

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.172-175

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛЧМ КВ РАДАРА БИСТАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 22-23 ИЮНЯ 2015 г.

Г.Г. Вертоградов¹, В.П. Урядов², М.С. Скляревский¹, Ф.И. Выборнов²

¹ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

²НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород

Аннотация. Представлены результаты наблюдений аномальных сигналов с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора во время магнитной бури 22-23 июня 2015г. на трассе Кипр – Ростов-на-Дону. На основе моделирования показано, что диффузные сигналы с большими задержками, регистрируемые на частотах выше МНЧ прямого сигнала через *F*-слой ионосферы, обусловлены рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях субавроральной ионосферы локализованных в окрестности южной границы аврорального овала.

Введение

Известно, что рассеяние радиоволн на ионосферных неоднородностях приводит к образованию аномальных сигналов, присутствие которых снижает эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения. Для прогнозирования распространения радиоволн и обеспечения эффективной работы радиоэлектронных систем в условиях приема аномальных сигналов важную роль играет позиционирование неоднородных структур, ответственных за появление таких сигналов.

Чтобы разобраться в сложной картине ионосферного распространения коротких радиоволн на трассах различной протяженности и ориентации в различных гелиогеофизических условиях необходим инструмент способный измерять ключевые характеристики ионосферного КВ канала (ДЧХ, АЧХ и УЧХ) всех мод распространения, в том числе аномальных сигналов. Инструментом, позволяющим в реальном времени измерять все характеристики ионосферного канала во всем диапазоне частот прохождения КВ сигналов, является ЛЧМ ионозонд-радиопеленгатор, с помощью которого получены новые научные результаты в области физики ионосферы и распространения радиоволн [1].

В докладе представлены результаты использования ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора применительно к позиционированию мелкомасштабных неоднородностей субавроральной ионосферы, ответственных за аномальные (рассеянные) сигналы во время магнитной бури 22-23 июня 2015 г., зарегистрированных на среднеширотной трассе Кипр – Ростов-на-Дону.

Результаты наблюдений и моделирования

Магнитная буря началась в 18:00 UT 21 июня 2015 г. с резкого возрастания индекса Dst, начальная фаза магнитной бури продолжалась примерно до 14:00 UT 22 июня 2015 г. Далее с резкого уменьшения Dst началась главная фаза магнитной бури, которая продолжалась до 05:00 UT 23 июня 2015 г., когда индекс Dst достиг минимального значения -204 нТл. Затем началась фаза восстановления бури, продолжавшаяся в течение нескольких дней, вплоть до 30 июня 2015 г. (см. рис. 1а).

На рис. 1б показан временной ход Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), южное направление которой определяет поступление энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы посредством механизма пересоединения. Как видно из рисунка в 18:00UT 22 июня уровень компоненты Vz резко изменился с 0 до -30 нТл. По данным спутника ACE в это же время произошел скачок скорости солнечного ветра с 370 до 680 км/с. Далее, как видно из рис. 1б имел место колебательный процесс с резкой сменой знака Vz с южного на северное направление и обратно.

На фазе восстановления магнитной бури произошло несколько магнитосферных суббурь, хорошо коррелируемых с авроральным индексом AE (рис. 1в). Во время магнитной бури максимальные значения индекса Kp принимали значения 5÷8 с 15:00 UT 22 июня до 15:00 UT 23 июня и значения 5÷6 во время суббури с 06:00 до 15:00 UT 25 июня.

Отрицательная фаза бури и сопровождающее ее усиление поглощения радиоволн оказали негативное влияние на ионосферный канал, приведя к сокращению диапазона частот прохождения радиоволн, деградации ионосферного канала, вплоть до блэкаута [2].

Во время магнитной бури ЛЧМ ионозонд-радиопеленгатор зарегистрировал на трассе Кипр – Ростов-на-Дону аномальные диффузные сигналы с большими задержками ~20-25 мс и азимутами ~20-30°, значительно отличающимися от азимута угла прихода прямого сигнала 203°, распространяющегося по дуге большого круга между передатчиком и приемником. На рис. 2 показан пример работы пеленгатора во время главной фазы магнитной бури в 02:30 UT 23 июня. Из рисунка видно, что на частотах ~8-11,5 МГц с задержками ~24-25 и 16-20 мс наблюдаются диффузные сигналы PC1 и PC2. Углы места изменяются в пределах ~13-30°. Амплитуда аномальных сигналов на 40-50 дБ меньше амплитуды прямого сигнала, распространяющегося через спорадический слой Es.

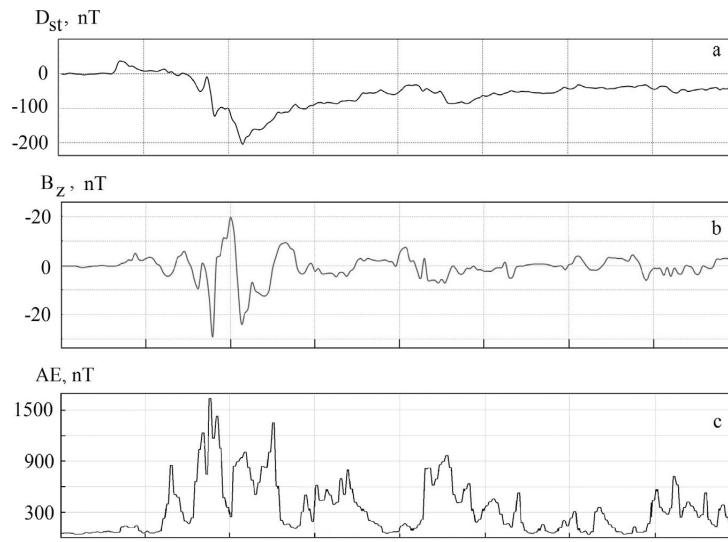


Рисунок 1. Индексы Dst, Bz и AE во время магнитной бури в июне 2015 г.

По результатам измерений ДЧХ и УЧХ мы провели позиционирование областей ионосферы, ответственных за аномальные сигналы. Результаты моделирования в виде проекции на географическую карту местоположения этих областей ионосферы показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что указанная область занимает обширный регион ~200 км по широте и ~700 км по долготе для сигнала PC2 и ~200×300 км для сигнала PC1. Геомагнитные широты этих областей составляют значения ~59-60°N и ~61°N соответственно. Мы полагаем, что диффузные сигналы PC1 и PC2 обусловлены рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях высокоширотной ионосферы в области высыпания заряженных частиц, южная граница которой смещается во время магнитной бури на субавроральные и даже на средние широты. Чтобы определить положение рассеивающих неоднородностей по высоте мы провели моделирование ракурсного рассеяния радиоволн для различного положения неоднородностей по высоте: от 120 км (E-слой) до 450 км (F-слой). В расчетах использовались две модели ионосферы: параболическая модель и модель IRI-2012.

1. Параболическая модель

Наиболее простое моделирование выполняется для параболической модели ионосферы. Параметры параболы взяты по результатам вертикального зондирования в ИЗМИРАНе (DPS-4, Москва): высота максимума слоя $h_m F_2 = 261$ км; полутолщина слоя $y_m F_2 = 153.7$ км; критическая частота $f_0 F_2 = 3.7$ МГц.

Конечно, модель проста, однако летом пространственное распределение ионизации в полночь меняется несильно.

Моделирование выполнено по традиционной схеме [3]. Расчеты ракурсного рассеяния выполнены для единичного объема с координатами проекции его центра на поверхность Земли (64°N, 75°E) для сигнала PC1 и (63°N, 55°E) для сигнала PC2. По высоте положение точки рассеяния варьировалось в широких пределах: от 120 км до 450 км с шагом 1 км. Считалось, что реализуется ракурсное рассеяние на трассе Кипр – область рассеяния (ОР) – Ростов-на-Дону, если в точке рассеяния выполняется условие ракурсности с точностью 0.5 градуса. По мере увеличения частоты сначала проверялось возможность рассеяния на волне обыкновенной поляризации. Затем, когда рассеяние прекращалось, проверялось рассеяние на волне необыкновенной поляризации.

В результате моделирования установлено, что рассеяние для сигнала PC1 зафиксировано в области частот 8-10 МГц, для сигнала PC2 – в области частот 8-14 МГц. Область рассеяния находилась в F-слое ионосферы. Причем распространение происходило прямыми лучами на обоих участках трассы Кипр – ОР и ОР – Ростов без промежуточного отражения от Земли.

Характеристики рассеянных сигналов приведены в таблице 1 для различных частот. Здесь h_{OP} – высота области рассеяния, τ – задержка рассеянного сигнала на трассе Кипр – ОР – Ростов, Δ – угол места прихода волны в пункте приема Ростов-на-Дону. Рассеянный сигнал всегда попадает в Ростов прямым сигналом без отражения от Земли. Это обстоятельство связано с меньшей рефракцией в ионосфере, когда в модели ионосферы не учитывается E-слой.

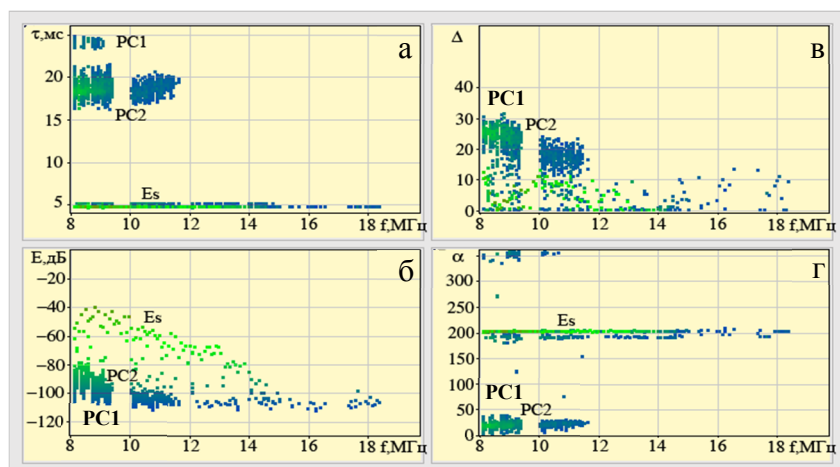


Рисунок 2. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ (в – угол места, град.; з – азимут, град.) на трассе Кипр – Ростов-на-Дону. 02:30UT 23.06.2015 г. PC1 и PC2 – рассеянные сигналы.

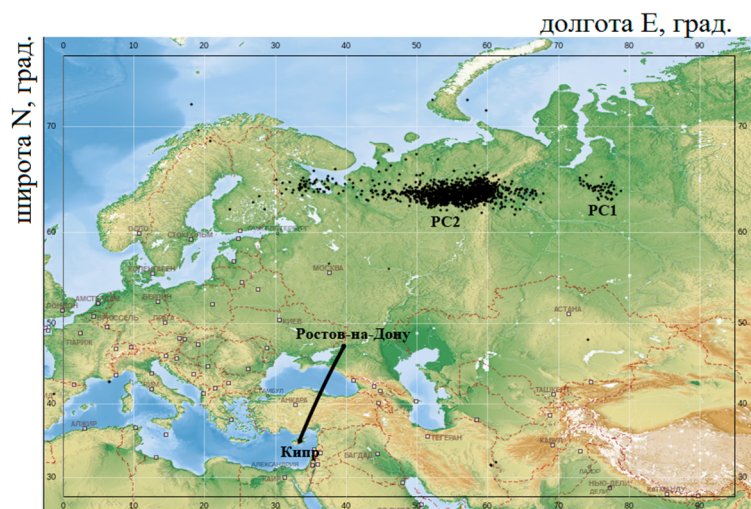


Рисунок 3. Проекция на поверхность Земли месторасположения областей ионосферы, ответственных за рассеянные сигналы PC1 и PC2 для сеанса зондирования 02:30UT 23.06.2015 г.

2. Модель ионосферы IRI-2012

Использовалась модель IRI-2012, для которой уровень солнечной активности принят равным 10. Модель корректировалась по ВЗ станции ИЗМИРАН. Использовались данные, которые приведены выше: критическая частота $f_0F_2 = 3.7$ МГц, высота максимума $h_mF_2 = 261$ км. Результаты моделирования приведены в табл. 2. Следует отметить, что с данными эксперимента согласуются не только задержки рассеянного сигнала, но и углы места его прихода в пункт приема. Область рассеяния находится в F-слое ионосферы. На высотах ниже 120 км по результатам моделирования рассеяние не реализуется. Отметим, что в данном случае сигнал попадает в Ростов-на-Дону с однократным отражением от земли как на участке Кипр–ОР, так и на участке ОР–Ростов-на-Дону. Это обстоятельство связано с повышенной рефракцией в ионосфере, когда учитывается слой E.

Область рассеяния	Таблица 1 Параболическая модель с коррекцией по данным ВЗ				Таблица 2 Модель ионосферы IRI-2012			
	f_oF_2 , МГц	h'_{oF_2} , км	τ , мс	Δ , град.	f_oF_2 , МГц	h'_{oF_2} , км	τ , мс	Δ , град.
PC1	8	210	26.7	23.0	8	130	24.9	12.8
	9	196	25.8	18.5	9	150	24.9	11.8
	10	179	25.2	13.9	10	180	25.1	11.8
PC2	8	305	21.0	23.1	8	200	20.5	20.5
	9	313	20.4	19.1	9	296	20.5	20.0
	10	317	20.0	15.8	10	303	20.3	17.8
	12	321	19.5	10.7				
	14	322	19.1	7.0				

Выводы

По данным ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора проведено позиционирование мелкомасштабных неоднородностей субавроральной ионосферы, ответственных за появление диффузных сигналов с большими задержками на трассе Кипр – Ростов-на-Дону во время магнитной бури 22-23 июня 2015 г. Согласно данным DMSP (Space Weather Prediction Center, www.sec.noaa.gov) положение областей с мелкомасштабными неоднородностями совпадают с зоной выпадения заряженных частиц вблизи южной границы аврорального овала.

По результатам моделирования с использованием, как параболической модели, так и модели IRI-2012 показано, что область рассеяния расположена в F -слое ионосферы. Причем, по данным на частотах больше 9 МГц для сигнала PC2 область рассеяния расположена выше максимума слоя F_2 . Для модели IRI-2012 область рассеяния, ответственная за сигнал PC1, находится в переходной области между E и F слоями.

Благодарности. Авторы благодарят сервисную службу World Data Center for Geomagnetism (Kyoto, Japan) за возможность получения данных по индексам Dst , AE и сервисную службу Space Weather Prediction Center (USA) за возможность получения данных спутника ACE по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Работа В.П. Урядова и Ф.И. Выборнова выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

Список литературы

1. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. и др. Ионозонд-радиопеленгатор с линейной частотной модуляцией сигнала – новый инструмент для исследований ионосферы и распространения радиоволн // Изв. Вузов. Радиофизика. 2013. Т.56, №5. С. 287-306.
2. Урядов В.П., Колчев А.А., Выборнов Ф.И., Шумаев В.В., Егошин И.А. Ионосферные эффекты магнитной бури и двух рентгеновских вспышек в период летнего солнцестояния 2015 г. по данным наклонного зондирования // Труды XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн», Томск, 4-9 июля 2016. Т. 2. С. 225-228.
3. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. и др. Скорость дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по данным многочастотного доплеровского КВ радара. 1. Метод расчета и его аппаратная реализация // Изв. Вузов. Радиофизика. 2015. Т.58, №5. С. 339-351.