

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РСФСР ПО ДЕЛАМ НАУКИ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ  
Ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

---

П р е п р и н т    №    324

О СТРУКТУРЕ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ  
ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ  
НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ ЧАСТОТЫ ВОЛНЫ НАКАЧКИ

Е. Н. Сергеев  
В. Л. Фролов

Нижний Новгород 1991

Сергеев Е. Н., Фролов В. Л.

О СТРУКТУРЕ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ ЧАСТОТЫ ВОЛНЫ НАКАЧКИ//Препринт № 324. - Нижний Новгород: НИРФИ, 1991. - 36 с.

УДК 551.510.535

Приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик искусственного радиоионизлучения ионосферной плазмы (ИРИ) в области отрицательных отстроек относительно частоты волны накачки (ВН). Показано, что в структуре ИРИ можно выделить, по крайней мере, три обычно наблюдаемых компонента: узкополосное излучение, наблюдаемое в области малых отрицательных отстроек, излучение, относящееся к его главному спектральному максимуму, и широкополосное излучение на отстройках  $\Delta f \approx -20 - -60$  кГц. Рассмотрены характеристики всех компонент ИРИ в зависимости от частоты и мощности ВН, угла наклона диаграммы направленности антенны нагревного стенда, уровня развития искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов. Приводятся первые результаты измерений динамики развития и релаксации высокочастотной плазменной турбулентности. Отмечены особенности генерации ИРИ на частотах ВН, близких к гармоникам гирочастоты электронов. Рассмотрены модели генерации исследуемых компонент излучения и проведено их сопоставление с имеющимися экспериментальными данными.

## И. В в е д е н и е

Исследование свойств искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы (ИРИ) /I-13/ убедительно показали, что оно имеет сложный (многокомпонентный) состав, отражающий развитие различного типа неустойчивостей в возмущенной области (ВО) ионосферы вблизи уровня отражения волны накачки (ВН). Суперпозиция этих компонент, свойства каждой из которых определяются многими факторами, обуславливает наблюдаемое многообразие динамики излучения в зависимости от частоты ВН ( $f_{ВН}$ ), ее мощности, а также величины и знака отстройки частоты излучения  $\Delta f$  относительно  $f_{ВН}$ . Такая композиционная структура ИРИ сильно осложняет интерпретацию получаемых экспериментальных данных. В этой ситуации важное значение приобретают измерения, позволяющие выделить свойства какой-либо одной компоненты излучения. В настоящей работе с этой точки зрения анализируются полученные нами экспериментальные данные о характеристиках ИРИ в области отрицательных отстроек ( $\Delta f^-$ ) относительно частоты ВН.

Обсуждаемые ниже измерения были выполнены в различное время на среднеширотных нагревных стендах "Зименки" и "Сура" (Нижний Новгород), а также на низкоширотном стенде "Гиссар" (Душанбе). Во всех этих экспериментах осуществлялось воздействие мощным радиоизлучением O-поляризации на плазму F-области ионосферы.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Зависимость спектральных характеристик ИРИ от частоты ВН

Обсуждаемые ниже измерения стационарных спектров ИРИ были выполнены в сентябре 1989 г. на нагревном стенде "Сура". В этих экспериментах использовалась только одна секция антенны нагревного стенда; при этом максимальная эффективная мощность ВН составляла  $\sim 20-30$  МВт /14/. Измерения выполнялись в вечернее время суток с 18.00 до 23.00 МСК последовательно на частотах ВН 9310 кГц; 7815 кГц; 5750 кГц и 4785 кГц по мере уменьшения критической частоты  $F_2$ -слоя ионосферы, так что  $f_{OF_2} - f_{ВН} \approx 0,2-1,5$  МГц. Результаты измерений представлены на рис. 1а, где каждый спектр отнормирован на значение интенсивности излучения для его главного спектрального максимума  $\Delta f_M \approx -9-18$  кГц. Видно, что с ростом  $f_{ВН}$  наблюдается обужение спектра ИРИ за счет исчезновения широкополосной компоненты излучения в диапазоне отстроек  $\Delta f^- = 30-60$  кГц; при этом излучение, относящееся к главному спектральному максимуму ИРИ, становится все более доминирующим в его спектре. Установлено, что интенсивность излучения для  $\Delta f^- \approx \Delta f_M$  имеет слабую зависимость от  $f_{ВН}$ : для  $\tilde{P}_2 = 15-20$  МВт плотность потока излучения  $S \approx (1-2) \times 10^{-17}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц, возможно несколько возрастая (но не сильнее, чем в первой степени) с увеличением  $f_{ВН}$  \*).

На рис. 1б представлена зависимость частоты смещения главного спектрального максимума  $\Delta f_M$  от  $f_{ВН}$ . Здесь же пунктирными линиями приведены результаты аналогичных измерений на нагревных стендах "Тромсё" /9/ и "Гиссар" /4, 5/. Видно, что все эти измерения дают очень близкие значения  $\Delta f_M$ , отвечающие линейной зависимости  $\Delta f_M$  от  $f_{ВН}$ . Такое близкое совпадение данных, полученных в разное время на различных геомагнитных широтах, заведомо не является случайным и может служить указанием на то, что формирование этой компоненты ИРИ не зависит от конкретных ионосферных условий. Важно, также, что генерация этой компоненты излучения, согласно изме-

\* Значение  $\tilde{P}_2$  определялось нами с учетом поглощения энергии ВН в нижней ионосфере.

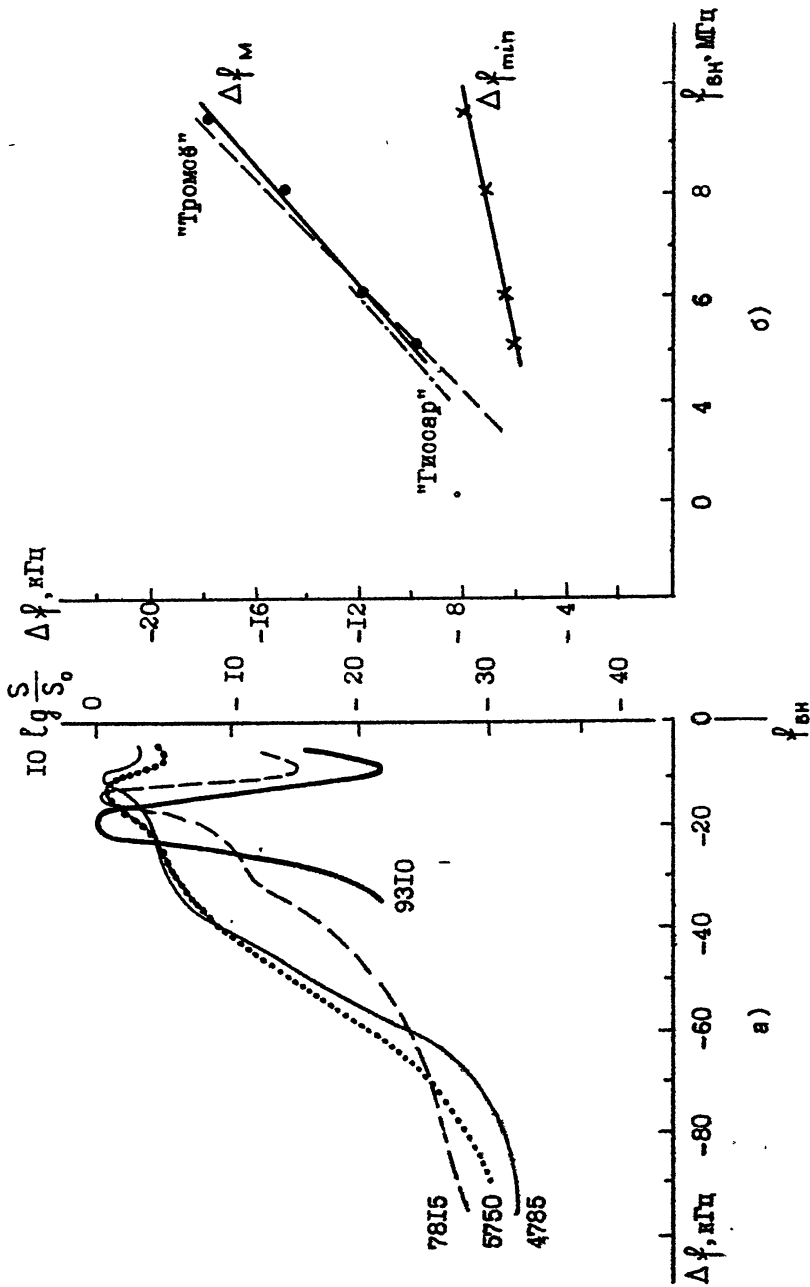


Рис. I

ниями /12, 13/, начинается, когда  $f_{ВН}$  даже несколько превышает критическую частоту  $f_{OF_2}$ . Последнее позволяет связывать высоту образования этой компоненты с областью верхне-гибридного резонанса для ВН.

На рис. 16 приведена также зависимость частоты минимума спектральной интенсивности ИРИ  $\Delta f_{\min}^I$ , обнаруживающегося в интервале частот между главным спектральным максимумом и  $f_{ВН}$ , от  $f_{ВН}$ . Видно, что и здесь имеет место линейная зависимость  $\Delta f_{\min}^I (f_{ВН})$ , но значительно более слабая, чем для  $\Delta f_M$ . Этот результат можно рассматривать как подтверждение сделанного в /12, 13/ вывода о постоянстве положения высокочастотного края этой компоненты излучения, приблизительно отвечающего смещению частоты на величину порядка частоты ниже-гибридного резонанса, которая для условий проведения наших экспериментов составляет 7,6 кГц.

Завершая рассмотрение свойств компоненты ИРИ, отвечающей его главному спектральному максимуму, отметим, что наблюдается зависимость ее спектральной интенсивности  $S$  от масштаба слоя ионосферной плазмы  $L_N = \left( \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial z} \right)^{-1}$ . При степенной аппроксимации функции  $S(L_N)$  значение показателя степени лежит в интервале  $\sim 0,5-1$ , что хорошо соответствует характеру зависимости интенсивности мелко-масштабных искусственных ионосферных неоднородностей от  $L_N/15$ .

Выше уже отмечалось, что с ростом частоты ВН наблюдается ослабление широкополосной компоненты излучения, которая обнаруживается на отстройках  $\Delta f_M < \Delta f^- \lesssim 60-70$  кГц для  $f_{ВН} = 4785$  кГц и 5750 кГц, на отстройках  $\Delta f_M < \Delta f^- \lesssim 30-40$  кГц - для  $f_{ВН} = 7815$  кГц и уже не регистрируется для  $f_{ВН} = 9310$  кГц. Если для оценок взять измерения на частотах ВН 5750 и 7815 кГц, то можно получить, что ширина спектра этой компоненты уменьшается приблизительно обратно пропорционально  $f_{ВН}$ , в то время как ее спектральная интенсивность  $S$  при степенной аппроксимации зависимости  $S(f_{ВН})$  уменьшается с ростом  $f_{ВН}$  как  $f_{ВН}^{-\beta}$ , где  $\beta \approx 4$ . Отметим, что результаты измерений для  $f_{ВН} = 9310$  кГц не противоречат сделанным оценкам. Из сказанного выше ясно, что полная интенсивность широкополосной компоненты спектра ИРИ очень быстро уменьшается с ростом  $f_{ВН}$  (приблизительно как  $f_{ВН}^{-5}$ ).

Отметим еще одну особенность генерации ИРИ в области отстроек  $\Delta f_M < \Delta f^- \lesssim 60$  кГц.

Проведенные в сентябре 1990 г. на стенде "Сура" совместно с

группой Б.Тиде (Швеция) исследования характеристик ИРИ для  $f_{ВН} = 9310$  кГц при мощностях ВН  $\tilde{P}_3 \approx 60$  МВт показали существование в спектре излучения, по крайней мере, еще двух резко выделяющихся максимумов на частотах порядка  $-30$  и  $-42$  кГц. Относительно главного спектрального максимума с  $\Delta f_M = 18$  кГц ослабление второго максимума составляло  $\sim 10-15$  дБ, а третьего  $\sim 20-30$  дБ. При уменьшении мощности ВН до  $\tilde{P}_3 \approx 15$  МВт ослабление интенсивности второго максимума увеличивалось до  $20-25$  дБ, а ослабление третьего превышало  $25-30$  дБ, и он уже не обнаруживался при регистрации; при  $\tilde{P}_3 = 4$  МВт регистрировался только главный спектральный максимум. Существование сильной зависимости интенсивности этих максимумов излучения от мощности ВН может объяснить их отсутствие в наших измерениях, представленных на рис. I.

Появление спектральных максимумов более высокого порядка, чем главный спектральный максимум, отмечалось в /12, 13/ при  $f_{ВН} \approx 4$  МГц в условиях, когда  $f_{ВН}$  была близка к  $f_{OF_2}$ . Кроме того, согласно нашим предварительным измерениям на стенде "Зименки" для  $f_{ВН} \approx 4$  МГц, появление двух дополнительных максимумов здесь наблюдается и при достаточно малых мощностях ВН  $\tilde{P}_3 \approx 5$  МВт. Обнаружение таких дополнительных максимумов в структуре ИРИ в области отстроек  $\Delta f^- \approx 20-40$  кГц само по себе является чрезвычайно интересным экспериментальным фактом и нуждается в проведении дополнительных целенаправленных исследований.

Рассмотрим свойства узкополосной компоненты излучения, которая регистрируется на частотах вблизи частоты ВН<sup>\*</sup>). Существование этой компоненты излучения отмечалось ранее в работах /1, 2, 16/, где было установлено, что оно имеет наибольшую интенсивность на начальном этапе взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой еще до появления эффекта аномального ослабления. Эта компонента ИРИ характеризуется быстрым уменьшением интенсивности излучения с ростом  $\Delta f^-$  с темпом  $\sim 0,5-2$  дБ/кГц, где большая скорость ослабления соответствует меньшим отстройкам. Важным свойством этой компоненты излучения является также резкий рост ее интенсивности при  $\tilde{P}_3 \approx 10$  МВт по сравнению с более низкими уровнями

\* На рис. Iа эту компоненту излучения можно видеть на отстройках  $3 \text{ кГц} < \Delta f^- < \Delta f_{\text{min}}^-$ , где  $\Delta f_{\text{min}}^- = 3 \text{ кГц}$  — минимальная регистрируемая отстройка ИРИ для данной серии измерений.

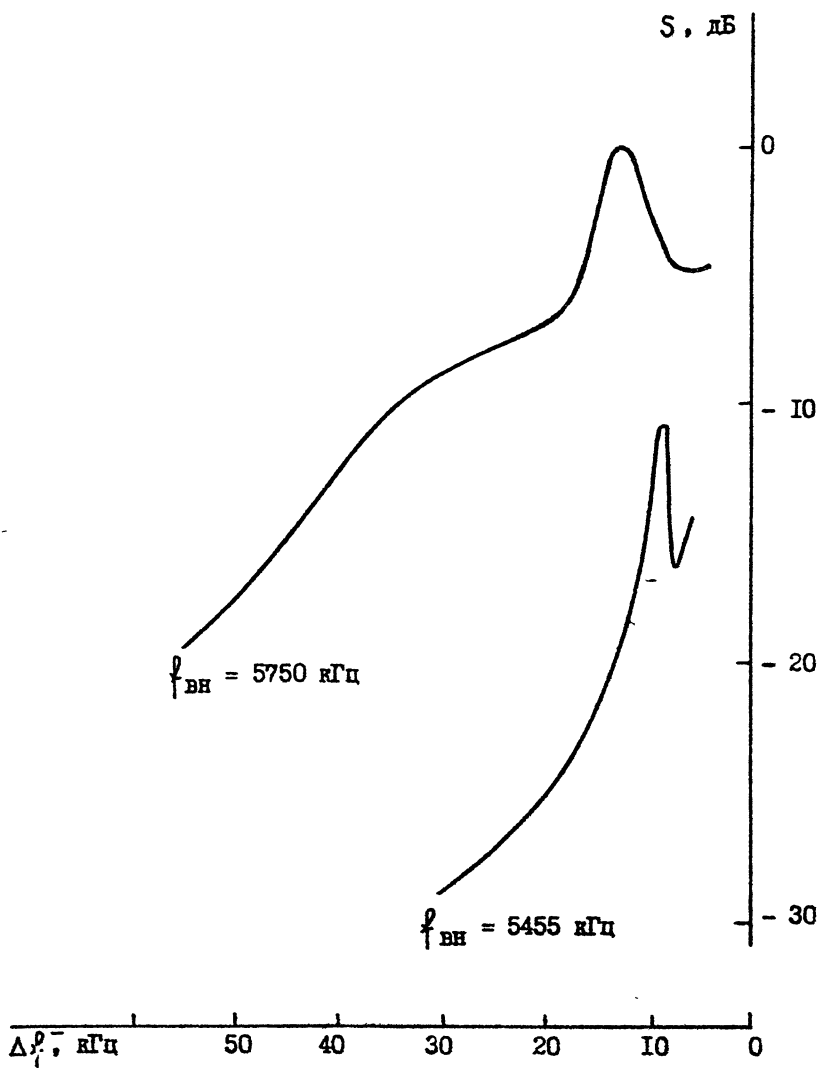
мощности ВН. Результаты, представленные на рис. 1а, позволяют оценить зависимость спектральной интенсивности этой компоненты ИРИ от частоты ВН. Если для оценок взять отстройку  $\Delta f^- = 5$  кГц, то интенсивность стационарного излучения здесь уменьшается с ростом  $f_{ВН}$  как  $f_{ВН}^{-\gamma}$ , где  $\gamma \approx 4-5$ , т.е. как и в случае широкополосной компоненты, зависимость от  $f_{ВН}$  получается очень сильной.

## 2.2. Об особенностях характеристик ИРИ на частотах ВН вблизи гармоник гирочастоты электронов

Рассмотренные выше результаты измерений относились к случаю, когда частоты ВН на уровне ее отражения в ионосфере не совпадали здесь с какой-либо гармоникой гирочастоты электронов. В случае, когда  $f_{ВН} \approx n f_{ен}$  спектр ИРИ, как показали многочисленные измерения /10-13/, претерпевает существенные изменения (например, исчезает главный спектральный максимум излучения и, наоборот, в области положительных отстроек появляется новая его компонента). Аналогичные явления наблюдались и в наших экспериментах.

На рис. 2 в качестве примера приведены спектры для двух сеансов нагрева ионосферной плазмы на частотах 5750 и 5455 кГц, проведенных с небольшим разном по времени наблюдений. Во втором случае частота ВН была близка к четвертой гармонике гирочастоты электронов на уровне ее отражения. При этом наблюдается уменьшение максимальной интенсивности излучения приблизительно на 10 дБ, сильное обужение спектра главного спектрального максимума излучения и уменьшение частоты  $\Delta f_m$  приблизительно на 3-4 кГц. Кроме того, для  $f_{ВН} = 5455$  кГц наблюдается подавление широкополосной компоненты излучения на отстройках  $\Delta f^- \approx 20-60$  кГц более, чем на 20 дБ, а также уменьшение интенсивности узкополосной компоненты ИРИ приблизительно на 10 дБ.





Р и с. 2

### 2.3. Динамика развития различных компонент ИРИ

В настоящем разделе мы проанализируем свойства различных компонент ИРИ с точки зрения корреляции их динамики с развитием эффекта аномального ослабления (АО) сигнала ВН в возмущенной области ионосферной плазмы. Мы будем использовать, в основном, результаты наших измерений на частотах ВН  $f_{ВН} \approx 4,8-5,8$  МГц, где выполнено наибольшее число такого рода исследований /1-5, 16, 18-22/. Кроме того, поскольку на динамику ИРИ существенное влияние оказывает эффект последствия от предыдущих циклов нагрева ионосферной плазмы, мы будем здесь использовать только результаты измерений после достаточно длительных (порядка нескольких минут) пауз между интервалами включения ВН.

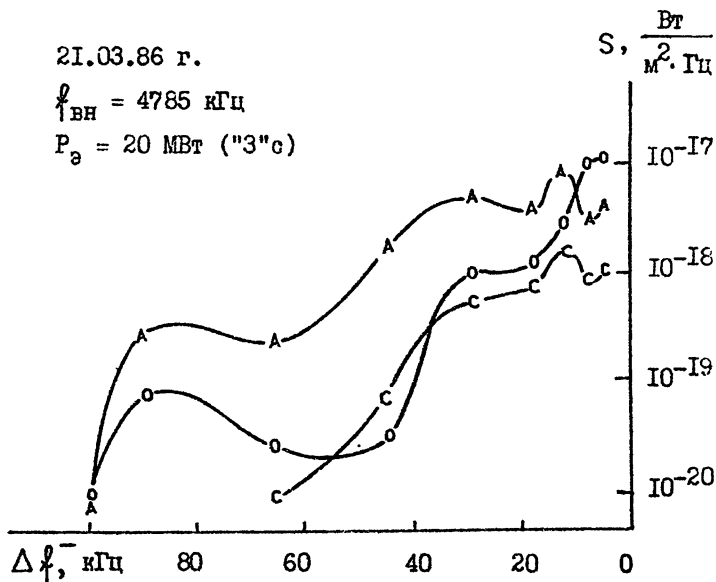
На рис.3 для  $f_{ВН} = 4785$  кГц и  $\tilde{P}_0 = 20$  МВт приведен типичный динамический спектр ИРИ в области отрицательных отстройок  $\Delta f^- = 7 \div +100$  кГц для трех его состояний, соответствующих начальной стадии развития взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой (спустя  $\Delta t = 0,2$  с после включения ВН) - индексы "0", времени развития АО на ВН ( $\Delta t = \tau_{АО} = 0,4$  с) - индексы "А" и через 5 с после начала нагрева на стадии стационарного развития мелкокомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) - индексы "С". Из рис.3 видно, что на временах  $\Delta t = 0,2$  с, когда еще не наблюдается появления МИИН, узкополосная компонента излучения имеет свою максимальную интенсивность. На этих же временах широкополосная компонента излучения на отстройках  $\Delta f^- \approx 20-40$  кГц уже достаточно хорошо развита, в то время как главный спектральный максимум на  $\Delta f^- \approx 10$  кГц еще не проявляется.

Развитие эффекта АО, сопровождающееся генерацией мелкокомасштабных ( $l_1 < 50$  м) искусственных ионосферных неоднородностей, вызывает уменьшение интенсивности узкополосной компоненты, увеличение интенсивности и расширение спектра широкополосной компоненты ИРИ, а также наиболее полное развитие излучения в области его главного спектрального максимума. На этом этапе развития взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой интегральная интенсивность ИРИ в области отрицательных отстроек имеет максимальную величину.

При переходе к стационарному развитию МИИН интенсивность излучения уменьшается по всему спектру и тем сильнее, чем больше вели-

чина отстройки  $\Delta f^-$ . При этом в стационарном спектре ИРИ сохраняются все его структурные особенности, характерные для этапа развития эффекта АО.

Рис.3 демонстрирует также существование еще одной компоненты ИРИ в области больших отрицательных отстроек  $\Delta f^- \approx 70-100$  кГц, интенсивность которой имеет значительную величину практически сразу после включения ВН, достигает максимума на временах развития АО и уменьшается затем более, чем на 20 дБ, опускаясь ниже порога обнаружения приемо-регистрирующей аппаратуры, при переходе к стадии стационарного развития искусственной турбулентности. Впервые исследование свойств этой компоненты ИРИ было проведено в /1/. В настоящей работе мы не будем проводить ее подробный анализ и ограничимся только сделанным замечанием.



Р и с. 3

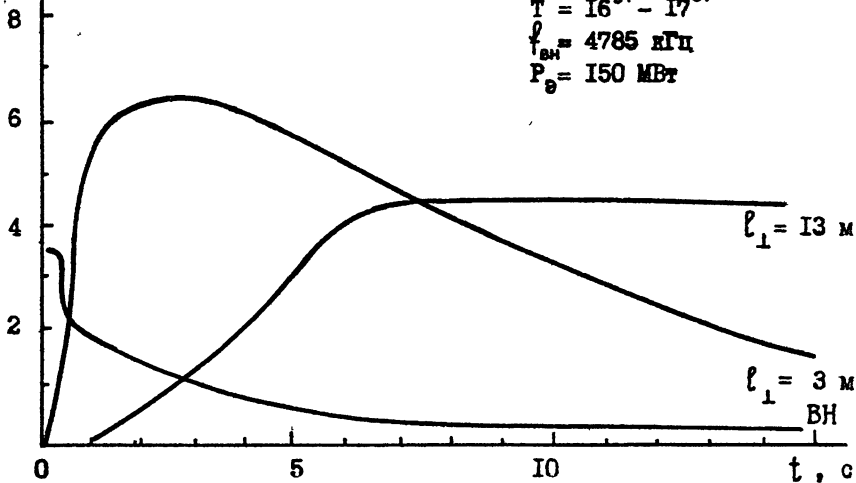
Согласно последним проведенным нами исследованиям эффекта АО и динамики МИИН различных масштабов /3, 17-22/, можно заключить, что при больших мощностях ВН  $\tilde{P}_{\varnothing} \approx 10$  МВт ( $f_{ВН} \approx 5-6$  МГц) в

развитии АО можно выделить два этапа. Первый этап характеризуется резким уменьшением интенсивности отраженного от ионосферы сигнала ВН через 0,3–0,5 с после начала воздействия. Это время коррелирует с развитием неоднородностей с  $h'_{\perp} \approx 3$  м. На втором этапе имеет место дальнейшее более плавное уменьшение интенсивности принимаемого сигнала ВН в течение нескольких секунд вместе с развитием декаметровых неоднородностей. Такую динамику АО и МИИИ демонстрирует рис. 4а, где также можно видеть, что развитие декаметровых ( $h'_{\perp} = 13$  м) неоднородностей сопровождается уменьшением интенсивности неоднородностей с  $h'_{\perp} \approx 3$  м. Последнее является важным экспериментальным фактом, который необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений ИРИ. Следует подчеркнуть, что такая динамика развития неоднородностей с  $h'_{\perp} \approx 3$  м имеет место только при достаточно больших мощностях ВН /22, 23/.

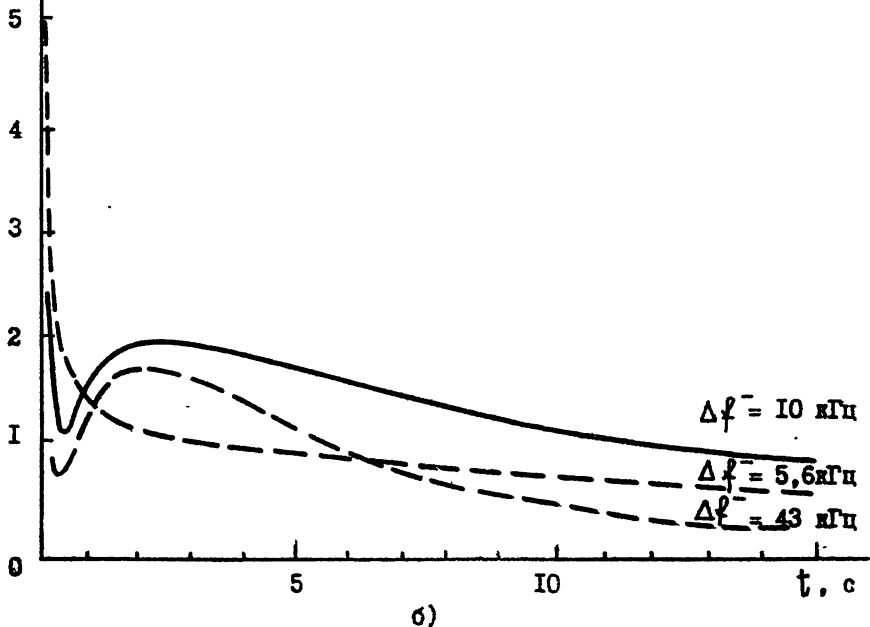
На рис. 4б для того же сеанса, который представлен на рис. 4а, показана динамика ИРИ для трех отстроек, относящихся к компоненте узкополосного излучения, сосредоточенные, в основном, на частотах, близких к частоте ВН (см.  $\Delta f^- = 5,6$  кГц), к компоненте главного спектрального максимума ИРИ (см.  $\Delta f^- = 10$  кГц) и к компоненте широкополосного излучения (см.  $\Delta f^- = 43$  кГц). Видно, что на временах  $\Delta t \approx \tau_{\text{БАО}} = 0,4$  с (БАО – быстрое АО) наблюдается быстрое уменьшение интенсивности узкополосной компоненты, проявляющееся на этих временах на всех трех представленных на рис. 4б отстройках. С развитием БАО амплитуда излучения для  $\Delta f^- = 5,6$  кГц начинает стабилизироваться и ко второй секунде воздействия (к моменту достижения неоднородностями  $h'_{\perp} = 3$  м своей максимальной интенсивности) оно практически выходит на стационарный уровень. В то же время с развитием БАО интенсивности двух других компонент начинают быстро нарастать и они достигают уровня своего максимального развития вместе с неоднородностями  $h'_{\perp} \approx 3$  м. В дальнейшем для этих двух компонент интенсивность ИРИ плавно уменьшается (как и интенсивность 3-метровых неоднородностей), причем более быстро и сильнее для излучения, отвечающего его широкополосной компоненте, по сравнению с компонентой главного спектрального максимума.

В заключение необходимо отметить, что наблюдающийся на рис. 4б временной максимум в интенсивности ИРИ для  $\Delta f^- = \Delta f_M^- \approx 10$  кГц наиболее сильно проявляется на более низких частотах ВН; для  $f_{\text{ВН}} \approx 5750$  кГц он уже слабо различим /1, 4, 5/. Нам представляется

A, ОТН. ЕД.



A, ОТН. ЕД.



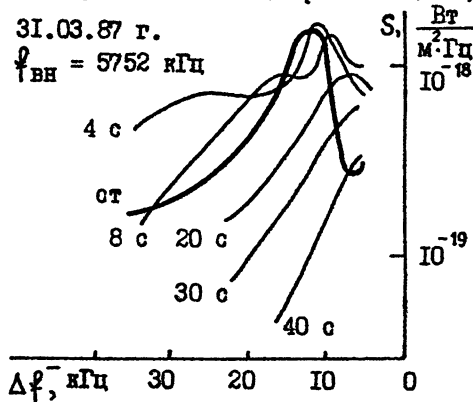
Р и с . 4

также важным отметить, что излучение на стадии развития временного максимума имеет более высокую степень зависимости от мощности ВН по сравнению с этой зависимостью для стационарного уровня развития ИРИ. Последнее отмечалось ранее в /1/.

#### 2.4. Изменение спектральных характеристик ИРИ на стадии релаксации МИИН

С целью более детального исследования влияния МИИН на генерацию ИРИ в области отрицательных отстроек нами были проведены эксперименты, когда после достаточно длительного воздействия на ионосферную плазму и установления стационарного уровня развития искусственной турбулентности передатчик нагрева переводился в режим импульсного излучения с малой длительностью посылок  $\tau_{и} \approx 15-20$  мс и большой их скважностью с  $Q \approx 20-25$ . При этом средняя мощность излучения была достаточно мала и, согласно проведенным контрольным измерениям, не оказывала существенного влияния на поддержание МИИН в возмущенной области ионосферы. Такая схема проведения измерений получила название зондирующего (диагностического) режима и была использована в работах /5, 16/. В этом режиме искусственное излучение регистрируется в течение импульса ВН. При этом считается, что изменение интенсивности и спектра ИРИ определенным образом связано с релаксацией искусственных неоднородностей. По характеру этого изменения с учетом результатов исследований релаксации МИИН /3, 17-22/ можно сделать некоторые выводы о влиянии искусственных неоднородностей на формирование различных компонент спектра ИРИ (см., например, /1, 5, 16/).

На рис.5 представлены результаты измерений спектральных характеристик ИРИ, выполненных на нагревном стенде "Гиссар" в зондирующем режиме излучения ВН /5/. Здесь индексом "СТ" отмечен его стационарный спектр после достаточно длительного воздействия на ионосферную плазму не-



прерывным излучением ВН, а индексами 4с, 8с, 20с, 30с и 40с - спектры ИРИ для зондирующего режима, соответственно, через 4, 8 и т.д. секунд после окончания непрерывного воздействия. Видно, что при переходе в зондирующий режим интенсивность широкополосной компоненты ИРИ на отстройках  $\Delta f^- = 20-40$  кГц вначале резко возрастает (см. кривую с индексом "4с"), а затем практически полностью исчезает за время  $\sim 20$  с. Согласно /5, 16/, времена роста интенсивности ИРИ здесь не превышают 1-2 с. Отметим также, что темп релаксации широкополосной компоненты ИРИ увеличивается с ростом величины отстройки. Последнее обуславливает здесь дрейф частоты максимума спектра в сторону меньших.  $\Delta f^-$  (ср. кривые "4с" и "8с").

При переходе в зондирующий режим излучения ВН в течение первых 10-20 с интенсивность ИРИ для его главного спектрального максимума практически не изменяется. Однако здесь также хорошо прослеживается его смещение в сторону меньших отстроек вместе с релаксацией МИИИ.

Спустя приблизительно 40 с после окончания непрерывного воздействия мы наблюдаем практически только узкополосную компоненту излучения вблизи  $f_{ВН}$  с характерным для нее темпом уменьшения интенсивности  $\sim 1$  дБ/кГц. Анализируя данные, представленные на рис. 5, мы также должны заключить, что ее интенсивность с переходом к зондирующему режиму в первые несколько секунд значительно возрастает по сравнению с ее стационарным уровнем.

В заключение следует отметить, что, согласно /4, 5/, при уменьшении частоты ВН от 5,75 МГц до 4,0 МГц наблюдается все большее относительное увеличение интенсивности ИРИ при переходе в зондирующий режим излучения ВН, причем возрастание интенсивности начинает регистрироваться также и на отстройках, отвечающих его главному спектральному максимуму. Кроме того, отмечается сильная зависимость динамики диагностического ИРИ от высоты отражения ВН: при изменении высоты от 280 до 180 км при всех частотах ВН в диапазоне 4-6 МГц имело место уменьшение характерных времен нарастания и спада амплитуды принимаемого излучения в 4-5 раз.

## 2.5. Влияние искусственных ионосферных неоднородностей на генерацию различных компонент ИРИ

Изучение взаимосвязи искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощным радиоизлучением вблизи уровня отражения ВН, и ИРИ имеет своей целью детальное исследование механизмов генерации различных его компонент. При этом мы интересуемся двумя аспектами проблемы: какие неоднородности способствуют генерации излучения, т.е. определяют свойства его "источника", а какие наоборот вызывают его ослабление, т.е. выступают в качестве "депрессора". Здесь возможны два пути постановки эксперимента.

В первом случае проводится непосредственное сравнение динамики роста ИРИ с развитием неоднородностей различных масштабов (см., например, рис.4).

Во втором случае измеряются характеристики диагностического ИИ на стадии релаксации искусственных ионосферных неоднородностей (см., например, рис.5). Здесь считается, что излучение коротких (диагностических) импульсов ВН для зондирования искусственной турбулентности не изменяет существенно характера релаксации искусственных неоднородностей, свойства которой считаются нам известными по результатам выполненных предварительно исследований /3, I7-22/. Таким образом, разница этих двух подходов заключается в том, что в первом случае анализируется связь неоднородностей с генерацией ИРИ на стадии развития искусственной турбулентности, а во втором - на стадии ее релаксации с некоторого уровня, достигаемого в результате воздействия в режиме "несущая".

Проанализируем более детально представленные в предыдущих разделах экспериментальные данные с точки зрения влияния развития искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов на генерацию различных компонент ИРИ.

а) Узкополосное излучение в области малых отрицательных отстроек. Эта компонента излучения обнаруживается практически сразу (через несколько миллисекунд) после включения ВН заведомо еще до появления сколь-нибудь значительного уровня МИИИ в возмущенной области ионосферы /1-3; I6/. Вместе с развитием искусственных неоднородностей с  $l_1 \approx 3$  м имеет место сильное уменьшение ее интенсивности (см. рис.4). На стадии релаксации МИИИ при использовании



зондирующего режима излучения ВН в течение приблизительно 10 с наблюдается увеличение амплитуды излучения, которая затем в течение нескольких десятков секунд плавно уменьшается до уровня, соответствующего условию воздействия на невозмущенную ионосферу. Такая динамика диагностического ИРИ может быть интерпретирована как последовательное исчезновение сначала "депрессора", а затем и "источника", усиливающего генерацию этой компоненты ИРИ. Исходя из полученных характерных времени, можно заключить, что "депрессор" для узкополосной компоненты ИРИ при стационарном уровне развития турбулентности должен определяться неоднородностями с  $h'_{1} \approx 5-10$  м, а "источник" - неоднородностями с  $h'_{1} \approx 0,1-1$  км. Полученный вывод полностью совпадает с результатами работы /16/.

Таким образом, генерация узкополосной компоненты ИРИ возможна в отсутствие искусственных неоднородностей ионосферной плазмы, однако она усиливается при наличии крупномасштабных неоднородностей с  $h'_{1} \approx 0,1-1$  км. Развитие мелкомасштабных неоднородностей вызывает подавление ее генерации, причем имеет место изменение характерного масштаба "депрессора" с  $h'_{1} \approx 3$  м на начальной стадии развития искусственной ионосферной турбулентности на  $h'_{1} \approx 10$  м при переходе к ее стационарному состоянию.

б) Главный спектральный максимум ИРИ. Его развитие, как было установлено выше (см. рис. 3, 4), совпадает по времени с генерацией неоднородностей с  $h'_{1} \approx 3$  м и появлением быстрого АО на отраженном от ионосферы сигнале ВН. Характеристики "источника" излучения, определенные с помощью диагностического ИРИ, дают времена его релаксации  $\sim 10-20$  с, и при приближении  $f_{ВН}$  к  $f_{OF_2}$  (возрастает и масштаб слоя  $L_N$ ) наблюдается, согласно /5/, их увеличение до 30-50 с. Таким образом, и в случае главного спектрального максимума излучения мы можем говорить об изменении характерного масштаба "источника" с  $h'_{1} \approx 3$  м на начальном этапе развития искусственной турбулентности на  $h'_{1} \approx 10-20$  м для ее стационарного состояния, причем, чем ближе  $f_{ВН}$  к  $f_{OF_2}$ , тем, по-видимому, все большие масштабы искусственных неоднородностей (вплоть до  $h'_{1} \approx 0,1-1$  км) влияют на усиление генерации этой компоненты ИРИ. Следует также отметить, что усиление генерации исследуемой компоненты ИРИ при приближении  $f_{ВН}$  к  $f_{OF_2}$  или в условиях развития  $F_{spread}$  отмечалось в /12, 13/.

В настоящей работе мы, в основном, ограничиваемся анализом динамики ИРИ для  $f_{ВН} = 5750$  кГц. Для такого значения частоты ВН после перехода к диагностическому режиму излучения практически не наблюдается возрастания интенсивности ИРИ для компоненты его главного спектрального максимума. Аналогичные результаты получаются и в случае  $f_{ВН} \geq 6$  МГц. Однако для более низких частот ВН ( $f_{ВН} \leq 5$  МГц) рост интенсивности излучения имеет место и тем до большего уровня, чем меньше частота ВН /5/. При этом времена релаксации "депрессора" имеют характерные значения  $\sim 5-10$  с, что позволяет связывать его с неоднородностями с  $l_1 \approx 5-10$  м. Характерные времена релаксации "источника" здесь, как и для  $f_{ВН} = 5750$  кГц, были  $\sim 10-40$  с, увеличиваясь с приближением  $f_{ВН}$  к  $f_{OF_2}$ .

В настоящее время вопрос о причинах, вызывающих смещение главного спектрального максимума в область меньших отстроек во время релаксации МИИН (см. рис. 5), остается открытым. Не исключено, что это каким-то образом может быть связано с резким изменением спектра МИИН за счет быстрой релаксации неоднородностей с  $l_1 \approx 10$  м /19-22/. Возможно, что здесь так же на динамику ИРИ может оказать существенное влияние присутствие быстро нарастающей во времени после окончания непрерывного воздействия узкополосной компоненты излучения. Особенно это должно проявляться на более низких, чем 5,75 МГц, частотах ВН. Однако, все эти вопросы требуют дополнительной более тщательной экспериментальной проверки.

в) Широкополосная компонента излучения. Формирование этой компоненты радиоизлучения наблюдается уже на временах  $t < \tau_{A0}$ , т.е. еще до появления искусственных мелкомасштабных неоднородностей. Однако ее интенсивность достигает максимальной величины одновременно с развитием неоднородностей с  $l_1 \approx 3$  м (см. рис. 3, 4), что указывает на усиление ее генерации в присутствии МИИН. Как и раньше, мы можем определить характерное время релаксации "источника", используя диагностический режим излучения ВН. По результатам наших измерений, а также работ /1, 5, 16/, это время составляет десятки секунд (до минуты и более), возрастая с увеличением длительности воздействия на ионосферную плазму. В то же время, определенное в диагностическом режиме излучения ВН характерное время релаксации "депрессора" для широкополосной компоненты ИРИ составляет 1-2 с и, следовательно, он должен определяться неоднородностями с  $l_1 = 3-$

-6 м. Таким образом, мы получили, что неоднородности, по существу, одного и того же масштаба  $l_{\perp} \approx 3$  м определяют генерацию этой компоненты ИРИ на стадии его развития и депрессию на стационаре, для которого усиление генерации необходимо уже связывать с присутствием более крупномасштабных неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 0,1-1$  км. Полученные данные полностью соответствуют результатам работы /16/.

На основе проведенного анализа можно сделать один общий вывод: в случае достаточно больших мощностей ВН ( $P_{\Sigma} \approx 5-10$  МВт) на начальной этапе развития искусственной ионосферной турбулентности динамика ИРИ в области  $\Delta f_{\perp}^{-} \leq 60$  кГц определяется, главным образом, развитием МИИН с  $l_{\perp} \approx 3$  м, в то время как для ее стационарного уровня развития - декаметровыми или еще более крупномасштабными неоднородностями с  $l_{\perp} \approx 0,1-1$  км. Такое изменение характерных масштабов МИИН, оказывающих определяющее влияние на динамику ИРИ, естественно связывать с трансформацией спектра интенсивности флуктуаций плотности плазмы  $\Phi_N(x_1)$  в процессе развития искусственной турбулентности. Как было показано в /19-22/, на временах  $t \leq \tau_{A0}$  в спектре  $\Phi_N(x_1)$  имеет место локальный максимум интенсивности флуктуаций в области масштабов  $l_{\perp} \leq 3$  м, который с развитием более крупных (декаметровых) неоднородностей исчезает. Этим, в частности, объясняется аналогичное рассмотренному выше изменение характерных масштабов МИИН, ответственных за эффект A0, с  $l_{\perp} \approx 3$  м при развитии искусственной турбулентности на  $l_{\perp} \approx 20-30$  м при ее релаксации /20, 24, 25/.

Наиболее интересным среди полученных результатов несомненно является обнаруживающееся влияние крупномасштабных неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 0,1-1$  км на генерацию различных компонент ИРИ. Следует подчеркнуть, что этот вывод был получен из сопоставления времен релаксации неоднородностей различных масштабов и свойств диагностического ИРИ. Однако, как будет отмечено в Заключение, такое сопоставление, по-видимому, не всегда правомочно, поскольку нет прямой зависимости между интенсивностью ИРИ и величиной флуктуаций плотности плазмы. Анализ полученных экспериментальных данных с этой точки зрения может привести к выводу, что наблюдаемые длинные времена жизни диагностического ИРИ связаны с медленной стадией релаксации декаметровых неоднородностей, о которой упоминается в работах /3-5, 17-19, 21/. Последнее кажется нам более вероятным, чем объяснение свойств ИРИ за счет влияния на его генерацию крупномас-

табных неоднородностей, но требует специальной экспериментальной проверки. До этих пор мы сохраняем способ пересчета масштабов неоднородностей согласно изложенной выше методике.

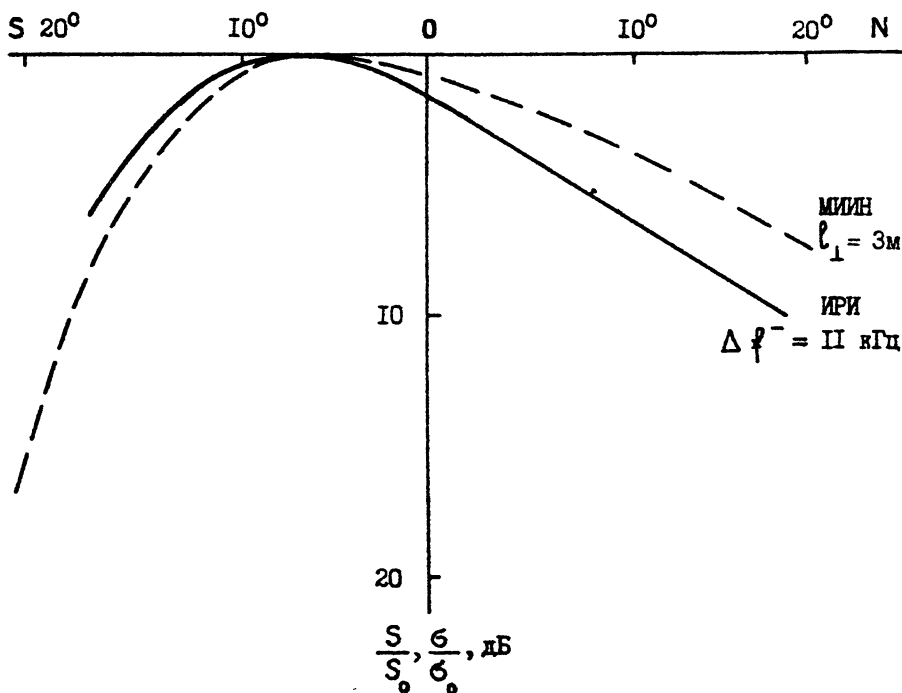
## 2.6. Зависимость характеристик ИРИ от угла между пучком мощных радиоволн и магнитным полем Земли

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что свойства искусственной ионосферной турбулентности зависят от угла между направлением распространения мощной радиоволны и геомагнитным полем  $\vec{H}_0$ . В этой связи представляет значительный интерес измерение характеристик ИРИ при различной ориентации пучка мощных радиоволн. Эти эксперименты были выполнены в марте-мае 1986 г. на нагревном стенде "Сура" с использованием синхронного режима работы передатчиков, что обеспечивало формирование узкой диаграммы направленности  $\sim 10^\circ \times 10^\circ$  ( $f_{\text{ВН}} = 4785$  кГц). Сканирование лучом антенны проводилось в плоскости геомагнитного меридиана с шагом  $4^\circ$  в интервале  $\pm 16^\circ$  от вертикали. Приведенная эффективная мощность излучения ВН в этих измерениях составляла  $\tilde{P}_3 = 20$  МВт. Интенсивность излучения измерялась во всех трех его компонентах в диапазоне отстроек  $\Delta f \approx 10-50$  кГц.

Измерения показали, что для узкополосной компоненты ИРИ не наблюдается сколь-нибудь значительной зависимости ее интенсивности от угла наклона диаграммы направленности. Для главного спектрального максимума и широкополосной компоненты ИРИ максимальная интенсивность излучения имела место при углах наклона  $\sim 4-12^\circ$  на ДГ как для максимального, так и для стационарного уровней излучения. При больших углах наклона на ДГ интенсивность ИРИ начинала быстро уменьшаться. Более плавное изменение интенсивности излучения наблюдается при переходе к северным углам наклона диаграммы и направленности антенны нагревного стенда.

На рис.6 приведены нормированные данные угловых измерений интенсивности рекурсивного рассеяния радиоволн ( $S/S_0$ ) на неоднородностях с  $l_1 \approx 3$  м/26/ и результаты наших измерений ИРИ( $S/S_0$ ) для  $\Delta f_m = -11$  кГц. Несмотря на различные условия проведения этих измерений, общий ход кривых достаточно хорошо соответствует друг

другу<sup>ж</sup>). Последнее может служить подтверждением, что генерация МИИИ в возмущенной области ионосферы оказывает определяющее влияние на формирование, по крайней мере, главного спектрального максимума и широкополосной компоненты ИРИ. Эти результаты также показывают, что при работе с широкими вертикальными пучками мощных радиоволн ( $\theta \approx 20^\circ$ ) большой вклад в суммарную интенсивность принимаемого сигнала ИРИ вносит южный край возмущенной области. Это необходимо иметь в виду при сравнении результатов различных измерений, например, динамики ИРИ и АО.



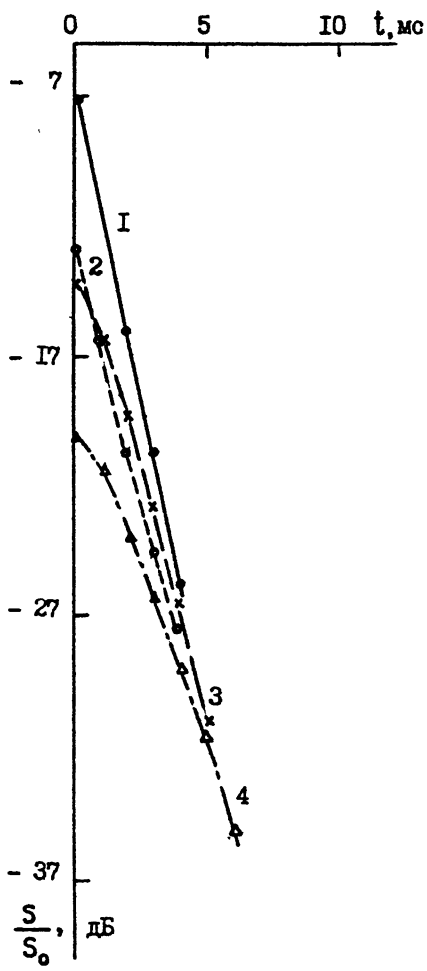
Р и с. 6.

ж) Аналогичные измерения были выполнены на нагревном стенде в Боулдере (США) при исследовании эффекта АО радиоволн [27]. В целом зависимость величины АО от угла наклона луча антенны имеет вид, показанный на рис. 6

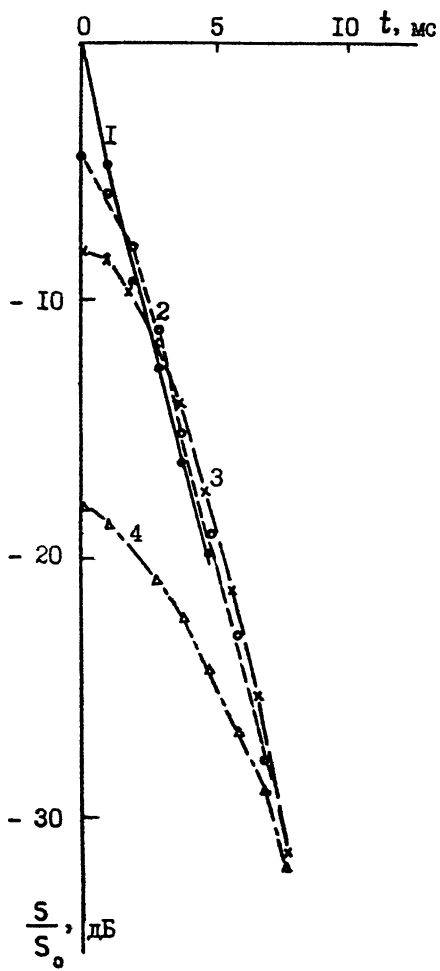
## 2.7. Исследования динамики высокочастотной плазменной турбулентности

В настоящем разделе рассматриваются результаты исследований динамики высокочастотной плазменной турбулентности, выполненных в апреле 1990 г. на нагревном стенде "Зименки". В этих экспериментах измерялись характерные времена развития и релаксации ИРИ на четырех отстройках:  $\Delta f^- = 11$  кГц (кривые с индексом 1 на рис.7), 25 кГц (с индексом 2), 35 кГц (с индексом 3) и 55 кГц (с индексом 4). В этих экспериментах частота ВН 0-поляризации составляла  $f_{ВН} = 5,750$  кГц, ее мощность  $\tilde{P}_3 \approx 3-5$  МВт. При проведении измерений для ВН был выбран режим 180 мс - излучение, 20 мс - пауза, в течение 2-3 мин с последующей длительной паузой. Такой режим воздействия позволял производить измерения характеристик развития и релаксации ИРИ каждые 200 мс в течение всего общего цикла нагрева при нарастающей интенсивности МИИИ. Последнее нам представлялось крайне важным для более детального изучения особенностей генерации ИИ. При обработке данных использовалось синхронное накопление сигналов по импульсам ВН с последующим усреднением.

На рис.7 приведены результаты измерений релаксации сигналов ИРИ во время 20 мс пауз излучения ВН для нескольких первых (после длительной паузы) импульсов цикла воздействия (а) и при стационарном уровне развития мелкомасштабной искусственной турбулентности (б). Видно, что в обоих случаях, спустя несколько миллисекунд после выключения ВН (но более медленно для стационарного уровня развития турбулентности), темп релаксации интенсивности ИРИ для всех отстроек сравнивается и имеет характерное время  $\tau_p \approx 0,8-1,3$  мс, в то время как сразу после окончания воздействия скорость релаксации излучения сильно зависит от уровня развития искусственной турбулентности, а также величины отстройки  $\Delta f^-$ . Измерения показали, что для отстроек  $\Delta f^- = 35$  и 55 кГц увеличение характерного времени релаксации ИРИ, определяемого по началу релаксации, хорошо коррелирует с ростом амплитуды излучения, имея на стадии стационарного развития турбулентности значение  $\tau_p \approx 4-5$  мс. Для отстройки  $\Delta f^- = \Delta f_m = 11$  кГц характерным является практическое постоянство величины  $\tau_p$  в течение всего цикла воздействия. Интересно отметить, что, если по данным рис.7б для  $\Delta t = 7,5$  мс (времени, когда скорость релаксации всех исследуемых компонент излучения ста-



а)



б)

Р и с . 7

новятся одинаковой) построить спектр ИРИ, то он окажется практически равномерным во всем диапазоне отстроек  $\Delta f^- = 11-55$  кГц.

Для выбранного режима излучения ВН (+180 мс, -20 мс) для стационарного уровня развития искусственной ионосферной турбулентности рост интенсивности ИРИ после начала воздействия до его максимального уровня происходил в течение 1-5 мс, причем более медленно для больших отстроек: инкремент развития составлял  $0,8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  для  $\Delta f^- \approx 50-70$  кГц и  $\sim 1,6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  для  $\Delta f^- \approx 20-30$  кГц. Для отстроек  $\Delta f^- \approx 25$  кГц после достижения своего максимального уровня интенсивность излучения несколько уменьшается, и тем сильнее чем больше величина отстройки. Эксперименты показали, что такое уменьшение интенсивности ИРИ имеет место только, когда наблюдается появление эффекта АО ВН, т.е. при развитии МИИН. Возможно, наблюдаемое нами явление имеет тесную связь с overshoot-эффектом, наблюдаемым во временной зависимости интенсивности плазменной линии, измеряемой с помощью станции некогерентного рассеяния /28-30/.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотренные свойства ИРИ в области отрицательных относительно  $f_{\text{ВН}}$  отстроек с  $\Delta f^- \approx 60$  кГц показывают, что здесь можно выделить, по крайней мере, три компоненты, которые в той или иной степени обычно присутствуют на всех стадиях развития искусственной ионосферной турбулентности. Ниже мы кратко суммируем их основные свойства и обсудим возможные модели их генерации.

#### 3.1. Узкополосная компонента излучения

Она характеризуется следующими свойствами.

а) Излучение обнаруживается практически сразу после включения ВН еще до развития МИИН в возмущенной области ионосферы.

б) Оно сосредоточено, главным образом, в области малых отрицательных отстроек, имея темп спадания с ростом  $\Delta f^- \sim 0,5-2$  дБ/кГц. Анализ имеющихся результатов показывает, что зависимость  $S(\Delta f^-)$  здесь близка к степенной:  $S \propto (\Delta f^-)^{-\delta}$ , где  $\delta \approx 2-3$ .

в) В области малых положительных отстроек излучение рассматриваемого типа, если и обнаруживается, то имеет интенсивность на 10 дБ и более слабее, чем для малых отрицательных отстроек.



г) По результатам измерений на  $f_{\text{ВН}} \approx 5$  МГц наблюдается резкое ослабление интенсивности излучения при уменьшении мощности ВН ниже 10 МВт.

д) Для стационарного состояния турбулентности наблюдается рост интенсивности этой компоненты излучения с уменьшением  $f_{\text{ВН}}$  как  $S \propto f_{\text{ВН}}^{-\gamma}$ , где  $\gamma \approx 4-5$ .

е) Развитие мелкомасштабных неоднородностей с  $l_1 \approx 3$  м приводит к сильному ( $\approx 10$  дБ) ослаблению этой компоненты ИРИ, причем это ослабление начинает регистрироваться раньше, чем появляется видимое аномальное ослабление на отраженном от ионосферы сигнале ВН. В то же время присутствие более крупномасштабных неоднородностей с  $l_1 \approx 0,1-1$  км (или декаметровых неоднородностей как отмечалось в разделе 2.5) способствует усилению генерации этого излучения.

ж) Эксперименты с наклоном диаграммы направленности антенных нагревного стенда в меридианальной плоскости в интервале углов  $\pm 16^\circ$  от вертикали не показали сколь-нибудь сильной зависимости интенсивности этой компоненты ИРИ от угла наклона.

з) Наблюдается уменьшение интенсивности этого излучения при приближении частоты ВН к гармонике гирочастоты электронов.

и) Отмечаются сильные вариации амплитуды узкополосной компоненты ИРИ от цикла к циклу воздействия в отличие от других рассматриваемых нами в настоящей работе компонент ИРИ.

Один из возможных механизмов генерации этой компоненты ИРИ был предложен в /16/, где излучение рассматривалось как результат прямой конверсии энергии ВН в плазменные волны на регулярном градиенте концентрации фоновой плазмы с последующим формированием спектра высокочастотной плазменной турбулентности в результате нелинейной перекачки энергии плазменных волн. Следует отметить, что в рамках этого механизма находит свое естественное объяснение усиление генерации излучения в присутствии крупномасштабных неоднородностей с  $l_1 \approx 0,1-1$  км, поскольку эти неоднородности могут увеличить коэффициент трансформации 0-моды в Z-моду. Однако, наблюдаемое быстрое уменьшение амплитуды излучения еще, что очень важно, до развития эффекта А0, нечувствительность интенсивности излучения к изменению угла наклона диаграммы направленности антенны нагревного стенда, высокая эффективность его генерации на низких геомагнитных широтах, присутствие этой компоненты излучения при приближении  $f_{\text{ВН}}$  к  $f_{\text{ОГ}_2}$ , а также существование некоторого поро-

вого уровня мощности ВН выше, чем порог его стрикционного само-воздействия, при превышении которой наблюдается резкое усиление его интенсивности - все это в совокупности ставит под сомнение правильность предложенного в /16/ механизма, объясняющего генерацию узкополосной компоненты ИРИ.

С учетом вышесказанного, мы предлагаем новую модель генерации узкополосной компоненты ИРИ. В основе предлагаемого механизма генерации рассматривается нелинейное рассеяние плазменных волн в электромагнитные на ионах плазмы. При этом возбуждение плазменных волн происходит в результате развития стрикционной параметрической неустойчивости мощного радиоизлучения 0-поляризации вблизи уровня его отражения.

Исследованию стрикционной параметрической неустойчивости посвящено большое число работ (см., например, /31, 32/), где применительно к ионосфере проанализированы как само развитие неустойчивости, так и спектр возбуждаемой высокочастотной плазменной турбулентности. Нелинейное рассеяние плазменных волн в электромагнитных рассматривается, например, в /33-36/.

В рамках предлагаемой модели удается легко объяснить появление этой компоненты ИРИ практически сразу после включения ВН и подавление ее с развитием МИИИ, спектральные характеристики излучения (сосредоточенность, главным образом, в области небольших отрицательных отстроек и существенно более слабое излучение в области небольших положительных отстроек), нечувствительность его к изменению в плоскости геомагнитного меридиана наклона диаграммы направленности в пределах  $\pm 16^\circ$  относительно вертикали. Сильные вариации его амплитуды от цикла к циклу воздействия, существование пороговой мощности его генерации, а также влияние на свойства этого излучения крупномасштабных неоднородностей с  $h'_{\perp} \approx 0,1-1$  км могут быть объяснены свойствами возбуждения стрикционной параметрической неустойчивости в реальных ионосферных условиях /37, 38/. Представляется весьма вероятным, что сильная зависимость от  $f_{ВН}$  пороговой мощности генерации стрикционной параметрической неустойчивости ( $P_{пор}$  (СПИ))  $\propto f_{ВН}^3$  /4, 5/ определяет и наблюдаемую сильную зависимость от  $f_{ВН}$  спектральной интенсивности ИРИ, поскольку от  $f_{ВН}$  зависят интенсивность и ширина спектра высокочастотной плазменной турбулентности /31/. Следует также отметить, что наблюдаемое появление искусственных неоднородностей с  $h'_{\perp} \leq 3$  м вблизи

уровня отражения ВН уже в первые десятки – сотни миллисекунд /24, 25/ возможно так же оказывает влияние на развитие стрикционной параметрической неустойчивости, вызывая ее подавление даже несколько раньше, чем наблюдается развитие МИИИ за счет тепловой параметрической неустойчивости. С последним может быть связано наблюдаемое нами уменьшение коэффициента стрикционного самовоздействия, спустя ~50–100 мс после начала воздействия /5/.

Кроме рассмотренных выше особенностей предложенного механизма генерации узкополосной компоненты ИРИ мы должны также иметь в виду, что при достаточно больших мощностях ВН возможно возбуждение и вынужденного ионного звука, что может привести к усилению интенсивности электромагнитного излучения /39/. Возможно с этим связано резкое увеличение интенсивности ИРИ при  $P_0 \gtrsim 10$  МВт ( $f_{ВН} = 5750$  кГц).

Таким образом, в рамках предложенного механизма находят свое объяснение все основные свойства наблюдаемой узкополосной компоненты ИРИ. Дальнейшее более точное сопоставление теории и эксперимента возможно только после детального расчета характеристик излучения на основе предложенной модели.

### 3.2. Главный спектральный максимум ИРИ

Эта компонента излучения характеризуется следующими основными свойствами.

а) Это излучение на спектре ИРИ проявляется в виде выделяющегося спектрального максимума, частота смещения которого относительно частоты ВН увеличивается с ростом  $f_{ВН}$ :  $\Delta f_M \propto f_{ВН}$ ,  $\Delta f_M = 12$  кГц для  $f_{ВН} = 5750$  кГц. Установлено, что средние зависимости  $\Delta f_M(f_{ВН})$ , полученные на высоких, средних и низких геомагнитных широтах, практически совпадают.

б) Максимальная интенсивность излучения в главном спектральном максимуме ИРИ имеет слабую зависимость от  $f_{ВН}$ , возможно несколько возрастающая с ростом  $f_{ВН}$ .

в) Наблюдается подавление этой компоненты излучения, когда частота ВН приближается к одной из гармоник гирочастоты электронов. Согласно последним измерениям группы Тиде, выполненным на станции "Сура", резонансная кривая поглощения имеет узкую полосу порядка нескольких сотен герц.

г) Эта компонента излучения обнаруживалась в экспериментах, когда  $f_{\text{ВН}}$  на 100–200 кГц превышала  $f_{\text{OF}_2}$ , что позволяет связать область ее генерации с областью верхнегибридного резонанса.

д) Формирование главного спектрального максимума излучения происходит одновременно с развитием МИИИ с  $l_1 \approx 3$  м и появлением быстрого АО на отраженном от ионосферы сигнале ВН. При этом зависимость интенсивности ИРИ от угла наклона диаграммы направленности нагревного стэнда в плоскости геомагнитного меридиана, а также ее зависимость от масштаба слоя ионосферной плазмы вблизи уровня отражения ВН полностью соответствуют аналогичным зависимостям интенсивности МИИИ.

е) На стационарной стадии развития искусственной ионосферной турбулентности определяющее влияние на генерацию рассматриваемой компоненты ИРИ оказывают уже более крупномасштабные неоднородности с  $l_1$  от 20 м до 0,1–1 км, причем с приближением  $f_{\text{ВН}}$  к  $f_{\text{OF}_2}$  больший вклад вносят все более крупномасштабные неоднородности\*. Здесь следует также подчеркнуть, что главный спектральный максимум ИРИ хорошо развивается и в условиях  $F_{\text{spread}}$ , когда другие компоненты ИРИ могут даже отсутствовать.

ж) На стадии релаксации искусственной ионосферной турбулентности, сопровождающейся наиболее быстрым затуханием неоднородностей с  $l_1 \approx 10$ –20 м, наблюдается постепенное смещение максимума излучения в сторону к  $f_{\text{ВН}}$ .

з) Во время релаксации высокочастотной плазменной турбулентности после выключения ВН характерное время уменьшения ее интенсивности остается приблизительно постоянным с  $\tau_p \approx 0,8$ –1,3 мс. Эта величина в 4–6 раз меньше времени релаксации плазменных волн за счет их столкновительного затухания и в несколько раз меньше характерного времени релаксации ИРИ с отстройками  $\Delta f \approx 30$ –60 кГц сразу после выключения ВН.

Механизм генерации главного спектрального максимума ИРИ был предложен в [12, 13], где рассмотрено появление излучения в результате распада верхнегибридной плазменной моды колебаний на электромагнитную волну и нижнегибридную моду, исходная же верхнегибрид-

---

\* Согласно замечанию, сделанному в разделе 2.5 вычисленные масштабы неоднородностей могут ок а з а т ь с я з а в ы ш е н н ы м и .

ная мода возбуждается за счет трансформации энергии ВН на МИИИ в плазменную ветвь колебаний в результате развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости /40-42/.

В рамках этого механизма легко объясняется корреляция динамики и некоторых свойств излучения с характеристиками МИИИ, подавление излучения, когда частота ВН приближается к какой-либо гармонике гирочастоты электронов, близость результатов измерений, выполненных в различных геофизических условиях. Однако в настоящее время остается неясным, чем объясняется линейная зависимость  $\Delta f_m$  от  $f_{ВН}$ , почему этот механизм генерации имеет такие низкие пороговые мощности  $P_{пор} \approx 0,5-1$  МВт, каким образом крупномасштабные неоднородности влияют на усиление его генерации, как формируется спектр этого излучения с  $\Delta f > f_{нг} \approx 7,6$  кГц.

При интерпретации экспериментальных данных, по-видимому, следует иметь в виду, что излучение в области главного спектрального максимума реально может являться суперпозицией нескольких компонент. Это со всей наглядностью продемонстрировали измерения /12, 13/, где скачкообразные изменения интенсивности ИРИ на отстройках  $\Delta f^- \approx \Delta f_m$  связывались с выключением генерации одного типа излучения. Такая сложная структура излучения может особенно сильно сказываться на свойствах его динамики.

### 3.3. Широкополосная компонента излучения

Она характеризуется следующими основными свойствами.

а) В спектре ИРИ она обнаруживается в виде широкополосного максимума в полосе частот  $\Delta f^- \approx 20-60$  кГц.

б) Она хорошо регистрируется уже спустя 0,2 с после начала воздействия еще в отсутствие значительного уровня МИИИ, однако максимального своего развития эта компонента излучения достигает вместе с генерацией неоднородностей с  $l_1 \approx 3$  м (развитием А0), имея на этих временах наиболее широкий спектр. На стационарной стадии развития турбулентности широкополосная компонента излучения чаще всего наблюдается как уплощение спектра ИРИ на отстройках  $\Delta f^- \approx 20-40$  кГц.

в) Получено, что интенсивность этого излучения резко уменьшается с ростом частоты ВН:  $S \propto f_{ВН}^{-4}$ . Это, а также уменьшение с ростом  $f_{ВН}$  ширины спектра излучения, приводит к тому, что для

наиболее высокой частоты воздействия  $f_{\text{ВН}} = 9310$  кГц максимальная спектральная интенсивность широкополосной компоненты имеет ослабление не менее 20 дБ по отношению к главному спектральному максимуму ИРИ и на его фоне практически не обнаруживается.

г) Эта компонента излучения надежно регистрируется при мощностях ВН  $P_3 \approx 10$  МВт. При меньших  $P_3$  на начальной стадии развития искусственной ионосферной турбулентности она проявляется достаточно слабо в спектре ИРИ, но хорошо выделяется на стационарной стадии.

д) Широкополосная компонента ИРИ испытывает сильное ослабление с приближением значения  $f_{\text{ВН}}$  к гармонике гирочастоты электронов, причем относительно может быть даже более сильное, чем излучение в его главном спектральном максимуме.

е) При развитии МИИН с  $l_1 \approx 3$  м наблюдается усиление генерации широкополосной компоненты излучения. В то же время для стационарного уровня турбулентности неоднородности практически этих же масштабов ( $l_1 \approx 3-6$  м) вызывают уже его депрессию, а усиление генерации здесь необходимо связывать с более крупномасштабными неоднородностями с  $l_1 \approx 20-100$  м, причем более мелкомасштабные неоднородности определяют генерацию ИРИ больших отстроек  $\Delta f^{-*}$ .

ж) Для широкополосной компоненты характерна наиболее медленная релаксация интенсивности излучения с  $\tau_p \approx 4-5$  мс на начальном этапе распада высокочастотной плазменной турбулентности с последующим уменьшением  $\tau_p$  до 1-2 мс, которое отвечает темпу релаксации главного спектрального максимума ИРИ.

В настоящее время для объяснения генерации ИРИ в диапазоне отстроек широкополосной компоненты излучения предложена модель двойной трансформации электромагнитных волн в плазменные и обратно-плазменных в электромагнитные на искусственных мелкомасштабных неоднородностях /43/. При этом широкий спектр вторичного излучения объясняется свойствами индуцированного рассеяния плазменных волн на ионах. В рамках этой модели находит свое объяснение интенсивность и ширина спектра излучения, его сосредоточенность только в области отрицательных отстроек относительно  $f_{\text{ВН}}$ , а также его связь с генерацией МИИН и развитием эффекта АО. Однако ряд свойств

---

\*) Относительно вычисленных размеров крупномасштабных неоднородностей справедливы ранее сделанные замечания.

широкополосной компоненты ИРИ не может быть объяснен с помощью этой модели. В первую очередь, это его генерация на малых временах еще до развития эффекта АО (МИИИ). Так же не ясно, чем обусловлено уменьшение интенсивности излучения на отстройках меньших, чем  $\Delta f \approx 20$  кГц. Кроме того, есть ряд вопросов, связанных с динамикой излучения, которые были поставлены еще в работе /1/.

Нам представляется важным обратить внимание на то, что на временах до развития эффекта АО существенную роль в генерации ИРИ могут играть мелкомасштабные неоднородности с  $l_{\perp} \approx 3$  м, которые могут при достаточно больших мощностях ВЧ образовываться за счет самофокусирующей неустойчивости стрикционных плазменных волн/24, 25/. Эти неоднородности развиваются вблизи уровня отражения ВЧ за времена порядка нескольких сотен миллисекунд. Вероятно такие неоднородности наблюдались также в Аресибо в экспериментах /46/. Второе, что следует иметь в виду, это возможное существование в спектре возбуждаемой высокочастотной плазменной турбулентности выделенных широкополосных линий. Указания на них можно найти в экспериментах со станциями некогерентного рассеяния, проведенных как в Аресибо /44/, так и в Тромсе /45/. По-видимому, с одной из таких вынужденных плазменных линий может быть связано формирование излучения в спектре ИРИ на отстройках  $\Delta f \approx 80-90$  кГц.

#### 4. Выводы

Рассмотренные выше результаты экспериментальных исследований позволяют выделить в области отрицательных отстроек спектра ИРИ три обычно наблюдаемых компоненты излучения и определить их свойства в зависимости от частоты и мощности ВЧ, а также от уровня развития искусственной ионосферной турбулентности. Это направление исследований являлось основной целью настоящей работы. В соответствии с поставленной задачей мы не рассматривали подробно динамику развития излучения, поскольку она носит довольно сложный характер и должна являться предметом специальных исследований, которые мы планируем выполнить в ближайшее время. Мы также ограничились областью отстроек излучения с  $\Delta f \approx 60$  кГц, т.к. именно здесь сосредоточена наибольшая интенсивность ИРИ. Сведения о других компонентах излучения, обнаруженных как в области положительных, так и отрицательных отстроек можно найти в работах /1-3, 6, 7-13/. Мы

ограничились лишь кратким рассмотрением характеристик ИРИ на стадии его релаксации с целью демонстрации, главным образом, зависимости  $\tau_p(\Delta\phi^-)$ . Полученные нами здесь другие экспериментальные данные показывают сильную зависимость свойств релаксации излучения от уровня развития искусственной ионосферной турбулентности и от режима воздействия мощным радиоизлучением на ионосферную плазму. Обнаруживается также определенная суточная и сезонная зависимости времени релаксации высокочастотной плазменной турбулентности. Однако ограниченный объем полученных данных не позволяет сделать пока надежных выводов и требуется проведение дальнейших исследований в этом направлении.

Как видно из выполненного анализа свойств ИРИ, для исследуемых трех его компонент в настоящее время не существует полностью адекватных экспериментальным данным моделей их генерации. Это, несомненно, сильно ограничивает возможности использования ИРИ в качестве диагностического метода исследования параметров ионосферной плазмы в ее естественном и возмущенном состояниях.

В экспериментальном плане нам представляется интересным проведение в дальнейшем измерений характеристик ИРИ в области частот  $f_{ВН} < 4$  МГц. Первые выполненные нами при  $f_{ВН} \approx 3$  МГц исследования показали заметное обужение спектра ИРИ, наивысшую интенсивность излучения сразу после включения ВН и низкие пороговые мощности его генерации ( $\approx 0,5$  МВт). Эти измерения показывают, что диапазон частот ВН  $f_{ВН} = 4-6$  МГц, по-видимому, является наиболее оптимальным с точки зрения генерации ИРИ.

Второй вопрос, который мы считаем не проанализирован до сих пор в полной мере, это изучение свойств ИРИ и механизмов его генерации при малых уровнях мощности ВН, когда еще не появляется видимое аномальное ослабление мощного радиоизлучения. Как показали измерения /1, 2/, в этих условиях наблюдается изменение динамики излучения (исчезает его временной максимум) и усиление степени зависимости его интенсивности от мощности ВН. Представляется, что изучение свойств этого излучения позволит более однозначно определить связь генерации ИРИ с развитием МИИИ различных масштабов. Последнее является важным моментом для понимания его природы, поскольку, как было ясно из проведенного нами в настоящей работе рассмотрен, в процессе развития искусственной ионосферной турбулентности одни и те же масштабы неоднородностей могут выступать как в роли /"источ-



ника" излучения, так и в роли его "депрессора".

Нам до конца также не ясно, с чем связано поддержание генерации ИРИ в течение длительного времени порядка нескольких десятков секунд при использовании диагностического режима излучения ВН. Непосредственное сопоставление времен релаксации диагностического ИРИ и искусственных ионосферных неоднородностей, как и в /16/, приво - дит нас к выводу о влиянии на его генерацию неоднородностей с  $l_1 \approx \approx 0,1-1$  км. Однако, неоднородности с  $l_1 > \lambda_0 \approx 50$  м ( $\lambda_0$  - длина волны ВН в вакууме) не могут участвовать прямо в процессах транс - формации поперечных электромагнитных и плазменных волн /40-42/. В то же время учет только эффектов прямой конверсии и самофокусировки мощного радиоизлучения на этих неоднородностях не объясняет, как было показано выше, всех свойств наблюдаемого излучения.

Для разъяснения этого противоречия проанализируем следую щ и й экспериментальный факт. Как показывают измерения /1, 2/, стационарная интенсивность ИРИ испытывает насыщение уже при сравнительно низких мощностях ВН  $\tilde{P}_3 \approx 5$  МВт, в то время как интенсивность МИИИ такого насыщения не испытывает и при существенно больших значениях  $\tilde{P}_3 /3, 17/$ . Поэтому нет никаких оснований для установления прямого соответствия между интенсивностью ИРИ и МИИИ. Более того, мы должны также принять, что уже достаточно слабые неоднородности способны обеспечить наблюдаемую интенсивность излучения на стационарн о й стадии его развития. В таком случае разумно допустить, что длинные времена релаксации диагностического ИРИ могут определяться медлен - ным временем релаксации неоднородностей с  $l_1 \approx 3-20$  м, переход к которому обычно наблюдается после уменьшения их интенсивности бо - лее, чем на 10 дБ /3, 18-19, 21-22/. В рамках этой гипотезы нахо - дят свое объяснение ряд других экспериментальных фактов, касающ их ся свойств динамики ИРИ. Её проверку, мы считаем, можно так же осу - ществить в экспериментах с малыми уровнями мощности ВН в диагнос - тическом режиме ее излучения.

В заключение авторы считают своим приятным долгом вырази т ь благодарность Л.М.Ерухимову и Н.А.Митякову за постоянный интерес и поддержку в работе, Г.Н.Бойко - за помощь в проведении ряда изме - рений, С.М.Грачу и С.А.Метелеву - за плодотворные дискуссии, а так - же всем сотрудникам нагревных стендов "Сура", "Зименки" и "Гиссар", работа которых обеспечила получение экспериментальных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Динамические и спектральные характеристики искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы. // Горький: Препринт № 185. - НИРФИ, 1984.
2. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Эззин В.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1985. - Т. 28, № 4. - С. 395.
3. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1987. - Т. 30, № 2. - С. 208.
4. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я., Куракин Е.П. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. - 1987. - Т. 27, № 5. - С. 758.
5. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я., Куракин Е.П. и др. Результаты экспериментальных исследований искусственной ионосферной турбулентности, полученные на нагревом стенде "Гиссар". // Препринт № 290. - Горький: НИРФИ, 1989.
6. Фролов В.Л. // Геомагнетизм и аэрномия. - 1990. - Т. 30, № 6. - С. 975.
7. Thidé B., Kopka H., Stubbe P. // Phys.Rev.Lett. - 1982. - V. 49, N 21. - P.1561.
8. Thidé B., Derblom H., Hedberg A., Kopka H., Stubbe P. // Radio Sci. - 1983. - V. 18, N 6. - P.851.
9. Stubbe P., Kopka H., Thidé B., Derblom H. // J.Geophys.Res.- 1984. - V. 89. - P.7523.
10. Leyser T.B., Thidé B., Derblom H. // Phys.Rev.Lett. - 1989. - V. 63, N 11. - P.1145.
11. Thidé B. // Physica Scripta. - 1990. - V. T30, N -. - P.170.
12. Leyser T.B., Thidé B., Derblom H. et al. // J.Geophys.Res. - 1990 ( in press ).
13. Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emission in the ionosphere, Doctoral dissertation at Uppsala University, Uppsala, Sweden, 1989.
14. Белов И.Ф., Бычков В.В. и др. Экспериментальный комплекс "Сура" для исследования искусственных возмущений ионосферы. // Препринт № 167. - Горький: НИРФИ, 1983.
15. Алимов В.А., Коровин А.В., Насыров А.М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1986. - Т. 29, № 1. - С. 115.
16. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Разумов Д.В. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1988. - Т. 31, № 11. - С. 1301.

17. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е. и др. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности. - В сб.: "Тепловые нелинейные явления в плазме". - Горький : ИИФ АН СССР. - 1979. - С.7.
18. Беленов А.Ф., Бубнов В.А., Ерухимов Л.М. и др. //Изв.вузов.Радиофизика. - 1977. - Т.20, № 2. - С.1805.
19. Беликович В.В., Ерухимов Л.М., Эозин В.А. и др. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1988. - Т.31, № 3. - С.251.
20. Фролов В.Л. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1988. - Т.31, № 10. - С.1164.
21. Беленов А.Ф., Ерухимов Л.М., Эозин В.А. и др. О динамике мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. // Горький: Препринт № 233. - НИРФИ, 1987.
22. 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.
23. Ерухимов Л.М., Эозин В.А., Комраков Г.П. и др. //Изв.вузов.Радиофизика. - 1982. - Т.25, № 7. - С.843.
24. Войко Г.Н., Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. //Геомagnetизм и аэрономия. - 1990. - Т.30, № 6. - С.998.
25. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Результаты экспериментальных исследований свойств искусственной ионосферной турбулентности на начальной стадии взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой Г-слоя ионосферы. //Препринт № 284. - Горький: НИРФИ, 1989.
26. Эозин В.А., Комраков Г.П., Насыров А.М., Стрекалов В.А. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1988. - Т.31, № 5. - С.622.
27. Allen E.M., Thome G.D., Rao P.B. // Radio Sci. - 1974. - V.9, N 11. - P.905.
28. Shown R.L., Kim D.M. // J.Geophys.Res. - 1978. - V.A83, N 2. - P.623.
29. Djuth F.T., Gonzales C.A., Ierkic H.M. // J Geophys.Res. - 1986. - V.91, N A11. - P.12089.
30. Jones T.V., Robinson T.R., Stubbe P., Корка Н. //J.Atmos. Terr.Phys. - 1986. - V.48, N 9-10.-P.1027.
31. Альбер Я.И., Кротова Э.Н., Митяков Н.А. и др. //ЖЭТФ. - 1974.- Т.66. - Вып.2. - С.574.

32. Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Д. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1975. - Т.18, № 1. - С.27.
33. Цытович В.Н. Нелинейные эффекты в плазме. - М.: Наука.- 1967.
34. Ситенко А.Г. Электромагнитные флуктуации в плазме. - Харьков: ХГУ. - 1965.
35. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме.- М.: Наука. - 1977.
36. Цытович В.Н. Теория турбулентной плазмы. - М.: Атомиздат. - 1971.
37. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. Международный симпозиум по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М.: ИЗМИРАН, 1986. /Тезисы докладов/. - С.67.
38. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М. Управление параметрами низкочастотной искусственной турбулентности и исследование процесса взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с плазмой верхней ионосферы. //Препринт № 317. - Горький: НИРФИ. - 1990.
39. Левин Б.Н., Токарев Д.В. XIV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. - М.: Наука. - 1984./Тезисы докладов/. - С.136.
40. Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Д. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1975. - Т.18, № 9. - С.1273.
41. Грач С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Д. Тепловая параметрическая неустойчивость в ионосферной плазме. : В сб.: "Тепловые нелинейные явления в плазме". - Горький : ИПФ АН СССР. - 1979. - С.46.
42. Васьков В.В., Гуревич А.В. Самофокусировочная и резонансная неустойчивости в Г-области ионосферы. - В сб.: "Тепловые нелинейные явления в плазме". - Горький: ИПФ АН СССР. - 1989. - С.81.
43. Грач С.М. //Изв.вузов. Радиофизика. - 1989. - Т.28, № 6. - С.684.
44. Kantor I.J. // J.Geophys.Res. - 1974. - V.79, N 1. - P.199.
45. Isham B., Kofman W., Hagfors T. et al. //Radio Sci. - 1990. - V.25, N 3. - P.251.
46. Noble S.T., Djuth F.T. // J.Geophys.Res. - 1990. - V.95, N A9. - P.15195.

# СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. ВВЕДЕНИЕ.....	3
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	4
2.1. Зависимость спектральных характеристик ИРИ от частоты ВН.....	4
2.2. Об особенностях характеристик ИРИ на частотах ВН вблизи гармоник гирочастоты электронов.....	8
2.3. Динамика развития различных компонент ИРИ.....	10
2.4. Изменение спектральных характеристик ИРИ на стад и и релаксации МИИИ.....	14
2.5. Влияние искусственных ионосферных неоднородностей на генерацию различных компонент ИРИ.....	16
2.6. Зависимость характеристик ИРИ от угла между пучком мощных радиоволн и магнитным полем Земли.....	20
2.7. Исследования динамики высокочастотной плазме н н о й турбулентности.....	22
3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	24
3.1. Узкополосная компонента излучения.....	24
3.2. Главный спектральный максимум ИРИ.....	27
3.3. Широкополосная компонента излучения.....	29
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
ЛИТЕРАТУРА.....	34

ON THE STRUCTURE OF STIMULATED ELECTROMAGNETIC EMISSION OF IONOSPHERIC PLASMA AT FREQUENCIES BELOW THE FREQUENCY OF PUMPING WAVE // Preprint N 324 - Nizhnij Novgorod: NIRFI, 1991. - 36 p.

The experimental results are given for the investigation of characteristics of stimulated electromagnetic emission (SEE) of the ionospheric plasma in the region of negative frequency shifts relative to the frequency of pumping wave (PW). It is shown that in the SEE structure one can isolate at least three usually observed components: narrow-band radiation observed in the region of small negative frequency shifts, a component corresponding to its downshifted maximum and wide-band radiation at frequency shifts of  $\Delta f \approx -20 - -60$  kHz. Characteristics of all SEE components have been considered depending on the frequency and power of PW, inclination angle of the antenna radiation pattern of the heating facility, the level of development of artificial ionospheric irregularities of different scales. The first results are given for measurements of time development and decay of high-frequency plasma turbulence. SEE generation peculiarities are given at frequencies of PW close to electron cyclotron harmonics. Models are considered for generation of investigated components of radio emission and their comparison are made with the experimental data available.