

УДК 550.388.2

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ДАЛЬНЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН

В. П. Урядов¹, Г. Г. Вертоградов², Е. Г. Вертоградова²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия;

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей дальнего распространения коротких радиоволн на субавроральной Магадан—Ростов-на-Дону и среднеширотных Хабаровск—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону трассах большой протяжённости, полученные с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала. На трассе Магадан—Ростов-на-Дону обнаружены аномальные (боковые) сигналы с задержками порядка $1 \div 2$ мс относительно прямого сигнала, приходящие с азимутов $10^\circ \div 20^\circ$. Боковые сигналы наблюдались в утренние и дополуденные часы в интервале времени 08:00–10:40 MSK. В вечерние и ночные часы боковые сигналы не наблюдались. Во время магнитной активности амплитуда боковых сигналов была на $5 \div 10$ дБ больше её значения до начала магнитной бури. Определено местоположение областей возмущения ионосферы, ответственных за появление боковых сигналов: $\varphi_{\text{геогр}} \approx 69^\circ \div 71^\circ$ с. ш. ($\varphi_{\text{магн}} \approx 65^\circ \div 66^\circ$ с. ш.), $\lambda \approx 51^\circ \div 58^\circ$ в. д. Рассмотрены механизмы распространения боковых сигналов за счёт боковой рефракции радиоволн на пэтчах с повышенной электронной концентрацией и за счёт их рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к дальнему распространению коротких волн (КВ) обусловлен стремлением изучить особенности различных механизмов их прохождения через ионосферу, в том числе волноводного распространения, а также потребностями решения практических задач дальней КВ радиосвязи.

Многочисленные исследования указывают на важную роль неоднородностей электронной концентрации при дальнем распространении коротких волн (см., например, [1] и цитируемую там литературу). Так, согласно измерениям характеристик КВ сигналов на протяжённой субавроральной трассе, проходящей вблизи главного ионосферного провала, показано, что эти неоднородности отклоняют траекторию распространения радиоволн от дуги большого круга между передатчиком и приёмником [2]. Аналогичные эффекты наблюдались на среднеширотных трассах наклонного зондирования сигналом с линейной модуляцией частоты при наличии геомагнитных возмущений [3].

С другой стороны, мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации естественного и искусственного происхождения могут играть роль рассеивателей для возбуждения ионосферных волноводов. Так, путём контролируемого воздействия мощного радиоизлучения на ионосферную плазму были получены экспериментальные доказательства возможности управления дальним распространением коротких волн посредством их вывода из ионосферного волновода за счёт рассеяния на искусственных мелкомасштабных ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях [4].

Исследования дальнего распространения коротких волн получили новый импульс с внедрением в практику ионосферных исследований ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала, позволяющего одновременно измерять, наряду с дистанционно-частотными и амплитудно-частотными характеристиками, также и угловые-частотные характеристики ионосферного канала, что существенно расширило возможности изучения механизмов

распространения коротких волн на трассах различной протяжённости и ориентации. Так, благодаря использованию ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала на протяжённой трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону, были обнаружены аномальные сигналы и дана их интерпретация. Часть аномальных сигналов была связана с рассеянием радиоволн от горных массивов Гималаев и Иранского нагорья, другие аномальные сигналы были обусловлены рассеянием рикошетирующих и волноводных мод неоднородностями высокоширотной ионосферы северного полушария [5].

Как уже отмечалось, в высокоширотной ионосфере на характеристики КВ радиосигналов существенное влияние оказывают неоднородности электронной концентрации с различными пространственными масштабами [6, 7]. К ним относятся крупномасштабные структуры, включая главный ионосферный провал, спорадические образования типа слоя E_s , перемещающиеся ионосферные возмущения, локальные образования типа пэтчей с повышенной электронной концентрацией, формируемые во время высыпания авроральных частиц, а также мелкомасштабные неоднородности, сопровождающие крупномасштабные структуры.

Форма главного ионосферного провала определяется долготно-широтными вариациями электронной концентрации и зависит от многих факторов, к числу которых следует отнести магнитосферную конвекцию, суточную освещённость высокоширотной ионосферы, солнечную и магнитную активности, высыпания авроральных частиц, нейтральный ветер, ионосферный дрейф и др. [8, 9]. Несмотря на обширные исследования главного ионосферного провала и его влияния на распространение радиоволн, см., например, [10] и цитируемую там литературу, многие вопросы о его форме, параметрах и динамике в различных геоионосферных условиях остаются ещё малоизученными. Это приводит к неопределённостям при модельном прогнозировании характеристик радиосигналов, пересекающих область главного ионосферного провала, что, в свою очередь, снижает эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения.

В этой связи исследование распространения КВ радиосигналов в высокоширотной ионосфере с помощью нового инструмента ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала — открывает дополнительные возможности для позиционирования главного ионосферного провала. При этом решается обратная задача определения структуры ионосферного провала на основе моделирования распространения радиоволн в трёхмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с использованием результатов измерений задержки и углов прихода (азимута и угла места) радиосигналов.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований дальнего распространения коротких волн на трассах Магадан—Ростов-на-Дону, Хабаровск—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону, пересекающих высокоширотную и среднеширотную ионосферу, с использованием ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала, расположенного на полигоне Южного федерального университета вблизи г. Ростов-на-Дону.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент с использованием ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала проводился с 27 января по 14 февраля 2011 года. Измерения выполнялись круглосуточно на трассах наклонного зондирования различной протяжённости и ориентации: Магадан—Ростов-на-Дону (длина трассы $D = 6580$ км), Хабаровск—Ростов-на-Дону ($D = 6650$ км) и Иркутск—Ростов-на-Дону ($D = 4430$ км). Геометрия эксперимента показана на рис. 1. Пунктиром на нём показаны пути распространения сигналов от передатчиков до области возмущения и от области возмущения до приёмного пункта. Отметим, что главный ионосферный провал расположен в интервале геомагнитных широт $55^\circ \div 65^\circ$ с. ш., что для евроазиатского

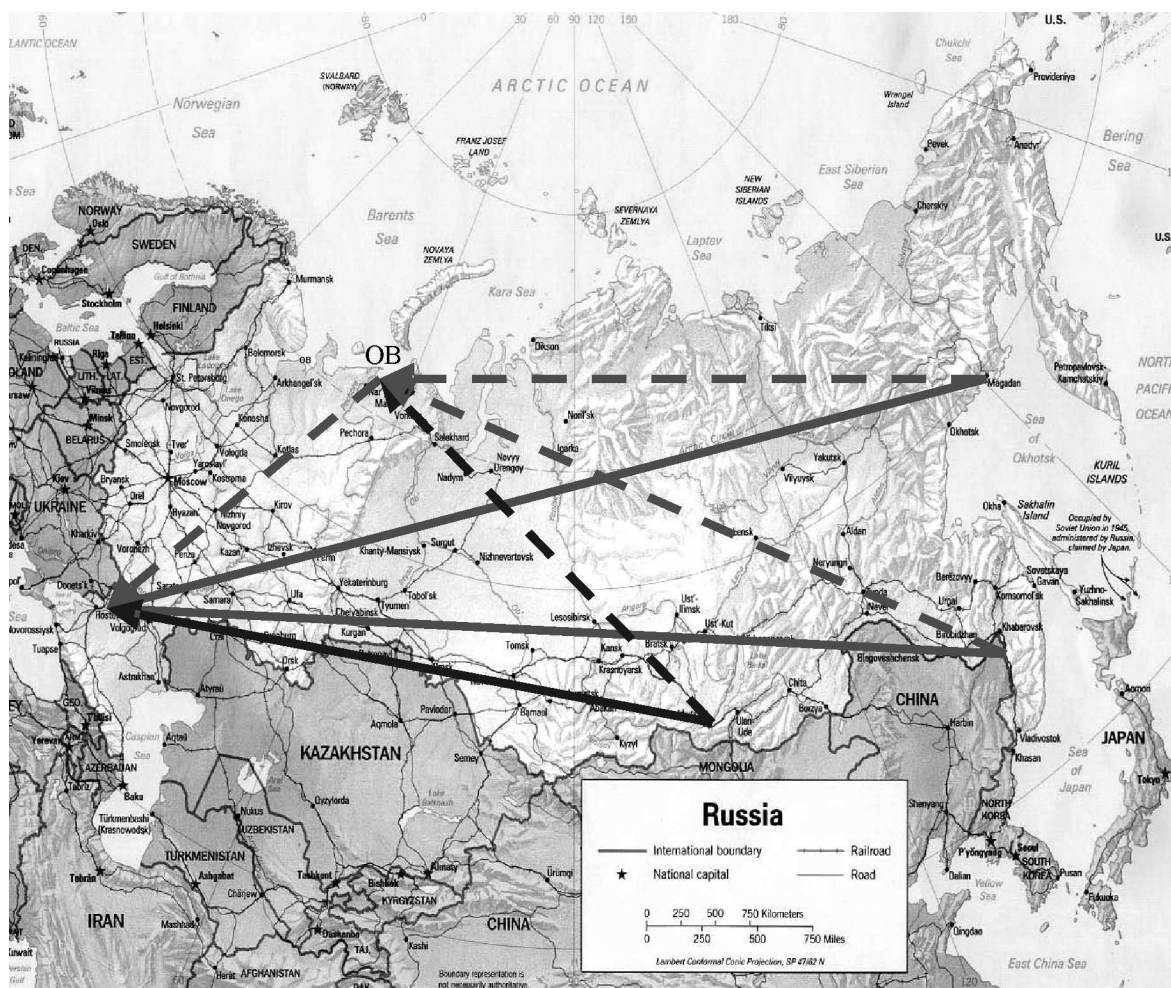


Рис. 1. Схема эксперимента. Сплошные линии — пути распространения прямых сигналов; пунктирные линии — пути распространения боковых сигналов от передатчиков до области возмущения (ОВ) и от области возмущения до приёмного пункта

долготного сектора, где проводился эксперимент, примерно соответствует $60^\circ \div 70^\circ$ с. ш.

Диапазон частот излучения всех трёх передатчиков с линейной модуляцией частоты был $4 \div 28$ МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с. Ионограммы от каждого передатчика регистрировались через 5 минут. Временная синхронизация старта приёма сигнала с линейной модуляцией частоты осуществлялась с помощью системы GPS с точностью не хуже 10 мкс.

В измерениях использовался ионозонд-радиопеленгатор с линейной модуляцией частоты выходного сигнала, построенный на основе двух когерентных радиоприёмников «Катран» Р-399А [11]. Разностный сигнал промежуточной частоты $f_{пч} = 215$ кГц оцифровывался 14-рядным аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации 50 000 Гц, что значительно превышало используемую полосу пропускания приёмника по промежуточной частоте, составляющую 3 000 Гц.

Преобразования сигнала и его обработка включали следующие этапы. Принятый сигнал подвергался процедурам переноса на нулевую частоту с получением квадратурных компонент, т. е. комплексной низкочастотной огибающей, низкочастотной фильтрации цифровым фильтром с по-

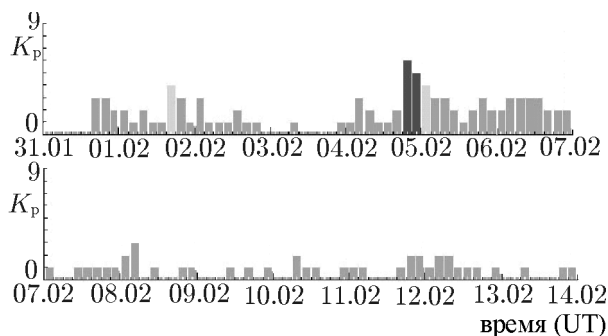


Рис. 2. Магнитный индекс K_p с 31 января по 14 февраля 2011 года

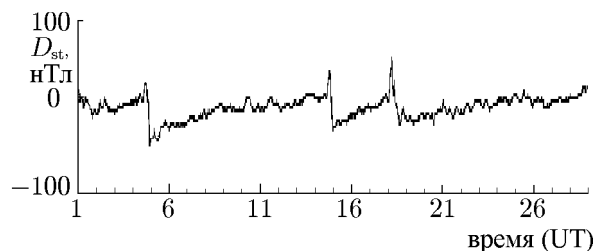


Рис. 3. Индекс D_{st} за февраль 2011 года по станции Киото

лосой пропускания 500 Гц и децимации с понижением частоты дискретизации до 3000 Гц. Описанная процедура увеличивала динамический диапазон анализа не менее чем на 10 дБ по сравнению с обработкой результатов измерений без использования указанных преобразований сигнала. Процедуры оцифровки, фильтрации, выделения квадратур сигнала и децимации были построены таким образом, что вся предварительная обработка осуществлялась автоматически в реальном времени и позволяла получать непрерывные записи неограниченной длительности. В результате обработки в реальном времени определялись следующие параметры: уровень спектральной плотности шума в полосе приёма, количество обнаруженных лучей распространения, амплитуды всех лучей, отношение сигнал/шум для каждого луча и абсолютные задержки каждого из обнаруженных лучей [12]. С помощью многопоточного вычислителя осуществлялось измерение двумерных угловых координат каждого луча путём фурье-синтеза диаграммы направленности антенной решётки. В данном эксперименте антенная решётка состояла из 16 вертикальных штыревых антенн с высотой 9 м каждая, размещённых на площадке 80×80 м [11].

Известно, что на характеристики КВ радиосигналов, особенно на высокоширотных радиолиниях, существенное влияние оказывает геомагнитная активность, которая сопровождается усилением неоднородной структуры и турбулизацией ионосферной плазмы. На рис. 2 показан временной ход магнитного индекса K_p в период проведения эксперимента. Из него видно, что повышенная активность наблюдалась 4–5 февраля, когда магнитный индекс K_p достигал значений $4 \div 6$. В остальные дни наблюдений, включая 27–30 января, геомагнитная обстановка была умеренно спокойной. По данным [13] в период 4–7 февраля была умеренная магнитная буря, начало которой приходится на 17 UT 4 февраля с минимальным значением индекса $D_{st} = -56$ нТл в 22 UT, после чего началась фаза восстановления, продолжавшаяся несколько дней (см. рис. 3). Отметим, что по данным Sodankyla Geophysical Observatory ($67^\circ 22'$ с. ш., $26^\circ 38'$ в. д.) в период времени 18–01 UT 4–5 февраля наблюдалось свечение, вызванное высыпанием заряженных частиц [14].

Наиболее важным параметром, влияющим на развитие магнитной бури, являются величина и ориентация вертикальной компоненты B_z межпланетного магнитного поля [15]. Согласно его измерениям спутником ACE [16] 4 февраля в 15:00 UT произошло изменение ориентации его B_z -компоненты с северного на южное направление и B_z достигла минимального значения $-16,4$ нТл в 19:00 UT. Затем, $|B_z|$ уменьшался и в 05:00 UT 5 февраля B_z сменила знак на северное направление, соответствующее $B_z > 0$. Известно, что с поворотом B_z -компоненты межпланетного магнитного поля к югу в магнитосфере усиливается крупномасштабное электрическое поле конвекции, которое приводит к возникновению магнитосферных суббурь. По данным [17] во время суббури область широт, охваченных сияниями, а следовательно и выделяемая энергия, значительно увеличиваются с ростом $|B_z|$ при $B_z < 0$.

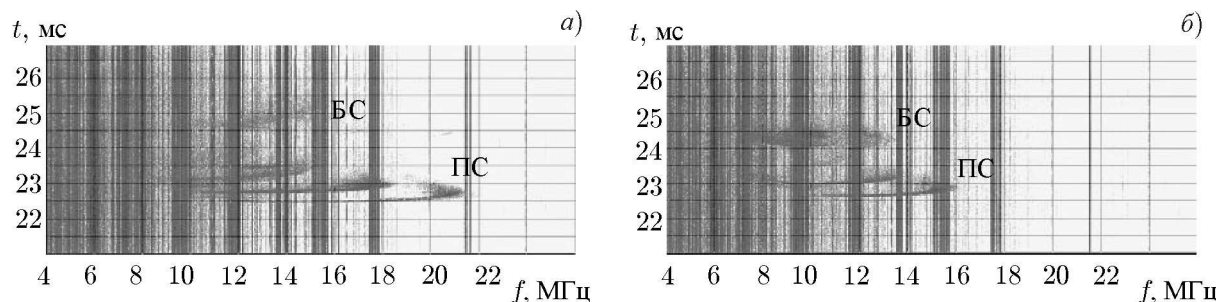


Рис. 4. Ионограмма на трассе Магадан—Ростов-на-Дону. 09:10 MSK 04.02.2011 (а) и 08:35 MSK 05.02.2011 (б), ПС — прямой сигнал, БС — боковой сигнал

Согласно результатам наклонного зондирования на всех трассах, во все дни наблюдений, кроме 4, 5 и 12 февраля, регистрировались стандартные моды, распространяющиеся вдоль дуги большого круга между передатчиками и приёмником, 4, 5 февраля и в меньшей степени 12 февраля на субавроральной трассе Магадан—Ростов-на-Дону наблюдались аномальные (боковые) сигналы. На других трассах такие сигналы не наблюдались. Характерные примеры ионограмм показаны на рис. 4, а результаты работы ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала приведены на рис. 5, 6. Из рис. 4а видно, что в сеансе 06:10 UT (09:10 MSK) 4 февраля зарегистрирован диффузный боковой сигнал в диапазоне частот $11,2 \div 15,0$ МГц, задержка которого относительно прямого сигнала растёт с частотой, принимая значение порядка 2,1 мс в нижней части интервала частот бокового сигнала. Рисунок 4б в сеансе 05:35 UT (08:35 MSK) 5 февраля иллюстрирует наличие достаточно интенсивного бокового сигнала в диапазоне частот $7,5 \div 13,0$ МГц с его расслоением на два трека с задержкой нижнего трека относительно прямого сигнала на величину порядка 1,5 мс. В обоих сеансах боковые сигналы принимались на частотах, меньших максимальной наблюдаемой частоты прямого сигнала, которая составляла 21,2 и 16 МГц для первого и второго сеансов соответственно. Из рис. 5 и 6 видно, что боковые сигналы принимались с азимутов $12^\circ \div 20^\circ$, а азимут прямого сигнала составлял примерно 33° .

Следует отметить, что в утренние и дополуденные часы LT по месту приёма задержка бокового сигнала относительно прямого сигнала увеличивалась с течением времени суток: так, 4 февраля в 04:10 UT задержка τ была 1,75 мс, в 06:10 UT $\tau \sim 2,1$ мс, в 07:50 UT $\tau \sim 2,4$ мс. Напомним, что LT = UT + 3^h. Если полагать, что боковые сигналы обусловлены отражением и (или) рассеянием радиоволн от неоднородностей в области северной стенки главного ионосферного провала¹, то такое поведение задержки τ бокового сигнала согласуется с движением главного ионосферного провала в утренние часы в северном направлении [8]. О наличии развитой неоднородной структуры в окрестности северной стенки главного ионосферного провала, примыкающей к экваториальной границе диффузных высываний электронов, т. е. авроральному овалу, свидетельствуют результаты спутниковых измерений [19], а также данные обратного [20] и бистатистического [3, 5] рассеяния КВ радиосигналов при широкополосном зондировании ионосферы.

2. ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерений дистанционно-частотных и угловых-частотных характеристик с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала мы определили местоположение в ионосфере областей возмущения, ответственных за появление боковых

¹ Хотя главный ионосферный провал представляется явлением, специфичным для ночного сектора ионосферы, многие исследования показывают, что он наблюдается и в другие часы суток, но менее выражен [18].

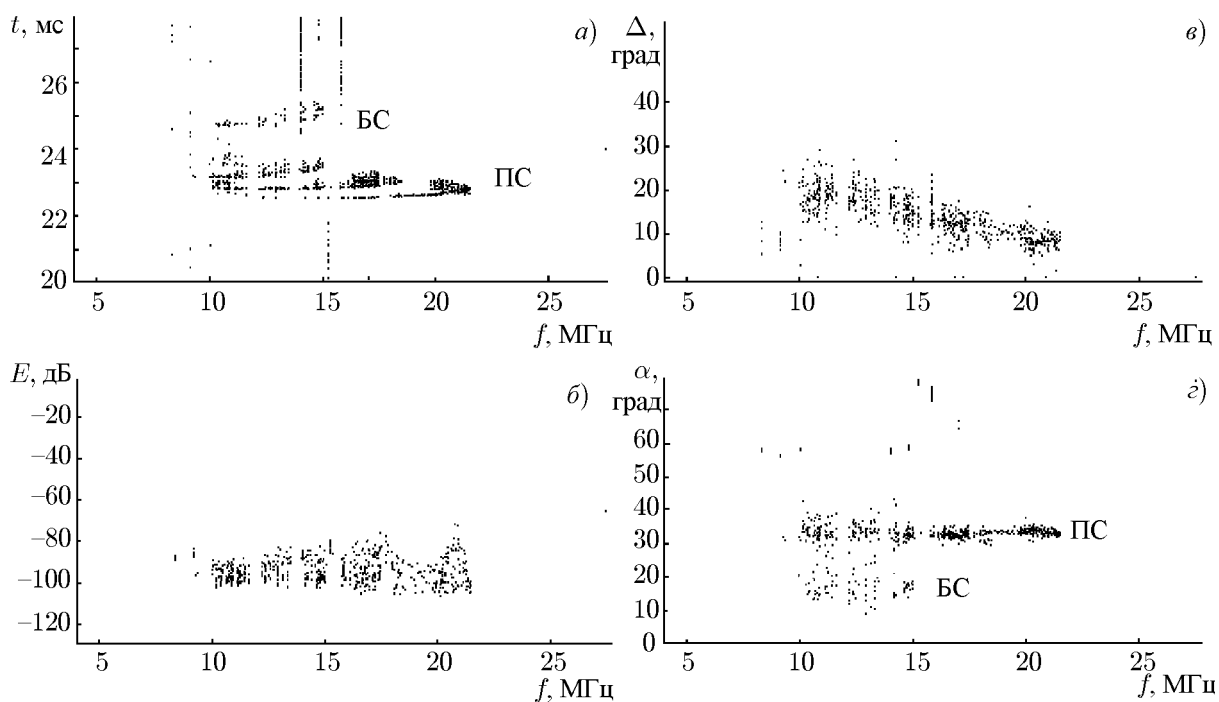


Рис. 5. Дистанционно-частотные (а), амплитудно-частотные (б), угловые-частотные (в) — угол места Δ , (г) — азимут α) характеристики на трассе зондирования сигналом с линейной модуляцией частоты Магадан—Ростов-на-Дону 04.02.2011 в 09:10 MSK. ПС — прямой сигнал, максимальная наблюдаемая частота равнялась 21,2 МГц, азимут $33^\circ \div 34^\circ$. БС — боковой сигнал, диапазон частот $10 \div 15$ МГц, азимут $12^\circ \div 20^\circ$, задержка порядка 2,1 мс

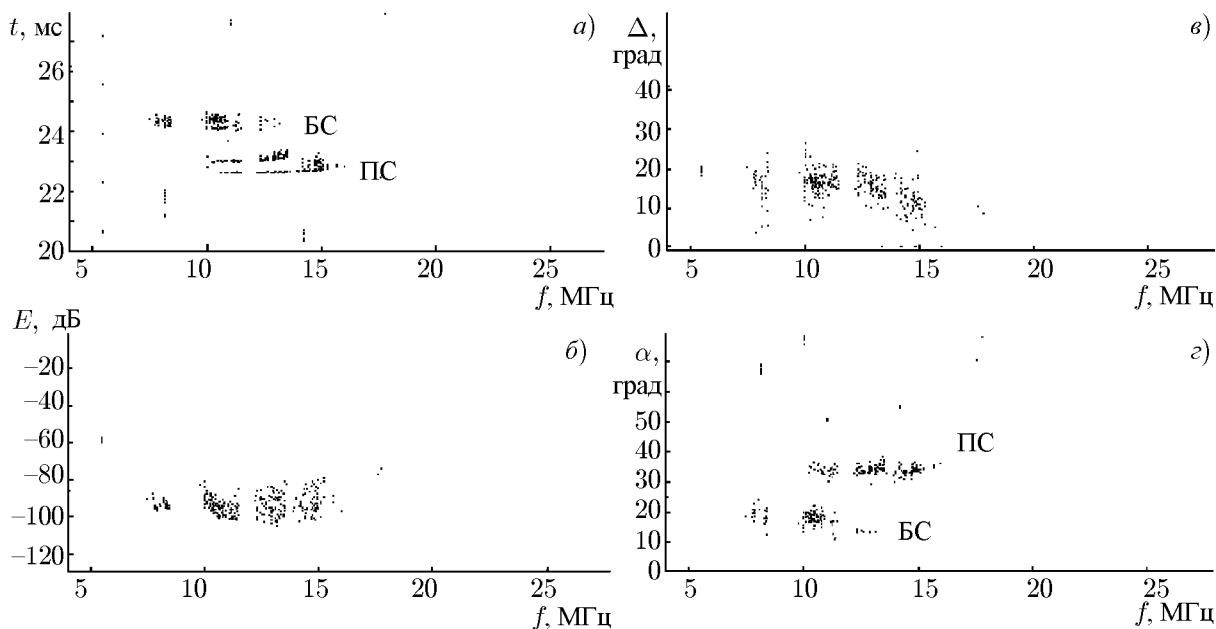


Рис. 6. То же, что на рис. 5 в 08:35 MSK 05.02.2011. ПС — прямой сигнал, максимальная наблюдаемая частота равнялась 16 МГц, азимут $33^\circ \div 35^\circ$. БС — боковой сигнал, диапазон частот $7,5 \div 12,5$ МГц, азимут $15^\circ \div 20^\circ$, задержка около 1,5 мс

сигналов: $\varphi_{\text{геогр}} \approx 69^\circ \div 71^\circ$ с. ш. ($\varphi_{\text{магн}} \approx 65^\circ \div 66^\circ$ с. ш.), $\lambda \approx 51^\circ \div 58^\circ$ в. д.

Зададимся вопросом: какие механизмы могут быть ответственны за появление боковых сигналов и какие факторы могут оказывать влияние на этот процесс?

В качестве одного из основных механизмов мы рассматриваем боковую рефракцию радиоволн на крупномасштабных образованиях типа пэтчей с повышенной электронной концентрацией, возникающих в области высыпания частиц на северной стенке ионосферного провала с примыкающей к ней экваториальной границей аврорального овала — границей диффузного высыпания. Наличие субавроральных пэтчей в период магнитной активности согласуется с данными [20] и связано с ростом западного электрического поля в ночном секторе, который следует за переориентацией B_z -компоненты межпланетного магнитного поля с северного на южное направление и последующей суббуравовой активностью. Данные измерений полного электронного содержания показывают, что высыпание заряженных частиц вносит вклад в ионизацию пэтчей [21]. Вообще говоря, высыпание частиц вдоль экваториальной границы аврорального овала из-за пространственной неоднородности и временной нестационарности процесса высыпания является перемежающимся. При этом время от времени интенсивность высыпаний заряженных частиц оказывается достаточно высокой и вносит значительный вклад в ионизацию пэтчей. На возможность образования пэтчей во время эксперимента указывают данные о свечении ионосферы, вызванном высыпанием заряженных частиц [14].

Ещё одним из механизмов, способным быть ответственным за появляемость боковых сигналов, является рассеяние радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях, сопровождающих крупномасштабные структуры. Здесь уместно сопоставить результаты данного эксперимента с результатами измерений на трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону, проведённом в декабре 2009 года—январе 2010 года с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала [5]. Согласно [5] на трансэкваториальной трассе в магнитоспокойной обстановке в вечерние и ночные часы наблюдался аномальный (боковой) сигнал с задержкой порядка $11 \div 12$ мс относительно прямого сигнала с азимутом угла прихода $18^\circ \div 21^\circ$, который мы интерпретировали как сигнал, рассеянный на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации, локализованных на северной стенке ионосферного провала ионизации северного полушария. Как показало моделирование, на появление боковых сигналов значительное влияние оказывали ионосферные условия на трассе распространения: наличие ионосферного провала и градиент электронной концентрации вдоль трассы. Прямая трасса Лейвертон—Ростов-на-Дону не пересекает ионосферный провал, а боковая трасса Лейвертон—область возмущения—Ростов-на-Дону пересекает его. На начальном участке трассы Лейвертон—область возмущения боковой сигнал за счёт отрицательного градиента электронной концентрации захватывается в ионосферный волновод. При этом на участке трассы с ионосферным провалом радиоволны распространяются в приподнятом волноводе. Это обеспечивает меньшее поглощение и более высокие значения частоты сигнала, который достигает области возмущения с мелкомасштабными неоднородностями, существующими в эти часы (вечернее и ночное время) в окрестности северной стенки ионосферного провала. Таким образом, результаты эксперимента по наблюдению в вечерние и ночные часы боковых сигналов на трансэкваториальной трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону согласуются с механизмом рассеяния рикошетирующих и волноводных мод на мелкомасштабных неоднородностях, локализованных на северной стенке ионосферного провала, прилегающей к границе диффузных высыпаний. Эти результаты согласуются с данными об экваториальной границе диффузных высыпаний [22] и с данными по обратному рассеянию коротких волн от неоднородностей субавроральной ионосферы [20].

На трассе Магадан—Ростов-на-Дону боковые сигналы регистрировались в утренние и дополнительные часы (08:00–10:40 MSK), в основном в магнитно-возмущённый период, когда имело

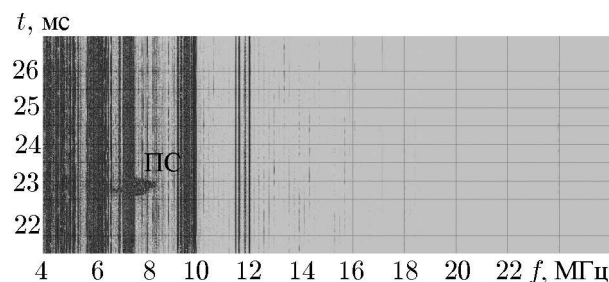


Рис. 7. Ионограмма на трассе зондирования сигналом с линейной модуляцией частоты Магадан—Ростов-на-Дону в 02:00 MSK 12.02.2011. ПС — прямой сигнал

времени, когда значительная её часть проходит через ионосферный провал. Из рис. 7 видно, что по сравнению с дополуденными часами (см. рис. 4), когда максимальная наблюдаемая частота составляет величину порядка $16 \div 21$ МГц, в ночное время она уменьшается до 8 МГц. В то же время, в вечерние и ночные часы на указанных трассах протяжённостью порядка $4500 \div 6500$ км нет значительного градиента электронной концентрации, который мог бы способствовать рефракционному захвату радиоволн в ионосферный волновод, обеспечивая распространение на более высоких частотах, как в случае распространения на трансэкваториальной трассе Лейвертон—область рассеяния [5]. Таким образом, за счёт влияния сильно выраженного в ночные часы ионосферного провала (низкие критические частоты и низкая энергетика сигнала) боковые сигналы не регистрируются, хотя в вечерние и ночные часы в области северной стенки провала и существуют мелкомасштабные неоднородности [19] и, как показывают расчёты, геометрические условия ракурсного (брэгговского) рассеяния радиоволн могут выполняться. По этой же причине, вследствие низких критических частот и недостаточного градиента электронной концентрации в вечерние и ночные часы не наблюдались аномальные сигналы за счёт боковой рефракции.

На появление боковых сигналов может оказывать влияние ориентация диаграммы направленности антенны передатчика с линейной модуляцией частоты выходного сигнала и её эффективность на низких частотах. Так, для Магадана разница углов между направлением максимального излучения антенны и направлением на область возмущения составляет величину около $8,4^\circ$, которая лежит в пределах главного лепестка диаграммы направленности антенны, для Хабаровска эта величина составляет $16,3^\circ$, которая уже выходит за пределы главного лепестка.

Важно ещё отметить, что на трассе Магадан—Ростов-на-Дону в ночное время максимальные наблюдаемые частоты сильно уменьшаются, а на низких частотах порядка $5 \div 8$ МГц эффективность используемых ромбических антенн, настроенных на оптимальные частоты около $15 \div 20$ МГц, заметно снижается. Кроме того, трасса Хабаровск—область возмущения пересекает Среднесибирское плоскогорье, что может приводить к диффузному отражению радиоволн от горных массивов и ослаблению сигнала.

По всей вероятности, на появление боковых сигналов оказывают влияние все перечисленные выше факторы, но в разной степени.

По результатам эксперимента можно сделать такой вывод: боковые сигналы обусловлены боковой рефракцией радиоволн на пятнах с повышенной электронной концентрацией, возникающих в период высыпания заряженных частиц. Механизм распространения боковых сигналов, связанный с рефракцией, укладывается в схему их отсутствия от Хабаровска и Иркутска, т. к. вследствие геометрии расположения трасс в этом случае требуется более сильная рефракция. Так, согласно оценкам, для данной геометрии трасс для боковой рефракции азимутальный угол отражения в области возмущения составляет порядка 73° , 62° и 50° для Магадана, Хабаровска

место высыпания заряженных частиц.

В вечерние и ночные часы боковые сигналы не наблюдались. Это может быть связано с влиянием ионосферного провала. Значительные части всех трасс (Магадан—область возмущения, Хабаровск—область возмущения, Иркутск—область возмущения) проходят через провал, что приводит к снижению максимальной наблюдаемой частоты и уменьшению амплитуды сигнала. На рис. 7 показан пример ионограммы зондирования сигнала с линейной модуляцией частоты на трассе Магадан—Ростов-на-Дону для ночного

и Иркутска соответственно. При этом, для бокового сигнала максимальная применимая частота на трассе Магадан—область возмущения—Ростов-на-Дону будет примерно в 1,6 раза больше, чем эта величина на трассе Хабаровск—область возмущения—Ростов-на-Дону и в 2,2 раза больше, чем максимальная применимая частота на трассе Иркутск—область возмущения—Ростов-на-Дону. Другими словами, для приёма бокового сигнала на трассе Магадан—область возмущения—Ростов-на-Дону требуются заметно меньшие значения электронной концентрации в области возмущения. Таким образом, для трассы Магадан—область возмущения—Ростов-на-Дону условия для бокового отражения радиоволн за счёт рефракции на поперечных градиентах (относительно направления трассы Магадан—область возмущения) в области крупномасштабных пэтчей с повышенной электронной концентрацией существенно менее жёсткие, чем для двух других трасс.

Следует отметить, что во время магнитной активности за счёт усиления мелкомасштабных неоднородностей, сопровождающих крупномасштабные структуры, рассеяние также может давать вклад в общую структуру боковых сигналов. При этом, согласно расчётам, за счёт рассеяния боковые сигналы от Хабаровска и Иркутска могут приниматься, но в эксперименте такие сигналы не наблюдаются. В данном случае это аргумент не в пользу рассеяния как основного механизма распространения боковых сигналов.

ВЫВОДЫ

Основные результаты работы состоят в следующем.

По результатам работы ионозонда-радиопеленгатора с линейной модуляцией частоты выходного сигнала на трассе Магадан—Ростов-на-Дону обнаружены аномальные (боковые) сигналы, регистрируемые на частотах порядка $8 \div 14$ МГц с азимутами углов прихода $10^\circ \div 20^\circ$. Азимут угла прихода прямого сигнала, распространяющегося по дуге большого круга между Магаданом и Ростовом-на-Дону, составляет $33,3^\circ$. Боковые сигналы наблюдались только на трассе Магадан—Ростов-на-Дону в утренние и дополуденные часы (08:00–10:40 MSK). Амплитуды прямых и боковых сигналов были одного порядка величины. В вечерние и ночные часы боковые сигналы не наблюдались. На трассах Хабаровск—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону боковые сигналы не наблюдались.

Во время магнитной активности амплитуда боковых сигналов была на $5 \div 10$ дБ больше амплитуды боковых сигналов до начала магнитной бури.

До начала магнитной бури задержка бокового сигнала относительно прямого сигнала составляла величину порядка 2 мс, во время магнитной бури она равнялась $1,1 \div 1,3$ мс, т. е. во время бури возмущённая область смещалась в южном направлении.

Определено местоположение в ионосфере области возмущения, ответственной за появление боковых сигналов: $\varphi_{\text{геогр}} \approx 69^\circ \div 71^\circ$ с. ш. ($\varphi_{\text{магн}} \approx 65^\circ \div 66^\circ$ с. ш.), $\lambda \approx 51^\circ \div 58^\circ$ в. д., что совпадает с положением северной стенки главного ионосферного провала, примыкающей к экваториальной границе диффузных высыпаний электронов, т. е. авроральному овалу.

Рассмотрены механизмы распространения боковых сигналов, связанные с рефракцией и рассеянием радиоволн. Более предпочтительным представляется объяснение распространения аномальных сигналов за счёт боковой рефракции радиоволн на пэтчах с повышенной электронной концентрацией, возникающих в ионосфере в период высыпания заряженных частиц. Вместе с тем рассеяние вперёд на ионосферных неоднородностях с пространственными размерами больше зоны Френеля (так называемое рефракционное рассеяние [23]), в сочетании с рефракцией на крупномасштабном возмущении электронной концентрации, может играть определённую роль в формировании боковых сигналов, наблюдаемых на высокоширотных радиоперелиях. В дальнейшем мы планируем выполнить моделирование распространения радиоволн в трёхмерно-неоднородной

магнитоактивной ионосфере с учётом возмущений электронной концентрации с различными пространственными масштабами.

Авторы благодарят В. И. Куркина, И. Н. Поддельского и З. Ф. Думбрава за помощь в организации работы передающих пунктов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00177-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 192 с.
2. Rogers N. C., Warrington E. M., Jones T. B. // IEE Proc. Microwaves Anten. Propagat. 1997. V. 144. P. 91.
3. Урядов В. П., Куркин В. И., Вертоградов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 12. С. 1041.
4. Патент № 2413363 РФ. Способ управления распространением коротких радиоволн в ионосферном волноводе / Урядов В. П. Оpubл. 27.02.2011.
5. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176.
6. Урядов В. П., Понятов А. А., Розанов С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 3. С. 255.
7. Stocker A. J., Warrington E. M., Jones T. B. // Radio Sci. 2003. V. 38, No. 3. doi: 1029/2002RS002781.
8. Moffett R. J., Quegan S. // J. Atm. Terr. Phys. 1983. V. 45, No. 5. P. 315.
9. Карпачев А. Т. // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43, № 2. С. 256.
10. Благовещенский Д. В., Жеребцов Г. А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.
11. Патент № 399062 РФ. Ионосферный зонд-радиопеленгатор / Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Кубатко С. В. Оpubл. 10.09.2010.
12. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. // Труды XIII Междунар. научн.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2007, Воронеж, 17–19 апреля 2007 г. Т. 2. С. 1203.
13. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.
14. <http://www.sgo.fi>.
15. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
16. <http://sec.noaa.gov>.
17. Успенский М. В., Старков Г. В. Полярные сияния и рассеяние радиоволн. Л.: Наука, 1987. 240 с.
18. Бенькова Н. П., Козлов Е. Ф., Можаяев А. М. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20, № 5. С. 817.
19. Tsunoda R. T. // Rev. Geophys. 1988. V. 26, No. 4. P. 719.
20. Moller H. G. // J. Atm. Terr. Phys. 1974. V. 36. P. 1487.
21. Leitinger R., Hartmann G. K., Degenhardt W., et al. // J. Atm. Terr. Phys. 1982. V. 44. P. 369.
22. Gussenhoven M. S., Hardy D. A., Heinemann N. J. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 5692.
23. Booker H. G. // J. Atm. Terr. Phys. 1981. V. 43, No. 11. P. 1215.

Поступила в редакцию 16 марта 2012 г.; принята в печать 27 апреля 2012 г.

INFLUENCE OF INHOMOGENEOUS STRUCTURE OF HIGH-LATITUDE IONOSPHERE ON THE LONG-DISTANCE PROPAGATION OF SHORT RADIO WAVES

V. P. Uryadov, G. G. Vertogradov, and E. G. Vertogradova

We present the results of experimental studies of the features of long-distance propagation of short radio waves on the large-extent subauroral Magadan—Rostov-Don and mid-latitude Khabarovsk—Rostov-Don and Irkutsk—Rostov-on-Don paths, which were obtained with help of ionosonde radio-direction finder with linear frequency modulation of output signal. Abnormal (lateral) signals with delays of the order of 1–2 ms with respect to direct signal, which arrive from the azimuths 10° – 20° , are observed on the Magadan—Rostov-Don path. Lateral signals were observed in the morning and forenoon hours in the time interval 08:00–10:40 MSK. In the evening and night hours, lateral signals were not observed. During magnetic activity, the amplitude of the lateral signals was by 5–10 dB greater than that observed prior to magnetic storm. Location of the ionospheric-disturbance regions responsible for the appearance of the lateral signals: $\varphi_{geog} \approx 69^{\circ} \div 71^{\circ}$ N ($\varphi_{magn} \approx 65^{\circ} \div 66^{\circ}$ N), $\lambda \approx 51^{\circ}$ – 58° E was determined. The mechanisms of lateral-signal propagation due to lateral refraction of radio waves on patches with increased electronic density and due to their scattering from the small-scale irregularities are considered.