

**Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт
Государственного комитета РФ по высшему образованию**

П р е п р и н т № 373

**УПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНИМ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ КВ
ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ
МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ**

**Л.М.Брухимов
В.А.Иванов
Н.А.Митяков
Н.В.Рябова
В.П.Урядов
В.В.Шумаев**

Нижегород, 1993

Б р у х и м о в Л. М., И в а н о в В. А.,*
М и т я к о в Н. А., Р я б о в а Н. В.,*
У р я д о в В. П., Ш у м а е в В. В. *

УПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНИМ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ КВ ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ
ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ//Препринт № 373. - Н и ж н и й
Новгород: НИРФИ, 1993. - 12 с.

УДК 550.388.2; 621.371.25

Экспериментально исследованы условия захвата радиоволн в ионосферный волноводный канал из-за рефракции на градиенте электронной концентрации, а также вывода на Землю волноводных мод за счет ракурсного рассеяния на искусственных ионосферных неоднородностях. Определены геофизические условия для наиболее эффективного управления выводом радиоволн из волновода и частотно-временные характеристики спускаемой моды. Показано, что захват в волновод происходит, когда $\text{grad } f_0$ (f_0 - плазменная частота) становится меньше $-(2) \cdot 10^{-2}$ (МГц/100 км), а вывод из него эффективен, когда планетарный индекс $K_p \sim 1-2$ и отсутствуют отрицательные ионосферные возмущения. МНЧ волноводной моды выше МНЧ скачковых мод, а ее протяженность по частоте составляет 2-3 МГц.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
В В Е Д Е Н И Е.....	3
1. ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ТЕХНИКА ЗОНДИРОВАНИЯ.....	4
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	5
3. ОБСУЖДЕНИЕ.....	9
В Ы В О Д Ы.....	II
Л И Т Е Р А Т У Р А.....	II

*Сотрудники Марийского политехнического института

В В Е Д Е Н И Е

Известно /1/, что в волноводе Земля - ионосфера существует приподнятые каналы, распространение в которых на трассах большой протяженности характеризуется рядом преимуществ по сравнению с скачковым механизмом распространения, таких как малые потери на поглощение, распространение на частотах в 1,5-2 раза превышающих МНЧ скачкового механизма. Существуют, однако, проблемы /2/ захвата радиоволн в ионосферный волноводный канал (ИВК) и вывода из него энергии на поверхность Земли. Для невозмущенной ионосферы наиболее эффективным механизмом захвата (вывода) считается рефракция на горизонтальных градиентах электронной концентрации. Другие механизмы связаны с рассеянием радиоволн на неоднородностях электронной концентрации/3/.Создание в ионосфере под действием мощного радиоизлучения искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) открывает возможности управления волноводным распространением КВ.

Впервые вывод радиоволн из ИВК за счет ракурсного рассеяния радиоволн на ИИН экспериментально был обнаружен авторами /4/ при работе на ряде фиксированных частот. Однако редкая сетка частот, невозможность разделения мод распространения не позволили провести детальные исследования этого явления.

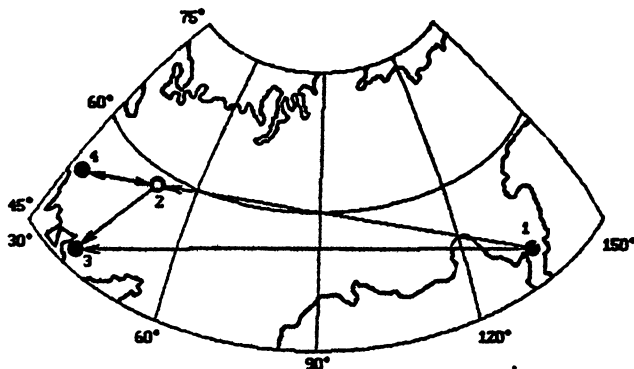
ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение условий захвата КВ и ИВК за счет градиента электронной концентрации вдоль трассы распространения и определение влияния геомагнитной и ионосферной возмущенности на эффективность

вывода энергии из канала путем ракурсного рассеяния на ИИИ, а также исследование частотно-временных характеристик волноводных мод.

1. ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ТЕХНИКА ЗОНДИРОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи нами был использован ЛЧМ ионосонд /5/, обладающий высокой помехозащищенностью, высоким разрешением по времени и частоте, а также сеть станций НЗ ионосферы и, созданная /5, 6/ на его основе.



Р и с. I

Схема эксперимента по выводу радиоволн из ионосферного волновода за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением.

I - Хабаровск, 2 - "Сура", 3 - Тамрик, 4 - Димёр

Геометрия эксперимента представлена на рис. I. Зондирование ионосферы осуществлялось из Хабаровска в диапазоне частот 6–28,4 МГц. Скорость изменения частоты составляла 350 кГц/с. Для передачи использовалась антенна типа РГ 65/4-I ($\lambda_0 = 19$ м). Мощность сигнала на входе антенны составляла 0,5 кВт. Наблюдения проводились с 18 по 23 марта 1991 г. с 22.00 до 06.00 мск., когда на трассе для данного сезона (равноденствие) существовал максимальный отрицательный градиент электронной концентрации, обеспечивающий захват ра -

диоволн в ИВК.

Для вывода радиоволн из ИВК был использован эффект ракурсно-го рассеяния радиоволн на ИИН, возбуждение которых осуществлялось мощным КВ радиоизлучением стенда "Сура", расположенным в Василь - сурске Нижегородской области на расстоянии 5,8 Мм от Хабаровска.

Передатчик стенда работал с эффективной мощностью РС ~ 100 МВт и излучал вертикально вверх волны обыкновенной поляризации на частоте волны накачки (f_H), которая выбиралась вблизи критическ о й частоты слоя Г2 ($f_H < f_{oF2}$). Воздействие на ионосферу осуществлялось циклами: 5 минут - нагрев, 5 минут - пауза.

Приемный пункт в Темрике был расположен к югу от трассы Ха - баровск - "Сура" на расстоянии ~ 1,3 Мм от нагревного стенда (угол рассеяния $\theta_s \sim 30^\circ$). Прием ЛЧМ сигналов производился на ант е н ну РГ 65/4-I ($\lambda_o = 19$ м), ориентированную на область возмущ е н и я (ОВ).

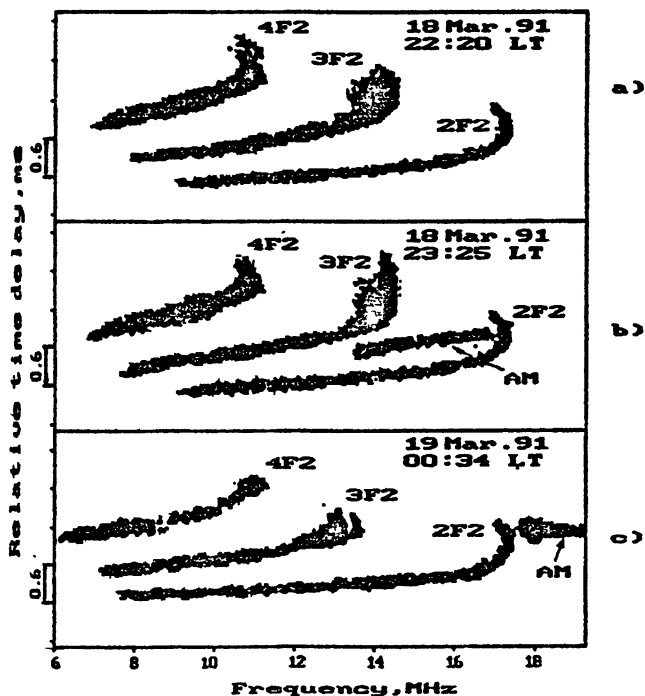
Ионосферная обстановка контролировалась с помощью стан ц и й ВЗ в пунктах излучения и "нагрева", а геомагнитная - магнетомет - ром в пункте излучения.

Для контроля эффективности возбуждения ИИН использов а л с я КВ локатор, расположенный на расстоянии 1,2 Мм от нагревного стен - да в направлении трассы Хабаровск - "Сура" в п.Дымер, Киевс к о й обл. /7/. Передатчик локатора мощностью 25 кВт работал в импульс - ном режиме на ряде фиксированных частот из диапазона 16,6 - 19,9 МГц на антенну РГ 65/4-I ($\lambda_o = 18$ м), ориентированную на ОВ. При - ем обратнорассеянных от ИИН КВ сигналов осуществлялся на фазиро - ванную антенную решетку.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В приемном пункте Темрик на ионограммах ВЗ во время "наг - рева" ионосферы наблюдались дополнительные моды ($2F2$). Характе - рные примеры ионограмм на трассе Хабаровск - Темрик приведены н а рис.2 а, в , с. Ионограмма на рис.2а получена во время паузы, а ионограммы на рис.2б и с - в период работы возмущающего передат - чика. Из рисунков видно, что дополнительные моды наблюдались как на частотах меньше $2F2$ МНЧ (рис.2б), так и на частотах выше $2F2$ МНЧ (рис.2в) прямого сигнала. Малые времена развития моды $2F2_s$ ($t_H < 1^m$) указывают на ее связь с возбуждением искусственн ы х

мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностей с поперечными размерами $l_{\perp} = \lambda / 2 \sin \theta_s / 2$ (для $\lambda = 15$ м и $\theta_s \sim 30^\circ$, $l_{\perp} \sim 30$ м), ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн.



Р и с.2

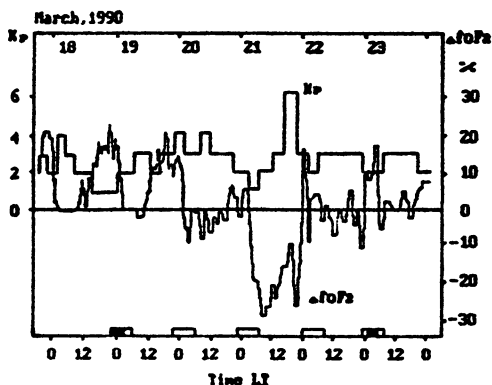
Примеры ионограмм на трассе Кабаровск - Темрюк.

а - во время паузы;

б и с - в период работы нагревного средства

Рис.3 характеризует ионосферно-геомагнитную обстановку в период проведения экспериментов. Уровень геомагнитной активности характеризуется Кр - индексом, а ионосферные возмущения величиной $\Delta f_{oF2} = \frac{f_{oF2} - \langle f_{oF2} \rangle}{\langle f_{oF2} \rangle} \cdot 100\%$. Прямоугольниками на времен-

ной оси отмечены интервалы наблюдений. Штриховкой указаны промежутки времени, на которых наблюдались рекурсивные моды (РМ), коррелировавшие с периодами работы стенда "Сура". Можно заметить, что РМ наблюдались лишь в периоды низкой геомагнитной активности ($K_p \sim 1-2$). Отсутствие эффекта 2I марта, когда $K_p \sim 1-2$, по-видимому, связано с отрицательным ионосферным возмущением на трассе.



Р и с. 3

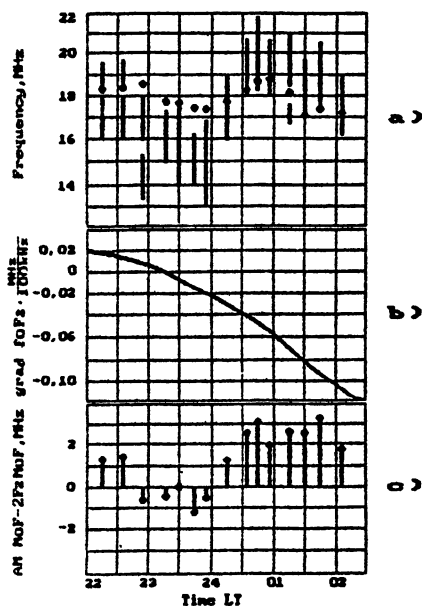
Магнитная и ионосферная обстановка в период проведения эксперимента. Внизу отмечены интервалы наблюдений; заштрихованы временные промежутки появления рекурсивной моды

На зависимость эффективности возбуждения ИИН от уровня геомагнитной и ионосферной возмущенности указывают результаты зондирования области возмущения с помощью КВ локатора. Согласно полученным данным, обратное рассеяние КВ от ИИН наблюдалось в период с 22 час. 13 мин. 18 марта до 00 час. 20 мин. 19 марта на частотах $f \sim 18...20$ МГц. При этом поперечник сечения обратного рассеяния достигал максимального значения $\sigma = 8 \cdot 10^7 \text{ м}^2$ 18 марта в 23 час. 30 мин. Обратное рассеяние КВ от области возмущения не наблюдалось как в периоды повышенной геомагнитной активности, когда $K_p \sim 3-4$, так и при отрицательном ионосферном возмущении.

Полученные данные позволили исследовать динамику РМ сигнала, обусловленной работой стенда "Сура". На рис. 4а в качестве примера представлены результаты экспериментов, проведенных 18 и 19 марта. Точками здесь обозначены МЧ моды 2F2, а вертикальными линиями - диапазоны частот, занимаемых РМ на последней минуте нагревного воздействия на ионосферу.

Для интерпретации представленных данных на рис. 4б приведен суточный ход градиента критической частоты со стороны передатчи -

на, усредненный вдоль трассы по пространственным масштабам 0-2 Мм и 2-4 Мм. Как видно из рис.4а и б, в тех случаях, когда $\text{grad } f_{\text{оF2}} > (2) \cdot 10^{-2}$ (МГц/100 км), РМ наблюдается на частотах меньших МНЧ 2F2. При обратном неравенстве она наблюдается, в основном, на частотах больших чем МНЧ 2F2.



Р и с. 4

а) Временные вариации 2F2 МПЧ трассы Хабаровск - Темрик (точки) и диапазона частот РМ (вертикальные линии) (а), $\text{grad } f_{\text{оF2}}$ вдоль трассы Хабаровск - "Сура" (б), разности РМ МПЧ - 2F2 МПЧ (с) для периода наблюдений 18-19 марта 1991 года

Рис. 4с иллюстрирует возможность управления РМ путем модификации ионосферы мощным радиоизлучением станда "Сура" для случая значительного градиента электронной концентрации на стороне передатчика. По вертикальной оси здесь отложена разность между МНЧ ракурсной моды и МНЧ скачковой моды. Следует отметить, что РМ при этом занимает диапазон частот $\Delta f \sim 2-3$ МГц.

Эксперименты показали, что после 03 час. мск. РМ практически не наблюдалась. Это, вероятно, связано как с уменьшением эффективности нагрева ионосферной плазмы, так и с изменением ракурсных условий рассеяния для данной геометрии эксперимента.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа экспериментальных данных использовалось математическое моделирование распространения КВ с учетом ракурсного рассеяния радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях X F-области ионосферы. Выполнялись как траекторные расчеты, так и синтез ионограмм для радиоволн, распространяющихся по дуге большого круга между излучателем и областью возмущения. Синтез ионограммы ракурсной моды проводился на основе расчета системы лучевых траекторий по методике, изложенной в /8/. В расчетах использовалась модель ионосферы, где $N(h)$ -профиль задавался в виде суммы чепменовских слоев, а область, ответственная за рассеяние - в виде диска, положение которого по высоте могло меняться в пределах ионосферного слоя. Параметры $N(h)$ -профиля брались из данных долгосрочного ионосферного прогноза.

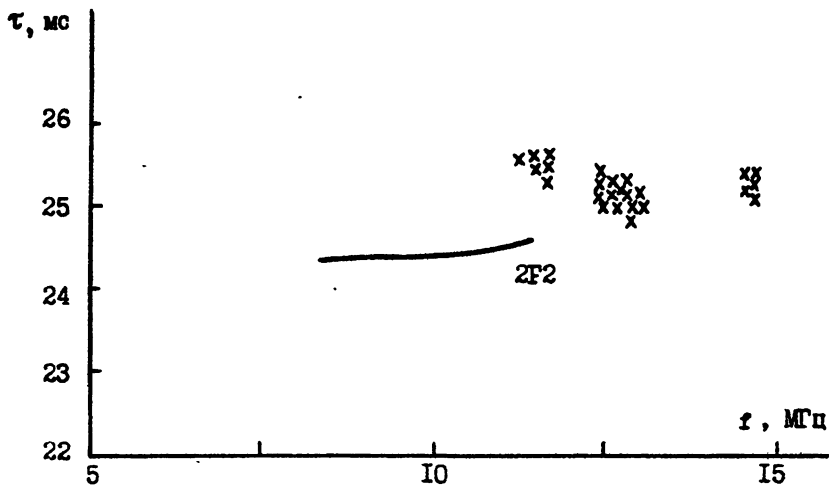
Моделирование распространения КВ на трассе Хабаровск - "Сура" показало, что условия ракурсного рассеяния могут реализоваться как для скачковых, так и для волноводных мод распространения. Если отрицательный градиент электронной концентрации, обусловленный терминатором, недостаточен, то в пункте приема будет регистрироваться ракурсный сигнал скачковой моды распространения на частотах меньших МНЧ 2F2. С увеличением градиента происходит захват радиоволн в ИВК в широком диапазоне углов излучения сигнала.

На рис.5 приведена синтезированная ионограмма ИЗ ионосферы. Сплошная линия соответствует скачковой моде 2F2 прямого сигнала для трассы Хабаровск - Темрюк, крестиками обозначена РМ для трассы Хабаровск - "Сура" - Темрюк. Траектории ракурсной моды на участке Хабаровск - "Сура" для частоты $f = 14,6$ МГц показаны на рис.5б. Здесь же показан ход критической частоты f_{cr2} и высоты максимума слоя h_m ионосферы вдоль трассы. Из рис.5 видно, что на частотах выше МНЧ 2F2 происходит ракурсное рассеяние волноводных мод распространения.

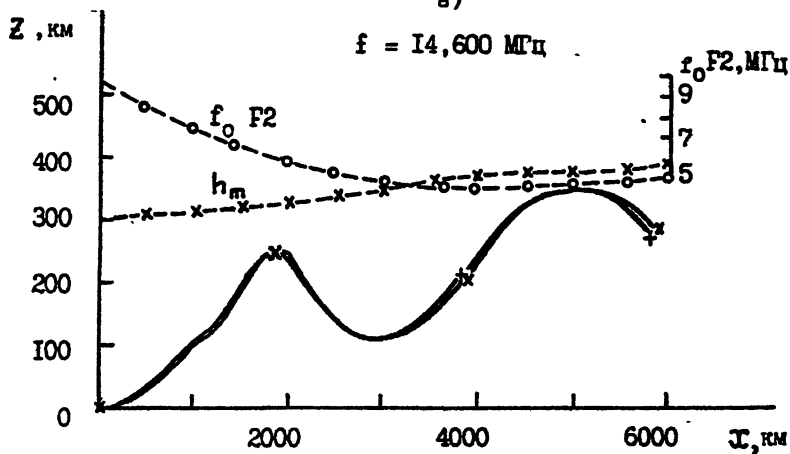
Таким образом, экспериментальные данные, представленные на рис.4, характеризуют величину градиента плазменной частоты $grad f_p \sim -(2-4) \cdot 10^{-2}$ (МГц/100 км), при котором начинается эффективный захват радиоволн в ИВК.

Условия вывода КВ из ИВК зависят от геофизических условий, определяющих эффективность возбуждения искусственных неоднородностей

Хабаровск - "Сура" - Темрик



а)



б)

Р и с.5

Синтезированная ионограмма на трассе Хабаровск - Темрик с учетом ракурсного рассеяния и лучевые траектории на трассе Хабаровск - "Сура". Март 1991 г., ОЛ^h ИТ

ностей. Согласно полученным данным, вывод радиоволн наиболее вероятен, когда $K_r \sim 1-2$ и отсутствуют отрицательные ионосферные возмущения. В этих случаях возможно управление волноводным распространением КВ за счет модификации ионосферы. Волноводная мода при этом занимает диапазон частот $\Delta f \sim 2-3$ МГц.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что захват КВ в ИВК из-за рефракции на отрицательном горизонтальном градиенте электронной концентрации происходит при условии, когда $\text{grad } f_o$ становится меньше $-(2) \cdot 10^{-2}$ (МГц/100 км);
2. Исследована возможность управления волноводным распространением КВ за счет ракурсного рассеяния на ИИИ. Определено влияние геомагнитной и ионосферной возмущенности на эффективность вывода КВ из ИВК. Показано, что вывод КВ из ИВК эффективен, когда $K_r \sim 1-2$ и отсутствуют отрицательные ионосферные возмущения;
3. Экспериментально определен диапазон частот выводимой волноводной моды распространения, составляющий $\Delta f \sim 2-3$ МГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта 93-02-15893.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич А.В., Цедильна Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. - М.: Наука, 1979. - 249 с.
2. Кравцов Ю.А., Тинин М.В., Черкашин Д.Н.//Геомагнетизм и аэрономия. - 1979. - Т.19, № 15. - С.769.
3. Ерухимов Л.М., Митягин С.Н., Урядов В.П.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1975. - Т.18, № 9. - С.1297.
4. Гетманцев Г.Г., Ерухимов Л.М., Митяков Н.А. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1976. - Т.19, № 12. - С.1909.
5. Иванов В.А., Малышев Д.Б., Ного Д.В. и др.//Радиотехника и электроника. - 1991. - № 4. - С.69.

6. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В. и др. Автоматизированный ЛЧМ комплекс в сети станций наклонного зондирования. Результаты диагностики естественной и модифицированной ионосферы//Препринт № 323. - Нижний Новгород: НИРФИ, 1991. - 56 с.
7. Богута А.М., Иванов В.А., Кульчицкий В.А. и др. Радиofизический приемно-передающий комплекс "Дымер" для исследования ионосферы и распространения радиоволн//Препринт № 306. - Горький: НИРФИ, 1990. - 58 с.
8. Бочкарев Г.С., Урядов В.П., Эрм Р.Э. - В кн.: Распространение радиоволн в ионосфере. - М.: ИЗМИРАН, 1989. - С.43.

Дата поступления статьи
18 октября 1993 г.

Подписано в печать 14.10.93 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,73 усл.п.л.
Заказ 5346. Тираж 100.

Отпечатано на ротационной машине НИРФИ