

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

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

---

П р е п р и н т № 285

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН  
НА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
С ПОМОЩЬЮ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН

В.С.Белей,  
А.Ф.Беленов,  
В.Г.Галушко,  
Л.М.Ерухимов,  
В.А.Эвзин,  
Ю.М.Ямпольский

Горький 1989

Белый В.С., Беленков А.Ф., Гадучко В.Г.,  
Брухимов Л.М., Зюзин В.А., Ямпольский Д.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННОЙ  
ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН. //  
Препринт № 285, Горький: НИРФИ, 1989. - 14 с.

Представлены результаты экспериментальных исследований эффектов рассеяния пробных радиоволн на искусственно возбуждаемых ионосферных неоднородностях при использовании в качестве приемной антенны радиотелескопа УТР-2. Угломерные измерения позволили оценить местоположение и размеры области возмущений в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Показано, что помимо регулярного дрейфа неоднородной структуры существуют волновые возмущения плазмы, оценена характерная фазовая скорость этих движений, установлена связь динамики релаксации уровня пробного сигнала с энергообменом рассеивающих неоднородностей и неоднородностей более мелких масштабов.

На стадии релаксации установлена связь различных участков пространственного спектра ИИТ с динамикой поведения спектра пробных радиосигналов.

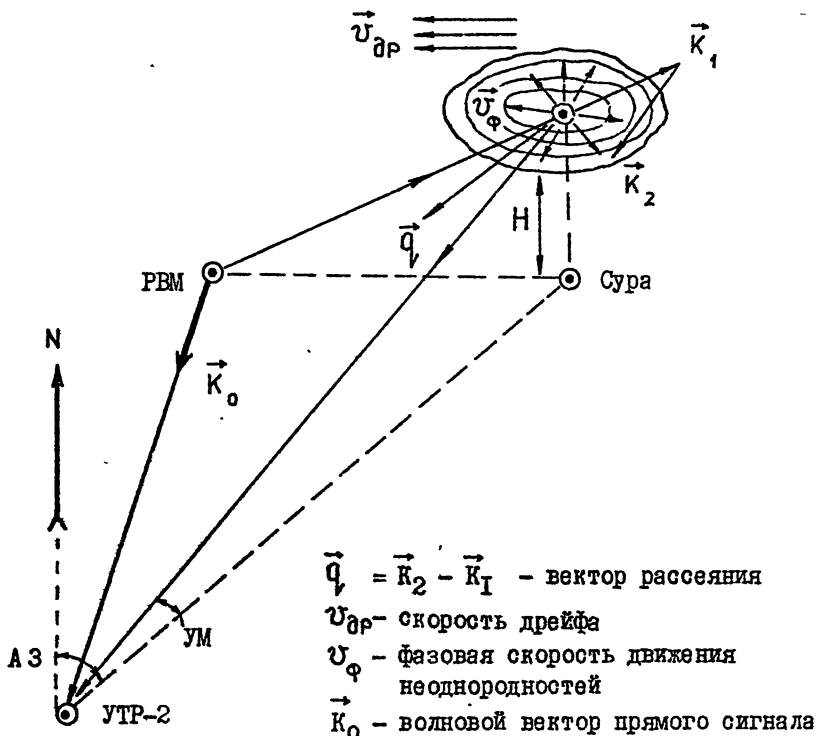
Одним из способов диагностики мелкомасштабных неоднородностей F-области ионосферы, возникающих под действием мощного КВ излучения, является исследование эффектов рассеяния пробных радиосигналов областью нагрева. Известно большое число работ, посвященных данному вопросу, обзор основных результатов приводится, в частности, в /1,4/. В этих исследованиях, однако, отсутствуют данные о высоком пространственным разрешением рассеивающей области. В настоящей работе предпринята попытка восполнить эти пробелы.

И. В 1987-1988 гг. в РИ АН УССР (г. Харьков) и НИРФИ (г. Горький) проводились исследования эффектов рассеяния пробных коротковолновых сигналов на искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), вызванной работой мощного нагревного стенда (НС) Сура (г. Васильсурск). Отличительной особенностью наших экспериментов являлось использование в качестве приемных антенн фазированных антенных решеток (ФАР) радиотелескопа УТР-2 /2/. Многоканальный приемно-измерительный комплекс был построен по принципу когерентной обработки и позволял регистрировать амплитудные спектры сигналов с разрешением порядка  $0,1 \dots 0,025$  Гц. В качестве пробных передатчиков использовались широкоэшелонные станции, расположенные в окрестности г. Москвы /3/ и г. Воронежа. Рабочие частоты излучения  $f_p$  выбирались таким образом, чтобы на прямых радиотрассах Москва-Харьков, Воронеж-Харьков, Горький-Харьков они превышали  $f_{\text{мпч}} E_s$ . Прием радиосигналов проводился одновременно на слабонаправленный одиночный линейный вибратор (ОВ), расположенный вблизи фазового центра радиотелескопа, и на две ортогональные линейные решетки УТР-2, ориентированные вдоль меридиана (антенна "Север-Юг") и параллели ("Запад-Восток"). Высокая направленность ФАР позволила в режиме сканирования по углу места (УМ) и азимуту (АЗ) оценить угловые размеры рассеивающей области. Частоты сигналов с выходов антенн преобразовались к промежуточной частоте  $f_{\text{пр}} \approx 3 \dots 5$  Гц и регистрировались на

многоканальных самописце и магнитографе. Спектральная обработка одного из каналов велась в реальном времени с помощью анализатора спектра Ж4-72.

2. Основной объем экспериментальных наблюдений был получен при работе НС в режиме вертикального излучения несущей частоты  $f_H$ . Мощный передатчик включался на 5 минут в течение каждого десятиминутного цикла с 8.00 до 12.00 и с 13.00 до 21.00 МДВ. В ряде случаев использовался импульсный нагрев длительностью от 1 до 5 с.

3. На рис. I схематически показано расположение приемного и передающего пунктов, заштрихованными окружностями отмечены границы рассеивающих областей. В отсутствие нагрева сигналы на прямых радиотрассах обусловлены рассеянием на естественных неоднородностях



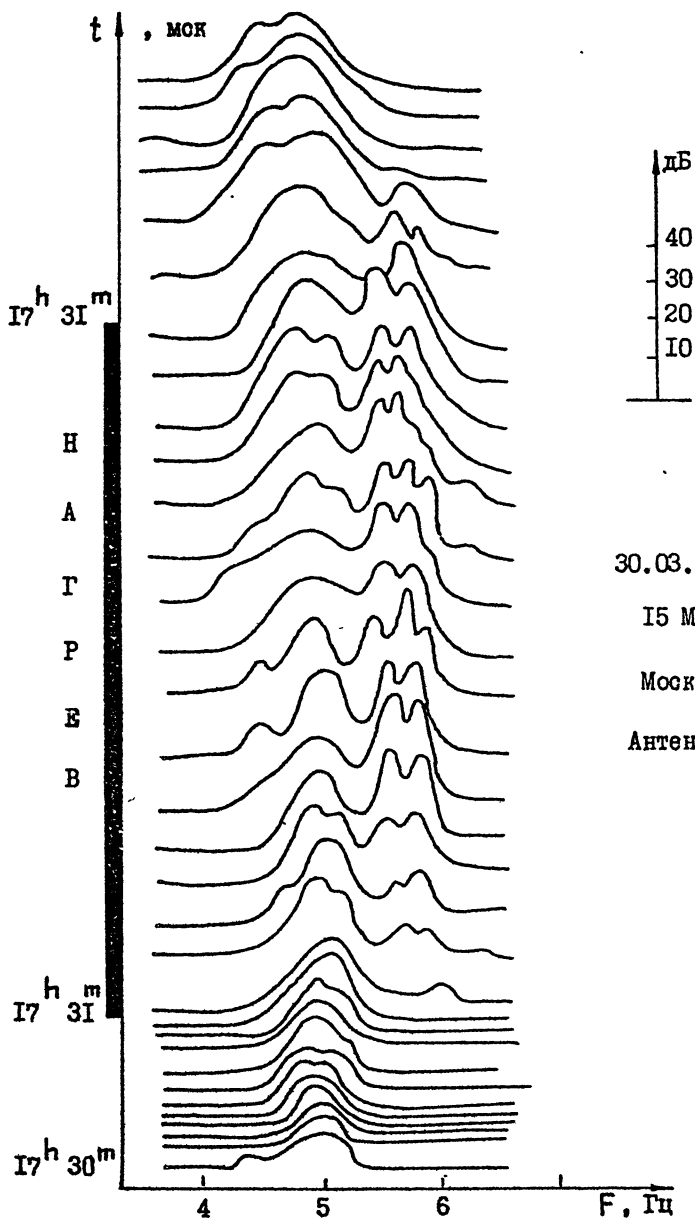
Р и с. I

ионосферы, их спектры на выходе ОВ представлены на рис.2 (временной интервал от 17<sup>h</sup> 30<sup>m</sup> до 17<sup>h</sup> 31<sup>m</sup>). Как правило, максимум спектра прямого сигнала (ПС) совпадал с частотой  $f_{\text{пр}}$ . В стационарных условиях нагрева (НС включен), кроме ПС на спектрах с ненаправленной антенны (ОВ) наблюдался сигнал, сдвинутый относительно  $f_{\text{пр}}$  на доплеровское смещение частоты (ДСЧ)  $F_d$  (временной интервал на рис. 2 от 17<sup>h</sup> 31<sup>m</sup> до 17<sup>h</sup> 36<sup>m</sup>). Величина  $F_d$  менялась в пределах от 0 до 5 Гц. Использование остронаправленных ФАР "Север-Юг" (С-Ю) и "Запад-Восток" (З-В) позволило решить пеленгационную задачу - определение местоположения искусственной рассеивающей области. Как и ожидалось, она находилась в районе НС "Сура" на высоте  $F$  - слоя ионосферы. Угломерные измерения позволили также определить ее пространственные размеры  $L_r$  в горизонтальной и  $L_v$  в вертикальной плоскостях:  $L_r \approx 50$  км,  $L_v \approx 10$  км.

Перейдем к анализу ряда особенностей поведения спектра пробного сигнала, рассеянного областью нагрева. Как уже отмечалось выше, наблюдалось смещение частоты рассеянного сигнала относительно  $f_{\text{пр}}$ . Величина  $F_d$  менялась в зависимости от времени суток и сезона года. На рис.3 показаны спектры сигналов для характерного пятиминутного цикла нагрева, принятых в канале ФАР "С-Ю", направленной на область нагрева. В левой части рисунка вблизи  $f_{\text{пр}}$  виден спектр ПС, принимаемый антенной УТР-2 на уровне боковых лепестков. Кроме смещения спектра исследуемого сигнала, обращает на себя внимание его большая "изрезанность" по сравнению со спектром ПС. Как правило, наблюдается "двугорбая" структура. Отчетливо прослеживаются его изменения (сужение) на стадии релаксации ("Сура" выключена). Статистическая обработка большого числа экспериментальных данных ( $N \approx 400 \dots 500$ ) показала, что в отличие от изменяющегося ДСЧ  $F_d$  средний частотный разнос между максимумами в спектре  $\langle \Delta F_d \rangle$  (коные скобки означают усреднение по ансамблю реализаций) оказался весьма стабильным, не зависел от времени суток и для несущей  $f_p \approx \approx 15$  МГц  $\langle \Delta F_d \rangle$  составил 0,2...0,3 Гц. Отметим также, что при использовании пробного излучения на частоте  $f_p \approx 26$  МГц (передатчик в г.Воронеже) оценка  $\langle \Delta F_d \rangle$  была порядка 0,5...0,6 Гц. Это

---

\*) Величина  $f_H$  подбиралась из условия близости к критической частоте слоя  $F_2$  ионосферы и в экспериментах менялась в зависимости от времени суток от 4 до 6 МГц.



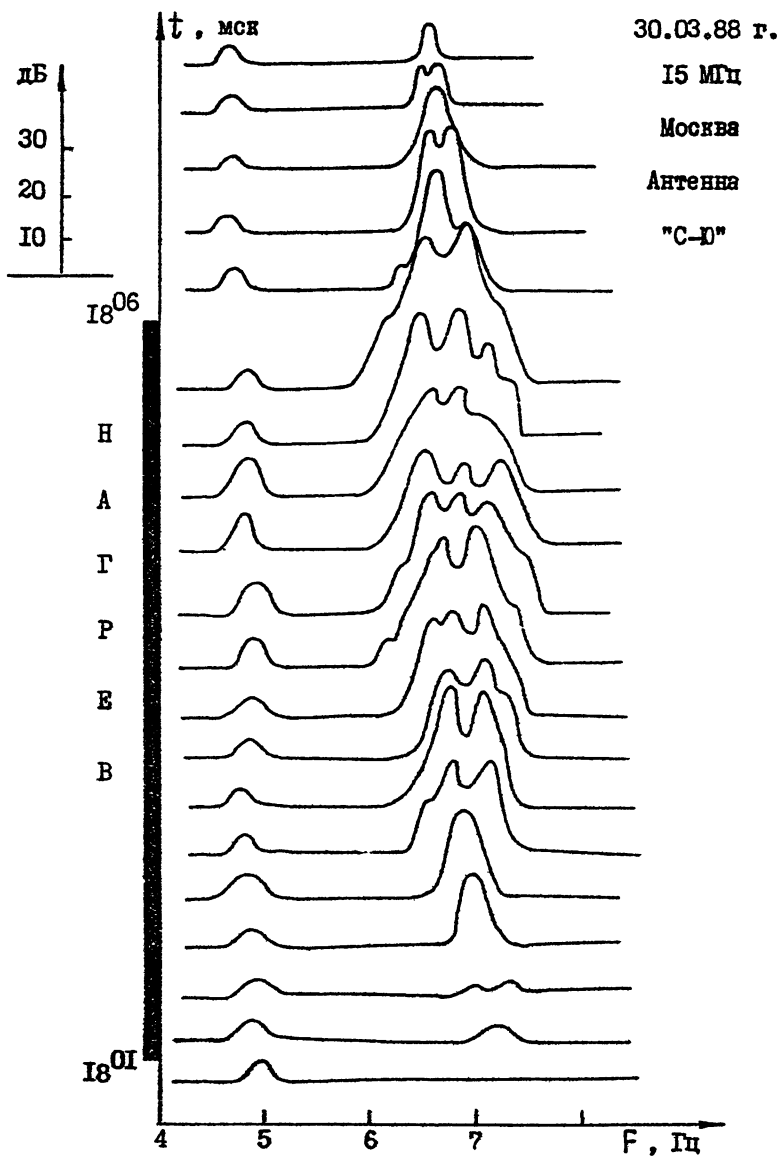
30.03.88 г.

15 МГц

Москва

Антенна ОВ

Р и с. 2



Р и с. 3

дало основание сделать вывод о том, что величина расщепления спектра пропорциональна значению несущей частоты. Следует обратить внимание еще на одно обстоятельство, обнаруженное при анализе спектральных данных. Выяснилось, что характерная ширина  $\Delta F$ , усредненного по каждому сеансу спектра (здесь черта означает усреднение по времени)  $\overline{PS}$ , пропорциональна среднему (для этого же сеанса) значению ДСЧ  $\overline{F_d}$ .

4. Перейдем к интерпретации экспериментальных данных, полученных в стационарном режиме нагрева. Прежде всего отметим, что формирование рассеянного поля в приемном пункте обусловлено резонансным рассеянием пробного сигнала на искусственных мелкомасштабных неоднородностях ионосферной плазмы с размерами  $l \sim \lambda/2$  /8/. Их интенсивность намного превышает уровень естественных флуктуаций  $\delta N_e$ , о чем свидетельствует отсутствие заметного рассеяния с азимута "Сура" в паузах НС. Заметим также, что условия ракурсного рассеяния на радиотрассе РВМ-"Сура"-Харьков не выполнялись. Наличие устойчивого (в течение одного сеанса наблюдений) дисперсионного смещения частоты  $F_d$  свидетельствует о переносе возбуждаемых в области нагрева неоднородностей с некоторой скоростью дрейфа  $\vec{v}_{др}$ . По-видимому, это движение носит регулярный характер, поскольку существует устойчивая связь между величиной  $F_d$  и уширением спектра ПС, которое, в свою очередь, определяется значением  $v_{др}$  вблизи области рассеяния сигнала на прямой радиотрассе. Численные оценки  $|\vec{v}_{др}|$  показали, что величина скорости дрейфа меняется в эксперименте от 10 до 70 м/с, наиболее вероятное значение  $v_{др} \sim 20$  м/с. Такие скорости движения характерны для дрейфа неоднородностей в F-области ионосферы /5/. Еще одной отличительной особенностью поведения  $\vec{v}_{др}$  является смена направления движения плазмы в средних широтах в F-области вблизи полудня: в утренние часы преобладает дрейф с востока на запад, в вечерние - с запада на восток /5/. Такую зависимость удалось проследить в весеннем цикле измерений 1988 г. (вблизи точки равноденствия).

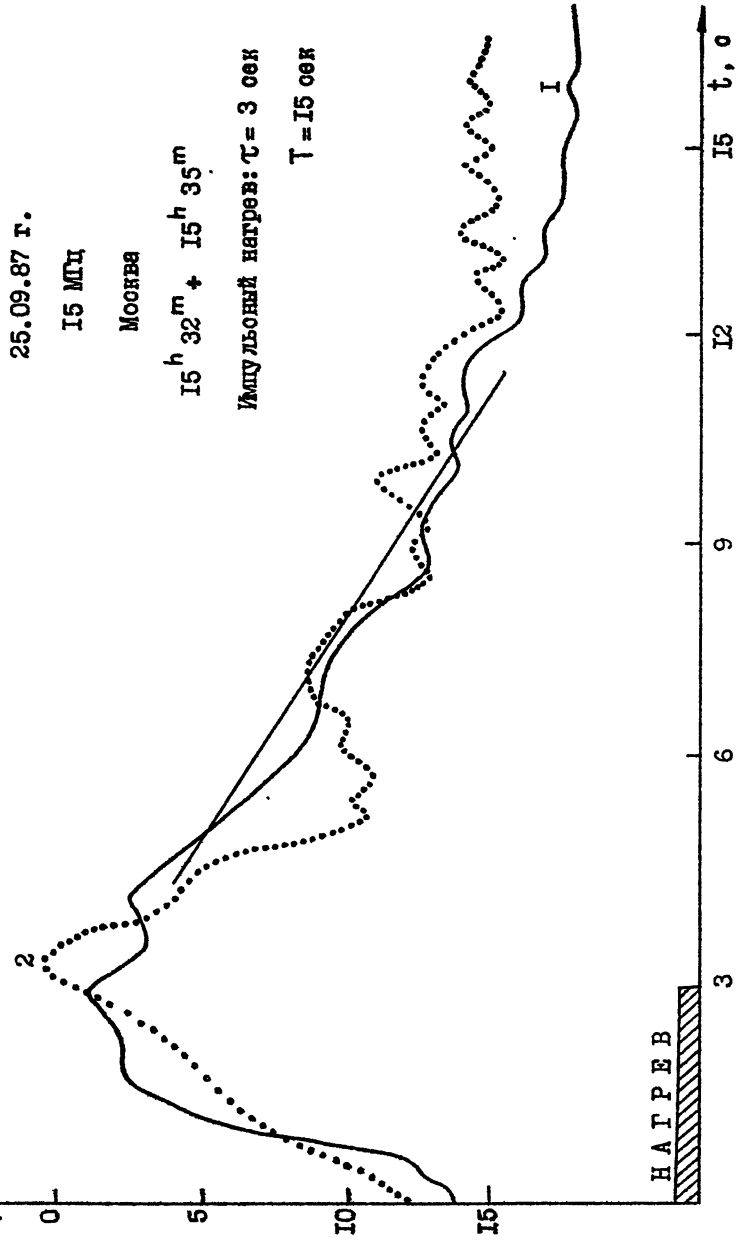
Рассмотрим одну из возможных моделей возмущенной области, объясняющую расщепление спектров сигналов, рассеянных на ИИТ. Пусть, кроме упорядоченного перемещения рассеивателей в области нагрева, со скоростью  $\vec{v}_{др}$ , существуют фазовые движения неоднородностей от центра рассеивающего объема (надрадарная точка) к его периферии с характерной скоростью  $\vec{v}_\phi$ . Тогда в спектре рассеянного сигнала



будет наблюдаться подъем спектральной плотности в областях частот  $f_{1,2} = F_d \pm \vec{q} \cdot \vec{v}_\phi$ , здесь  $\vec{q}$  - вектор рассеяния (см. рис. I). Как уже отмечалось выше, величина расщепления спектров  $\Delta F_d = |f_2 - f_1|$  для несущей частоты  $f_p = 15$  МГц в среднем по всему массиву данных составляла 0,2...0,3 Гц. С учетом геометрии эксперимента ( $|\vec{q}| = 1,8 |\vec{k}|$ ), такая оценка приводила к значениям  $v_\phi \sim 2...3$  м/с. Если наши рассуждения верны, то в области нагрева существуют фазовые движения неоднородностей с масштабами  $l \sim 12$  м, в радиальных направлениях от центра возмущенной области. Естественно, что наблюдение расщепления возможно только тогда, когда  $v_\phi \ll v_{др}$ , либо  $v_\phi \gg v_{др}$  (в противном случае картина расщепления будет искажаться наложением спектра ПС). В реальных условиях чаще всего выполнялось первое неравенство. Если такое модельное представление динамики рассеяния справедливо, то это означает, что в возмущенной области должны существовать волновые процессы с масштабами от единиц до десятков метров, с характерными фазовыми скоростями  $v_\phi \sim 2...3$  м/с.

5. Остановимся на ряде особенностей поведения рассеянных пробных сигналов в нестационарных условиях нагрева. На стадии релаксации возмущенной области спектр рассеянного сигнала сужается. Этот факт позволяет выделить в спектре две части: окрестность максимума и "хвосты", которые характеризуются различными скоростями релаксации. Количественный анализ этих скоростей был сделан для режима работы НС импульсами с длительностью  $\tau = 3$  с и периодом повторения  $T = 15$  с. Сигнал промежуточной частоты разделялся параллельно на два канала, в каждом из которых производилась фильтрация с полосой  $\sim 1$  Гц (характерная ширина спектра рассеянного сигнала (РС) при стационарном нагреве). Настройка фильтра в канале 1 была близка к частоте  $f_d$  максимума спектра РС, в канале 2 она составляла  $f_d + 1,5$  Гц (периферийная область спектра РС). На рис. 4 приведены осциллограммы амплитуд  $A$  сигналов ( $f_p = 15$  МГц) с выхода фильтров в каналах 1 и 2, усредненных по восьми последовательным периодам нагрева. Анализ кривых  $A_{1,2}(t)$  дает возможность оценить характерные времена релаксации максимума спектра  $\tau_p \sim 8...10$  с и "хвостов" спектра:  $\tau_{p2} \sim 1...2$  с. Следует отметить, что времена  $\tau_{p1,2}$  совпадают с характерными временами двух стадий релаксации масштабов  $l \sim 10$  м ионосферной турбулентности /6/. Сужение спектра РС при выключении нагрева наблюдалось во всех обра-

Ю  
A<sub>F</sub>, мВ



25.09.87 г.

15 МГц

Москва

15<sup>h</sup> 32<sup>m</sup> + 15<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>

Импульсный нагрев:  $\tau = 3$  сек

$T = 15$  сек

Р и с . 4

сз'

ботанных сеансах. На стадии развития ИИТ при включении нагрева наблюдался переход от "узкого" спектра к "широкому" (рис.2), однако эта особенность проявлялась лишь в тех сеансах, для которых характерны большие (более 2 с) времена развития РС (вечерние часы наблюдений).

6. Модельное описание деформации спектра РС при включении и выключении нагрева связано с интерпретацией "хвостов" спектра при стационарном нагреве. Согласно /8/, ширина частотного спектра рассеянного сигнала обусловлена изменением вектора рассеяния  $\vec{q}$  в пределах рассеивающего объема, что приводит к соотношению между шириной спектра  $\overline{\Delta F}$  и угловыми азимутальными размерами  $\Delta\alpha$  возмущенной области:  $\overline{\Delta F} \sim v_{др} \Delta\alpha / \lambda$ . На рис.5 приведены спектры РС для  $f_p \approx 26$  МГц (Воронеж), полученные при одновременном приеме ФАР "С-Ю" и "З-В" (рис.5) (пункты Воронеж, "Сура" и Харьков находятся практически на одном азимуте). Заметим, что при приеме ФАР "С-Ю" в формировании сигнала с выхода антенны участвует весь азимутальный угловой размер возмущенной области  $\Delta\alpha \geq 3^\circ$ , в то время как при приеме на ФАР "З-В" эффективный азимутальный размер области рассеяния определяется направленными свойствами антенны и составляет  $\Delta\alpha_1 \sim 1^\circ$ . Идентичность спектров в каналах "С-Ю" и "З-В" при стационарном нагреве и на стадии релаксации указывает на слабую связь формы спектров РС с азимутальными угловыми размерами области возмущений. К такому же выводу приводит отсутствие связи между шириной спектра и доплеровским смещением частоты в эксперименте. В работе /7/ уширение  $\overline{\Delta F}$  спектра РС для  $l \sim 3$  м интерпретируется наличием хаотической скорости перемещения рассеивателей:  $\overline{\Delta F} \sim \overline{v} / \lambda$ , где  $\overline{v}$  - среднеквадратичное значение случайной скорости. Для  $\lambda \approx 12$  м (Воронеж) ширина спектра РС по уровню  $I/e$  лежала в пределах 2...2,5 Гц, что дало оценку  $\overline{v} \approx 25 + 30$  м/с. Однако такой вывод не объясняет наблюдаемого регулярного расщепления спектра РС при стационарном нагреве. Как уже отмечалось, время релаксации "хвостов" спектра много меньше времени релаксации максимума, которое, в свою очередь, совпадает с интервалом диффузионного расплывания неоднородностей. Можно предположить, что в формировании "хвостов" спектра принимают участие рассеиватели меньших масштабов, чем "резонансные". Интенсивность рассеивающих неоднородностей изменяется за счет энергообмена между ними и более мелкомасштабных следствием этого является наблюдаемое уширение спектра.

04.04.88 г.

Воронеж

26 МГц

Антенна

"З - В"

Антенна

"С - Д"

дБ

30

20

10

t, мкс

15<sup>06</sup>

Н

А

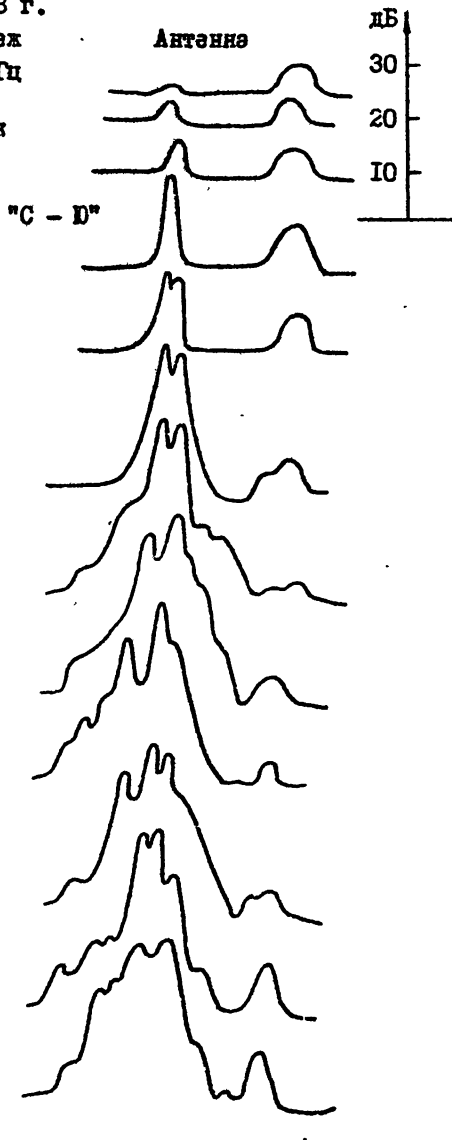
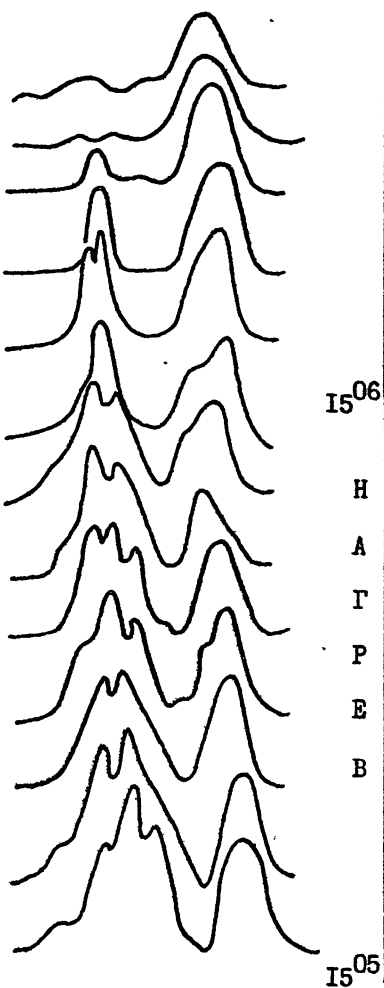
Г

Р

Е

В

15<sup>05</sup>



0 1 2 3 4 5 F, Гц

0 1 2 3 4 5 F, Гц

Р и с. 5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование остронаправленных приемных антенн в экспериментах по рассеянию пробных радиоволн на ИИТ позволило оценить размеры области возмущений, выяснить характер движения искусственно возбуждаемых неоднородностей, а также детализировать особенности их релаксации.

Было показано, что помимо регулярного дрейфа при длительном нагреве ( $\geq 1$  мин) существует еще один тип движения неоднородностей - радиальные волновые перемещения с характерной фазовой скоростью 2...3 м/с.

При проведении экспериментов в режиме коротких импульсов работы НС ( $\tau \approx 5$  с) была обнаружена связь между двухступенчатой релаксацией ИИТ и деформацией спектра рассеянного сигнала после выключения нагрева. Особенности релаксации спектра РС указывают на роль энергообмена между неоднородностями ИИТ разных масштабов. Это дает возможность использовать спектральные характеристики рассеянного сигнала в качестве средства диагностики процессов "перекачки" энергии по спектру масштабов ИИТ.

Авторы работы считают своим долгом поблагодарить участников радиофизических семинаров РИ АН УССР и НИРФИ, с которыми обсуждались основные результаты, а также сотрудников НИРФИ Бойко Г.И. и Сергеева Е.А. за помощь в проведении ряда измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н., Имитяков Г.А., Фролов В.Л. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Известия вузов. Радиофизика. - 1987. - Т.30, № 2. - С.208.
2. Брауде С.Я., Мень А.В., Содин Л.Г. Радиотелескоп декаметрового

го диапазона волн УТР-2. - В об.: Антенны. - М.: Связь, 1978, Вып.26 . - С.3.

3. Бюллетень В ОБ Государственной комиссии единого времени и эталонных частот СССР. Москва, 1988.
4. Беленов А.Ф. и др. О параметрах искусственных мелкомасштабных неоднородностей.//Изв.вузов. Радиофизика. - 1977. - Т.20 , № 12. - С.1805.
5. Казимирский Э.С., Коксуров В.Д. Движения в ионосфере. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1979. - 344 с.
6. Беленов А.Ф., Брухимов Л.М., Зюзин В.А., Насыров А.М., Стрелков В.А., Фролов В.Л. О динамике мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей.//Препринт № 233. - Горький: НИРФИ, 1987 . - 26 с.
7. Коровин А.В. и др. Доплеровские изменения частоты при ракурсном рассеянии УКВ на искусственных неоднородностях ионосферы. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1982. - Т.25, № 3. - С.277.
8. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику, ч.П. - М.: Наука, 1978.

Дата поступления статьи  
26 апреля 1989 года

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН  
НА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
С ПОМОЩЬЮ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН

---

Подписано в печать 27.09.89 г. МЦ 05264. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,85 усл.п. л.

Заказ 4922. Тираж 120. Бесплатно

---

Отпечатано на ротапинтере НИРФИ