

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 236

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ,
ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

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

Горький 1987

Ерухимов Л.М., Иванов В.А.⁺ Митяков Н.А.
Урядов В.П., Фролов В.А., Шумаев В.В.⁺

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН
ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ //
Прецепт № 236. - Горький: НИРФИ. - 1987. - 60 с.

УДК 621.371.25

Предложен метод зондирования ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением, радиосигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Представлены результаты экспериментальных исследований модифицированной ионосферы методами вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) зондирования с помощью ЛЧМ ионозонда, обладающего высокой разрешающей способностью по частоте и высоте. Обнаружены новые эффекты, в том числе: усиление луча Педерсена, образование искусственного фокусирующего плазменного зеркала в спорадическом слое E_s, широкополосное ослабление пробных сигналов при НЗ (и ВЗ) модифицированной ионосферы, возникновение дополнительных следов (сигналов бокового отражения) на ионограммах ЛЧМ ВЗ во время работы нагревного передатчика, расположенного в 110 км от ЛЧМ ионозонда, влияние перемещающихся ионосферных возмущений на искусственную диффузность отраженных от ионосферы сигналов. Дана интерпретация полученных результатов.

⁺ Сотрудники Марийского политехнического института

В В Е Д Е Н И Е

При воздействии на ионосферную плазму пучком мощных радиоволн в ионосфере возбуждаются искусственные неоднородности различных масштабов от долей метра до десятков километров, оказывающие существенное влияние на распространение КВ и УКВ. Со времени первых экспериментов по нагреву ионосферы мощным КВ радиоизлучением получено большое число данных, значительно расширивших наше понимание условий образования искусственной ионосферной турбулентности, динамических процессов в ионосфере, получены сведения о параметрах неоднородностей, об их влиянии на распространение радиоволн различных диапазонов частот. Вместе с тем, использование для диагностики области возмущения (ОВ) пробных волн на фиксированных частотах, отсутствие современных средств диагностики, обладающих высокой разрешающей способностью по высоте и частоте, существенно ограничивает возможности исследования ОВ.

В последние годы, однако, появилась возможность использования для диагностики ОВ широкополосного панорамного зондирования ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда, обладающего высокой помехозащищенностью и достаточно высокой разрешающей способностью $\sim 1-5/$. Применение для лоцирования ОВ сигналов с линейной частотной модуляцией в широком диапазоне частот дает возможность оперативно получать более полные сведения о частотных характеристиках эффектов воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением, в частности, в непосредственной близости от возмущающего передатчика.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных совместно НИРФИ и Марийским политехническим институтом методами вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) зондирования ионосферы, модифицированной мощным КВ радиоизлучением. Наблюдения проводились в период с 1980 по 1986 гг. с использованием как импульсных средств зондирования на фиксированных частотах, так и с помощью сигналов с линейной частотной модуляцией (в широкой полосе частот непрерывного излучения) — первого в СССР ЛЧМ ионозонда.

Работа состоит из пяти разделов. В первом из них дается общая характеристика проведенных экспериментов по ВЗ и НЗ возмущенной ионосферы на трассах Зименки (Горьковская область) - Йошкар-Ола и Киев - Йошкар-Ола с использованием двух нагревных стенодов: в поселках Зименки и Васильсурск Горьковской области.

Во втором разделе рассматриваются вопросы, связанные с генерацией крупномасштабных возмущений электронной концентрации в E - и F-областях ионосферы. Представлены новые экспериментальные результаты по обнаружению сигналов бокового отражения, исследованию широкополосного ослабления при ЛЧМ НЗ модифицированной ионосферы, усиления луча Педерсена, эффектов, возникающих при модификации спорадического слоя E_s.

В третьем разделе обсуждаются эффекты, обусловленные влиянием среднemasштабных искусственных ионосферных неоднородностей на диффузность отраженных сигналов при НЗ ионосферы. Сделаны оценки параметров неоднородностей, ответственных за малоугловое рассеяние волн.

В четвертом разделе представлены некоторые результаты исследования аномального поглощения при ВЗ модифицированной ионосферы, полученные с помощью ЛЧМ ионозонда.

В пятом разделе представлены результаты анализа статистических характеристик КВ сигналов на трассах наклонного зондирования в условиях модификации ионосферы мощным радиоизлучением.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

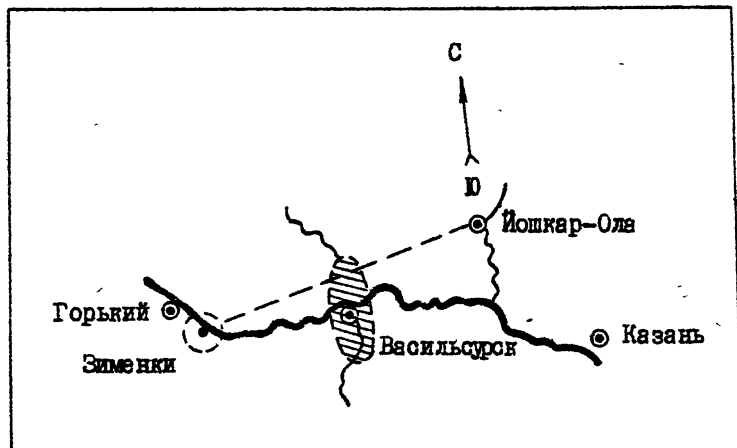
I. Общая характеристика проведенных экспериментов

Эксперименты по вертикальному зондированию (ВЗ) ионосферы, модифицированной сигналами мощных КВ передатчиков, были начаты в сентябре 1980 г. в поселке Зименки Горьковской области, где располагался нагревной стенд НИРФИ, и были продолжены в марте-апреле 1983 г., январе 1984 г. и мае 1985 г. Наблюдения проводились в дневные часы с 09.00 до 16.00.

В экспериментах 1980 г. нагревной передатчик работал на частоте $f_H = 4,6$ МГц с эффективной мощностью $P_E \approx 12$ МВт, а в экспериментах 1982-1985 гг. на частоте $f_H = 5,75$ МГц с $P_E \approx 20$ МВт. Нагрев ионосферы был периодическим: длительность рабочего цикла и

паузы составляли либо по 10, либо по 5 минут.

В мае 1985 г. одновременно с нагревным стендом в п. Зименки включался стенд "Сура" в п. Васильсурск /6/, расположенный примерно в 110 км к востоку от п. Зименки. Удаленный передатчик работал на частоте $f_H = 4,8$ МГц с $P_G \approx 150$ кВт. Целью последних экспериментов, проведенных в дневные часы (с 09.00 до 16.00 L T), было изучение сигналов бокового отражения (СВО) от области возмущения (ОВ) над удаленным передатчиком. Геометрия этого эксперимента представлена на рис. I.I.



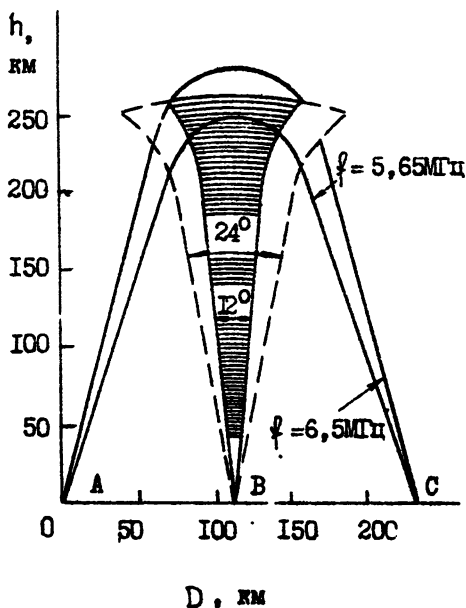
Р и с. I.I

Здесь же изображены диаграммы направленности антенны нагревного стенда "Сура" и диагностической ЛЧМ аппаратуры, расположенной в п. Зименки. В наблюдениях 1980-1984 гг. диагностический ЛЧМ ионозонд работал в узком диапазоне частот $\Delta f = 100$ кГц с $P_H \approx 50$ Вт, обеспечивая при этом разрешающую способность по времени $\sim 0,5$ с и разрешающую способность по высоте $\sim 1,5$ км. В 1980 г. излучение осуществлялось на частоте $f = 4,3 \pm 0,05$ МГц, в 1982 г. и 1983 г. - на частоте волны накачки, т.е. $f = 5,75 \pm 0,05$ МГц. В 1984 г. передатчик пробной волны работал на частотах $f = 5,1 \pm 0,05$, $f = 6,2 \pm 0,05$ и $f = 2,1 \pm 0,05$ МГц. В результате этих эксперимен-

тов были получены данные об изменениях статистических характеристик флуктуаций амплитуд пробных сигналов, смещения точки отражения волны накачки, об искусственной диффузности. В 1985 г. применялось широкополосное ВЗ модифицированной ионосферы ЛЧМ сигналами. При этом были исследованы частотные характеристики флуктуаций амплитуд, аномального и широкополосного ослабления, обнаружен эффект образования плазменного зеркала в спорадическом слое E_s .

Исследование ОВ методом наклонного зондирования (НЗ) проводилось на двух трассах различной конфигурации по отношению к нагревному стенду "Сура". Это трассы Зименки - Иошкар-Ола и Киев - Иошкар-Ола. Как показали расчеты на ЭМ, трасса Зименки - Иошкар-Ола была оптимальной для исследования ОВ методом НЗ, т.к. траектория моды $1F$ пробного сигнала пересекала ее в горизонтальном направлении, а высокочастотная часть моды $2F$ - в вертикальном. Причем значительная часть траектории пробных волн "заходила" в ОВ.

Исследования на данной трассе проводились в несколько этапов: в октябре 1982 г., в мае 1983 г., в апреле 1984 г. и феврале 1986 г.



Р и с. I.2

На первых трех этапах осуществлялось импульсное зондирование ОВ на частотах $f = 5,65$, $f = 6,5$ и $f = 7,5$ МГц импульсами длительностью $\tau_n = 100$ мкс, мощностью $P_n \approx 30$ кВт. Модификация ионосферы осуществлялась с помощью стенда "Сура" на частоте $f_n = 5,8$ МГц с $PG = 50$ кВт. Эксперименты проводились с 16.00 до 24.00 LT. На рис. I.2 приведены результаты траекторных параметров ионосферы в период экспериментов 1982 г. и обыкновенной моды пробного сигнала. Излучение сигнала производилось из пункта А (п.Зименки), а прием осуществлялся в пункте С (г.Иошкар-Ола). Ширина диаграммы направленности антенны нагревного стенда (пункт В) составляла 12°

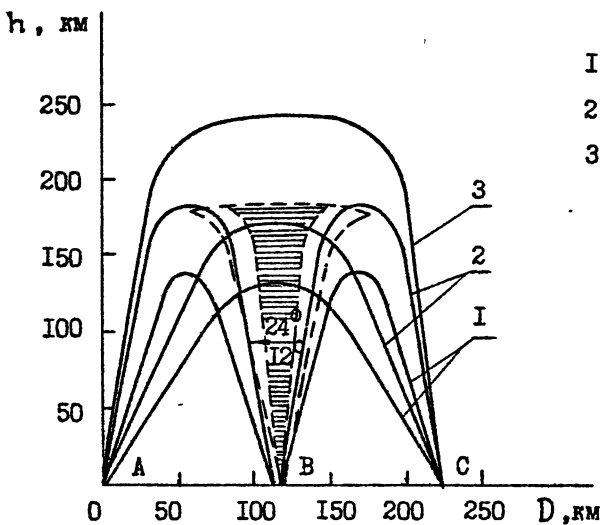
или 24° . В этой серии экспериментов пробные сигналы пересекали ОВ на высотах $h > 200$ км, что позволило исследовать ее фокусирующие свойства и влияние на статистические характеристики.

В феврале 1986 г. проводилось широкополосное зондирование ОВ непрерывными ЛЧМ сигналами, а в отдельных сеансах импульсными ЛЧМ сигналами на частоте $f = 3,55 \pm 0,05$ МГц длительностью 1 с. Мощность пробного сигнала составляла $\sim 50 \dots 80$ Вт. Модификация ионосферы осуществлялась на $f_H = 4,8$ МГц с $PG \approx 50$ МВт, $PG \approx 100$ МВт и $PG \approx 150$ МВт. Наблюдения проводились в дневное время с 09.00 до 16.00 ЛТ. Траектории пробных сигналов для ряда частот из диапазона зондирования и характерных для периода наблюдений параметров ионосферы представлены на рис. I.3. На рис. I.3а приведены траектории для обыкновенной, а на рис. I.3б - для необыкновенной компонент сигнала.

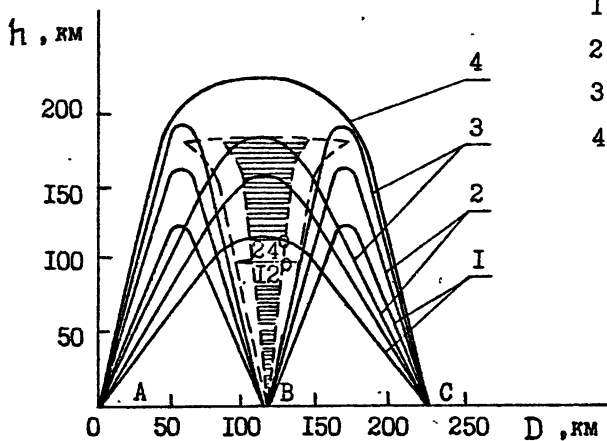
Анализ ДЧК и АЧК различных мод пробного сигнала позволил обнаружить ряд эффектов: широкополосное ослабление сигнала НЗ, усиление луча Педерсена, искусственную диффузность в присутствии перемещающихся ионосферных возмущений (ПВ).

На трассе Киев - Йошкар-Ола передатчик волны накачки был значительно смещен относительно центра трассы к пункту приема. Эксперименты проводились в марте-апреле 1982 г. и апреле-июле 1983 г. с 16.00 до 24.00 ЛТ. Источником пробных сигналов служил передатчик "Вяз", расположенный в г. Киеве. Пробные волны излучались периодически на четырех фиксированных частотах: $f = 10,8$, $f = 16,8$, $f = 18,2$ и $f = 19,85$ МГц в импульсном режиме ($\tau_H = 100$ мкс) и режиме несущей с $P_H = 30$ кВт. Передатчик нагревного стенда работал на ряде частот в диапазоне $f_H = 5,8 \dots 9,3$ МГц с $PG = 50$ МВт. На рис. I.4 приведены геометрия трассы и траектории распространения сигналов $f = 10,8$ МГц, рассчитанные на ЭВМ для условий экспериментов 1982 г. Видно, что мода 3F пересекает ОВ в диапазоне высот $200 \dots 300$ км, а мода 2F - на высотах $130 \dots 180$ км. В этих экспериментах исследовалось влияние ОВ на статистические характеристики пробных сигналов и фокусирующие свойства ОВ.

В общей сложности было проведено и обработано около 2500 сеансов наблюдений. Для обработки и анализа записей были разработаны алгоритмы, реализованные на базе микро-ЭВМ.

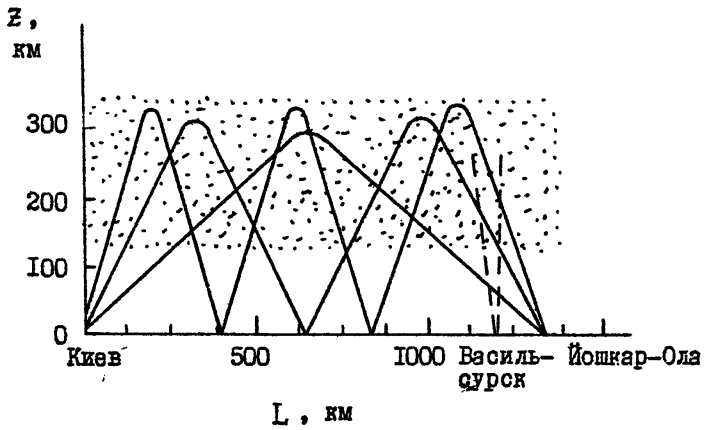
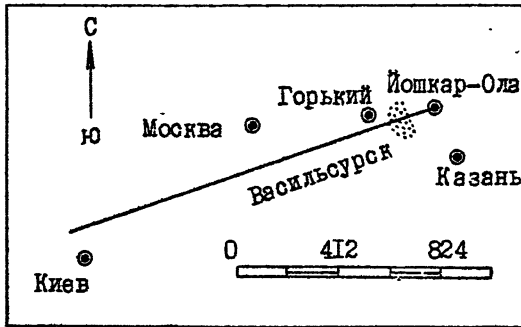


а)



б)

Р и с. 1.3



Р и с. I.4

2. Эффекты генерации крупномасштабной искусственной ионосферной турбулентности

Одним из важных эффектов, возникающих при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением, является генерация крупномасштабных неоднородностей (КН). Исследования КН посвящено значительное число работ (см. например обзоры /7, 8/). Новые сведения о структуре КН и их влиянии на распространение дециметровых радиоволн удалось получить благодаря использованию для диагностики СВ непрерывных широкополосных ЛЧМ сигналов /9/.

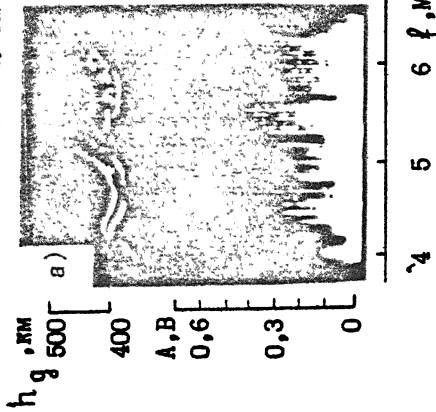
Одним из таких результатов является обнаружение сигналов бокового отражения (СВО) при ВЗ возмущенной ионосферы.

Для исследования СВО в широком диапазоне частот были проведены эксперименты, краткое описание которых приведено в разд. I. Напомним, что модификация ионосферы осуществлялась на частоте $f_n = 4,8$ МГц с РГ ≈ 150 МВт с помощью станда "Сура", расположенного около п. Васильсурск Горьковской области (см. рис. I. I). Диагностика ионосферы методом ВЗ производилась с помощью ЛЧМ ионозонда непрерывного действия, который находился примерно в 110 км от станда "Сура", в п. Эменки (рис. I. I). При вертикальном нагреве ионосферы сигналами мощного СВ передатчика станда "Сура" на ионограммах ВЗ в п. Эменки, на частотах $f \sim f_n$ и выше основного следа примерно на 30 км, появлялся дополнительный след, который затем "распространялся" на большие и меньшие высоты и частоты. Иллюстрацией эффекта СВО является рис. 2. I, на котором представлены различные случаи СВО. Обычно наблюдались дополнительные следы СВО трех типов: первый тип - параллельные друг другу следы в достаточно широком диапазоне частот (рис. 2. Iа), второй тип - параллельные следы в более узком диапазоне частот (рис. 2. Iб) и третий тип - множественные следы СВО (рис. 2. Iв). Дополнительные следы возникали за время $\tau_n \sim 0,5 \dots 1$ мин.

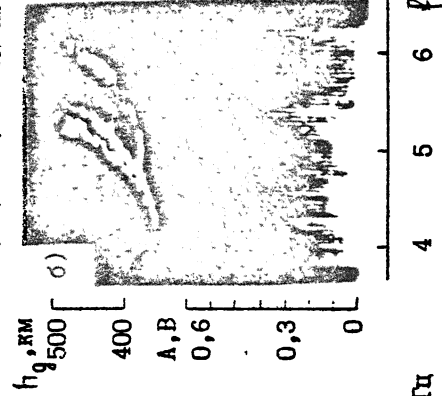
В приемной ЛЧМ аппаратуре имелась возможность разделять принимаемый сигнал по модам распространения, поэтому на рис. 2. 2, приведены для сравнения АЧХ*) обыкновенной компоненты основного отраже-

*) Здесь и в дальнейшем на АЧХ уровень амплитуды 0 дБ соответствует 10 мВ на выходе приёмной аппаратуры.

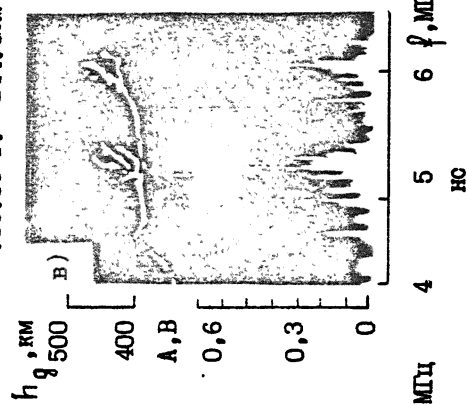
20.05.85 г. 14ч.49м



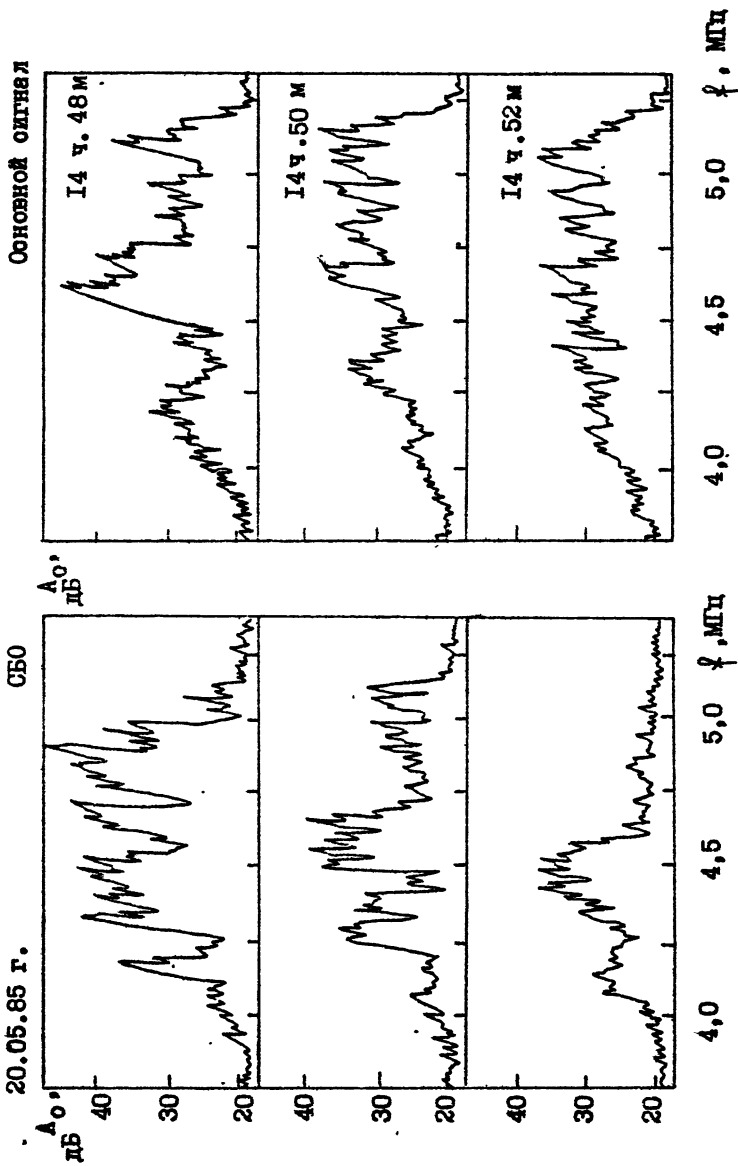
24.05.85 г. 11ч.24м



20.05.85 г. 14ч.42м



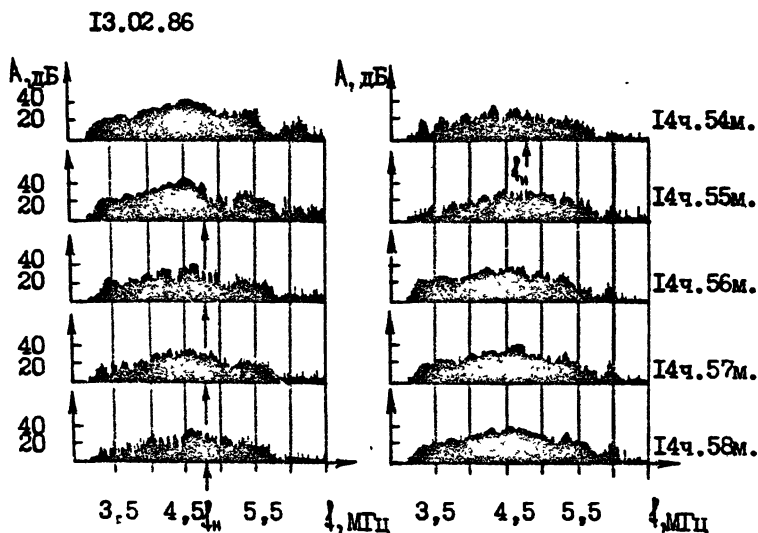
Р и с. 2.1



ния (рис.2.2б) и СВО (рис.2.2а) для диапазона частот 4...5,5 МГц на стадии релаксации процесса возмущения. Можно видеть, что в момент выключения волны накачки уровень СВО был по величине близок к уровню основного отражения, а на отдельных частотах даже превышал его. Это позволяет сделать вывод о том, что СВО является результатом "зеркального" отражения пробной волны от крупномасштабных искусственных неоднородностей над станцией "Сура". Именно по этой причине эти сигналы мы назвали сигналами бокового отражения. Условия зеркального отражения возникают в вершине первого скачка пробного ЛЧМ радиосигнала (диаграмма направленности антенной системы ЛЧМ ионозонда достаточно широкая) из-за рефракционного отклонения радиоволн на крупномасштабных искусственных неоднородностях. На определяющую роль для СВО крупномасштабной искусственной ионосферной турбулентности указывают также процессы их релаксации. Релаксация СВО начинается на высоких частотах, а на частотах $f \sim f_n$ СВО за время $t \sim 5$ мин не успевают релаксировать. Полная релаксация СВО происходит за время $\tau_n \sim 7...10$ мин, что соответствует времени релаксации неоднородностей с масштабами l до десятка километров.

В экспериментах по наклонному зондированию ионосферы, возмущенной сигналами мощного КВ передатчика, с помощью непрерывных ЛЧМ сигналов был обнаружен эффект широкополосного ослабления. Этот эффект достаточно регулярно проявлялся на амплитудно-частотных (АЧХ) и дистанционно-частотных (ДЧХ) характеристиках односкачковой моды (IF) пробного сигнала на трассе Зименки - Иожкар-Ола. Иллюстрацией его служит рис.2.3, на котором приведены примеры изменения характера АЧХ моды IF при включении и выключении нагревного передатчика. К возмущенным условиям относятся лишь те АЧХ, на которых стрелками отмечена частота волны накачки. Одновременно с ослаблением амплитуд сигналов моды IF происходило увеличение глубины и скорости замираний, при изменении зондирующей частоты, что хорошо видно на рис.2.3. Здесь же можно заметить, что эффекты воздействия начинают развиваться на высотах отражения волны накачки и проявляются в некотором увеличении флуктуаций и ослаблении амплитуды на частотах 4,8...5,2 МГц, а затем происходит увеличение флуктуаций и ослабление амплитуды на более низких и высоких зондирующих частотах. Вычисленная по времени задержки сигнала эффективная вертикальная скорость агента возмущения составляет величину $v_{эф} \sim 0,4...2$ км/с (см. также /10/). Селективный характер эффектов влияния мощного КВ излучения на ЛЧМ

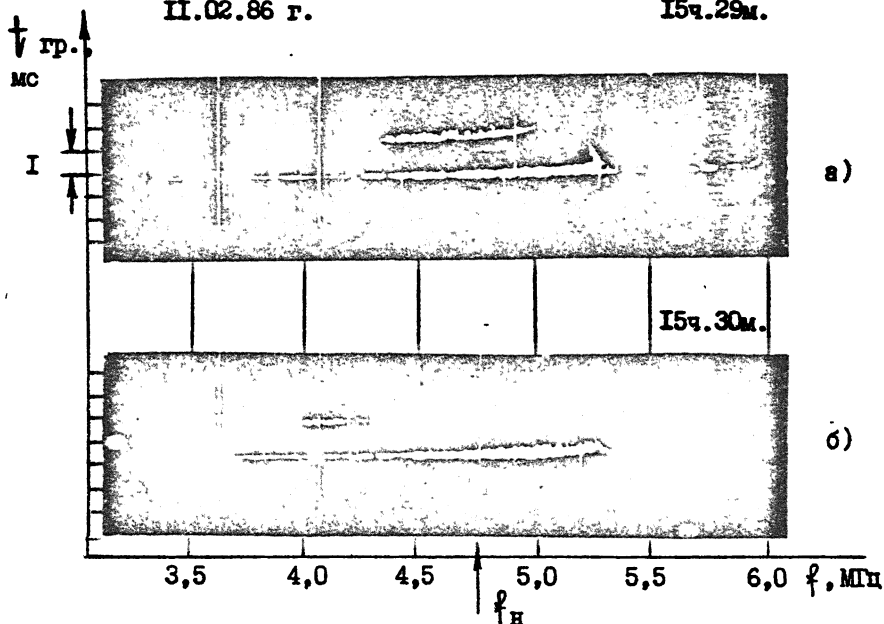
сигналы четко проявлялся и на ДЧХ. В качестве примера на рис.2.4а изображена ДЧХ принимаемого ЛЧМ сигнала, полученная за минуту перед включением нагревного стенда, а на рис.2.4б - ДЧХ, полученная в период нагрева. Из рисунков можно видеть исчезновение во время нагрева следов необыкновенной компоненты моды 1F, моды 2F на частотах $\sim 4,3...5,0$ МГц и подчеркивание следа моды 2F на частотах $\sim 4,0...4,3$ МГц.



Р и с . 2.3

Частотная зависимость ослабления, полученная для ряда последовательных циклов "нагрев-пауза" представлена на рис.2.5. Видно, что максимальной величины $\sim 4,5$ дБ эффект ослабления достигает на частотах $\sim 4...4,5$ МГц, которые отражаются в диапазоне высот $\sim 150...170$ км (см.рис.1.3).

Сигналы различных частот необыкновенной и обыкновенной моды испытывали одинаковое ослабление, если они отражались на одной высоте. Поэтому данное ослабление разумно будет связывать с дефокусирующими свойствами области возмущения (ОВ), обусловленными ростом электронной концентрации N на высотах $h < 200$ км, предсказанным /II/.



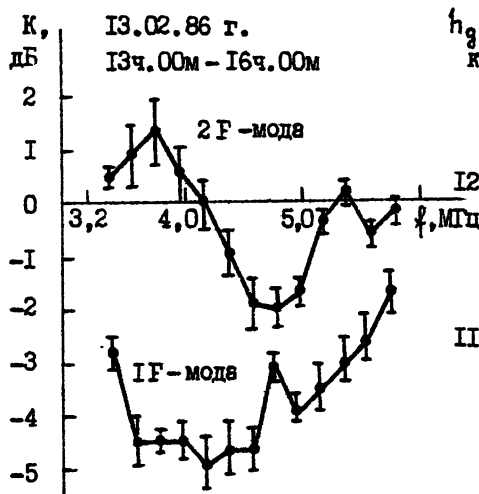
Р и с . 2 . 4

Независимым подтверждением этому выводу являются результаты вертикального импульсного ЛЧМ зондирования E-области ионосферы на частоте $f = 2,1 \pm 0,05$ МГц с высоким разрешением по высоте. В этих экспериментах исследовалось изменение действующей высоты h_g отражения при воздействии на ионосферу сигналами мощного КВ передатчика с $P_G \approx 20$ МВт. Было установлено [12], что при воздействии величина h_g уменьшалась примерно на 3...5 км. Пример изменения $h_g(t)$ представлен на рис.2.6. Расчеты на ЭМ показали, что уменьшение h_g на 3...5 км обусловлено ростом N на 1...3%.

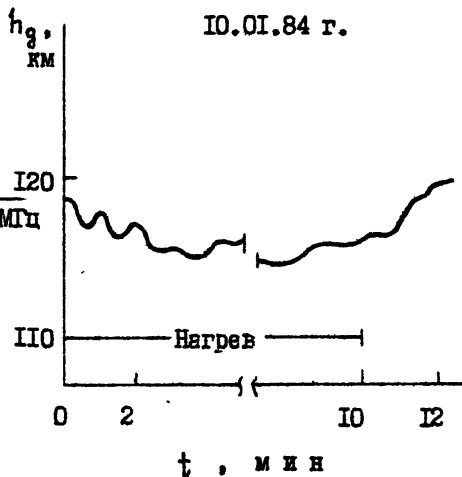
Полоса частот, где наблюдается широкополосное ослабление односкачковой моды сигнала, позволяет оценить вертикальный размер OB с положительным изменением N. По нашим оценкам он составляет $\Delta h \sim 40...50$ км.

На двухскачковой моде 2F пробного сигнала также наблюдался эффект широкополосного ослабления. Усредненная по нескольким циклам нагрева частотная зависимость ослабления моды 2F показана на рис.2.5, из которого видно, что при нагреве ионосферы, ослабление

моды 2F происходит лишь на частотах $f \geq 4,3$ МГц и оно меньше по величине, чем ослабление моды 1F. Это связано с тем, что на трассе Зименки - Йошкар-Ола траектория моды 2F проходит лишь по краю ОВ (рис. 1.3а), причем более глубоко в ОВ заходят сигналы высоких частот. Такая специфика распространения моды 2F на трассе Зименки - Йошкар-Ола позволила оценить угловой (горизонтальный) размер области положительного возмущения N, который по нашим оценкам составил $\sim 25^\circ$, что несколько больше размера диаграммы направленности антенны станда "Сура" (см. также /13/).



Р и с. 2.5



Р и с. 2.6

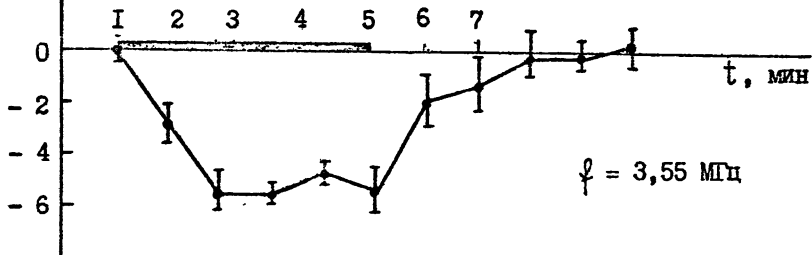
Были исследованы процессы развития и релаксации положительного возмущения N по величине ослабления моды 1F. На рис. 2.7 представлено изменение во времени ослабления для частоты $f = 3,55$ МГц. Здесь утолщенной линией отмечен интервал воздействия на ионосферу сигналами мощного КВ передатчика с $P_G = 150$ МВт и указаны границы доверительных интервалов измерений. Видим, что характерное время развития возмущения составляет $\tau_H \sim 1,5 \dots 2$ мин., а время релаксации - $\tau_P \sim 3 \dots 5$ мин.

Проводились исследования величины ослабления от мощности волны накачки. Примеры частотной зависимости ослабления моды 1F для мощностей волны накачки: 50, 100, 150 МВт представлены на рис. 2.8.

К, дБ

13.02.86 г.

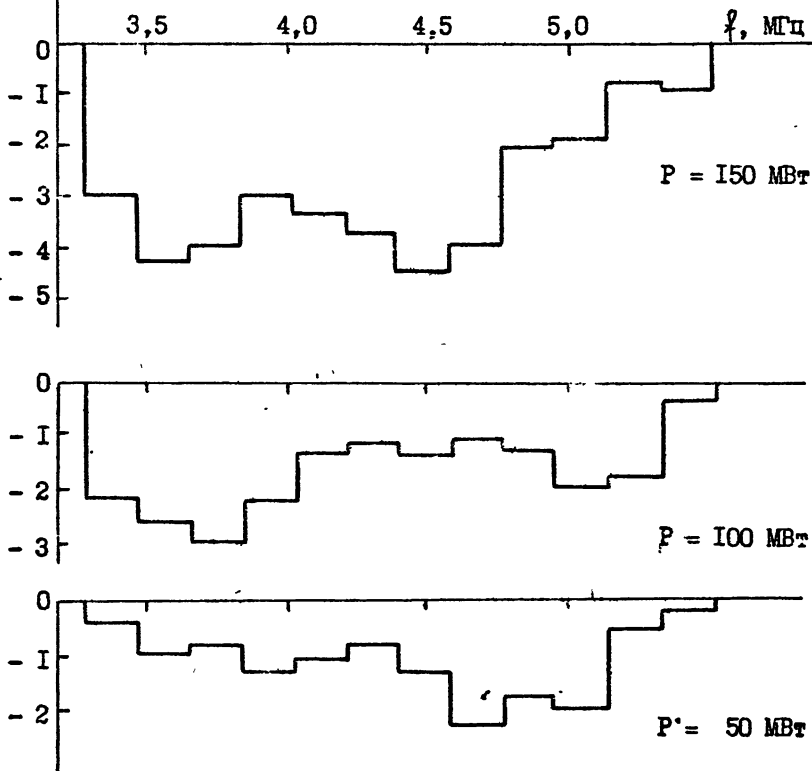
10ч.30м-11ч.30м



Р и с. 2.7

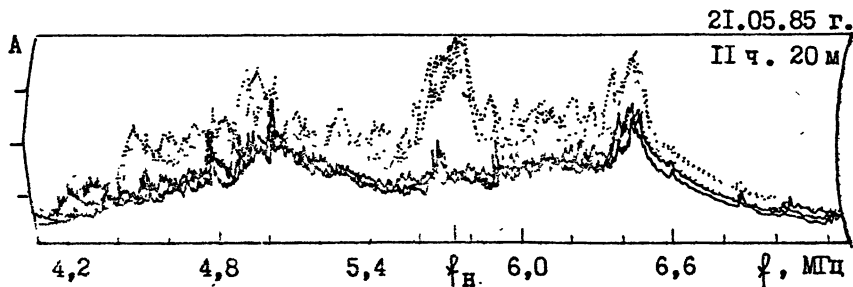
К, дБ

13.02.86 г.



При эффективной мощности излучения $P_G \approx 50$ МВт максимальная величина ослабления составляет $K(50) \approx 1$ дБ, при $P_G \approx 100$ МВт $K(100) \approx 2,5 \dots 3$ дБ, а при $P_G \approx 150$ МВт $K(150) \approx 4 \dots 4,5$ дБ. Усредненные по совокупности измерений данные свидетельствуют о том, что зависимость $K(P_{эф})$ в диапазоне изменения $P_{эф} = P_G = 50 \dots 150$ МВт близка к линейной функции K (дБ) = $\beta P_{эф}$ (МВт), где $\beta = -0,025$ дБ/МВт для частот порядка $\sim 3,5 \dots 4,5$ МГц.

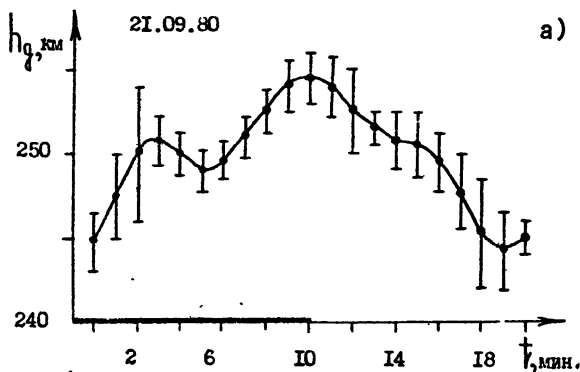
Дефокусировка пробных сигналов ОВ при вертикальном зондировании была обнаружена авторами /14/ и исследовалась нами наряду с аномальным ослаблением при вертикальном ЛЧМ зондировании ионосферы в экспериментах 1985 г. /5, 9/.



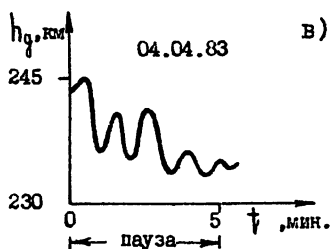
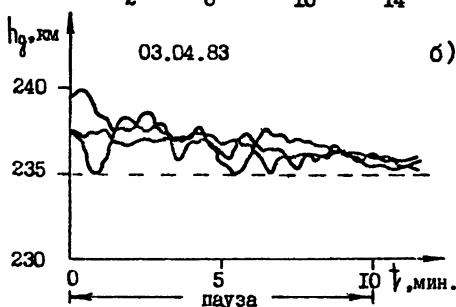
Р и с . 2.9

На рис. 2.9 в качестве примера приведены АЧХ (сплошные линии и точки отвечают сеансам зондирования во время нагрева и паузы соответственно) вертикального ЛЧМ зондирования для обыкновенной моды. Здесь отчетливо видны две компоненты ослабления сигнала: широкополосное (ШО) с $\Delta f \sim 1,5 \dots 2$ МГц на $1 \dots 1,3$ дБ и аномальное ослабление (АО) на $6 \dots 10$ дБ в сравнительно узкой полосе частот: $\Delta f \sim 0,5 \dots 0,6$ МГц около частоты волны накачки. Малая величина ШО в этих экспериментах обусловлена незначительной мощностью волны накачки, которая составляла лишь $P_G \sim 15 \dots 20$ МВт. Времена развития и релаксации (τ_n, τ_p) ШО и АО сильно отличались, причем времена τ_n, τ_p ШО при вертикальном зондировании были близки по величине к τ_n, τ_p ШО при наклонном зондировании.

Крупномасштабные отрицательные возмущения N регистрировались нами на высотах $h > 200$ км при вертикальном зондировании ОВ импульсными ЛЧМ сигналами в экспериментах 1980, 1983 и 1984 гг. /12, 15/, когда исследовались изменения h_q .



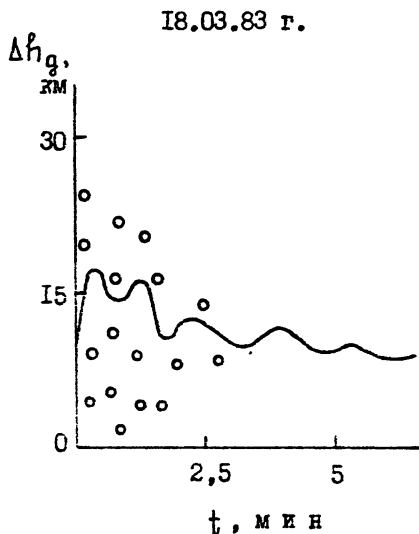
Р и с. 2.10



Характерные особенности изменений $h_g(t)$ приведены на рис. 2.10. На рис. 2.10а представлены данные, полученные в экспериментах 1980 г. при зондировании ОВ на частоте $f = 4,3 \pm 0,05$ МГц ($f_H = 4,6$ МГц), рис. 2.10б - 1983 г., когда $f = 5,75 \pm 0,05$ МГц. Следует отметить, что изменения $h_g(t)$ носили в основном нерегулярный характер, хотя их сглаженные значения позволяют говорить об определенных закономерностях. Действительно, как видно из рис. 2.10а и 2.10б сглаженные значения $h_g(t)$ при модификации ионосферы на $h \sim 240 \dots 260$ км возрастали за время $\tau_n \sim 4 \dots 6$ мин на $5 \dots 8$ км и релаксировали за $\tau_n \sim 6 \dots 7$ мин. Расчеты на ЭМ показали, что возрастанию f_g на $5 \dots 8$ км соответствует уменьшение N на $3 \dots 5\%$. Нерегулярность изменений h_g обусловлена влиянием на результаты измерений крупномасштабной турбулентности, которая также возбуждается при модификации ионосферы, о чем свидетельствуют описанные выше результаты наклонного зондирования.

Были обнаружены квазипериодические затухающие колебания h_g на стадии релаксации искусственного возмущения (рис.2.10в). Эти колебания имели период 0,5...1 мин и амплитуду до 5 км. Их мы связываем с релаксационными колебаниями возмущенной плазмы, которые предсказывались авторами /II/.

Известно, что искусственная ионосферная турбулентность ответственна за диффузность отражений при вертикальном зондировании ио-



Р и с . 2 . II

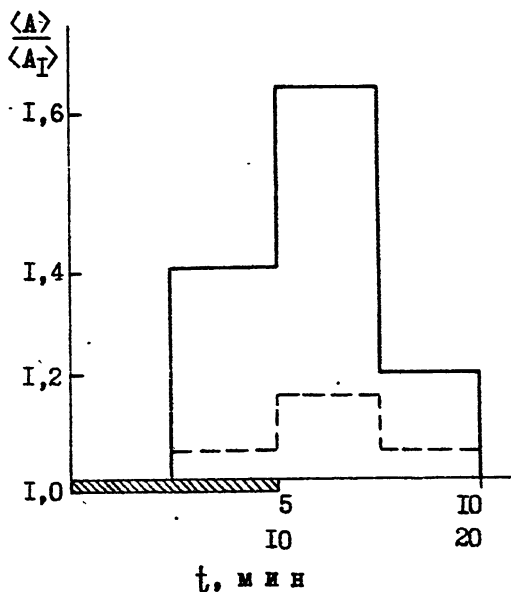
формуле $\Delta h_g = 8 \sqrt{\pi} \sqrt{2} L^{3/2} l^{-1/2} \delta N$. Например, для $L \approx 80$ км (величина L была определена по ионограммам ВЗ), $l \sim 10$ км получим, что диапазон высот $\Delta h_g \sim 10...20$ км обусловлен неоднородностями с $\delta N \sim 10^{-3} - 10^{-2}$.

Неоднородное плазменное образование на $h \geq 200$ км может проявлять фокусирующие свойства (см. напрмер /16,17/). На это обстоятельство нами было обращено внимание /18/ в экспериментах на трассе п.Зименки - Йошкар-Ола, когда НЗ ионосферы осуществлялось и в ночные часы на частотах $f = 5,65$, $f = 6,5$ и $f = 7,5$ МГц, радио-

носферы. На рис.2. II приведены результаты ВЗ ионосферы /12/ с разрешающей способностью $\sim 1,5$ км, полученные с помощью импульсных ЛЧМ сигналов на частоте $f = 5,75 \pm 0,05$ МГц на стадии релаксации области возмущения, создаваемой волной накачки на $f_n = 5,75$ МГц с $PG = 15...20$ МВт. Кружками на рис. 2. II отмечены диффузные отражения, занимавшие диапазон действующих высот $\Delta h_g \sim 10...20$ км. Известная связь между интервалом Δh_g и параметрами области отражения: масштабом слоя L , характерным масштабом неоднородностей l , средним квадратом относительных флуктуаций электронной концентрации $\delta N^2 \equiv \langle (\Delta N/N)^2 \rangle$ позволяет оценить δN или l по

волны которых пересекали ОВ на высотах $h_f > 200$ км (рис.1.2). В этих экспериментах фокусирующие свойства ОВ маскировались эффектом рассеяния пробных радиоволн на искусственных среднemasштабных ($h_f \sim 0,3 \dots 1$ км) неоднородностях.

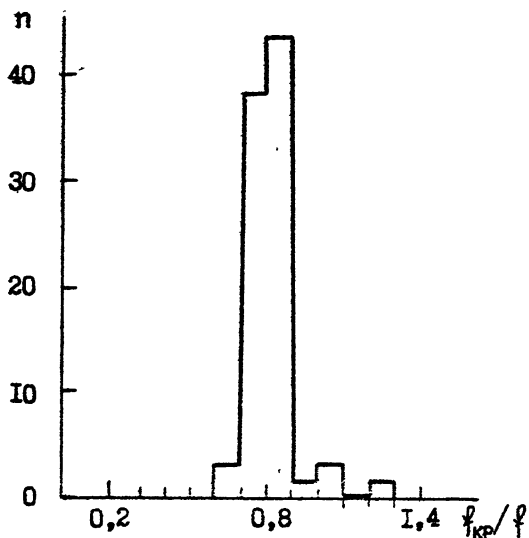
Для выделения фокусирующих свойств ОВ на $h_f > 200$ км была применена следующая методика обработки сигналов НЗ. Периоды нагрева и паузы делились на две равные части, в каждой из которых определялось среднее значение амплитуды пробного сигнала. Полученные значения нормировались на величину средней амплитуды в первую половину нагревного периода.



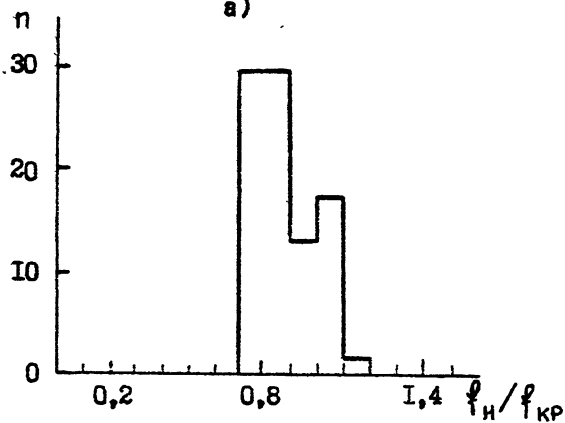
Р и с. 2.12

На рис.2.12 приведены нормированные, $\langle A \rangle / \langle A_1 \rangle$, значения средних амплитуд пробных радиоволн для 10-минутных (сплошные линии) и 5-минутных (пунктирные линии) сеансов нагрева и паузы. Рис.2.12 построен по 30 сеансам наблюдений (нагрев+пауза). Рост $\langle A \rangle / \langle A_1 \rangle$ к концу нагрева связан с проявлением фокусирующих свойств крупномасштабной ОВ ($h_f > 200$ км). При этом при 10-минутных циклах нагрева амплитуда $\langle A \rangle$ достигала более высоких значений, чем при 5-минутных сеансах. Это можно объяснить тем, что характерное время формирования глобальной ОВ при нагреве слоя F на $h_f > 200$ км полем мощной волны составляет $\tau \sim 6 \dots 10$ мин. Различия времени τ_n при ВЗ и НЗ объясняется разной мощностью воз-

мущающих ионосферу передатчиков. Увеличение амплитуды сигнала при выключении нагревного передатчика свидетельствует о релаксации среднemasштабных неоднородностей, на которых происходило рассеяние пробных сигналов. (см. также /19, 20/ и разд.3). Эффекты фокусировки зависели



а)



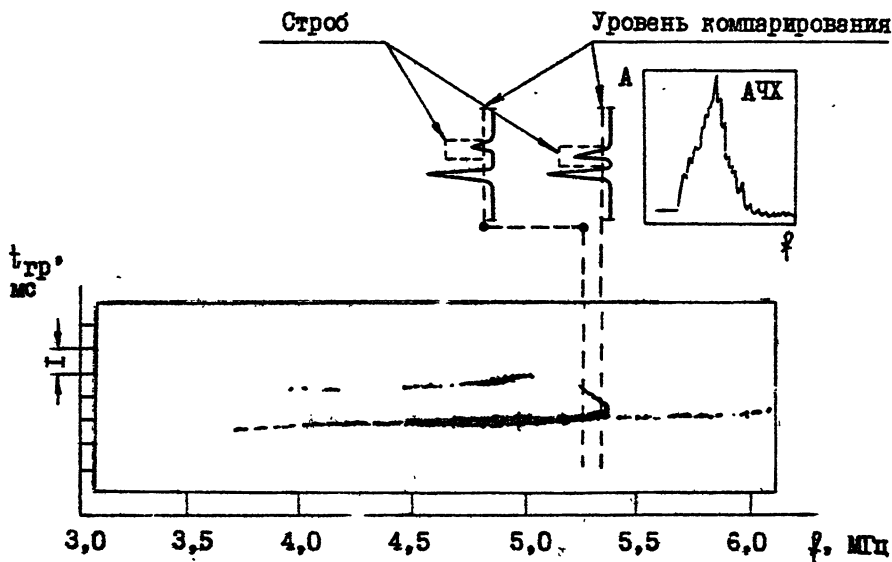
б)

Р и с. 2.13

от соотношения критической частоты $f_0 F 2$, частоты пробной волны f и нагревной волны f_n . Для сеансов с ярко выраженной фокусировкой были построены гистограммы отношения $f_0 F 2 / f$ (рис. 2.13а) и $f_n / f_0 F 2$ (рис. 2.13б). Приведенные данные позволяют заключить, что рассматриваемые эффекты имели место в тех случаях, когда значения $f \cos \theta$ (θ - угол падения пробной волны на ионосферу, $\cos \theta \sim 0,7 \dots 0,9$) и f_n были близки к $f_0 F 2$.

Оценка $\Delta N/N$ для рассмотренных случаев дает значения 10 ... 15% для 10-минутных сеансов нагрева и 5...10% для 5-минутных. Отсюда характерное время формирования области на $h > 200$ км с отрицательным возмущением N ($\Delta N/N = (\Delta N/N)_{\max} [1 - \exp\{-t/\tau_n\}]$) составляет ~ 10 мин при мощности волны накачки $P_G = 50$ МВт.

С генерацией крупномасштабной искусственной ионосферной турбулентности мы связываем обнаруженные нами эффекты усиления луча Педерсена /5/. Эти эффекты были исследованы благодаря тому, что в ЛЧМ аппаратуре непрерывного действия имелась возможность выделения с помощью стробирования сигнала верхнего луча и регистрации его АЧХ. Строб, внутри которого производился анализ АЧХ принимаемого сигнала, выставлялся от точки соединения нижнего и верхнего лучей в сторону больших задержек. Положение строба корректировалось при изменении условий в регулярной ионосфере. Методика стробирования показана на рис. 2.14, здесь же приведена АЧХ луча Педерсена. Максимум амплитуды на АЧХ соответствует точке слияния верхнего и нижнего лучей.



Р и с. 2.14

Рассматривалось влияние на АЧХ луча Педерсена вертикального нагрева ионосферы мощным НВ радиоизлучением на $f_H = 4,8 \text{ МГц}$ с $P_G \approx 150 \text{ МВт}$, осуществляемым в середине трассы Зименки - Йошкар-Ола. Для анализа отбирались только такие случаи, когда естественные возмущения в ионосфере отсутствовали.

Характерный пример изменения АЧХ верхнего луча приведен на рис. 2.15. На рис. 2.15а утолщенной линией отмечены интервалы времени, когда на ионосферу оказывалось воздействие мощным радиоизлучением. На рис. 2.15б приведены для сравнения две АЧХ, выбранные из представленных реализацией и относящиеся: одна к паузе (тонкая линия), а другая к нагреву (утолщенная линия). На рис. 2.16 приведена АЧХ трассы, отображающая состояние ионосферы в период проведения экспериментов, результаты которых представлены на рис. 2.15. Аналогичные АЧХ, полученные за другой день, представлены на рис. 2.17 с той лишь разницей, что на рис. 2.17а изображена АЧХ верхнего луча, когда, как и в предыдущем примере, нагрев ионосферы осуществлялся вертикальным излучением, а на рис. 2.17б, когда диаграмма направленности антенны возмущающего передатчика была отклонена от зенита на юг на 20° .

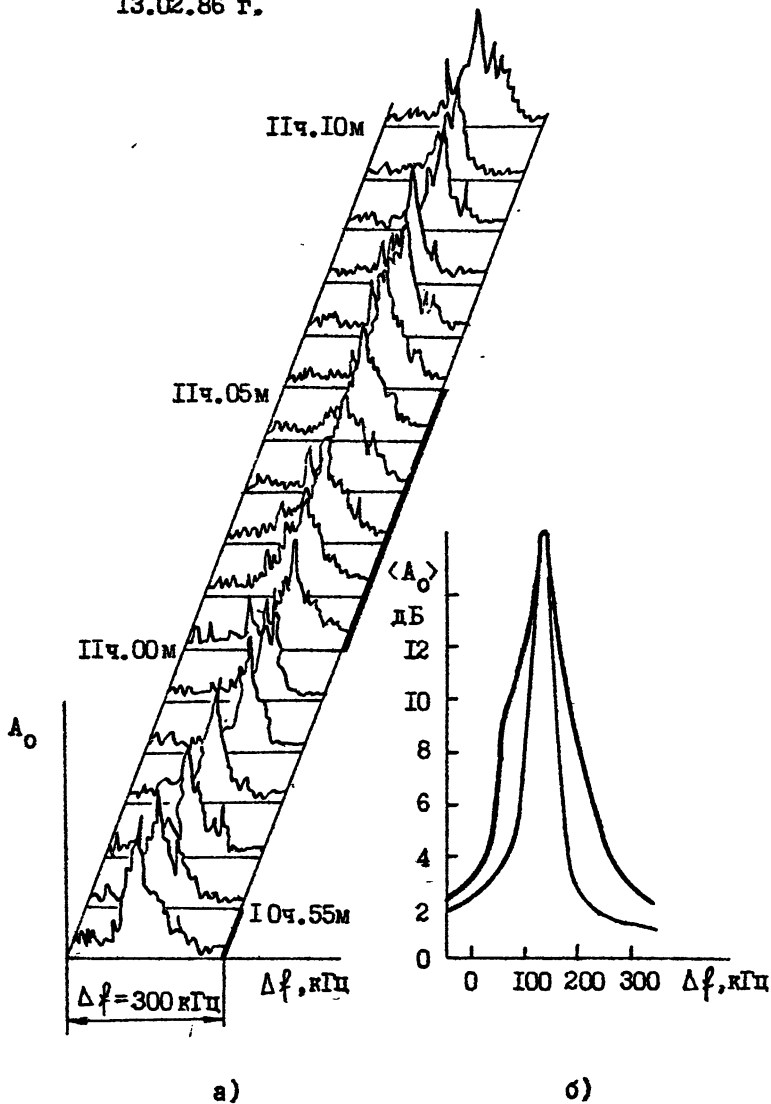
Из рассмотрения рис. 2.15 и рис. 2.17 видим, что при модификации ионосферы происходит увеличение амплитуды верхнего луча слева и справа от максимума. Увеличение частотного диапазона справа соответствует увеличению МПЧ трассы, которое в рассматриваемых примерах составляло $\sim 50 \text{ кГц}$. Увеличение амплитуды луча слева от максимума мы связываем с усилением луча Педерсена из-за каналирования его вдоль максимума слоя за счет образования флуктуационного волновода. На возможность такого механизма распространения верхнего луча было обращено внимание в работе [21]. Поскольку время развития эффекта усиления $\tau_H \sim 2 \dots 3 \text{ мин}$, а время релаксации $\tau_H \sim 3 \dots 5 \text{ мин}$, можно говорить о том, что волновод образован за счет крупномасштабных искусственных ионосферных неоднородностей.

Оценим в этой связи параметры неоднородностей, формирующих флуктуационный волновод. Для этого рассмотрим потенциальную функцию $U(f)$, которая определяет радиальную компоненту E_{\perp} поля распространяющейся в ионосфере радиоволны [22]:

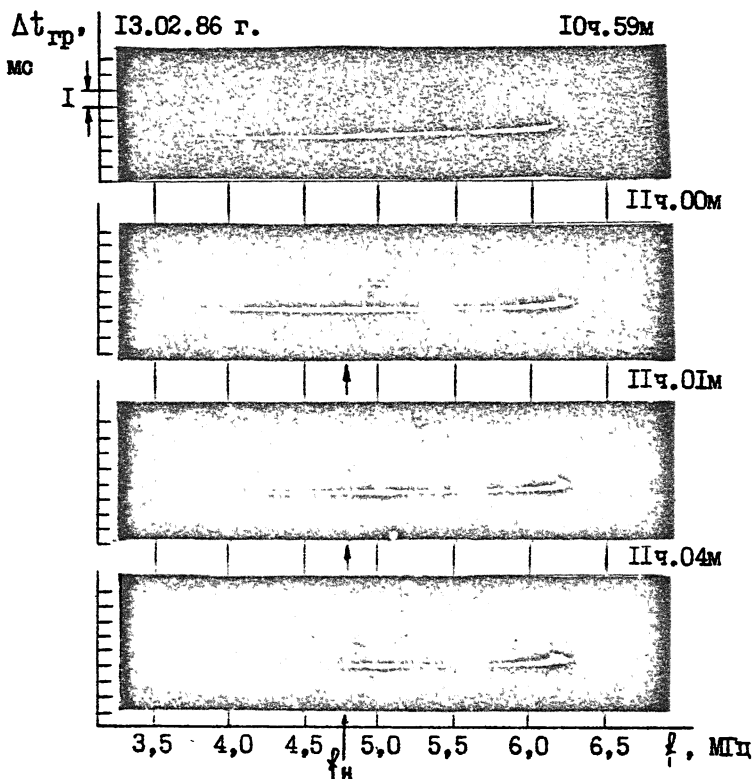
$$\frac{d^2 E_{\perp}}{df^2} + k_0^2 (E - U(f)) E_{\perp} = 0. \quad (2.1)$$

В приближении квазиперпендикулярного распространения, для параболической

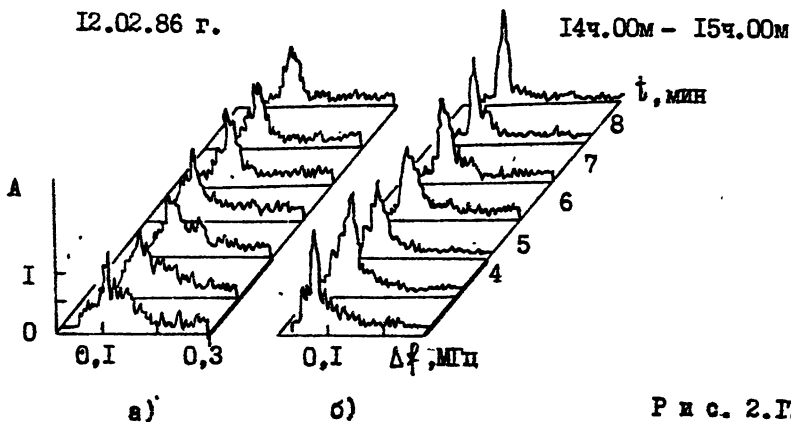
13.02.86 г.



Р и с. 2.15



Р и с. 2.16

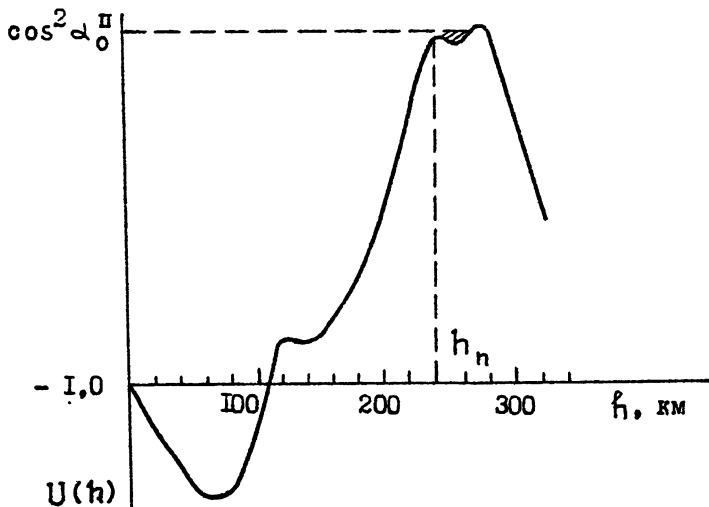


Р и с. 2.17

модели регулярной ионосферы в окрестности максимума слоя F_2 и гауссовской неоднородности, функцию $U(h)$ можно представить в виде

$$U(h) \approx - \left[1 + \frac{2h}{R_0} - \frac{f_{OF}^2}{f^2} \left\{ 1 - \left(\frac{h-h_0}{h_m} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \frac{\Delta N}{N} \exp \left[- \left(\frac{h-h_H}{L} \right)^2 \right] \right\} \right], \quad (2.2)$$

где R_0 - радиус Земли, f_{OF} - критическая частота слоя F_2 , h_0 - высота слоя, h_m - его полутолщина, h_H - высота расположения неоднородности, L - ее полутолщина, ΔN - флуктуационное отклонение N в неоднородности. На рис. 2.18 показан вид потенциальной функции $U(h)$ для частоты зондирования $f = 5,5$ МГц и типичных для периода наблюдения ионосферных условий $f_{OF_2} = 5,8$ МГц, $h_0 = 260$ км, $h_m = 100$ км. Были приняты следующие параметры неоднородности: $\Delta N/N = 7 \cdot 10^{-2}$, $h_H = 250$ км, $L = 15$ км.



Р и с . 2.18

Как видно из рис. 2.18, наличие крупномасштабного возмущения вблизи максимума слоя F_2 приводит к деформации потенциальной функции $U(h)$ и образованию волновода. Этому волноводу будет соответствовать угол α_0^n излучения с Земли луча Педерсена, отсчитанный

от горизонта

$$\begin{aligned} \cos \alpha_0^n &\approx \sqrt{-U(h_n)} \\ \frac{\partial U}{\partial h} \Big|_{h=h_n} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

где h_n - высота скольжения луча Педерсена.

По формуле (2.2) можно оценить глубину потенциальной ямки в угловых единицах, которая для данного примера равна $\Delta\beta \sim 3^\circ$. Таким образом, если луч частоты $f = 5,5$ МГц был выпущен с Земли под углом $\alpha_0^n \approx 76,4^\circ$, то он за счет многократного рассеяния может быть каналирован в данный волновод и выведен из него в пределах области, где существует волновод, т.е. в пределах области модификации. В процессе рассеяния основная роль принадлежит среднемасштабным искусственным неоднородностям, эффекты возбуждения которых будут рассмотрены в следующем разделе.

Расширение частотного диапазона луча Педерсена справа от максимума мы также связываем с эффектами рассеяния пробного сигнала на неоднородностях среднего масштаба. Как показывают оценки [23], частотному диапазону $\Delta f \sim 50$ кГц соответствует диапазон углов рассеяния $\Delta\theta \sim 1^\circ$.

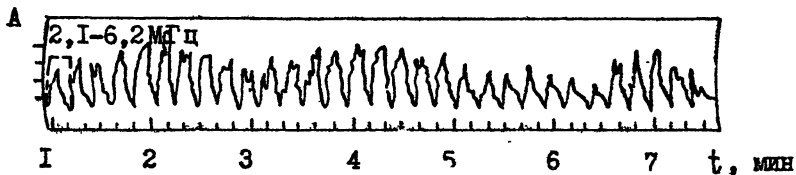
Новый экспериментальный результат был получен также при непрерывном вертикальном ЛЧМ зондировании мощного спорадического слоя E_S , возмущенного сигналами КВ передатчика на $f_n = 5,75$ МГц с $P_G \approx 20$ Мвт. Эксперименты проводились в мае 1985 г.

На рис.2.19 показан пример изменения во времени АЧХ пробных сигналов в диапазоне $2,1 \dots 6,2$ МГц при отражении от слоя E_S с высотой $h \sim 115$ км. Период нагрева ионосферы радиоизлучением показан на рисунке утолщенной линией. Отметим, что в первые минуты модификации E_S происходило увеличение амплитуд $A(f)$ пробных сигналов, причем изменение $A(f)$ от времени носило характер затухающих колебаний с периодом $2 \dots 3$ мин. Повторяемость характера поведения $A(f)$ при повторных циклах воздействия иллюстрирует рис. 2.20.

Были построены зависимости $A(f)/A(0)$ для частот 3,7, 4,4, 5,1, 5,8 МГц, которые приведены на рис.2.21. Видим, что увеличение амплитуд в первые минуты воздействия достигало $1,8 \dots 1,6$ раза. Через $4 \dots 5$ мин после начала воздействия их значения на высоких зондирующих частотах уменьшались до уровня преднагревных, а за-

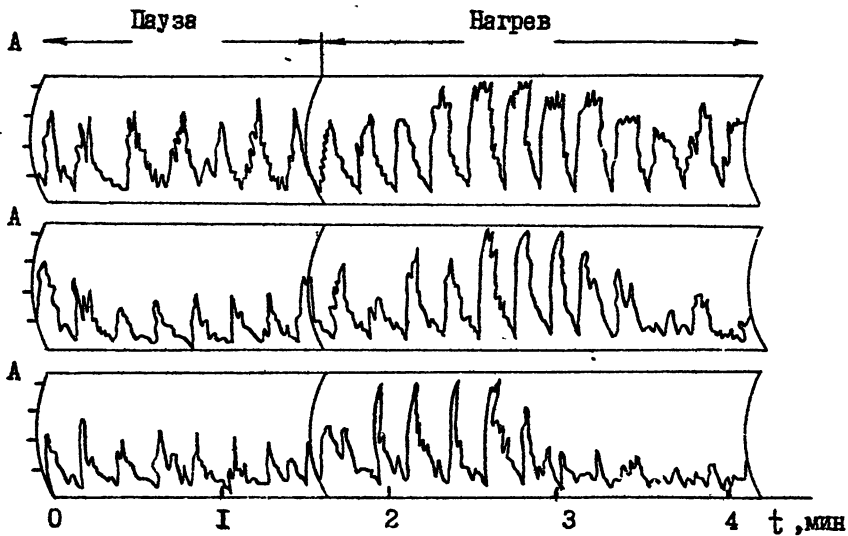
28.05.85 г.

Нагрев



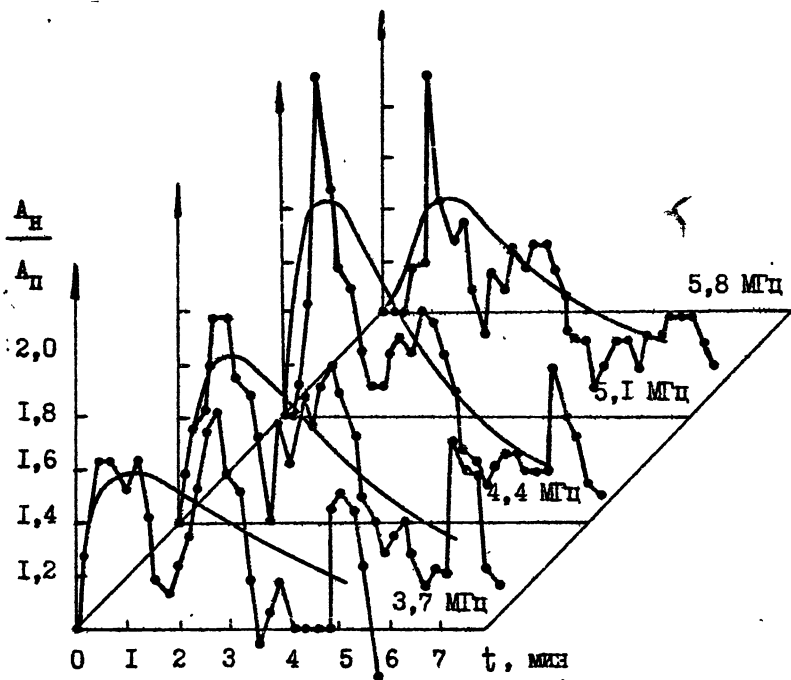
Р и с. 2.19

28.05.85 г.



Р и с. 2.20

тем становились ниже его.



Р и с. 2.21

При нагреве плазмы слоя E_s , состоящего из металлических ионов, из-за преобладания процессов диффузии происходит выталкивание плазмы из области отражения волны накачки. Таким образом, на первых минутах воздействия должно образовываться плазменное зеркало, фокусирующее пробные сигналы. В приближении геометрической оптики амплитуда поля A_H связана с амплитудой поля $A_П$ соотношением [24/

$$A_H = A_П \frac{F}{F - h_n},$$

где h_n - высота плазменного зеркала, F - его фокусное расстояние, n, \tilde{n} - индексы принадлежности к нагреву и паузе соответственно. Величину прогиба зеркала Δh_n можно оценить по формуле

$$\Delta h \approx l^2 / 16F,$$

где l - поперечный размер плазменного зеркала. Для используемых в эксперименте пучков радиоволн с угловыми размерами $\sim 10^\circ \dots 15^\circ$ величина l на высоте слоя E_S составит $\sim 15 \dots 20$ км. Тогда для значений $A_H/A_\Pi \sim 1,6 \dots 1,8$ получаем следующую оценку: $\Delta h \approx 50 \dots 100$ м.

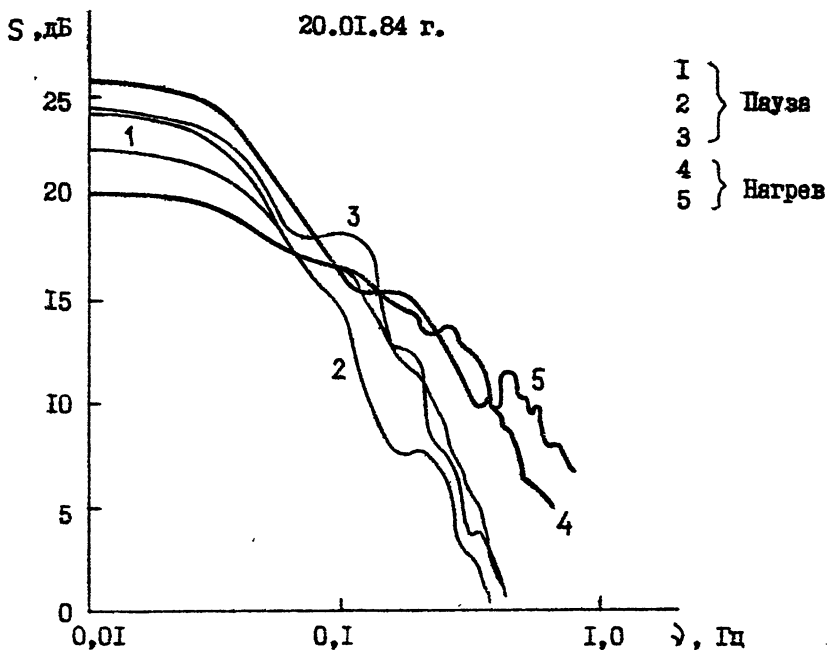
С ростом температуры электронов, как показывают теоретические расчеты /25/, будет происходить уменьшение электронной концентрации в металлическом E_S , а это должно привести к увеличению прозрачности слоя на высоких зондирующих частотах, что мы и наблюдаем на рис.2.21.

3. Среднемасштабные искусственные ионосферные неоднородности и их влияние на распространение декаметровых радиоволн

Известно, что стимулированные воздействием на ионосферу флуктуации амплитуд пробных сигналов и диффузность отражений обусловлены влиянием искусственной ионосферной турбулентности средних масштабов ($l_\perp \sim 0,1 \dots 1$ км).

Флуктуации амплитуд сигналов исследовались методом ВЗ ионосферы с помощью импульсных и непрерывных ЛЧМ сигналов. Результаты импульсного ЛЧМ зондирования ионосферы на $f = 5,75 \pm 0,05$ МГц при $f_H = 5,75$ МГц с $PG = 15 \dots 20$ МВт. показали, что временной радиус автокорреляции амплитуд сигналов при модификации уменьшался в 2-3 раза по сравнению с преднагревными значениями. Были вычислены спектры флуктуаций, характерные примеры которых представлены на рис.3.1. Три спектра, изображенные тонкой линией, соответствуют преднагревному состоянию F-области и два (утолщенные линии) возмущенному состоянию. Из сравнения данных отметим увеличение интенсивности флуктуаций на высоких частотах, которое обусловлено эффектами рассеяния "вперед" пробного сигнала на искусственных ионосферных неоднородностях с $l_\perp \sim 0,3 \dots 1$ км. О величинах приведенных масштабов неоднородностей свидетельствуют времена развития и релаксации рассматриваемого эффекта, которые составляли $\tau_H \sim 20 \dots 60$ с и $\tau_n \sim 40 \dots 80$ с соответственно.

В экспериментах /9/ по широкополосному ЛЧМ зондированию уда-

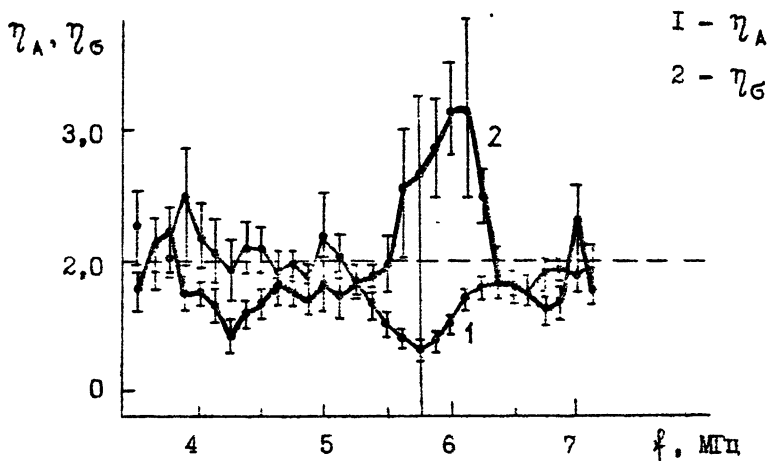


Р и с. 3.1

лось выделить диапазоны частот пробного сигнала, в котором преобладал эффект флуктуаций. С этой целью для ряда последовательных циклов "нагрев-пауза" были вычислены среднеквадратичные отклонения $\sigma_{н,п}$ амплитуд (индексы "н", "п" означают нагрев и паузу соответственно) и зависимость их отношения $\eta_{\sigma}(f) = \sigma_n / \sigma_p$ от частоты f зондирования при $f_n = 5,75$ МГц и $P_G \approx 15...20$ МВт.

На рис.3.2 представлена зависимость $\eta_{\sigma}(f)$. Вертикальными линиями здесь отмечены доверительные интервалы, а стрелкой - частота волны накачки. Как следует из рис.3.2, зависимость $\eta_{\sigma}(f)$ имеет экстремум на частоте $f \sim f_0 F_2$. Тот факт, что $\eta > 1$ для диапазона частот $\Delta f \sim 0,8...1$ МГц, говорит об увеличении на этих частотах в пробном сигнале рассеянной компоненты. В наибольшей степени эффект рассеяния радиоволн на среднемасштабных неоднородностях проявляется в окрестностях максимума слоя F_2 . По величине Δf можно оценить толщину Δh рассеивающего слоя. Действительно, если предположить, что в окрестности точки отражения волны накачки вы-

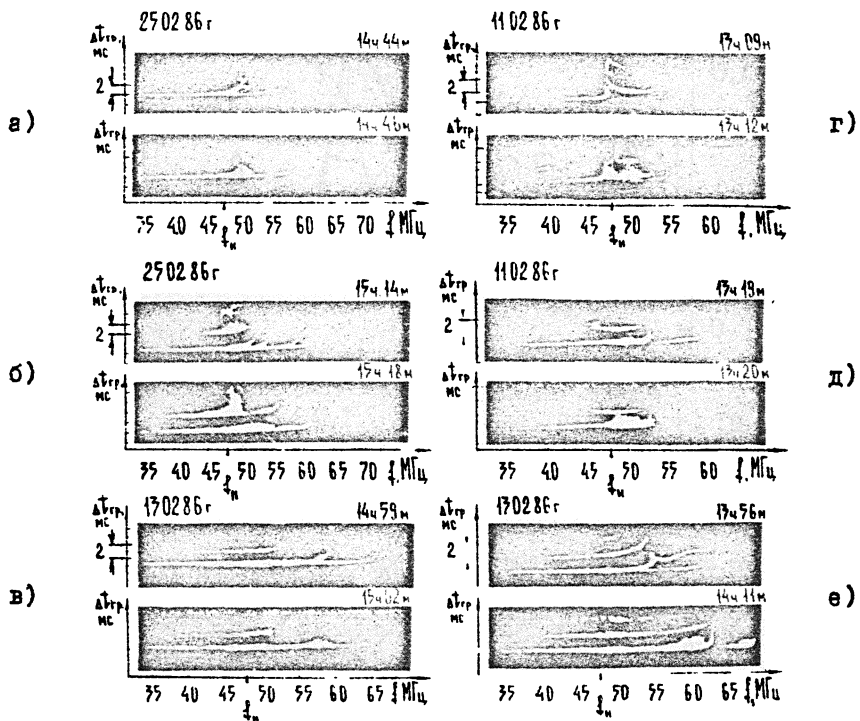
сотный профиль, диэлектрической проницаемости определяется выражением $\epsilon = 1 - \frac{h}{L}$ ($h \leq L$) и $\epsilon = 1 - \frac{f_0^2}{f^2}$, то при $L \sim 100$ км толщина составляла $\Delta h \geq 30$ км.



Р и с. 3.2

Эксперименты по наклонному ЛЧМ зондированию ионосферы модифицированной сигналами мощного КВ передатчика (трасса Эменки - Йошкар-Ола) показали, что влияние области возмущения (ОВ) на ДЧХ трассы также наблюдается главным образом на частотах близких к максимальной наблюдаемой частоте (МНЧ). Один из основных эффектов связан с возбуждением искусственной диффузности. Было обнаружено, например, что величина и частотный интервал диффузности определяется величиной ПИВ и его местоположением на ионограмме НЗ.

Характерные примеры изменения ДЧХ при мощном воздействии на ионосферу с помощью стенда "Сура" приведены на рис.3.3(здесь стрелкой отмечены сеансы с нагревом ионосферы на частотах волны накачки $f_H = 4,8$ МГц). Рис.3.3а, в показывают проявление эффекта диффузности при незначительных ПИВ, когда частотный диапазон диффузности составляет $\Delta f \sim 200 \dots 300$ кГц, а диапазон задержек $\Delta t_{gr} \sim 0,2 \dots 0,3$ мс. Рис.3.3б иллюстрирует влияние нагрева ионосферы на пробные сигналы вблизи МНЧ моды 2F, когда в присутствии ПИВ диффузность



Р и с. 3.3

увеличивалась до $\Delta t_{гр} \sim 1 \dots 1,5$ мс. Рис.3.3г соответствует значительным ПИВ. Здесь ДЧХ является более сложной: возникают расслоения следа, появляются "серпы", "петли", происходит выгибание следа вблизи МЧ. Рис.3.3г указывает на случай сильной искусственной диффузности моды 1F с диапазоном задержек $\Delta t_{гр}$ до 2 мс. При этом как бы происходит "смыкание" следов для мод 1F и 2F.

Рис.3.4а,б иллюстрирует процесс развития и релаксации искусственной диффузности в последовательных сеансах "нагрев-пауза". Видим, что время развития эффекта $\tau_H \leq t_{мин}$, а релаксации $\tau_H \leq 2 \dots 3$ мин, что соответствует времени развития и релаксации неоднородностей с $l_{\perp} \sim 1$ км, хотя неоднородности более мелкого масштаба тоже, по-видимому, оказывают влияние на развитие диффузности (см. в связи с этим /26/).

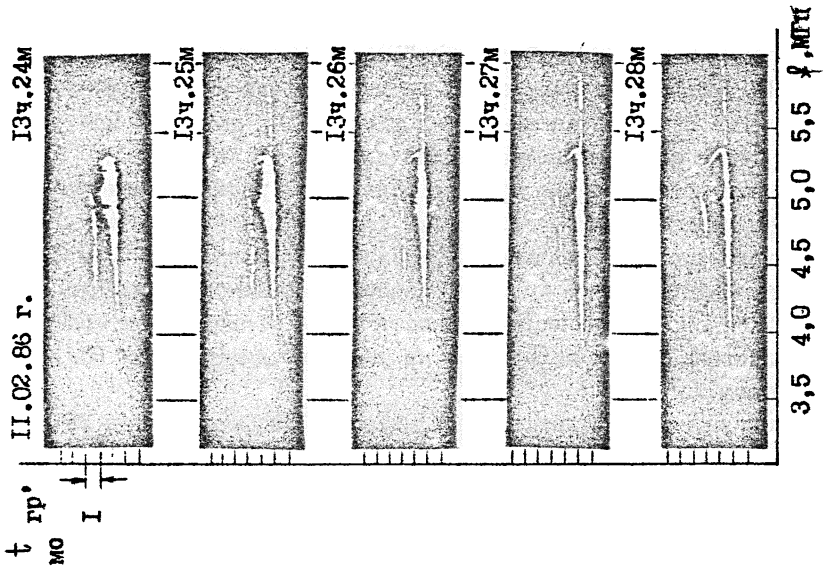
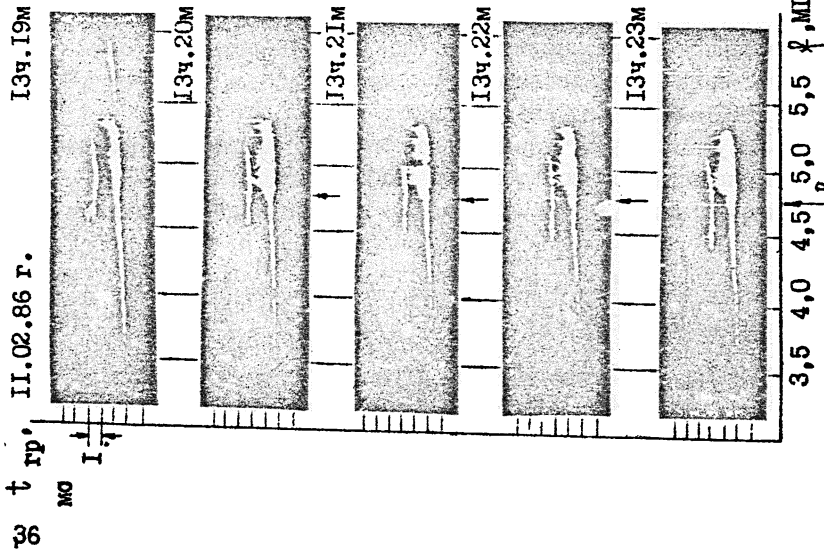
Влиянием ПИВ на результаты модификации ионосферы вблизи МЧ, по-видимому, объясняется нерегулярность эффектов воздействия мощным радиоизлучением на ионосферную плазму, наблюдавшихся в более ранних экспериментах исследователями, проводившими зондирование на фиксированных частотах.

Диффузность на ионограммах НЗ мы связываем преимущественно с взаимной трансформацией верхнего и нижнего лучей за счет рассеяния радиоволн на искусственных среднemasштабных неоднородностях с размерами $l_{\perp} \sim 1$ км, расположенных вблизи максимума слоя F_2 . По частотному диапазону диффузности Δf_g в этом предположении представляется возможным оценить дисперсию углов $\Delta \theta$ на выходе из слоя с неоднородностями, а задав масштаб l_{\perp} , определить и величину $\Delta N/N$ в них.

Диапазон углов $\Delta \theta$ в вертикальной плоскости, обеспечивающий трансформацию педерсеновских лучей на крайних частотах f_1 и f_2 интервала диффузности $\Delta f_g = f_2 - f_1$, составляет величину

$$\Delta \theta = \arccos \left[\frac{\cos \alpha_{0f_1}^n}{\sqrt{1 + \frac{2h_N}{R_0} - \frac{f_N^2(h_N)}{f_1^2}}} \right] - \arccos \left[\frac{\cos \alpha_{0f_2}^n}{\sqrt{1 + \frac{2h_N}{R_0} - \frac{f_N^2(h_N)}{f_2^2}}} \right] \quad (3.1)$$

где α_{0f_1, f_2}^n - угол излучения с Земли верхнего луча для частот f_1 и f_2 соответственно, h_N - высота расположения слоя с неоднородностями, R_0 - радиус Земли, f_N - частота волны накачки. Углы α_{0f_1, f_2}^n определяются путем решения уравнений (2.3). Согласно /23/, при прохождении слоя с гауссовскими неоднородностями дисперсия углов на его выходе составляет величину



2) ф

$$\langle (\Delta\theta)^2 \rangle^{1/2} = \sqrt[4]{\frac{\pi}{8}} \sqrt{\frac{L}{l_{\perp}}} \frac{f_0^2}{f^2} \frac{1}{n} \delta N, \quad (3.2)$$

где L - протяженность слоя, n - показатель преломления, f_0, f - плазменная и рабочая частоты. Из (3.1), (3.2) для значений $f_1 = 6,3$ МГц и $f_2 = 6,5$ МГц, $f_0 = 5, \dots, 5,5$ МГц, $h_m = 240$ км, $L = 40 \dots 50$ км получим $\Delta\theta \sim 3^{\circ} \dots 4^{\circ}$ и $\delta N \sim 6 \cdot 10^{-3}$ для масштабов $l_{\perp} \sim 1$ км. Случаи сильной диффузии (см., например, рис.3.3г) связаны с возникновением сложных петлевых траекторий, с переотражениями из-за значительных ПИВ.

4. Эффекты трансформации пробных сигналов в плазменную моду

Использование ЛЧМ сигналов повысило помехозащищенность диагностической аппаратуры и позволило проводить измерения амплитуд пробных сигналов на частотах близких к частоте волны накачки в непосредственной близости от КВ стенда, создающего в ионосфере искусственное возмущение плазмы.

При ВЗ модифицированной ионосферы на скользящей частоте ЛЧМ сигнала регулярно наблюдался эффект исчезновения следа обыкновенной компоненты на ионограмме /9/. Иллюстрацией эффекта служит рис.4.1. На рис.4.1а приведена ионограмма ВЗ перед воздействием на ионосферу сигналами мощного КВ передатчика, а на рис.4.1б в период его воздействия.

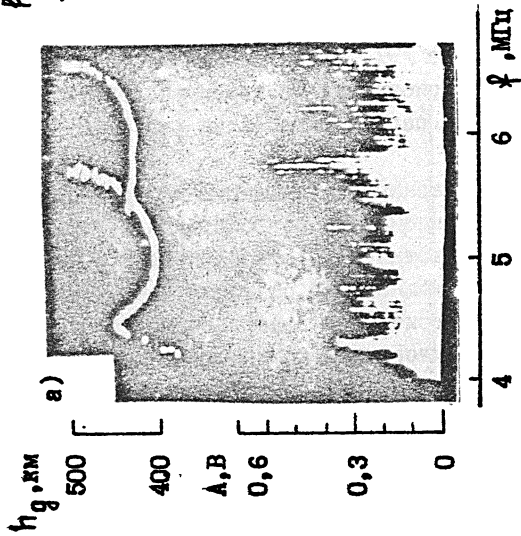
На рис.4.2а,б показаны АЧХ зондирующего сигнала для обыкновенной и необыкновенной компоненты соответственно. Утолщенной линией на рисунках отмечены участки АЧХ, относящиеся к периодам воздействия на ионосферу сигналами мощного КВ радиоизлучения. Видно, что аномальное ослабление (АО) происходит в достаточно узком диапазоне частот $f \sim f_H$ только на обыкновенной компоненте пробной волны.

Уже в первых экспериментах по исследованию АО были определены времена развития и релаксации эффекта ($\tau_{н,п} < 0,5$ мин), позволившие сделать вывод /27, 28/ о том, что он обусловлен трансформацией энергии электромагнитной волны накачки в плазменную волну на мелкомасштабных неоднородностях ($l_{\perp} < 50$ м). Нами была исследована частотная зависимость эффекта АО, а также зависимость его величины от состояния ионосферы и поведения АО во времени.

На рис.3.2 представлена частотная зависимость АО, полученная

27.05.85 г.

IOч. 49M



IOч. 5IM

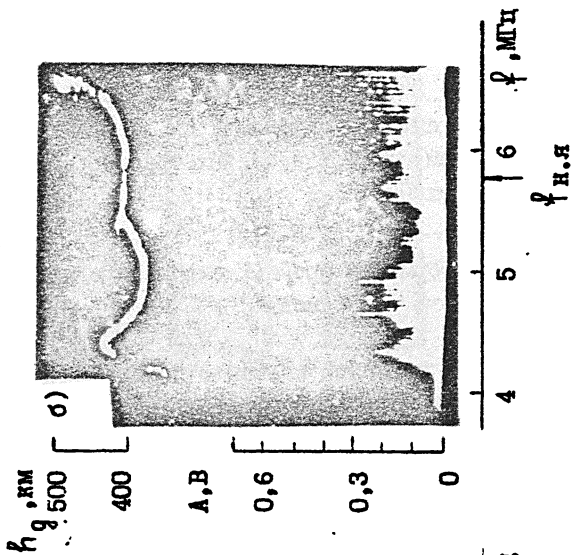
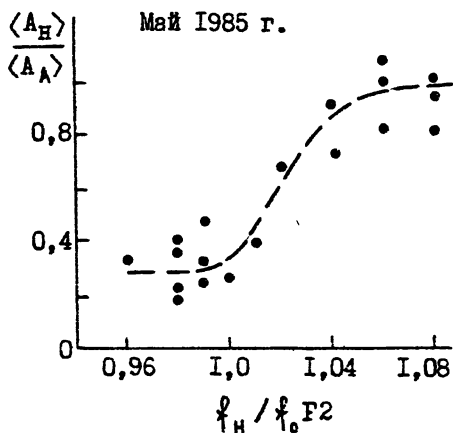


Рис. 4.1

для последовательности актов воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. Вертикальными линиями здесь отмечены доверительные интервалы для выборочных средних отношения амплитуд обыкновенной компоненты сигнала при нагреве "н" и в паузе "п" $\eta_A(f) = \frac{\langle A_n \rangle}{\langle A_p \rangle}$ (здесь

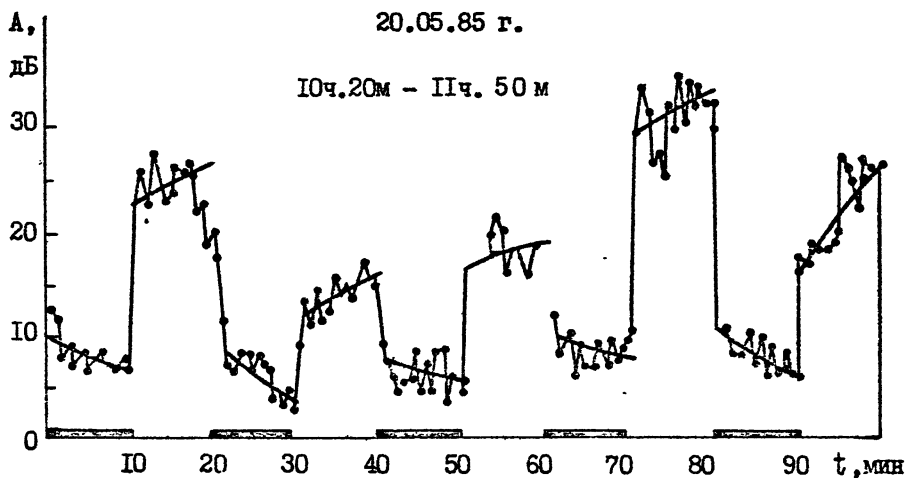
скобки означают усреднение по времени). Согласно представленным данным, максимальное ослабление имеет место на частоте волны накачки $f_H = 5,75$ МГц. Частотный диапазон АО $\Delta f \sim 0,5 \dots 0,6$ МГц очевидно определяется толщиной слоя, занятого искусственными мелкомасштабными неоднородностями. Предположение о линейности ионосферы в окрестности точки отражения волны накачки ($\epsilon = 1 - \frac{h^2}{L^2}$ ($h \leq L$), $\epsilon = 1 - f_0^2/f^2$) позволяет оценить толщину Δh слоя с неоднородностями $h_{\perp} < 50$ м. Так для $L \sim 80$ км, $\Delta f = 0,5 \dots 0,6$ МГц, $f = 6$ МГц величина $\Delta h \sim 15$ км. Эта оценка примерно соответствует оценке, сделанной по ракурсному рассеянию радиоволн /29/.



Р и с. 4.3

Рис.4.3 показывает зависимость величины АО на $f \sim f_H$ от отношения $f_H / f_0 F 2$. Из него можно заключить, что эффект АО наблюдается при $f_H < f_0 F 2$. Диапазон частот переходного процесса $\Delta f_H \sim 180$ кГц. определяется полосой частот верхнего гибридного резонанса $\Delta f \sim f_H^2 / 2f_0 \sim 170$ кГц (где $f_H = 1,4$ МГц — гирочастота электрона, $f_0 \sim 6$ МГц), что дополнительно указывает на определяющее значение в АО процессов трансформации пробных сигналов в продольную волну за счет рассеяния на мелкомасштабных искусственных неоднородностях.

Измерения на скользящей частоте позволили провести частотные усреднения амплитуд пробных сигналов на частотах $f \sim f_H$ и частотах вне полосы АО. На рис.4.4 представлены данные об усредненных по частоте в диапазоне $\Delta f \sim 200$ кГц амплитуд сигналов ($f \sim f_H$) для нескольких последовательных циклов "нагрев-пауза". Утолщенными линиями на оси времени отмечены периоды "нагрева" ионосферы мощным



Р и с. 4.4

КВ радиоизлучением. Отчетливо видно два характерных времени развития и релаксации исследуемого процесса: быстрый процесс $\tau_{н,п} < 30$ с и медленный процесс $\tau_{н,п} \sim 3...5$ мин. Однако сравнение этих данных вне полосы А0 показало, что медленный процесс изменения амплитуды сигнала в полосе А0 коррелирует с развитием и релаксацией широкополосного ослабления ($\Delta f \sim 1,5...2$ МГц), т.е. определяется возбуждением и исчезновением крупномасштабных неоднородностей.

5. Влияние области возмущения на статистические характеристики КВ сигналов при наклонном зондировании ионосферы

Исследования проводились на трассах Эменки - Йошкар-Ола, Киев - Йошкар-Ола, имеющих различную конфигурацию относительно нагревного стенда "Сура" (см.рис. I.2, I.3. и I.4). В качестве пробных сигналов использовались импульсные, импульсные с ЛЧМ, непрерывные, непрерывные широкополосные с ЛЧМ.

Известно, что при воздействии на ионосферу сигналами мощных КВ передатчиков в ОВ развивается искусственная ионосферная турбулентность. Искусственные неоднородности, наряду с естественными, влия-

от на распространяющиеся через ОВ сигналы как "шероховатый экран". Глобальные возмущения N в ОВ проявляют линзовые свойства

Случайный характер неоднородностей в ОВ приводит к тому, что амплитуда поля волны в точке приема испытывает случайные флуктуации во времени. При нагреве ионосферы сигналами мощного КВ передатчика увеличивается частота флуктуаций амплитуды, меняются и другие статистические характеристики.

Иллюстрацией данного эффекта является пример, приведенный на рис.5.1, где изображена зависимость от времени амплитуды (A) пробного сигнала моды $1F$, полученная при импульсном ЛЧМ зондировании ионосферы на частоте $f = 3,55 \pm 0,05$ МГц на трассе Эмерки - Йошкар-Ола 13.02, 1986 г. в 10.30 ЛТ (траектория пробной волны приведена на рис.1.3а). Утолщенная линия на рисунке соответствует значению $A(t)$ для периода нагрева. Заметим, что время развития эффекта мерцаний составило $\tau_n \sim 20 \dots 60$ с, а время релаксации $\tau_p \sim 40 \dots 80$ с.

Одной из математических моделей, описывающих наблюдаемые флуктуации, является модель Райса (см. например /30/). В ней предполагается, что в точке приема поле радиоволны является следующей суммой величин:

$$E(t) = E_0(t) + e(t),$$

где E_0 - зеркальная компонента поля, e - рассеянная компонента поля, а амплитуда поля распределена по закону Райса.

Для оценки вклада рассеянной компоненты в этой модели используется коэффициент мутности ионосферы:

$$K_M = I_p / (I_0 + I_p),$$

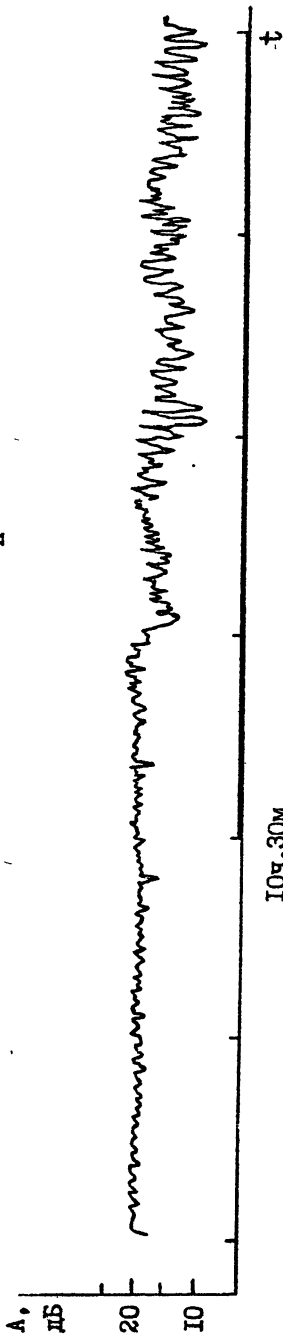
где $I_{0,p}$ - интенсивность зеркальной рассеянной компоненты поля соответственно.

Изменение коэффициента K_M (в случае адекватности экспериментального распределения амплитуды поля закону Райса) в результате модификации ионосферы будет характеризовать вклад искусственной ионосферной турбулентности в рассеянную компоненту поля пробной волны.

При анализе данных в начале проверялась адекватность гипотетической модели экспериментальному закону распределения. На рис.

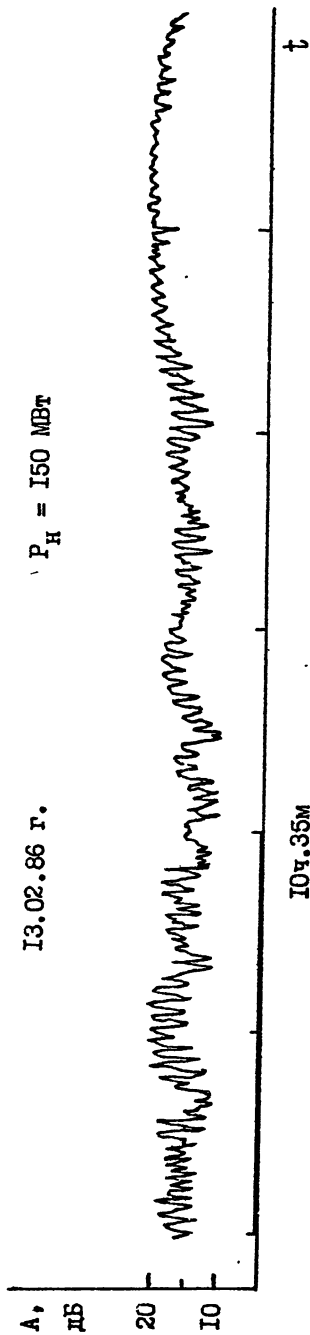
13.02.86 г.

$P_H = 150 \text{ MBT}$



13.02.86 г.

$P_H = 150 \text{ MBT}$



Р и о. 5.1

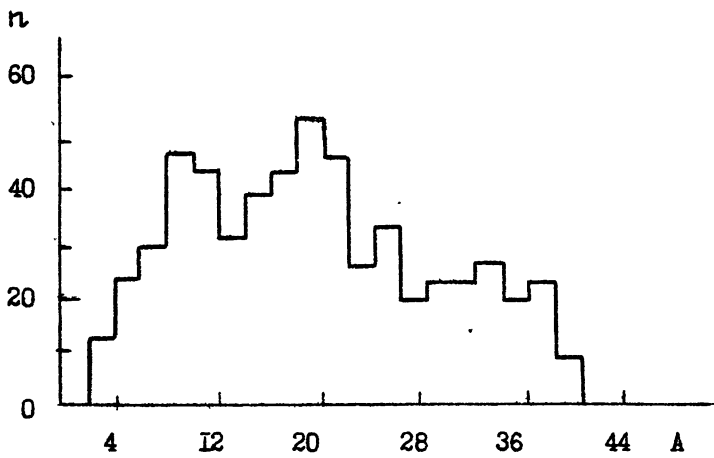
5.2 в качестве примера приведены гистограммы распределения амплитуд пробного сигнала частотой $f = 6,5$ МГц, полученные в период паузы (рис.5.2а) и нагрева (рис.5.2б) 19.10.82 г. в 19.00 ЛТ при импульсном зондировании ионосферы на трассе п.Элменки - Йошкар-Ола (траектории распространения сигналов приведены на рис.1.2). На рис.5.2 видно, что обе гистограммы удовлетворительно описываются законом Райса, причем при нагреве ионосферы максимум распределения смещается в сторону меньших значений амплитуд сигнала. Последнее,

свидетельствует в данном случае об увеличении рассеянной компоненты поля пробной волны. Рассмотрение серии экспериментальных распределений показало, что примерно в 70% случаев гипотеза о Райсовой модели преемлема как для естественного, так и для возмущенного состояния области отражения. Анализ величины K_M для указанных случаев показал, что коэффициент мутности увеличился на 20...60% в периоды модификации ионосферы, т.е. интенсивность рассеянной компоненты возрастала в 1,2...1,6 раза, а это приводило к некоторому незначительному на 10...30% уменьшению амплитуды сигналов.

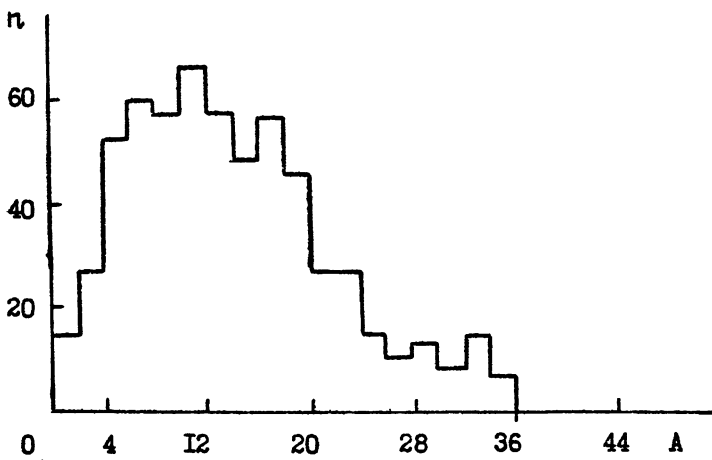
Предположение о перемещении неоднородностей поперек трассы со скоростью U позволяет получить оценку масштабов неоднородностей l_{\perp} по величине временного радиуса τ_K корреляции амплитуд пробных сигналов /30/:

$$l_{\perp} \approx \frac{1}{2} \tau_K \cdot U. \quad (5.1)$$

На рис.5.3 приведены характерные примеры зависимости $\rho_A(\tau)$ (где $\rho_A(\tau)$ - временной коэффициент корреляции амплитуд пробных сигналов) для естественных (кривая 1) и возмущенных (кривая 2) условий, относящихся к последовательным сеансам наблюдений, проведенных на частоте $f = 5,65$ МГц 25.09.84 г. (траектории пробной волны см. на рис.1.2). Если временный радиус корреляции τ_K определять из соотношения $\rho_A(\tau_K) \sim e^{-1}$, то для приведенного примера получим соответствующие значения $\tau_{K_n} = 12$ с и $\tau_{K_n} = 4$ с. Поскольку в наших экспериментах скорость дрейфа не определялась, то для оценки l_{\perp} по формуле (5.1) примем для скорости неоднородностей в F-слое наиболее характерное значение $U \approx 100$ м/с /30/. Тогда получим $l_{\perp} \sim 0,6$ км и $l_{\perp} \sim 0,2$ км. Средние значения $\langle \tau_K \rangle$ и отношения $\delta = \langle \tau_{\perp n} \rangle / \langle \tau_{K n} \rangle$ для различных частот зондирования приведены в таблице 5.1.

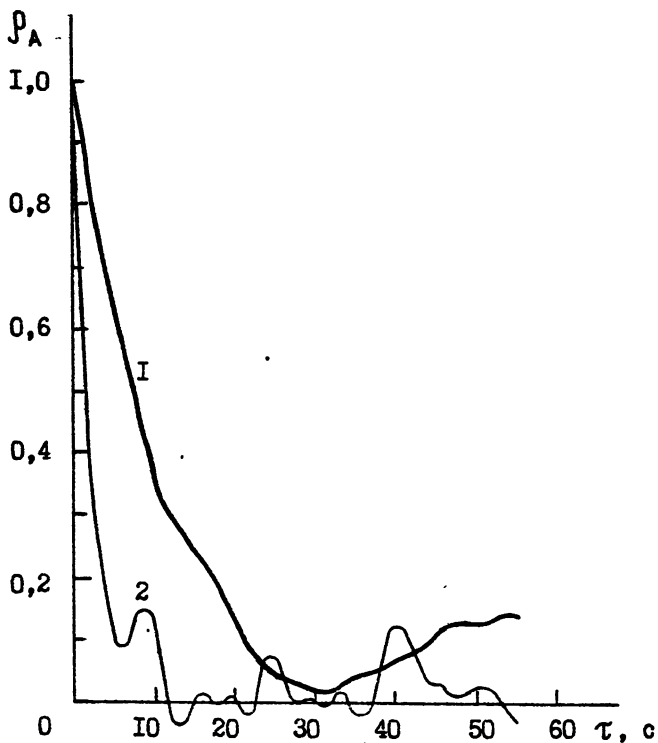


а)



б)

Р и с. 5.2



Р и с. 5.3

Таблица 5.1.

МГц	$\langle \tau_k \rangle_n$	$\langle \tau_k \rangle_p$	δ
3,55	3,0	5,3	1,8
3,77	9,0	12,0	1,3
5,65	3,1	16,3	5,3
6,5	2,2	4,7	2,1
7,5	3,2	12,1	3,8

Заметим, что для частот, отражающихся на высотах $h_1 < 200$ км (частоты $f = 3,55$ МГц и $f = 3,7$ МГц), величина δ более чем в

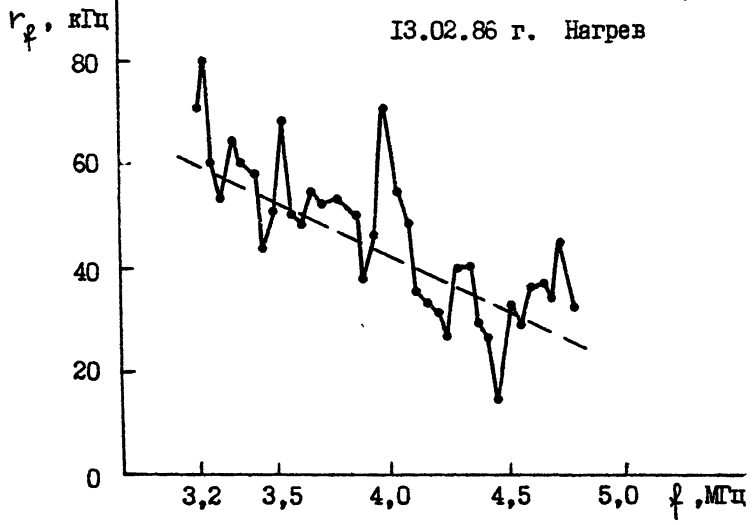
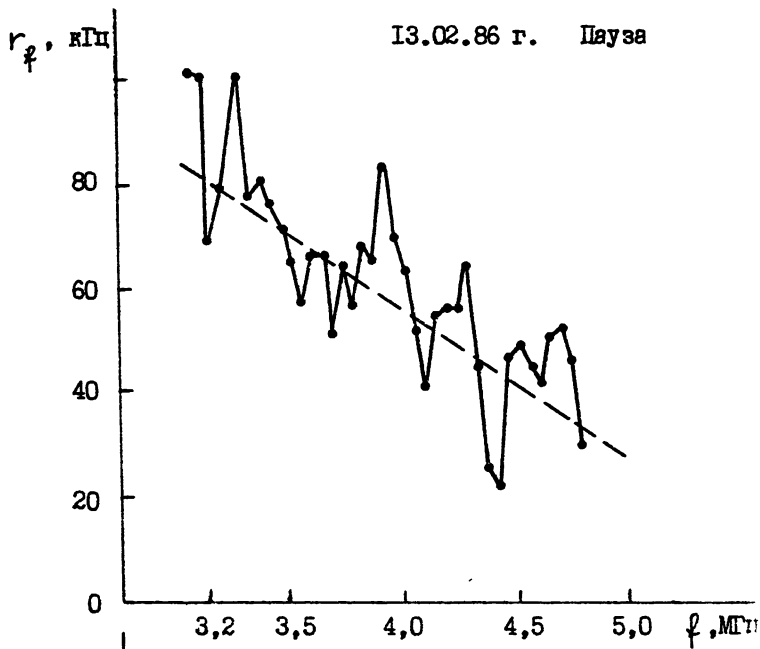
два раза меньше, чем для частот, отражающихся на высотах $h > 200$ км ($f = 5,65$ МГц, $f = 6,5$ МГц, $f = 7,5$ МГц). Регулярные уменьшения τ_K периоды нагрева свидетельствуют о возрастающем вкладе более мелких масштабов неоднородностей в рассеянную компоненту пробных сигналов, распространяющихся на высотах 150... 300 км.

Об увеличении роли мелкомасштабной части спектра неоднородностей в флуктуации амплитуд сигналов с ростом высоты свидетельствуют и данные о частотной зависимости частотного радиуса корреляции $r_f(f)$, которые были получены нами в экспериментах по наклонному ЛЧМ зондированию модифицированной ионосферы на трассе Зименки - Йошкар-Ола в феврале 1986 г. На рис.5.4а,б приведены характерные примеры зависимости $r_f(f)$ для паузы и нагрева соответственно. Видно, что с ростом f пробного сигнала величина $r_f(f)$ уменьшается, а при нагреве значения r_f уменьшаются примерно в 1,5 раза в диапазоне частот $\sim 3...6$ МГц.

Более подробные сведения о влиянии ОВ на характеристики пробных сигналов можно получить из анализа формы спектра $S_A(\nu)$ флуктуаций амплитуд, который определенным образом /31/ связан со спектром флуктуаций электронной концентрации. На рис.5.5 приведены примеры спектров $S_A(\nu)$ для периодов паузы и нагрева (утолщенная линия). Данные получены 25.09.82 г. в 24.40 LT на частоте $f = 5,65$ МГц, которая отражалась на высоте $h \approx 250$ км. Здесь же пунктиром нанесены степенные спектры вида $S_A(\nu) \sim \nu^{-\rho}$ для $\rho = 2$ и $\rho = 3$. В предположении, что $\nu \approx 100$ м/с на оси частот ν нанесены соответствующие значениям ν масштабы l_{\perp} рассеивающих неоднородностей. Согласно приведенным данным, в период нагрева значительно увеличивается интенсивность неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \sim 0,3...0,7$ км, что приводит к их определяющей роли в процессе рассеяния пробной волны. На этот эффект указывали также авторы работы /8/.

Характерным является и наличие максимумов в форме спектра в области масштабов $l_{\perp} \sim 1...3$ и $l_{\perp} \sim 0,3...0,7$ км. Кроме того следует отметить, что в периоды нагрева "хвосты" спектров лучше соответствуют степенной форме, чем в паузе. Этот эффект хорошо согласуется с результатами экспериментов, приведенных в /32/ для геомагнитных возмущений в умеренных широтах.

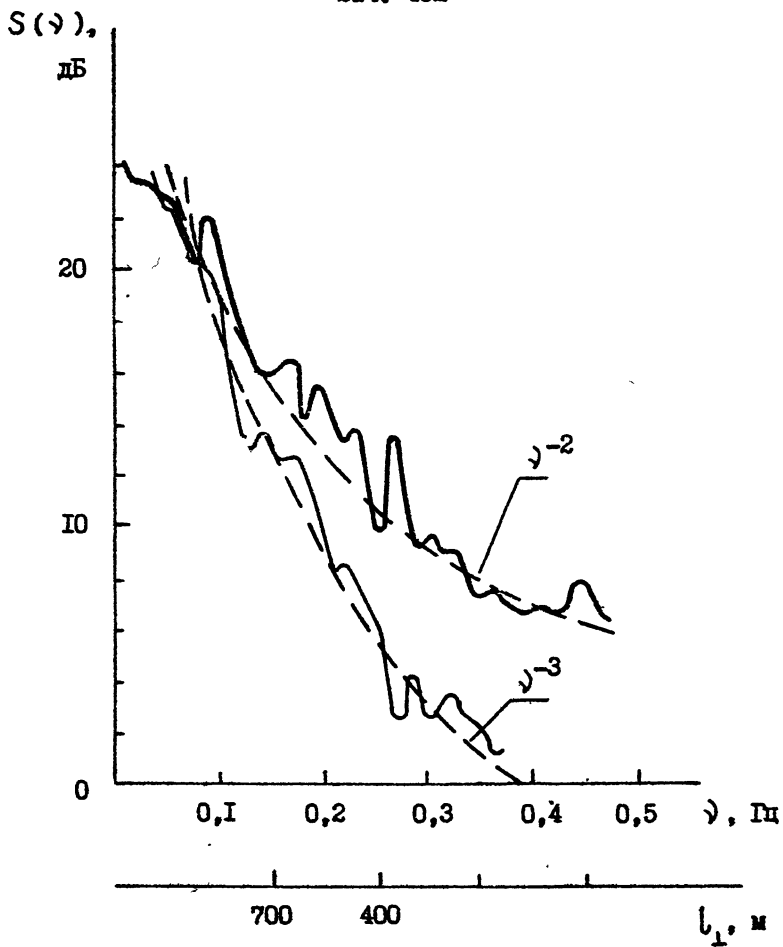
Аппроксимация спектров для $f = 5,68...6,5$ МГц, отражав-



Р и с. 5.4

25.09.82 г.

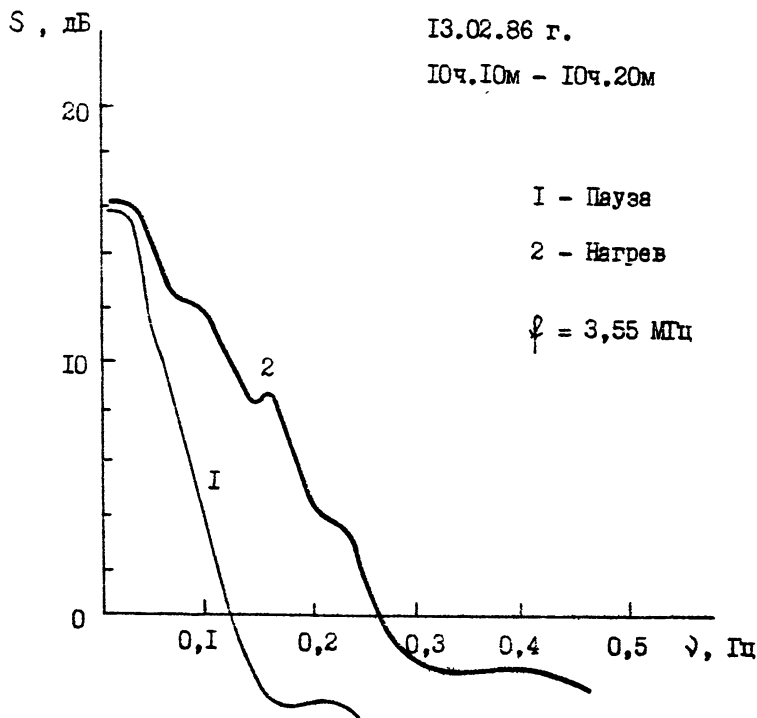
21ч. 45м



Р и с. 5.5

шихся на высотах $h \sim 250 \dots 280$ км, функцией вида ν^{-P} и усреднение результатов по серии экспериментов, проведенных в одинаковой ионосферной обстановке, показывают, что $\langle P_H \rangle = 2,7$, $\langle P_H \rangle = 1,75$ в области масштабов $l_{\perp} \sim 0,2 \dots 0,8$ км, т.е. величина P при нагреве увеличилась в 1,5 раза. Значение $P \approx 2,7$ близко по величине к показателю степени $P \approx 2,64$, полученному в [32] для измерений в авроральной F - области ионосферы, находящейся в естественно возмущенных условиях.

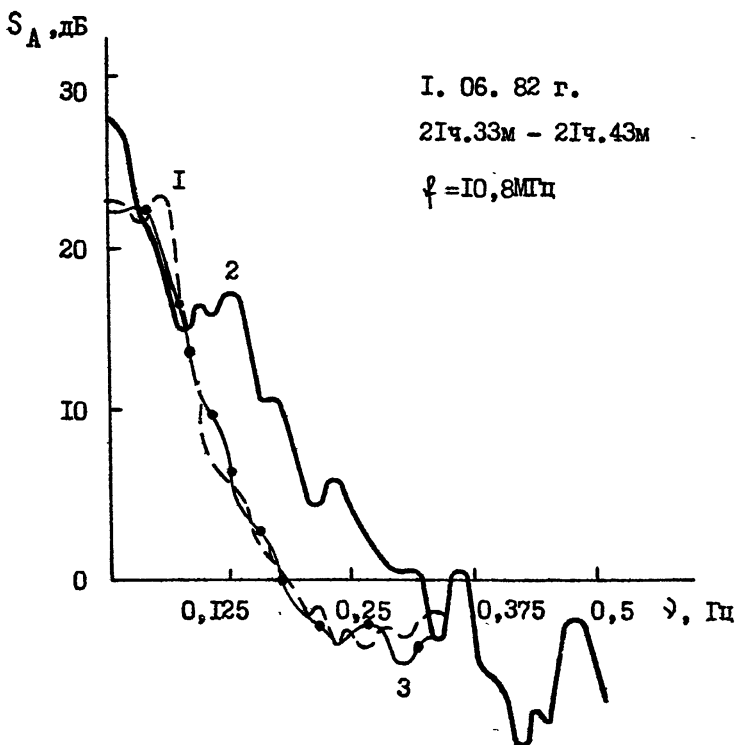
На рис. 5.6 представлены спектры $S_A(\nu)$ для частоты зондирования $f = 3,55$ МГц, которая отражалась на высоте $h \sim 140$ км. Данные были получены при импульсном ЛЧМ зондировании ионосферы 13.02.86 г. - в 10.30 ЛТ. Здесь утолщенной линией и тонкой линией отмечены спектры для периодов нагрева и паузы соответственно.



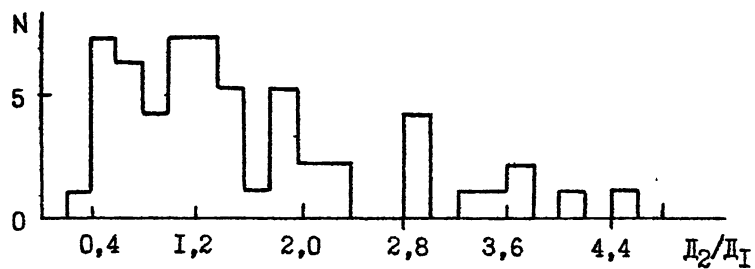
Р и с. 5.6

В отличие от предыдущего примера в данном случае наблюдается значительное увеличение интенсивности флуктуаций на частотах $\nu \sim 0,1$ Гц, которые при $v \approx 100$ м/с соответствуют $l_{\perp} \sim 1$ км. При этом отношение $\langle P_H \rangle / \langle P_R \rangle \sim 1,2$ изменяется не так значительно.

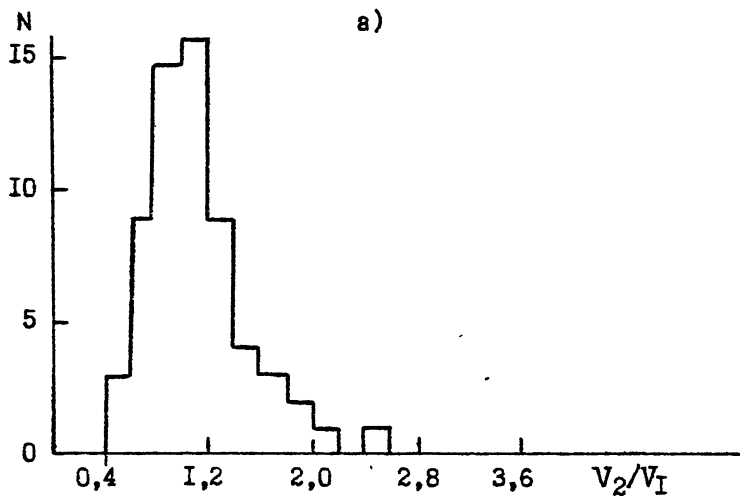
Влияние ОВ на статистические характеристики КВ наблюдалось в 80% случаев для моды 3F при наклонном зондировании на трассе Киев - Йошкар-Ола /33/. В этих экспериментах, как следует из рис.1.4, мода 3F пересекала ОВ на высотах 200...300км. Сказанное подтверждает пример, приведенный на рис.5.7. Представленные данные были получены 1.06.82 г. в период с 21.33 по 21.43 ЛТ на частоте $f = 10,8$ МГц. Кривая - 1 относится к преднагревной паузе, кривая-2 к периоду нагрева, а кривая - 3 - к посленагревной паузе.



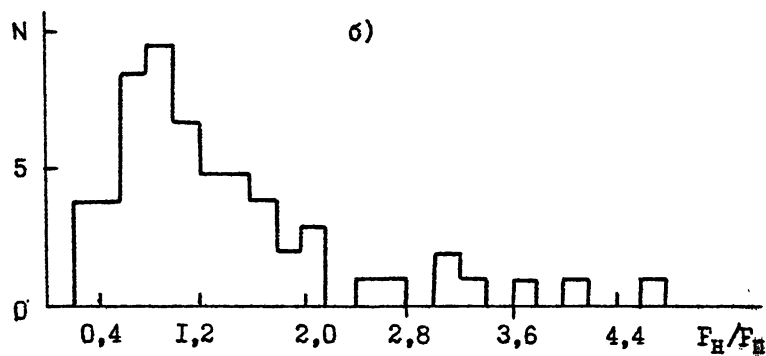
Р и с. 5.7



а)



б)



в)

Р и с. 5.8

В экспериментах на трассе Киев - Йошкар-Ола при модификации ионосферы мощным КВ излучением кроме уширения спектра было установлено увеличение дисперсии (D), коэффициента вариаций (V), и флуктуаций (F). Данные об отношениях D_H/D_H , V_H/V_H и F_H/F_H приведены на рис. 5.8а,б,в соответственно. Рассчитанные по ним средние $\langle D_H/D_H \rangle$, $\langle V_H/V_H \rangle$ и $\langle F_H/F_H \rangle$ показали, что в периоды нагрева коэффициенты D, V, F увеличиваются в 1,6...1,8 раза. Анализ, полученных для этой трассы данных, показал, что степень влияния ОВ на статистические характеристики пробных сигналов зависела от ионосферной обстановки и увеличивалась в среднем с ростом $f_o F_2$.

З а к л ю ч е н и е

Предложен метод ЛЧМ зондирования, применение которого к исследованию модифицированной ионосферы позволило получить новые сведения о структуре ОВ и ее влиянии на распространение декаметровых радиоволн. При этом получены следующие основные результаты:

- обнаружен при вертикальном ЛЧМ зондировании ионосферы в широкой полосе частот сигнал бокового отражения (СБО), обусловленный "зеркальным" отражением пробной волны от крупномасштабной области возмущения, возбуждаемой в ионосфере мощным КВ радиоизлучением удаленного (на 110 км) передатчика;

- обнаружено квазипериодическое увеличение амплитуд пробных сигналов при ВЗ непрерывными ЛЧМ сигналами мощного спорадического слоя E в период работы нагревного стенда, связываемое с образованием искусственного фокусирующего плазменного зеркала;

- обнаружено, наряду с аномальным на 6-10 дБ ослаблением пробных волн, регистрируемым в узком диапазоне частот $\Delta f \sim 0,5-0,6$ МГц, широкополосное с $\Delta f \sim 1,5...2$ МГц ослабление на 1...1,3 дБ зондирующих сигналов;

- обнаружено широкополосное ослабление на 3...5 дБ обыкновенной и необыкновенной компонент ЛЧМ сигнала в диапазоне частот НЗ, проходящих через ОВ на высотах E- и F₁-слоев ионосферы, обусловленное дефокусирующими свойствами крупномасштабного положительного возмущения электронной концентрации на высотах $h' < 200$ км, показано, что при эффективной мощности излучения в интервале $P_G = 50 \div 150$ МВт величина ослабления линейно зависит от мощности

$$K \text{ (дБ)} = \beta P_{\text{эф}} \text{ (МВт)},$$

где $\beta = -0,025$ дБ/МВт для частот $\sim 3,5 \dots 4,5$ МГц;

- обнаружен эффект усиления луча Педерсена, обусловленный каналированием волн за счет многократного рассеяния во флуктуационном волноводе, образуемом крупномасштабными искусственными неоднородностями с параметрами $l \sim 10$ км, $\delta N \sim (1-7) \cdot 10^{-2}$, возбуждаемыми вблизи максимума слоя F_2 мощным КВ радиоизлучением;

- на основе анализа результатов вертикального импульсного ЛЧМ зондирования E-области ионосферы в период работы нагревного стенда на частотах f_n близких к критической частоте слоя F_2 ($f_n \leq f_o F_2$) сделаны оценки положительного возмущения электронной концентрации на высотах $h_e < 200$ км, которые составили величину $\sim 1 \dots 3\%$;

- по результатам ВЗ и НЗ модифицированной F_2 -области ионосферы на высотах $h_e > 200$ км, полученных с помощью ЛЧМ ионозонда и зондирования на фиксированных частотах, сделаны оценки крупномасштабного отрицательного возмущения электронной концентрации $\delta N \sim 3 \dots 5\%$, рефракция на котором приводит к фокусировке пробных волн;

- показано, что искусственные среднемасштабные ионосферные неоднородности с размерами $l \sim 0,1-1$ км приводят к рассеянию "вперед" и вызываемые ими эффекты проявляются в увеличении скорости замираний пробных сигналов, появлении диффузионных отражений на ионограммах наклонного зондирования, причем диффузность на ДЧХ для трасс НЗ наблюдалась в окрестности максимально наблюдаемой частоты и в значительной мере определялась наличием и величиной перемещающихся ионосферных возмущений и их положением на ионограмме НЗ;

- из анализа статистических характеристик пробных волн (автокорреляционной функции, спектра флуктуаций амплитуд и др.) показано, что эффекты рассеяния радиоволн на среднемасштабных искусственных ионосферных неоднородностях проявляются во всей толще ионосферного слоя, через который проходит пучок мощных радиоволн, однако вклад мелкомасштабной части спектра неоднородностей увеличивается с ростом высоты и приближением частоты волны накачки к критической частоте слоя F_2 .

В заключение заметим, что приведенные экспериментальные данные ВЗ и НЗ модифицированной ионосферы, полученные с помощью ЛЧМ ионозонда, позволили существенно уточнить представления о струк-

туре возмущенной области и могут быть использованы для развития теории нелинейных явлений в ионосферной плазме и решения некоторых специальных задач КВ радиосвязи.

Л и т е р а т у р а

1. Fenwick R.V., Barry G.H. Sweep-frequency oblique ionospheric sounding at medium frequencies. // IEEE Trans. Broad. - 1966. - V. BC-12, N 1. - P. 25 - 27.
2. Иванов В.А., Фролов В.А., Шумаев В.В. ЛЧМ метод вертикального зондирования ионосферы // Марийский политехнический институт, Йошкар-Ола, Деп. в ВНИИТИ АН СССР, 28.05.84 г., № 3824-84.
3. Иванов В.А., Фролов В.А., Шумаев В.В. Зондирование ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами // Изв. вузов Радиофизика. - 1986. - Т.29 № 2, - С. 235-237.
4. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Митяков Н.А. и др. ЛЧМ метод диагностики ионосферного канала КВ связи // Марийский политехнический институт, Йошкар-Ола, - Деп. в ВНИИТИ АН СССР 18.12.86 г., №027-В86.
5. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Митяков Н.А. и др. Зондирование искусственно возмущенной ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда. - В кн.: Распространение радиоволн в ионосфере. - М.: ИЗМИРАН, 1986. - С. 80-85.
6. Белов И.Ф., Бенедиктов Е.А., Митяков Н.А. и др. Экспериментальный комплекс "Сура" и первые результаты проведенных на нем исследований по нагреву ионосферы // Тез. докл. XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981. - С.103-104.
7. Штуббе П., Копка Х. Воздействие на область F с помощью мощного радиоизлучения. Полярная верхняя атмосфера. - М.: Мир, 1983. - С. 91-106.
8. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е. и др. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький, изд. АН СССР, 1979. - С. 7-45.
9. Ерухимов Л.М., Митяков Н.А., Урядов В.П. и др. Исследование час-

- тотных характеристик эффектов воздействия мощным радионизлучением на вертикальной и наклонной трассах. - В кн.: Модификация ионосферы мощными радиоволнами. - М.: АН СССР, 1986. - С.77-78.
10. Брухимов Л.М., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н. и др. О спектре искусственных ионосферных неоднородностей на разных высотах // Изв. вузов Радиофизика. - 1977. - Т.20, №12. - С. 1814-1820.
 11. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. - М.: Наука, 1973. - 272 с.
 12. Зиничев В.А., Иванов В.А., Фролов В.А., Шумяев В.В. Использование ЛЧМ метода вертикального зондирования для исследования модификации верхних слоев ионосферы // Изв. вузов Радиофизика. - 1986. - Т.29, №5. - С. 629-631.
 13. Албастров В.А., Бенедиктов Е.А., Иванов В.Н. и др. Особенности развития и релаксации искусственного возмущения ионосферы. Результаты эксперимента // Изв. вузов Радиофизика. - 1984. - Т.27, №2. - С. 147-153.
 14. Бойко Г.Н., Васильков В.В., Голян С.Ф. и др. Искусственная дефокусирующая линза в ионосфере // Письма в ЖЭТФ. - 1984. - Т.39, Вып. II. - С. 533-536.
 15. Беленов А.Ф., Зиничев В.А., Иванов В.А. и др. Зондирование ионосферы квазинепрерывными сигналами // Тез. докл. XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981. - С.12-13.
 16. Бочкарев Г.С. Исследование некоторых особенностей ионосферного распространения радиоволн с помощью асимптотических методов и реальных экспериментов: Дис...канд. физ.-мат. наук: Защищена 29.01.80г. 161 с; Утв. 18.06.80 г.; № 410. - М.: ИЗМИРАН, 1979.
 17. Бакметьева Н.В., Бенедиктов Е.А., Игнатъев Ю.А. и др. Исследование крупномасштабной области возмущения, возникающей при вертикальном нагреве ионосферы мощным КВ радионизлучением и ее влияния на распространение радиоволн // Препринт №188, Горький: НИРФИ. - 1985. - 58 с; Препринт №189, Горький: НИРФИ. - 1985. - 46 с.
 18. Иванов В.А., Игнатъев Ю.А., Фролов В.А. и др. Фокусирующие свойства искусственной крупномасштабной области возмущения на трассе, протяженностью 250 км // Геомагн. и аэронавиг. - 1986. - № 2. - С. 328-329.

19. Бенедиктов Е.А., Гончаров Н.П., Игнатъев Ю.А. и др. Экспериментальные результаты исследования параметров искусственной области возмущения верхней и нижней ионосферы методом вертикального зондирования // Изв. вузов Радиофизика. - 1984. - Т.27, № 1. - С. 12-17.
20. Бенедиктов Е.А., Игнатъев Ю.А., Матюгин С.Н. и др. Экспериментальные результаты исследования влияния искусственной области возмущения на пробные волны при вертикальном и наклонном зондировании ионосферы // Исследования по геомагн., аэрономии и физике Солнца. - М.: Наука, 1984, № 67, С. 45-51.
21. Бочкарев Г.С., Гусева З.Г., Еременко В.А., Черкашин Ю.Н. Влияние вытянутых неоднородностей на удержание волнового пучка в окрестности F-слоя электронной концентрации. - В кн.: Распространение радиоволн в ионосфере. - М.: ИЗМИРАН, 1978. - С. 10-14.
22. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. - М.: Наука, 1979. - 248 с.
23. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. - М.: Наука, 1978, Ч. II. - 464 с.
24. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980.-304 с.
25. Игнатъев Ю.А., Кротова З.Н. О воздействии мощных радиоволн на образование среднеширотного слоя E_s // Геомагн. и аэрономия. - 1976. - Т.16, № 4. - С. 638-641.
26. Алимов В.А., Ерухимов Л.М., Пыркова Т.С. К теории явления F₅ в ионосфере // Геомагн. и аэрономия. - 1971. - Т.11, №5. - С.790-797.
27. Ютло У., Коэн Р. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн // УФН. - 1973. - Т.109, №2. - С. 371-387.
28. Гетманцев Г.Г., Комраков Г.П., Коробков Ю.С. и др. Некоторые результаты исследований нелинейных явлений в F-слое ионосферы // Письма в ЖЭТФ. - 1973. - Т.18, №10. - С. 621-624.
29. Беленов А.Ф., Бубнов В.А., Ерухимов Л.М. и др. О параметрах искусственных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей // Изв. вузов Радиофизика. - 1977. - Т.20, №12. - С.1805-1813.

30. Альперт Я.Д. Распространение электромагнитных волн в ионосфере. - М.: Наука, 1972. - 563 с.
31. Гайлит Т.А., Гусев В.Д., Ерухимов Л.М., Широ П.И. О спектре фазовых флуктуаций при зондировании ионосферы // Изв. вузов Радиофизика. - 1983. - Т.26, №7. - С. 795-801.
32. Ерухимов Л.М., Максименко О.И. О параметрах ионосферных неоднородностей. Полярная ионосфера и магнитоферно-ионосферные связи. Апатиты: КФ АН СССР, 1978. - С. 189-200.
33. Богута Н.М., Иванов В.А., Катков Е.В. и др. Некоторые результаты исследования воздействия мощным КВ излучением на распространение радиоволн на трассе Киев-Йошкар-Ола // Изв. вузов Радиофизика. - 1984.-Т.27, - С. 1477-1479.

Дата поступления статьи

13 июля 1987 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
В в е д е н и е	3
1. Общая характеристика проведенных экспериментов	4
2. Эффекты генерации крупномасштабной искусственной ионосферной турбулентности	15
3. Среднемасштабные искусственные ионосферные неоднородности и их влияние на распространение декаметровых радиоволн	31
4. Эффекты трансформации пробных сигналов в плазменную моду	37
5. Влияние области возмущения на статистические характеристики КВ сигналов при наклонном зондировании ионосферы	41
З а к л ю ч е н и е	53
Л и т е р а т у р а	55

Лев Михайлович Ерухимов
Владимир Алексеевич Иванов
Николай Анатольевич Митяков
Валерий Павлович Урядов
Владимир Александрович Фролов
Владимир Васильевич Шумаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ,
ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Подписано в печать 28.01.88 г. МЦ 00694, Формат 60 x 84 1/16
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 3,03 усл.п.л. Тираж 120
Заказ 4611. Бесплатно

Отпечатано на ротапринте НИРФИ