

УДК 533.9.082.7

## ДИАГНОСТИКА ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА КОРОТКИХ РАДИОТРАССАХ

И.А. Болотин

### DIAGNOSTICS OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES ALONG SHORT-DISTANCE RADIO PATHS

I.A. Bolotin

В работе рассмотрены возможности зондирования искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых в ионосфере Земли мощным КВ-радиоизлучением стенда «Сура», с использованием коротких радиотрасс и техники вертикального зондирования. В работе также продемонстрировано применение предлагаемой методики для решения некоторых задач гирогармонического нагрева ионосферы.

In the paper we discuss some opportunities to sound the artificial ionospheric irregularities, excited in the Earth's ionosphere by HF powerful radio waves radiated at the "Sura" facility, using short-distance radio paths and tools of ionosphere vertical sounding. We demonstrate peculiarities of such sounding as well as applications of the suggested technique for solving some problems of the ionosphere pumping at powerful wave frequency close to the gyro harmonic frequency.

Воздействие мощным КВ-радиоизлучением на ионосферу Земли приводит к развитию искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), которые имеют поперечные к геомагнитному полю размеры от долей метра до десятка и более километров. Изучение их спектральных и динамических характеристик дает возможность исследовать свойства возбуждаемых мощной радиоволной неустойчивостей, изучать особенности динамических процессов в ионосфере, а также определять возможное влияние ИИН на распространение радиоволн различных диапазонов. Несмотря на проведенные многочисленные исследования, сегодня нельзя считать изученными в достаточной степени свойства неоднородностей с  $l_1 \approx 50\text{--}100$  м, где наблюдается спектральный максимум интенсивности ИИН, который связывается с развитием тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости. Это определяет важность знания характеристик таких ИИН для понимания механизмов взаимодействия мощных радиоволн с магнитоактивной плазмой. Исследования свойств таких неоднородностей могут быть выполнены методом ракурсного рассеяния радиоволн в диапазоне частот  $f \approx 1.5\text{--}5$  МГц. Ясно, что из-за сильной рефракции столь низкочастотных радиоволн в ионосфере измерения могут быть выполнены только в том случае, если приемопередающий комплекс располагается достаточно близко к нагревному стенду.

В исследованиях, результаты которых представлены в настоящей работе, модификация ионосферы осуществлялась с помощью нагревного стенда «Сура», расположенного в 100 км к востоку от Нижнего Новгорода (координаты стенда:  $\phi = 56.15^\circ$  N,  $\lambda = 46.1^\circ$  E). Зондирование возмущенной области ионосферы выполнялось с помощью модифицированного ионозонда «Циклон», расположенного на территории загородной лаборатории физического факультета Казанского (Приволжского) федерального университета (координаты лаборатории:  $\phi = 55.85^\circ$  N,  $\lambda = 48.81^\circ$  E) [Акчурин, Юсупов, 2010]. Ионозонд может работать в комбинированном режиме, когда в паузу между съемом ионограмм он переводится в режим импульсного излучения последовательно на десяти частотах.

Рассматриваемые в настоящей работе эксперименты были выполнены 22–26 августа 2010 г. в утренние, дневные, вечерние и ночные часы [Акчурин и др., 2011а]. В качестве примеров на рис. 1 и 2 приведены ионограммы, полученные соответственно 23 августа в вечернее время (до нагрева – панель а, через ~60 с после включения мощной радиоволны на частоте 4785 кГц с эффективной мощностью  $P_0 G \approx 100$  МВт – панель б) и 26 августа в условиях, когда профиль плазмы более отвечал дневной ионосфере (частота волны накачки 5445 кГц). На ионограммах видно появление дополнительных следов (рассеянных сигналов, РС).

В качестве примера регистрации рассеянных сигналов на фиксированных частотах 2.5, 3.4 и 5.1 МГц из областей РС на рис. 3 приведены сонограммы для каждой из частот зондирования в координатах время – задержка принимаемого сигнала – его интенсивность (степень яркости) для представленного на рис. 1 сеанса измерений. Сонограммы приведены четырьмя фрагментами длительностью ~100 с каждый. Они содержат момент включения волны накачки (ВН) (первый ряд), интервал времени спустя 1–3 мин после начала воздействия (второй ряд), момент выключения ВН (третий ряд) и интервал времени спустя 1–3 мин после окончания воздействия (четвертый ряд).

Важное место в интерпретации полученных результатов играют траекторные расчеты, позволяющие определить возможности выполнения условий ракурсного рассеяния в различных частях возмущенной области ионосферы в зависимости от ионосферных условий и частоты зондирования. Расстояние от ионозонда до стенда «Сура» составляет 170 км. Особенностью этой трассы является то, что плоскость зондирования практически перпендикулярна плоскости геомагнитного меридиана, проходящей через нагревный стенд. Поэтому условие обратного рассеяния радиоволн сводится к условию, при котором в области рассеяния волновой вектор падающей волны должен быть горизонтален, что соответствует положению максимума траектории луча. Все это позволяет заметно упростить траекторные расчеты, используя в расчетах закон Снеллиуса и теорему Брейта–Тьюва, а также приближение

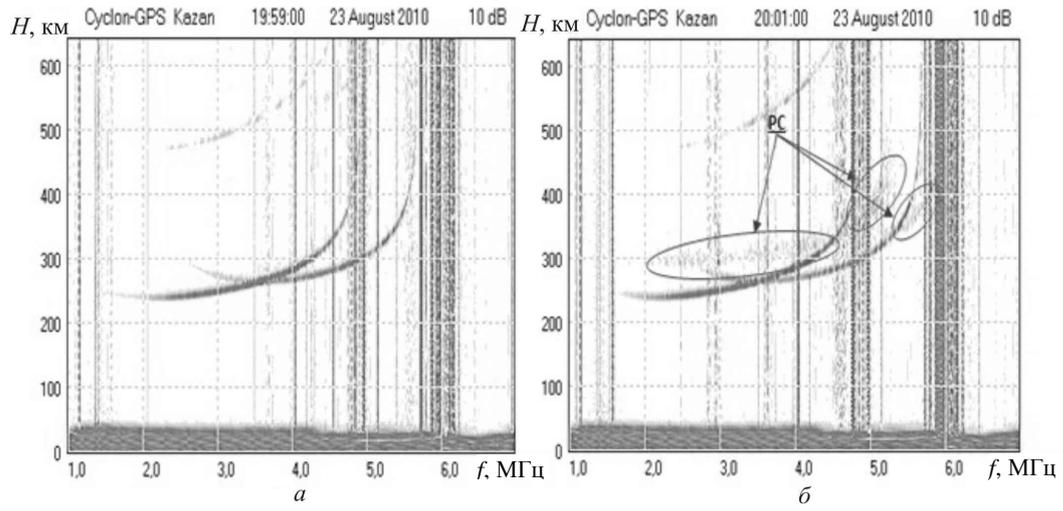


Рис. 1.

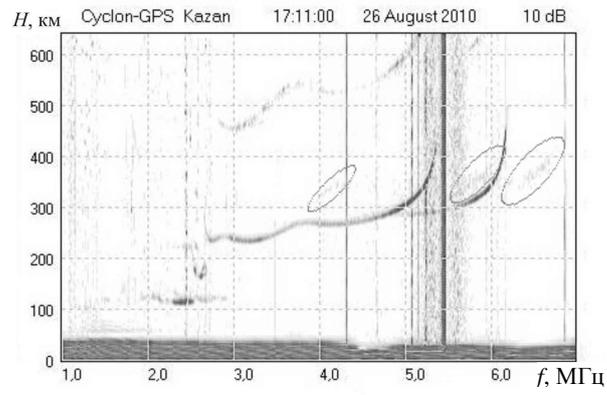


Рис. 2.

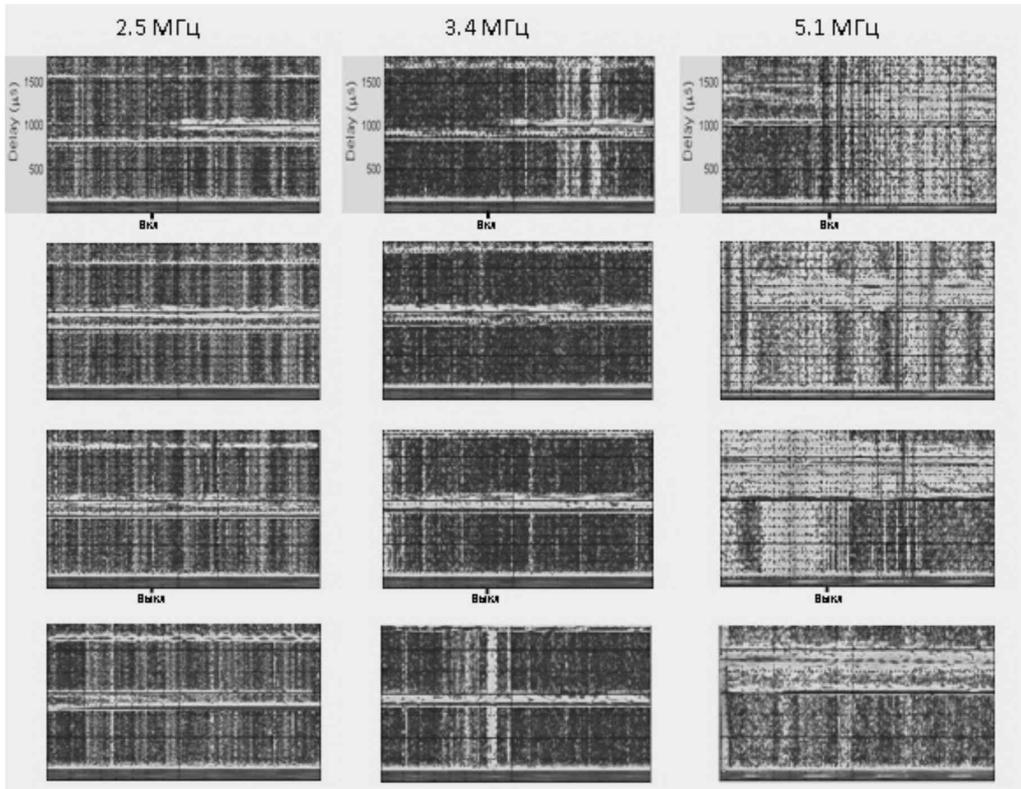


Рис. 3.

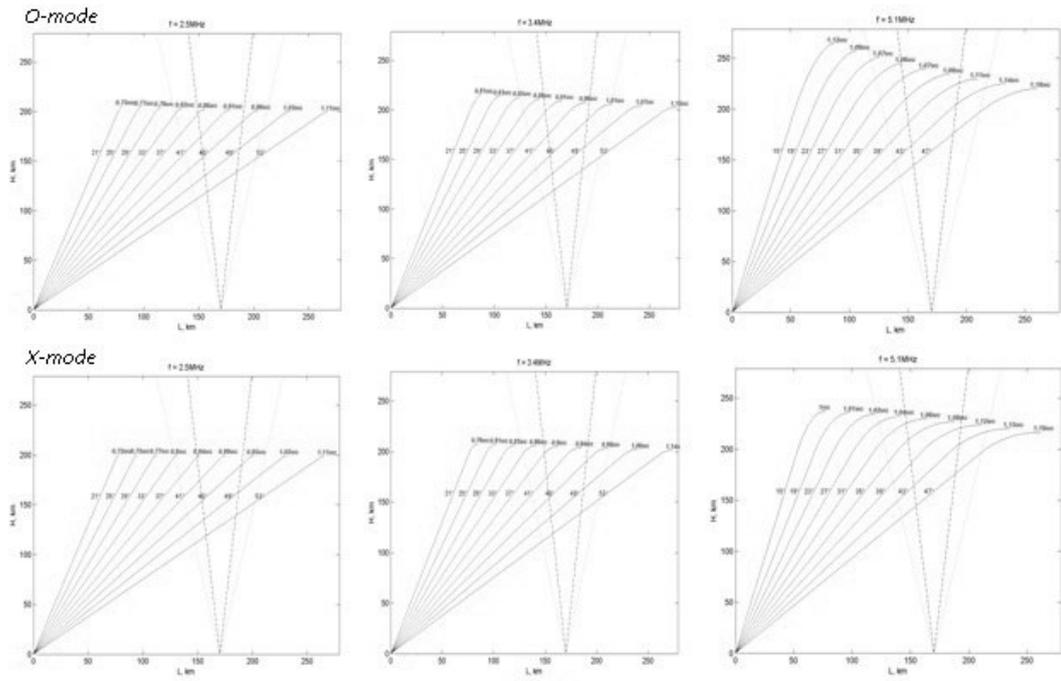


Рис. 4.

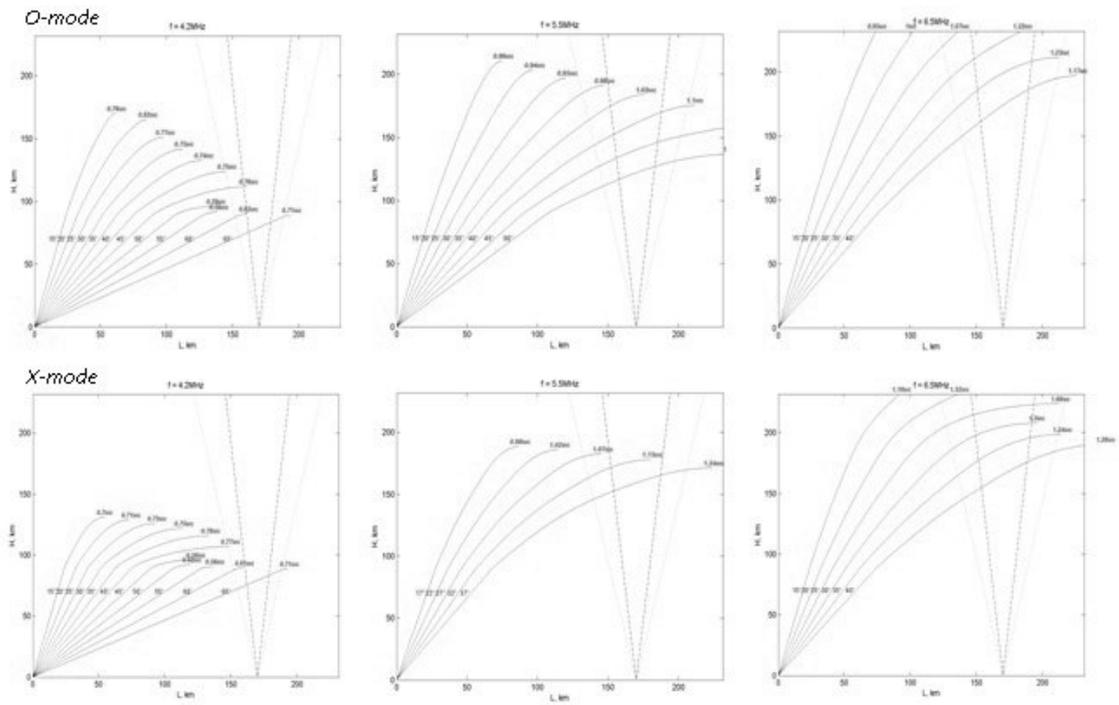


Рис. 5.

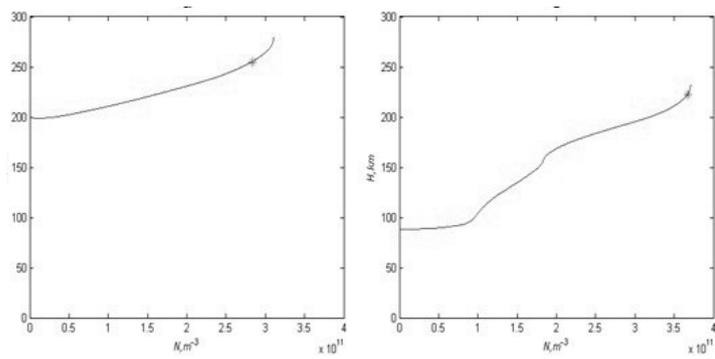


Рис. 6.

плоскостной среды, что вполне оправдано для такой короткой трассы.

Результаты траекторных расчетов продемонстрированы для случаев ночной (рис. 4) и дневной (рис. 5) ионосферы, для волн О- и Х-поляризации на частотах из областей РС на рис. 1 и 2. Восстановленные из ионограмм профили электронной концентрации, соответствующие ночной (а) и дневной (б) ионосфере, приведены на рис. 6. Звездочками на профилях показаны высоты отражения мощной радиоволны.

По использованию описанной методики можно сделать следующие выводы.

1. Реализована возможность диагностики неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 100-200$  м в интервале высот F-области.

2. Рефракционные эффекты играют существенную роль, влияя на характеристики рассеянного сигнала, и это необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных.

3. Характерные времена развития рассеянных сигналов составляют от ~5 с до 1–2 мин. Время релаксации рассеянных сигналов также изменяется в широких пределах от десятков секунд до нескольких минут. Все это указывает на то, что в формировании рассеянного сигнала участвуют разные части возмущенной области (ВО), что подтверждается траекторными расчетами.

Продемонстрируем теперь использование описанной техники для решения некоторых задач гирогармонического нагрева, т. е. нагрева, при котором частота волны накачки (ВН) близка к  $nf_{ce}$  (в нашем случае  $n=4$ ). Описываемый далее эксперимент был проведен 26 августа 2010 г. с 16:00 до 17:36 мск [Акчуринов и др., 2011б]. Нагревный стенд «Сура» излучал мощные радиоволны О-поляризации последовательно на частотах 5425, 5445, 5465, 5485, 5465 кГц и т. д. с длительностью излучения на каждой из частот 90 с. Диапазон частот ВН был выбран таким образом, чтобы в каждом цикле их изменения значение  $f_{ВН}$  проходило через частоту четвертой гармоники гирочастоты электронов, которая во время эксперимента уменьшалась, в среднем, от 5465 до 5425 кГц. Положение самой гирогармоники электронов в области взаимодействия ВН с плазмой определялось

по подавлению генерации главного спектрального максимума (downshifted maximum, DM) в спектре [Ermakova, et al., 2001] искусственного радиоизлучения в области двойного резонанса.

Во время рассматриваемого здесь эксперимента рассеяние на частотах 2–4 МГц наблюдалось нерегулярно, поэтому здесь мы ограничимся только анализом данных, полученных в полосе частот 5.4–7.0 МГц. На их основе можно сделать следующие выводы.

1. Достаточно четко прослеживается зависимость интенсивности рассеяния от соотношения  $f_{ВН}$  и  $4f_{ce}$  с наибольшим ослаблением при  $\delta f = -(10-30)$  кГц.

2. С уменьшением интенсивности рассеяния наблюдалось увеличение времен развития неоднородностей.

Выполненные исследования продемонстрировали широкие возможности, которые открывает использование коротких радиотрасс для локализации ИИН с масштабами  $l_{\perp} \approx 50-200$  м на основе обычной техники вертикального зондирования ионосферы. В такого рода экспериментах возможно проводить исследование динамических характеристик ИИН на разных высотах и изучать структуру ВО ионосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акчуринов А.Д., Юсупов К.М. Система управления ионозонда «Циклон» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. Вып. 5(108). С. 49–56.

Акчуринов А.Д., Болотин И.А., Зыков Е.Ю. и др. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей на коротких радиотрассах // XXIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Труды конференции. 2011а. Т. 2. С. 185–188.

Акчуринов А.Д., Болотин И.А., Вертоградов В.Г. и др. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей // XXIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Труды конференции. 2011б. Т. 2. С. 285–288.

Ermakova E.N., Frolov V.L., Komrakov G.P., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, N. 16. P. 3103–3106.

Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород