

**ВОЗМУЩЕНИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫЕ
УДАЛЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
И СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ**

¹И.Ф. Домнин, ¹С.В. Панасенко, ^{1,2}Л.Ф. Черногор

**DISTURBANCES IN THE MIDLATITUDE IONOSPHERE CAUSED BY THE REMOTE ACTION
OF HIGH POWER EMISSION AND BY SOLAR TERMINATOR**

¹I.F. Domnin, ¹S.V. Panasenko, ^{1,2}L.F. Chernogor

Описаны и проанализированы временные зависимости относительных вариаций концентрации электронов в период и после окончания работы мощного нагревного стенда «Сура» на фоне прохождения вечерних солнечных терминаторов по данным харьковского радара некогерентного рассеяния. На высотах 200–300 км через 60–90 мин после первого включения нагревного стенда возникло волновое возмущение с периодом около 30 мин, который соответствовал циклическому режиму работы стенда, и относительной амплитудой 0.08–0.1. Также возникли возмущения с периодами около 60, 90 и 120 мин. Их амплитуда достигла 0.15–0.20 после прохождения терминаторов.

Time dependences of related variations in electron concentration during and after high power «Sura» facility experiments with solar terminators moving from Kharkiv incoherent scatter radar data are described and analyzed. The wave disturbance with a period of near 30 min that correspond to facility cyclic operation and with relative amplitude of 0.08–0.10 was at the heights of 200–300 km 60–90 min after the first heating start. The disturbances with periods of 60, 90 and 120 min were also. Their amplitude reached 0.15–0.20 after the moving of terminators.

Введение

Использование мощного радиоизлучения дециметрового диапазона для воздействия на геокосмическую плазму имеет большое фундаментальное и прикладное значение для решения ряда как радиофизических, так и геофизических задач. В процессе таких активных экспериментов появляется возможность качественно и количественно изучить механизмы взаимодействия подсистем в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, оценить параметры плазменных возмущений, исследовать характеристики радиосигналов, прошедших через возмущенную среду, создать новые каналы передачи информации, генерировать электромагнитные волны на ионосферных высотах и др. (см., например, [Gurevich, 1978]).

Целью работы является описание и анализ временных зависимостей относительных вариаций электронной концентрации на высотах 150–500 км по данным харьковского радара некогерентного рассеяния, полученным в период работы удаленного на расстояние около 1000 км нагревного стенда «Сура» на фоне прохождения вечернего солнечного терминатора (СТ) в пункте наблюдения и в магнитосопряженной области.

Краткое описание средств и методов диагностики

Нагревный стенд «Сура» расположен вблизи Нижнего Новгорода, Россия. Его географические координаты 56.1° N, 46.1° E. Краткие характеристики стенда, период и режим его работы приведены в табл. 1. Отметим, что в настоящее время «Сура» является единственным функционирующим нагревным стендом, расположенным в средних широтах.

Радар некогерентного рассеяния (НР) расположен вблизи Харькова, Украина (49°36' N, 36°18' E). Его основные характеристики даны в табл. 2. Харьковский радар НР Института ионосферы является единственной в среднеширотной Европе установ-

кой, с помощью которой можно получать наиболее полную информацию об основных параметрах ионосферы и ее динамическом состоянии.

Методы статистического анализа сигнала

Для определения временных вариаций мощности НР-сигнала вначале выполнялись базовые оценки ее значений на интервале времени 1 мин. Затем с помощью скользящего усреднения вычитался тренд на интервале 120 мин, а полученный таким образом сигнал усреднялся на интервале 5 мин с шагом 1 мин. Более подробно применяемые методики описаны в работе [Бурмака и др., 2005].

Таблица 1

Основные сведения о режиме работы стенда «Сура»

Частота радиоволны	4.7 МГц
Поляризация	Обыкновенная
Режим излучения	Циклический (20 мин нагрев, 10 мин пауза)
Суммарная мощность передатчиков	0.5 МВт
Эффективная мощность системы	80 МВт
Наклон диаграммы направленности	12° к югу (в магнитный зенит)
Период работы стенда	20–23.09.2010 г. с 12:50 до 17:40 UT

Таблица 2

Основные параметры радара НР Института ионосферы (Харьков)

Рабочая частота	158 МГц
Режим работы	Импульсный
Импульсная мощность	1.8 МВт
Эффективная мощность	23 ГВт
Длительность импульса	
длинного	663 мкс
короткого	135 мкс
Диаметр антенны	100 м
Диапазон исследуемых высот	100–1500 км

Методы спектрального анализа сигнала

Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) на основе вейвлета Морле. Основные соотношения и формат получаемых результатов подробно описаны в работе [Черногор, 2008].

Результаты статистического анализа

Измерения на радаре НР проводились непрерывно в течение 20–22 сентября, а также 23 сентября 2010 г.

Временные вариации мощности НР-сигнала, соответствующие двум соседним суткам, для ряда высот приведены на рис. 1. Видно, что в 09:00–13:00 (здесь и далее UT) вариации относительных изменений электронной концентрации δ_N на высотах 144–200 км обычно не превышали 0.1 для обоих суток. На больших высотах имели место как аperiodические, так и квазипериодические возмущения, а максимальные значения δ_N достигали 0.15–0.2. Отметим, что существенные вариации их значений 21 сентября 2010 г. в интервале времени 12:00–12:40 связаны с неполной фильтрацией мощной импульсной помехи, вызванной прохождением грозового фронта вблизи места наблюдения.

После начала работы стенда «Сура», а также прохождения СТ в магнитосопряженной области и в пункте наблюдения характер вариаций δ_N существенно изменился. На высотах 144–250 км после 14:00 наблюдалось усиление волновой активности. Максимальные значения δ_N при этом достигли 0.3–0.4 в 16:00–20:00 UT, после чего вновь уменьшились. На высотах 309–474 км увеличения вариаций отно-

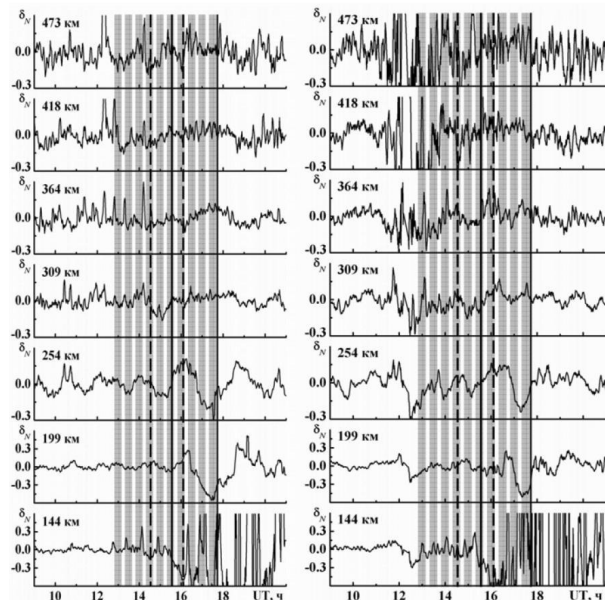


Рис. 1. Временные зависимости относительных вариаций электронной концентрации на высотах 144–474 км, полученные при зондировании длинным импульсом для 20.09.2010 г. (а) и 21.09.2010 г. (б). Здесь и далее серой заливкой показаны интервалы времени работы стенда «Сура». Сплошными и штриховыми линиями отмечены моменты прохождения солнечного терминатора на высотах 0 и 400 км соответственно в пункте наблюдения и в магнитосопряженной точке.

сительных изменений концентрации электронов не наблюдалось (на ряде высот они, наоборот, уменьшились), но изменился характер сигнала. С 14:00 стали преобладать квазипериодические вариации δ_N с большими периодами, чем в предыдущий интервал времени (см. рис. 1).

В целом, вариации δ_N в соседние сутки наблюдений были подобны.

Результаты спектрального анализа

Для оценки амплитуд, периодов и длительностей волновых возмущений (ВВ) был произведен спектральный анализ δ_N для ряда высот.

Из рис. 2 видно, что в 09:00–14:00 UT как 20-го, так и 21 сентября 2010 г. преобладали ВВ с периодами 100–150 мин, их амплитуда обычно не превышала 0.05, иногда достигая 0.1. После 14:00 спектральный состав существенно изменился. Через 60–90 мин после первого включения нагревного стенда возникло ВВ с периодом около 30 мин. Его относительная амплитуда составила 0.08–0.1, а длительность не превышала двух часов. Важно, что данное ВВ наблюдалось во все дни, когда имело место воздействие на ионосферу радиоизлучения удаленной системы.

После прохождения СТ существенно усилились ВВ с периодами около 60, 90 и 120 мин. Их относительная амплитуда достигла 0.15–0.3, длительность – 1–2 периода в различные дни проведения измерений (см. рис. 2).

Обсуждение и выводы

1. Ионосферные эффекты, вызванные воздействием мощного радиоизлучения удаленного примерно на 1000 км источника, накладывались на эффекты вечерних СТ в пункте наблюдения и в магнитосопряженной области, поэтому в ряде случаев их разделение вызывало определенные трудности.

2. Усиление ВВ с периодами около 60, 90 и 120 мин наблюдалось как в периоды работы стенда «Сура», так и в фоновые интервалы времени, что, вероятно, вызвано наложением эффектов СТ и магнитосопряженного СТ. Подобные эффекты описаны в ряде работ (см., например, [Бурмака и др., 2005, 2009]). Заметим, что эффекты магнитосопряженного СТ стали исследоваться лишь в последние годы, им посвящены отдельные работы (см., например, [Afraimovich et al., 2010]).

3. ВВ с периодом около 30 мин наиболее четко было выражено лишь в дни работы стенда «Сура». Данный период соответствовал циклической работе стенда. Отметим, что это колебание практически не просматривалось на временных вариациях δ_N , а было уверенно обнаружено лишь с использованием спектрального анализа.

4. Если наблюдаемое ВВ связано с распространением возмущения от области нагрева, то кажущаяся скорость распространения равняется 190–280 м/с. Такая скорость будет иметь место, если ВВ было сгенерировано первым включением стенда «Сура». Поскольку ионосфера является инерционной, а значит, интегрирующей системой, правдоподобным будет

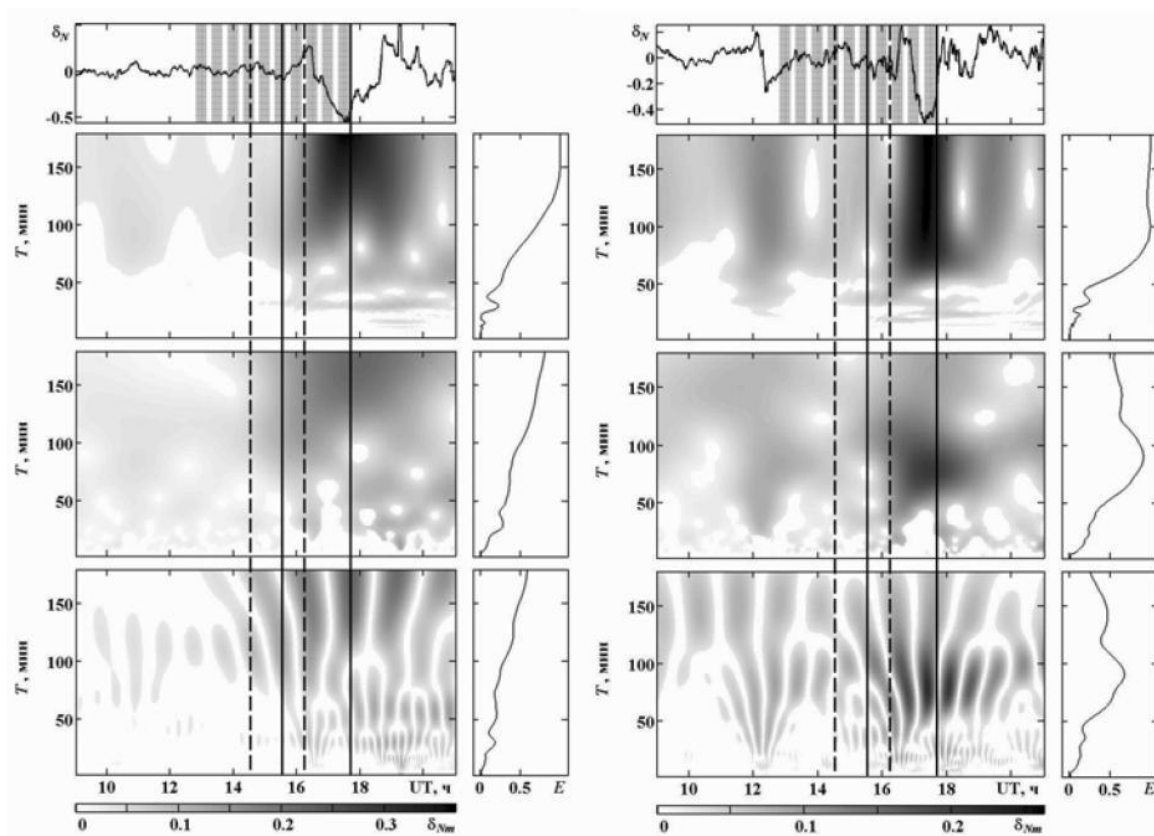


Рис. 2. Результаты применения к временным вариациям электронной концентрации (первая панель) на высоте 199 км для 20.09.2010 г. (а) и 21.09.2010 г. (б) оконного (вторая панель), адаптивного (третья панель) преобразований Фурье и вейвлет-преобразования (четвертая панель). Справа приведены энергограммы [Черногор, 2008].

предположение о том, что генерация ВВ произошла лишь при втором или третьем включении стенда. Тогда скорость распространения ВВ составит 280–560 м/с. Все полученные скорости лежат в диапазоне скоростей распространения ВГВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 3. С. 4–35.

Бурмака В.П., Домнин И.Ф., Урядов В.П., Черногор Л.Ф. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиопизика. 2009. Т. 52, № 11.

С. 859–880.

Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. Т. 48, № 5. С. 681–702.

Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Voeykov S.V., et al. MHD nature of ionospheric wave packets generated by the solar terminator // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50, N 1. P. 79–95.

Gurevich A.V. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. New York; Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1978. 372 p.

¹Институт ионосферы, Харьков

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина МОН Украины, Харьков