

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт  
Министерства науки, высшей школы и технической политики  
Российской Федерации

П р е п р и н т   №   343

СТЕНД "СУРА". ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Беленов А.Ф., Белов И.Ф., Бенедиктов Е.А., Бычков В.В.,  
Гончаров Н.П., Грач С.М., Ерухимов Л.М., Зиничев В.А.,  
Зюзин В.А., Караштин А.Н., Комраков Г.П., Котик Д.С.,  
Митяков Н.А., Мясников Е.Н., Поляков С.В., Рапопорт В.О.,  
Токарев Ю.В., Урядов В.П., Фролов В.Л. (НИРФИ),  
Трахтенгерц В.Ю., Фабрикант А.Л. (ИИФРАН),  
Ямпольский Ю.М. (ИРА АН Укр.),  
Тиде Бу, Лейзер Томас (Институт космической физики, Швеция),  
Берхадт Пол (Военно-Морская научно-исследовательская  
лаборатория, США)

Приводятся основные технические характеристики нагревного стенда "Сура" и рассматриваются предложенные проекты его модернизации. Дана краткая характеристика результатов экспериментальных исследований, выполненных в последние годы на стенде "Сура", и проанализированы перспективные направления развития этих исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
I. ВВЕДЕНИЕ.....	3
2. Коротковолновая приемо-передающая система стенда "Сура".	5
2.1. Основные параметры и возможности.....	5
2.2. Структура стенда.....	6
2.3. Перспективы развития стенда "Сура".....	7
3. Основные результаты и перспективы исследований на стенде "Сура".....	8
3.1. Искусственная ионосферная турбулентность F-области ионосферы.....	8
3.2. Исследования атмосферы и ионосферы методом обратного рассеяния радиоволн естественными и искусственными неоднородностями.....	36
3.3. Динамика атмосферных активных зон и радио-акустическое зондирование атмосферы.....	44
3.4. Радиолокационные исследования магнитосферы.....	48
3.5. Радиолокационные исследования объектов ближнего космоса.....	53
3.6. Радиоастрономические исследования.....	56
ЛИТЕРАТУРА.....	63

## 1. Введение

1. Современные тенденции в исследовании околоземного пространства требуют комплексного подхода, который соединил бы в себе набор инструментов и методов, позволяющих получать исчерпывающую информацию о параметрах нейтральной и ионизированной оболочек Земли. По сути дела, такие задачи поставлены в крупнейших международных проектах STEP (Solar - Terrestrial Energy Program) и Международной геосферно-биосферной программе "Глобальные изменения" (Global Change), цель которых, в частности, проследить цепочку солнечно-земных связей от межпланетного пространства вплоть до поверхности Земли и оценить вклад антропогенной деятельности в изменение окружающей среды. Для выполнения указанных задач было бы заманчиво объединить комплекс необходимых измерительных средств и группу квалифицированных специалистов в одном научно-исследовательском центре, способном конкурировать на международном уровне. Таким центром мог бы быть, на наш взгляд, модифицированный стенд "Сура", функционирующий на базе двух институтов: Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) и Института прикладной физики АН (ИПФАН).

Стенд "Сура" был сооружен и введен в строй в 1980 году (коротковолновая приемно-передающая система) и в 1985 году (средневолновая передающая система). При разработке стенда первоначально ставилась задача исследования искусственных ионосферных возмущений, возникающих при воздействии на ионосферу мощным пучком радиоволн. Исходя из этой задачи определялись основные параметры стенда. Коротковолновая антенная система стенда в настоящее

время имеет полосу частот  $4,5+94$  МГц, обеспечивает эффекты в нуль мощность в луче  $PG = 200$  МВт ( $P$  — мощность передатчика,  $G$  — коэффициент усиления антенны) на средней частоте  $6,6$  МГц. Ширина луча диаграммы направленности на средней частоте около  $8^\circ$  в зенитном направлении. Угол сканирования луча антенны равен  $\pm 40^\circ$  от зенитного направления в плоскости магнитного меридиана. Антенная система состоит из трех идентичных подрешеток общей площадью  $300 \times 300$  м<sup>2</sup>, возбуждаемых тремя радиовещательными коротковолновыми (КВ) передатчиками ПКВ-250 со средней мощностью  $250$  кВт каждый. Диапазон рабочих частот КВ передатчиков —  $4+26$  МГц.

Средневолновая антенная система, имеющая полосу частот  $I, I+I,5$  МГц, обеспечивает в зенитном направлении ширину диаграммы направленности  $25^\circ \times 50^\circ$  на средней частоте диапазона  $I,3$  МГц. Общая площадь, занимаемая антенной, —  $250 \times 500$  м<sup>2</sup>. Антенная система состоит из двух 4-элементных сфазированных линейных решеток турникетных излучателей, каждая из которых возбуждается собственным блоком передатчика. В средневолновой передающей системе применен промышленный передатчик ДСВ-150, предназначенный для радиовещания в диапазоне длинных и средних волн с мощностью в режиме несущей  $150$  кВт. Передатчик состоит из двух блоков мощных усилителей с мощностью  $75$  кВт каждый. Установка предназначалась для исследований воздействия на ионосферу радиоизлучением на резонансной частоте (гирочастота электронов  $\approx I,4$  МГц).

Традиционные направления работ, которые велись на станции "Суря" в течение последнего десятилетия, включают: исследования искусственной ионосферной турбулентности, возникающей вблизи точки отражения мощной радиоволны от ионосферы; исследования генерации сигналов на комбинационных частотах при воздействии модулированным радиоизлучением на нижнюю ионосферу; исследования ионосферы методом обратного рассеяния радиоволн искусственными неоднородностями ионосферной плазмы; радиолокация Луны и наблюдения космического радиоизлучения. Значительных успехов в обсуждаемых исследованиях удалось добиться в последние годы (1990—1991 гг.) в процессе совместных экспериментов НИРФИ со Шведским институтом космических исследований и Морской научно —

-исследовательской лабораторией США в результате сочетания уникальных возможностей стенда "Сура" и диагностических средств зарубежных партнеров. Существуют договоренности о продолжении этих работ. По оценкам зарубежных партнеров стенд "Сура" является лучшей в мире установкой подобного класса. В настоящее время рассматривается проект модернизации стенда "Сура" (строительство новых антенн) и создание уникального многоцелевого диагностического комплекса для дистанционных исследований нижней, средней, верхней атмосферы Земли и объектов ближнего космоса. Предлагается построить новую приемо-передающую антенную систему на диапазон частот 15+25 МГц с эффективной площадью  $173 \times 173 \text{ м}^2$  с дискретно управляемым лучом с отклонением на максимальный угол  $45^\circ$  в северо-западном направлении и на угол  $25^\circ$  в северо-восточном направлении. Общее количество лучей - 75. Ширина луча -  $4,5^\circ$ , эффективная мощность 800 МВт. В радиолокационном режиме предполагается использовать три уже имеющиеся передатчика ПКВ-250.

Помимо этого, на том же полигоне предлагается создание уникальной излучающей акустической системы, работающей в диапазоне частот 45+60 Гц в виде активной фазуруемой антенной решетки из 52 излучающих модулей. Предполагается электронное сканирование лучом шириной  $15^\circ$  в пределах  $0+50^\circ$  по зенитному углу. Максимальная излучаемая мощность решетки не менее 10 кВт.

Ниже приводятся основные технические характеристики и возможности стенда "Сура" (раздел 2) и основные результаты проведенных в последние годы измерений и перспективы дальнейших исследований (раздел 3).

## 2. КРОТКОВОЛНОВАЯ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩАЯ СИСТЕМА СТЕНДА "СУРА"

### 2.1. Основные параметры и возможности

Антенная система стенда, имеющая полосу частот 4,5+94 МГц, обеспечивает эффективную мощность в луче  $P_G \approx 200 \text{ МВт}$  на средней частоте 6,6 МГц. Ширина луча на средней частоте около  $8^\circ$  в зенитном направлении. Антенная система имеет развязанные пере-

дающий и приемный каналы с разным знаком круговой поляризации в передающем и приемном режимах работы. Угол сканирования луча антенны равен  $\pm 40^\circ$  от зенитного направления в плоскости магнитного меридиана.

Антенная система стенда состоит из трех идентичных подрешеток, возбуждаемых тремя передатчиками с мощностью 250 кВт каждый. Такая конструкция обеспечивает когерентную работу трех или двух подрешеток на одной частоте, а также автономную работу каждой подрешетки на разных частотах с разным типом модуляции. Возможность импульсной модуляции с минимальной шириной импульса около 10 мкс делает стенд очень эффективным инструментом в радиолокационных экспериментах, в моностатическом или бистатическом режимах работы. Кроме того, имея большую площадь:  $300 \times 300 \text{ м}^2$ , антенная решетка стенда эффективно используется в радиоастрономических наблюдениях на декаметровых волнах.

## 2.2. Структура стенда

Плоская фазированная решетка стенда с размерами  $12 \times 12$  элементов состоит из трех ( $4 \times 12$  элементов) подрешеток. Мощные усилители, используемые в стенде и имеющие 250 кВт средней мощности, являются промышленными коротковолновыми передатчиками типа ПКВ-250. Возбудители всех передатчиков работают от общего кварцевого генератора, идентичность фазовых характеристик каналов передатчиков достигается с помощью системы автоматической фазовой подстройки.

Каждая антенная подрешетка состоит из четырех  $12$ -элементных сфазированных линейных решеток, с постоянным амплитудным распределением. В антенне применены ортогональные широкополосные диполи, возбуждаемые  $3$ -дБ квадратурным делителем мощности (поляризатором). Поляризаторы обеспечивают излучение и прием циркулярно поляризованных волн с разными знаками поляризации. Изменение знака поляризации ( $0 - \pi$ ) достигается переключением одного из выходов поляризатора. Поляризатор вместе с поглощающей линией на его приемном выходе выполняет функцию согласующего элемента, улучшая характеристики антенны.

В передающем режиме необходимое линейное фазовое распределение внутри каждой подрешетки осуществляется механической настройкой линий задержки, которые также реализованы на 3-дБ квадратурных гибридах. Линейное фазовое распределение между подрешетками формируется с помощью электрически управляемых линий задержки, введенных на входах мощных усилителей. Сектор электрического сканирования луча ограничивается шириной диаграммы направленности подрешетки,  $18^\circ$  на средней частоте.

В настоящее время заканчивается модернизация стенда "Сура", разрабатывается система электрического фазирования антенны в приемном режиме для обеспечения работы в режиме локатора при полной мощности передатчиков. Приемные каналы включены на выходе поляризаторов через поглощающие линии и pin-диодные выключатели, используемые для защиты приемной системы во время работы передатчиков. Благодаря высокому уровню внешних шумов в рабочем диапазоне частот потери в поглощающих линиях (около 10 дБ) практически не портят отношение сигнал/шум системы.

Приемная фазированная система обеспечит электрическое сканирование луча в секторе  $\pm 40^\circ$  от зенита, а также образование нескольких независимых лучей.

### 2.3. Перспективы развития стенда "Сура"

Для расширения возможностей стенда "Сура" при проведении исследований в активных экспериментах и для диагностики околоземного пространства было предложено построить новую антенную систему, в локационном режиме использовать те же самые три передатчика ПКВ-250. Ниже приведены основные параметры антенной системы.

1. Диапазон частот 15–25 МГц.
2. Антенна – плоская горизонтальная фазированная решетка, содержащая 576 широкополосных вибраторов шунтового типа.
3. Эффективная площадь антенны  $3 \cdot 10^4 \text{ м}^2$  ( $173 \times 173 \text{ м}^2$ ).
4. Ширина луча  $4,5^\circ$  в обеих плоскостях на средней частоте  $F = 20 \text{ МГц}$ .
5. Луч антенны управляется электрически дискретно на угол

$\pm 25^\circ$  в северо-восточном направлении и на угол  $\pm 45^\circ$  в северо-западном направлении (направление на северную Скандинавию), причем электрически на угол  $\pm 6,5^\circ$  относительно пяти направлений ( $0, \pm 19, 5^\circ, \pm 39^\circ$ ) путем фазирования передатчиков. Выделенные пять направлений устанавливаются с помощью электромеханических фазовращателей. Общее количество лучей в области сканирования - 75.

6. Эффективная мощность в луче  $P_G = 800$  МВт на средней частоте  $F = 200$  МГц.

7. Поляризация линейная.

Устранение больших дифракционных лепестков в секторе сканирования луча во всем рабочем диапазоне частот обеспечивается с расстоянием между вибраторами  $0,6\lambda_{\min}$  ( $\lambda_{\min} = 12$  м).

Антенна состоит из трех подрешеток по  $8 \times 24$  вибраторов в каждой, образующих квадратную решетку из  $24 \times 24$  вибраторов. Каждая подрешетка возбуждается одним передатчиком ПКВ-250.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТЕНДЕ "С У Р А"

#### 3.1. Искусственная ионосферная турбулентность F-области ионосферы

В настоящем разделе представлены результаты исследований искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) F-области ионосферы, полученные в Нижегородском научно-исследовательском радиотехническом институте (НИРФИ). ИИТ возникает в ионосфере вблизи высоты отражения мощной радиоволны (волны накачки, ВН) обычной поляризации в результате развития различных параметрических неустойчивостей (ПН), которые возбуждаются, когда частота ВН  $\omega_0 = 2\pi f_0$  близка к одной из собственных частот плазмы, а ее эффективная мощность  $P_G$  превышает некоторое пороговое значение  $P_{G_{th}}$ . ПН могут быть обусловлены как стрижонной (высокочастотное давление электрического поля), так и тепловой (джоу-лав нагрев) нелинейностями /1, 2/. В результате их развития усиливаются высокочастотные собственные колебания плазмы с частотой



тами  $\omega \sim \omega_0 \geq \omega_{pe}$  ( $\omega_{pe}$  - электронная ленгмювская частота), а также различные низкочастотные возмущения: ионно-звуковые волны, вынужденные ионно-звуковые колебания, потенциальные ионно-циклотронные волны, мелкомасштабные неоднородности концентрации и плазмы (МН). ИИТ воздействует, в свою очередь, на характерные свойства ионосферной плазмы: появляются искажения профиля электронной концентрации /3/, искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) на частотах  $\omega \sim \omega_0$  и  $\omega \sim 2\omega_0$  /4, 5/, дополнительная ионизация /6/ и свечение в оптическом диапазоне /7/, вызываемые ускоренными электронами; оказывает существенное влияние на распространение радиоволн через возмущенную область ионосферы: аномальное ослабление ВЧ и близких по частоте пробных радиоволн /8/, ракурсное рассеяние радиоволн КВ и УКВ диапазона /9/. Развитие ПН значительно усиливает крупномасштабное расслоение ионосферной плазмы, возникающее в результате самофокусировочной неустойчивости /10/.

Исследования ИИТ ведутся в НИРФИ с начала 70-х годов, сначала на стенде "Зименки" (частоты ВЧ:  $f = 5,75$  и  $4,76$  МГц, эффективная мощность  $PG \sim 20$  МВт,  $56^\circ$  с.ш.), а с 1981 г. на стенде "Сура" ( $f_0 = 4,785+9,310$  МГц,  $PG \sim 150+270$  МВт,  $56^\circ$  с.ш.) и стенде Института астрофизики АН Таджикистана "Гиссар" ( $f_0 = 3,7+6$  МГц,  $PG \sim 8$  МВт,  $38^\circ$  с.ш.). За рубежом исследования ИИТ ведутся на нагревных стендах в Аресибо (Пуэрто-Рико,  $f_0 = 3+12$  МГц,  $PG \sim 160+300$  МВт,  $18^\circ$  с.ш.), Тромсё (Норвегия,  $f_0 = 2,5+8$  МГц,  $PG \sim 360$  МВт,  $70^\circ$  с.ш.) и Фэйрбэнкс (Аляска, США). Кроме того, серия исследований была проведена в 1970-1975 гг. на стенде в Боулдере (США,  $f_0 = 4,5+9$  и  $2,7+3,3$  МГц,  $PG \sim 120+160$  МВт и  $60$  МВт,  $55^\circ$  с.ш.).

Отметим, что к настоящему времени различным аспектам исследований ИИТ посвящено свыше 600 публикаций. Многие из них суммированы в обзорах /II-I7/, а также в специальных выпусках журналов: Radio Science (1974, № 12), Изв. вузов. Радиопизика (1975, Т. 18, № 9; 1977, Т. 20, № 12), Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics (1982, Т. 44, № 12; 1985, Т. 74, № 12).

Ниже кратко представлены основные результаты по исследованиям ИИТ, полученные в НИРФИ в последние годы, а также рассмот-

рени некоторые перспективы дальнейших исследований.

3.1.1. Стрикционная параметрическая неустойчивость. Наиболее быстро после включения ВН в ионосфере развивается стрикционная параметрическая неустойчивость (СПН), обусловленная вытеснением плазмы из областей с повышенной интенсивностью электрического поля. На эксперименте СПН проявляется как быстрое (за несколько (1-5) миллисекунд) уменьшение амплитуды отраженной от ионосферы волны накачки (стрикционное самовоздействие) и значительное (в  $10^3+10^4$  раз) усиление плазменной и ионно-звуковой волн на сигналах станций некогерентного рассеяния. В условиях средних широт СПН наиболее эффективно развивается вблизи точки отражения ВН в первых максимумах функции Эйри. В процессе исследований стрикционного самовоздействия ВН в НИРФИ были определены пороговые поля СПН  $E_{ths}$  при различных частотах ВН  $f_0$  и подтверждена теоретическая зависимость  $E_{ths} \propto f_0^{3/2} / I_8, I_9 / (E_{ths} \approx 360 \text{ мВ/м при } f_0 = 5,75 \text{ МГц})$ . В хорошем согласии с теорией, построенной в приближении слабой турбулентности /20/, находятся также величина потерь энергии ВН на возбуждение плазменных волн и зависимость инкремента неустойчивости от мощности ВН. Отметим также существенную разницу величины потерь энергии ВН в средних (75+90% /I8/) и низких (20-35%, Аресибо /2I/) широтах, что связано, по-видимому, с существенно большим разбуханием поля ВН вблизи точки отражения при малых углах наклона геомагнитного поля к вертикали. Во время совместных советско-шведских экспериментов в 1990, 1991 гг. были проведены параллельные измерения стрикционного самовоздействия ВН и искусственного радиоизлучения ионосферы на стадии СПН. Данные в настоящее время обрабатываются.

Времена  $0,05+1$  с после включения ВН характеризуются появлением быстрых (с периодом  $0,1+0,3$  с при  $\tilde{P} \sim 10$  МВт,  $\tilde{P}$  - эффективная мощность ВН с учетом линейного поглощения в ионосфере) затухающих осцилляций с нарастающим периодом на отраженном сигнале ВН и пробных волн, частоты которых могут отличаться от  $f_0$  на несколько (до десятков) килогерц. Такие осцилляции не явля-

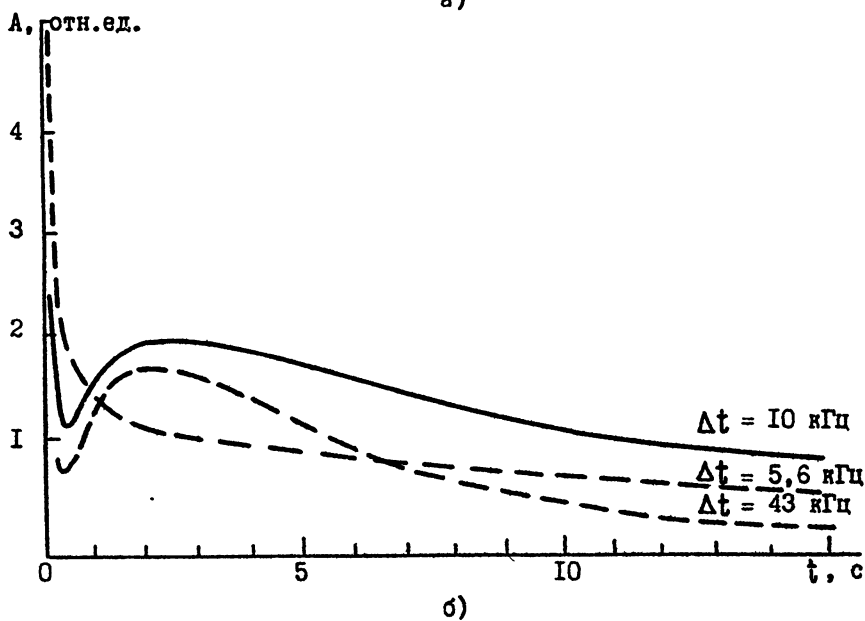
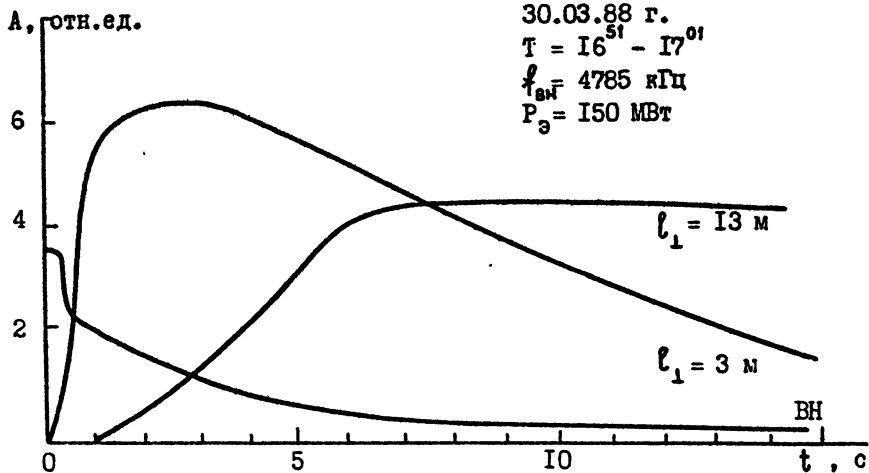
ются результатом интерференции нескольких волн, они формируются в локальных областях возмущенной области ионосферы и имеют порог по мощности ВН, близкий к порогу СПН /22/. Удовлетворительная интерпретация этого эффекта в настоящее время отсутствует.

3.1.2. Тепловая параметрическая неустойчивость. За более длительное время:  $\sim 0,5-10$  с (в зависимости от мощности ВН) в F-области ионосферы развивается тепловая параметрическая неустойчивость (ТПН), обусловленная омическим нагревом плазмы в суммарном поле ВН и плазменных волн /2, I2, I4/. В процессе ТПН в ионосфере вблизи уровня верхнего гибридного резонанса, где  $\omega_0^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{ve}^2$  ( $\omega_{ve}$  - электронная циклотронная частота), возбуждаются плазменные волны и сильно вытянутые вдоль геомагнитного поля  $\vec{B}$  мелкомасштабные неоднородности концентрации плазмы (МН) с поперечными масштабами  $r_e \ll l_{\perp} \leq \lambda_0$  ( $\lambda_0$  - длина ВН в вакууме,  $r_e$  - радиус циклотронного вращения тепловые электронов) и продольными  $l_{\parallel}$  порядка 5-15 км, определяемыми характерными длинами теплопроводности соответственно поперек и вдоль  $\vec{B}$ .

В эксперименте ТПН проявляется, в первую очередь, через аномальное ослабление (АО, уменьшение амплитуды отраженных от ионосферы волн на 15-25 дБ) ВН и близких к ней по частоте пробных радиоволн с частотами  $|f - f_0| \approx f_0 l_{\parallel} / L \sim 0,1 f_0$  ( $L$  - характерный масштаб ионосферного слоя) /8, II-13/. АО связано с рассеянием ВН и пробных волн в плазменные области верхнего гибридного резонанса (ВГР). Высоочастотное давление возбуждаемых в процессе ТПН плазменных волн приводит, вследствие вытеснения плазмы из области ВГР, к заметным искажениям профиля электронной концентрации обнаруженным методом многочастотного доплеровского зондирования ионосферы /3/. Пространственный спектр МН изучается на эксперименте с помощью метода ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов /9, II, I2/, возникающего при выполнении условия Брэгга  $\vec{k}_1 - \vec{k}_2 = \vec{\alpha}$ , где  $\vec{k}_1, \vec{k}_2$  - волновые векторы падающей на возмущенную область ионосферы и рассеянной радиоволн,  $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2|$ , а  $\vec{\alpha}$  - волновой вектор рассеивающей неоднородности  $\vec{\alpha} \perp \vec{B}$ .

Как показали измерения, порог генерации МН составляет  $\bar{P}_{\text{tht}} \sim I-2$  МВт ( $E_{\text{tht}} \sim 40$  мВ/м). Порог срыва МН оказывается ниже и составляет  $\bar{P}_{\text{сг}} \sim 0,5$  МВт /II, I3/. Этот факт приводит к появлению гистерезисной зависимости интенсивности рассеянного МН сигнала от мощности ВН, которая выявлена в эксперименте /23/. Спектр МН на стационарной стадии в области масштабов  $3 \text{ м} < \ell < 20 \text{ м}$  близок к степенному с показателем спектра 2:  $n_{\omega}^2 \propto \omega^{-2}$ . В то же время, при больших ( $\bar{P} \sim 40+60$  МВт) мощностях ВН на начальной стадии развития ТПН (в течение 2-3 с) интенсивность МН с  $\ell_1 \sim 3 \text{ м}$  оказывается выше, чем с  $\ell_1 \sim 13 \text{ м}$ . Установлено, что время развития аномального ослабления определяется развитием МН с  $\ell_1 \sim 3 \text{ м}$ , а время его релаксации после выключения ВН - неоднородностями с  $\ell_1 \sim 10-15 \text{ м}$ . Развитие искусственной турбулентности в области ВГР подавляет эффект стрикционного самовоздействия ВН. Это связано со значительной трансформацией энергии ВН в плазме и в волны в этой области на развитой стадии ТПН и "экранировкой" области отражения ВН, где стрикционное самовоздействие наиболее эффективно. Отметим одну особенность развития МН: если длительность импульса ВН оказывается короче времени достижения стационарного уровня МН, развитие МН может продолжаться некоторое время  $\neq 1$  с после выключения ВН.

Используя данные измерений интенсивности МН, представленные на рис.3.1.1а, можно вычислить спектральные характеристики мелкомасштабной турбулентности в процессе ее развития. Установлено, что в течение первых нескольких секунд после начала воздействия, т.е. практически все время пока наблюдается развитие эффекта А0, имеет место инверсия спектра в области масштабов  $\ell_1 \approx 3-10 \text{ м}$ , когда интенсивность более мелкомасштабной части спектра турбулентности превышает интенсивность более крупномасштабных флуктуаций плотности плазмы. Измерения показали, что такая инверсия спектра имеет место только при достаточно больших мощностях ВН:  $\bar{P}_0 \approx 10$  МВт и сопровождается появлением таких эффектов, как перенос модуляции мощного радионизлучения на пробные волны, и "быстрой" стадии развития эффекта А0. В качестве модели, объясняющей генерацию инверсного спектра МН на начальной



Р и с. 3.1.1

стадии взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой, в /27/ рассмотрена возможность генерации искусственных неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 3$  м за счет самофокусировочной неустойчивости плазменных волн, возбуждаемых вблизи уровня отражения ВН при развитии и стрикционной параметрической неустойчивости, которые могут служить "затравочными" неоднородностями для тепловой параметрической неустойчивости.

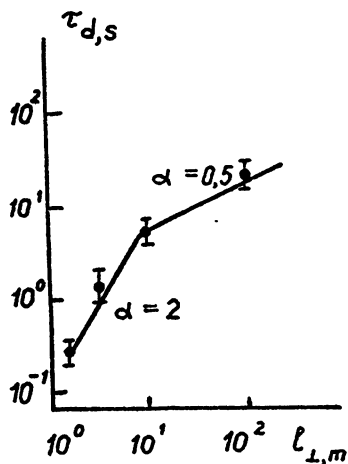


Рис. 3.1.2

Измерения релаксации МН (рис. 3.1.2) /24/, проведенные также с помощью метода ракурсного рассеяния, показали, что зависимость времени релаксации  $\tau_d$  от поперечного масштаба при  $l_{\perp} < l_{\perp}^*$  носит квадратичный характер  $\tau_d \propto l_{\perp}^2$ , релаксация неоднородностей при этом определяется поперечной магнитному полю  $\vec{B}$  амбиполярной диффузией ионосферной плазмы. При  $l_{\perp} > l_{\perp}^*$   $\tau_d \propto l_{\perp}^{0,5}$ , что связано с существенным влиянием продольной диффузии на релаксацию МН. Величина  $l_{\perp}^*$  зависит от времени суток и составляет 6+10 м в дневные и вечерние часы и ~3 м ночью.

Отмечено, что релаксация рассеянного сигнала носит, как правило, ярко выраженный двухступенчатый характер: на первом этапе амплитуда его падает на 10–20 дБ с характерным временем  $\tau_d$ , после чего темп релаксации замедляется в несколько раз /24/. Характерное время релаксации МН на этом этапе по-прежнему  $\propto l_{\perp}^2$ , но коэффициент диффузии оказывается существенно меньше амбиполярного.

Новые интересные результаты при исследовании рассеяния КВ радиоволн на МН удалось получить с помощью остронаправленной антенны УТР-2 Харьковского радиоастрономического института (РИ) АН УССР /25, 26/. В частности, обнаружено, что спектр рассеянного сигнала состоит из узкополосной центральной части и широкополосного пьедестала (рис.3.1.3), причем времена релаксации

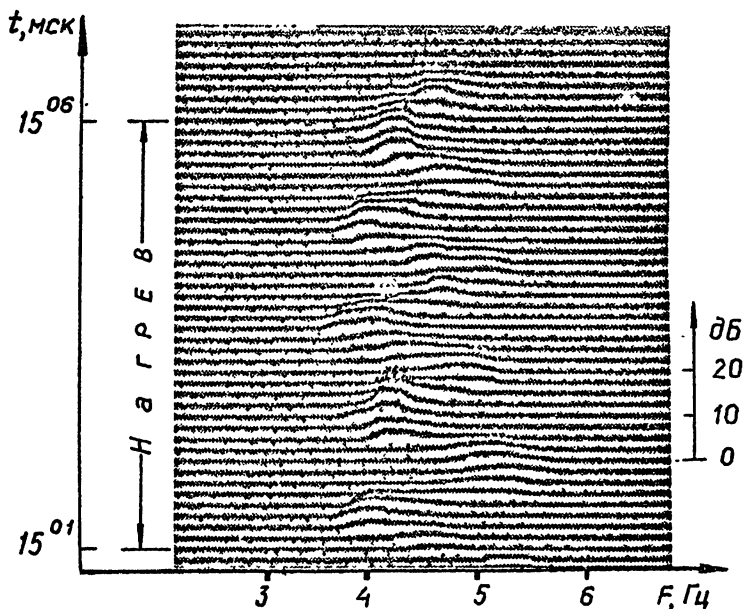


Рис. 3.1.3

областей пьедестала и максимума совпадают соответственно с временами первого (быстрого) и второго (медленного) этапов двух-ступенчатой релаксации рассеянного сигнала. Обнаружены устойчивое расщепление ( $\Delta f \sim 0,2+0,8$  Гц) спектров рассеянных сигналов с линейной зависимостью частотного расщепления от частоты пробного сигнала, которое может быть интерпретировано как относительное движение неоднородностей с характерной скоростью порядка 3 м/с, квазипериодические изменения параметров рассеянного сигнала с периодами порядка 2–5 мин во время работы нагреваемого передатчика (рис.3.1.4). Удовлетворительная интерпретация эффектов появления квазипериодических изменений и "эхо-рассеяния" в настоящее время отсутствует.

3.1.3. Искусственное радиоизлучение ионосферы. Одним из следствий возбуждения интенсивных плазменных волн при развитии параметрических неустойчивостей в F-области ионосферы является

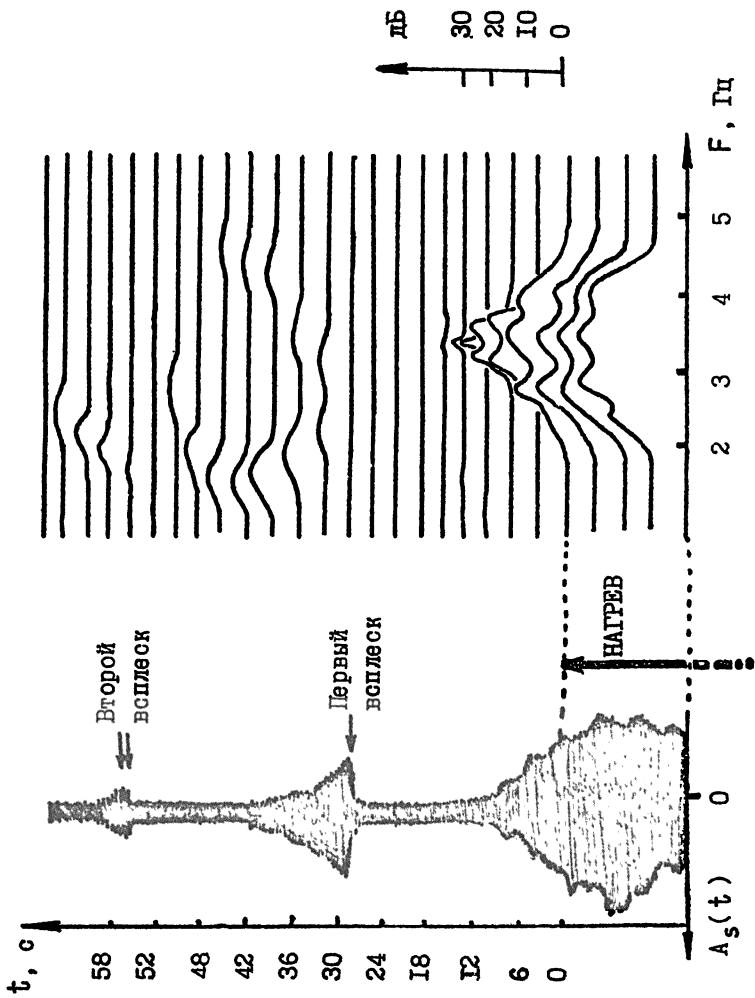


Рис. 3.1.4



генерация искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). На эксперименте ИРИ наблюдается как шумовая составляющая в спектре отраженного от ионосферы сигнала ВН с интенсивностью на 60–80 дБ ниже интенсивности отраженного сигнала ВН и занимающая полосу частот в несколько десятков (в некоторых случаях до сотен) килогерц, а также как всплески излучения в области частот  $\omega \sim 2\omega_0$ . Впервые ИРИ было обнаружено в эксперименте /4/ на стенде в Тромсе, в дальнейшем его свойства изучались группой IRFU на стендах Тромсё и Аресибо и группой НИРФИ на стендах "Сура", "Зименни" и "Тиссар". Особенно результативными оказались исследования ИРИ, проведенные совместно этими двумя группами в 1990 и 1991 гг. на стенде "Сура". На рис.3.1.5, 3.1.6 приведены примеры стационарных спектров ИРИ, полученных во время совместных экспериментов 1990 г. при различных частотах ВН. Отчетливо проявляются следующие спектральные компоненты ИРИ: (1) – continuum – излучение со сплошным спектром, основная доля энергии которого сосредоточена в области отрицательных отстроек относительно частоты ВН  $\Delta f = f - f_0 < 0$ ; (2) – downshifted maximum (DM) – спектральный максимум ИРИ на отстройках  $\Delta f_{DM} \approx -10 \pm -12$  kHz, в некоторых случаях наблюдаются также второй (2DM) и реже третий (3DM) максимумы с почти эквидистантными отстройками; (3) – upshifted maximum – максимум в спектре при положительных отстройках  $\Delta f_{UM} \sim 0,7 |\Delta f_{DM}|$ ; (4) – broad upshifted maximum (BUM) – широкополосная компонента в области положительных отстроек, возникающая, когда частота ВН близка к кратной гирочастоте электронов  $f_{ВН} \approx n f_{вс} ; f > n f_{вс}$ .

Указанные компоненты ИРИ возбуждаются за характерное время, близкое к времени развития аномального ослабления и генерации МН с  $l_{\perp} \sim 3$  м (см. рис.3.1.1 а, б, на котором изображен временной ход амплитуды отраженной от ионосферы ВН, амплитуд сигналов, рассеянных неоднородностями с  $l_{\perp} \sim 3$  и  $l_{\perp} \sim 13$  м (а), и амплитуды ИРИ при различных отстройках  $\Delta f$  (б)). В /28/ была предложена схема генерации ИРИ, согласно которой излучение возникает при рассеянии плазменных волн в электромагнитные на МН. Широкий спектр плазменных волн объясняется их индуцированным рассеянием на ионах. В этой модели удалось достичь неплохого согласия тео -

SURAI 90/09/18 18:49:22 Vasilsursk  
Single spectrum. Time: 18:49:26UT

SPEC284

REF -10.0 DBM  
10 DB/DIV

RANGE -5.0 DBM

MARKER 5 440 000.0 HZ  
-72.2 DBM

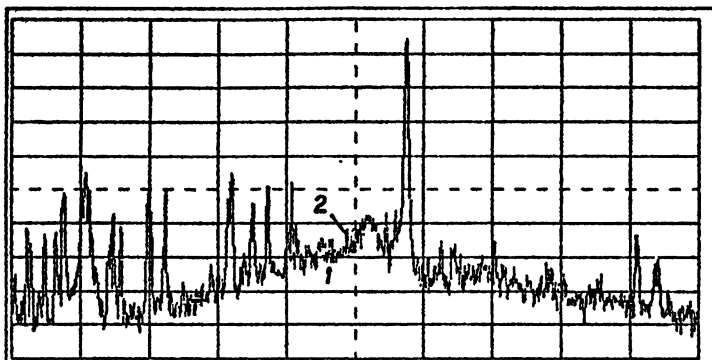


Рис. 3.I.5

SURAI 90/09/20 08:48:32 Vasilsursk  
Single spectrum. Time: 08:48:34UT

SPEC1056

REF -15.0 DBM  
10 DB/DIV

RANGE -10.0 DBM

MARKER 6 750 000.0 HZ  
-85.7 DBM

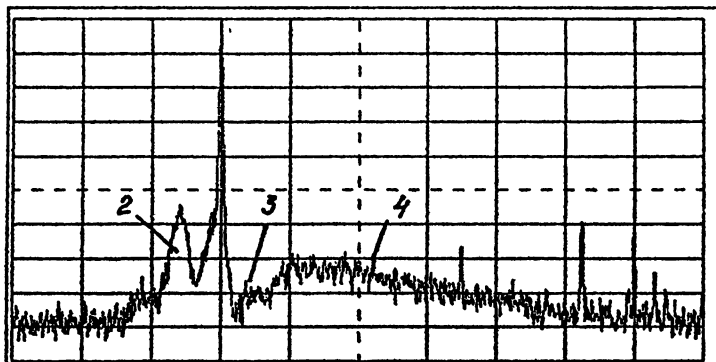


Рис. 3.I.6

SPAN 200 000.0 HZ  
ST 7.0 SEC

Рис. 3.I.6

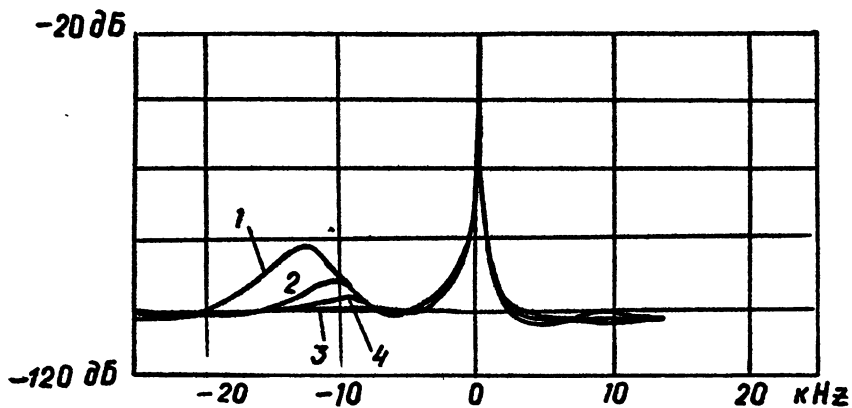
рии с экспериментальными данными в области отстроек  $\Delta f \sim -15 + -60$  кГц.

Отметим, что при постоянной интенсивности МН характер и не времена развития плазменных волн и возникновения ИРИ (и их релаксации после выключения ВН) составляют несколько миллисекунд. Характерные же времена развития и релаксации МН оказываются существенно большими. Кроме того, масштаб (по высоте) области взаимодействия ВН с плазменными волнами в области ВГР на МН оказывается существенно меньшим, чем продольный размер последних  $l_{\parallel}$ . Это позволило использовать пробные волны на сдвинутых относительно ВН частотах (и соответственно со сдвинутым по высоте уровнем ВГР), не вносящие существенного вклада в нагрев плазмы и интенсивность МН, однако достаточно интенсивные для возбуждения ИРИ, для диагностики развития и релаксации МН, созданных волной накачки (диагностическое искусственное радиозлучение, ДИРИ) /29-31/.

Интересные свойства ИРИ проявляются при  $f_0 \sim n f_{Ve}$ . В частности, в совместном эксперименте НИРФИ и ИРГУ 1990 г., наряду со значительным ослаблением ИРИ типа ДМ при  $f_0 \sim n f_{Ve}$  было обнаружено полное исчезновение ДМ в узкой полосе частот ВН  $\Delta f / f_0 \sim 2 \cdot 10^{-5}$  при  $f \approx 9268$  кГц  $\approx 7 f_{Ve}$  (рис.3.1.7, /32/). В совместном с ИРГУ эксперименте 1991 г. было показано, что подавление ДМ при  $f_0 \sim n f_{Ve}$  сопровождается значительным снижением величины аномального ослабления пробных волн и вытеснения плазмы из области ВГР ВН.

Из рис.3.1.7 видно также, что отстройка высокочастотного края ДМ от частоты ВН одинакова при различных  $f_0$  и составляет  $\Delta f \approx 7,6$  кГц, что практически совпадает с нижней гибридной частотой в F-слое ионосферы. Отсюда, а также из результатов исследований динамики ДМ на стадиях развития ИИТ (/33/, совместный эксперимент 1990 г.) и релаксации МН (/34/, метод ДИРИ) следует, что важную роль в формировании свойств ИИТ играют нижнегибридные волны.

Из результатов исследований ИРИ следует отметить также измерения декремента затухания плазменных волн /35/, обнаружен и е



- 1 - = 9253 кГц,
- 2 - = 9226 кГц,
- 3 - = 9268,2 кГц,
- 4 - = 9268,3 кГц

( 0 соответствует частоте В Н )

Спектр ИРИ при различных частотах В Н

Рис. 3.1.7

спорадической широкополосной компоненты ИРИ с /36/ +40++120 кГц при частотах  $f_0$ , далеких от  $\pi f_{ge}$ , исследования свойств ИРИ на "стрикционной" стадии воздействия на ионосферу /37/.

3.1.4. Диагностика модифицированной ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда. В последние годы в РФ /38-40/ и за рубежом /41, 42/ интенсивно развивается направление ионосферных исследований, связанное с разработкой и созданием новой диагностической техники универсального назначения, оснащенной современными вычислительными средствами. К их числу относится разработанный совместно НИРФИ и МарПИ ионозонд с непрерывным линейным частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом, на базе которого в 1986-1991 гг. организована сеть станций наклонного зондирования ионосферы. Передатчики расположены в Хабаровске, Душанбе, Йошкар-Оле, а приемники - в Нижнем Новгороде, Йошкар-Оле, Мурманске, Темрюке, Киеве, Бельцах. В настоящее время на данной сети станций проводятся исследования по ВЗ, НЗ и ВНЗ естественной и модифицированной ионосферы, целью которых являются: изучение пространственно-временных корреляционных связей параметров ионосферного КВ радиоканала, решение обратных задач дистанционного зондирования ионосферы на основе многопозиционного приема сигналов НЗ и ВНЗ, исследование аномальных мод и определение возможности управления дальним распространением КВ путем вывода радиоволн из ИВК за счет модификации ионосферы мощным наземным радиоизлучением /43, 44/.

Измерения на скользящей частоте позволили детально исследовать частотные характеристики эффектов воздействия на ионосферу мощным КВ радиоизлучением в непосредственной близости от возмущающего передатчика. В качестве примера на рис.3.1.8 приведены АЧХ (сплошные линии и точки отвечают сеансам зондирования во время нагрева и паузы соответственно) вертикального ЛЧМ зондирования для обыкновенной моды. Отчетливо видны две компоненты ослабления сигнала: широкополосное (ШО) с  $\Delta f \sim 1,5-2$  МГц на  $1...1,3$  дБ и аномальное ослабление (АО) на  $6-10$  дБ в сравнительно узкой полосе частот  $\Delta f \sim 0,5-0,6$  МГц около частоты вол-

21.05.85 г

11ч. 20мин

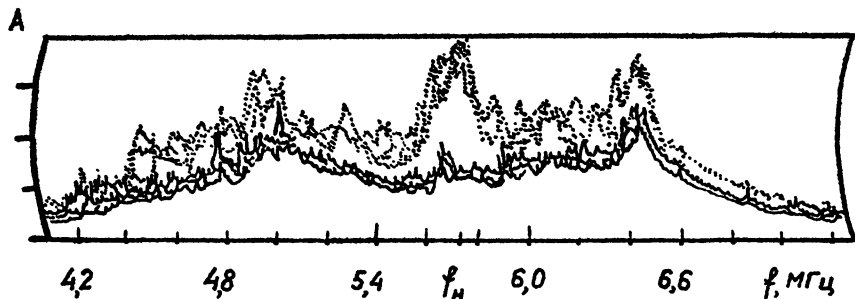


Рис. 3.1.8

ны накачки. На рис.3.1.9 представлены данные от усредненных по частоте в диапазоне  $\Delta f \sim 200$  кГц амплитуд сигналов (на частоте  $f \sim f_n$ ) для нескольких последовательных циклов "нагрев-паузы".

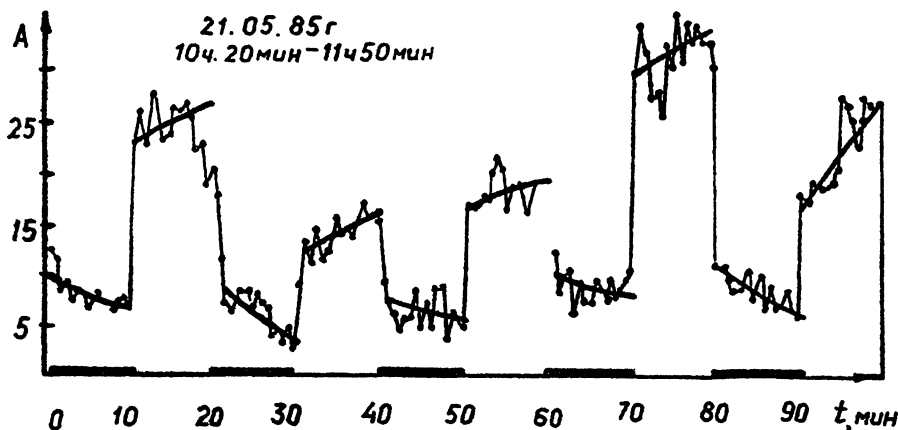


Рис. 3.1.9

Утолщенными линиями на оси времени отмечены периоды нагрева ионосферы мощным радиоизлучением. Из рисунка видно два характер -

ных времени развития и релаксации исследуемого процесса: быстрый процесс с  $\tau_{н,п} < 30$  с (связанный с АО) и медленный процесс с  $\tau_{н,п} \sim 3-5$  минут. Сравнение этих данных вне полосы АО показало, что медленный процесс изменения амплитуды сигнала коррелирует с развитием и релаксацией ШО в полосе  $\Delta f \sim 1,5-2$  МГц, т.е. определяется возбуждением и исчезновением крупномасштабных неоднородностей.

Известно, что искусственные ионосферные неоднородности ответственны за флуктуации амплитуд пробных сигналов, прошедших их область возмущения. Широкополосное ЛЧМ ВЗ модифицированной ионосферы позволило выделить диапазон частот пробного сигнала, в котором преобладает эффект флуктуаций. С этой целью для ряда последовательных циклов "нагрев-пауза" были вычислены средние - квадратичные отклонения  $\sigma_{н,п}$  амплитуд и зависимость их отношения  $\eta_{\sigma} = \sigma_{н,п} / \sigma_n$  от частоты зондирования. Эта зависимость представлена на рис.3.1.10. Как видно из рисунка, зависимость  $\eta_{\sigma}(f)$  имеет экстремум на частоте  $f$ , близкой к критической частоте  $f_o F_2$ . Тот факт, что  $\eta_{\sigma} > 1$  для диапазона частот  $\Delta f \sim 0,8-1$  МГц говорит об увеличении на этих частотах в пробном сигнале рассеянной компоненты. По величине  $\Delta f$  можно оценить толщину  $\Delta h$  рассеивающего слоя. Если предположить, что в окрестности точки отражения волны накачки высотный профиль диэлектрической проницаемости определяется выражением  $\epsilon = 1 - h/L = 1 - f_o^2 / f^2$ , то при  $L \sim 100$  км толщина слоя с рассеивающими неоднородностями  $\Delta h \geq 30$  км.

Интересный результат был получен при наклонном ЛЧМ зондировании модифицированной ионосферы на трассе большой протяженности Хабаровск - "Сура" - Темрик /45/. Эксперимент проводился в марте 1991 года с целью исследования возможности управления волноводным распространением КВ за счет ракурсного рассеяния радиоволны на искусственных мелкомасштабных неоднородностях. ЛЧМ зондирование осуществлялось из Хабаровска в диапазоне частот 6-28,4 МГц. Нагревный передатчик работал на частоте волны накачки  $f_n$ , близкой к критической частоте ионосферы  $f_o F_2$  ( $f_n \leq f_o F_2$ ) циклами: 5 минут - нагрев, 5 минут - пауза с эффективной мощ -

ность излучения  $P_G = 100$  МВт. Приемный пункт в Темрике был расположен в 130 км от трассы Хабаровск - "Сура" на расстоянии  $\sim 1300$  км от нагревного стнда (угол рассеяния  $\theta_s \sim 30^\circ$ ). Наблюдения проводились с 22<sup>h</sup>.00 до 06<sup>h</sup>.00 мск, когда на трассе для данного сезона (равноденствие) существовал максимальный отрицательный градиент электронной концентрации, обеспечивающий захват радиоволн в ИБК.

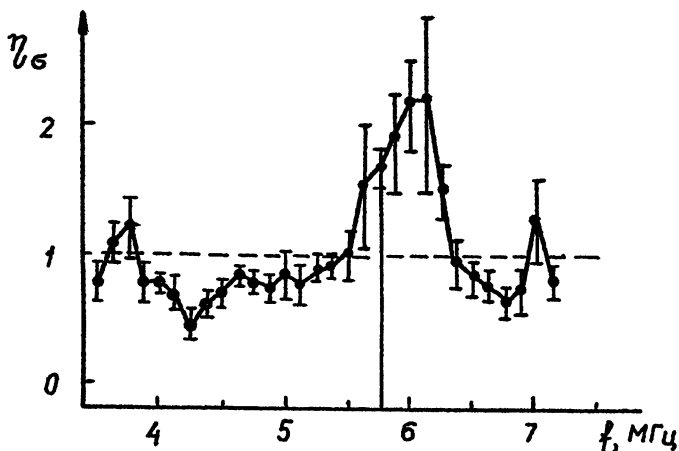


Рис. 3.1.10

В Темрике на ионограммах ЛЧМ НЗ во время нагрева ионосферы регистрировались дополнительные моды. Малые времена развития дополнительной моды ( $\tau_n < 1$  мин) указывают на ее связь с возбуждением искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностей с поперечными размерами  $\ell_1 = 30$  м. Примеры ионограмм ЛЧМ НЗ с ракурсной модой (РМ), коррелируемой с работой нагревного передатчика, показаны на рис. 3.1.11. Как видно из рисунка, РМ наблюдается как на частотах ниже МНЧ2Р2 (а), так и на частотах выше МНЧ2Р2 (б) прямого сигнала на трассе Хабаровск - Темрик.

Для сопоставления с экспериментальными данными было проведено численное моделирование распространения КВ с учетом ракур-



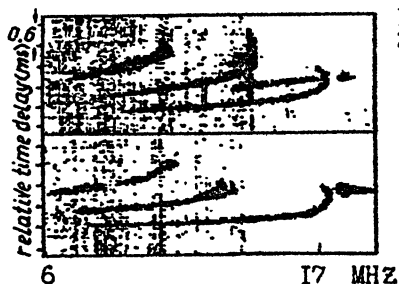


Рис. 3.1.11

18.03.91  
22<sup>h</sup>.25<sup>m</sup> а)  
19.03.91  
00<sup>h</sup>.34<sup>m</sup> б)

сного рассеяния радио - волн на искусственных мелкомасштабных неоднородностях. Расчеты показали, что при небольшом отрицательном градиенте критической частоты вдоль трассы

$$|\text{grad } f_o F_2| < 0,02 \frac{\text{МГц}}{100\text{км}}$$

в пункт приема попадает ракурсный сигнал скачковой моды. С увеличением отрицательного градиента  $f_o F_2$  происходит захват радиоволн в ИВК на частотах больших  $\text{МГц} 2F_2$  и РМ, регистрируемая в пункте приема, имеет волновое происхождение.

В заключение заметим, что результаты проведенных исследований показывают перспективность использования ЛЧМ изозонда в решении научных и прикладных задач ионосферного распространения КВ.

3.1.5. Исследование искусственных ионосферных неоднородностей методом радиопросвечивания. Измерения формы спектра искусственных ионосферных неоднородностей в диапазоне масштабов  $0,1 < l_1 < 2+4$  км в плоскости, ортогональной геомагнитному полю  $H_0$ , проводились методом радиопросвечивания возмущенной области сигналами ИСЗ. По наблюдениям мерцаний геостационарного ИСЗ / 46/ было показано, что вблизи уровня отражения мощных радиоволн проекция спектра искусственных неоднородностей  $\Phi_{\Delta N}(\alpha_{1y})$  ( $\alpha_{1y}$  - волновое число неоднородностей в плоскости, ортогональной  $H_0$  в восточно-западном направлении) имеет максимум в диапазоне масштабов  $l_{1y} \approx 500+600$  м. Форма спектра  $\Phi_{\Delta N}(\alpha_{1y})$  для высот, превышающих уровень отражения мощных радиоволн на  $40+60$  км, была близка к обычно наблюдаемой для естественных неоднородностей ионосферы, которые возбуждаются на средних широтах преимущественно в вечернее и ночное время суток.

Данные, полученные при радиопросвечивании искусственных

неоднородностей сигналами орбитальных ИСЗ /47/, позволили также обнаружить максимум спектральной плотности  $\Phi_{\Delta N}(\alpha_{\perp})$  в северо-восточном направлении (соответствующем движению спутника) в диапазоне масштабов  $\ell_{\perp} \approx 0,3+1$  км.

Использование специальной геометрии радиопросвечивания, при которой сигнал орбитального ИСЗ, распространявшийся через возмущенную область, пересекал направление геомагнитного зенита, позволило определить величину масштаба "обрезания" спектра искусственных неоднородностей  $\Phi_N(\vec{\alpha})$  в направлении геомагнитного поля. Согласно анализу спектров мерцаний при радиопросвечивании неоднородностей под различными углами с магнитным полем, предложено в /48/ для формы спектра

$$\Phi_{\Delta N}(\vec{\alpha}) = \Phi_{\Delta N}(\alpha_{\perp}) \exp\left(-\alpha_{\parallel}^2 \ell_{0\parallel}^2\right)$$

и значений угла  $\Psi$  между направлениями радиолуча и поля  $\vec{H}$  таких, что  $\Psi L^2 / \alpha_{\perp} \ell_{0\parallel}$ , наклон спектра мерцаний амплитуды должен уменьшаться приблизительно на единицу. На рис. 3.1.12 представлены спектры флуктуаций амплитуды, полученные при пересечении радиолучем области искусственных неоднородностей в последовательные три интервала времени, отвечающие различным значениям угла  $\Psi$  ( $\Psi_{\min} \approx 1,7^\circ$ ). Приведенные результаты позволяют сделать оценку значения продольного масштаба "обрезания" спектра, величина которого составляет  $\ell_{0\parallel} \sim 3+4$  км для  $\ell_{\perp} \approx 1+2$  км и  $\ell_{0\parallel} \sim 0,7+0,9$  км для  $\ell_{\perp} \approx 0,5$  км.

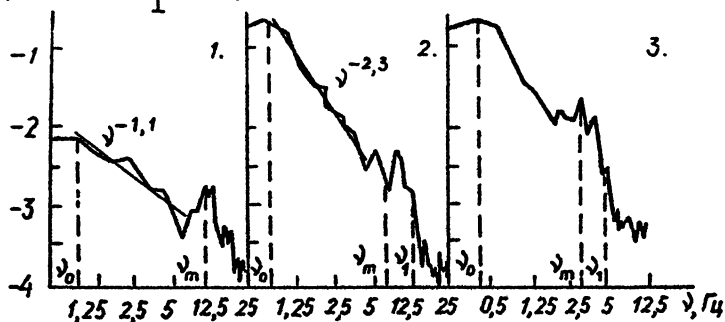


Рис. 3.1.12

3.1.6. Эффекты оптического свечения, ускорения электронов и дополнительной ионизации ионосферы. Другим проявлением интенсивных плазменных волн в возмущенной области ионосферы является появление быстрых электронов с энергиями  $\epsilon \approx 20+25$  эВ, которые, в свою очередь, могут вызывать свечение ионосферы в оптическом диапазоне и дополнительную ионизацию в F-области.

Дополнительная ионизация может возникать, когда энергии ускоренных частиц превышают потенциал ионизации  $I_0$  основных нейтральных компонент ионосферной плазмы (атомарный кислород,  $I_0 = 13,6$  эВ и молекулярный азот  $I_{N_2} = 15,6$  эВ). Такое явление наблюдалось в эксперименте /6/, проведенном методом многочастотного доплеровского зондирования.

Оптическое свечение линий атомарного кислорода с длиной волны  $\lambda = 6300 \text{ \AA}$  и  $5577 \text{ \AA}$  (красная и зеленая линии) связано с излучением уровней  $0(1D)$  и  $0(1S)$  с энергиями возбуждения соответственно  $\epsilon^* = 1,96$  и  $4,17$  эВ и возникает из-за возбуждения соответствующих уровней атомов в результате столкновения с ускоренными электронами. Первые наблюдения оптического свечения на стенде "Сура" проведены в сентябре 1990 г. группой П.Бернхардта (США, Морская исследовательская лаборатория) (рис.3.1.13 /49/). В красной линии ( $6300 \text{ \AA}$ ) были зафиксированы "облака свечения" размером 10 км и более, дрейфующие через возмущенную область ионосферы со скоростями  $40+200$  м/с. Максимальная интенсивность свечения составила  $150+200$  R, что существенно превышает значения, полученные на стенде Аресибо /50/ и близки к значениям, полученным в Боулдере /7/.

3.1.7. Генерация низкочастотного радиоизлучения в ионосфере. Генерация СНЧ излучения в ионосфере при воздействии мощным модулированным излучением составляет заметную часть в экспериментах по модификации ионосферы. Этот эффект был впервые открыт в начале 70-х годов группой исследователей НИРФИ /60/. В течение последних 15 лет этот эффект интенсивно исследовался как в НИРФИ, так и на нагревных стендах в Тромсё /61/ и Аресибо /62/.

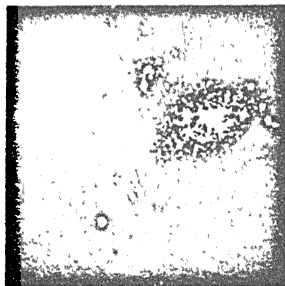
Первые прямые эксперименты по обнаружению ионосферной гене -

SURA ARTIFICIAL AIRGLOW (630.0 nm)  
18 September 1990 4.786 MHz 150 MW ERP

$f_oF_2$  5.1 MHz

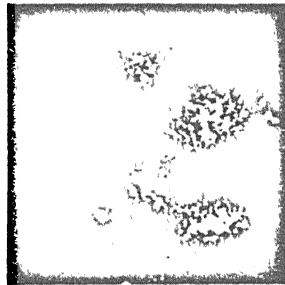
Maximum Intensity

88 R



00:40:27

41 R



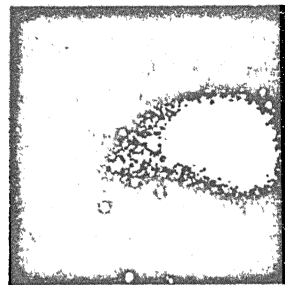
00:43:13

148 R



00:46:00

203 R



00:48:46

Reflection Altitude 350 km

Westward Drift Velocity 200 m/s

FIG. 3.1.13

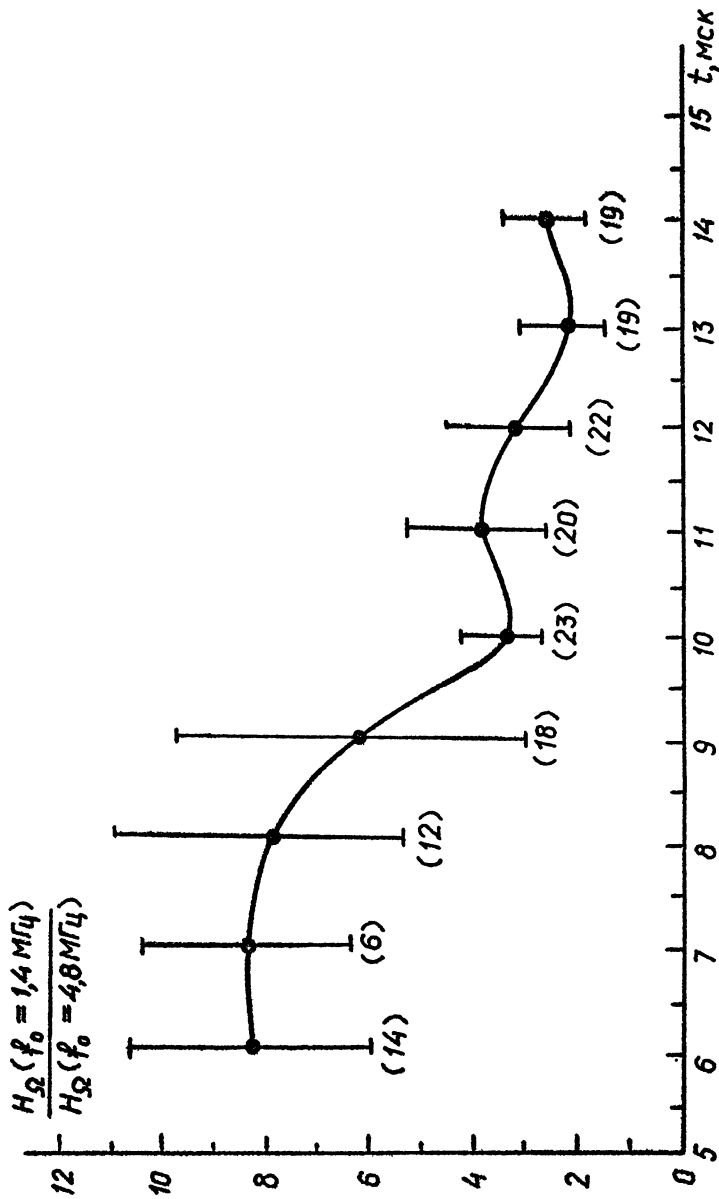
рации ОНЧ излучения были проведены зимой 1973/1974 гг. /60/. Использовался 150-кВт передатчик в Зименках, работающий на частоте 5,75 МГц, и антенна с коэффициентом усиления 100. Принимались фиксированные частоты модуляции в диапазоне 1-8 кГц. В результате был обнаружен ряд важнейших свойств ионосферных ОНЧ сигналов, а именно:

- амплитуда сигналов имела явный суточный ход с максимумом в полуденные часы;
- максимум сигнала приходился на частоту 2,5 кГц и усиливался в магнитоактивные периоды;
- интенсивность поля ОНЧ сигнала не зависела от критической частоты F-слоя и линейно зависела от мощности передатчика;
- фаза сигнала была стабильна с точностью  $10^{-3}$  Гц.

Важным шагом в этих исследованиях являлось измерение эффективных высот ионосферного источника /63/. Измеренные высоты составляли 70-80 км. Было также исследовано поведение поляризации характеристик ОНЧ сигналов. Поляризация соответствовала свистовой моде, выходящей с ионосферных высот или иногда бывала близка к линейной. Направление главной оси эллипса поляризации и меняется в течение дня, следуя по направлению ионосферного тока в соответствии с  $S_q$ -вариацией. В магнитоактивные периоды характер и поведение поляризационных характеристик носили более сложный характер со значительными вариациями в течение суток /64, 65, 66/.

Позднее, когда был введен в строй мощный стенд "Сура" (КВ - 1985 и СВ - в 1986 гг.) в Васильсурске, был проведен ряд более детальных исследований. В частности была подтверждена (рис. 3.1.14) теоретически предсказанная высокая эффективность генерации ОНЧ сигналов при использовании гирочастотного нагрева /67-72/.

Новые экспериментальные средства обеспечили возможность исследовать эволюцию спектров ионосферных сигналов с хорошим разрешением по времени и частоте. Было показано, что первый максимум в ОНЧ спектре сигнала в ближнем поле сдвигается с 2,2 кГц в



Р и с. 3.1.14 Относительная эффективность генерации СВЧ при применении КВ и СВ нагревных средств. Данные нормированы по мощности. В скобках приведено число усреднений.

полдень до 1,6 кГц в вечерние часы (см. рис. 3.1.15). Это соответствует изменению высоты волновода Земля - ионосфера от 68 км в полдень до 88 км вечером. Высокое отношение сигнал/шум позволило также проводить исследования явления генерации и в ночное время /72, 73/.

В 1986 г. был проведен очень интересный эксперимент, использующий возможность быстрого свипирования положения луча КВ-передатчика "Сура" в пространстве. Было показано, что при специальном режиме работы существует возможность реализовать сверхсветовое движение ионосферного источника (излучение типа Вавилова-Черенкова) /74/.

Одно из наиболее важных приложений явления генерации ОНЧ сигналов может быть диагностика тонкой структуры ионосферных токов и динамики процессов в мезосфере. Было показано, что в суточном ходе параметров ионосферного сигнала проявляются короткопериодные пульсации с периодами типичными для внутренних гравитационных волн (рис. 3.1.16). Усредненный спектр этих вариаций близок к спектру мезосферной турбулентности, измеряемой с помощью MST радаров (рис. 3.1.17) /75/. Этот тип наблюдений включен в ряд международных программ по исследованию верхней ионосферы /76, 77/.

Значительный прогресс был достигнут в исследованиях ионосферной генерации сигналов в диапазоне короткопериодных колебаний магнитного поля Земли. Впервые этот эффект был обнаружен с помощью нагревного средства в Зименках и в последствии подвергся более детальным исследованиям на стенде "Сура" /72, 78/.

Ряд интересных исследований по генерации ОНЧ сигналов приполярной ионосферы был проведен с помощью мощного длинноволнового Ленинградского вещательного передатчика, работающего на частоте 234 кГц. Было показано, что наклонные лучи этого передатчика способны генерировать ОНЧ сигналы на частотах в несколько сот герц при магнитной активности с  $K_p \geq 2$  (где  $K_p$  - планетарный индекс). Прием этих сигналов осуществлялся на удалении в 1,5-2 тыс. км в приемном пункте вблизи "Суры" /79, 101/.

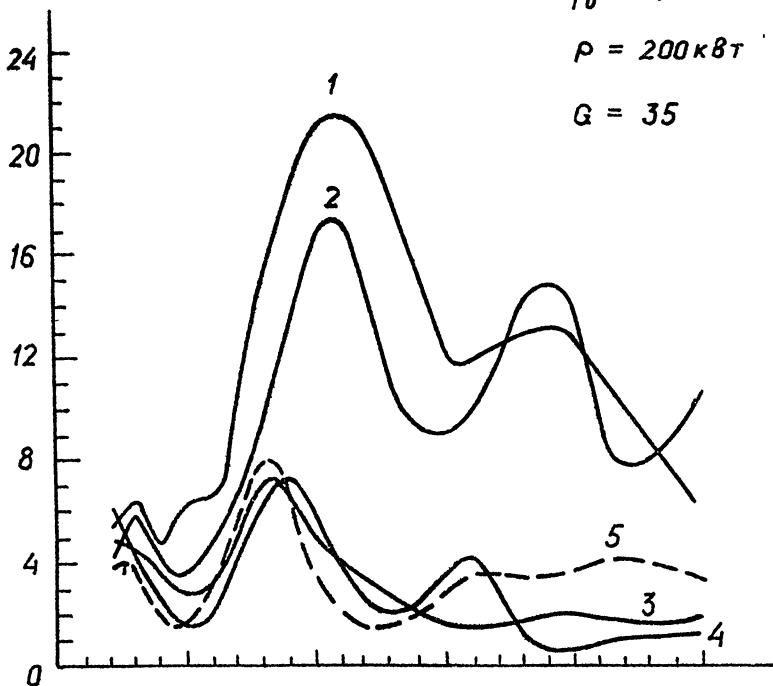
И наконец, в 1991 г. было проведено экспериментальное исследование генерации ионосферных ОНЧ сигналов на основе кубичной

$|H|(A/m) \cdot 10^8$

$f_0 = 1,4 \text{ МГц}$

$\rho = 200 \text{ кВт}$

$G = 35$



Р и с. 3.1.15 Спектры поля ОНЧ-сигналов. Переход ото дня к ночи (04.03.1985,  $f_0 = 1,4 \text{ МГц}$ ,  $\rho = 200 \text{ кВт}$ ,  $\mathcal{X}$ -компонента); цифры на кривых соответствуют различным моментам времени:

1 - 11.00; 4 - 19.00;

2 - 15.30; 5 - 24.00.

3 - 17.00;



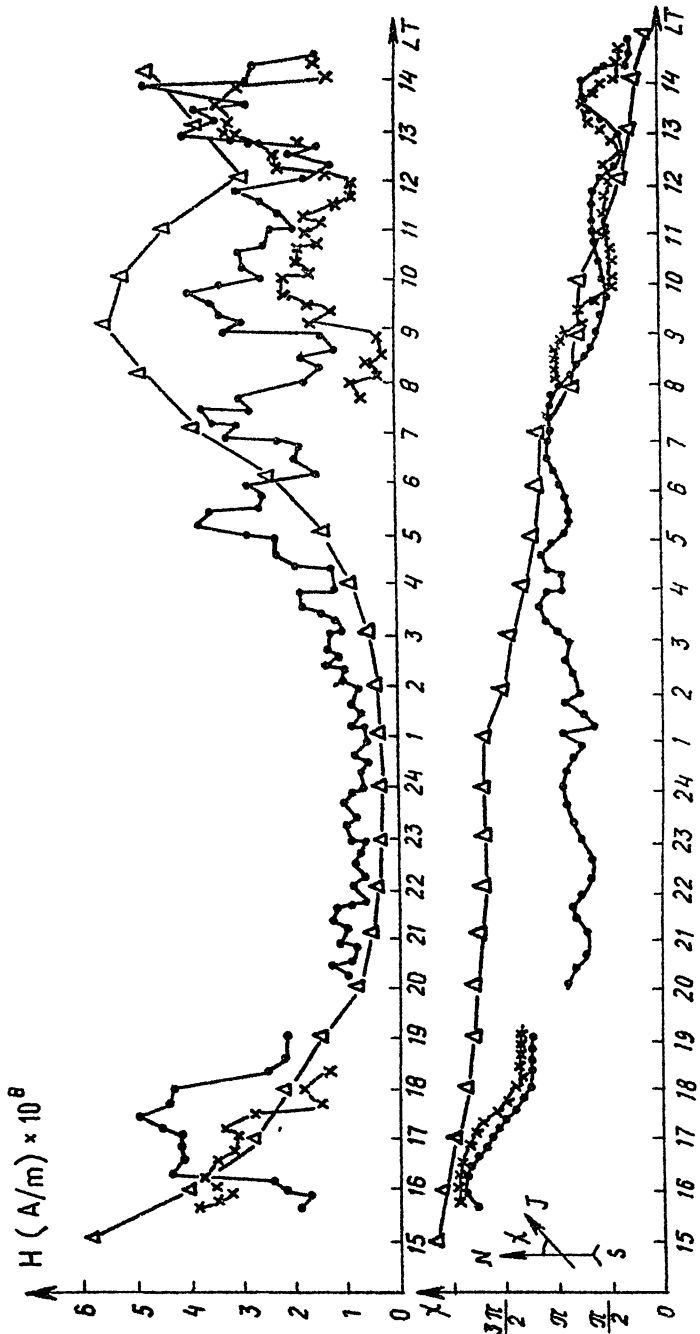
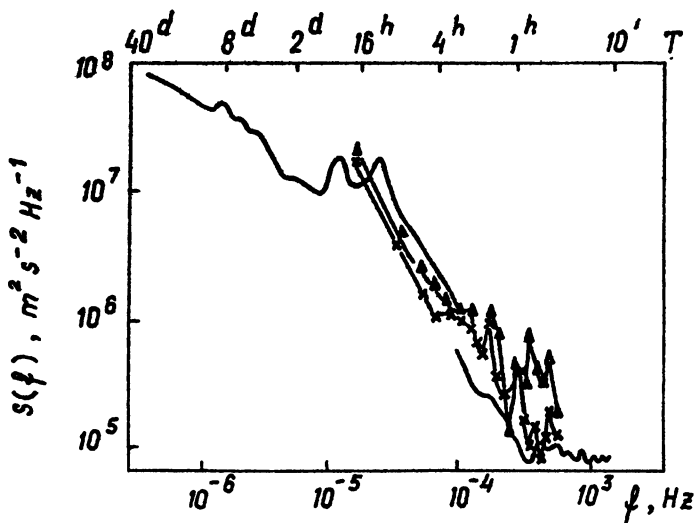


Рис. 3.1.16 Суточный ход амплитуды магнитного поля  $H(A/m)$  (а) и угла поворота эллипса  $\chi$  (б) для двух передатчиков (I передатчик:  $f_0 = 1,4$  МГц,  $P = 200$  кВт,  $G = 37$  (—●—); II передатчик:  $f_0 = 4,8$  МГц,  $P = 360$  кВт,  $G = 200$  (x—x—x)). Частота модуляции  $F = 820$  Гц, полярность — западная необыкновенная. Данные за 8–9 апреля 1985 г.). Символом (—△—△—△) показаны расчетные кривые величины и направления  $S_q$ -тока в ионосфере.



Р и с. 3.1.17 Сравнение спектров флуктуаций мощности ОНЧ-сигналов со спектром усредненных флуктуаций ветровой скорости на высоте 88 км (по данным MST-радара).

(  $\blacktriangle$  -  $\blacktriangle$  -  $F_m = 220$  Гц;

x - x -  $F_m = 2809$  Гц)

тепловой нелинейности на частоте  $F = 2f_1 - f_2$ , где  $f_{1,2}$  - частоты взаимодействующих волн. Этот тип взаимодействия оказался более эффективным в диапазоне 10-20 кГц по сравнению с механизмом модуляции ионосферного тока /IO2/.

3.1.8. Заключительные замечания. К настоящему времени накоплен большой объем данных по искусственной ионосферной турбулентности, сложились определенные представления о физических процессах, происходящих в возмущенной области ионосферы. Многие эффекты, обнаруженные на эксперименте, получили в целом адекватную интерпретацию. Теоретические оценки стационарных параметров ИИТ и времен ее развития и релаксации хорошо согласуются с экспериментом. Предложен ряд механизмов генерации ИРИ, построена теория ускорения электронов в возмущенной области, оценены интенсивность свечения в оптическом диапазоне и дополнительная ионизация, обусловленные появлением таких электронов. С помощью метода ракурсного рассеяния, измерений оптического свечения и флуктуаций сигналов ИСЗ, прошедших через возмущенную область, измеряются скорости движений ионосферной плазмы, пространственный спектр искусственных неоднородностей различных масштабов от десятков километров до нескольких сантиметров. Многочастотное доплеровское зондирование ионосферы позволяет изучать динамику изменения электронной концентрации в возмущенной области на различных высотах. С помощью измерений ИРИ изучаются свойства высокочастотной плазменной турбулентности ионосферы; эффект пропадаания ИРИ при  $f_{вн} \approx n f_{ен}$  позволяет создать метод измерения концентрации электронов и магнитного поля в плазме.

В то же время в картине искусственной ионосферной турбулентности остается немало нерешенных вопросов, которые представляют большой интерес как для физики ионосферы, так и для изучения плазмы в целом. До сих пор не ясна роль сильнотурбулентных эффектов (кавитоны, коллапс) в ионосферных условиях, особенно при развитой тепловой параметрической неустойчивости. Не получили адекватной интерпретации такие, например, явления, как генерация

ИРИ на частотах, существенно (на  $\sim 200$  кГц) превышающих частоту ВН и развитие турбулентной структуры ионосферы после выключения ВН при малых длительностях взаимодействий и на стадии "эхо-рассеяния". Все это требует тщательных экспериментальных исследований с применением самых современных средств диагностики ионосферы (в том числе и в международной кооперации) и дальнейших теоретических разработок.

Построение наиболее полной физической модели ИИТ позволит разработать новые нетрадиционные методы диагностики плазмы, подойти к решению проблемы происхождения естественных неоднородностей ионосферы, лучше понять закономерности взаимодействия мощного электромагнитного излучения с плазмой.

### 3.2. Исследования ионосферы и атмосферы методом обратного рассеяния радиоволн естественными и искусственными неоднородностями

Большой диапазон рабочих частот и использование одновременно трех передатчиков позволят проводить широкомасштабные исследования естественных неоднородностей в средней атмосфере по обратному рассеянию импульсных радиоволн. В частности, речь идет об изучении динамики неоднородностей, спектра их размеров, расположения в пространстве и во времени. Сканирование диаграммы направленности высокочастотной антенны в сочетании с высокой эффективной мощностью (порядка 500 МВт) даст возможность использования станда в качестве MST-радаров для определения горизонтальных и вертикальных скоростей в стратосфере и мезосфере, исследования акустико-гравитационных, приливных и планетарных волн. Применение более низких рабочих частот по сравнению с обычно используемыми в MST-радаров должно обеспечить в мезосфере, где неоднородности показателя преломления создаются ионосферной плазмой, заметно большую интенсивность обратно рассеянных сигналов.

Низкочастотный диапазон станда (4,5-9 МГц) удобно использовать для измерений концентрации электронов в D области и в спорадических слоях E<sub>s</sub> по величине коэффициента взаим-

ной корреляции амплитуд обратно рассеянных неоднородностями ионосферной плазмы на двух различных частотах и разных магнитных компонентах, поскольку величина этого коэффициента при заданных рабочих частотах определяется концентрацией электронов и частотой соударений электронов с молекулами. Отметим, что максимум этого коэффициента не зависит от толщины слоя, занят его неоднородностями /51/.

В периоды ионосферных возмущений и в более редких случаях возмущений аврорального вида диапазон частот от 4,5 до 9 МГц является оптимальным для измерений концентрации электронов в области ионосферы стандартным методом частичных отражений.

Наряду со стендом "Сура" в Васильсурске предполагается иметь установку для исследований ионосферы методом частичных отражений в диапазоне 3 МГц. Для этой цели сооружена I2-дипольная антенна, изготавливается приемо-регистрирующая аппаратура. В приемном режиме антенна работает в диапазоне от 3 до 6 МГц и может применяться в качестве вспомогательной при работе с передатчиками стенда "Сура". В качестве самостоятельного инструмента (после укомплектования импульсным передатчиком мощностью ~ 50-100 кВт) установка для частичных отражений может быть использована для измерений электронной концентрации в D-области ионосферы и для определения горизонтальных движений (ветров) в этой области.

Стенд "Сура" является высокоэффективным средством исследований ионосферы и высоких слоев атмосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей плазмы (ИПН) /52, 53/. ИПН создаются в поле стоячих радиоволн, возникающих при интерференции падающих на ионосферу и отраженных от нее радиоволн. В F-области они формируются под воздействием стрижционных (пондеромоторных) сил. На высотах E-области и в верхней половине D-области (75-130 км) основной причиной образования ИПН является диффузионное перераспределение плазмы, вызванное неравномерным нагревом электронного газа в поле стоячих радиоволн. В нижней половине D-области (50-75 км), для которой характерно наличие положительных и отрицательных ионов, ИПН возникают из-за темпе-

ратурной зависимости скорости прилипания электронов к нейтральным молекулам.

Интенсивность создаваемых стендом "Сура" искусственных периодических неоднородностей (то есть относительные вариации электронной концентрации в периодической структуре) в зависимости от высоты, рабочей частоты и величины поглощения радиоволн может изменяться примерно от  $10^{-2}$  до  $10^{-8}$ . При зондировании пробными волнами с мощностями, соответствующими передатчиками стенда, такая интенсивность ИПН обеспечивает уверенный прием и регистрацию обратно рассеянных сигналов со всех высот, где формируются ИПН. Высотное разрешение определяется в основном длительностью зондирующих импульсов.

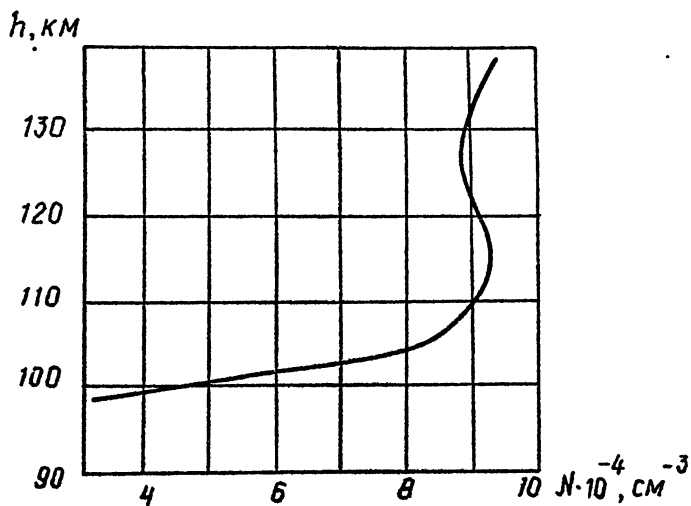
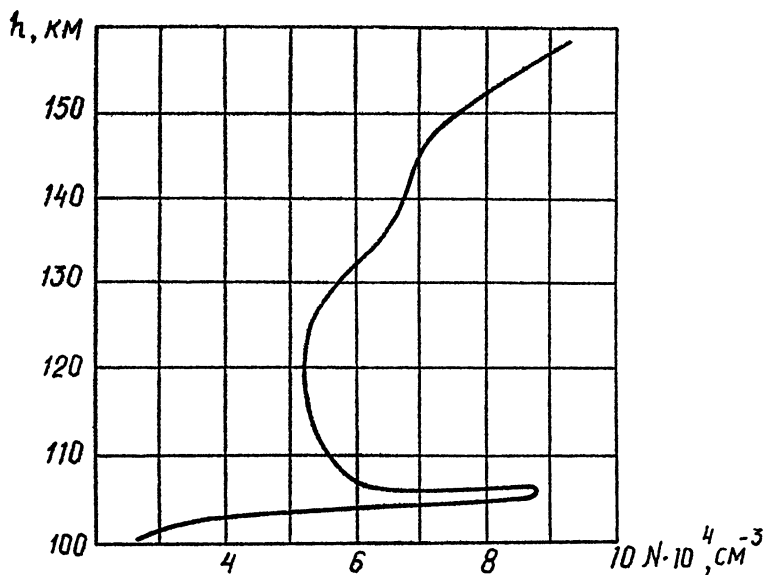
Наблюдения за ИПН позволяют определять значительное число основных параметров ионосферной плазмы и, в частности, концентраций электронов. Дело в том, что при работе возмущающего и пробного передатчиков на разных частотах и разных магнитонных компонентах обратное рассеяние пробных радиоволн возникает только для определенной электронной концентрации, зависящей от выбранных значений рабочих частот и гирочастоты электронов. Изменяя высоту, с которой приходит рассеянный сигнал, и меняя одну или обе рабочие частоты, можно получить профиль электронной концентрации  $N(h)$  до уровня отражения радиоволн. Достоинством данного метода является то обстоятельство, что с его помощью можно определять концентрацию электронов не только в E- и F-областях ионосферы, но также в верхней половине D-области и, что весьма существенно, — в межслоевой впадине между областями E и F. Кроме того, поскольку рабочие частоты значительно превышают плазменные (за исключением высот вблизи уровня отражения радиоволн в F-области) значительно упрощается задача пересчета действительных высот в истинные. Отметим также, что требуемые изменения рабочих частот существенно (в 3-5 раз) меньше диапазона, необходимого при обычном методе вертикального зондирования.

Минимальная концентрация электронов, измеряемая с помощью ИПН, на стенде "Сура" составляет около  $10^3 \text{ см}^{-3}$ , а верхний пре-

дел измерений, определяемый частотным диапазоном антенны, равен примерно  $10^6$  см<sup>-3</sup>. На рис.3.2.1 представлены примеры профилей электронной концентрации, полученные с помощью ИПН.

Во время работы возмущающего передатчика пространственная структура определяется структурой стоячих радиоволн. После выключения передатчика, в период релаксации ИПН, неоднородности в нижней ионосфере (50–130 км) увлекаются движениями нейтрального газа. При этом вертикальные движения вызывают изменения фазы пробных радиоволн, измеряя которую, можно, следовательно, определять скорости вертикальных движений атмосферного газа одновременно на многих высотах в мезосфере и нижней термосфере. Время измерений не превышает нескольких секунд, что позволяет получать значения вертикальных скоростей несколько раз в минуту. Таким образом, с помощью ИПН можно изучать такие динамические явления как внутренние гравитационные волны различных масштабов, начиная от предельно малых, а также приливные и планетарные волны. Особо следует отметить возможность надежного мониторинга вертикальных скоростей в районе турбопаузы, где другие известные методы не позволяют проводить подобные наблюдения. Очевидно, также, что ценность измерений вертикальных скоростей может быть существенно повышена одновременным определением горизонтальных скоростей движений методом частичных отражений или методом MST-радара. На рис.3.2.2 в качестве примера представлены результаты измерений вертикальных скоростей на пяти высотах в области Е.

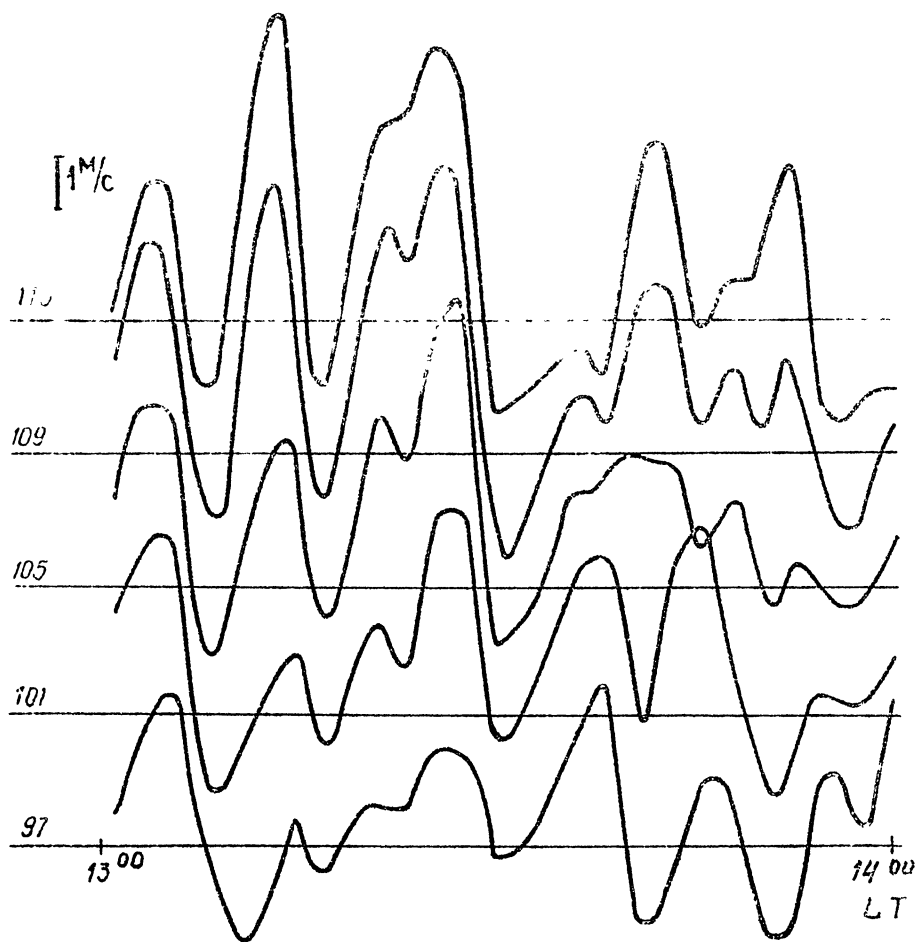
Весьма значительную информацию о параметрах атмосферы и ионосферы можно получить по наблюдениям времени релаксации ИПН. В диапазоне высот от 75–80 км до 125–130 км неоднородности создаются, как уже говорилось выше, за счет диффузионного перераспределения плазмы. Время релаксации  $\tau$  зависит от высоты расположения неоднородностей. Выше турбопаузы оно обусловлено величиной коэффициента амбиполярной диффузии и уменьшается с высотой по барометрическому закону от примерно 1 с (при работе на частотах около 4–6 МГц) до  $10^{-2}$  с. По измерениям  $\tau$  выше турбопаузы можно определять коэффициент амбиполярной диффузии, число соударений ионов с молекулами, приведенную высоту, температуру и



Р и с. 3.2.1

Высотные распределения электронной концентрации в E-области и межслоевой впадине между областями E и F.





Р и с. 3.2.2

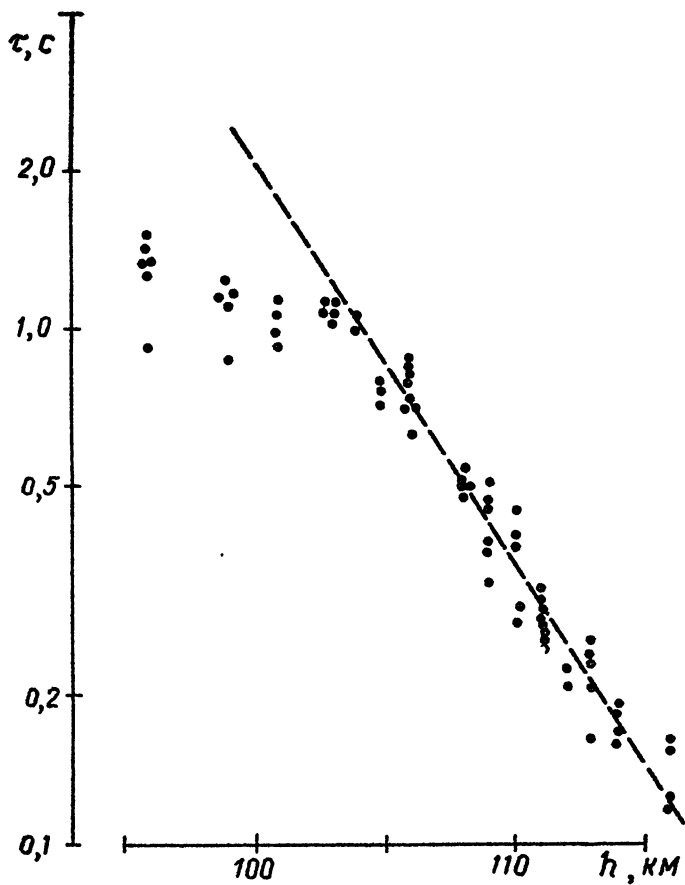
Скорости вертикальных движений на гяги высотах в диапазоне 97-113 км 27.02.91 г.

плотность атмосферы.

Ниже турбопаузы в отсутствие турбулентности время релаксации должно возрастать до значений порядка  $10^2$  с на высотах 75-80 км. Однако турбулентные движения разрушают упорядоченную структуру ИПН после выключения возмущенного передатчика. Поэтому измеряемое на опыте время релаксации уменьшается по сравнению с расчетным и тем больше, чем больше скорости турбулентных движений. Турбулентность, кроме того, уменьшает амплитуду обратно рассеянных сигналов. Таким образом, время релаксации и амплитуда обратно рассеянных сигналов являются источником ценной информации о параметрах турбулентности и высоте турбопаузы. На рис.3.2.3 представлены зависимость  $\tau$  от высоты. Изменение характера этой зависимости ниже 103 км вызвано влиянием турбулентности.

Ниже примерно 75 км ИПН образуются из-за температурной зависимости скорости прилипания электронов к молекулам нейтрального кислорода при тройных соударениях. При этом характеристики ИПН существенно зависят также от скоростей преобразования первичных отрицательных ионов во вторичные и от скоростей отлипания электронов от ионов. Время формирования и релаксации ИПН испытывает значительные вариации (наиболее сильные в сумеречные периоды суток) и в среднем увеличивается от нескольких сотых долей секунды на высотах порядка 50 км до примерно 0,5-1 с на высотах 70-75 км. Наблюдения за  $\tau$  в нижней части D-области являются в настоящее время практически единственным наземным средством изучения процессов преобразований отрицательных частиц в поносферной плазме.

В F-области, где ИПН формируются стрикционными силами, при включении и выключении возмущающего передатчика возбуждаются ионно-звуковые волны, и переходные процессы представляют собой быстро затухающие колебания, период которых и декремент затухания зависят от электронной и ионной температур, от массы и числа соударений ионов с молекулами. Стенд "Сура", имеющий три передатчика, позволяет, вообще говоря, создавать одновременно три системы ИПН с разными пространственными периодами. При из -



и с. 3.2.3

Измеренная зависимость времени релаксации ИПН от высоты 4.10.90 в период 9.55-10.07 LT.

мерениях на одной и той же высоте периода и декремента затухания колебаний для двух систем ИПН можно определять как температуры ионов и электронов, так и число соударений ионов с молекулами на этой высоте (при работе на одной частоте определяются лишь два из вышеуказанных параметров).

Заметим, что все виды измерений, использующих релаксационный период ИПН, можно повторять со скоростью в несколько раз в минуту. Это обстоятельство позволяет вести непрерывные наблюдения (мониторинг) за теми или иными параметрами атмосферы и ионосферы.

### 3.3. Динамика атмосферных активных зон и радио-электро-акустическое зондирование атмосферы

Целью настоящего проекта является исследование атмосферной динамики и электрических явлений в области высот 2-30 км на основе комплексного использования технических средств полигона "Сура". Указанная область атмосферы, будучи чрезвычайно изменчивой, содержит основную часть энергии атмосферы и играет решающую роль в формировании погодных явлений. На указанных высотах возникают и развиваются основные активные зоны в атмосфере, такие как фронтальные разрывы, ядра циклонов, грозовые очаги и т.п. Эволюция активных зон в значительной степени определяет динамику атмосферных процессов различных масштабов.

Исследование процессов в активных зонах наталкивается на значительные трудности. Дело в том, что традиционные методы дистанционного зондирования атмосферных параметров, хорошо зарекомендовавшие себя в условиях "хорошей погоды" (лидары, MST-радары и т.д.), имеют существенно ограниченные пределы использования и мало пригодны для изучения активных зон. Основным инструментом исследования структуры, например, грозовых очагов служат метеорологические радары, дающие информацию о скорости и направлении ветра, интенсивности осадков, характеристиках электрических разрядов и т.д. Однако их возможностей недостаточно для измерения основных метеорологических полей и исследования гидродинамической и электрической структуры гроз и других активных зон.

Особые трудности вызывает проблема измерения электрических параметров атмосферы. Используемые контактные методы с помощью шаров-зондов и самолетных лабораторий обладают рядом принципиальных недостатков: вносят значительные искажения в измеряемые поля и дают информацию лишь в окрестности траектории движения прибора, что совершенно недостаточно для современного уровня исследований. Дистанционные же методы зондирования электрических параметров атмосферы в настоящее время практически отсутствуют. Исключение составляют радиолокационные методы исследования молниевых разрядов, которые, однако, не дают возможности следить за развитием грозового очага в целом.

Предлагаемый проект включает ряд новых физических, методических и технических разработок, которые могли бы, на наш взгляд, существенно продвинуть изучение указанной проблемы. Среди физических идей отметим механизм генерации электрических полей при взаимодействии воздушных ветровых потоков с заряженными аэрозолями и каплями /54, 55/. Такое взаимодействие приводит к появлению в первоначально квазинейтральной среде областей с мощным пространственным электрическим зарядом, которые во многом определяют электродинамику грозового облака. Большой интерес представляет также возможность исследования процессов переноса энергии и импульса атмосферными волнами из активных зон в тропосфере в верхние слои атмосферы, а также отождествление источников волновых возмущений с различными синоптическими и мезомасштабными структурами.

В области экспериментальных исследований центральное место предполагается уделить изучению процессов, протекающих внутри атмосферных активных зон, в частности, грозовых очагов, на разных стадиях их эволюции. Для этого необходимо иметь возможность измерять вектор скорости, влажность, температуру, характеристики турбулентности, состав и концентрацию аэрозолей. Вместе с тем, нужны данные об электрических параметрах: проводимости, структуре пространственного электрического заряда, электрических полях разных масштабов.

Получение указанной совокупности данных требует комплексного подхода с использованием на той или иной стадии процесса (с мо -

мента его зарождения до фазы созревания и релаксации) наиболее адекватных методик и измерительных средств. При разработке такого подхода целесообразно исходить из того принципиального обстоятельства, что лишь два типа волн, низкочастотный звук и радиоволны — могут распространяться при любых погодных условиях и сквозь всю толщу тропосферы и в стратосфере, в том числе и внутри активных зон. Указанным требованиям, на наш взгляд, может удовлетворять радио-электро-акустическая установка для зондирования тропосферы и стратосферы, которая предлагается в качестве экспериментальной основы данного проекта.

Предполагаемый комплекс состоит из многоэлементной (60 элементов) активной акустической решетки (см. раздел 3.2) и стратосферно-тропосферного (СТ) радара, длина зондирующей волны которого в два раза больше длины акустической волны. При этом появляется возможность радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы, когда радиоимпульс отражается от искусственного Брегговского зеркала, созданного периодическими возмущениями диэлектрической проницаемости воздуха в поле звуковой волны. Доплеровский сдвиг частоты радиоимпульса, отраженного от звуковой волны на разных высотах, несет информацию о высотном профиле температуры и скорости ветра. Низкая частота акустического лока т о р а ( $f_s \approx 45+60$  Гц) позволяет осуществлять радиоакустическое зондирование всей толщи тропосферы и нижней стратосферы — вплоть до высот 30–40 км. Установка РАЗ на основе мощного направленного низкочастотного излучателя звука должна стать уникальным инструментом, обладающим богатым спектром возможных приложений.

Данная установка открывает возможность комплексного дистанционного исследования активных зон в атмосфере, включая фронтальные разрывы, ядра циклонов, грозные очаги и т.д. Здесь, наряду с измерением метеорологических параметров (температуры и скорости ветра), появляется возможность акустической локализации атмосферной турбулентности в плохо изученном декаметровом диапазоне длин волн. Возможно также экспериментальное исследование волновых явлений, связанных с активными областями в атмосфере.

На данной установке предполагается впервые осуществлять электро-акустическое зондирование электрических параметров об-

лачной атмосферы, основанное на резонансе волны с электрическими ячейками и турбулентность в облаке, содержащем заряды и ные аэрозоли /56/. Этот резонанс приводит к появлению макроскопического электрического дипольного момента на частоте звукового локатора (с масштабом порядка размера огибающей звукового импульса), электромагнитное поле которого далеко простирается за пределы облака и может быть измерено на поверхности Земли. Электроакустическое зондирование открывает принципиально новую возможность дистанционного зондирования электрической структуры грозных облаков и, в частности, электрических ячеек, играющих по современным представлениям принципиальную роль для физики и грозного электричества.

Возможно также использование данной установки для различных практических приложений:

- 1) Слежение за слоями инверсии (накапливающимися аэрозолями — загрязнениями) с целью контроля экологических процессов в атмосфере.
- 2) Оперативный контроль скорости ветра и атмосферной турбулентности на разных высотах в интересах авиации — вблизи крупных аэропортов.
- 3) Предоставление метеоданных по всей толще тропосферы для прогноза погоды.

Имеется лишь один зарубежный аналог предлагаемой установки и радиоакустического зондирования (реализованный в Японии), с максимальной высотой зондирования до 23 км, включающий в себя МУ-радар с очень высоким потенциалом и слабонаправленный акустический излучатель мощностью до 200 Вт. Эта установка обладает уникальными возможностями для радиолокационных исследований атмосферной турбулентности, но практически не пригодна для проведения акустических и электроакустических экспериментов. Предлагаемый проект основан на оптимальном сочетании радиолокационной системы с мощным направленным низкочастотным акустическим локатором.

### 3.4. Радиолокационные исследования магнитосферы

Способность станда "Сура" работать в радиолокационном режиме открывает новую возможность исследования высокоширотной авроральной магнитосферной плазмы – дистанционное зондирование с помощью наземной установки – которая в настоящее время является уникальной.

Известно, что исследования плазмы ионосферы, проводимые локационным методом некогерентного рассеяния в метровом и дециметровом диапазонах длин волн, приносят исключительно богатую информацию о физических свойствах среды. Классический метод некогерентного рассеяния не может быть применен к исследованию магнитосферной плазмы ввиду недостаточной интенсивности сигнала. Однако, в авроральной области магнитосферы, как показали бортовые измерения на спутниках S3-3 /57/ и Viking /58/, в широком интервале высот от 1000 до 13000 км плазма сильно турбулентна, и рассеяние на неоднородностях плотности может быть достаточно сильным для регистрации рассеянного сигнала на поверхности земли. Радиолокационные исследования авроральной магнитосферы позволят определять динамические характеристики турбулентности и ее распределение в пространстве в отличие и в дополнение к исследованиям на спутниках, позволяющим определять все параметры плазмы непосредственно, однако дающим лишь мгновенную картину вдоль траектории движения спутника.

Зондирование магнитосферы следует проводить на более низких частотах, чем зондирование ионосферы, ввиду больших характерных пространственных масштабов турбулентности. Принимая во внимание, что зондирующее излучение должно проникать через ионосферу, целесообразно использовать декаметровый диапазон длин волн.

Станд "Сура" уже в настоящее время может использоваться в целях зондирования магнитосферы при использовании одной секции антенны в качестве передающей, а другой секции – в качестве приемной антенны. Это обусловлено высокой эффективной излучаемой мощностью станда, возможностью наклона диаграммы направленности антенной системы в направлении север-юг и достаточно высокой верхней рабочей частотой антенны, которая в ночных условиях

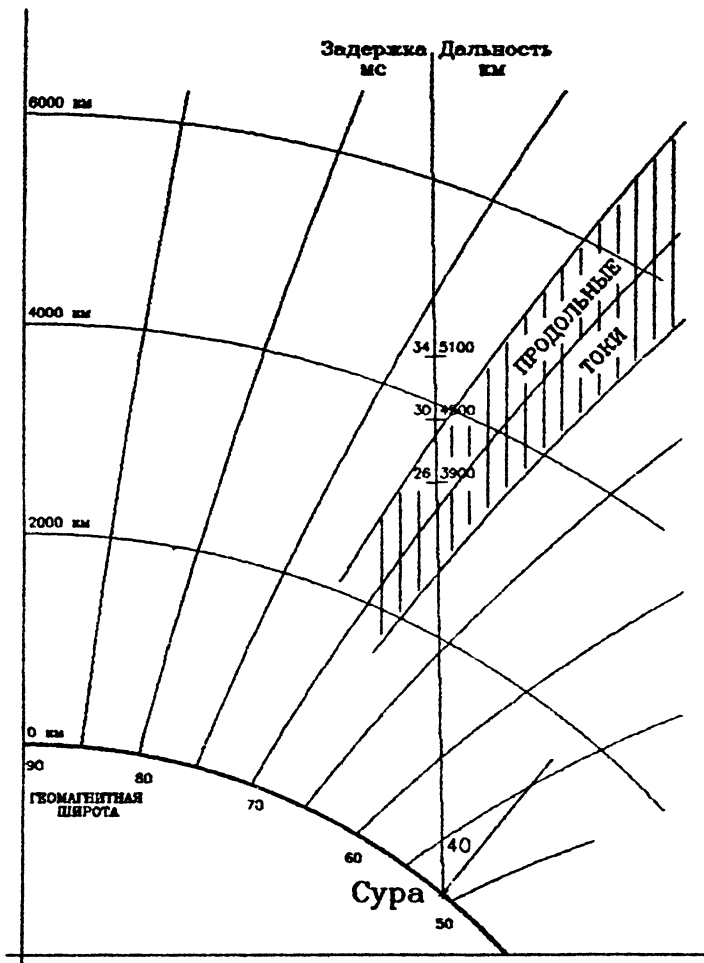


обычно может проникать через ионосферу. Максимальный наклон диаграммы направленности антенны на север позволяет зондировать авроральную область магнитосферы на высотах порядка 3-5 тыс. км. Теоретические оценки отношения сигнал/шум дают значение порядка 0,3 по отношению к космическому фону и порядка  $(1-3) \cdot 10^{-2}$  по отношению к усредненному шуму от радиостанций (в области минимальных помех) в полосе частот 4 кГц для расстояния до рассеивающего объема 4000 км. Пробные эксперименты, проведенные на стенде на частоте около 9 МГц, позволили обнаружить в авроральной области магнитосферы ионно-звуковые колебания /59/. Использованная техника бифазового кодирования зондирующих импульсов с последующим усреднением позволила улучшить отношение сигнал/шум примерно в 300 раз. Геометрия эксперимента показана на рисунке 3.4.1, а примеры спектров сигналов с различных дальностей (времен задержки) - на рисунке 3.4.2.

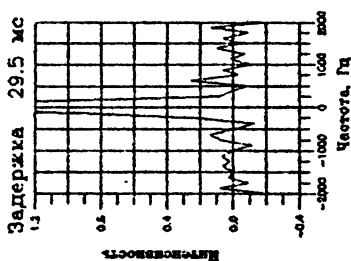
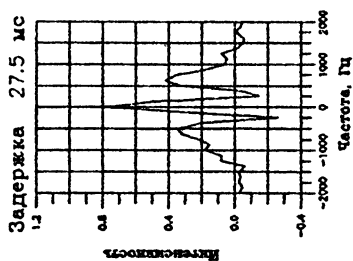
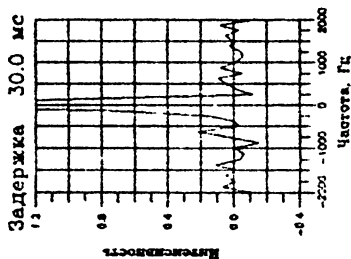
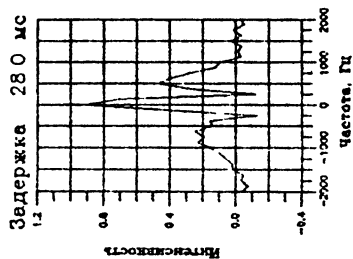
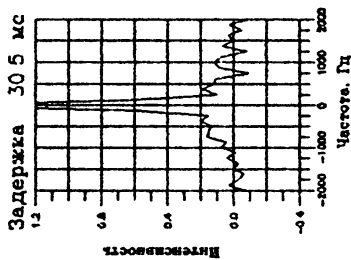
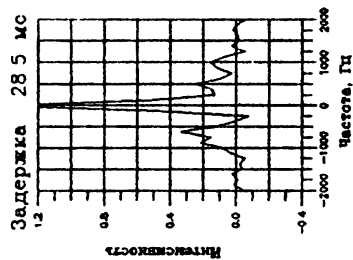
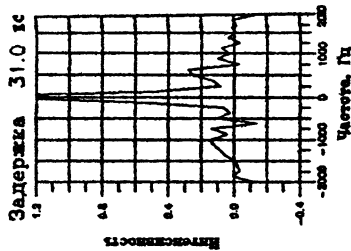
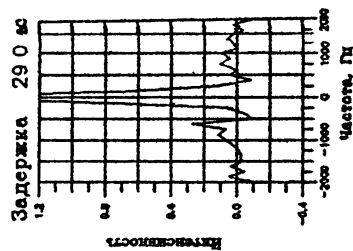
Основным мешающим фактором в экспериментах /59/ было наличие сильных рассеянных сигналов возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) от поверхности земли вследствие того, что частота 9 МГц не превышает максимально применимых частот (МПЧ) ионосферы. Сигналы ВНЗ проходят вне главного лепестка диаграммы направленности антенны. Для разделения рассеянных сигналов от магнитосферы и ВНЗ использовался спектральный анализ, поскольку рассеяние на ионно-звуковой турбулентности приводит к значительному - несколько сот герц - доплеровскому сдвигу частоты. На рис. 3.4.2 сильные пики на нулевой частоте (относительно частоты волны накачки) соответствуют сигналам ВНЗ, а сдвинутые примерно на  $\pm 500$  Гц широкие пики при задержках 27,5+28,5 мс (дальности порядка 4000 км) - рассеянию на ионно-звуковой турбулентности.

Проводимая в настоящее время реконструкция антенной системы 4,5+9 МГц стенда позволит увеличить его потенциал при работе в качестве радара по крайней мере на порядок за счет увеличения подводимой мощности и площади приемной антенны. Увеличение коэффициента направленности антенны должно привести к уменьшению относительной интенсивности сигналов ВНЗ также на порядок.

Качественное расширение возможностей стенда и улучшение его характеристик как магнитосферного радара возможно при создании и



Р и с. 3.4.1



Р и с. 3.4.2

новой антенной системы на диапазон частот 15+25 МГц и переходе к работе на этих частотах. Прежде всего следует отметить, что наиболее разумно направить новую антенну на район с е в е р н о й Скандинавии, где существует богатый комплекс инструментов для исследования околоземного космического пространства, включающий в себя радиофизические, магнитометрические и оптические установки, а также геофизический ракетный полигон и станцию сбора научной информации со спутников. Это позволит получать необходимую для интерпретации радиолокационных данных о магнитосферной плазме дополнительную информацию и проводить целенаправленные комплексные измерения.

Основные преимущества использования диапазона частот 15+25 МГц заключаются в следующем. Прежде всего появляется возможность работы на нескольких разнесенных частотах, что позволит получать спектральные характеристики магнитосферной турбулентности. Применение более высоких частот позволит улучшить условия прохождения радиоволн через ионосферу, а в ночное время работать на частотах выше МГц, что должно существенно ослабить мешающее влияние рассеянных ВЧЗ сигналов. Кроме того, это позволит проводить измерения и в дневное время, в связи с чем не только расширится временной интервал наблюдений авроральной магнитосферы вплоть до круглосуточных, но и могут быть поставлены принципиально новые задачи исследования других магнитосферных объектов, таких как дневная магнитопауза и отошедшая ударная волна, формирующаяся при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли.

Зондирование авроральной магнитосферы в более высокочастотном диапазоне позволит наряду с исследованием свойств ионно-звуковой магнитосферной турбулентности изучать характеристики двойных слоев, погруженных в эту турбулентность. Наблюдения усиленной плазменной линии в области турбулентности позволяет также получать профили плотности плазмы в магнитосфере, что в настоящее время недоступно наземным средствам. Кроме того, появляется возможность измерения продольных (вдоль магнитного поля) скоростей плазмы как целого и поперечных электрических полей, включая геомагнитные пульсации.

В заключение следует отметить, что географическое положение станда "Сура" в средних широтах имеет то преимущество перед аналогичной высокоширотной установкой, что зондирующий радиосигнал не испытывает столь сильного поглощения в нижних слоях ионосферы в возмущенных условиях, связанного с выпадениями частиц.

### 3.5. Радиолокационные исследования объектов ближнего космоса

В 1980 г. на стенде "Сура" были проведены первые эксперименты по радиолокации Луны. Достаточно высокий потенциал вновь созданного локатора (ВРЛ-1), в состав которого входят пространственно разнесенные секции ППАЦД (на прием и передачу) и один из передатчиков ПКВ-250 (на средней частоте рабочего диапазона 4,6+9,3 МГц эффективная мощность излучения  $P_{эфф} = P_0 G$  в направлении зенита составляет 20 МВт, эффективная площадь приема  $1,6 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ) позволяет использовать его в исследованиях Луны /80/, солнечного ветра /81-84/, ионосферы /85/ и магнитосферы /59/ Земли и в прикладных задачах /86/. Некоторые результаты выполненных на ВРЛ-1 исследований представлены ниже.

3.5.1. Эффективный поперечник рассеяния Луны. Впервые измерен эффективный поперечник рассеяния (ЭПР) Луны в длинноволновой части декаметрового диапазона волн:  $\sigma_{2,05} = (1,23 \pm 0,43)$

$10^6 \text{ м}^2$ ,  $\sigma_{5,83} = (7,3 \pm 2,6) \cdot 10^5 \text{ м}^2$ ; при сопоставлении с данными других авторов на более высоких частотах обнаружен максимум  $\sigma_f$  вблизи 20 МГц (рис.3.5.1).

Показано, что наблюдаемая частотная зависимость  $\sigma_f$  вызвана эффектом усиления лунного радиоэха при двойном прохождении доплеро-национных сигналов через ионосферные неоднородности. Лунный грунт в центральных областях Луны в среднем однороден по глубине (диэлектрическая проницаемость  $\approx 2,8$ ) вплоть до расстояний от поверхности  $\geq 500 \text{ м}$ .

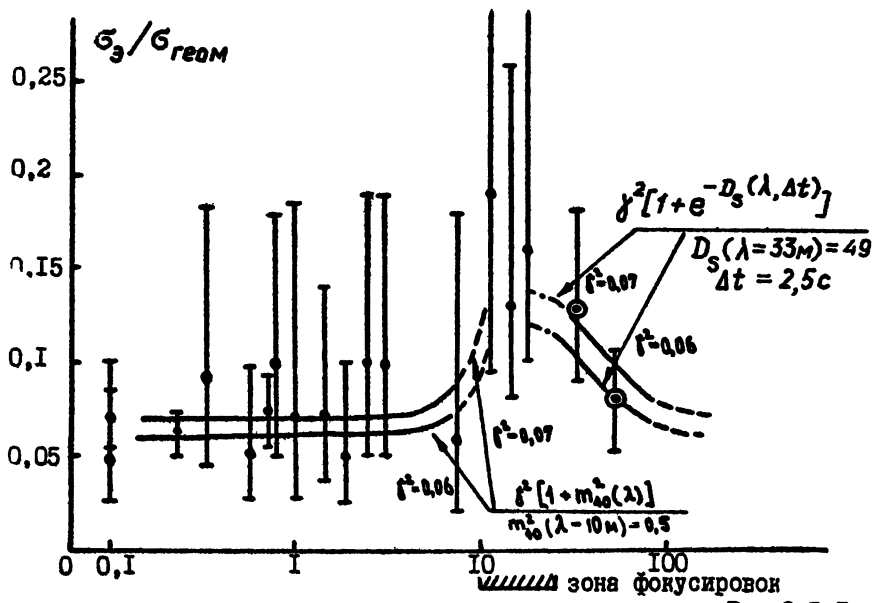
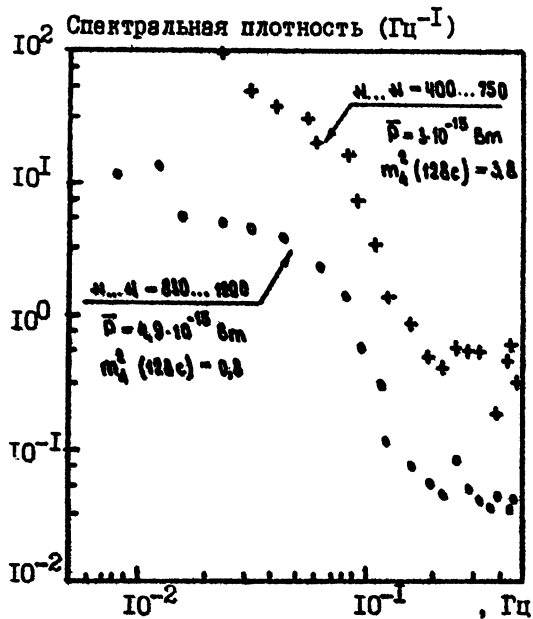


Рис.3.5.1



- $Z_\lambda = 35^\circ$
- $T_\kappa = 23 \text{ 58}$
- $f_0 F_2 = 3,1 \text{ МГц}$
- $f_p = 9048,5 \text{ кГц}$
- $P_0 = 250 \text{ кВт}$
- $T = 1 \text{ с}$
- $\tau = 0,2 \text{ с}$
- $f_{\text{н}} = 4785 \text{ кГц}$
- $P_0 = 250 \text{ кВт}$
- $T = 1 \text{ с}$
- $\tau = 0,6 \text{ с}$

Нагрев до  $N = 700(23 \frac{h}{52} \text{ м})$

Рис.3.5.2

3.5.2. Радиолокация Луны как метод диагностики солнечного ветра. В исследованиях ЭПР Луны на РЛ-1 обнаружена тонкая структура флуктуаций интенсивности  $I(t)$  лунного радиосэха с характерными временами  $\approx 0,5$  с и индексом мерцаний  $\approx 0,4$ . Наиболее вероятной причиной обнаруженной переменности является рассеяние и локационных сигналов на облаках солнечного ветра (СВ).

В приближении фазового экрана решена задача о связи статистических характеристик  $I(t)$  с параметрами СВ. Показано, в частности, что автокорреляционная функция флуктуаций  $I(t)$  в схеме моностатической локации имеет боковые максимумы, ширина  $\tau$  и аргументы  $\pm t_0$ , которых связаны со скоростью перемещения неоднородностей СВ в картинной плоскости  $V$  и расстоянием  $z$  до области повышенной турбулентности СВ на трассе Земля - Луна простыми соотношениями  $\tau = V^{-1} \sqrt{\lambda z (D - z) / D}$ ,  $t_0 = 2(D - z) / c$ , где  $D$  - расстояние Земля - Луна,  $\lambda$  - длина волны локации,  $c$  - скорость света. По высоте центрального максимума определяется величина  $\Delta z \iint \Phi_{N_e}(q_{\perp}, 0) \sin^2(q_{\perp} L_z / 2\kappa) d^2 q_{\perp}$ , где  $\Delta z$  и  $\Phi_{N_e}$  - толщина и спектр неоднородностей электронной концентрации турбулентной области СВ,  $L = z(D - z) / D$ ,  $\kappa = 2\pi / \lambda$ .

3.5.3. Возмущение ионосферы транзитным КВ-радиоизлучением. Напряженность электрического поля излучения локатора в диапазоне 9 МГц начинает превышать значение порогового поля для конвективной самофокусировочной неустойчивости на высотах F-слоя ионосферы уже при  $P_{эфф} = 3$  МВт и  $f_0 F2 = 3$  МГц. В этой связи возникает вопрос о выборе оптимального режима зондирования (без потерь мощности и искажения кода сигнала из-за рассеяния на искусственных неоднородностях) в локационных исследованиях объектов ближнего космоса на частотах ниже 10 МГц.

В 1987-1988 гг. на стенде "Сура" были проведены эксперименты по нагреву ночной ионосферы мощным КВ-радиоизлучением на частотах  $f_H > f_0 F2$ . Диагностика возмущенной области осуществлялась методом радиолокации Луны в диапазоне 9 МГц.

Обнаружено увеличение во время нагрева ( $f_H \approx 4,8$  МГц,  $P_{эфф} = 10$  МВт, импульсы длительностью 0,6 с периодом повторения 1 с, зенитный угол области возмущения  $\approx 34^\circ$ ,  $f_0 F2 = (2,2-3,1)$  МГц)

спектральной плотности флуктуаций интенсивности  $I(t)$  дунного радиоэха во всей исследованной области частот мерцаний  $5 \times (10^{-3} - 10^{-1})$  Гц (рис.3.5.2). Отмечена тенденция уменьшения средней интенсивности радиоэха в 2-3 раза с ростом приведенной мощности нагрева  $P_H = P_{CG}(\frac{f_0}{f_H} F_2 / \frac{f_0}{f_H})^2$  от 1 до 12 МВт.

3.5.4. Перспективы исследований. В настоящее время проводится модернизация антенно-фидерного тракта ШПАДД и системы управления передатчиками стенда "Сура", целью которой является повышение эффективной мощности излучения стенда в локационном режиме до номинальной величины ( $\approx 150$  МВт в диапазоне 9 МГц) с приемом отраженных сигналов на полную площадь ШПАДД. Планируется также создание на базе трех передатчиков ПКВ-250 локатора диапазона 15-25 МГц.

### 3.6. Радиоастрономические исследования

В 1962 г. на базе стенда "Сура" введен в строй первый в северном полушарии широкополосный радиотелескоп длинноволновой части декаметрового диапазона радиоволн (4,6 - 9,3 МГц) с управляемой диаграммой направленности ВДР-300 (Васильсурский декаметровый радиотелескоп с приемной антенной размерами 300 x 300 м) /87, 88/. К началу работ на ВДР-300 данные об угловой структуре распределенного космического радиоизлучения (РКР) с разрешением по небосводу менее  $30^\circ$  и дискретных космических радиоисточниках в северной небесной полусфере на частотах ниже 10 МГц практически отсутствовали (исключение составляют области небосвода на склонениях  $\delta = 56^\circ$  /89/ и  $\delta \approx 10^\circ$  /90/; сведения о дискретных источниках исчерпывались данными о плотности потока Кассиопеи А на частоте 8,8 МГц, а также оценками верхнего предела потока этого источника на 5,6 МГц и источника Лебедь А на 8,8 МГц /91/).

Потенциал и функциональные возможности ВДР-300 позволяют в значительной мере восполнить отмеченный пробел. Исходя из этого, были намечены две основные программы: картографирование РКР и измерение спектров мощных радиоисточников в области обзора ра-



диотелескопа со склонениями  $\delta = 12-83^\circ$ . В качестве рабочих выбраны участки диапазона вблизи частот  $f = 5,6$  и  $8,9$  МГц, наиболее свободные от помех радиостанций. Основная часть измерений выполнена в период с ноября 1984 года по февраль 1989 года вблизи последнего минимума солнечной активности, когда условия наблюдений были наиболее благоприятными.

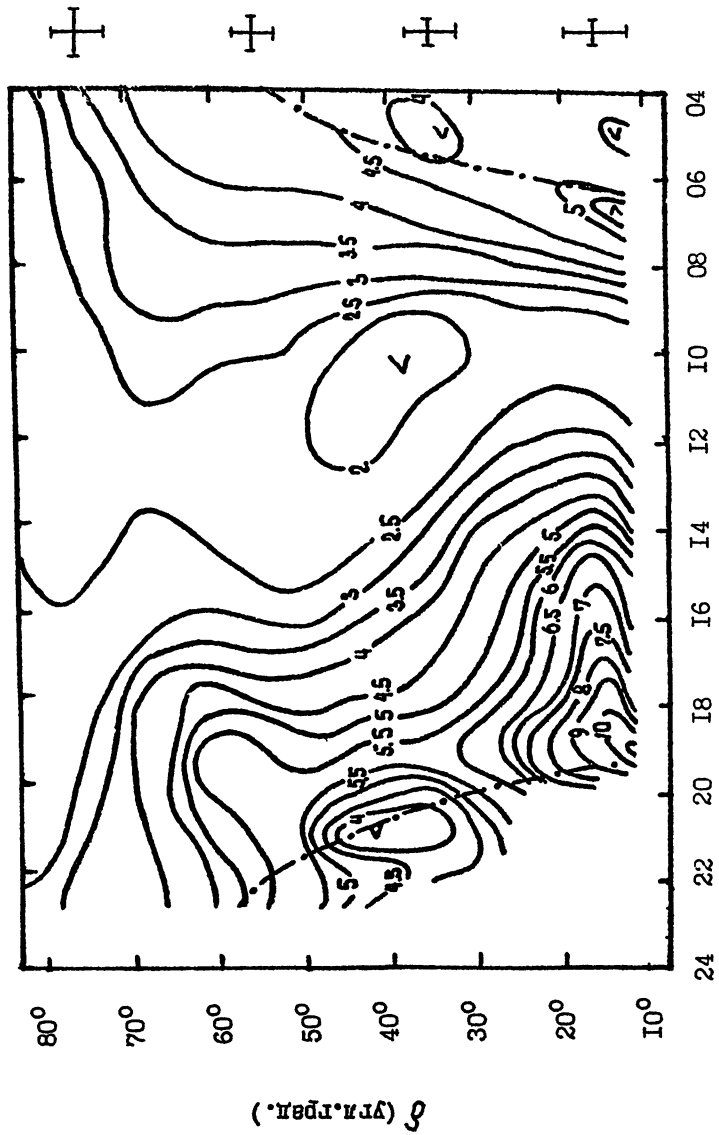
Результаты исследований суммированы в отчетах /87, 92/, докладывались на Всесоюзных конференциях по радиоастрономии/93-98/ и кратко изложены ниже.

3.6.1. Угловая радиоструктура РКР на частотах 5,6 и 8,9 МГц. На частоте 8,9 МГц объем полученных данных позволяет синтезировать радиоизотопы эффективных температур РКР  $T_{8,9}(\alpha, \delta)$  для обширных участков небосвода (рис.3.6.1). На частоте 5,6 МГц число удачных записей меньше и пока построены кривые прохождения  $T_{5,6}(\alpha, \delta = \text{const})$  для склонений  $\delta = 17, 27, 35$  и  $60^\circ$  в интервале прямых восхождений  $\alpha = 06-18^h$ .

Сопоставление результатов измерений на ВДР-300 с высокочастотными радиообзорами показывает, что на умеренных и высоких галактических широтах  $|b| \geq 30^\circ$  угловые вариации  $T_f$  качественно одинаковы в широком диапазоне частот 5,6-400 МГц. Имеющиеся количественные расхождения свидетельствуют об увеличении относительного вклада квазиизотропных компонент РКР (радиокорона, метагалактический радиофон) в формирование наблюдаемого радиоизлучения с понижением частоты. На низких широтах ( $|b| < 20^\circ$ ) картина углового распределения  $T_f$  из-за поглощения радиоволн в межзвездном ионизованном газе существенно отличается от обычной для метрового и дециметрового диапазонов радиоволн.

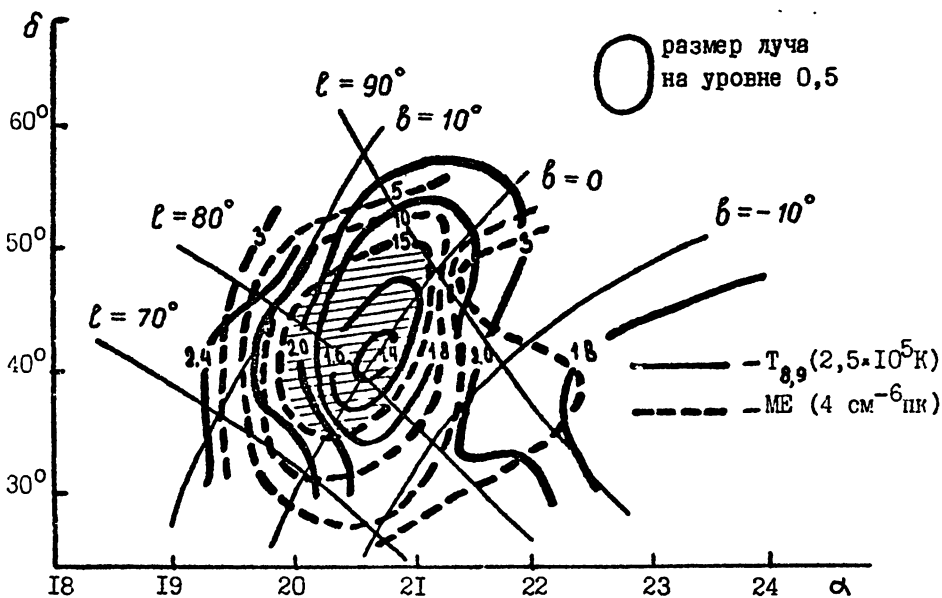
3.6.2. Объемная радиосветимость рукава Ориона. В ходе радиообзора РКР на 8,9 МГц обнаружен локальный минимум  $T_{8,9}(\ell, b)$  в направлении с галактическими координатами  $\ell = 80^\circ, b = 0^\circ$  (см.рис.3.6.1). Его положение хорошо коррелирует с областью усиления диффузного  $H\alpha$ -излучения /99/ и скоплением  $H\alpha$ -областей в комплексе Лебедь-X /100/, что позволяет определить локальную объемную радиосветимость рукава Ориона  $\epsilon_{8,9}(\ell = 80^\circ, b = 0^\circ) =$

$T_{8,9}$  ( $10^5$  K)

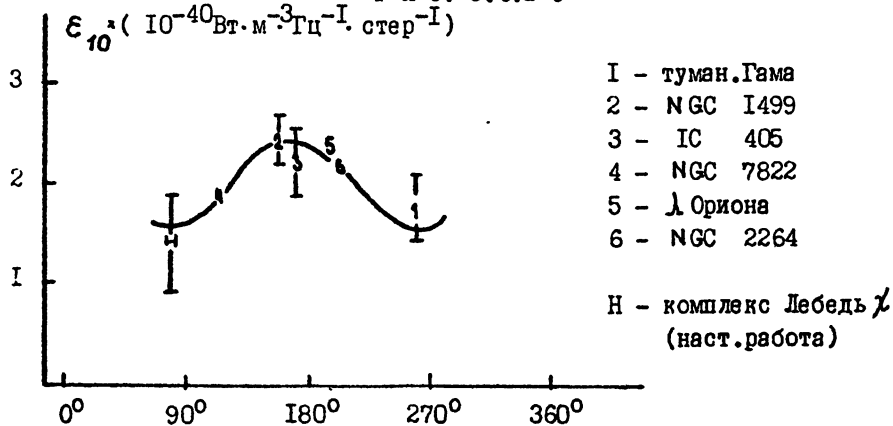


$\alpha$  (h)

Р и с . 3.6.1 а



Р и с. 3.6.1 б



Р и с. 3.6.2

$= (1,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-40}$  Втм<sup>-3</sup>Гц<sup>-1</sup>стер<sup>-1</sup> на масштабе горизонта видимости ( $\approx 1,8$  кпк).

Этот результат существенно дополняет имеющиеся немногочисленные оценки  $\epsilon_f$  на разных частотах в направлениях ближайших ( $\approx 1,5$  кпк) HII-областей и (после приведения всех данных к частоте 10 МГц) выявляет тенденцию уменьшения  $\epsilon_f$  в направлении  $\ell \approx 80^\circ$  (рис.3.6.2). Анализ зависимости  $\epsilon_f(\ell)$  от  $\ell$  в рамках магнитотормозного механизма радиоизлучения с учетом данных об интенсивности потока электронной компоненты космических лучей дает оценки напряженностей хаотической ( $H_x$ ) и регулярной ( $H_p$ ) компонент магнитного поля рукава Ориона соответственно,  $1,2 \times 10^{-5}$  Тс и  $0,6 \cdot 10^{-6}$  Гс. Последняя величина примерно в 3 раза превышает  $H_p$  по измерениям мер вращения РМ и дисперсии ДМ радиоизлучения пульсаров на расстояниях  $\approx 6$  кпк от Солнца, что представляет интерес для решения вопроса о связи волн плотности с особенностями крупномасштабного магнитного поля диска Галактики.

3.6.3. Низкочастотные радиоспектры дискретных космических источников ЗС 144, ЗС 274, ЗС 405 и ЗС 461. Впервые на частотах ниже 10 МГц измерены плотности потоков  $S_f$  четырех наиболее мощных в северной небесной полусфере дискретных космических радиоисточников.

Таблица плотностей потоков ( $S_f \cdot 10^{23}$  Втм<sup>-2</sup>Гц<sup>-1</sup>)

Частота: (МГц)	ЗС 144 (Крбов. тум):	ЗС 274 (Лева А)	ЗС 405 (Лебедь А)	ЗС 461 (Кассиопея А)
5,6	16,2 <sub>+5</sub>	17,7 <sub>+5,5</sub>	< 2,8	7 <sub>+5</sub>
8,9	6,4 <sub>+1,3</sub>	11,2 <sub>+2,5</sub>	5,9 <sub>+12</sub>	32 <sub>+7</sub>

Сопоставление с высокочастотными данными показывает, что спектр ЗС 274 в пределах ошибок измерений не отличается от линейного (в масштабе  $\lg S_f - \lg f$ ) в диапазоне 5,6–178 МГц, в то время как ЗС 405 и ЗС 461 имеют спектры с положительной кривизной (низкочастотной дисперсией), а ЗС 274 – с отрицатель-

ной.

Результаты измерений на ВДР-300 свидетельствуют, что спектр компактного источника Крабовидной туманности, доминирующего в ее интегральном радиопотоке на частотах ниже 15 МГц и отождествляемого с пульсаром NP 0532, остается аномально крутым (спектральный индекс  $\alpha = 2$ ) вплоть до 5,6 МГц, указывает на низкую плотность ионизованного газа  $\langle N_e^2 \rangle^{1/2} \lesssim 7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$  в области формирования декаметрового радиоизлучения радиогалактики Дева А, а также позволяют получить независимые оценки меры эмиссии ME диска Галактики в направлении на Лебедь А - ME = 170 см<sup>-6</sup>пк и реликтовой зоны ионизации вокруг остатка сверхновой Кассиопея А - ME = 120 см<sup>-6</sup>пк (при электронной температуре 6000°К).

Полученные оценки  $S_f$  представляют интерес также для прикладных исследований (при калибровках приемных антенн в диапазоне ниже 10 МГц, в измерениях ионосферного поглощения радионаблюдениями методом и пр.).

3.6.4. Полу часовая переменность Крабовидной туманности. Результаты измерений  $S_{fn}$  плотности потока дискретных радиоисточников характеризуются определенным суточным разбросом. Анализ вероятностных распределений  $S_{fn}$  показал, что, в отличие от "эталонных" источников - радиогалактики Дева А и Лебедь А, суточный разброс  $S_{fn}$  Крабовидной туманности помимо дестабилизирующих факторов наземных измерений (ионосферные мерцания, радиопомехи и пр.) вызван также внеатмосферной переменностью этого объекта. Относительная дисперсия внеатмосферной компоненты флуктуаций (ЗС I44) на частотах 5,6 и 8,9 МГц составляет соответственно, 0,4 и 0,1; характерный временной масштаб на обеих частотах близок к 0,5 часа.

Обнаруженная переменность может быть обусловлена, вообще говоря, как собственной переменностью, так и мерцаниями пульсара NP 0532 на неоднородностях космической среды. Установлено, что в модели мерцаний необходимый режим переменности ЗС I44 могут обеспечить только ближайшие окрестности пульсара, включая его магнитосферу, а также гипотетическая турбулентная область на границе гелиосферы. При этом расстояние до области должно

быть  $\approx 50$  а.е., среднеквадратичное значение флуктуаций электронной концентрации  $\approx 0,3 \text{ см}^{-3}$ , масштаб неоднородностей  $\approx 6 \cdot 10^{10}$  см.

3.6.5. Перспективы исследований. Повышение потенциала и расширение функциональных возможностей ВДР-300 связано с ведущимися в настоящее время работами по созданию электронной системы управления лучем телескопа и организации интерферометрического приема на пространственно разнесенных секциях ППАД. В результате этих модернизаций ожидается повысить точность измерений радиояркости и распределенного космического радиоизлучения и увеличить доступное для исследований число дискретных космических радиоисточников.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Силин В.П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. - М.: Наука, 1973.
2. Грач С.М., Трахтенгерц В.Ю. //Изв.вузов. - Радиофизика , 1975. - Т.18, № 9. - С.1288-1296.
3. Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. //Письма в ЖЭТФ, 1986. - Т.43, № II. - С.512-515.
4. Thide Bo, Kopka H., Stubbe P. Phys.Rev.Let., 1982, 49, N21, 1561-1564.
5. Караштин А.Н., Коробков Ю.С., Фролов В.Л., Цимринг М.Ш. //Изв.вузов. - Радиофизика, 1986. - Т.29, № I. - С.28-32.
6. Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. //Письма в ЖЭТФ, 1981. - Т.34, № II. - С.582-585.
7. Harlet S.C., Megill L.R. Radio Sci. 1974, 9, N 11, 1005-1020.
8. Гетманцев Г.Г., Комраков Г.П. и др. //Письма в ЖЭТФ, 1973. - Т.18, № 10. - С.621-624.
9. Беленов А.Ф., Бубнов В.А. и др. //Изв. вузов. - Радиофизика, 1977. - Т.20, № 12. - С.1805-1813.
10. Ерухимов Л.М., Митякова Э.Е. и др. //Изв.вузов. - Радиофизика, 1977. - Т.20, № 12. - С.1814-1820.
11. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др. - В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме, ИГи АН СССР, Горький, 1979. - С.7-45.
12. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др. //Изв.вузов. - Радиофизика, 1987. - Т.30, № 2. - С.208-225.
13. Грач С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. - В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме, ИГи АН СССР, Горький, 1979. - С.46-80.
14. Васьков В.В., Гуревич А.В. - В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме, ИГи АН СССР, Горький, 1979. - С.81-138.
15. Fejer J.A. Rev.Geophys.Space Phys., 1979, N 1, 135-153.
16. Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. - М.: ВИНТИ, 1989.

17. Robinson T.R. Physics Reports, 1989, 179, N 2&3.
18. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1982. - Т.25, № 5. - С.490-494.
19. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я. и др.//Геомagnetизм и аэрономия, 1987. - Т.27, № 5. - С.758-763.
20. Альбер Я.И., Кротова З.Н. и др.//ЭТФ, 1974. - Т.66, № 2. - С.574-578.
21. Djuth F.T., Gonzales C.A., Ierkić H.M. J.Geophys.Res. , 1986, 91, N A11, 12089-12107.
22. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др.//Геомagnetизм и аэрономия, 1983. - Т.23, № 3. - С.433-439.
23. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1978. - Т.21, № 12. - С.1738-1741.
24. Беликович В.В., Ерухимов Л.М. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1988. - Т.31, № 3. - С.251-256.
25. Belenov A.F., Erukhimov L.M., Yampolski Yu.M. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 47-52.
26. Belenov A.F., Ponomarenko P.V., Sinitsin V.G., Yampolski Yu.M. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 107-109.
27. Беленов А.Ф., Ерухимов Л.М., Сергеев Е.Н., Фролов В.Л. Особенности динамики мелкомасштабных искусственных неоднородностей при больших мощностях волны накачки//Препринт № 314. - Н.Новгород: НИРФИ, 1991.
28. Грач С.М.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1985. - Т.28, № 6. - С.684-693.
29. Грач С.М., Метелев С.А., Шварц М.М. Proc. of the Suzdal International Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1986, 86-87.
30. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Разумов Д.В.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1988. - Т.31, № 11. - С.1301-1308.
31. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Грач С.М., Терина Г.И.



- International Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1986, 120-121.
32. Leyser T.B., Thide Bo et al. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 165-166.
33. Waldenvik M., Thide Bo et al. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 162-163.
34. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Л. и др. //Препринт № 190. - Горький: НИРФИ, 1989.
35. Sergeev E.N., Frolov V.L. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 154-155.
36. Frolov V.L. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 156-157.
37. Boiko G.N., Erukhimov L.M., Metelev S.A. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 144-145.
38. Иванов В.А., Фролов В.А., Шумаев В.В. Зондирование ионосферы непрерывными ЛЧМ радиосигналами//Изв.вузов. - Радиофизика, 1986. - Т.29, № 2. - С.235.
39. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Митяков Н.А. и др. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях//Препринт № 258. - Горький: НИРФИ, 1986. - 44 с.
40. Брынько И.Г., Галкин И.А., Грозов В.Л. и др. Ионозонд с непрерывным ЛЧМ сигналом//Препринт № 13-86. - Иркутск : СибИЗМИР, 1986.
41. Poole A.W.V. Advanced sounding. The FM/CW alternative//Radio Sci. 1985. V.20,N6. P.1609.
42. Fenwick R.B. Oblique chirpsounder the HF communication s test set // Communication News. 1974,V11,N2.P.32.
43. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Митяков Н.А. и др. Исследование частотных характеристик декаметровых радиоволн при зондировании ионосферы, возмущенной мощным радиоизлуче -

- нием//Препринт № 236. - Горький: НИРФИ, 1987. - 30 с.
44. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В. и др. Автоматизированный ЛЧМ комплекс в сети станций наклонного зондирования. Результаты диагностики естественной и модифицированной ионосферы//Препринт № 323. - Н.Новгород: НИРФИ, 1991. - 56 с.
  45. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Костромин В.Г. и др. Управление волноводным распространением КВ за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением//Изв.вузов. - Радиопизика. - в печати.
  46. Ерухимов Л.М., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н., Поляков С.В., Рахлин А.В., Синельников В.М.//Изв.вузов. - Радиопизика, 1977. - Т.20, № 12. - С.1845.
  47. Выборнов Ф.Н., Ерухимов Л.М., Комраков Г.П., Косолапенко В.И., Кряжев В.А., Мясников Е.Н.//Изв.вузов. - Радиопизика, 1986. - Т.29, № 4. - С.491.
  48. Erukhimov L.M., Lerner A.M., Kosolapenkov V.I., Myasnikov E.N., Planet. and Space Sci, 1981, V.29,N9, P.931.
  49. Bernhardt P.A., Scales W.A. et al. Geophys. Res. Let., 1991, V.18, N 8, P.1477-1480.
  50. Carlson H.C., Wickwar V.B., Mantas G.P. J. Atm. Terr. Phys., 1982, V.44, N 12, 1089-1100.
  51. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А.//Изв.вузов. - Радиопизика, 1980. - Т.23, № 6. - С.762-763.
  52. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Terina G.I. J. Atmos. and Terr. Phys., 1986, V.48, N 11-12, P. 1247-1253.
  53. Benediktov E.A., Belikovich V.V., Goncharov N.P., Tolmacheva A.V. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves, Moscow, 1991, 60-64.
  54. Трахтенгерц В.Ю.//Доклады АН СССР, 1989. - Т.308, № 3. - С.584-586.
  55. Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю.//Геометризм и аэрономия, 1990. - Т.30, № 5. - С.869-875.
  56. Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю.//Изв.вузов. - Радиопизика, 1992. - Т.35, № 1.

57. Moez F.S., C.A.Cattell, M.Temerin, R.B.Torbert, S. von Glinzki, M.Woldorff, J.Wygart. *J. Geophys. Res.*, 1979, V.84, P.5875-5884.
58. Block L.P. *Geophys.Res.Lett.*, 1987, V.14, P.435-438.
59. Бабиченко А.М., Гуревич А. В., Караштин А.Н., Рапопорт В.О.//Письма в ЖЭТФ, 1991. - Т.53, № 3. - С.139-143;
60. Гетманцев Г.Г., Котик Д.С., Зуйков Н.Е., Мироненко Л.Ф., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Трахтенгерц В.Ю., Эйрман В.Я.//Письма в ЖЭТФ, 1974. - Т.20, № 4. - С.229-232.
61. Stubbe P., Корка Н. , *J.Geophys.Res.*, 1981, A, V.86, N3.
62. Ferraro A.J., H.S.Lee, R.Allshouse, K.Carrell, R. Lunnen *J.Atmos. and Terr. Phys.* 1984. V.46, N10. P.855.
63. Будилин А.В., Гетманцев Г.Г., Котик Д.С., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Смирнов С.Ю., Трахтенгерц В.Ю.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1977. - Т.20, № 1, 83-87.
64. Гетманцев Г.Г., Котик Д.С., Зуйков Н.Е., Мироненко Л.Ф., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Трахтенгерц В.Ю., Эйрман В.Я.//Письма в ЖЭТФ, 1977. - Т.20, № 4. - С.229-232.
65. Будилин А.В., Котик Д.С., Зуйков Н.Е., Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А.//Труды XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1978. - С.120.
66. Котик Д.С., Митяков С.Н., Рапопорт В.О., Поляков С.В., Трахтенгерц В.Ю.//Препринт № 45, I-53. - Горький: ИПФ АН СССР, 1982.
67. Котик Д.С., Митяков С.Н., Рапопорт В.О., Поляков С.В., Трахтенгерц В.Ю.//Препринт № 73, I-53. - Горький: ИПФ АН СССР, 1983.
68. Котик Д.С., Рапопорт В.О., Поляков С.В.//Труды I Суздальского симпозиума по эффектам искусственного воздействия на Земную ионосферу мощными радиоволнами, 1983. - С.131-

69. Котик Д.С., Рапопорт В.О., Митяков С.Н., Поляков С.В.// Труды I Суздальского симпозиума по эффектам искусственного воздействия на Земную ионосферу мощными радиоволнами, 1983. - С.141-142.
70. Котик Д.С., Рапопорт В.О., Митяков С.Н., Поляков С.В.// Труды I Суздальского симпозиума по эффектам искусственного воздействия на Земную ионосферу мощными радиоволнами, 1983. - С.140-141.
71. Котик Д.С., Иткина М.А., Кротова З.В., Поляков С.В., Рапопорт В.О.//Препринт № 162. - Горький: НИРФИ, 1983. - 52 с.
72. Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1987. - Т.30, № 2. - С.248-268.
73. Бабиченко А.М., Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О., Солннин В.А.//Труды II Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М., 1986. - С.113-114.
74. Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков С.Н., Рапопорт В.О., Тамойкин В.В.//Труды II Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М., 1986. - С.91-92.
75. Бабиченко А.М., Котик Д.С., Митяков С.Н., Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О. - В сборнике: Неустойчивости и волновые явления в системе ионосфера - термосфера. - ИФ АН СССР, 1989. - С.75-88.
76. Бабиченко А.М., Котик Д.С., Белова Н.И., Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О.//Труды XXIII Генеральной ассамблеи УРСИ, 1990. - С.169.
77. Котик Д.С., Рапопорт В.О., Бабиченко А.М., Белова Н.И. //Труды III Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы, 1991. - С.206-207.
78. Гетманцев Г.Г., Гульельми А.В., Котик Д.С., Клайн Б.И., Крылов С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю., Троицкая В.А.//Изв.вузов. - Радиофизика, 1977. -

- Т.20, № 7. - С.1017-1020.

79. Котик Д.С., Рапопорт В.О., Поляков С.В., Петров М.С., Сорокин Ю.А., Хмельяк Ю.А. - В кн.: Низкочастотные излучения в магнитосфере Земли. - М.: ИЗМИРАН, 1986. - С.71-75.
80. Токарев Ю.В.//Отчет по НИР "Дека". - Горький: НИРФИ, 1989. - II4 с.
81. Токарев Ю.В., Юрищев М.А.//20 Всесоюзная конференция по радиофизическим исследованиям солнечной системы, Симфе - рополь, 1988. - Тезисы докладов. - С.121.
82. Токарев Ю.В., Юрищев М.А.//16 Всесоюзная конференция по распространению радиоволн, Харьков, 1990. - Тезисы докладов, Ч.П. - С.130.
83. Токарев Ю.В., Юрищев М.А. Заявка на изобретение № 4738061/09; решение о выдаче авт.свидетельства от 06.07.90 г.
84. Genkin L.G., L.M.Egukhimov, Yu.V.Tokarev. Proc. of the 3-d Suzdal URSI Symposium. 1991, P.171-172.
85. Токарев Ю.В., Юрищев М.А.//Всесоюзный симпозиум "Ионосфера и взаимодействие декаметровых радиоволн с плазмой". - М., 1989. - Тезисы докладов, Ч.1. - С.44.
86. Белов И.Ф. и др.//ВКА И-Ш "Метеорологическое обеспечение антенных измерений", Ереван, 1984. - Тезисы докладов. - С.135-137.
87. Токарев Ю.В.//Отчет по НИР "Горизонт". - Горький: НИРФИ, 1986. - 222 с.
88. Белов И.Ф. и др.//18 Всесоюзная конференция по радиоастрономии, Иркутск, 1986. - Тезисы докладов. - С.9-10.
89. Бенедиктов Е.А., Ефимова Т.В., Сиребкова Л.Л.//Астрон.ж., 1969. - Т.46, - С.286-290.
90. Ellis G.R.A. Austr.J.Phys.1982,V.35,N1,P.91-104.
91. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Коробков Ю.С.//Астрон. ж., 1967. - Т.44, № 5. - С.981-983.
92. Токарев Ю.В.//Отчет по НИР "Среда". - Горький: НИРФИ, 1990. - 131 с.
93. Тарасов А.Ф., Токарев Ю.В., Юрищев М.А.//10 Всесоюзная конференция по радиоастрономии, Таллинн, 1987. - Тезисы

- докладов. - С.92-93.
94. Токарев Ю.В. Там же. - С.100-101.
95. Виняйкин Е.Н., Тарасов А.Ф., Токарев Ю.В., Юрищев М.А. Там же. - С.164-165.
96. Токарев Ю.В.//21 Всесоюзная конференция по радиоастрономии, Ереван, 1989. - Тезисы докладов. - С.345-346.
97. Тарасов А.Ф., Токарев Ю.В.//23 Всесоюзная конференция по радиоастрономии, Ашхабад, 1991. - Тезисы докладов. - С.51-52.
98. Тарасов А.Ф., Токарев Ю.В. Там же. - С.91.
99. Reynolds R.J. et al. *Astrophys.J.* 1974, V.192, N2(2), P.53-56.
100. Wendker H.J. *Astron.Astroph.*, 1970, V.4, N3, P.378-386.
101. Котик Д.С., Остапенко А.А.//Труды II Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы. - М.: ИЗМИРАН, -1986. - С.132.
102. Котик Д.С., Ермакова Е.Н.//Труды III Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы. - М.: ИЗМИРАН, 1991. - С.175-176.

**THE "SURA" FACILITY. A REVIEW OF INVESTIGATION RESULTS//**  
**Preprint N343.- Nizhny Novgorod: NIRFI, 1992.- 70p.**

Main specifications of the heating facility "Sura" are given. The projects proposed for its modernization are discussed. A brief review is presented of the experimental results obtained in recent years using the "Sura" facility. A perspective of investigation directions is analyzed.