания по отношению к началу нагрева ионосферы мощным радиоизлучением  $\Delta t \approx 5 \div 15$  мин [14–25]. Оказалось, что увеличение  $N$  на десятки–сотни процентов имело место не только вблизи нагревного стенда, но и на расстоянии  $R \approx 1000$  км от него. В ходе таких экспериментов нам удалось выявить основные закономерности возникающих возмущений, которые были названы крупномасштабными. Возмущения в нижней ионосфере были аperiодическими, их появление и время развития существенно зависели от состояния космической погоды и режима

нагрева. Удалось выделить следующие три основные эффекта.

1. *Эффект накопления.* При воздействии на ионосферу сравнительно короткими импульсами (длительность импульса  $\tau \sim 1 \div 5$  мин) реакция наблюдалась не при первом включении, а постепенно “накапливалась”. Время становления возмущений при этом составляло  $5 \div 15$  мин.

2. *Эффект переключения (эффект ударного воздействия).* В ряде случаев всплески возмущений наблюдались при переключении мощности или выключении нагревного стенда.

3. *Эффект исчерпания (эффект ударного возмущения).* Он заключался в том, что при длительном воздействии (в течение времени  $\Delta T \sim 1 \div 5$  ч) возмущения могли заканчиваться до выключения нагревного стенда.

Все эти закономерности можно объяснить активизацией взаимодействий подсистем в системе ЗАИМ при ударном воздействии на одну из подсистем. Схема взаимодействия подсистем будет описана ниже.

Для подтверждения обнаруженных ранее закономерностей (см., например, [21, 22]) требуется постановка новых экспериментов. В настоящей работе для обнаружения крупномасштабных возмущений с масштабами около 560 км использовался ионозонд.

Цель работы – исследование эффективности генерации аперiodических крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере при различных режимах работы нагревного стенда и различных состояниях космической погоды.

## 2. Средства и методы

### 2.1. Нагревный стенд “Сура”

Возмущение ионосферной плазмы стендом “Сура” осуществлялось с 27 августа по 4 сентября 2012 г. Режимы работы стенда и его параметры приведены в табл. 1. Несущая частота стенда в разных экспериментах изменялась от 4785 до 7815 кГц, поляризация радиоволн была обыкновенная либо необыкновенная. Длительность импульсов воздействия варьировалась от 1 до 30 мин, в ряде случаев использовался непрерывный режим излучения. Эффективная мощность стенда приближалась к 150 МВт. Для достижения эффекта магнитного зенита

во всех случаях диаграмма направленности антенны была наклонена к югу на  $12^\circ$ .

Стенд расположен вблизи г. Нижний Новгород (Россия). Его географические координаты следующие:  $56.15^\circ$  с. ш.,  $46.1^\circ$  в. д.

### 2.2. Ионозонд

Для наблюдения за возмущениями в ионосфере, вызванными воздействием мощного радиоизлучения, использовался цифровой ионозонд DPS-4, расположенный вблизи г. Москва (Россия). Его географические координаты следующие:  $55.5^\circ$  с. ш.,  $37.3^\circ$  в. д.

Частота съема ионограмм – 1 ионограмма каждые 15 мин (ионограммы представлены на сайте <http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>).

Расстояние  $R$  от стенда “Сура” до ионозонда составляет около 560 км.

Погрешность отсчета частоты зондирующей радиоволны – не хуже 50 кГц.

## 3. Состояние космической погоды

Состояние космической погоды контролировалось при помощи параметров солнечного ветра (концентрации частиц  $n_{sw}$ , скорости  $V_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$  и давления  $p_{sw}$ ), компонент  $B_y$  и  $B_z$  межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акасофу  $\epsilon_A$ , а также индексов геомагнитной активности  $K_p$  и  $D_{st}$ .

26 августа 2012 г. геокосмическая среда была слабо возмущена, наблюдалось незначительное возмущение межпланетного поля (до  $-(5 \div 6)$  нТл) и геомагнитного поля ( $K_{p\max} < 4$ ).

С 27 августа по 31 августа 2012 г. состояние космической погоды характеризовалось как спокойное (см. рис. 1). Параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля слабо флуктуировали вокруг своих невозмущенных значений.

1 сентября 2012 г. значения  $n_{sw}$  увеличились до  $(1 \div 2) \cdot 10^6$  м<sup>-3</sup> (рис. 2). Такие значения наблюдались в течение первой половины суток 1 сентября, а также всех суток 2 сентября. В течение второй половины суток 3 сентября концентрация  $n_{sw}$  выросла до  $2 \cdot 10^7$  м<sup>-3</sup>. 4 и 5 сентября значения  $n_{sw}$  также достигали  $\sim 10^7$  м<sup>-3</sup>. Увеличение  $n_{sw}$  сопровождалось увеличением  $V_{sw}$ ,  $T_{sw}$  и  $p_{sw}$ .

С 1 по 3 сентября 2012 г. компонента  $B_z$  стала отрицательной, значения функции  $\epsilon_A$  увеличились

Таблица 1. Основные сведения о параметрах и режимах работы нагревного стенда “Сура”

Дата	Время (УТ)	Режим	Частота, кГц	Эффективная мощность, МВт	Примечание
27.08.2012 г.	17:00–18:30	[+5; –5 мин]	4785	75	Три РПУ* синхронно
28.08.2012 г.	06:15–09:45	[+30; –30 мин]	4785	75	То же
	12:00–12:30	–	–	–	Настройка РПУ
	13:00–13:30	Непрерывно	5828	110	Три РПУ синхронно
	13:45–16:00	[+10; –10 мин]	5828	110	То же
	16:00–16:30	–	–	–	Настройка РПУ
	16:40–18:30 18:30–20:30	[+10; –10 мин] [+15; –15 мин]	4785 4785	80 80	Три РПУ синхронно То же
29.08.2012 г.	06:00–09:30	[+30; –30 мин]	4785	80	То же
	10:45–13:00	[+15; –15 мин]	6720	150	То же
	13:15–13:45	Непрерывно	6720	150	То же
	14:15–15:45	[+30; –30 мин]	5828	130	То же
	16:05–18:30	[+10; –10 мин]	5828	130	То же
	18:30–20:30	[+15; –15 мин]	5828	130	То же
30.08.2012 г.	07:00–09:30	[+30; –30 мин]	4785	70	То же
	10:00–11:15	[+5; –5 мин]	6720	65	Только 1-й и 3-й РПУ
	13:25–14:02	Непрерывно	6500	65	То же
	14:20–14:40	То же	6500	65	То же
	15:20–16:40	[+20; –10 мин]	5828	45	То же
	17:00–18:25	[+5; –5 мин]	5828	45	То же
31.08.2012 г.	09:58–10:59	[+1; –1 мин]	4785	65	Три РПУ синхронно
	16:00–19:45	[+15; –15 мин]	6720	65	То же
1.09.2012 г.	07:21–07:26	Непрерывно	7815	130	То же
	07:30–07:33	То же	7815	130	То же
	07:33–07:39	То же	7815	60	Только 1-й и 3-й РПУ
	07:41–07:50	То же	7815	60	То же
	09:51–09:56	То же	7815	110	Три РПУ синхронно
	10:00–10:10	То же	7815	110	То же
	10:13–10:25	То же	7815	110	То же
	10:30–11:00	[+1; –1 мин]	7815	110	То же
	11:00–12:30	[+10; –10 мин]	7815	110(60)	С 11:05 1-й и 3-й РПУ
	13:25–14:01	[+6; –4 мин]	7815	110	Три РПУ синхронно
	14:19–16:03	[+3; –3 мин]	6720 ÷ 6780	120	То же
	16:03–17:10	[+3; –3 мин]	6780 ÷ 6660	60	Только 1-й и 3-й РПУ
	17:13–18:04	[+3 ± 10 с; –3 мин]	6660	75	То же
2.09.2012 г.	06:00–10:30	[+30; –30 мин]	4785	80	Три РПУ синхронно
	13:30–14:00	Непрерывно	4785	80	То же
	15:00–18:30	[+30; –30 мин]	4785	80	То же
3.09.2012 г.	16:00–16:15	Непрерывно	5828	115	То же
	16:39–16:47	–	–	–	Настройка РПУ
	17:00–17:15	Непрерывно	6720	140	Три РПУ синхронно
	17:35–17:45	То же	5455	120	То же
	18:00–18:45	[+15; –15; +15 мин]	5455	120	То же
4.09.2012 г.	10:55–11:15	Непрерывно	5828	115	То же
	11:40–12:03	То же	5828	100	То же
	13:30–13:50	То же	5828	120	То же
	16:50–18:20	[+10; –10; +10 мин]	5455	120	То же

\*РПУ – радиопередающее устройство.

от 1 ÷ 2 до 8 ГДж/с. Индекс  $K_p$  увеличился от  $\approx 1$  до 4 ÷ 6, а  $D_{st}$ -индекс уменьшился до  $-(50 \div 60)$  нТл. Наступила сильная ( $K_{p\max} = 6$ ) геомагнитная буря. Она продолжалась до 8 сентября 2012 г.

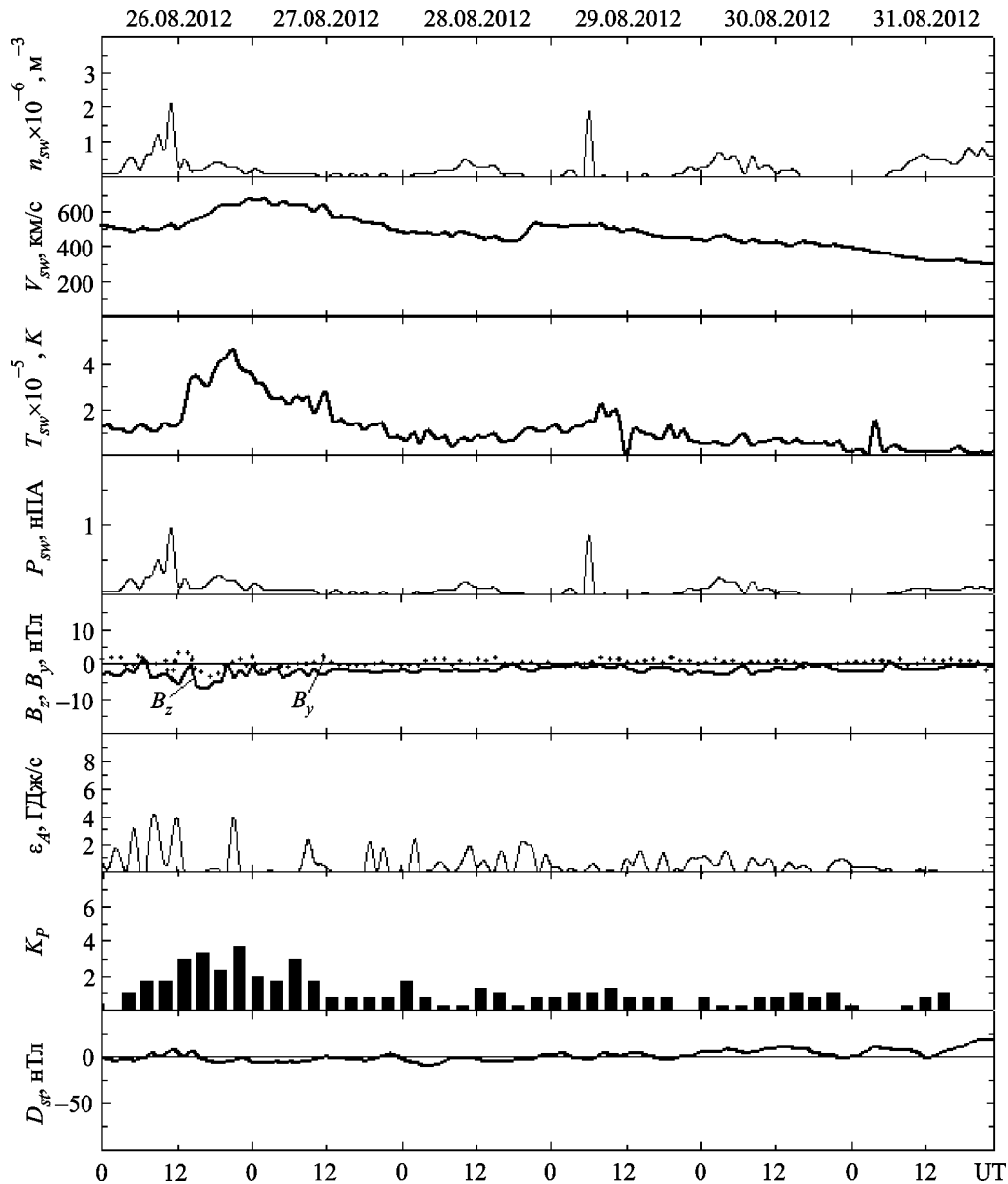


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра (радиальной скорости  $V_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$  и концентрации  $n_{sw}$ , рассчитанных значений динамического давления  $p_{sw}$ )  $B_y$ - (точки) и  $B_z$ -компоненты (сплошная линия) межпланетного магнитного поля, рассчитанных значений энергии  $\epsilon_A$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени,  $K_p$ -индекса,  $D_{st}$ -индекса с 26 по 31 августа 2012 г.

#### 4. Результаты наблюдений

Состояние возмущенности нижней ионосферы контролировалось при помощи минимальной наблюдаемой частоты (МНЧ)  $f_{min}$  на ионограммах вертикального зондирования. Временные вариации  $f_{min}$  для 27–31 августа и 1–6 сентября 2012 г. приведены на рис. 3 и рис. 4 (здесь и далее приводится всемирное время UT, если не оговорен другой вариант).

26 сентября стэнд “Сура” не излучал, поэтому эти сутки использовались как контрольные.

Вариации МНЧ были следующими. В дневное время (с 03:00 до 14:00) значения МНЧ были близки к 1.5 МГц. Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_f \approx 0.1$  МГц. После 15:00  $f_{min}$  увеличилась от 1.25 до 1.5 МГц и оставалась на таком уровне до 24:00. В течение всего времени наблюдались незначительные (на  $0.1 \div 0.2$  МГц) всплески.

День 27 августа 2012 г. также можно рассматривать как контрольный (до 17:00). Значения МНЧ флуктуировали вблизи невозмущенного значения

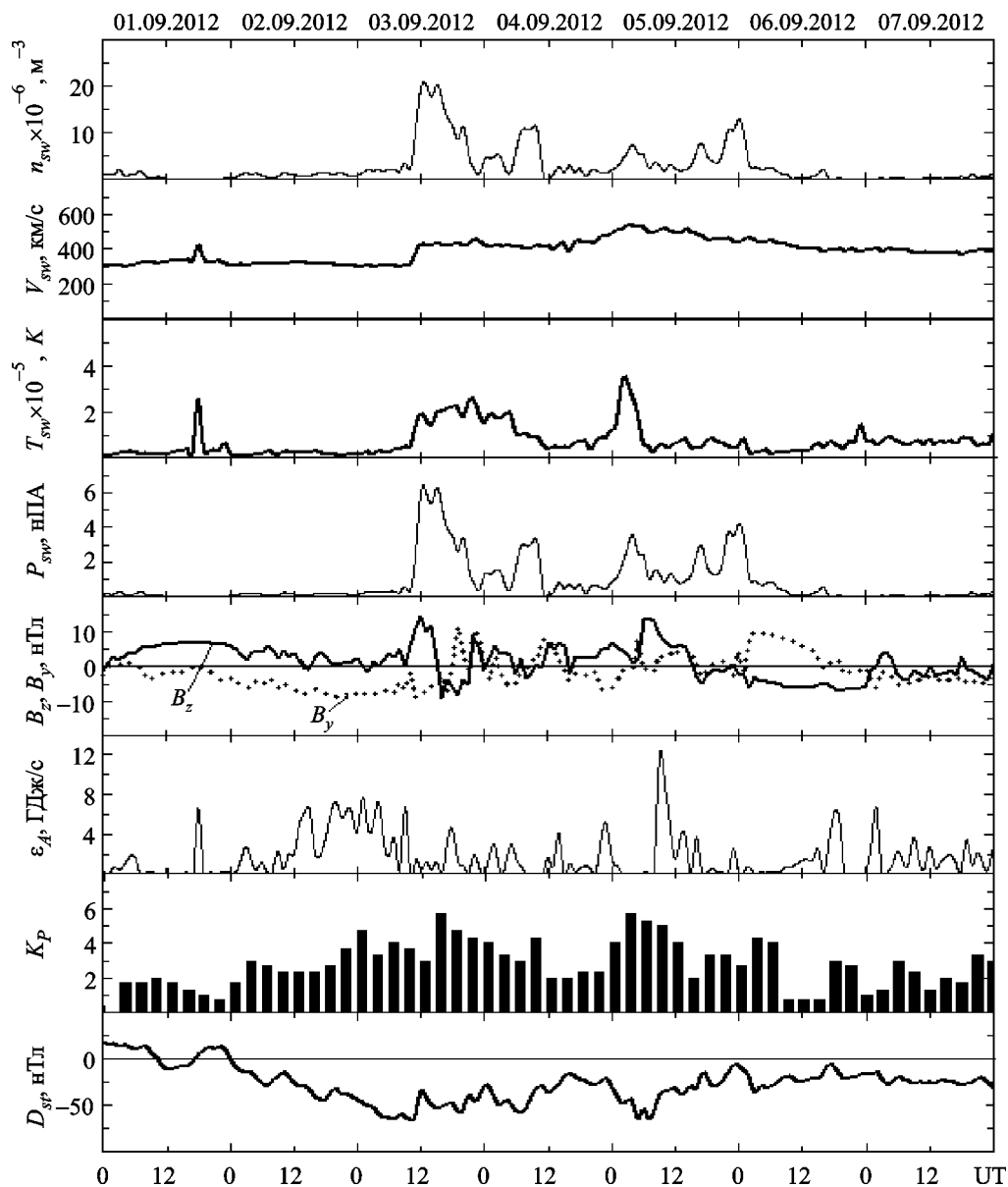


Рис. 2. Временные вариации параметров солнечного ветра (радиальной скорости  $V_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$  и концентрации  $n_{sw}$ , рассчитанных значений динамического давления  $p_{sw}$ )  $B_y$  - (точки) и  $B_z$  -компоненты (сплошная линия) межпланетного магнитного поля, рассчитанных значений энергии  $\epsilon_A$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени,  $K_p$  -индекса,  $D_{st}$  -индекса с 1 сентября по 7 сентября 2012 г.

$f_{\min 0} \approx 1.3$  МГц,  $\sigma_f$  составило около 0.1 МГц. Стенд “Сура” излучал лишь в интервале времени 17:00–18:30. За час до включения стенда  $f_{\min 0} = 1.6$  МГц. С 17:16 до 17:31  $f_{\min} \approx 1.8$  МГц. Следующее заметное увеличение  $f_{\min}$  имело место в 19:46.

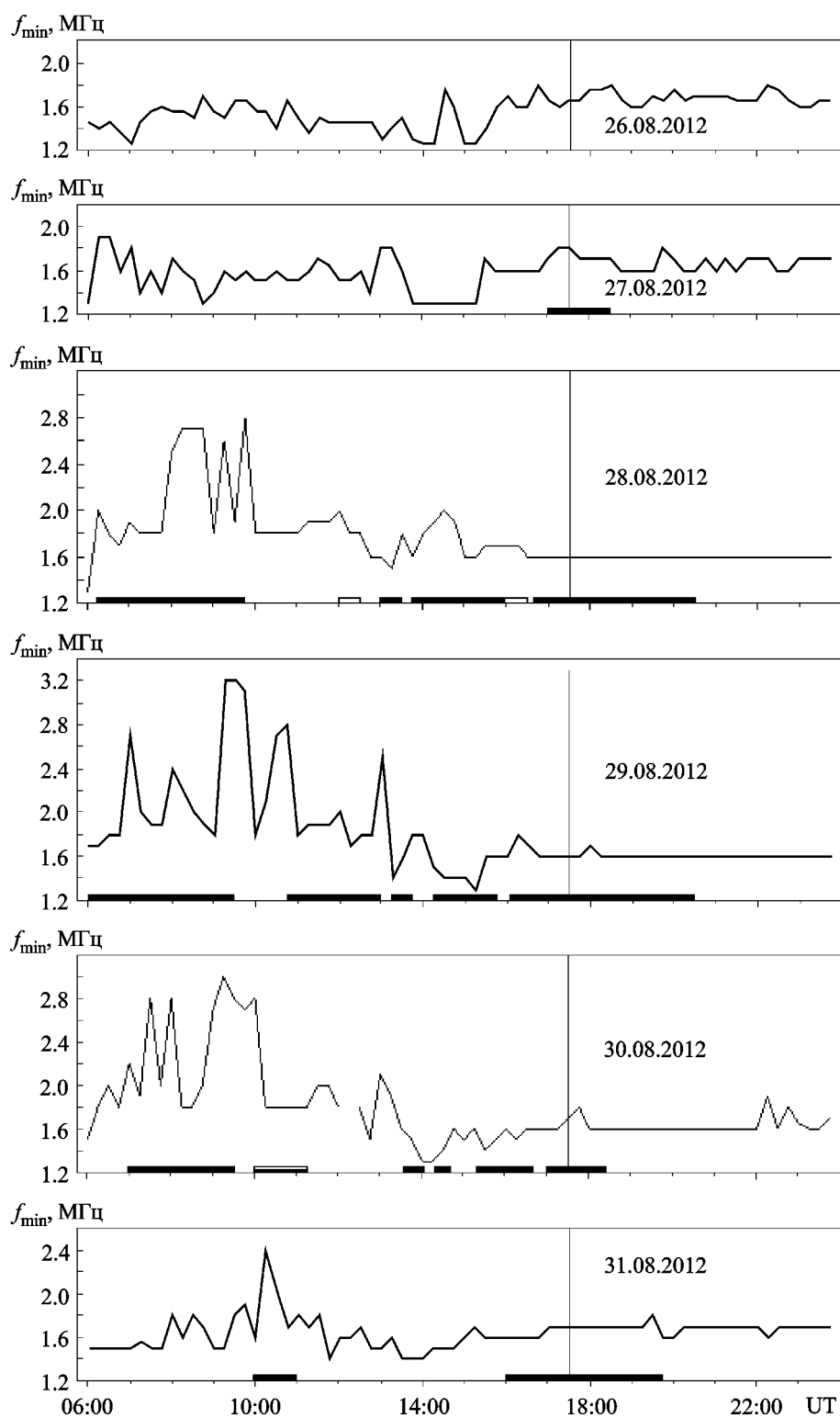
В последующие сутки, с 28 по 31 августа 2012 г., стенд с определенными паузами излучал как в дневное, так и в ночное время.

28 августа 2012 г. значительное увеличение МНЧ наблюдалось в интервале времени с 08:01

до 08:31, а также в 09:16 и 09:46. Незначительное (на  $0.3 \div 0.4$  МГц) увеличение МНЧ имело место с 14:01 до 14:46.

29 августа 2012 г. всплески МНЧ наблюдались в 07:01, 08:01, 09:16, 09:31, 09:46, 10:16, 10:31, а также в 13:01. Значения  $f_{\min}$  при этом достигали  $2.8 \div 3.2$  МГц.

30 августа 2012 г. увеличение значений МНЧ отмечалось в 07:01, 07:31, 08:01, 09:01, 09:16, 09:31, 09:46, 10:01, 13:01 и 13:16. При этом  $f_{\min}$  достигала  $2.2 \div 3.0$  МГц.



**Рис. 3.** Временные вариации МНЧ в период с 26 по 31 августа 2012 г. Темными прямоугольниками на временной оси показаны интервалы работы нагревного стенда “Сура”, светлыми прямоугольниками – интервалы настройки РПУ, а их комбинация обозначает уменьшение мощности. Вертикальная линия обозначает момент захода Солнца на высоте 100 км

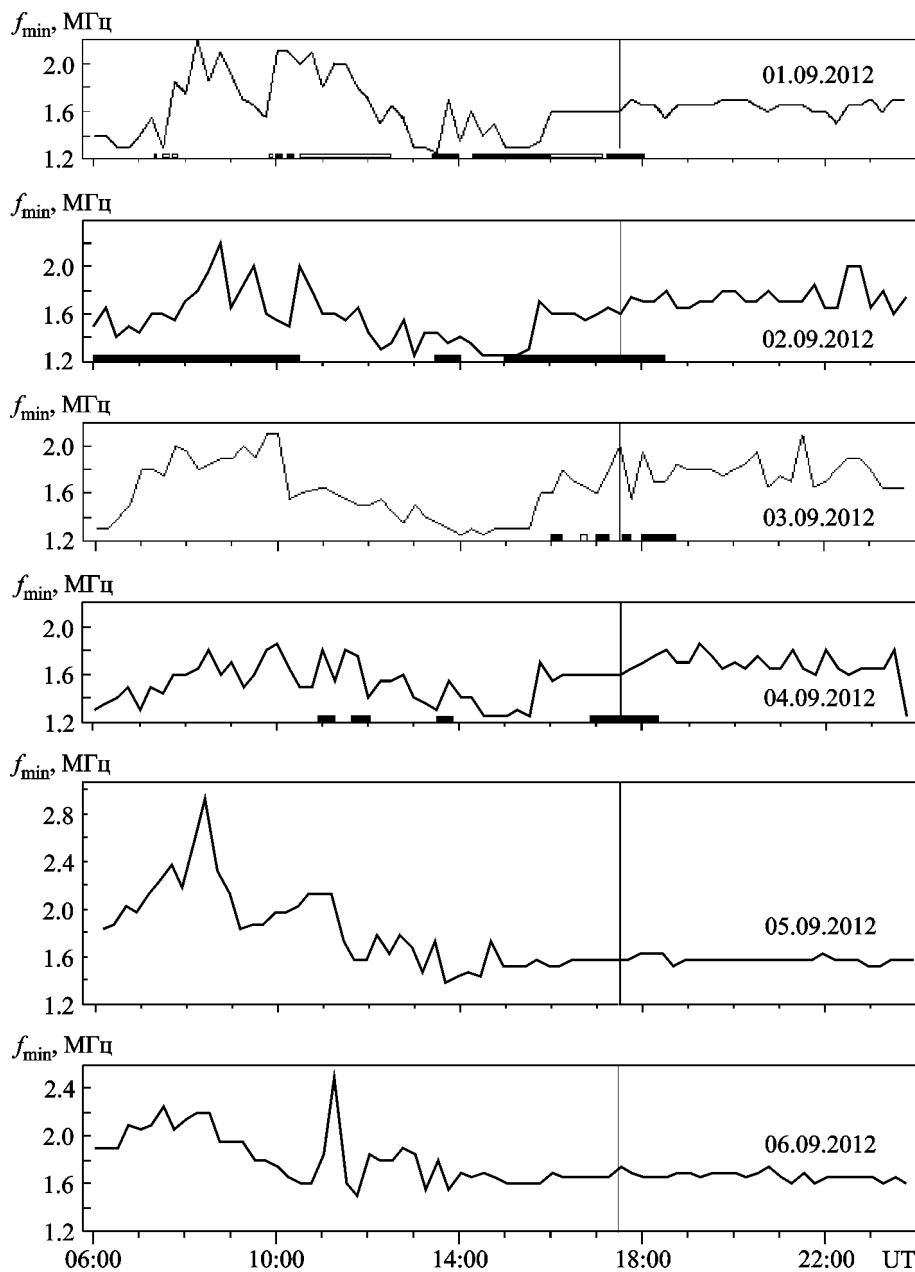


Рис. 4. Временные вариации МНЧ в период с 1 по 6 сентября 2012 г. Темными прямоугольниками на временной оси показаны интервалы работы нагревного стенда “Сура”, светлыми прямоугольниками – интервалы настройки РПУ, а их комбинация обозначает уменьшение мощности. Вертикальная линия обозначает момент захода Солнца на высоте 100 км

31 августа 2012 г. всплеск МНЧ наблюдался в интервале времени 10:16–10:31. Значение  $f_{\min}$  достигало 2.4 МГц.

1 сентября 2012 г. значения МНЧ в утреннее, дневное и вечернее время изменялись примерно от 1.25 до 2.0÷2.2 МГц. Как и в другие дни, имело место увеличение МНЧ в дневное время (примерно с 11:00 до 17:00 местного времени), затем ее уменьшение в предзаходное время (с 17:00 до 19:30 местного времени) и, наконец, увеличе-

ние МНЧ в интервале с 20:00 до 04:00 местного времени следующих суток.

Всплески  $f_{\min}$  наблюдались в 07:46, 08:16, 08:46, 10:01, 10:16, 10:46, 11:16, 11:31, 13:46, 14:16 и 14:46.

2 сентября 2012 г. всплески МНЧ имели место в 06:16, 07:16, 08:01, 08:31, 08:46, 09:16, 09:31, 10:31, 10:46 и 15:46.

3 сентября 2012 г. значительные всплески  $f_{\min}$  отмечались в 16:16, 17:16, 17:31, 18:01 и 18:46.

4 сентября 2012 г. существенные всплески МНЧ наблюдались в 11:01, 11:31, 11:46, 13:46, 15:46, 18:31 и 19:16.

5 и 6 сентября 2012 г. стенд “Сура” не работал, эти сутки могут рассматриваться как контрольные, точнее, как сутки с естественными возмущениями, сопровождавшими магнитную бурю.

## 5. Результаты расчетов

### 5.1. Оценка возмущения концентрации электронов

Увеличение  $f_{\min}$  на ионограммах свидетельствует об увеличении концентрации электронов  $N$  в нижней ионосфере. Получим соотношение, связывающее  $f_{\min}$  с  $N$ . Считаем, что отсутствуют сильные местные помехи, а также что амплитудно-частотная характеристика приемного тракта ионозонда в диапазоне частот 1÷3 МГц является линейной.

Будем исходить из основного уравнения дистанционного радиозондирования [26]:

$$q = \frac{P_s}{P_n} = \frac{PGS\sigma}{(4\pi z^2)^2 P_n} e^{-4K}, \quad (1)$$

где  $P_s$  и  $P_n$  – мощности сигнала и помехи,  $P$  – мощность радиопередающего устройства,  $G$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $S$  – эффективная площадь приемной антенны,  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния цели,  $z_r$  – высота цели (высота отражения радиоволны),  $K$  – интегральный коэффициент поглощения зондирующей радиоволны. В (1) пренебрегается малыми потерями в антенно-фидерном тракте.

В случае вертикального зондирования ионосферы имеем [26]:

$$\sigma = 4\pi z^2 \rho^2, \quad (2)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения радиоволны (по напряженности поля).

Кроме того, коэффициент усиления передающей антенны связан с ее эффективной площадью  $S_1$  следующим образом:

$$G = \eta \frac{4\pi S_1}{\lambda^2} = \eta \frac{4\pi S_1}{c^2} f^2. \quad (3)$$

Здесь  $\eta$  – к. п. д. антенны,  $\lambda$  – длина радиоволны,  $f$  – ее частота,  $c$  – скорость света в вакууме. Метод вертикального зондирования основан на

зеркальном отражении от плазменного слоя, при этом  $\rho \approx 1$  [26].

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$q = \eta \frac{PSS_1}{P_n z_r^2 c^2} f^2 e^{-4K}. \quad (4)$$

В уравнении (4)  $\eta$ ,  $P$ ,  $S$  и  $S_1$  от частоты  $f$  практически не зависят. От нее зависят  $P_n$ ,  $z_r$  и  $K$ . Величина  $P_n$  в пригороде (месте расположения ионозонда) от  $f$  зависит степенным образом [26]:

$$P_n(f_{\min}) = P_{n0} \left( \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}} \right)^\beta, \quad (5)$$

где  $f_{\min}$  и  $f_{\min 0}$  – значения частоты  $f_{\min}$  в возмущенных и невозмущенных условиях,  $P_{n0} = P_n(f_{\min 0})$ ,  $\beta \approx 2.5$ . В дневное и вечернее время в ходе измерительной кампании  $f_{\min 0} \approx 1.6$  МГц, а значения  $f_{\min}$  достигали примерно 3 МГц. При этом радиоволны с частотами 1.6 и 3.0 МГц в дневное время отражались на высотах около 90 и 100 км соответственно. В ночное время радиоволна с частотой  $f_{\min}$ , которая близка к  $f_{\min 0}$ , отражалась на высотах 240÷270 км.

Основной вклад в поглощение радиоволны с частотой  $f_{\min 0}$  дает диапазон высот от 70 км до  $z_r$ . Для этого диапазона высот

$$\begin{aligned} K(f_{\min}) &\approx \frac{1}{2c(f_{\min} + f_B)^2} \int_{z_0}^{z_r} f_p^2 v dz = \\ &= \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m (f_{\min} + f_B)^2} \int_{z_0}^{z_r} N v dz, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $f_B \approx 1.4$  МГц – гирочастота электронов,  $f_p$  – плазменная частота электронов,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $v$  – частота соударений электронов,  $z_0$  – высота нижней границы ионосферы. Из (6) следует, что

$$K(f_{\min}) \approx K(f_{\min 0}) \left\langle \frac{N}{N_0} \right\rangle \left( \frac{f_{\min 0} + f_B}{f_{\min} + f_B} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\langle N/N_0 \rangle$  – среднее по высотному диапазону от 70 до 90 км (далее – просто среднее) значение  $N/N_0$ ,  $N_0$  – невозмущенное значение концентрации электронов.



Из (4) при  $f = f_{\min 0}$  получаем

$$q(f_{\min 0}) = \eta \frac{PSS_1 f_{\min 0}^2}{P_{n0} z_{r0}^2 c^2} \exp[-4K(f_{\min 0})], \quad (8)$$

где  $z_{r0} = z_r(f_{\min 0})$ .

С учетом (5) и (7) из (4) получаем, что при  $f = f_{\min}$

$$q(f_{\min}) = \eta \frac{PSS_1 f_{\min}^2}{P_{n0} z_r^2(f_{\min}) c^2} \left( \frac{f_{\min}}{f_{\min 0}} \right)^\beta \times \exp \left[ -4K(f_{\min 0}) \left\langle \frac{N}{N_0} \right\rangle \left( \frac{f_{\min 0} + f_B}{f_{\min} + f_B} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Полагая, что  $q(f_{\min 0}) = q(f_{\min})$ , из (8) и (9) находим

$$\frac{z_{r0}}{z_r} \left( \frac{f_{\min}}{f_{\min 0}} \right)^{\beta/2+1} = \exp \left[ 2K_0 \left( \frac{n}{n_\infty} - 1 \right) \right] \equiv B, \quad (10)$$

где  $n = \langle N/N_0 \rangle$ ,  $n_\infty = \left( \frac{f_{\min} + f_B}{f_{\min 0} + f_B} \right)^2$ ,  $K_0 = K(f_{\min 0})$ .

Из (10) следует оценка для относительного возмущения концентрации электронов:

$$n = n_\infty \left( 1 + \frac{\ln B}{2K_0} \right). \quad (11)$$

Результаты оценки  $n$  для дневного времени приведены в табл. 2. При расчете  $K_0$  использо-

Таблица 2. Результаты расчета относительной концентрации электронов  $n = \langle N/N_0 \rangle$  в дневное время

$f_{\min}$ , МГц	$n$	$n_\infty$	$\Delta$ , %
1.7	1.10	1.07	2.7
1.8	1.20	1.14	5.0
2.0	1.41	1.28	9.2
2.2	1.64	1.44	12.2
2.4	1.88	1.60	14.9
2.6	2.15	1.78	17.2
2.8	2.44	1.96	19.8
3.0	2.77	2.15	21.5

вались профили  $N_0$  из табл. 3 и профили  $v$ , приведенные в [7, 8]. Принималось, что  $K_0 = 0.75$ . При  $2K_0 \gg \ln B$  из (11) следует более простое выражение для  $n$ ,

$$n \approx n_\infty,$$

справедливое при очень сильном поглощении зондирующей волны. Отличие  $n_\infty$  от  $n$  не превышает ошибки  $\Delta \approx 50\%$  (см. табл. 2).

При  $f_{\min}/f_{\min 0} - 1 = \delta_f \ll 1$  из (11) находим

$$n \approx 1 + \left( \frac{1}{1 + \gamma_f} + \frac{2 + \beta}{4K_0} \right) \delta_f, \quad (12)$$

где  $\gamma_f = f_B/f_{\min 0}$ .

Результаты расчета  $n$  для различных значений  $K_0$  при  $\beta = 2.5$ ,  $\delta_f = 0.1$  МГц,  $f_{\min 0} = 1$  МГц приведены в табл. 4. Из таблицы следует, что в ночное время (при  $K_0 \approx 0.05 \div 0.10$ ) возмущения  $N$  по измерениям  $f_{\min}$  могут быть обнаружены лишь при  $n_{\min} \approx 3 \div 2$ . В переходное время суток ( $K_0$  составляет десятые доли единицы) возможно обнаружение увеличения  $N$ , если оно превышает десятки процентов. В дневное время при  $K_0 \gg 1$  из (12) получаем

$$n \approx 1 + \frac{\delta_f}{1 + \gamma_f}.$$

При  $f_{\min 0} = 1.6$  МГц,  $\delta_f = 0.1$  МГц имеем  $n_{\min} \approx 1.05$ .

Из табл. 2 видно, что в течение активного эксперимента концентрация электронов в нижней ионосфере могла увеличиваться в среднем в 2.7 раза. Горизонтальный размер (радиус  $R$ ) был не меньше 560 км, т. е. не меньше расстояния между нагревным стендом и ионозондам. К увеличению  $N$  в разы могло приводить высыпание электронов из магнитосферы [27]. Далее оценим параметры этого процесса.

## 5.2. Оценка параметров высыпавшихся электронов

Методика оценки параметров потока высокоэнергичных электронов приведена в [24, 25, 27]. Поступая аналогично, для изменения скорости ионизации  $q$  имеем

$$\Delta q = q - q_0 = \alpha N^2 - \alpha_0 N_0^2,$$

Таблица 3. Параметры потоков высшающихся электронов

$z$ , км	$N_0$ , м <sup>-3</sup>	$\alpha_0$ , м <sup>3</sup> · с <sup>-1</sup>	$\Pi_p$ , м <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>	$\Pi$ , Вт · м <sup>-2</sup>	$P_p$ , Вт	$E_p$ , Дж	$K_{tr}$
70	$2 \cdot 10^8$	$10^{-11}$	$8.4 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$6.3 \cdot 10^4$	$6.3 \cdot 10^7$	0.13
75	$4 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{-12}$	$10^7$	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$8.1 \cdot 10^4$	$8.1 \cdot 10^7$	0.16
80	$8 \cdot 10^8$	$10^{-12}$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^8$	0.21
85	$2.8 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{-13}$	$8.2 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$6.3 \cdot 10^5$	$6.3 \cdot 10^8$	1.25
90	$8 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-13}$	$2.7 \cdot 10^8$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^9$	4.3

Таблица 4. Минимально обнаружимая относительная концентрация электронов в зависимости от интегрального коэффициента поглощения

$K_0$	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0
$n$	3.29	2.17	1.60	1.32	1.22	1.18	1.15	1.11	1.09

где  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации электронов (индексом “0” обозначены параметры невозмущенной среды). Далее считаем, что  $\alpha \approx \alpha_0$ . При этом плотность потока энергии высшающихся частиц [24]

$$\Pi = 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q \approx 2\varepsilon_i \Delta z \alpha_0 N_0^2 (n^2 - 1), \quad (13)$$

где  $\varepsilon_i$  – энергия, затрачиваемая на один акт ионизации нейтральной молекулы,  $\Delta z$  – толщина слоя с дополнительной ионизацией.

Как следует из (13), плотность потока высшающихся электронов

$$\Pi_p = \frac{\Pi}{\varepsilon} = 2 \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} \Delta z \alpha_0 N_0^2 (n^2 - 1),$$

где  $\varepsilon$  – энергия электронов.

Мощность и энергия высшающихся на площади  $S_p$  частиц за время  $\Delta T$  даются следующими соотношениями:

$$P_p = \eta_f \Pi S_p, \quad E_p = P_p \Delta T.$$

Здесь  $\eta_f$  – коэффициент, учитывающий неоднородность потока частиц по горизонтали, ее “пятнистость”, точнее, фрактальность [25].

Результаты оценок основных параметров высшающихся из магнитосферы электронов приведены в табл. 3. Считалось, что  $\varepsilon_i = 35$  эВ,  $\varepsilon = 100$  кэВ,  $\Delta z = 10$  км,  $S_p \approx \pi R^2 \approx 9.8 \cdot 10^{11}$  м<sup>2</sup> ( $R \approx 560$  км),  $\eta_f = 0.5$ ,  $\Delta T = 1000$  с. Из табл. 3 следует, что  $\Pi_p \sim 10^7 \div 10^8$  м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>.

Интересно сравнить значения  $P_p$  с суммарной мощностью радиопередающих устройств  $P_r$ . Для этого вычислим коэффициент триггерности [6, 25]

$$K_{tr} = \frac{P_p}{P_r}.$$

Результаты расчета  $K_{tr}$  при  $P_r = 5 \cdot 10^5$  Вт также приведены в табл. 3. Видно, что для  $z \approx 85 \div 90$  км  $K_{tr} \approx 1.25 \div 4.3$ . Это означает, что мощность стимулированного радиоизлучением процесса больше мощности источника, вызвавшего этот процесс. Естественно, что при  $R \approx 1000$  км имеем  $K_{tr} \approx 5 \div 17$ . Значения  $K_{tr}$ , приведенные в работе [25], достигали нескольких десятков и даже сотен единиц.

## 6. Обсуждение

### 6.1. Вариации МНЧ в контрольные дни

В дневное и ночное время в невозмущенных условиях МНЧ была близка к  $1.5 \div 1.6$  МГц. Близость значений в разное время суток связана с тем, что интегральный коэффициент поглощения радиоволн с  $f_{\min}$  уменьшается примерно от  $0.75 \pm 0.08$  в дневное время до  $0.015 \pm 0.0015$  в ночное время. Одновременно с этим в ночное время увеличивается примерно на порядок (в результате уменьшения поглощения) уровень помех. Из-за этих факторов значения  $q(f_{\min})$  близки в дневное и ночное время.

Вблизи моментов времени прохождения солнечного утреннего и вечернего терминаторов, когда концентрация электронов в D-области ионосферы уже существенно изменяется, а высота отражения радиоволны с  $f = f_{\min}$  близка к 100 км, значения МНЧ уменьшаются примерно до  $1.2 \div 1.3$  МГц. Это продолжается около  $2.0 \div 2.5$  ч.

## 6.2. Вариации МНЧ в возмущенные дни

27 августа 2012 г. Примерно через время  $\Delta t \approx 16$  мин после включения стенда “Сура”  $f_{\min}$  начала увеличиваться от 1.6 до 1.8 МГц. Этот рост продолжался не менее 15 мин. Увеличение  $f_{\min}$  могло быть вызвано увеличением  $N$  в  $2 \div 2.5$  раза.

28 августа 2012 г. С 06:15 до 09:45 стенд “Сура” работал в режиме [+30 мин; -30 мин], т. е. в течение 30 мин он излучал немодулированную радиоволну, затем в течение 30 мин имела место пауза. Первые всплески  $f_{\min}$  наблюдались в 06:16 и 07:01, т. е. через 1 и 16 мин после первого включения и первого выключения стенда. Следующие значительно большие значения всплесков МНЧ отмечались с 08:01 до 08:31, а также в 09:16 и 09:46. Им соответствовали времена запаздывания 16, 16, 1 и 1 мин после включения/выключения мощного радиоизлучения. Продолжительность всплесков  $\Delta T$  изменялась от 15 до 30 мин. При  $f_{\min 0} = 1.6$  МГц и  $f_{\min} = 2.8$  МГц всплескам МНЧ соответствовало увеличение  $N$  примерно в 3.5 раза.

С 12:00 по 12:30 происходила настройка радиопередатчиков устройств. Наблюдалось некоторое уменьшение  $f_{\min}$ , связанное с переходом ионосферы от дневных к ночным условиям.

В интервале времени 13:00–13:30 стенд излучал немодулированную волну. Имело место увеличение МНЧ от 1.5 до 1.8 МГц с  $\Delta t \approx 31$  мин и  $\Delta T \approx 15$  мин. Это увеличение МНЧ было вызвано увеличением  $N$  на  $30 \div 40$  %.

Следующий заметный рост МНЧ от 1.6 до 2.0 МГц имел место в интервале времени 14:01–14:46. При этом значение  $N$  увеличилось примерно в 1.5 раза.

Последующие включения стенда в интервале времени 16:40–20:30 не привели к заметным изменениям МНЧ.

29 августа 2012 г. Наиболее существенные всплески МНЧ наблюдались в 07:01, 08:01, 09:16, 09:31, 09:46, 10:16, 10:31 и 13:01. Увеличению  $f_{\min}$  от 1.6 до  $2.8 \div 3.2$  МГц соответствовало увеличение  $N$  в  $3.5 \div 4.5$  раза. Эти возмущения возникали лишь после второго включения мощного радиоизлучения в 07:00. Достаточно уверенно наблюдалась периодичность всплесков МНЧ, период  $T$  был близок к 60 мин, т. е. к периоду циклов нагрева ([+30 мин; -30 мин]). Всплески МНЧ в 12:01 (до 2 МГц) и в 13:01 (до 2.5 МГц) были

выражены слабее, чем те, что наблюдались в интервале времени с 07:01 до 10:31.

Нагрев ионосферы с 13:15 до 13:45 привел к увеличению  $f_{\min}$  от 1.4 до 1.8 МГц и к увеличению  $N$  примерно в 1.5 раза. При этом  $\Delta t \approx 16$  мин,  $\Delta T \approx 30$  мин.

30 августа 2012 г. Первая серия экспериментов продолжалась с 07:00 до 09:30. Стенд работал в режиме [+30 мин; -30 мин]. Всплески МНЧ отмечались в 07:01, 07:31, 08:01, 09:01, 09:16, 09:31, 09:46 и 10:01. Хорошо выделялся период  $T = 30$  мин, т. е. сначала, в течение первых двух часов, реакция наблюдалась на каждое включение и выключение стенда, продолжительность реакции не превышала 15 мин. Затем в интервале времени 09:01–10:01 реакции на включение и выключение наложились.

Значения  $f_{\min}$  достигали  $2.8 \div 3$  МГц, а  $N$  при этом увеличивалась в  $3.5 \div 4$  раза. Работа стенда с 10:00 до 11:15 не сопровождалась всплесками  $f_{\min}$ . При этом работали только два радиопередатчика с  $PG = 65$  МВт в режиме [+5 мин; -5 мин], а диаграмма направленности антенны была двухлепестковой. Кроме того, частота радиоволны была выше (6720 кГц), чем в утреннем эксперименте (4785 МГц). По этим же причинам следующие три серии экспериментов в этот день также не привели к значительным всплескам  $f_{\min}$ , а значит и к росту  $N$ .

31 августа 2012 г. В это день воздействие на ионосферную плазму осуществлялось радиоволной необыкновенной поляризации с 09:58 до 10:59 в режиме [+1 мин; -1 мин] и с 16:00 до 19:45 в режиме [+15 мин; -15 мин].

В первой серии экспериментов увеличение  $f_{\min}$  от 1.6 до 2.7 МГц имело место в 10:16,  $\Delta t \approx 18$  мин и  $\Delta T \approx 30$  мин. При этом  $N$  увеличилась примерно в 3 раза.

В течение второй серии экспериментов существенные вариации  $f_{\min}$  не были зарегистрированы.

1 сентября 2012 г. Все три радиопередатчика работали синхронно в интервалах времени 07:21–07:26, 07:30–07:33, 09:51–09:56, 10:00–10:10, 10:13–10:25 и 10:30–16:03. В интервалах времени 07:33–07:39, 07:41–07:50 и 16:03–18:04 излучали только первый и третий радиопередатчики. Диаграмма направленности антенны была при этом двухлепестковой. Значительные всплески  $f_{\min}$  имели место в 07:46, 08:16, 08:46, 10:01–10:16, 10:46,

11:16–11:31 и 11:46. Хотя режим излучения не был периодическим, в возмущениях МНЧ часто выделялся квазипериод  $\Delta T = 30$  мин (кроме интервала 08:46–10:08). Первое увеличение МНЧ наблюдалось через 25 мин после выключения нагревного стенда.

Включение мощного радиоизлучения в интервалах времени 13:25–14:01 и 14:19–18:04 сопровождалось относительно небольшими ( $0.2 \div 0.4$  МГц) всплесками МНЧ. В первом интервале времени был применен режим излучения [+6 мин; –4 мин], во втором – [+3 мин; –3 мин]. В последнем случае частота радиоволны была близка к  $5f_B \approx 6660 \div 6780$  кГц. Видно, что указанные режимы не были эффективными. Крупномасштабные возмущения если и возникали, то были относительно слабыми.

2 сентября 2012 г. Все три радиопередатчика работали синхронно в режиме [+30 мин; –30 мин]. Первый заметный всплеск МНЧ наблюдался в 06:16, т. е. примерно через 16 мин после включения нагревного стенда. Следующие два всплеска возникли через 30 и 60 мин после первого, т. е. с периодом  $\Delta T = 30$  мин. Вариации МНЧ составили  $0.1 \div 0.2$  МГц. Значительные всплески МНЧ имели место в 08:31, 08:46, 09:31 и 10:31, несколько меньшие – в 10:46, 11:46, 12:46 и 13:46. В обоих случаях всплески были квазипериодическими с периодом  $T = 60$  мин, равном периоду циклов мощного излучения. Важно, что всплески МНЧ с уменьшающейся амплитудой продолжались и в интервале времени 11:00–13:00, т. е. когда нагревной стенд был выключен. Возможно, что мощное радиоизлучение послужило триггером естественных процессов с  $T = 60$  мин. Интенсивность магнитной бури при этом была небольшой, индекс  $K_p \approx 2 \div 3$ .

3 сентября 2012 г. Особенностью этой серии экспериментов было то, что стенд излучал радиоволну необыкновенной поляризации и только в вечернее и ночное время. Важно также, что интенсивность магнитной бури в течение второй половины суток (с 15:00 до 21:00) была наибольшей,  $K_p \approx 5 \div 6$ .

С 06:00 до 07:00 значения  $f_{\min}$  быстро увеличились от 1.3 до 1.8 МГц. Далее, в течение трех ближайших часов, они флуктуировали в пределах  $1.8 \div 2.1$  МГц. Около 10:00 наблюдалось резкое падение МНЧ от 2.1 до 1.6 МГц, а затем в течение трех часов ее медленное уменьшение от 1.6

до 1.3 МГц. В интервале времени 15:46–16:01  $f_{\min} \approx 1.6$  МГц, а в 16:16  $f_{\min} \approx 1.8$  МГц. С 16:00 до 16:15 стенд “Сура” излучал в непрерывном режиме. Возмущение МНЧ возникло с временем запаздывания около 15 мин,  $\Delta T \approx 30$  мин. Из-за относительно непродолжительного воздействия (15 мин) возмущение  $f_{\min}$  было сравнительно небольшим (0.2 МГц). Несмотря на это,  $n \approx 1.7 \div 2.2$  при  $K_0 \approx 0.4 \div 0.2$ .

Всплеск МНЧ на 0.2 МГц в 17:16 связан с включением стенда ( $\Delta t = 16$  мин,  $\Delta T = 15 \div 30$  мин), на 0.4 МГц в 17:31 и 18:01 – с его выключением ( $\Delta t = 16$  мин,  $\Delta T = 15$  мин). При  $K_0 \approx 0.1 \div 0.2$  значение  $n \approx 2.2 \div 3.4$  при включении стенда и  $n \approx 3.5 \div 5.7$  при его выключении.

В интервале времени 20:00–23:30 наблюдались квазипериодические вариации МНЧ с  $T = 1$  ч. Не исключено, что мощное радиоизлучение послужило триггером природного процесса. В последней серии экспериментов стенд работал в режиме [+15 мин; –15 мин; +15 мин]. При этом  $f_{\min}$  увеличивалась на 0.3 МГц, а  $n \approx 2.8 \div 4.5$ .

4 сентября 2012 г. Особенностью наблюдений в эти сутки было то, что от 00:00 до 15:00 имела место слабая магнитная буря ( $K_{p\max} = 4$ ). По этой причине в интервале времени 08:00–08:30 и 09:30–10:30 отмечались всплески  $f_{\min}$  от 1.5 до 1.8 МГц. При этом  $n \approx 1.4$  для  $K_0 = 0.75$ .

После включения мощного радиоизлучения в 10:55, 11:40 и 13:40 с временами запаздывания около 6, 6 и 16 мин имело место увеличение МНЧ на  $0.2 \div 0.3$  МГц. При этом  $n \approx 1.3 \div 1.4$  для  $K_0 \approx 0.6$ . Реакция на выключение мощного радиоизлучения наблюдалась в 11:31,  $\Delta t \approx 16$  мин,  $\Delta T \approx 15$  мин.

С 16:50 до 18:30 стенд работал в режиме [+10 мин; –10 мин; +10 мин]. Увеличение МНЧ началось лишь в 17:46, т. е. после повторных воздействий сериями импульсов. Скорее всего, имел место эффект накопления. При этом  $f_{\min}$  увеличилась от 1.6 до 1.8 МГц,  $n \approx 2.2 \div 3.4$  для  $K_0 \approx 0.1 \div 0.2$ .

### 6.3. Вариации МНЧ в магнитовозмущенные дни

5 сентября 2012 г. магнитная буря усилилась. В интервале времени 00:00–15:00 значения  $K_p \approx 4 \div 6$ . В результате повышенной магнитной активности нижняя ионосфера была возмущенной. С 07:00

до 13:00 значения МНЧ достигали  $2.8 \div 3.0$  МГц, имели место отдельные всплески  $f_{\min}$ .

В интервале времени 13:00–15:00 значения  $f_{\min}$  были близки к минимальным. В вечернее время  $f_{\min}$  постепенно увеличивалась от  $1.4 \div 1.5$  до  $1.6$  МГц. Такие значения характерны для ночного времени.

6 сентября 2012 г. магнитное поле было заметно возмущенным ( $K_{p\max} \approx 4$ ) лишь с 03:00 до 09:00. Тем не менее нижняя ионосфера была возмущенной: сказывались послебуревые эффекты (см., например, [28]). Суточный ход  $f_{\min}(t)$  5 и 6 сентября 2012 г. в целом был подобен.

Таким образом, временные вариации МНЧ в контрольные сутки 26 и 27 сентября 2012 г. существенно отличались от аналогичных вариаций МНЧ с 28 сентября по 4 сентября 2012 г. Кроме того, всплески МНЧ, как правило, возникали после включения стенда (реже после его выключения) с временем запаздывания  $5 \div 16$  мин,  $\Delta T \approx 15 \div 30$  мин. Подобные эффекты наблюдались нами и ранее при использовании других методов диагностики [14–25].

Все это позволяет утверждать, что мощное нестационарное радиоизлучение декаметрового диапазона приводит к возникновению крупномасштабных (радиус не менее 560 км) возмущений в нижней ионосфере. Характер возмущений, сопровождающих воздействие мощного радиоизлучения и магнитные бури, в целом подобен. Это может означать, что мощное радиоизлучение выступает триггером ряда процессов в системе ЗАИМ, подобных тем, что имеют место в естественных условиях.

Пространственное распределение крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере будет представлено в другой работе автора.

Заметим, что волна накачки необыкновенной поляризации использовалась только 31 августа и 3 сентября 2012 г. и лишь на небольших интервалах времени. Поэтому зависимость эффектов от перемены поляризации не обнаружена.

#### 6.4. Схема взаимодействия подсистем

Схема взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ представляется следующей. При включении/выключении мощного радиоизлучения на высотах динамо-области ионосферы ( $z \approx 100 \div 150$  км) температура и концентрация электронов скачкообразно увеличиваются/уменьшаются в  $2 \div 3$

и  $1.4 \div 1.7$  раза соответственно. Таким же образом изменяется проводимость  $\sigma_i$  ионосферной плазмы, вызывая возмущения геомагнитного поля и электрического поля ионосферно-магнитосферного происхождения. В результате ударного воздействия на одну из подсистем нарушается сложившееся взаимодействие между ионосферой и магнитосферой. Происходит перераспределение высокоэнергичных электронов по питч-углам. Механизмы перераспределения частиц обсуждаются в работах [24, 27]. Определенная часть электронов высыпается из магнитосферы (точнее, из внутреннего радиационного пояса в магнитосфере) в ионосферу (высоты  $z \approx 70 \div 100$  км). Энергия электронов, ионизирующих нейтралы на высотах нижней ионосферы, составляет порядка 100 кэВ (см., например, [28]). Так возникает взаимодействие ионосфера – магнитосфера – ионосферы.

Добавим, что в ночное время абсолютные возмущения  $\sigma_i$  относительно небольшие. Это снижает эффективность описанного выше механизма взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ, что и наблюдалось в экспериментах.

Механизм ударного воздействия объясняет наблюдавшийся эффект переключения. Эффект накопления связан с инерционностью системы, с конечным временем, необходимым для перераспределения энергичных электронов по питч-углам. Эффект исчерпания обусловлен конечностью числа электронов, находящихся в конусе потерь, либо конечной продолжительностью вспышки высыпаний при ударном воздействии на систему ЗАИМ.

Таким образом, результаты настоящей работы хорошо согласуются с результатами более ранних исследований и подтверждают сделанные ранее выводы. Для построения количественной модели взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ при нагреве ионосферной плазмы мощным радиоизлучением требуются, однако, дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Добавим, что в ряде случаев во временных вариациях  $f_{\min}(t)$  выделялся период  $T \approx 1$  ч. Если период циклов нагревного стенда совпадал с этим периодом, имело место усиление всплесков  $f_{\min}$ . По-видимому,  $T \approx 1$  ч является характерным периодом в системе ЗАИМ. Скорее всего, он не является универсальным, а его величина связана с месторасположением стенда “Сура”. Попытаемся выяснить природу процесса с периодом  $T \approx 1$  ч.

Известно, что высокоэнергичные электроны в геомагнитном поле осуществляют три вида движения: движение по спирали вокруг магнитной силовой линии, движение вдоль этой линии между магнитными зеркалами и дрейф в поперечном по отношению к магнитной силовой линии направлении. Скорость дрейфа дается известной формулой:

$$\vec{v}_d = \frac{\varepsilon}{e} \frac{[\nabla B, \vec{B}]}{B^3}.$$

Для дипольного магнитного поля с индукцией  $B = B_0 (R_E/R)^3$  справедлива следующая оценка:

$$|\nabla B| \approx 3 \frac{B}{R} = 3 \frac{B}{R_E L},$$

где  $R_E$  – радиус Земли,  $R$  – расстояние от центра Земли до вершины силовой линии,  $L = R/R_E$  – параметр Мак-Илвейна. Для модуля скорости дрейфа имеем оценку:

$$v_d = \frac{3\varepsilon}{eBR} = \frac{3L^2\varepsilon}{eB_0R_E}. \quad (14)$$

Для месторасположения стенда “Сура”  $L \approx 2.4$ ,  $B_0 \approx 5 \cdot 10^{-5}$  Тл. Тогда из (14) при  $\varepsilon \approx 100$  кэВ получим  $v_d \approx 5$  км/с. При длине траектории (магнитной параллели над стендом)  $l \approx 20000$  км имеем время дрейфа

$$\tau_d = l/v_d \approx 1.1 \text{ ч.}$$

Таким образом, получаем, что при  $\varepsilon \approx 100$  кэВ,  $\tau_d \approx T \approx 1$  ч. Период  $T$  действительно является характерным для системы ЗАИМ, он равен периоду дрейфа электронов вокруг Земли над стендом “Сура”.

## 7. Выводы

1. Разработана методика оценки изменений концентрации электронов в нижней ионосфере (высоты  $\sim 70 \div 90$  км) по вариациям МНЧ. Показано, что методика позволяет обнаруживать изменения  $N$  порядка 10 и 100 % в дневное и ночное время соответственно.

2. Обнаружено увеличение МНЧ на  $1 \div 1.6$  и  $\sim 0.2$  МГц в дневное и ночное (вечернее) время соответственно, вызванное воздействием на ионосферную плазму мощного радиоизлучения стенда, удаленного примерно на 560 км от места диагностики. Таким изменениям МНЧ соответствова-

ло увеличение концентрации электронов в среднем в нижней ионосфере  $\sim 2 \div 3$  и  $1.2 \div 1.9$  раз в дневное и ночное время соответственно.

3. Наибольшие увеличения  $f_{\min}$  (на  $1.4 \div 1.6$  МГц) и  $N$  (в  $3.5 \div 4$  раза) возникали при работе стенда в непрерывном режиме или длинными (30 мин) импульсами на низкой частоте (4785 МГц) при обыкновенной поляризации радиоволны в дневное время.

4. Реакция среды на воздействие мощного нестационарного радиоизлучения чаще всего наблюдалась с временем запаздывания около 16 мин, реже – с временем запаздывания в 1 и 31 мин. В отдельных случаях реакция среды возникала не при первом включении стенда, т. е. имел место эффект накопления.

5. В ряде случаев всплески МНЧ возникали как при включении, так и при выключении мощного излучения, т. е. имел место эффект переключения (эффект ударного воздействия).

6. Чаще всего продолжительность всплесков МНЧ (и концентрации электронов) была меньше длительности серии циклов включение/выключение, т. е. имел место эффект исчерпания (эффект ударного возмущения системы).

7. Наблюдаемые возмущения  $f_{\min}$  и  $N$ , скорее всего, объясняются ударным воздействием на систему ЗАИМ длительных импульсов радиоизлучения, взаимодействием подсистем в этой системе, приводящим к высыпанию высокоэнергичных ( $\sim 100$  кэВ) электронов из магнитосферы в нижнюю ионосферу.

8. Характер возмущений в нижней ионосфере, сопровождающих воздействие мощного радиоизлучения и магнитные бури, в целом подобен. Это может означать, что мощное радиоизлучение выступает триггером ряда процессов в системе ЗАИМ.

Автор благодарен В. Л. Фролову и Г. П. Комракову за обеспечение работы нагревного стенда, сотрудникам ИЗМИРАН за непрерывное функционирование ионозонда и рецензенту за ряд полезных советов.

## 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. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная

- физическая система. 1 // *Нелинейный мир*. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
3. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // *Нелинейный мир*. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.
  4. Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая нелинейная динамическая система // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 120–137.
  5. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes // *Int. J. Remote Sens.* – 2011. – Vol. 32, No. 11. – P. 3199–3218.
  6. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
  7. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, 1973. – 272 с.
  8. Gurevich A. V. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. – New York, Heidelberg, Berlin: Springer – Verlag, 1978. – 465 p.
  9. *Radio Sci.* – 1974. – Vol. 9, No. 11. – P. 881–1090. (Тематический выпуск).
  10. Тепловые нелинейные явления в плазме. Сб. науч. трудов. – Горький: ИПФ АН СССР, 1979. – 220 с.
  11. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
  12. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милых Г. М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. – М.: ИЗМИРАН, 1986. – 184 с.
  13. 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.
  14. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения // *Вестник Харьковского университета. Сер. Радиофизика и электроника*. – 1988. – № 318. – С. 29–30.
  15. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением // *Компьютерная оптика*. – 1989. – Вып. 6. – С. 62–71.
  16. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного излучения // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1989. – Т. 29, № 3. – С. 513–515.
  17. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Исследование глобальных и крупномасштабных возмущений в ионосфере с помощью сети ионозондов // *Космическая наука и техника*. – 1989. – Вып. 4. – С. 72–75.
  18. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А., Леус С. Г., Петров М. С., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф., Юрин К. И. Влияние искусственных возмущений в нижней ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением, на характеристики радиосигналов // *Труды НИИР*. – М.: Радио и связь. – 1989. – № 9. – С. 57–60.
  19. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Кажущиеся скорости распространения возмущения в околоземном космосе // *Космическая наука и техника*. – 1990. – Вып. 5. – С. 71–74.
  20. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование крупномасштабных волновых возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1990. – Т. 30, № 1. – С. 159–161.
  21. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. – 1998. – № 6. – С. 17–40.
  22. 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.
  23. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1996. – Т. 36, № 2. – С. 75–81.
  24. Черногор Л. Ф. Фазовые вариации километровых радиоволн, сопутствовавшие воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 377–389.
  25. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. Аперiodические крупномасштабные возмущения в E-области ионосферы, стимулированные мощным радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2012. – Т. 55, № 3. – 173–185.
  26. Черногор Л. Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 500 с.
  27. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 371–375.
  28. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы*. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

## ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ЗБУРЕННЯ В НИЖНІЙ ІОНОСФЕРІ, ВИКЛИКАНІ ДІЄЮ ПОТУЖНОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Актуальність роботи обумовлена необхідністю вивчення великомасштабних (~ 560 км) збурень у нижній іоносфері, які можуть бути результатом взаємодії підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. До тепер досліджувались в основному ефекти, що виникають у межах діаграми спрямованості антени. Для збурення іоносферної плазми використовувався нагрівний стенд “Сура” (м. Нижній Новгород), для діагностики виникаючих збурень – іонозонд (м. Москва). Встановлено, що вмикання/вимикання стенду призводило до зростання мінімальної спостережуваної частоти на іонограмах на 1.2 і 1.6 МГц у нічний та денний час відповідно.

Зростання цієї частоти зумовлено зростанням поглинання зондуючої радіохвилі внаслідок росту концентрації електронів у нижній іоносфері. Останнє, найімовірніше, є наслідком висипання високоенергійних ( $\sim 100$  кеВ) електронів із магнітосфери в нижню іоносферу. Оцінена густина потоку електронів склала щось близько  $10^7 \div 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Підтверджено існування ефектів накопичення, перемикання й ударного збурення.

*L. F. Chernogor*

V. Kazarin National University of Kharkiv  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

LOWER IONOSPHERE LARGE-SCALE  
DISTURBANCES CAUSED BY POWERFUL  
NON-STATIONARY RADIATION

The relevance of this study is due to the need of studying large-scale ( $\sim 560$  km) disturbances in the lower ionosphere, which

can be due to coupling among the subsystems in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. Until recently, the effects arising within the antenna beam have mainly been studied. The Sura heater near Nizhny Novgorod was used to stimulate disturbances in the ionospheric plasma, and the ionosonde near Moscow city was used as a diagnostic facility. The heater turn on/off resulted in an increase of 1.2 to 1.6 MHz in the minimum observable frequency in the ionograms during the night and day times, respectively. This frequency increase is caused by an increase in absorption of sounding radio waves due to an increase in the lower ionospheric electron density. The latter is probably due to energetic ( $\sim 100$  keV) electron precipitation from the magnetosphere into the lower ionosphere. Electron flux estimates are of the order of  $10^7 \div 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . The accumulation, switching off/on, and impact effects have been proved to exist.

*Статья поступила в редакцию 19.11.2012*