

Государственный комитет РСФСР по делам науки и высшей школы

Ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиотехнический институт (Н И Р Ф И)

П р е п р и н т N 323

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛЧМ КОМПЛЕКС В СЕТИ СТАНЦИЙ НАКЛОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ ЕСТЕСТВЕННОЙ И  
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИОНОСФЕРЫ

В. А. Иванов  
Н. В. Рябова  
И. В. Рябов  
В. П. Урядов  
В. В. Шумяев

Видный Новгород 1991

Иванов В.А.", Рябова Н.В., Рябов И.В.,  
Урядов В.П., Шумаев В.В."

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛЧМ КОМПЛЕКС В СЕТИ СТАНЦИЙ НАКЛОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ И МОДИФИЦИ-  
РОВАННОЙ ИОНОСФЕРЫ // Препринт N 323 - Н.Новгород: НИРФИ, -  
1991. - 56 с.

УДК 550.388.2, 621.371.25

Описана внутрисюзовая сеть станций наклонного зондирования ионосферы и приведены основные параметры сетевого ионозонда с ЛЧМ-сигналом. Представлены результаты пространственно-временной корреляции МНЧ и ННЧ для трасс различной протяженности и ориентации, результаты краткосрочного прогнозирования и экстраполяции значений МНЧ и ННЧ на соседние трассы. Исследованы вариации МНЧ и ННЧ для трассы протяженностью ~ 4 Мм в период солнечного затмения 22 июля 1990 г. Получены ДЧХ кругосветного сигнала (КС) для трассы ориентированной близко к терминатору. Предложена методика определения механизма распространения ЭС по ДЧХ.

Выполнены эксперименты по оценке ВЧ нагрева ионосферной плазмы на дальнейшее распространение КВ. Показано влияние на ДЧХ рассеяния "вперед" и ракурсного рассеяния радиоволн на искусственных неоднородностях (ИИН). Экспериментально показана возможность управления дальним распространением КВ на частотах выше МНЧ скачкового механизма путем вывода волноводных мод на поверхность Земли за счет ракурсного рассеяния на ИИН. Определены частотные характеристики ракурсной моды сигнала. Развита метод численного моделирования на ЭВМ ионограмм ВЗ в горизонтально-неоднородной ионосфере с учетом ракурсного рассеяния радиоволн. Кратко описаны результаты использования ЛЧМ ионозонда в адаптивной среднеширотной КВ радиодлинии протяженностью 3 Мм, а также ВЕЗ среднеширотной ионосферы. Рассмотрена возможность создания фазового и адаптивного ионозонда с применением широкополосных сигналов и комбинированных методов модуляции.

---

" Сотрудники Марийского политехнического института

## В В Е Д Е Н И Е

В последние годы в СССР [1-3] и за рубежом [4,5] интенсивно развивается направление ионосферных исследований, связанное с разработкой и созданием новой диагностической техники универсального назначения, оснащенной современными вычислительными средствами. К их числу относится разработанный совместно МарПИ и НИРФИ ионозонд с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом [2]. Высокий энергетический потенциал при низкой мощности излучения зондирующего сигнала, достигаемый за счет корреляционной обработки сигнала, высокая разрешающая способность по времени группового запаздывания и частоте, малые габариты, вес и энергопотребление открыли широкие возможности для использования ЛЧМ ионозонда в решении научных и прикладных задач ионосферного распространения коротких радиоволн.

Развитие микропроцессорной техники делает возможным дальнейшую модификацию диагностирующей аппаратуры и создание адаптивного и фазового ЛЧМ ионозонда, предназначенных для проведения комплексных радиофизических исследований на более высоком технологическом уровне.

В 1986-1990 г.г. совместными усилиями НИРФИ и МарПИ была организована сеть станций наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы, покрывающая всю территорию страны. В настоящее время на данной сети станций проводятся исследования по ЕЗ, НЗ и ВЕЗ естественной и модифицированной ионосферы, целью которых являются: изучение пространственно-временных корреляционных связей параметров ионосферного КВ радиоканала, решение обратных задач дистанционного зондирования ионосферы на основе многопозиционного приема сигналов ЕЗ и ВЕЗ, исследование аномальных мод и определение возможности управления дальним распространением КВ путем вывода радиоволн из ионосферного волноводного канала за счет модификации ионосферы мощным наземным радиоизлучением.

В настоящей работе представлены результаты исследования по указанным направлениям, полученные с помощью созданной сети станций ЛЧМ зондирования ионосферы. Рассмотрены возможности дальнейшей модификации ЛЧМ ионозонда.

## 1. СЕТЕВОЙ ЛЧМ-ИОНОЗОНД И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

### 1.1. Автоматизированный ЛЧМ-ионозонд для ИЗ, НЗ и ВНЗ ионосферы. Адаптация к условиям распространения.

Сетевой ионозонд разработан МарПИ совместно с НИРФИ. Блок-схема основных узлов ионозонда для ИЗ и ВНЗ ионосферы представлена на рис. 1.1, а его основные технические характеристики приведены в таблице. Передающая часть ионозонда состоит из эталона частоты и времени - 1, управляющей персональной электронной вычислительной машины (ПЭВМ) 2, которая может быть заменена микропроцессорным блоком управления (МБУ), монитора - 3, усилителя мощности - 4, цифросаналогового синтезатора (ЦАС) ЛЧМ-сигнала - 5, контроллера - 6, накопителя на магнитном диске - 7.

Приемная часть ионозонда включает: эталон частоты и времени - 8, управляющую и обрабатывающую ПЭВМ - 9, монитор - 10, антенный коммутатор - 11, модернизированный радиоприемник "Катран" (РПУ) - 12, ЦАС - 13, контроллер - 14, анализатор спектра типа СКА-72/2 (или БКУ) - 15, принтер - 16.

Как видно из рисунка, ЛЧМ-ионозонд построен в основном из серийных промышленных изделий, поэтому легко тиражируется.

ПЭВМ передающего пункта выполняют роль управления. Аналогичная функция, возложена на ПЭВМ приемного пункта. Работа ПЭВМ ионозонда обеспечивается пакетом соответствующих программ, который постоянно совершенствуется.

При включении питания, ПЭВМ автоматически загружает и начинает выполнять программу обслуживания (драйвер) ионозонда, которая содержится в файле автозапуска (обобщенная структура драйвера ЛЧМ-ионозонда приведена на рис. 1.2.). Затем ПЭВМ предлагает меню и позволяет оператору выбрать один из пяти режимов работы: ручное управление, редактирование программы эксперимента, автоматическое управление, тестирование системы, конец работы.

В режиме ручного управления оператору предоставляется

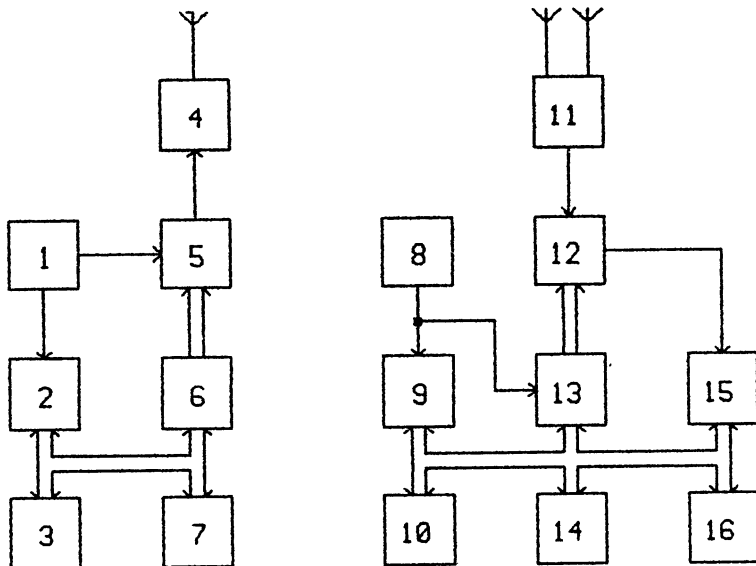


Рис. I. I

Таблица

: N п/п :	Параметр	:	Величина	:
: 1. :	Диапазон частот, $\Delta f$	:	1 - 30 МГц	:
: 2. :	Скорость изменения частоты, $\dot{f}$	:	0,01 - 1 МГц/с	:
: 3. :	Полоса пропускания, $\Delta F$	:	0,3; 1; 3 кГц	:
: 4. :	Мощность излучения сигнала	:	10 - 500 Вт	:
: 5. :	Регистрация и отображение	:	НМД, принтер, видео-монитор.	:
: 6. :	Программное обеспечение	:	Пакет прикладных программ, включающий алгоритмы по очистке ионограмм от помех, построения ДЧХ, АЧХ, алгоритмы прогнозирования.	:

возможность оперативного управления ионограммой с клавиатуры компьютера. При этом на экране монитора в удобной для восприятия форме отображается структура установки, состояние всех входящих в нее устройств. Оператор устанавливает дату, текущее время с точностью до 1 секунды, признаки включения/выключения питания всех устройств ионограммы, параметры режима зондирования и ЛЧМ-сигнала.

На рис. 1.3 показана временная структура одного цикла устанавливаемого режима зондирования. Оператор с клавиатуры ПЭВМ вводит следующие параметры режима зондирования: длительность ( $T_{ц}$ ) цикла зондирования в одном часе, который определяется началом цикла (НЦ) и концом цикла (КЦ), начало работы в цикле (НРЦ), длительность периода ( $T_c$ ) режима синхронизации, длительность периода ( $T_i$ ) режима снятия ионограмм. Оператором с клавиатуры также задаются параметры зондирующего ЛЧМ-сигнала в режимах синхронизации и снятия ионограмм: начальная частота, скорость изменения частоты, длительность ( $T_{ис}$ ) импульса синхронизации, продолжительность ( $T_{ии}$ ) снятия ионограмм.

В режиме автоматического управления процесс зондирования выполняется ПЭВМ в соответствии с заданной программой. При выходе на данный режим компьютер запрашивает у оператора имя файла, в котором находится программа зондирования и загружает ее в ОЗУ. Программа зондирования представляет собой последовательность командных строк, каждая из которых однозначно определяет режим зондирования для ионограммы на определенном интервале времени. За одну минуту до наступления момента времени, указанного в первой командной строке программы, ПЭВМ включает питание всех устройств и производит их тестирование. К моменту наступления времени, указанного в командной строке, ПЭВМ устанавливает параметры режима зондирования и параметры ЛЧМ-сигнала в соответствии с командной строкой, включает синтезатор ЛЧМ и высокое напряжение на передатчике.

ПЭВМ приемного пункта совместима с IBM PC/XT-AT и, поэтому кроме рассмотренных функций она выполняет формирование и отображение ионограмм, их автоматизированную обработку с целью получения параметров КВ-радиоканала (многолучевость, уровень сигнал/помеха, скорость измерения групповой задержки от частоты).



Рис. I.2

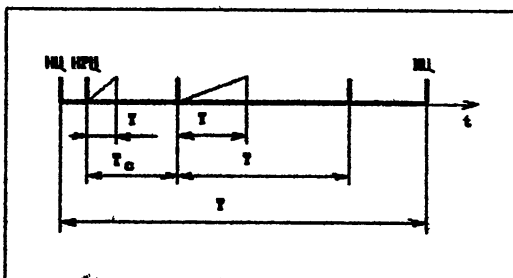


Рис. I.3

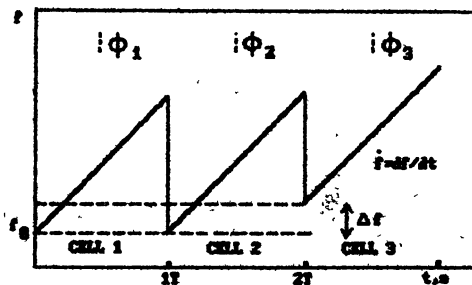


Рис. I.4

ты, разность межмодовых задержек, диффузность и др.) В режиме формирования ионограмм ПЭВМ работает по алгоритму, описанному в [6]. В этом случае в ПЭВМ вводятся данные с анализатора спектра, которые подвергаются очистке от помех методом осреднения спектров. При этом среднее находится по пяти соседним спектрам. Такая процедура позволяет при дальнейшей очистке в 5 раз уменьшить объем оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) ПЭВМ и разместить трехмерное изображение ионограмм в 64 кБайтах памяти. Далее применяется кросскорреляционный анализ спектрограмм, построение дискретных треков, которое заканчивается процедурой сглаживания и формирования обработанной ионограммы. После этого ПЭВМ автоматически определяет ионосферные параметры. Ионограмма и результаты обработки отображаются на экране дисплея ПЭВМ и регистрируются с помощью принтера на бумажном носителе и магнитном накопителе.

Программа прогнозирования позволяет накапливать временные ряды ионосферных параметров (параметров КВ-канала) и осуществлять их краткосрочное прогнозирование [6].

В режиме ВЗ ионосферы автоматизированный ЛЧМ-ионозонд может работать в двухпозиционном режиме, когда приемная и передающая части разнесены на расстояние не менее 2...3 км. (алгоритм работы ионозонда в этом случае соответствует описанному выше) или в однопозиционном режиме (с одной приемно-передающей антенной).

В однопозиционном режиме ВЗ ионосферы во избежание перегрузки приемника антенна поочередно подключается к выходу передатчика или входу приемника с помощью управляемого антенного коммутатора "прием-передача" по закону псевдо-случайной последовательности (ПСЦ), в качестве которой выбрана M-последовательность. Наименьшая длительность излучаемого импульса в M-последовательности должна быть меньше минимального времени распространения отраженного сигнала (например для  $h = 60$  км  $T = 2h/c = 0,4$  мс). Наибольшая длительность - соответствует максимальному времени распространения зондирующего сигнала ( $T = 60$  мс для  $h = 900$  км). Дальнейшее увеличение  $T$  ведет к уменьшению энергии сигналов, отраженных с малых высот. Для сохранения выигрыша при обработке ЛЧМ-сигнала необходимо, что-



бы период ПСП соответствовал времени интегрирования ( $T_{\text{э}}$ ) отраженного ЛЧМ-сигнала в корреляционном приемнике.

Для формирования ПСП используется генератор, включающий многозарядный регистр сдвига, обратная связь для которого выбиралась по известным таблицам соединений.

Обратим внимание на то, что сигнал гетеродина приемника оптимален излучаемому сигналу. Рассмотрим возможность построения адаптивного ионозонда, в котором сигнал гетеродина оптимален принимаемому сигналу.

Пусть частота принимаемого сигнала равна:

$$f_s = f_0 + \dot{f}_t + \dot{f}_{\text{trp}}(f) \quad (1.1)$$

Именно последнее слагаемое в (1.1) не учитывается при обработке сигнала в приемнике. Следовательно в адаптивном ионозонде для ВЗ ионосферы частота гетеродина должна меняться по закону:

$$f = f_0 + \dot{f}_t - \dot{f}_{\text{trp}}(f) \quad (1.2)$$

Его несложно реализовать, вводя автоматическую подстройку частоты (АПЧ) гетеродина под частоту принимаемого сигнала. При этом полоса частот разностного сигнала становится значительно ниже, а ВЧХ ионосферы может быть определена по величине сигнала ошибки петли АПЧ.

В таком ионозонде возникают проблемы при многомодовом характере отраженного сигнала. Однако способы разделения магнито-ионных компонент хорошо известны и легко реализуется технически.

При ВЗ и ВВЗ ионосферы часто встречаются задачи увеличения разрешающей способности свыше пределов, обусловленных дисперсией задержки сигнала (задача сверхразрешения). Известно [2], что при зондировании ионосферы разрешающая способность определяется полосой частот  $\Delta f_{\text{э}}$  зондирующего сигнала, на которой дисперсией задержки можно пренебречь. Расширения  $\Delta f_{\text{э}}$  ЛЧМ-сигнала можно добиться, адаптируя под закон дисперсии скорость изменения частоты сигнала. Как нетрудно показать, для  $\Delta f_{\text{э}}/f \ll 1$  ( $f$  - средняя частота сигнала) скорость изменения

частоты должна меняться по формуле:

$$\frac{df}{dt} = \dot{f} + f^2 \frac{d\tau_p}{df} \quad (1.3)$$

Для небольших диапазонов частот  $\Delta f$  величину  $df\tau_p/df$  можно считать постоянной, определять по результатам НЗ или ВВЗ ионосферы и вводить в закон изменения частоты зондирующего сигнала при следующем цикле зондирования.

## 1.2. Базовый ЛЧМ-ионозонд

Выше рассматривался ЛЧМ-ионозонд, используемый для измерения АЧХ и ДЧХ радиоканала. Покажем, что модифицируя ЛЧМ-ионозонд, можно создать условия для измерения одновременно доплеровского смещения частоты, углов прихода и др. Действительно в работе [7] было показано, что фаза  $\Phi$  спектральной компоненты разностного сигнала совпадает с набегом фазы ЛЧМ-сигнала на частоте наблюдения  $f$  в ионосфере Земли. Включив в состав приемной части ионозонда анализатор спектра на базе быстрого преобразования Фурье, получим возможность одновременно с амплитудным спектром  $S(f)$  оценивать и фазовый спектр  $\Phi(f)$ :

$$S(f) = \text{Re } S + j \text{Im } S, \quad \Phi(f) = \text{arctg} \frac{\text{Im } S}{\text{Re } S} \quad (1.4)$$

При изменении времени или частоты приращения фазы  $i$ -ой спектральной компоненты (ионосферной моды) будут практически совпадать с приращениями фазы сигнала  $\psi$  из-за изменения частотно-временных свойств ионосферы, т. е.

$$(\Phi_i)_2 - (\Phi_i)_1 = \psi_2 - \psi_1 = d\psi$$

Измеряя, например, приращение фазы  $\Phi_i$  за небольшие промежутки времени (при  $f = \text{const}$ ) получим:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \simeq \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = Fd, \quad (1.5)$$

где  $Fd$  - доплеровское смещение частоты.

Определяя приращение фазы  $\Phi_1$ , обусловленное изменением частоты наблюдения  $f_2 = f_1 + \Delta f$ , для малых  $\Delta f$  получим:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta f} \simeq \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{df} = \text{trp}. \quad (1.6)$$

Для практической реализации фазовых измерений  $Fd$  и  $\text{trp}$  необходимо усложнить структуру ЛЧМ-сигнала и использовать, например, трехэлементный сигнал, представленный на рис. 1.4.

Фазовый ЛЧМ-ионозонд может также работать в качестве измерителя углов прихода радиоволн. На рис. 1.5 представлена схема антенной системы интерференционного ЛЧМ-радиопеленгатора [8]. Здесь  $\alpha$  - угол возвышения,  $\beta$  - азимутальный угол траектории волны.

Согласно рисунку, разность фаз сигналов для антенны, расположенных на расстояниях  $L$  по базовым линиям  $OX$  и  $OY$  соответственно, равны [8]:

$$\Phi_{0x} = (2\pi L/c) f \sin\beta \cos\alpha \quad (1.7)$$

$$\Phi_{0y} = (2\pi L/c) f \cos\beta \cos\alpha$$

Отсюда:

$$\beta = \arctg \frac{\Phi_{0x}}{\Phi_{0y}}, \quad (1.8)$$

$$\cos \alpha = \frac{(\Phi_{0x}^2 + \Phi_{0y}^2)}{(2\pi L/c) f}$$

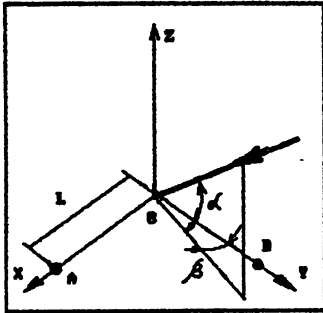


Рис. I.5

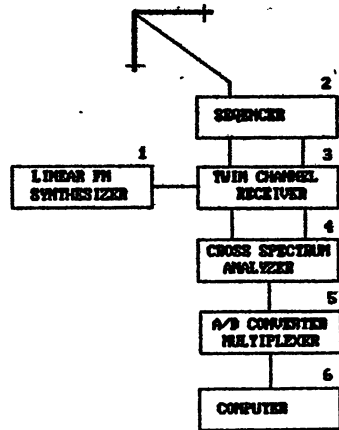


Рис. I.6

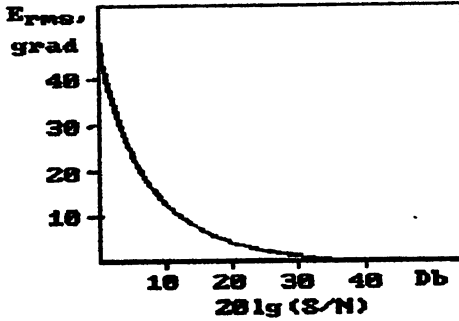


Рис. I.7

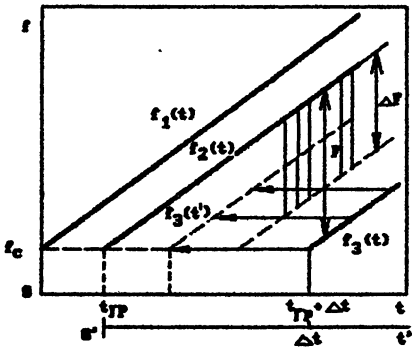


Рис. I.8

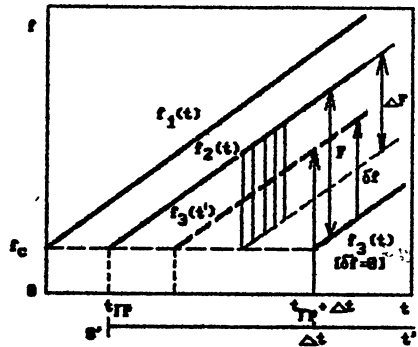


Рис. I.9

Пусть время анализа разностного сигнала составляет  $\sim T\dot{\alpha}$ . В результате этого частота зондирующего сигнала меняется на величину  $\Delta f\dot{\alpha} = \dot{f}T\dot{\alpha}$  и возникают фазовые ошибки  $\Delta\Phi_{0x}$ ,  $\Delta\Phi_{0y}$ , которые равны

$$\Delta\Phi_{0x} = (2\pi L/c) f\dot{\alpha} \sin\beta \cos\alpha \quad (1.9)$$

$$\Delta\Phi_{0y} = (2\pi L/c) f\dot{\alpha} \cos\beta \cos\alpha$$

Используя формулы (1.9), можно подобрать значения  $L$ ,  $\dot{f}$  и  $T\dot{\alpha}$  таким образом, чтобы обеспечить необходимую точность определения углов прихода. Например, для  $L = 75$  м,  $\dot{f} = 10^5$  с<sup>-2</sup>,  $T\dot{\alpha} = 0,5$  с отклонение фазы составит  $\sim 4,5^\circ$ , что считается допустимым для радиопеленгации в КВ-диапазоне.

Блок-схема ЛЧМ-пеленгатора представлена на рис.1.6. В состав его приемной части входит двухканальный приемник, подключенный к анализатору спектра функций взаимной корреляции разностного сигнала. Фаза  $i$ -ой спектральной компоненты, соответствующей моды ионосферного сигнала, будет определять искомую разность фаз  $\Phi_{0x}$  или  $\Phi_{0y}$ .

Для фазовых измерений важно учитывать уровень помех (шумов), присутствующих на выходе приемника вместе с полезным сигналом. Предположим, что  $i$ -я компонента Фурье разностного сигнала является суммой полезного сигнала  $U_c$  и помехи  $U_p$ :

$$U_i = U_c + U_p \quad , \quad (1.10)$$

где

$$U_c = S \cos(2 F_i t),$$

$$U_p = N \cos(2 F_i t + \xi) .$$

Здесь  $\xi$  - равен разности фаз между колебаниями  $U_c$  и  $U_p$ .

Тогда суммарный сигнал  $U_i$  можно представить в виде:

$$U_i = A \cos(2 F_i t + \theta_\xi),$$

где  $\theta_\xi$  - фазовая ошибка сигнала  $U_c$  при наличии шумов.

Нетрудно показать [4], что

$$A = [S^2 + N^2 + 2 S N \cos \xi]^{0.5},$$

$$\theta_{\xi} = \arctg \frac{Z \sin \xi}{1 + Z \cos \xi}, \quad (1.11)$$

где  $S/N$  - отношение сигнал/шум по напряжению для  $i$ -ой спектральной компоненты Фурье.

Известно [4], что для нормального шума величина  $\xi$  равномерно распределена в интервале  $(-\pi, \pi)$ . В этом случае для среднеквадратичной ошибки  $\langle \theta_{\xi}^2 \rangle^{0.5}$  можно получить следующую оценку:

$$\langle \theta_{\xi}^2(Z) \rangle^{0.5} = \left( \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \theta_{\xi}^2(\xi, Z) d\xi \right)^{0.5} \quad (1.12)$$

На рис. 1.7 показана зависимость  $\langle \theta_{\xi}^2 \rangle^{0.5}$  от отношения  $Z = S/N$ . Как нетрудно видеть, фазовая ошибка  $\langle \theta_{\xi}^2 \rangle^{0.5}$  достигает величины инструментальной ошибки анализатора спектра  $\sim 3^{\circ}..4^{\circ}$  при  $[S/N] > 20$  дБ. Итак, для правильной оценки разности фаз  $\Phi$  необходимо, чтобы сигнал превышал шум не менее чем в 10 раз.

**1.3. Методы синхронизации разнесенных частей ЛЧМ-ионозонда, определения абсолютного времени распространения КВ-сигнала на трассе**

При работе ЛЧМ-ионозонда в режиме ВВЗ для того чтобы избежать перегрузки приемника зондирующим сигналом, необходимо разносить передатчик и приемный пункты на несколько десятков километров. Таким образом, ВЗ и ВВЗ ионосферы ЛЧМ-ионозондом предполагает синхронную работу передающей и приемной частей ионозонда. Будем иметь ввиду, что при ВЗ и ВВЗ ионосферы за

начало отсчета времени на приемном устройстве удобно принять время прихода основной моды ионосферного сигнала. Действительно, в ряде задач для определения таких параметров трассы как МНЧ, ННЧ, многолучевости важны задержки между различными модами сигнала и нет необходимости знать абсолютное время распространения сигнала от приемника до передатчика. Процедура синхронизации важна здесь лишь для того, чтобы разностный сигнал попал в полосу пропускания приемника и его можно было затем подвергнуть необходимой обработке. Поэтому будем считать, что шкалы времени (ШВ) передающего и приемного устройств сличены, если ШВ на приемном конце имеет своим началом время прихода ионосферного сигнала, излученного в момент начала ШВ на передающем конце. В этой связи удобно говорить о сличении двух ШВ: одна на входе приемника, носителем которой является принимаемый сигнал, вторая - на его выходе. Ее носителем является сигнал гетеродина приемника. Таким образом, задача синхронизации состоит в выполнении таких действий, которые бы привели к совпадению с определенной точностью ШВ на выходе и входе приемника, а затем к поддержанию с той же точностью установленного синхронизма.

Обычно для сведения ШВ используются сигналы станций точного времени в КВ и СДВ диапазонах, телевизионные сигналы и др. Однако это требует специального оборудования, что не всегда оправдано. Поэтому авторами для этих целей используются ЛЧМ-сигналы, излучаемые передатчиком ионосонда. Такой подход обладает рядом преимуществ. Во-первых, значительно (на несколько порядков) увеличивается энергия, переносимая синхросигналом, что позволяет осуществить сведение ШВ приемной и передающей частей ионосонда при их значительном удалении. Во-вторых, использование частотной модуляции сигнала в сочетании с оптимальной обработкой его в приемнике обеспечивает высокую помехозащищенность режима синхронизации и увеличивает точность сведения ШВ. В-третьих, исключается зависимость от функционирования внешних источников синхронизации. В-четвертых, отпадает необходимость в специальной аппаратуре для сличения ШВ по сигналам станций точного времени.

Рассмотрим два метода синхронизации разнесенных частей

ионовонда с помощью ЛЧМ-сигналов, разработанных авторами. Первый метод мы назвали "временным", а второй - "частотным".

В первом методе излучается непрерывный ЛЧМ-сигнал, частота которого с периодом  $1с$  возвращается к начальной. Итак, частота синхросигнала можно представить следующим выражением:

$$f_1 = f_0 + \dot{f} t \quad , \quad (1.13)$$

где  $f_1$  - периодическая функция с периодом  $T_1 = 1с$ .  
На входе приемника частота сигнала будет иметь вид:

$$f_2 = f_0 + \dot{f}(t + t_{гр}) \quad . \quad (1.14)$$

Гетеродин приемника из-за смещения ШВ формирует сигнал с частотой:

$$f_3 = f_0 + \dot{f} t' \quad . \quad (1.15)$$

Таким образом, частота разностного сигнала будет равна (см. рис. 1.8):

$$F = f_3 - f_2 = \dot{f} \Delta t \quad , \quad (1.16)$$

где  $\Delta t = t' - (t + t_{гр})$  - величина рассогласования ШВ.  
Итак, принимаемый сигнал будет проходить на выход приемника при условии (см. рис. 1.8):

$$(\dot{f} \Delta t) < \Delta F \quad , \quad (1.17)$$

где  $\Delta F$  - полоса пропускания приемника (полоса анализа).  
Если  $\Delta t$  не удовлетворяет неравенству (1.17), то входение в синхронизм возможно только путем изменения  $\Delta t$ . Проблема определения знака изменения  $\Delta t$  в этом методе решается весьма просто. Действительно, т.к. период синхросигнала равен  $1с$ , то оператор в приемном пункте должен "запускать" ШВ немного позднее чем оператор на передатчике. Как показал опыт это можно сде-



вать по обычным часам с секундной стрелкой. Однако, задержка запуска не должна превышать 1с. Далее, в приемном пункте последовательно уменьшая от такта к такту  $\Delta t$  на величину  $\Delta F/2f$  можно добиться вхождения в синхронизм. Максимальное время, которое может потребоваться на эту процедуру будет составлять:

$$T_{\text{вх}} = \frac{2\dot{f}T_a}{\Delta F} = \frac{2T_a}{\Delta t_{\text{гр}}} , \quad (1.18)$$

где  $\Delta t_{\text{гр}}$  - эквивалентная полосе пропускания приемника задержка ( $\Delta t_{\text{гр}} = \Delta F/\dot{f}$ ).

Например, если  $T_a = 1\text{с}$ ,  $\Delta t_{\text{гр}} = 6\text{ мс}$ , то  $T_{\text{вх}} = 5,5\text{ мин}$ .

Эту методику авторы применяли и в случае предварительного сведения ШВ по сигналам КВ-станции точного времени. В этом случае время  $T_{\text{вх}}$  значительно сокращалось.

Частота, на которой проводилась синхронизация, обычно выбиралась нами по ионосферному прогнозу. Данная методика применялась нами на радиотрассах протяженностью от 0,22 Мм до 7,5 Мм.

ЛЧМ-метод зондирования ионосферы, ввиду совершенно иного, чем при импульсном методе, способа обработки сигнала в приемнике, открывает новые способы синхронизации аппаратуры, которые мы назвали "частотными". Рассмотрим принцип "частотного" метода синхронизации.

Пусть на передающем устройстве частота ЛЧМ-генератора меняется по закону (1.13), тогда на входе приемника закон изменения частоты будет иметь вид (1.14). В отличие от (1.15) зависимость частоты от времени для гетеродина приемника зададим следующим образом:

$$f_3 = f_0 + \delta f + \dot{f}t , \quad (1.19)$$

где  $\delta f$  - вносимое смещение начальной частоты гетеродина. Тогда разностная частота  $F = f_3 - f_2$  будет равна (см. рис.1.9):

$$F = \dot{f} \Delta t - \delta f \quad . \quad (1.20)$$

Откуда видно, что при ЛЧМ-зондировании имеется возможность вхождения в синхронизм также за счет изменения величины  $\delta f$ , которое можно осуществить и в процессе зондирования. При этом величина  $\delta f$  меняется до тех пор, пока разностный сигнал не попадет в полосу пропускания приемника, т.е. пока не выполнится равенство:

$$\delta f = \dot{f} \Delta t \quad . \quad (1.21)$$

После акта зондирования в ШВ приемника должна быть введена поправка:

$$\Delta t = \frac{\delta f}{\dot{f}} \quad , \quad (1.22)$$

а на следующем акте должно быть принято условие  $\delta f = 0$ .

"Частотный" метод синхронизации можно осуществить как при излучении периодического (с периодом 1 с) сигнала, так и в процессе зондирования. Этим он в ряде случаев оказывается предпочтительнее "временного".

В задачах редукции ионограмм ИЭ ионосферы в  $N(h)$  - профиль для средней точки трассы требуется знать абсолютное время распространения сигнала. В этом случае мы применяем "временной" метод синхронизации размещая в каждом пункте приемник и передатчик ЛЧМ-сигнала. В начале осуществляется сведение ШВ. В результате рассогласования ШВ передатчика и приемника будет определяться только временем распространения сигнала  $t_{гр}$ . Его можно определить, если из приемного пункта излучать такой же синхросигнал. Принимаемый сигнал будет переносить ШВ смещенную уже на  $2t_{гр}$ . Сравнивая ее с исходной ШВ, можно определить рассогласование ШВ, которое равно абсолютному времени распространения  $t_{гр}$  сигнала на трассе.

## 2. ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СЕТИ СТАНЦИЙ НАКЛОННОГО ЛЧМ-ЗОНДИРОВАНИЯ

Пункты сети расположены в районах Дальнего Востока, Средней Азии, Европейской части СССР. Передатчики расположены в городах Хабаровске, Душанбе, Йошкар-Оле, Москве, Алма-Ате, а приемники - в Нижнем Новгороде, Йошкар-Оле, Киеве, Бельцах, Броневе, Москве, Темрике. Предполагается приемные пункты также разместить в Душанбе, Ленинграде, Мурманске.

2.1. Пространственно-временная корреляция МНЧ и ННЧ. Экстраполяция на близлежащий регион и краткосрочное прогнозирование параметров ионосферного КВ-радиоканала

Известность ионосферных процессов позволяет экстраполировать значения параметров КВ-радиоканала во времени и в пространстве. Нами была рассмотрена задача экстраполяции значений МНЧ и ННЧ, полученных экспериментально для одной из трасс КВ, на другие соседние трассы, а также краткосрочного прогноза МНЧ и ННЧ для одной трассы. Экстраполяция и прогноз осуществлялись с помощью уравнения линейной регрессии:

$$y - \langle y \rangle = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \rho_{xy} (x - \langle x \rangle), \quad (2.1)$$

где  $x$  и  $y$  - значения измеряемого и экстраполируемого (прогнозируемого) параметров соответственно,

$\langle x \rangle$ ,  $\langle y \rangle$  - их средние значения,

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  - дисперсии этих параметров,

$\rho_{xy}$  - коэффициент пространственной (временной) корреляции.

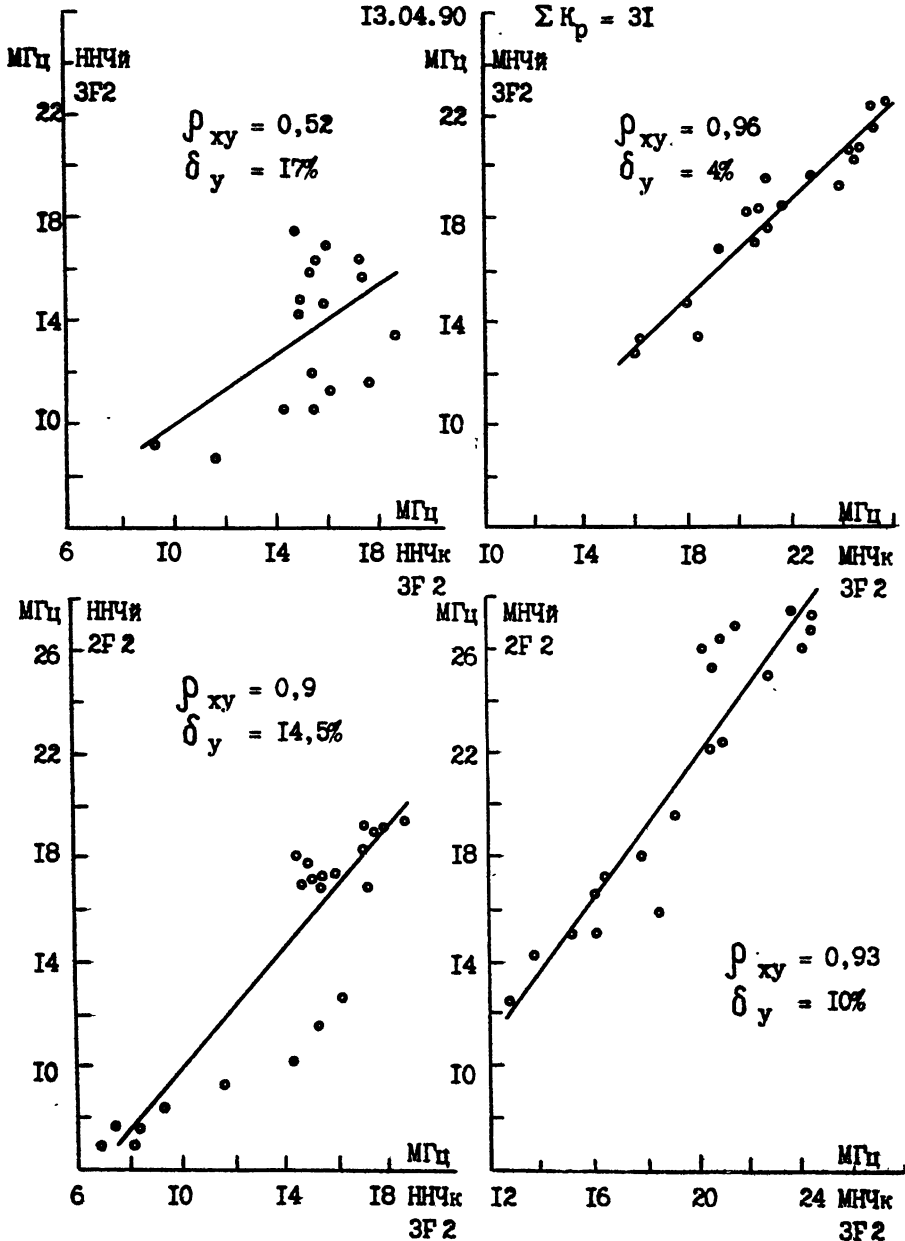
Основным параметром в (2.1) является коэффициент корреляции  $\rho_{xy}$ . Исследование временных корреляционных связей МНЧ и ННЧ для трассы Хабаровск-Нижний Новгород проводилось в период

с 21 марта по 3 апреля 1988 г. На основе данных круглосуточного зондирования рассчитывался коэффициент временной корреляции и делался краткосрочный прогноз изменения МНЧ и ННЧ на различных интервалах времени. Согласно полученным данным в спокойных ионосферных условиях в дневные часы ~10.00 - 18.00 мск коэффициент корреляции МНЧ моды 3F2 на интервал прогноза  $\Delta t \sim 0,5-1,5$  часа составляет величину  $\sim 0,95-0,75$ , а коэффициент корреляции ННЧ моды 3F2 для  $\Delta t = 1$  час равен  $\sim 0,7$ . С ростом  $\Delta t$  коэффициент корреляции падает. Относительная ошибка прогноза МНЧ составляет  $\sim 4\%$ . Ошибки суточного прогноза ННЧ и МНЧ, рассчитанные методом скользящей средней и путем экстраполяции тренда суточных значений методом наименьших квадратов, составляют  $\sim 10\%$  и  $6\%$  соответственно.

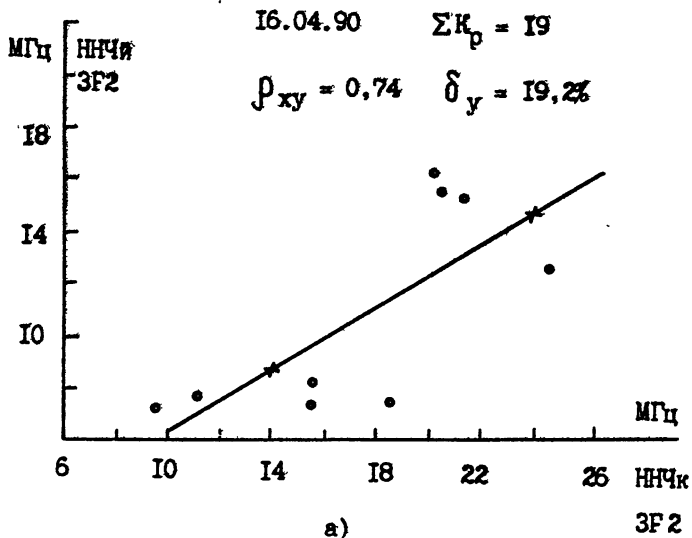
Значительный интерес для практики радиосвязи представляет пространственная экстраполяция параметров КВ радиоканала, сведения о которой могут быть использованы для повышения эффективности работы региональной сети станций КВ радиосвязи. Исследования пространственной корреляции МНЧ, ННЧ проводились нами на радиотрассах различной протяженности и ориентации. Излучение ЛЧМ сигналов осуществлялось из Хабаровска и Душанбе, а прием проводился одновременно в двух пунктах: Киеве и Йошкар-Оле, разнесенных на 1,4 Мм. Относительно передатчика в Хабаровске приемные пункты расположены вдоль трассы, а относительно передатчика в Душанбе - поперек трассы распространения.

Измерения на трассах Хабаровск-Киев, Хабаровск-Йошкар-Ола проводились с 11 по 19 апреля 1990 г. На рис. 2.1 и рис. 2.2 для двух дней наблюдений с различным уровнем магнитной возмущенности представлены зависимости МНЧ, ННЧ различных мод сигнала на трассе Хабаровск-Йошкар-Ола от соответствующих значений на трассе Хабаровск-Киев. Там же приведены значения коэффициентов пространственной корреляции МНЧ, ННЧ и рассчитанные для линейной регрессионной зависимости относительные ошибки прогноза. Как видно из рисунков, коэффициент пространственной корреляции МНЧ мод 2F2, 3F2 и 4F2 достаточно высокий, ( $\rho_{\text{мнч}} \sim 0,93-0,98$ ), относительные ошибки прогноза МНЧ составляют  $\sim 5-10\%$ . Коэффициент пространственной корреляции ННЧ несколько меньше ( $\rho_{\text{ннч}} \sim 0,7-0,9$ ), а относительные ошибки прогноза выше

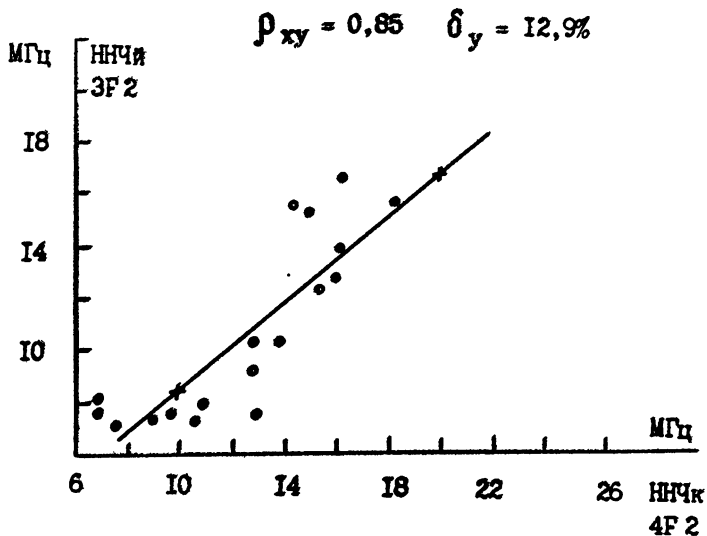
13.04.90  $\Sigma K_p = 31$



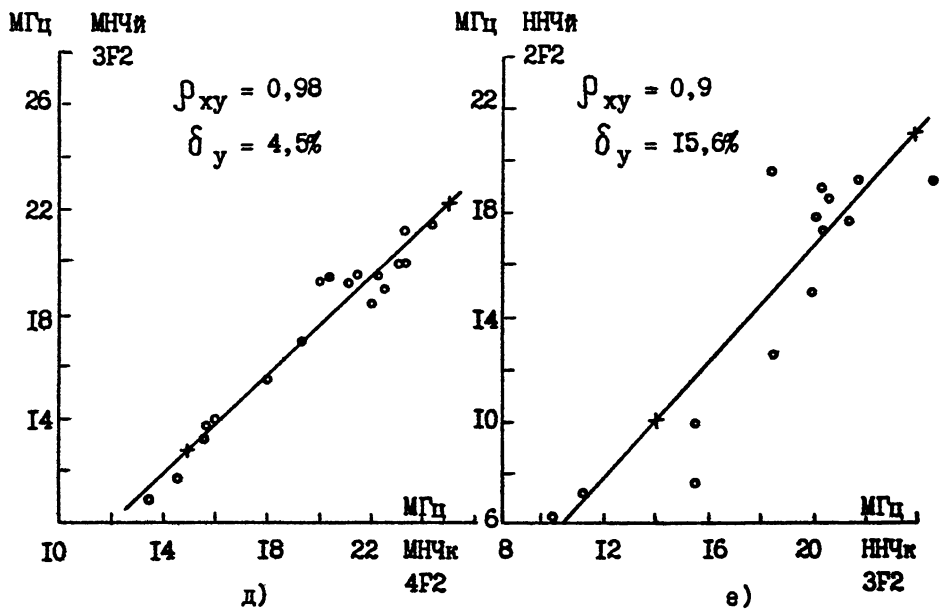
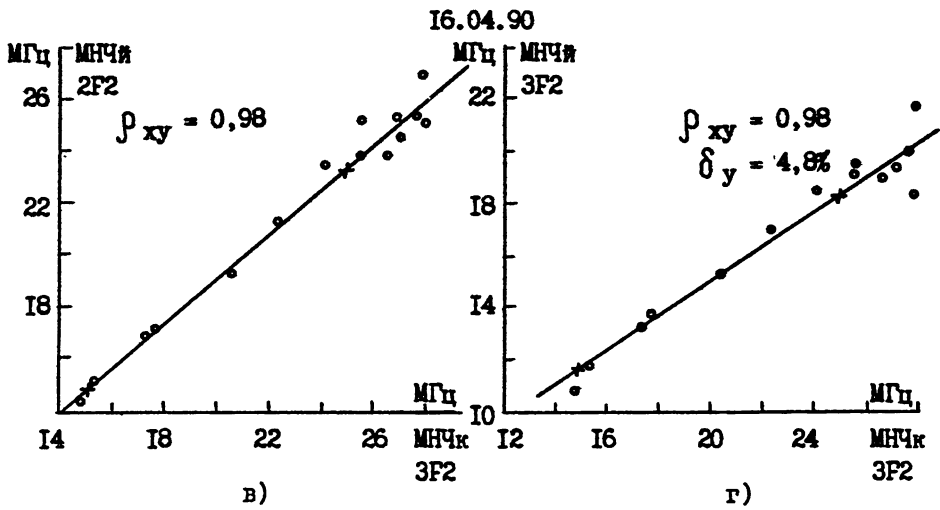
Р и с. 2.1



б)



Р и с. 2.2



Р и с. 2.2

~ (13-19%). Меньшие значения  $\rho_{\text{нчч}}$  по сравнению с  $\rho_{\text{мнч}}$  указывают на наличие локальных областей поглощения на трассе распространения.

Следует отметить, что на величину пространственной корреляции параметров КВ радиоканала существенное влияние оказывает уровень геомагнитной возмущенности, причем эффект носит пороговый характер. Для значений  $\sum K_p < 25-35$  пространственная корреляция МНЧ, ННЧ достаточно высокая ( $\rho_{\text{мнч}} \sim 0,90-0,98$ ,  $\rho_{\text{нчч}} \sim 0,7-0,9$ ), а при  $\sum K_p > 35-40$  (например для 12.04.90г., когда  $\sum K_p = 40$ ) коэффициент пространственной корреляции МНЧ, ННЧ меньше 0,5, что, по-видимому, связано с разрушением регулярной структуры ионосферного канала.

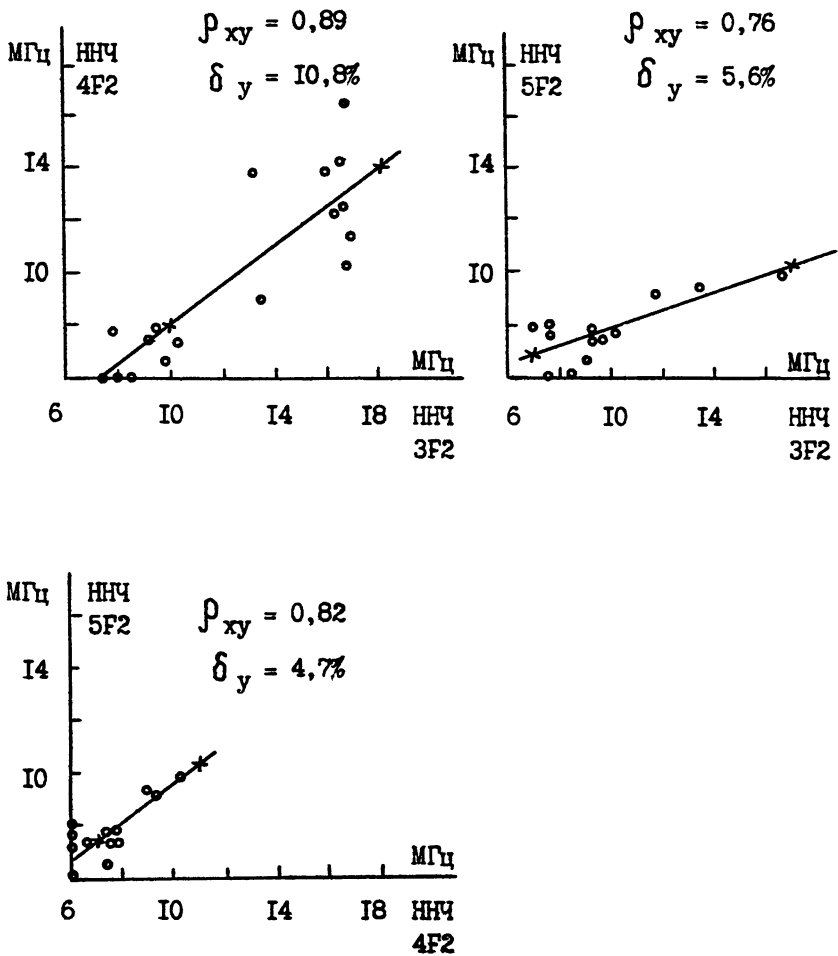
На многоскачковых трассах представляет интерес исследование взаимной корреляции мод различного порядка. На рис. 2.3 и рис. 2.4 в качестве примера приведены регрессионные зависимости МНЧ, ННЧ для мод 2F2-5F2, относящиеся к трассе Хабаровск-Йошкар-Ола. Из рисунков видно, что коэффициент корреляции МНЧ мод высокого порядка (3F2-5F2) весьма значителен ( $\rho_{\text{мнч}} \sim 0,94-0,98$ ), ошибки прогноза составляет ~ 2-3%. Коэффициент взаимной корреляции ННЧ мод 3F2-5F2 составляет величину  $\rho_{\text{нчч}} \sim 0,76-0,89$ , ошибки прогноза ~ 5-10%. Для мод более низкого порядка (2F2, 3F2) коэффициент взаимной корреляции МНЧ меньше и составляет величину  $\rho_{\text{мнч}} \sim 0,8$ , а ошибки прогноза-около 10%. По всей вероятности, это связано с тем, что пространственный разнос областей отражения для мод более низкого порядка больше, чем для мод высокого порядка.

Измерения пространственной корреляции ННЧ и МНЧ при равенении приемных пунктов поперек трассы распространения проводились в мае 1990 г. на радиолиниях Душанбе-Киев, Душанбе-Йошкар-Ола. На рис. 2.5 в качестве примера представлены зависимости ННЧ и МНЧ моды 2F2 на трассе Душанбе-Йошкар-Ола от соответствующих значений на трассе Душанбе-Киев. Коэффициент пространственной корреляции МНЧ моды 3F2 равен  $\rho_{\text{мнч}} \sim 0,77$ , ошибки прогноза составляют ~ 5%. Коэффициент пространственной корреляции ННЧ моды 2F2 равен  $\rho_{\text{нчч}} \sim 0,84$ , а ошибки прогноза ~ 9%.

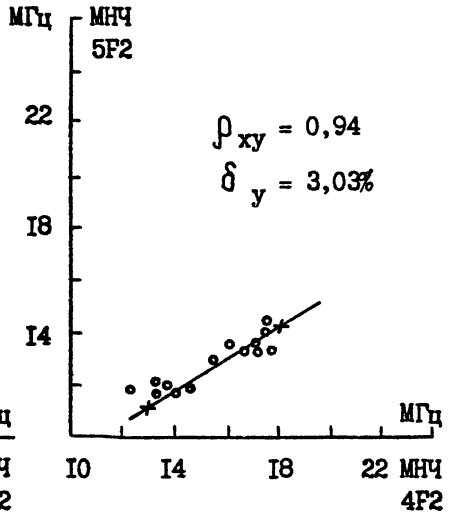
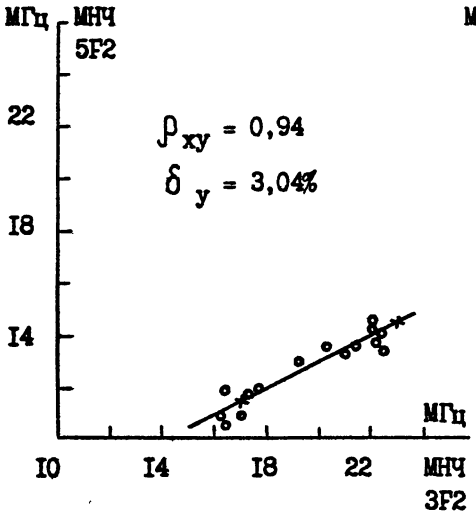
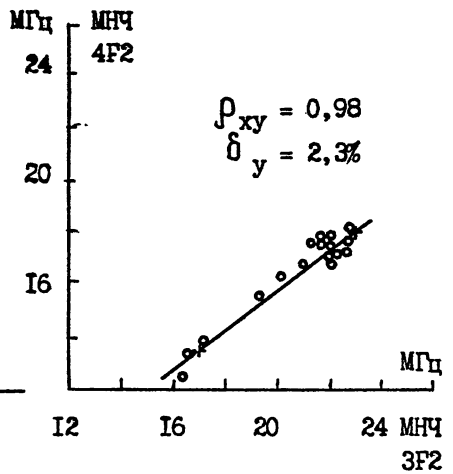
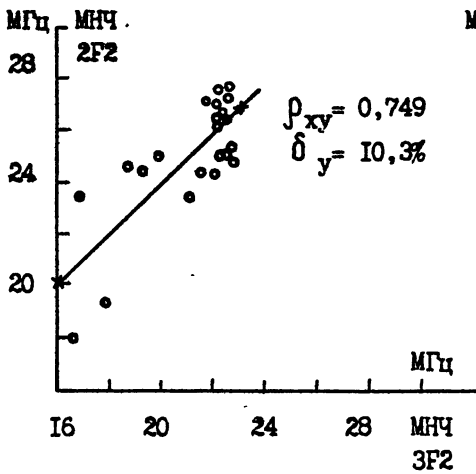
Сопоставление результатов измерений для трасс различной



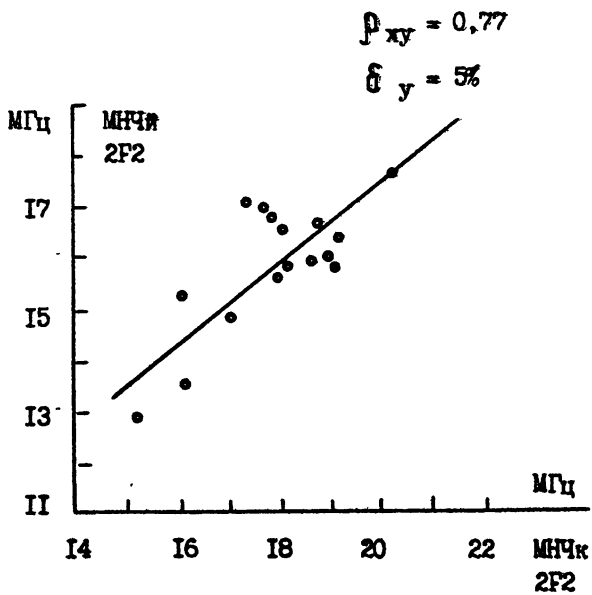
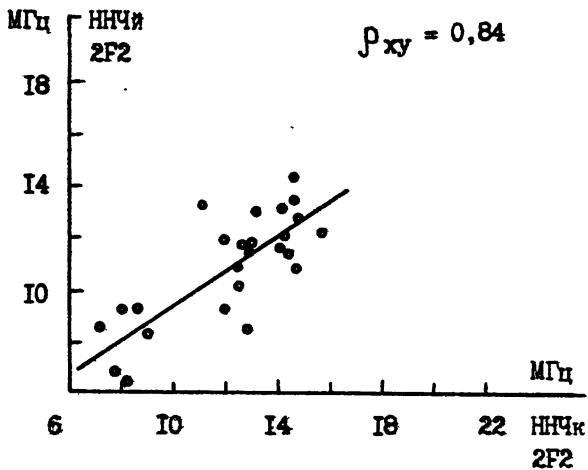
21.04.90  $\Sigma K_p = 20$



Р и с. 2.3



Р и с. 2.4



Р и с. 2.5

ориентации показывает, что коэффициенты пространственной корреляции параметров ионосферного КВ радиоканала, измеренные вдоль трассы распространения превышают их значения поперек трассы распространения.

В заключение заметим, что результаты исследования пространственной корреляции параметров ионосферного КВ радиоканала показывают перспективность экстраполяции МНЧ и ННЧ на достаточно обширный регион по данным НЗ на одной трассе.

## 2.2. Сверхдальнее ЛЧМ зондирование как метод диагностики кольцевого ионосферного КВ канала

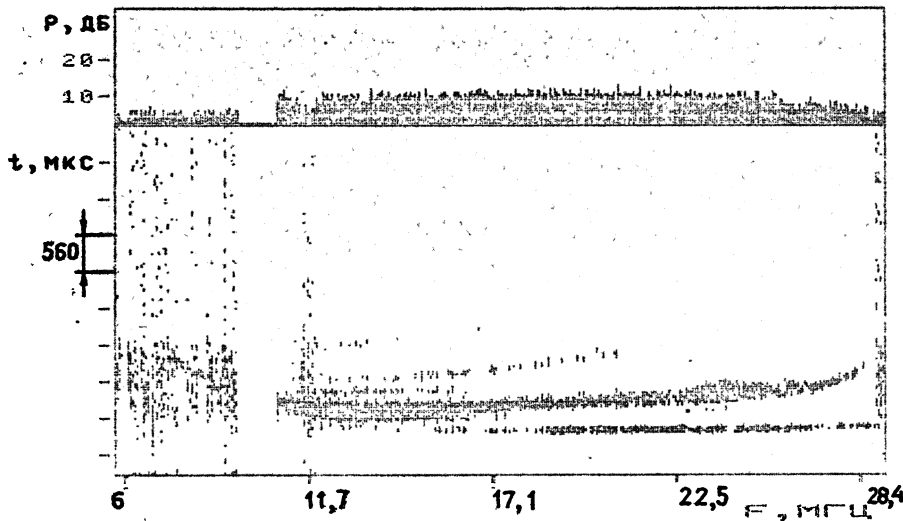
ЛЧМ-зондирование на сверхдальних трассах представляет интерес с точки зрения контроля и прогнозирования ионосферной обстановки в планетарном масштабе, а также для исследования механизмов сверхдальнего распространения КВ.

В настоящем разделе представлены результаты исследований распространения кругосветных сигналов (КС), проводившихся в ноябре-декабре 1990г. на трассе Хабаровск-Нижний Новгород протяженностью 45,8 Мм. Излучение ЛЧМ сигналов из Хабаровск осуществлялось на антенну РГ $_{\frac{65}{4}}-1$  ( $\lambda_0 = 19$  м), ориентированную на Нижний Новгород (азимут  $A = 315^\circ$ ). Мощность передатчика составляла ~ 200 Вт, диапазон частот 6-28,4 МГц, скорость изменения частоты ~ 350 кГц/с. Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся на антенну РГ $_{\frac{65}{4}}-1$  ( $\lambda_0 = 16$  м), ориентированную на Хабаровск (азимут  $A = 58^\circ$ ). В приемном пункте проводилась регистрация как прямых сигналов (ПС), так и прямых кругосветных сигналов (ПКС), задержанных относительно ПС на 138 мс. На рис. 2.6, 2.7 показаны примеры ионограмм ПС и ПКС. Как видно из рисунков ПКС носит диффузионный характер. Общая ширина следа ПКС уменьшается с ростом частоты и приближением к МНЧ. Средний уровень ПС составляет ~ минус 85-90 дБ, а ПКС ~ минус 123-128 дБ относительно 1 В.

Известно [9], что для сверхдальнего распространения КВ оптимальными являются трассы, проходящие вблизи сумеречной зоны. Поэтому основное внимание было уделено наблюдениям в дополуденные часы 08.00 - 12.00 мск, когда для данного сезона нап-

ХАБАРОВСК—Н. НОВГОРОД

ДАТА: 11.12.90 ВРЕМЯ: 08.55



ДАТА: 11.12.90 ВРЕМЯ: 10.55

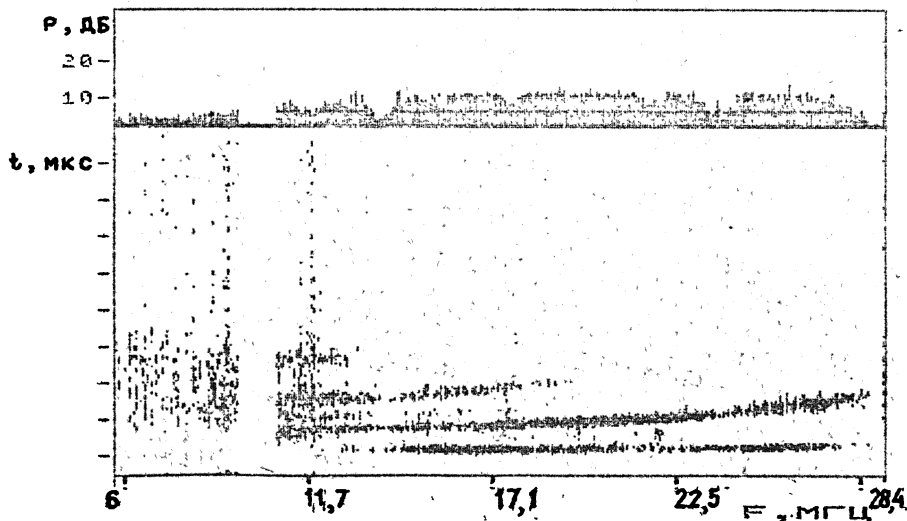


Рис.2.6

ХАБАРОВСК-Н.НОВГОРОД КС

ДАТА: 11.12.90 ВРЕМЯ: 08.41

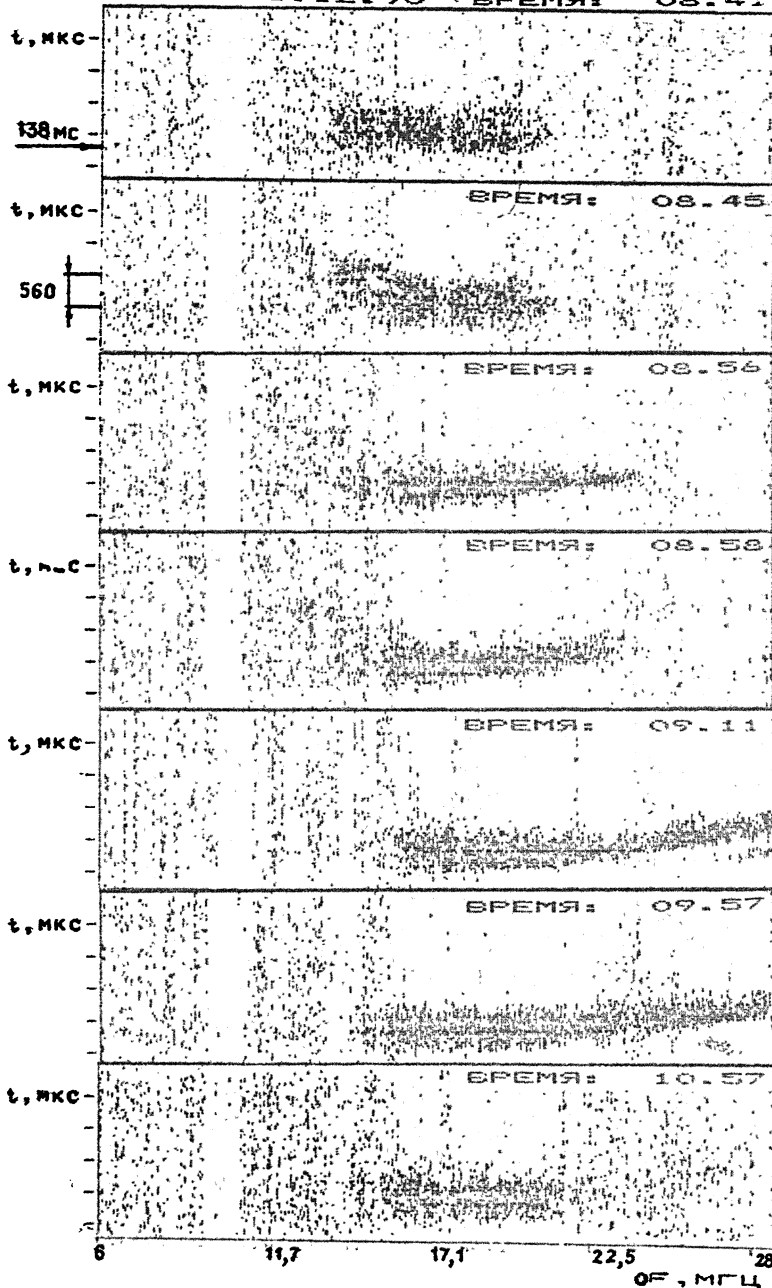


Рис. 2.7

равление трассы было близко к линии терминатора. На рис. 2.8 представлены временной ход диапазона частот прохождения ПКС и угла  $\alpha$ , составляемого линией терминатора с направлением трассы. Как можно видеть из рисунка, наибольший диапазон частот прохождения ПКС  $\Delta f = 14-28$  МГц приходился на время 09.15 - 10.30 мск, когда угол  $\alpha$  составлял величину  $\sim 6^{\circ}-15^{\circ}$ . С ростом угла величина  $\Delta f$  уменьшалась и прием ПКС прекращается для значений  $\alpha > 25^{\circ}-30^{\circ}$ .

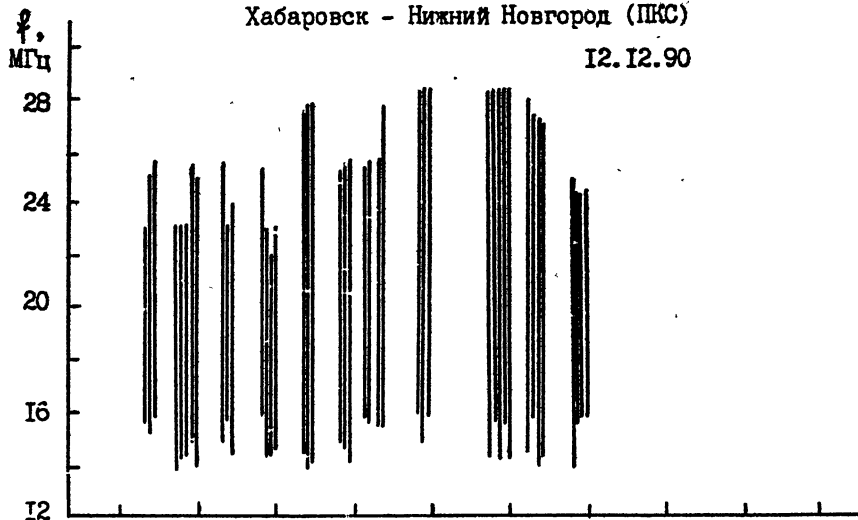
Особый интерес представляют ионограммы ПКС, зарегистрированные в 08.45 мск (см. рис. 2.7.). Для них характерен излом ДЧХ в окрестности частот  $f_k \sim 17-18$  МГц. При этом на частотах  $f < f_k$  задержка  $T$  ПКС уменьшается с ростом частоты, ( $\partial T / \partial f \sim$  минус 100 мкс/МГц), а на частотах  $f > f_k$  растет с ростом частоты ( $\partial T / \partial f \sim 80$  мкс/МГц). Наличие излома ДЧХ, на наш взгляд, может быть связано с различными механизмами распространения радиоволн на частотах  $f > f_k$  и  $f < f_k$ .

Для сопоставления с экспериментальными данными нами были проведены расчеты лучевых траекторий по методике, изложенной в [10]. Согласно расчетам при углах  $\alpha$ , составляемых терминатором с направлением излучения (приема)  $\sim 10^{\circ}-15^{\circ}$  ( $t \sim 08$  мск) на трассе существуют оптимальные условия для комбинированного механизма распространения радиоволн, когда часть пути ПКС проходит в приподнятом ионосферном волноводе, захват и выход из которого осуществляются за счет рефракции радиоволн на горизонтальных градиентах электронной концентрации. При этом более сильное влияние рефракции на низких частотах ( $f < f_k$ ) обеспечивает захват радиоволн в межслоевой FE- канал и распространение в нем на значительной части трассы с малыми потерями на поглощение. Вклад скачковых мод в энергетику сигнала на этих частотах мал вследствие большого поглощения. На частотах  $f > f_k$  основной механизм распространения - скачковый в сочетании с рикошетирующим. Примеры траекторий ПКС на частотах  $f > f_k$  показаны на рис. 2.9.

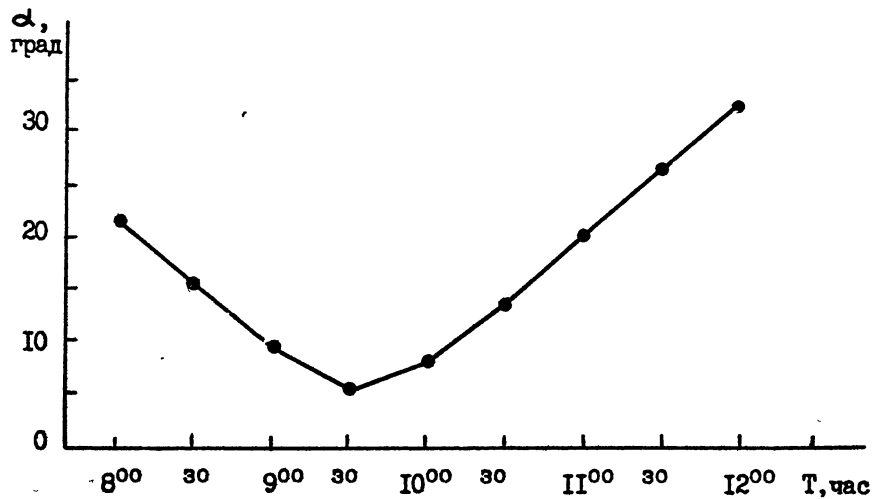
При малых углах  $\alpha < 5^{\circ}-7^{\circ}$  определяющим фактором является однородность трассы и преобладающим механизмом распространения является скачковый. Эти результаты согласуются с поведением ННЧ ПКС. Так в 08.40-09.10 мск и 10.30-10.45 мск когда угол

Хабаровск - Нижний Новгород (ПКС)

12.12.90



а)



б)

Р и с . 2.8



$F = 14.000 \text{ МГц}$

$Z, \text{ км}$

400

200

0

$T = 8 \text{ мкс}$

$\beta_T = 4,40^\circ$

$\beta_R = 11,7^\circ$

$Z, \text{ км}$

400

200

0

$T = 10 \text{ мкс}$

$\beta_T = 5,60^\circ$

$\beta_R = 3,3^\circ$

12000

24000

36000

км

$F = 14.000 \text{ МГц}$

$F = 20.000 \text{ МГц}$

$Z, \text{ км}$

400

200

0

$T = 10 \text{ мкс}$

$\beta_T = 6,20^\circ$

$\beta_R = 9,7^\circ$

$Z, \text{ км}$

400

200

0

$T = 10 \text{ мкс}$

$\beta_T = 1,90^\circ$

$\beta_R = 2,9^\circ$

12000

24000

36000

км

$F = 23.000 \text{ МГц}$

Р и с. 2.9

$\alpha \sim 8^{\circ}-15^{\circ}$ , НЧ ПКС  $\sim 14$  МГц, а в 09.40-10.15 мск, когда  $\alpha \sim 6^{\circ}-7^{\circ}$ , НЧ ПКС выше на 1-2 МГц и составляет величину  $\sim 15-16$  МГц. В то же время на прямой трассе ситуация обратная. В 08.40-09.10 мск НЧ ПС составляет  $\sim 9,5-10$  МГц, а в 09.30-10.00 мск НЧ ПС ниже и составляет величину  $\sim 8$  МГц. Поскольку для НЧ определяющим фактором является поглощение радиоволн, то более низкие значения НЧ ПКС при больших продольных градиентах электронной концентрации на трассе, повидимому, свидетельствует о преимущественно волноводном (с малыми потерями) способе распространения ПКС на частотах  $f < f_k$ .

Полученные результаты согласуются с данными работы [11], где показано, что волноводные моды имеют отрицательную дисперсию, ( $\partial \tau / \partial f < 0$ ), а скачковые - положительную ( $\partial \tau / \partial f > 0$ ).

Сопоставление данных о прохождении ПКС с магнитной активностью указывает на существенное влияние магнитной возмущенности на сверхдальнее распространение КВ. ПКС наблюдались лишь в спокойной ионосфере, когда  $K_p < 2-3$ . С ростом  $K_p$  происходит сокращение диапазона частот и временного интервала прохождения ПКС, а его исчезновение при значениях  $K_p > 5-7$ .

Таким образом, совокупность экспериментальных и расчетных данных о ПКС позволяет сделать вывод, что оптимальными направлениями для сверхдальнего распространения КВ являются трассы, составляющие небольшой угол (около  $5^{\circ}-15^{\circ}$ ) с терминатором, когда на трассе существует градиент электронной концентрации, обеспечивающий захват радиоволн в межслоевой F<sub>E</sub>- и рикошетирующий F-каналы и выход из них на поверхность Земли. В то же время трасса остается достаточно однородной, чтобы поддерживать распространение радиоволн на сравнительно высоких частотах скачковым механизмом. Низкочастотная ветвь ПКС ( $f < f_k$ ) формируется преимущественно волноводными модами (эффект более четко выражен при углах  $\alpha \sim 10^{\circ}-15^{\circ}$ ), а высокочастотная ветвь ( $f > f_k$ ) - рикошетирующими и скачковыми модами распространения.

2.3. Вариации параметров КВ-радиолинии протяженностью  $\sim 4$  Мм в период солнечного затмения 22 июля 1990 г. Редукция ионограмм ВЗ в N(h)-профили для средней точки трассы

Для диагностики ионосферы в период солнечного затмения 22 июля 1990 г. нами использовались две радиотрассы: Иркутск-Йошкар-Ола и Иркутск - Нижний Новгород, протяженностью 3,54 Мм и 3,76 Мм соответственно. В этих экспериментах передающая часть ионозонда являлась разработкой СибВЭМИР [3].

Затмение с фазой 0,5...0,7 началось около 4 часов и закончилось около 6 часов мск. Контрольные наблюдения проводились в тоже время 21 и 23 июля. Полученные ионограммы использовались для построения суточного хода МНЧ и ННЧ различных скачковых мод сигнала. Было установлено, что значения МНЧ и ННЧ для исследуемых трасс практически совпадали и поэтому они использовались для статистического усреднения.

Рис. 2.10 иллюстрирует изменения во времени МНЧ и ННЧ в день затмения (точки) и контрольные дни (крестики). Не трудно видеть, что в период затмения МНЧ и ННЧ всех мод уменьшались относительно контрольных значений. При этом МНЧ моды 1F2 уменьшались на 3...4%, моды 2F2 - на 5...7%, а моды 3F2 - на 5...8%. В то же время уменьшение ННЧ тех же мод зондирующего сигнала составляло: 5...9%, 16...18% и 4...9% соответственно.

Для анализа экспериментальных результатов был применен метод редукции [12,13] ионограмм НЗ в профили электронной концентрации для средней точки радиотрассы.

Вычисление  $N(h)$  - профилей проводилось в предположении сферически симметричной ионосферы, состоящей из отдельных элементарных слоев, границами которых являлись высоты отражения зондирующей волны на близких частотах  $f_{m-1}$ ,  $f_m$ . Предполагалось, что электронная концентрация внутри каждого слоя меняется по закону [13]:

$$N \sim f_{Nm}^2 = \alpha_m - \frac{\beta_m}{z^2}, \quad (2.2)$$

где  $f_N$  - плазменная частота;  
 $\alpha_m, \beta_m$  - константы;

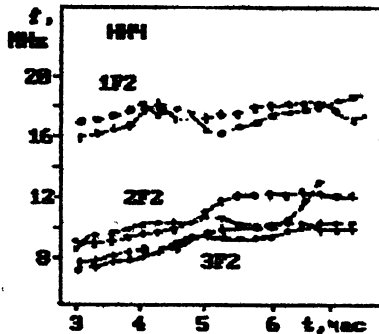
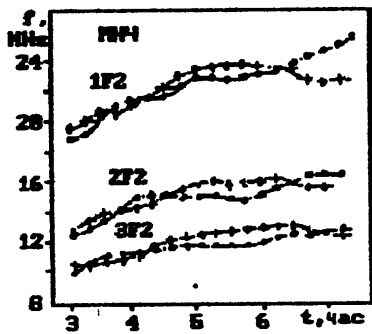


Рис.2.10

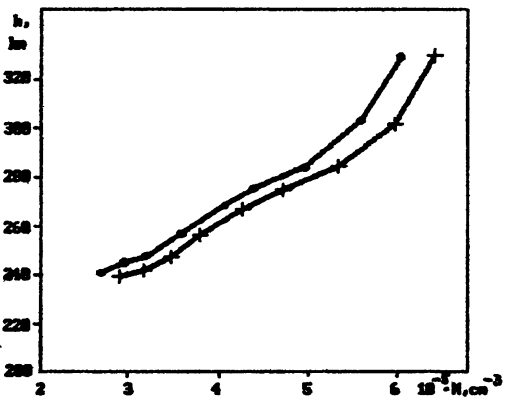


Рис.2.11

$$Z = \frac{R_0 + h}{R_0} - \text{приведенная высота;}$$

$R_0$  - радиус Земли.

В результате вычислений была получена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \text{Pgp}(fk) &= 2R_0 \left\{ \sqrt{Z_0^2 - \cos^2 \theta_{0k}} - \cos \theta_{0k} \right\} + \\ &+ \sum_{m=1}^k \left( \frac{\alpha_m}{fk} - 1 \right) \left[ (S_{m,k}^2 - S_{m-1,m-1}^2)^{0.5} - (S_{m,k}^2 - S_{m,m}^2)^{0.5} \right], \quad (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Д}(fk) &= 2R_0 \cos \theta_{0k} \left\{ \cos^{-1} \theta_{0k} \left[ \arccos \left( \frac{\cos \theta_{0k}}{\sqrt{Z_0^2 - \cos^2 \theta_{0k}}} \right) - \theta_{0k} \right] + \right. \\ &+ \sum_{m=1}^k \left( \frac{\beta_m}{fk} - \cos^2 \theta_{0k} \right)^{-0.5} \ln \frac{S_{m,m} S_{m,k} + (S_{m,k}^2 - S_{m-1,m-1}^2)^{0.5}}{S_{m-1,m-1} S_{m,k} + (S_{m,k}^2 - S_{m,m}^2)^{0.5}} \left. \right\}, \quad (2.4) \end{aligned}$$

$$Z = S_{m,m}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (2.5)$$

$$\theta_{0k} = \arccos \left\{ \frac{\begin{matrix} \text{Д} \\ 2R_0 \sin \frac{\text{Д}}{2R_0} \end{matrix}}{\text{Pgp}(fk)} \right\} - \frac{\text{Д}}{2R_0}, \quad (2.6)$$

где  $\text{Pgp}(fk)$ ,  $\text{Д}(fk)$  - групповой путь и дальность между приемным и передающим пунктами,

$$S_{m,k} = \frac{\beta_m^2 / fk^2 - \cos^2 \theta_{0k}}{\alpha_m / fk - 1}, \quad S_{0,0} = Z_0 = 1,0157 - \text{приведенная высота начала ионосферного слоя,}$$

$\theta_0$  - угол излучения, отсчитанный от касательной к поверхности Земли.

В системе уравнений выражение (2.6) является следствием из теоремы Брайт-Тьва [13].

Далее для  $F_{gr}(f_k)$  задавалась таблица значений, которые брались из экспериментальных ионограмм. Абсолютные значения  $F_{gr}(f_k)$  при этом отсчитывались по моде 2E, поскольку положение высоты максимума слоя E известно с достаточной степенью точности. Численное решение системы уравнений осуществлялось на ЭВМ методом Ньютона-Рафсона.

На рис. 2.11 представлены  $N(h)$ -профили, полученные в результате редукции ионограммы моды 1F2. Точками отмечены значения  $N(h)$  за 22 июля, а крестиками - за 23 июля для  $T = 5$  час мск.

Из рисунка видно, что в период затмения электронная концентрация в слое F в середине трассы уменьшалась примерно на 6...8%. Эти значения соответствуют рассмотренным выше изменениям МНЧ. Несколько большие значения изменений ННЧ, особенно заметные для моды 2F2, по сравнению с изменениями МНЧ, свидетельствуют о том, что концентрация электронов в нижней ионосфере уменьшалась на большую величину чем в слое F. Эти изменения можно объяснить количественно если предположить, что функция потерь электронов в D-области ионосферы возрастает в периоды солнечных затмений [14].

#### 2.4. Влияние ВЧ нагрева ионосферы на ДЧХ трасс различной протяженности

Известно, что при воздействии на ионосферу мощным пучком дециметровых радиоволн, в ней возбуждаются неоднородности различных масштабов, от долей метра до десятков километров, оказывающие заметное влияние на распространение радиоволн. В настоящем разделе представлены результаты исследования влияния модифицированной ионосферы на ДЧХ односкачковых и многоскачковых трасс при наклонном ЛЧМ зондировании.

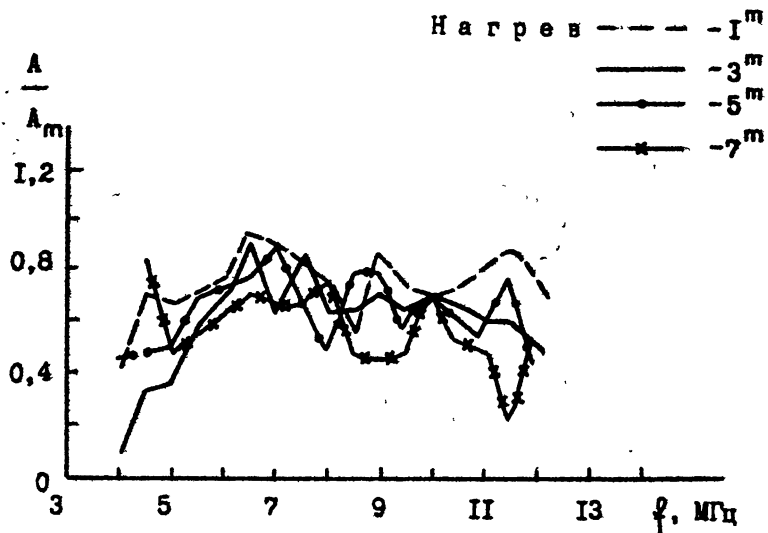
Эксперименты проводились в 1990 г. на радиолиниях различной протяженности и ориентации. Эксперимент на короткой трассе Йошкар-Ола-Нижний Новгород протяженностью 220 км проводился в

ноябре 1990 г. Нагревный стенд "Сура" располагался примерно в 25 км к югу от центра трассы. Измерения проводились с 14 до 18 мск. Возмущение ионосферы осуществлялось на двух частотах:  $f_1 = 5,8$  МГц и  $f_2 = 7,8$  МГц с эффективной мощностью излучения  $P_1 = 150$  МВт,  $P_2 = 70$  МВт циклами 7 минут - нагрев, 8 минут - пауза. ЛЧМ зондирование проводилось в диапазоне частот 3-14,2 МГц.

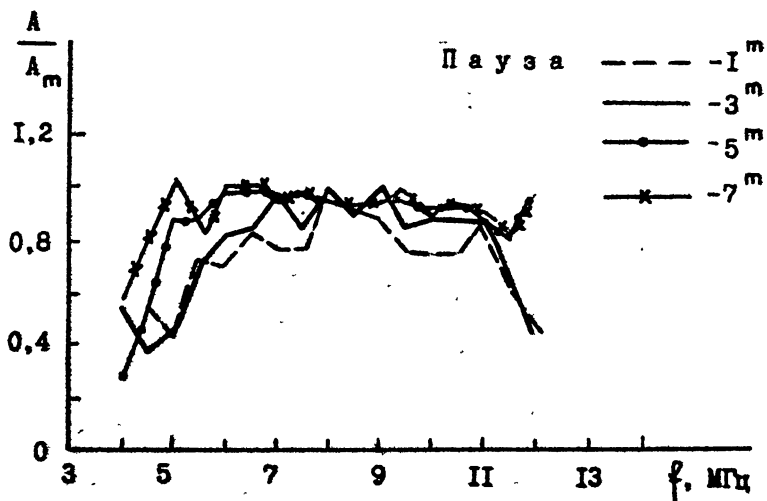
На рис. 2.12а представлены усредненные по всем циклам нагрева частотные зависимости амплитуд пробного сигнала, нормированные на максимальное значение  $A_p$  для 7(8) минут паузы. Аналогичная зависимость, но для паузы показана на рис. 2.12б. Как видно из рисунков в первые 2-3 минуты нагрева наблюдается ослабление зондирующего сигнала во всей полосе частот 4 - 12 МГц на величину ~2-6 дБ. В последние 2-3 минуты нагрева поведение амплитуд сигнала различно на различных частотах. В то время как практически на всех частотах в диапазоне ~ 5-12 МГц происходит дальнейшее (более медленное) уменьшение уровня сигнала, на низких частотах ( $f \sim 4-5$  МГц) наблюдается заметный рост его амплитуды.

После выключения возмущающего передатчика амплитуда сигнала на частотах 5-12 МГц восстанавливается за время  $t_p \sim 3-4$  минуты. На частотах 4-5 МГц амплитуда пробного сигнала падает на 8-10 дБ в течении 4-5 минут, а затем восстанавливается до невозмущенного уровня примерно за 3 минуты. Если общий эффект ослабления пробного сигнала, на наш взгляд, связан с рассеянием радиоволн на среднемасштабных неоднородностях с размерами  $l \sim 0,3-1$  км (о чем свидетельствуют времена развития  $t_n \sim 1,5 - 2$  мин и релаксации  $t_p \sim 3 - 4$  мин), то на вариации амплитуд сигналов низких частот ( $f \sim 4-5$  МГц), наряду с рассеянием, по-видимому, заметное влияние оказывают эффекты, связанные с рефракционным отклонением радиоволн в нижней ионосфере на крупномасштабном положительном возмущении электронной концентрации [15]. Для более детального анализа экспериментальных данных мы предполагаем провести расчеты характеристик КВ сигналов в трехмерной анизотропной ионосфере с учетом моделирования искусственной области возмущения.

Интересные данные были получены 2 ноября 1990 г. в 14.00-16.00 мск, когда ЛЧМ зондирование модифицированной ионосферы



а)



б)

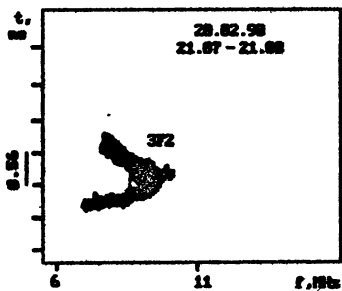
Р и с. 2.1



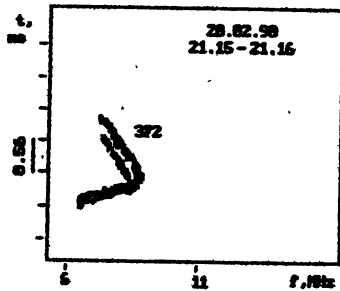
осуществлялось при наличии спорадического слоя E на трассе. "Нагрев" ионосферы проводился на частотах  $f_n = 5,8$  МГц,  $f_n = 7,8$  МГц циклами 1 минута - нагрев, 2 минуты - пауза. Эффективная мощность излучения  $P_G = 150$  МВт,  $P_G = 70$  МВт. Было обнаружено, что в период нагрева ионосферы происходило уменьшение на 4-6% частоты экранирования слоя F2 ионосферы (МНЧ 1F2), что означает "просветление" спорадического слоя E в результате прохождения через него мощной волны накачки. При этом во время "нагрева" ионосферы наблюдалось уменьшение амплитуды отраженного от Es сигнала на 2-3 дБ.

В феврале 1990 г. эксперимент с ЛЧМ зондированием возмущенной ионосферы проводился на трассе Хабаровск-Киев протяженностью  $\sim 7,0$  Мм. При этом нагревный стенд "Сура" располагался вдоль трассы распространения на расстоянии  $\sim 1,2$  Мм от приемного пункта. Измерения проводились в вечернее время (17.00-23.00 мск). Возмущение ионосферы осуществлялось с помощью стенда "Сура" путем вертикального излучения пучка радиоволн с эффективной мощностью  $\sim 100$  МВт на частотах нагрева вблизи критической частоты слоя F2 ( $f_n < f_oF2$ ) циклами: 5 минут - нагрев, 5 минут - пауза. ЛЧМ передатчик работал в диапазоне частот 6-28,4 МГц, скорость изменения частоты составляла  $\sim 350$  кГц/с. Основной эффект влияния нагрева ионосферы на ДЧХ был связан с возбуждением искусственной диффузности вблизи МНЧ моды 3F2, для которой точка отражения третьего скачка приходилась на возмущенную область.

Характерный пример изменения ДЧХ трассы при воздействии на ионосферу мощных радиоволн показан на рис. 2.13а,б. Из рисунка видно, что во время нагрева ионосферы в окрестности МНЧ 3F2 развивается искусственная диффузность, заполняющая область частот и дальностей между МНЧ необыкновенной и обыкновенной компонент сигнала и между верхними лучами магнитоионных компонент. Частотная протяженность диффузности составляла  $\sim 1,5$  МГц, диапазон задержек  $\sim 0,8$  мс. Время развития эффекта  $t_n \sim 1$  мин, а релаксации  $t_p \sim 2-3$  мин. Это соответствует временам развития и релаксации среднemasштабных неоднородностей с размерами  $l \sim 0,1-0,6$  км. Таким образом, диффузность на ионограммах ЛЧМ ИВ и сопутствующий ей эффект замираний КВ сигналов



a)



б)

Рис.2.13

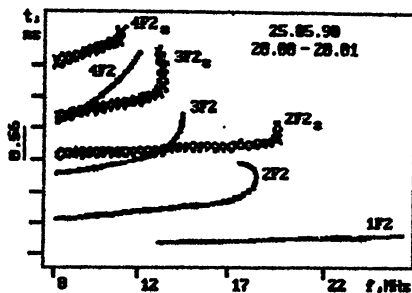
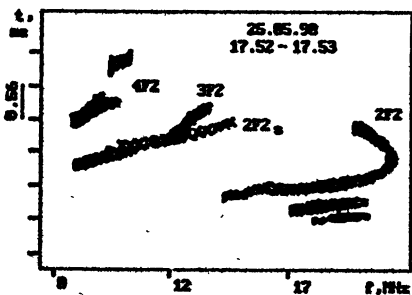
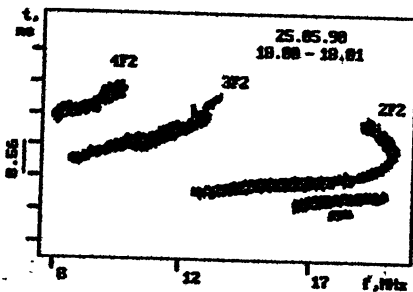


Рис.2.14



a)



б)

Рис.2.15

связана с рассеянием радиоволн "вперед" на искусственных среднемасштабных неоднородностях.

В мае 1990 г. проводился эксперимент на трассе Душанбе - "Сура" - Киев. Нагревный стенд располагался сбоку на значительном (~1,0 Мм) удалении от прямой трассы Душанбе-Киев протяженностью ~ 3,2 Мм. Режим работы ЛЧМ аппаратуры и возмущающего передатчика был тем же, что и при работе на трассе Хабаровск-"Сура"-Киев. Влияние нагрева ионосферы выразилось в появлении на ионограммах НЗ дополнительных треков за счет ракурсного рассеяния радиоволн на искусственных мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностях. В связи с многомодовым характером распространения радиоволн на трассах Душанбе-"Сура", Душанбе-Киев для интерпретации результатов измерений были проведены численные расчеты ДЧК при наличии искусственных магнитоориентированных неоднородностей, сосредоточенных в пределах диаграммы направленности антенны мощного передатчика на высотах ионосферного слоя. Расчеты проводились по методике, изложенной в [10] по прогноэным ионосферным данным. На рис. 2.14 представлена синтезированная ионограмма на трассе Душанбе-Киев с учетом ракурсной моды, а на рис. 2.15а,б - экспериментальные ионограммы во время нагрева и паузы соответственно. Сплошными линиями на рисунках указаны моды прямого сигнала на трассе Душанбе-Киев, штрихом - моды ракурсно-рассеянного сигнала. Сопоставление рисунков показывает хорошее соответствие экспериментальных и расчетных ионограмм НЗ.

## 2.5. Использование ЛЧМ-ионозонда в адаптивной среднеширотной радиолинии КВ связи протяженностью 3 Мм

В октябре 1990 г. нами были выполнены эксперименты по управлению с помощью ЛЧМ-ионозонда рабочими частотами КВ-радиолинии протяженностью около 3 Мм. Малые габариты и низкая мощность излучаемого сигнала ( $P < 500$  Вт) позволили разместить ионозонд в обслуживаемой зоне системы связи.

Использование ЛЧМ-ионозонда обеспечивало измерение следующих параметров КВ-радиоканала: отношения уровней сигнал/шум-

ка, равенности и межмодовых задержек, скорости изменения групповой задержки от частоты. Получаемые данные накапливались в памяти ЭВМ и позволяли назначать оптимальные частоты связи. Кроме этого, с помощью разработанного пакета прикладных программ по ним определялся прогноз условий распространения радиоволн.

Цель описываемого эксперимента состояла в адаптации радиолинии по частоте и мощности передаваемого сигнала и увеличении помехоустойчивости связи. Эксперимент осуществлялся чередующимися этапами.

На первом - передатчик системы КВ-связи излучал тестовое сообщение на частоте, выбранной по данным долгосрочного ионосферного прогноза. При этом мощность передатчика последовательно принимала значения 100 Вт, 5 Вт. В приемном пункте с помощью связанной аппаратуры регистрировался процент ошибок в принятом тестовом сообщении для различных мощностей излучения связанного сигнала. На втором этапе осуществлялось наклонное зондирование КВ-радиоканала ЛЧМ-сигналами. Результаты обработки ионограмм НЗ выдавались ЭВМ в виде таблицы значений частот соответствующих одномодовому механизму распространения радиоволн на выбранной трассе и отношений сигнал/помеха для сетки частот с шагом 100 кГц. Из данного массива по критерию максимального значения отношения сигнал/помеха выбиралась оптимальная рабочая частота для системы связи, которая передавалась по служебному каналу на передающий пункт.

На третьем этапе передатчик системы связи излучал тестовое сообщение на назначенной частоте при мощности связанного сигнала 5 Вт. В этом случае в приемном пункте также определялся процент ошибок в принятом тестовом сообщении.

Эксперимент проводился круглосуточно получасовыми циклами в течении нескольких дней.

Данные наблюдений были разбиты на две группы. В первую вошли результаты, полученные в дневные и вечерние часы (08.00-20.00 мск), а во вторую - полученные в ночные и утренние часы (20.00-08.00 мск).

На рис. 2.16б,в приведены гистограммы распределения разности рабочих частот связанной радиолинии  $\Delta f = f_d - f_0$ , выбира-

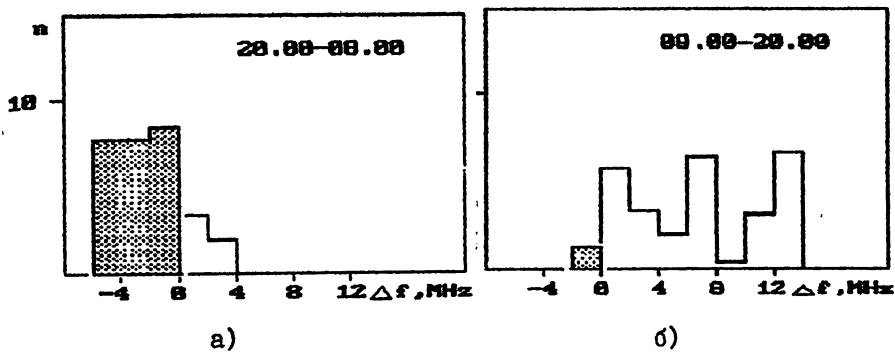


Рис.2.16

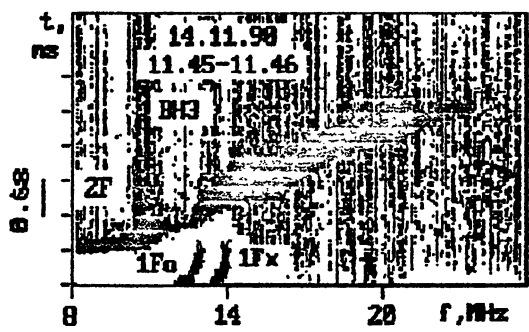


Рис.2.17

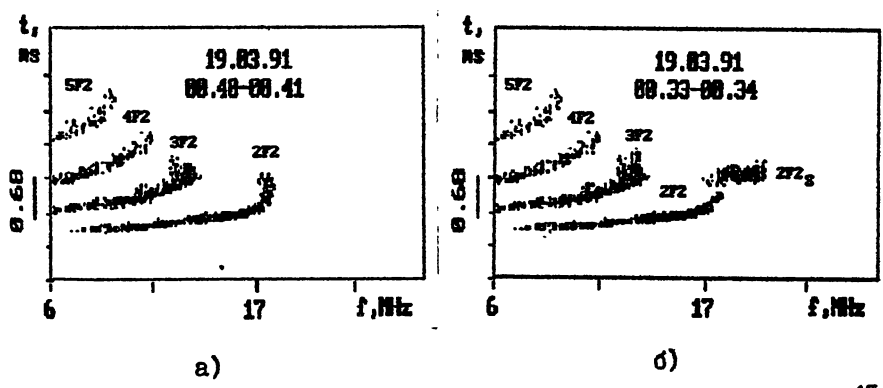


Рис.2.18

емых по долгосрочному ионосферному ( $f_d$ ) и оперативному ( $f_o$ ) прогнозу для 08.00-20.00 мск и 20.00-08.00 мск соответственно. Как видно из рис. 2.16б в дневные часы разность частот  $\Delta f$  в большинстве случаев положительная ( $\Delta f > 0$ ). Это связано с тем, что в дневные часы широкий диапазон частот прохождения КВ сигналов увеличивает возможность выбора ОРЧ. Поэтому, если по долгосрочному прогнозу работа связаной КВ радиолинии осуществлялась на частотах близких к МНЧ, то по оперативному прогнозу выбиралась наиболее интенсивная по энергетике двухскачковая мода. При этом для ослабления интерференционных (межмодовых) замираний в полосе двухлучевого распространения выбирались диапазоны частот, где основная мода на 5-10 дБ превышала уровень третьей моды.

В ночные и утренние часы, когда существенно (на 10-15 МГц) уменьшалась МНЧ и сужался диапазон частот прохождения КВ сигналов, разность частот  $\Delta f$  смещалась в сторону отрицательных значений (см. рис. 2.16а). Это связано с тем, что в ночные часы на низких частотах увеличивается спектральная плотность помех, поэтому возникает необходимость выбора ОРЧ на максимально высокой (с учетом S/N) частоте.

Эксперимент показал, что адаптивная система связи, выбор частот, в которой осуществляется на основе анализа данных ВЗ ионосферы ЛЧМ-сигналом, обеспечивала безошибочный прием информационного сообщения при весьма низкой мощности излучения связаного сигнала (5 Вт); ионозонд не создавал помех действующей радиолинии.

## 2.6. Предварительные результаты ВЗ среднеширотной ионосферы непрерывными ЛЧМ-сигналами

Эксперименты по ВЗ ионосферы проводились в ноябре 1990г. Был реализован бистатистический вариант зондирования. Непрерывный ЛЧМ-сигнал в диапазоне 6-28 МГц излучался из Йошкар-Олы на горизонтальный широкополосный диполь типа ВГД. Мощность сигнала на входе фидера была около 1 кВт. Прием сигнала осуществлялся в Нижнем Новгороде на горизонтальную ромбическую антенну

$rg_{\frac{65}{4}}-1$  ( $\lambda_0 = 16$  м) ориентированную по азимуту  $A = 59^\circ$ . Расстояние между передающим и приемным пунктами составляет 220 км, что исключает перегрузку приемника непрерывным зондирующим сигналом. Сигнал ВВЗ наблюдался регулярно с уровнем минус 120 дБ относительно 1 В.

На рис. 2.17 представлена типичная ионограмма ВВЗ. На ней присутствуют треки прямого сигнала: мода 1F2, мода 2F2 и мода 3F2. Сигнал ВВЗ продолжает моду 2F2 и простирается до ~ 22 МГц. Для ВВЗ характерен резкий передний фронт сигнала и размытый задний.

В дальнейшем предполагается увеличить энергетику зондирующей линии, применив в качестве передающей антенну обладающую более высокой направленностью чем диполь.

## 2.7. Управление дальним распространением КВ за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением

Известно [16], что в волноводе Земля-ионосфера существуют приподнятые каналы, распространение в которых на трассах большой протяженности характеризуется рядом преимуществ по сравнению со скачковым механизмом распространения. К их числу относятся: малые потери на поглощение и возможность распространения на частотах, в 1,5-2 раза превышающих МНЧ скачкового механизма. Основной проблемой волноводного распространения является захват радиоволн в ионосферный волноводный канал (ИВК) и вывод из него энергии на поверхность Земли. Существует несколько механизмов захвата и вывода радиоволн из ИВК, различающихся по своей эффективности [17]. В условиях невозмущенной ионосферы наиболее эффективным является захват (вывод) радиоволн за счет рефракции на горизонтальных градиентах электронной концентрации. Очевидно, что этот механизм должен работать на трассах ортогональных терминатору при переходе на ночную сторону (захват) и в обратном направлении (вывод). Осуществление этого механизма однако ограничено по времени.

Создание в ионосфере под действием мощного радиоизлучения неоднородностей различных масштабов открывает новые возможнос-

ти для захвата и вывода энергии из ИЕК. Очевидно к выводу радиоволн из ИЕК может приводить как рассеяние "вперед" на среднemasштабных (1 ~ 0,3-1 км) искусственных неоднородностях, так и ракурсное рассеяние на мелкомасштабных (1 ~ 10-30 м) ионосферных неоднородностях [18,19].

Первые вывод радиоволн из ИЕК за счет ракурсного рассеяния радиоволн на искусственной ионосферной турбулентности экспериментально был обнаружен авторами [20] при работе на ряде фиксированных частот. Однако ограниченные возможности этого метода диагностики не позволили провести исследования данного механизма.

Использование для диагностики ИЕК ЛЧМ-ионозонда позволило сделать дальнейшие шаги в этом направлении. В настоящем разделе представлены результаты исследования влияния ВЧ нагрева ионосферы на дальнейшее распространение ЛЧМ сигналов. Эксперимент проводился в марте 1991 г. на трассе Хабаровск-"Сура"-Темрик и Хабаровск-"Сура"-Бельцы. Зондирование ионосферы осуществлялось из Хабаровска в диапазоне частот 6-28,4 МГц. Прием ЛЧМ сигналов проводился в 2-х пунктах: Бельцы, расположенных вдоль трассы распространения на расстоянии ~ 1,5 Мм от нагревного стенда и в Темрике, расположенном к югу от трассы Хабаровск-"Сура" на расстоянии ~ 1,3 Мм от нагревного стенда (угол рассеяния ~30°). Прием осуществлялся на горизонтальную ромбическую антенну, ориентированную на область возмущения.

Нагревный стенд "Сура" расположен в г. Васильсурске Нижегородской области. Его передатчик работал с эффективной мощностью PG ~ 100 МВт и излучал вертикально вверх волны обыкновенной поляризации на частоте волны накачки ( $f_H$ ), которая выбиралась вблизи критической частоты слоя F2 ( $f_H < f_{oF2}$ ). Воздействие на ионосферу осуществлялось циклами: 5 минут - нагрев, 5(10) минут - пауза.

Наблюдения проводились с 22.00 до 06.00 мск, когда на трассе для данного сезона (равноденствие) существовал максимальный отрицательный градиент электронной концентрации, обеспечивавший захват радиоволн в приподнятый ионосферный волновод.

В Темрике на монограммах НЗ во время "нагрева" ионосферы

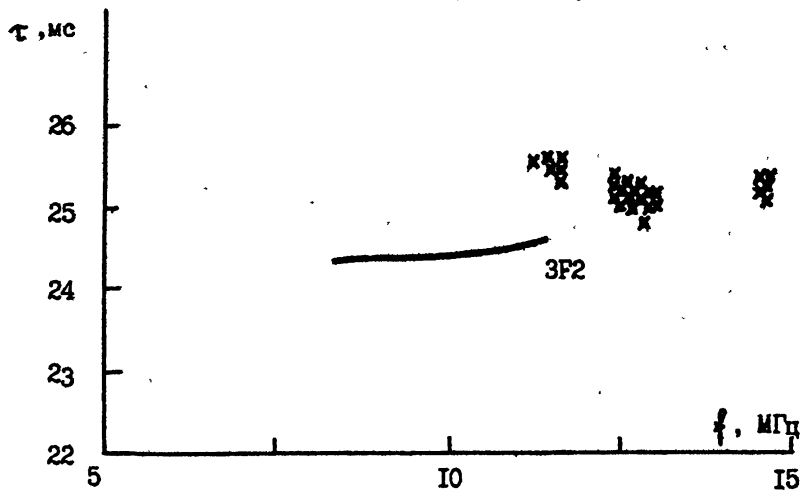


наблюдались дополнительные треки. На рис. 2.18а,б приведены примеры ионограмм ЕЗ для паузы и нагрева соответственно. Из рисунка видно, что дополнительная мода появляется на частотах выше МНЧ скачкового распространения. Малые времена развития дополнительной моды ( $t_{\text{н}} < 1$  мин) указывают на ее связь с возбуждением искусственных мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностей с поперечными размерами  $l_{\perp} = \lambda/2 \sin(\theta_s/2)$  (для  $\sim 15$  м и  $\theta_s \sim 30^\circ$ ,  $l_{\perp} \sim 30$  м), ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн. Полученные данные позволили исследовать динамику ракурсной моды (РМ) с течением времени суток. Так РМ начинали регистрироваться  $\sim$  в 22.40 мск в узкой подпосе частот  $\Delta f \sim 1$  МГц на частотах ниже МНЧ прямого сигнала. С течением времени расширялся диапазон частот РМ  $\Delta f \sim 1,8$  МГц в 23.33 мск до  $\Delta f \sim 3,1$  МГц в 00.30 мск, а сам рассеянный сигнал наблюдался на частотах выше МНЧ прямого сигнала (см. рис. 2.18а,б).

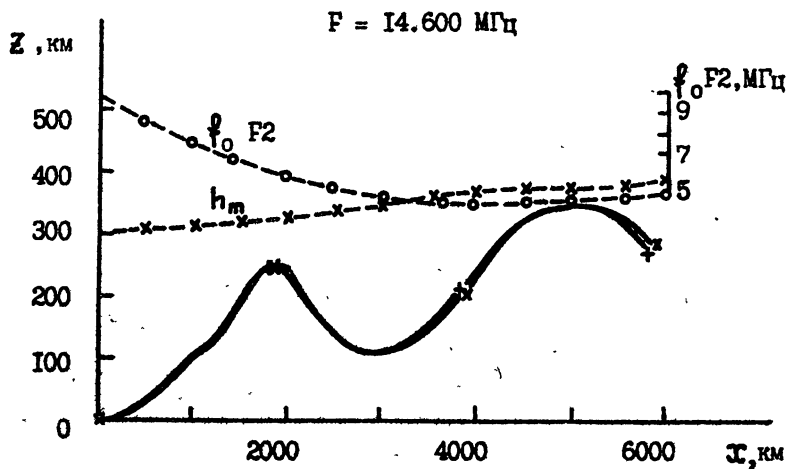
Примерно до 02.00 мск диапазон частот РМ и его положение на ионограмме ЕЗ относительно прямого сигнала остаются неизменными (падает лишь интенсивность сигнала и растет его диффузность). В период с 02.00 до 03.00 мск диапазон частот РМ сужается до  $\sim 1$  МГц, уровень сигнала значительно уменьшается, растет диффузность и он регистрируется на частотах  $f$  больше МНЧ прямого сигнала. После 03.00 мск рассеянный сигнал практически не наблюдался, что, по всей вероятности, связано с низкой эффективностью нагрева (критическая частота  $f_oF2$  становится меньше частоты волны накачки  $f_{\text{н, min}} = 4,8$  МГц).

Математическое моделирование показало, что в период наблюдения на частотах выше МНЧ прямого сигнала радиоволны на трассе Хабаровск - "Сура" распространяются в приподнятом ионосферном волноводе. Нагрев ионосферы станцией "Сура" приводит к образованию неоднородностей и выводу их энергии на поверхность Земли за счет ракурсного рассеяния. Иллюстрацией этому являются синтезированные на ЭВМ ионограммы, которые приведены на рис. 2.19а. Здесь представлена ионограмма прямого сигнала трассы Хабаровск-Темрик (сплошная линия) и ракурсной моды трассы Хабаровск-"Сура"-Темрик (крестики). Траектория ракурсной моды на участке трассы Хабаровск-"Сура" для частоты  $f = 14,6$  МГц

Хабаровск - "Сура" - Тонроук



a)



b)

Рис.2.19.

показана на рис. 2. 196. Здесь же приведены изолинии плазменных частот ионосферы вдоль трассы. Из рисунка видно, что на частотах выше МПЧ скачкового распространения реализуется волноводный механизм распространения, обусловленный захватом радиоволн в ИВК за счет рефракции на отрицательном градиенте электронной концентрации. Вывод радиоволн из ИВК на поверхность Земли возможен за счет ракурсного рассеяния на искусственных мелкомасштабных неоднородностях.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности управления дальним распространением КВ на частотах выше МПЧ скачкового распространения за счет вывода волноводных мод из приподнятого над Землей канала путем создания внутри канала искусственной области возмущения, содержащей ориентированные вдоль геомагнитного поля мелкомасштабные неоднородности, ответственные за ракурсное рассеяние радиоволн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оформулируем основные результаты работы:

1. Организована внутрисюжная сеть станций наклонного зондирования ионосферы в районах Дальнего Востока, Средней Азии, Европейской части СССР, оснащенная ионозондами с ЛЧМ сигналом.

2. Проведены измерения пространственной корреляции МНЧ, ННЧ на среднеширотных трассах протяженностью  $\sim 3$  Мм и 7 Мм при разнесении приемных пунктов вдоль и поперек трассы зондирования. Показано, что при разнесении на 1,4 Мм поперек трассы коэффициент пространственной корреляции МНЧ составляет  $\sim 0,77$ , а ННЧ  $\sim 0,84$ ; относительная ошибка пространственной экстраполяции МНЧ на расстояние 1,4 Мм равна  $\sim 5\%$ , а ННЧ  $\sim 9\%$ . При том же разнесении приемных пунктов вдоль трассы коэффициент пространственной корреляции МНЧ составляет  $\sim 0,93-0,98$ , а ННЧ  $\sim 0,7-0,9$ . Относительная ошибка пространственной экстраполяции МНЧ на расстояние 1,4 Мм равна  $\sim 5-10\%$ , а ННЧ  $\sim 13-19\%$ .

3. Методом наклонного ЛЧМ зондирования на среднеширотной трассе протяженностью  $\sim 4$  Мм проведена диагностика ионосферы во время солнечного затмения 22.07.1990 г. с фазой покрытия  $\sim 0,6-0,7$ . Показано, что во время затмения ННЧ и МНЧ уменьшались на 8-15% и 8% соответственно. Сделана редукция данных НЗ в  $N(h)$ -профили для в средней точке трассы. Получено, что во время затмения значения  $N(h)$  уменьшались на 6-8%.

4. Проведены эксперименты по сверхдальному ЛЧМ зондированию кольцевого ионосферного КВ канала на трассе протяженностью  $\sim 46$  Мм. Показано, что оптимальные условия для распространения КС возникают, когда угол  $\alpha$  между направлением трассы и линией терминатора составляет  $\sim 5^{\circ}-15^{\circ}$ . Диапазон частот КС  $\Delta f = 14-28$  МГц уменьшается с ростом угла  $\alpha$ . Прием КС прекращается при  $\alpha > 25^{\circ}-30^{\circ}$ . Обнаружено, что внутри диапазона  $f$  существует некоторая критическая частота  $f_k \sim 17-18$  МГц. Показано, что на частотах  $f < f_k$  КС формируется в основном волноводными модами распространения, а на частотах  $f > f_k$  - скачковыми и рикошетирующими модами.

5. Проведены исследования влияния ионосферных неоднородностей, возбужденных в ионосфере мощным КВ радиоизлучением, на ДЧМ многоскачковых трасс при наклонном ЛЧМ зондировании. Показано, что при ВЧ нагреве ионосферы в верхней точке траектории на ионограммах НЗ наблюдается диффузность в окрестности МНЧ. Частотная протяженность диффузности  $\sim 1,5$  МГц, диапазон задержки  $\sim 0,8$  мс. Времена развития эффекта  $t_n \sim 1$  мин и релаксации  $t_p \sim 2-3$  мин соответствуют временам развития и релаксации среднемасштабных неоднородностей с размерами  $l \sim 0,3-1,0$  км. Показано, что наличие искусственных междомасштабных магнитоориентированных неоднородностей с размерами  $l_1 = \lambda / 2 \sin(\theta_s / 2)$  ( $\theta_s$  - угол рассеяния,  $\lambda$  - длина волны) приводит к формированию ракурсных мод на ионограммах НЗ. Разработан метод численного моделирования ионограмм НЗ в горизонтально-неоднородной ионосфере с учетом ракурсного рассеяния радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях.

6. Экспериментальным путем с использованием ЛЧМ диагностики ионосферного КВ канала показана возможность управления дальним распространением КВ на частотах выше МНЧ скачкового

распространения путем вывода волноводных мод из ИВК на поверхность Земли за счет ракурсного рассеяния радиоволн на искусственных ионосферных мелкомасштабных неоднородностях. Определены частотные и временные характеристики ракурсной моды сигнала в точке приема.

7. Показано, что адаптивная система связи (на среднеширотной радиолинии протяженностью 3 Мм), выбор частот в которой осуществляется на основе анализа данных НЗ ионосферы ЛЧМ сигналом, обеспечивала безошибочный прием информационного сообщения при весьма низкой мощности излучения связанного сигнала (~ 5 Вт). ЛЧМ ионозонд не создавал помех действующей радиолинии.

8. Разработаны временной и частотный методы синхронизации приемной и передающей частей ЛЧМ ионозонда, проверенные на радиолиниях протяженностью от 0,22 до 7,5 Мм. Разработан метод измерения абсолютного времени ионосферного распространения КВ сигнала с использованием ответчика синхроимпульсов на приемном конце радиолинии.

9. Рассмотрена возможность создания фазового и адаптивного ионозонда с использованием широкополосных сигналов с комбинированными видами модуляции.

## Л и т е р а т у р а

1. Иванов В. А., Фролов В. А., Шумзев В. В. Зондирование ионосферы непрерывными ЛЧМ-радиосигналами. //Изв. вузов. Радиофизика. -1986. -т. 29. №2. -с. 235-237.
2. Ерухимов Л. М., Иванов В. А., Митяков Н. А. и др. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях. //Препринт N258, НИРФИ, Горький, 1988.
3. Брынько И. Г., Галкин И. А., Грозов В. П. и др. Ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом. //Препринт N13-86, СибИЗМИР, Иркутск, 1986.
4. Poole A. W. V. Advanced soundin. The FM/CW alternative//Radio Sci. -1985, v. 20, n. 6-p. 1609-1616.
5. Fenwick R. B. Oblique chirrsounder the HF communications test set. //Communications News-1974-v. 11, n. 2, p. 32-33.
6. Богута Н. М., Иванов В. А., Кульчицкий В. А. и др. Радиофизический приемно-передающий комплекс "Дымер" для исследования ионосферы и распространения радиоволн. //Препринт N306, НИРФИ, Горький, 1990.
7. Иванов В. А. Особенности распространения коротковолновых ЛЧМ-радиосигналов в регулярной ионосфере. //Марийский политех. ин-т, Йошкар-Ола, -Деп. в ВИНТИ N3064-85, 1985, -41 с.
8. Shareil W. M., Green T. C., Martin P. E. Interferometric direction finding on an FM/CW ionosonde//Radio Sci. -1972-v. 7, n. 2, p. 251-256.
9. Островский И. Я. Азимутальные характеристики КС в зимний период //Геомagn. и аэрoномия, 1972, т. 12, N 4 , с. 763.
10. Бочкарев Г. С., Урядов В. П., Эрм Р. Э. Методика расчета геометрии ракурсного рассеяния радиоволн на магнитоориентированных ионосферных неоднородностях. //в кн. Распространение радиоволн в ионосфере, ИЗМИРАН, М., 1989, с. 43.
11. Цедиллина Е. Е. Дискретная структура кругосветных сигналов. // Геомagn. и аэрoномия, 1980, т. 20, N1, с. 148.
12. Крашенинников И. В., Лобачевский Л. А. и др. Оценка высотного распределения  $N(h)$  по ионограммe E3 ионосферы. //Геомagn. и аэрoномия, 1983 т. 23, N5, с. 727.

13. Reilly M.H. Ionospheric true high profiles from oblique ionograms // Radio Sci., 1985, v.20, n.3, p.280.
14. Бенедиктов Е. А. Особенности коэффициента потерь в D-области ионосферы // в кн. Полярная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи, АН СССР, Апатиты, 1978, с.169.
15. Иванов В. А. , Игнатьев Ю. А. , Фролов В. А. и др. Экспериментальные исследования амплитудных характеристик сигналов, прошедших искусственно возмущенную нижнюю ионосферу. //Радиофизика, 1988, т.31, N12, с.1527.
16. Гуревич А. В. , Цедилина Е. Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. // М. Наука, 1979, 248 с.
17. Кравцов Ю. А. , Тинин М. В. , Черкашин Ю. Н. О возможных механизмах возбуждения ионосферных волновых каналов. //Геомагн. и астрономия. 1979, т.19, N5, с.769.
18. Гуревич А. В. , Ерухимов Л. М. , Ким В. Ю. и др. Влияние рассеяния на захват радиоволн в ионосферные волновые каналы. // Радиофизика, 1975, т.18, N9, с.1305.
19. Ерухимов Л. М. , Матвигин С. Н. , Урядов В. П. К вопросу о распространении радиоволн в ионосферном волновом канале. // Радиофизика, 1975, т.18, N9, с.1297.
20. Гетманцев Г. Г. , Ерухимов Л. М. , Митяков Н. А. и др. Ракурсное рассеяние коротковолновых радиосигналов на атмосферных неоднородностях. // Радиофизика, 1976, т.19, N12^ с.1909.

# СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Введение	3
1. Сетевой ЛЧМ-ионозонд и перспективы его дальнейшего развития	4
1.1. Автоматизированный ЛЧМ-ионозонд для ВЗ, НЗ и ВВЗ ионосферы. Адаптация к условиям распространения	4
1.2. Фазовый ЛЧМ-ионозонд	10
1.3. Методы синхронизации разнесенных частей ЛЧМ-ионозонда, определения абсолютного времени распространения КВ-сигнала на трассе	14
2. Диагностика ионосферы с помощью сети станций наклонного ЛЧМ-зондирования	19
2.1. Пространственно-временная корреляция МНЧ и ННЧ. Экстраполяция на близлежащий регион и краткосрочное прогнозирование параметров ионосферного КВ-радиоканала	19
2.2. Сверхдальнее ЛЧМ зондирование как метод диагностики кольцевого ионосферного КВ канала	28
2.3. Вариации параметров КВ-радиолинии протяженностью ~4 Мм в период солнечного затмения 22 июля 1990 г. Редукция ионограмм НЗ в N(h)-профили для средней точки трассы	34
2.4. Влияние ВЧ нагрева ионосферы на ДЧК трасс различной протяженности	38
2.5. Использование ЛЧМ-ионозонда в адаптивной среднеширотной радиолинии КВ связи протяженностью 3 Мм	43
2.6. Предварительные результаты ВВЗ среднеширотной ионосферы непрерывными ЛЧМ-сигналами	46
2.7. Управление дальним распространением КВ за счет модификации ионосферы мощным радионалучением	47
Заключение	51
Литература	54



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛЧМ КОМПЛЕКС В СЕТИ СТАНЦИЙ НАКЛОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ ЕСТЕСТВЕННОЙ И  
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИОНОСФЕРЫ

---

Подписано в печать 15.05.91 г. Формат 60 x 84/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 3,54 усл. п. л.  
Заказ 5169. Тираж 120. Бесплатно.

---

Отпечатано на ротапринтере НИРФИ