

А.В. Першин, Ф.И. Выборнов, Д.С. Котик
ФРБНУ «НИРФИ»

О ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИОНОЗОНДА CADI В ИССЛЕДОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННО-МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИОНОСФЕРЫ

Канадский цифровой ионозонд CADI (The Canadian Advanced Digital Ionosonde) используется в научных исследованиях при проведении наблюдений за состоянием ионосферы. В 2011 г. такой ионозонд был установлен на полигоне ФГБНУ НИРФИ Васильсурск для диагностики состояния ионосферы во время работы нагревного стенда СУРА. Основное отличие ионозонда CADI от использовавшихся на полигоне ранее (АИС, ТИС, Базис) заключается в относительно малой выходной мощности и возможности использования 7/13-битного кода Баркера. Ионозонд CADI имеет различные режимы работы, в том числе режим фиксированных частот, позволяющий регистрировать динамику процессов в ионосфере. К сожалению, программное обеспечение этого ионозонда поставляется без детального описания и только эмпирическим путем можно установить возможность регистрации отдельных видов возмущений в ионосфере. Отсутствуют четкие требования на параметры электромагнитной обстановки в месте установки ионозонда.

Основными задачами исследования являлись:

- изучение функциональных возможностей данного ионозонда и выявление особенностей относительно ранее использовавшихся на этом полигоне ионосферных станций при его расположении в непосредственной близости от стенда СУРА;
- проведение цикла исследований по диагностике крупномасштабных неоднородностей ионосферы (F-spread) с помощью ионозонда CADI в естественных условиях и при воздействии на нее мощным коротковолновым излучением нагревного стенда СУРА;
- изучение влияния мощного электромагнитного излучения стенда СУРА на работоспособность ионозонда CADI.

Для решения этих задач потребовалось разработать программное обеспечение дистанционного доступа к данным ионозонда и их визуализации в режиме on-line через Интернет и обеспечить работу ионозонда в режиме непрерывных наблюдений без оператора.

Одним из видов реакции ионосферы на зондирование ее мощной радиоволной является уширение следа отражения на высотно-частотной характеристике вертикального зондирования ионосферы. Это явление получило название искусственного F-spread (F-рассеяния) или искусственной диффузности. Его связывают с возникновением в ионосфере крупномасштабных искусственных неоднородностей электронной концентрации с характерными размерами 1–100 км (крупномасштабной турбулентностью) при прохождении или отражении мощной электромагнитной волны. Впервые это явление было обнаружено в экспериментах по искусственной модификации ионосферы в Боулдере (США) [1,2], а затем в г. Горьком [3] с использованием стенда Ястреб, а затем СУРА. Первые эксперименты показали, что ИД уверенно наблюдается как в ночное, так и в дневное время, при этом для диагностики использовались ионосферные станции типа АИС, Базис-М, Сойка-6000, выходная мощность которых составляла 10-50 кВт (в импульсе). На рис. 1 приведены ионограммы станции Базис-М, полученные 16 мая 2010 г. в вечернее время после десятиминутного сеанса работы нагревного стенда СУРА на обыкновенной компоненте вблизи критической частоты, которые показывают этап релаксации ИД с 00:11:52 UT до 00:31:15 UT.

Применение различных кодирующих последовательностей при регистрации сигнала (в том числе кодов Баркера) позволяет повысить помехоустойчивость ионозонда

за счет использования корреляционной обработки. При этом работа ионозонда в режиме кодирования излучаемого импульса 13-ти разрядным кодом Баркера с мощностью в импульсе 600 Вт (при идеальной фильтрации помех!) эквивалентна моноимпульсному режиму с мощностью 8 кВт. Естественно, что для режима с корреляционной обработкой принимаемого сигнала необходимо было экспериментально подтвердить возможность регистрации диффузного (значительно большей длительности и сложной формы) сигнала, а затем провести сравнительный цикл исследований явления искусственного F-spread.

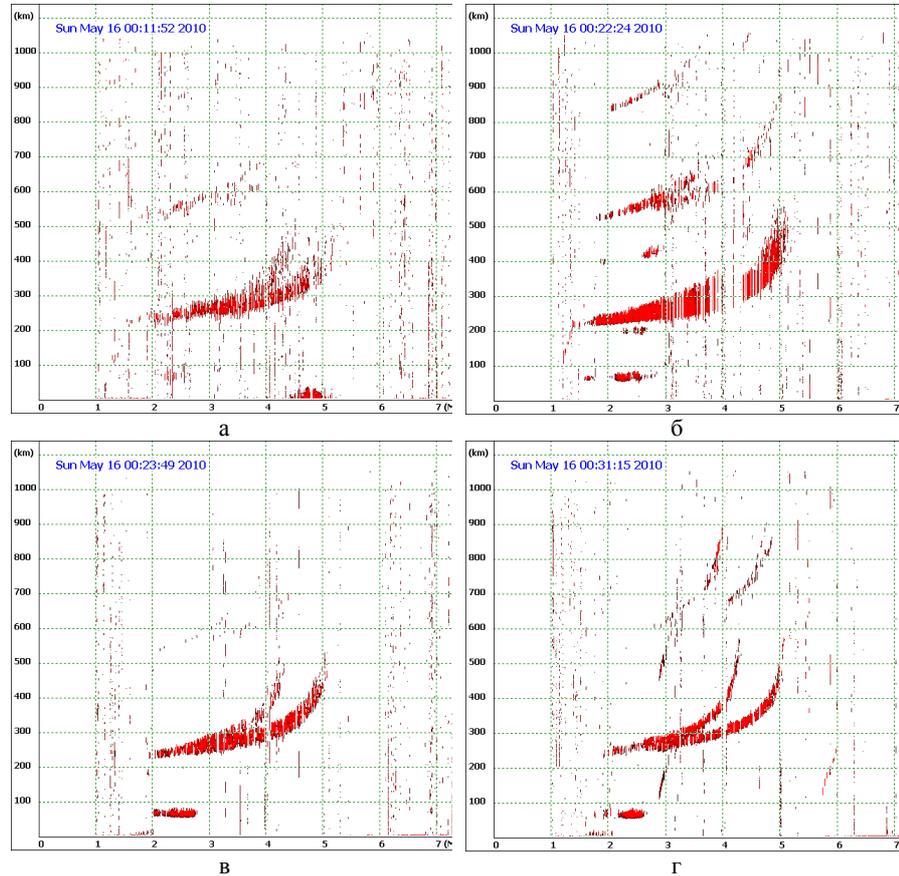


Рис. 1. Релаксация искусственного F-spread по данным ионозонда Базис-М (а – ионограмма, полученная сразу после выключения нагревного стенда СУРА 16.05.2010 г. в 16:00 UT; б, в, г – ионограммы, полученные через 11, 12 и 20 минут соответственно)

Использование ионозонда CADI с режимом работы 13-битным кодом Баркера и выходной мощностью 600 Вт для диагностики ионосферы показало, что ИД уверенно наблюдается как в ночное, так и в дневное время. Воздействие на ионосферу излучением нагревного стенда СУРА осуществлялось на частоте ниже критической на обыкновенной компоненте с эффективной мощностью до 80 МВт, как правило, в дневное и вечернее время весной, летом и осенью 2012 года. ИД уверенно диагностировалась ионозондом CADI при временах нагрева около 10 минут. Обычно наблюдался частотный F-spread с интенсивностью до 3 баллов [4]. При этом установлено, что релаксация ИД происходит за время 15-30 минут. Увеличение длительности нагрева более 15 минут в непрерывном режиме не приводило к усилению диффузности.

На рис. 2 показаны ионограммы, полученные 4 сентября 2012 г. с 16:40 по 17:08 UT для случая развития сильной искусственной диффузности. Первой показана ионограмма до включения стенда СУРА, вторая – сразу после 10-минутной работы. Третья ионограмма – через 8 мин. после выключения нагрева. На рис. 3 показаны ионограммы, полученные 2 сентября 2012 г. с 15:55 по 16:45 UT, когда наблюдалась слабая искусственная диффузность. Первой показана ионограмма до включения стенда СУРА, вторая – сразу после 30 минут работы. Третья ионограмма – через 15 мин. после выключения нагрева. Регистрация ионограмм во время работы нагревного стенда оказалось затруднительна из-за подавления сигнала ионозонда сильными помехами.

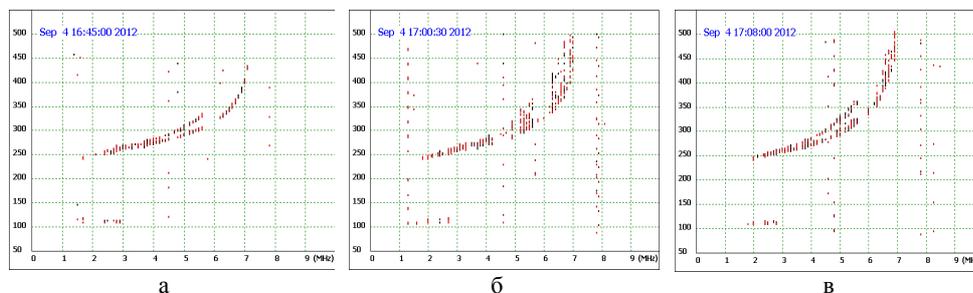


Рис. 2. а – ионограмма, полученная на ионозонде CADI до включения стенда СУРА 4.09.2012 г. в 16:45 UT, б – сразу после выключения в 17:00 UT, в – через 8 минут после выключения стенда СУРА

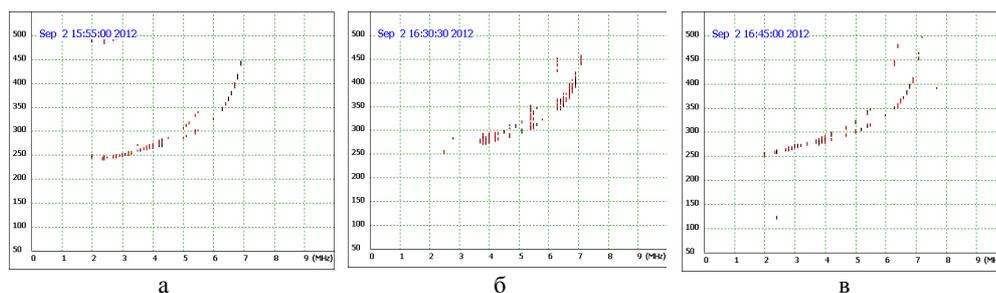


Рис. 3. а – ионограмма, полученная на ионозонде CADI до включения стенда СУРА 2.09.2012 г. в 15:55 UT, б – сразу после выключения в 16:30 UT, в – через 15 минут после выключения стенда СУРА

В результате проведенных исследований доказано, что ионозонд CADI может успешно использоваться для диагностики искусственных крупномасштабных возмущений ионосферы.

В ходе диагностики явления искусственного F-spread установлено, что:

- а. Явление ИД возникает во всех циклах воздействия КВ-излучения на ионосферу.
- б. Интенсивность ИД зависит от соотношения частоты волны накачки и критической частоты F-слоя ионосферы.
- в. Интенсивность ИД зависит от высоты отражения КВ-волны, излучаемой стендом СУРА.
- г. Интенсивность ИД зависит от естественно-возмущенного состояния ионосферы; наличие естественных возмущений типа перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), дополнительных и наклонных отражений, слабой начальной диффузности, как правило, усиливают интенсивность ИД [5–8].

Данный ионозонд введен в эксплуатацию в качестве одного из постоянно действующих средств диагностики состояния ионосферы (в режим патрульных наблюдений), в том числе и во время всех проводимых исследовательских работ в лаборатории Васильсурск;

В процессе работы разработан вариант независимого программного обеспечения для осуществления доступа к данным ионозонда и их визуализации в режиме on-line (находится в свободном тестовом доступе по адресу: <http://basis.sura-nn.ru/2011/tst1/index.html>).

В целях развития САДИ как средства диагностики состояния ионосферы планируется:

- увеличение выходной мощности с помощью дополнительного усилителя до 50 кВт;
- использование специальных антенн, в том числе фазированных антенных решеток;
- модернизация программного обеспечения для обработки получаемых данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №11-02-00419-а, №11-02-97104р_поволжье_a.

Список литературы:

- [1] Utlant W.F., Cohen R. Modifying the ionosphere with intense radio waves // Science. 1971. V. 174, N 4006. P. 245–255.
- [2] Utlant W.F., Violette E.S. Summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification // Radio science, 1974, V. 9, № 11, November. P. 895–903.
- [3] Беликович В.В. и др. Новые результаты исследований нелинейных явлений в ионосфере // Изв. Вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 516–520.
- [4] URSI Руководство по обработке и интерпретации ионограмм.
- [5] Ерухимов Л.К., Метелев С.А., Митяков Э.Е. и др. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности // В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФАН. 1979. С. 7–46.
- [6] Выборнов Ф.И., Котик Д.С., Першин А.В. Исследование явления искусственного F-spread с использованием ионозонда САДИ. // В сб. трудов конференции: Региональная XVIII конференция, 13–15 ноября 2012 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет. С. 50–52.
- [7] Першин А.В. Построение адаптивной модели полного содержания электронов в ионосфере Земли // Тезисы доклада (в печати). Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков. Санкт-Петербургский государственный университет. 11–12 декабря 2012 г.
- [8] Выборнов Ф.И., Котик Д.С., Першин А.В., Рахлин А.В. О явлении искусственной диффузности при воздействии на ионосферу мощным излучением нагревного стенда СУРА. 8-я конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 4–8 февраля 2013 г. М: ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 82–83.