

П р е п р и н т № 368

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ИРИ
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ВН
МЕЖДУ ГАРМОНИКАМИ ГИРОЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОНОВ**

В.Л.Фролов, С.М.Греч, Г.П.Комраков, Е.Н.Сергеев
Научно-исследовательский радиофизический институт,
Нижний Новгород, Россия,

Т.Б.Лейзер
Институт космической физики, Кируне, Швеция,
Б.Тиде, М.Вальденвик, Е.Весзелей, С.Гудман
Институт космической физики, Уппсала, Швеция

Abstract

Experimental results concerning the spectrum of stimulated electromagnetic emissions (SEE) in the sidebands of a powerful high-frequency electromagnetic ordinary mode pump wave are presented. The pump wave was vertically injected into the ionospheric F region from the Sura ionospheric modification facility in Russia. We report detailed measurements of the commonly observed broad continuum, narrow continuum, downshifted maximum, and broad upshifted maximum emissions for pump frequencies ranging from the fourth to above the seventh electron cyclotron harmonic in the ionospheric plasma as well as observations of a new wideband emission occurring primarily in the upper sideband. The dependence of the SEE spectral structure on the pump frequency in relation to electron cyclotron harmonics is emphasized. All spectral features in the sidebands of the pump exhibit cyclotron harmonic effects. We present also measurements of the time evolution of the different SEE components and correlation between SEE development and artificial small-scale irregularities generation. Models are considered for generation of investigated SEE components and their comparison are made with the experimental data available.

І. В В Е Д Е Н И Е

Как было обнаружено в /1/, при воздействии мощным радиоизлучением 0-поляризации на плазму F-области ионосферы вблизи уровня отражения волны навачки (ВН) наблюдается генерация вторично от этого электромагнитного излучения (искусственного радиоизлучения ионосферы - ИРИ), основная доля энергии которого сосредоточена в диапазоне ± 100 кГц относительно частоты ВН. Измерения /1-10/ показали, что это излучение имеет сложную многокомпонентную структуру, свидетельствующую о параллельном развитии в возмущенной области (ВО) ионосферы различных типов неустойчивостей. Здесь важно отметить, что измерения характеристик ИРИ, выполненные в условиях высоких /1-5, 11/, средних /6, 7, 8, 10/ и низких /9, 12/ широт, дают достаточно хорошую повторяемость его основных спектральных особенностей. Последнее свидетельствует об однородности протекающих в ВО ионосферы явлений при широких (от $\sim 10^\circ$ до $\sim 45^\circ$) вариациях угла наклона вектора геомагнитного поля. С другой стороны, эти же измерения показали достаточно существенные вариации формы спектра ИРИ с изменением частоты ВН, особенно когда значение $f_{ВН}$ приближалось к одной из гармоник гирочастоты электронов /4, 5, 13, 14/. В этой связи представляют значительный интерес целенаправленные исследования вариаций спектральных характеристик ИРИ при измерениях $f_{ВН}$ в достаточно широких пределах ее значений.

Основные рассматриваемые в настоящей работе экспериментальные данные были получены во время совместных советско-шведских измерений, проведенные в сентябре 1990 и 1991 гг. на нагревом стенде "Сура", расположенном около п. Васильсурск, Россия (географические координаты стенда: $\varphi = 56^\circ$ с.ш., $\lambda \approx 44^\circ$ в.д., угол наклона геомагнитного поля $\sim 19^\circ$). В настоящей работе детальное

анализируются характеристики стационарных спектров излучения в области положительных (Δf^+) и отрицательных (Δf^-) отстроек относительно частоты ВЧ при ее изменении в диапазоне от 4,8 до 9,5 МГц (или в интервале приблизительно от 4-ой до 7-ой гармоники гирочастоты электронов, $f_{\text{гн}} \approx 1,34$ МГц). Основное внимание при этом уделялось изучению свойств наиболее мощных и постоянно присутствующих компонент ИРИ: главного спектрального максимума ($\Delta f_{\text{м}}^- \approx 10-15$ кГц), широкополосной компоненты излучения в области отрицательных отстроек ($\Delta f^- \approx 20-70$ кГц), широкополосного максимума в области положительных отстроек ($\Delta f^+ \approx 15-100$ кГц) и узкополосной компоненты излучения с $\Delta f \lesssim 7$ кГц. Измерения эволюции ИРИ и искусственных мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы были выполнены в восьмидесятые годы российской группой исследователей /6, 7, 10, 15/, данные этих исследований частично использованы в работе для более полного описания свойств различных компонент излучения.

Измерения стационарных спектров ИРИ проводились с помощью спектроанализатора HP 3585A, как правило, в дневные часы, когда отражение мощной радиоволны происходило на высотах F-области ионосферы ($h \approx 200-250$ км). В этих экспериментах использовался "синхронный" режим излучения трех секций стенда "Сура" с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = P_0 G \approx 150-300$ МВт. При этом плотность потока энергии в максимуме диаграммы направленности антенны составляла $\sim 0,6$ МВт/м² на высоте $h = 200$ км при условии пренебрежения линейным поглощением радиоволн в нижних слоях ионосферы, которое днем обычно составляло 5-7 дБ. При исследовании вариаций стационарных спектров ИРИ использовался режим ступенчатого изменения частоты ВЧ с шагом $\delta f \approx 5-20$ кГц в полосе частот передатчика ~ 100 кГц при непрерывном режиме ее излучения. После завершения измерений радиопередатчики стенда выключались на 5-10 мин. Во время этой паузы происходила их перестройка на новую среднюю частоту излучения. Перед началом следующего цикла измерений в течение нескольких минут осуществлялось воздействие на ионосферную плазму на новой частоте ВЧ с целью установления стационарных условий генерации искусственной турбулентности. При исследовании динамики ИРИ нами, как правило, использовались режимы с короткими (до нескольких десятков секунд) импульсами излучения ВЧ при достаточно длительных (порядка нескольких минут) паузах между ними,

когда можно было пренебречь эффектами последствия от предыдущего цикла воздействия на ионосферную плазму. Последнее позволяло более точно определить связь динамики ИРИ с развитием искусственных неоднородностей различных масштабов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения сначала на нагревном стенде "Тромсё" /4, 13/, а затем на стенде "Сура" /14, 16/ показали, что в узкой области частот ВЧ около гармоник гирочастоты электронов (исследования проводились вблизи гармоник с $n = 3...7$) в области отрицательных отстроек, наблюдается подавление интенсивности главного спектрального максимума и широкополосной компоненты излучения, сопровождающееся появлением широкополосного максимума (ШМ) в области положительных отстроек (так называемого ВИМ - broad upshifted maximum), причем полное подавление главного спектрального максимума наблюдается в очень узкой полосе частот $\sim 0,1-5$ кГц в зависимости от номера гармоники /10/, в то время как подавление широкополосной компоненты ИРИ и наоборот появление ШМ регистрируется в полосе в несколько десятков кГц.

В настоящей работе наиболее подробно исследуется поведение ИРИ вблизи 5 и 6 гармоник гирочастоты электронов, поскольку измерения здесь выполнялись в условиях дневной стабильной ионосферы. Меньше измерений удалось провести вблизи седьмой гармоники и они практически отсутствовали вблизи $4 f_{ce}$. Тем не менее, полученные экспериментальные данные позволяют выявить ряд общих закономерностей в изменениях стационарных спектров ИРИ.

Как уже указывалось выше, в работе /14/ было детально проанализировано изменение спектральных характеристик излучения в области главного спектрального максимума. Поэтому ниже наибольшее внимание уделяется анализу свойств ИРИ для его широкополосной компоненты в области отрицательных отстроек ($\Delta f^- \approx 20-70$ кГц) и широкополосного максимума в области положительных отстроек ($\Delta f^+ = 10-100$ кГц), т.к. именно эти компоненты излучения показывают наибольшую свою изменчивость при приближении f_{en} к гармонике гирочастоты электронов.

2.1. Вариации спектральных характеристик широкополосной компоненты ИРИ

Широкополосное излучение (ШИ) в области отрицательных отстройек относительно $f_{вн}$ (или continuous согласно классификации /3/), является обычно присутствующей компонентой в спектре ИРИ. Она занимает интервал отстроек от $\Delta f^- \approx 10-20$ кГц до $\sim 40-150$ кГц, имея сильную зависимость своих спектральных характеристик от $f_{вн}$ /9, 10/.

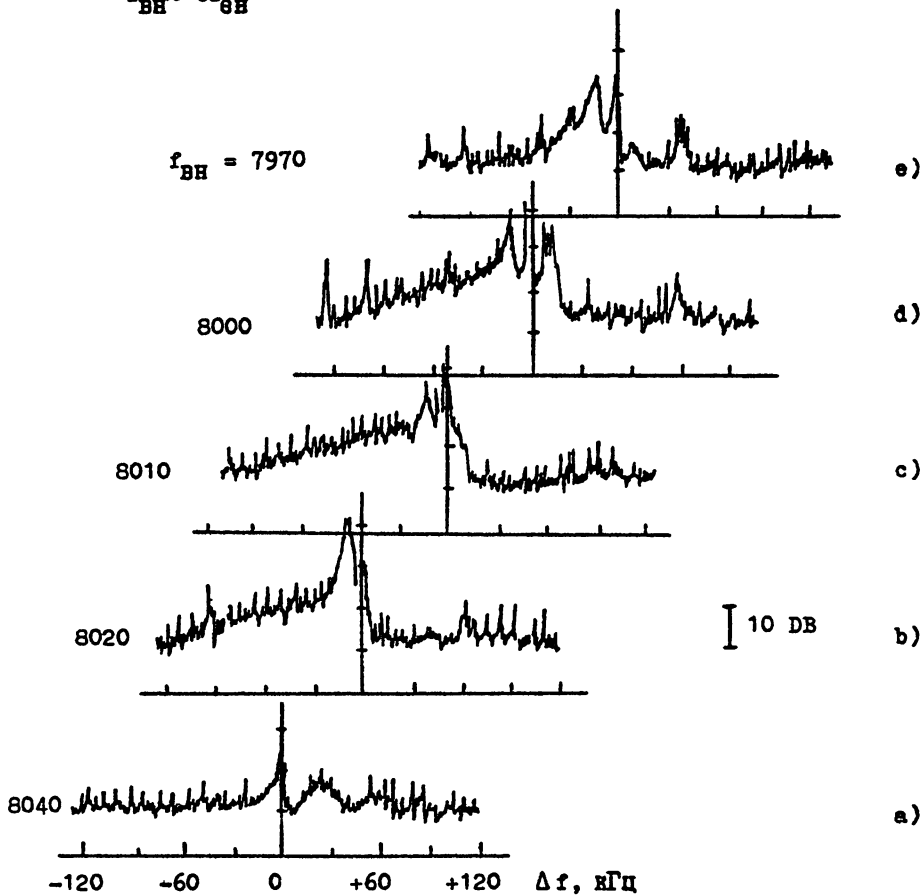
Рассмотрим рис.1, где приведена серия последовательно снятых спектров, когда частота ВН уменьшалась ступеньками с шагом 10 кГц вниз от 6 гармоника гирочастоты электронов ($6f_{ен} \approx 8,040$ кГц). Совпадение $f_{вн}$ с гирогармоникой идентифицировалось по сильному ослаблению излучения в области главного спектрального максимума m в ($\Delta f^- = 13$ кГц), подавлению ШИ и наличию широкополосного максимума (ШМ) в области положительных отстроек с $\Delta f_{max}^+ \approx 25$ кГц (см.рис. 1а)*. Уже при уменьшении частоты ВН на 10 кГц относительно резонансной частоты ШИ хорошо регистрируется в области отстроек $\Delta f^- = 30-120$ кГц, хотя и остается еще достаточно слабым. Видно, что с уменьшением $f_{вн}$ ниже $6f_{ен}$ наблюдается провал и е ШМ в области положительных отстроек. При уменьшении $f_{вн}$ до значения 8020 кГц интенсивность ШИ заметно увеличивается (рис.1б), и эта компонента имеет наибольшую интенсивность с образованием плато для $\Delta f^- = 20-60$ кГц при уменьшении $f_{вн}$ на ≈ 30 кГц относительно резонансной частоты (см.рис.1с, где $f_{вн} = 8010$ кГц). При дальнейшем уменьшении $f_{вн}$ спектр ШИ начинает быстро обужаться, и для $f_{вн} \approx 7970$ кГц (отстройки от резонансной частоты ≥ 50 кГц) ширина этой компоненты излучения не превышает 45 кГц (см.рис.1е). Отметим, что при изменении $f_{вн}$ в диапазоне 8020-7970 кГц интенсивность главного спектрального максимума излучения ($\Delta f^- \approx 13$ кГц) испытывает достаточно слабые вариации.

Таким образом, полса частот ВН, где наблюдается усиление ШИ около 6 гармоника гирочастоты электронов, не превышает 20 - 30 кГц с максимальным усилением его интенсивности при смещении частоты

*). Здесь спектральные пики в области отстроек $\Delta f^- = 25-35$ кГц являются сигналами радиостанций, попавших в полосу приема спектроанализатора. На следующих спектрах они смещаются вправо в такт с изменением центральной частоты приемника.

23.09.91

$$f_{\text{BH}} \approx 6f_{\text{BH}}$$



Р и с. I

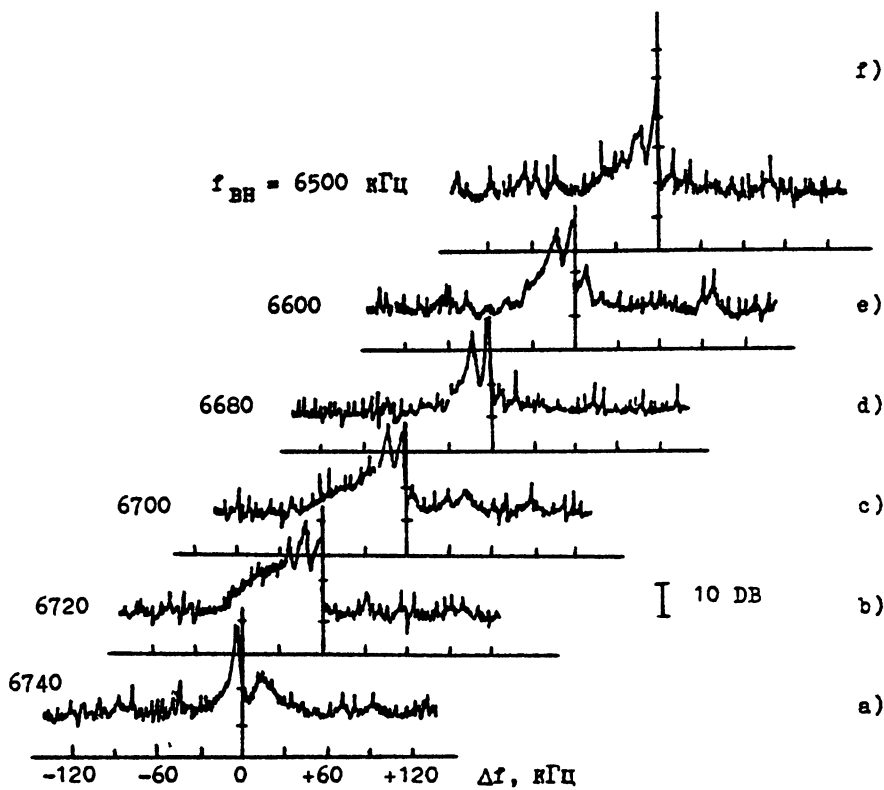
ты ВН приблизительно на 30 кГц вниз от значения $6f_{ен} = 8040$ кГц.

Следует заметить, что усиление ШИ вблизи шестой гармоник и в частоты ВН с образованием плато в области отстройек $\Delta f \approx 20-40$ кГц наблюдалось также в области частот $f_{вн} = 7620-7680$ кГц, т.е. приблизительно на 400 кГц ниже резонансной частоты $6f_{ен}$. К сожалению в интервале частот ВН между 7680 и 7860 кГц, а также и же 7620 кГц измерения не проводились.

Аналогичные результаты были получены при исследовании характеристик излучения вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов. На рис.2 представлена серия спектров ИРИ для $f_{вн} \leq 5f_{ен} = 6740$ кГц. Здесь, как и раньше, совпадение значения $f_{вн}$ с $5f_{ен}$ определялось по исчезновению ШИ и главного спектрального максимума в области отрицательных отстроек и появлению ШИМ в области положительных (см. рис.2а). Наиболее мощное излучение в области ШИ с образованием плато для $\Delta f = 30-50$ кГц здесь имеет место при уменьшении $f_{вн}$ на 10-30 кГц ниже значения $5f_{ен}$ (см.рис.2в). При дальнейшем уменьшении $f_{вн}$ спектр ИРИ обужается и при $5f_{ен} - f_{вн} \geq 60$ кГц он приобретает практически треугольную форму, простираясь в область отрицательных отстроек до $\Delta f \approx 40-60$ кГц (см.рис.2а, в, г).

Повторное усиление интенсивности широкополосной компоненты излучения в области между четвертой и пятой гармониками наблюдается в интервале частот ВН $f_{вн} \approx 5,6+5,9$ МГц. Это можно видеть из рис.3; где приведены стационарные спектры ИРИ для нескольких частот ВН в диапазоне 4785-5828 кГц для вечерних (большие эффективные мощности излучения ВН, рис.3а) и дневных (малые мощности, рис.3в) сеансов наблюдений. Здесь наиболее широкие спектры ИРИ были получены для $f_{вн} \approx 5,6+5,8$ МГц. В диапазоне частот $f_{вн} \approx 5,0 + 5,5$ МГц с уменьшением $f_{вн}$ происходит обужение спектра излучения за счет ослабления его широкополосной компоненты при приближении $f_{вн}$ к $4f_{ен}$ (см.рис.3в, $f_{вн} = 5300$ кГц). На частотах $f_{вн} < 5,0$ МГц наблюдается вновь расширение спектра излучения. Отмечается, что при больших мощностях ВН $P_{э} \geq 50$ МВт спектр ИРИ на частоте $f_{вн} = 4785$ кГц может расширяться настолько, что оказывается подобен спектру на частоте $f_{вн} \approx 5,8$ МГц (см./10/). Из данных, представленных на рис.3, можно также заключить, что наиболее мощное излучение в области положительных отстроек, прилегающих к $f_{вн}$, регистрируется при более мощной широкополосной компоненте излучения.

$$f_{BH} \approx 5f_{\Theta H}$$



Ф и с. 2

24.09.91

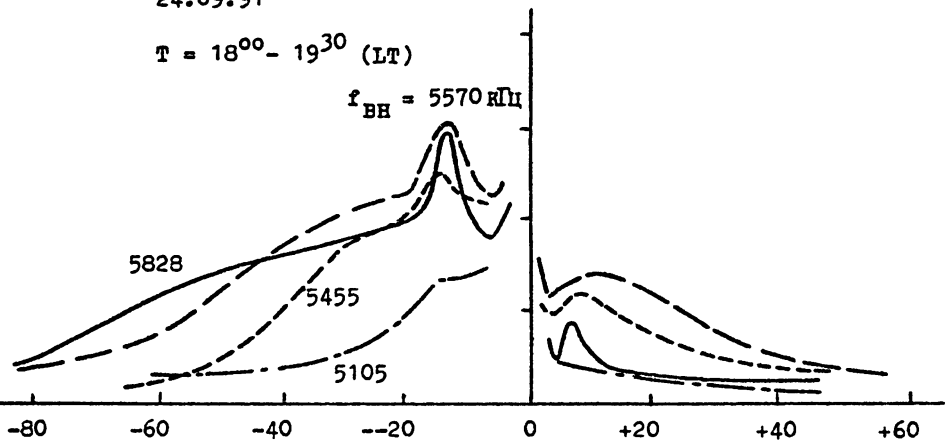
$T = 18^{00} - 19^{30}$ (LT)

$f_{BH} = 5570$ кГц

5828

5455

5105



a)

24.09.91

$T = 12^{45} - 13^{51}$

$f_{BH} = 5828$ кГц

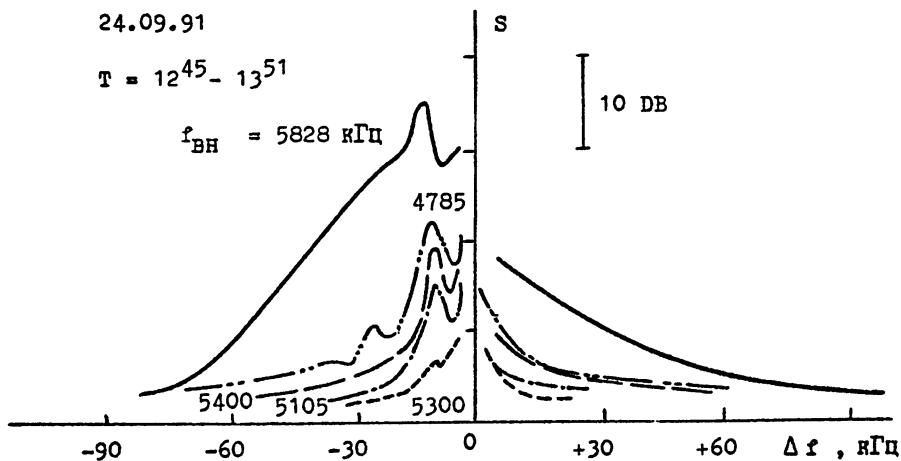
4785

5400

5105

5300

10 DB



b)

Р и с. 3

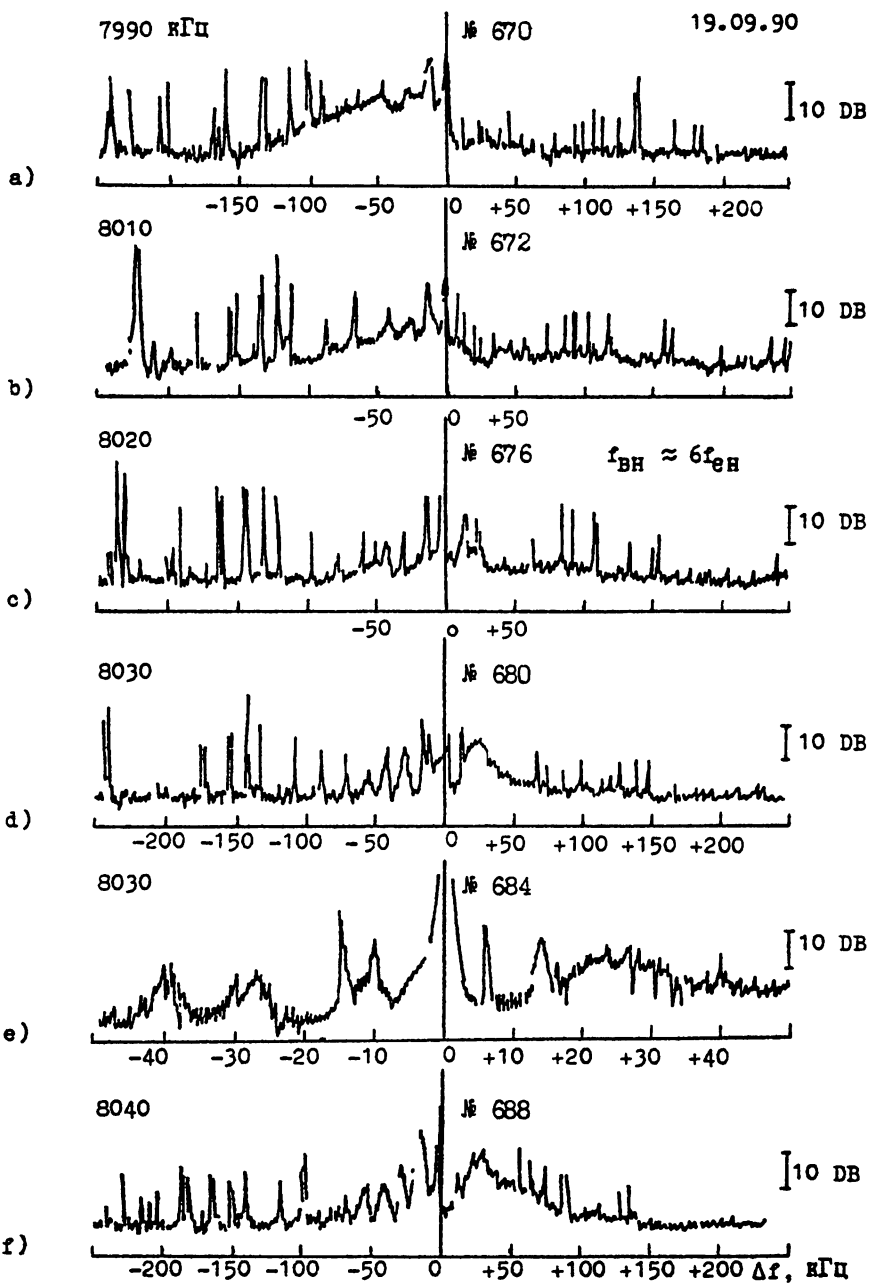
К сожалению более детальные исследования стационарных спектров ИРИ в диапазоне частот $f_{\text{вн}} < 5 f_{\text{ен}}$ в рассматриваемых циклах измерений провести не удалось.

Проследим более детально изменение формы спектра ИРИ при переходе частоты НН через гармонику гирочастоты электронов. Эти данные представлены на рис.4 для случая, когда $f_{\text{вн}} \approx 6 f_{\text{ен}} = 8020$ кГц. При $f_{\text{вн}} = 7990$ кГц (рис.4а) наблюдается отмеченное выше усиление ШИ. Однако здесь кроме главного спектрального максимума с $\Delta f_{\text{м}}^- = 11$ кГц на спектре излучения хорошо выделяются также дополнительные максимумы интенсивности ИРИ на частотах $\Delta f_{\text{м}}^- \approx 29$ и ≈ 48 кГц^{*)}. Важно, что контрастность этих максимумов усиливается при приближении значения $f_{\text{вн}}$ к $6 f_{\text{ен}}$, причем это усиление происходит за счет увеличения глубины провалов в интенсивности излучения. В области $f_{\text{вн}} > 6 f_{\text{ен}}$ (см.рис.4а, г) интенсивность излучения в провалах между максимумами остается близкой к уровню шумов аппаратуры в то время как интенсивность излучения в максимумах близка к интенсивности излучения на соответствующих расстройках $\Delta f_{\text{м}}^-$ для $f_{\text{вн}} = 8010$ кГц и только на 3-5 дБ меньше интенсивности ШИ для $f_{\text{вн}} = 7990$ кГц, где наблюдается ее наибольшее усиление. Представленные на рис.4 результаты измерений позволяют говорить нам о проявлении в спектре ИРИ нескольких практически эквидистантно расположенных полос поглощения излучения с центральными частотами для данного сеанса наблюдений $\Delta f_{\text{м}}^- = 20, 34, 49$ и 65 кГц^{**)}.

Рассмотрим представленный на рис.4е спектр ИРИ для $f_{\text{вн}} = 8030$ кГц, который был снят с более высоким частотным разрешением, чем для рис.4 д. Здесь отчетливо виден эффект расщепления главного спектрального максимума за счет уменьшения интенсивности излучения в диапазоне расстройк $\Delta f_{\text{м}}^- = 11,5+14,5$ кГц. В свете выше-

*) Аналогичные максимумы излучения можно видеть на рис.1 f и на рис.2 в, с, д.

**) Вообще говоря, форму спектра ИРИ можно рассматривать как последовательность эквидистантно расположенных максимумов, как это предполагалось, например, в работе /3/. Однако, как указано выше, при изменении значения $f_{\text{вн}}$ в спектре излучения изменяется именно глубина провалов между максимумами, а их интенсивности остаются приблизительно постоянными. Поэтому более вероятно, что здесь имеет место проявление практически эквидистантно расположенных полос поглощения излучения.

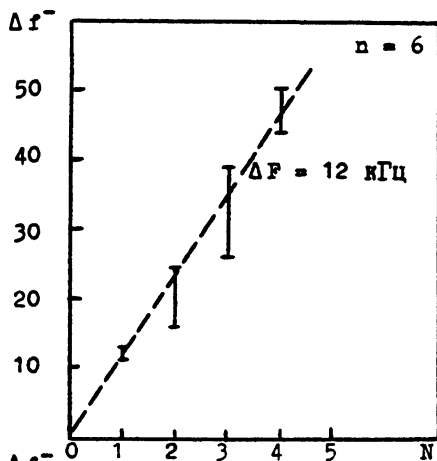


сказанного, такое локальное по частоте уменьшение интенсивности ИРИ можно также рассматривать как проявление первой в ряду частот полосы поглощения излучения. На рис.5а вертикальными отрезками и показаны интервалы частот поглощения в зависимости от номера линии N . Видно, что с достаточно хорошей степенью точности имеет место линейное увеличение средней частоты диапазона линий поглощения с ростом их номера со средним расстоянием между линиями $\Delta f \approx 12$ кГц.

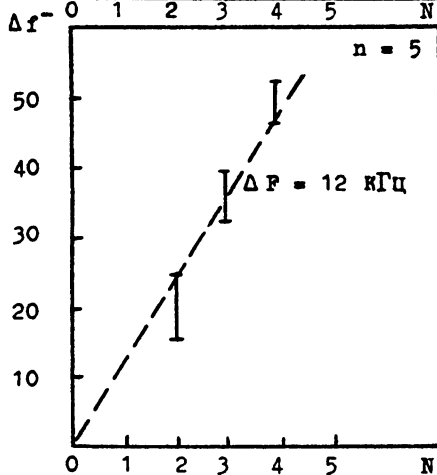
Существование аналогичных линий поглощения в спектре ИРИ было зарегистрировано также при работе вблизи пятой (см.рис.5в) и седьмой (см.рис.5с) гармоник гирочастоты электронов. Важно, что во всех случаях расстояние между средними частотами линий поглощения Δf было близко к 12 кГц. Эта зависимость на рис.5 отмечена пунктирными линиями. Дополнительно следует отметить, что по измерениям в Тромсё /5/ на частотах 4,04 и 5,363 МГц первая линия поглощения имеет частотный сдвиг относительно $f_{вн} \sim 7,5+8$ кГц, вторая ~ 15 кГц и третья $\sim 20+25$ кГц, т.е. среднее расстояние между линиями здесь $\approx 7,5+8$ кГц, что заметно меньше, чем в нашем случае.

Согласно проведенным исследованиям, проявление линий поглощения наблюдается при частотах ВН на 100 кГц и более, превышающих гармонику гирочастоты электронов. Из рис.6, где приведены результаты измерений вблизи пятой гармоники ($5f_{ен} \approx 6690$ кГц), видно, что с увеличением значений $f_{вн}$ контрастность второго максимума уменьшается и спектр ИРИ в области ШИ принимает все более обычную экспоненциальную зависимость типа $I \propto e^{-\Delta f / \Delta f}$ (треугольная форма спектра при логарифмическом масштабе по оси интенсивности). Из рис.6 можно сделать также еще один важный вывод: центральная частота полосы поглощения с $N = 2$ увеличивается от 17,5 до 24 кГц при увеличении расстройки относительно резонанса от 10 до 150 кГц, причем этот рост носит нелинейный характер с проявлением эффекта насыщения с увеличением значения $f_{вн}$. Такой характер зависимости имел место и при измерениях вблизи других гармоник гирочастоты электронов.

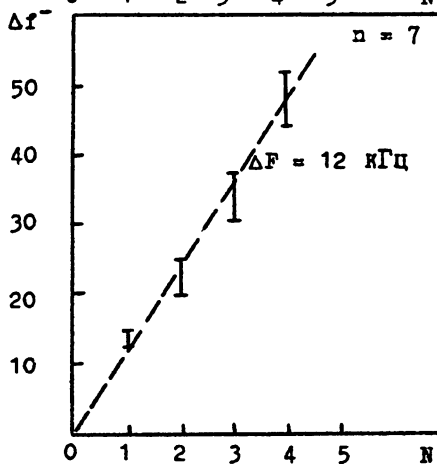
Таким образом, при приближении сверху к какой-либо гармонике гирочастоты электронов ($f_{вн} > n f_{ен}$) вместе с появлением широкополосного максимума излучения в области положительных отстроек относительно $f_{вн}$ наблюдается появление линий поглощения в



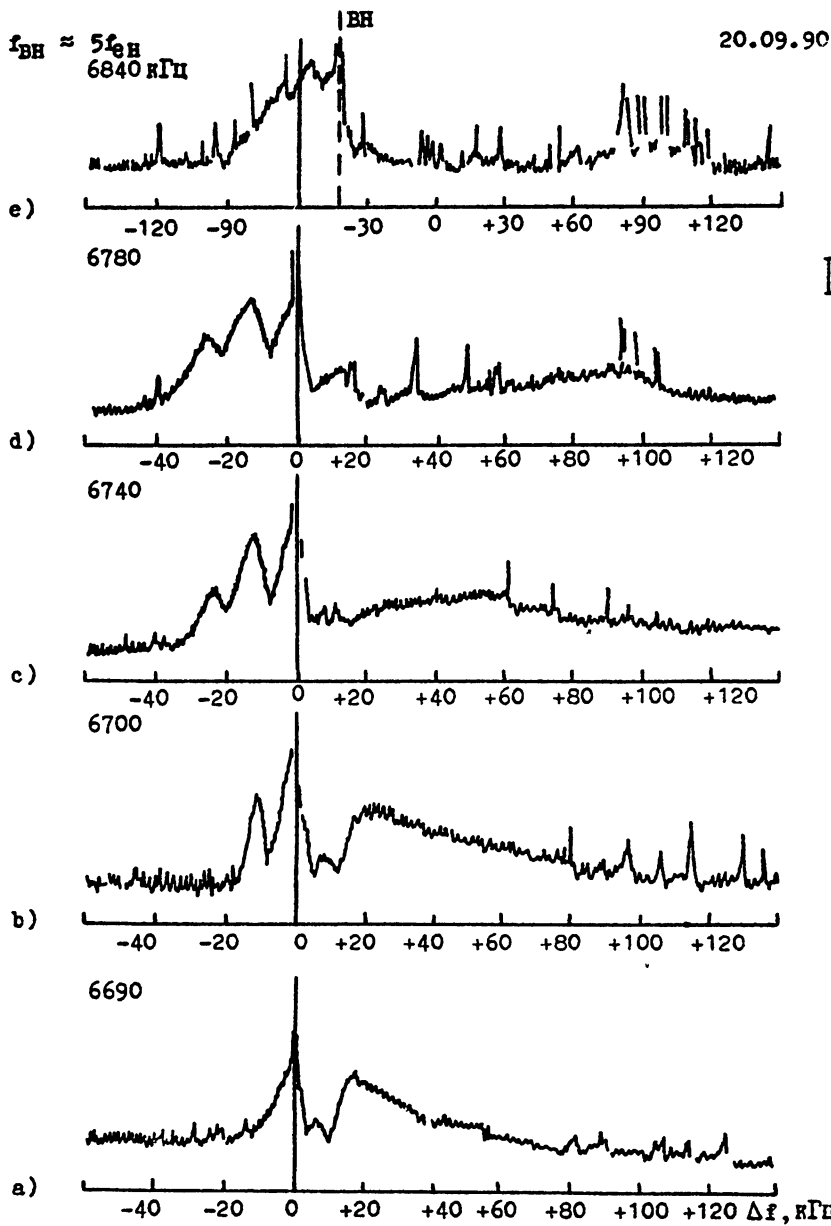
a)



b)



c)



Р и с. 6

спектре ИРИ для $\Delta f < 0$, которые усиливаются с уменьшением разности $f_{вн} - n f_{ен}$. При этом спектр излучения приобретает форму практически эквидистантно расположенных максимумов, огибающая амплитуды которых повторяет форму спектра ИРИ при $f_{вн}$ немного меньше $n f_{ен}$, где эти линии поглощения проявляются лишь в виде слабых вариаций интенсивности излучения. Непосредственно вблизи и эи самого резонанса $f_{вн} = n f_{ен}$ ШИ оказывается сильно подавленными и в спектре излучения в области отрицательных отстроек остается только один его главный спектральный максимум, на фоне которого может обнаруживаться первая линия поглощения. Не вдаваясь в подробности, здесь следует отметить, что появление провала интенсивности в области главного спектрального максимума сопровождается появлением дополнительного максимума излучения на симметричной положительной отстройке, как это можно видеть, например, на рис. 4 д, е для $\Delta f^+ \approx 15$ кГц.

В заключение следует заметить, что наблюдается усиление зависимости интенсивности ИРИ от мощности НН с ростом номера максимума излучения (с ростом Δf^-), как это имеет место в случае ШИ при измерениях далеко от гармоник гирорезонанса /6/.

В свете всего вышесказанного можно считать, что максимумы интенсивности для отрицательных отстроек спектра ИРИ более высокого порядка, чем главный спектральный максимум, есть остаток широкополосной компоненты излучения, ослабленной за счет дискретных линий поглощения. Такая модель спектра ИРИ представляется нам более предпочтительной по сравнению с моделью генерации чередующихся максимумов излучения, поскольку именно провалы в спектре отрицательных отстроек ИРИ показывают свою более сильную изменчивость при изменении значений $f_{вн}$ по сравнению с интенсивностью максимумов излучения.

2.2. Характеристики широкополосного максимума излучения в области положительных отстроек

Ранее в экспериментах на стенде "Тромсе" измерения характеристик широкополосного максимума (ШМ, ВМ по классификации /3/) были выполнены вблизи 3, 4 и 5 гармоник гирочастоты электронов в /2-5/. Аналогичные измерения были повторены на стенде "Сура" для более высоких частот ВН вблизи 4, 5, 6 и 7 гармоник $f_{ен}$. Ниже мы рассмотрим полученные результаты.

Измерение спектральных характеристик ПМ при увеличении значения частоты ВН выше резонансной частоты можно видеть на рис. 6. Здесь на панели (а) показан спектр ИРИ для частоты ВН $f_{\text{ВН}} = 6690$ кГц, наиболее близкой к 5 гармонике гирорезонанса. Он характеризуется практически полным исчезновением сигнала в области главного спектрального максимума и широкополосной компоненты излучения ($\Delta f_{\text{шм}} \approx 15$ кГц) в диапазоне отрицательных отстроек и присутствием широкополосного максимума в области положительных отстроек. Видно, что с ростом значения $f_{\text{ВН}}$ величина отстройки частоты, отвечающей максимальной интенсивности сигнала $\Delta f_{\text{шм}}$, увеличивается: $\Delta f_{\text{шм}} \approx 18, 22, 55$ и 90 кГц, соответственно, для $f_{\text{ВН}} = 6690, 6700, 6740$ и 6780 кГц. Одновременно с этим уменьшается его интенсивность в максимуме спектра излучения и возрастает ширина полосы сигнала.

Аналогичные результаты были получены и при работе вблизи других гармоник гирочастоты электронов (см., например, рис. 4 для $f_{\text{ВН}} \approx 6 f_{\text{ен}}$), и, в целом, они хорошо соответствуют данным измерениям на стенде "Тромсе".

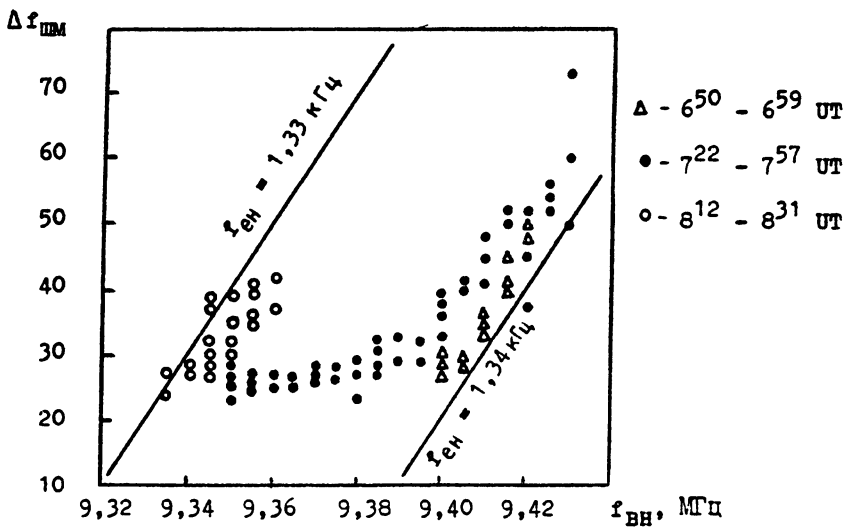
На рис. 7 приведены результаты обработки трех циклов измерения зависимости $\Delta f_{\text{шм}}$ от $f_{\text{ВН}}$, когда стенд работал в режиме I мин-нагрев, I мин-пауза, а частота ВН изменялась во время паузы с шагом 5 кГц в интервале $f_{\text{ВН}}$ от 9335 кГц до 9430 кГц ($f_{\text{ВН}} \approx 7 f_{\text{ен}}$). Различные циклы измерений помечены на рисунке различными маркерами*). Наклонные пунктирные линии на рисунке отвечают зависимости и

$$2 f_{\text{ВН}} = f_{\text{шм}} + 7 f_{\text{ен}}$$

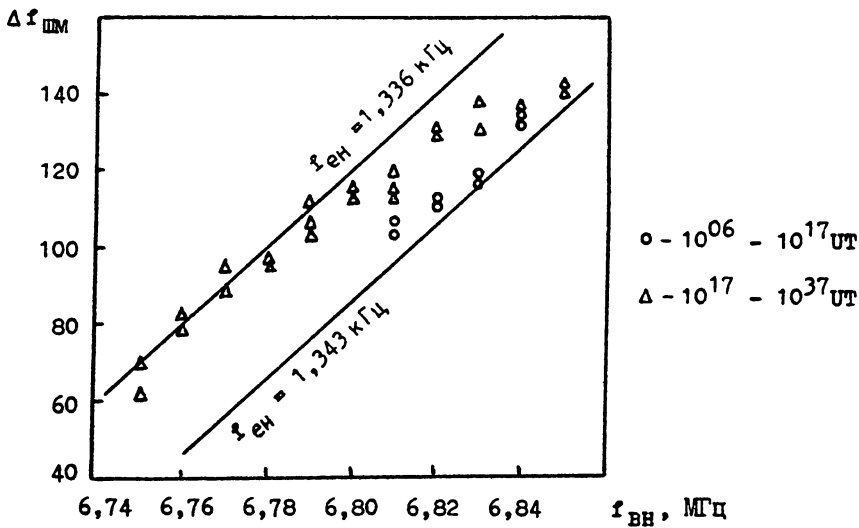
для двух несколько отличных значений $f_{\text{ен}}$: 1,33 и 1,34 МГц. Видно, что в первом цикле измерений экспериментальные данные лучше соответствуют величине $f_{\text{ен}} = 1,34$ МГц; значение $f_{\text{ен}}$ изменяется от $\approx 1,34$ МГц до $\approx 1,33$ МГц во время второго цикла измерений, и оно $\approx 1,33$ МГц для третьего цикла. Это объясняется увеличением высоты отражения ВН во время этих измерений и уменьшением, следовательно, значения $f_{\text{ен}}$ в области взаимодействия.

Результаты измерений зависимости $\Delta f_{\text{шм}}$ от $f_{\text{ВН}}$ вблизи 5 гармоники гирочастоты приведены на рис. 8. Здесь частота ВН изменялась с шагом 10 кГц в интервале частот 6750–6850 кГц. Было выполнено два

*) Время UT отличалось от местного времени на три часа.



Р и с. 7

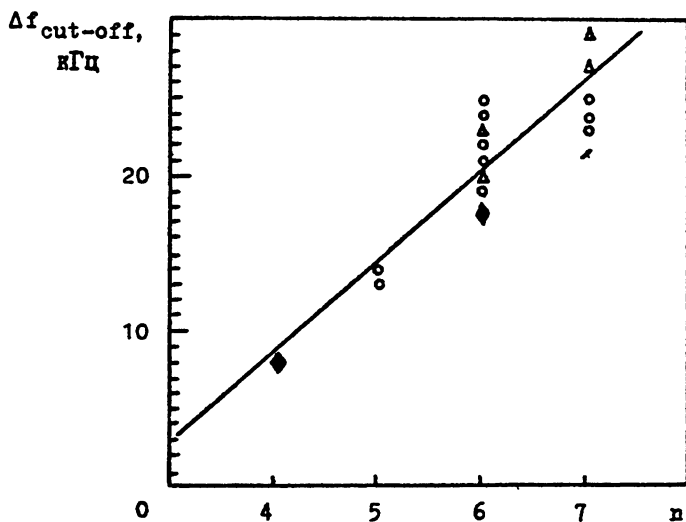


Р и с. 8

цикла измерений, которые на рисунке показаны разными маркерами. Видно, что имеет место практически линейная зависимость $\Delta f_{\text{ШМ}}^f$ от $f_{\text{ВМ}}$ при слабых вариациях $f_{\text{ВМ}}$ от 1,336 МГц до 1,343 МГц.

К сожалению, вблизи 4 и 6 гармоник гирочастоты исследования не были проведены столь детальным образом, поскольку период возможных измерений вблизи гармоник совпадал со временем сильных и суточных изменений параметров слоя F_2 , что приводило к значительным искажениям в получаемых результатах.

При рассмотрении спектральных характеристик ШМ важно подчеркнуть следующую особенность. Обнаруживается существование некоторой граничной частоты ШМ со стороны его наименьших частот, ниже которой не наблюдается генерации излучения этой компоненты ИРИ (обрыв спектра ШМ в сторону к $f_{\text{ВМ}}$). Для 5 гармоник гирочастоты (см. рис. 6) эта граничная частота составляет порядка 10 кГц. Ранее такая особенность спектра ШМ отмечалась в [4]. В экспериментах на стенде "Сура" в 1990 и 1991 гг. измерения граничной частоты ШМ были выполнены вблизи 4, 5, 6 и 7 гармоник гирочастоты. Результаты этих измерений представлены на рис. 9.



Р и с. 9

Видно, что граничная частота ПМ линейно возрастает с ростом номера гирогармоники, описываясь законом

$$\Delta f_{\text{cut-off}} = 6n - 14 \text{ кГц},$$

где n - номер гирогармоники. Аналогичный характер зависимости $\Delta f_{\text{cut-off}}(n)$ ранее был получен и в экспериментах на стенде "Тромсе".

Таким образом эксперименты на стенде "Сура" показали хорошее соответствие данным аналогичных измерений, выполненных на стенде "Тромсе" вблизи более низких гармоник гирочастоты электронов.

2.3. Несколько замечаний о характеристиках некоторых других компонент ИРИ

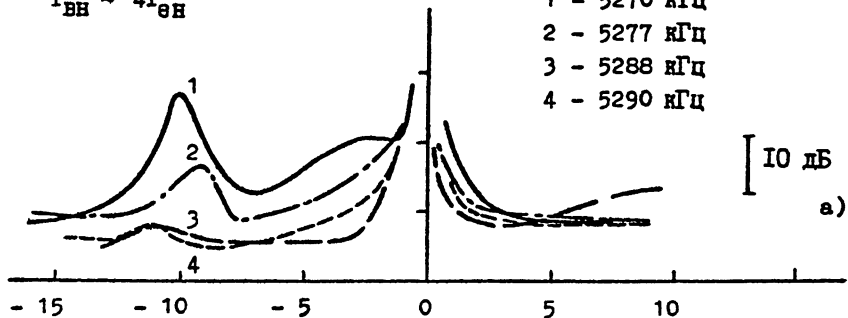
Здесь в первую очередь следует отметить узкополосную компоненту излучения, непосредственно прилегающую в области отрицательных отстроек к $f_{\text{вн}}$ и характеризующуюся быстрым уменьшением интенсивности сигнала при увеличении Δf с темпом 0,5-2 дБ/кГц, где больший темп спада соответствует меньшей отстройке. Наиболее отчетливо эта компонента излучения видна при работе вблизи гармоник гирочастоты электронов, когда оказываются в значительной степени подавленными главный спектральный максимум и широкополосное излучение (см. рис. 1а, 2а, 4с, 6а). В других случаях эту компоненту можно идентифицировать в интервале частот от $f_{\text{вн}}$ до $\Delta f \approx 8$ кГц (до компоненты главного спектрального максимума). Отмечено, что узкополосная компонента излучения появляется только при достаточно больших уровнях мощности $\text{ВН } P_3 \approx 10 \text{ МВт}$, и ее интенсивность уменьшается с ростом $f_{\text{вн}} / 10$.

При проведении измерений вблизи гармоник гирочастоты электронов было обнаружено, что с приближением к резонансу происходит обужение спектра узкополосной компоненты ИРИ. Это можно видеть на рис. 10, где приведены экспериментальные данные по 4, 5, 6 и 7 гармоникам. При этом отмечается более сильное подавление интенсивности главного спектрального максимума (как правило, более, чем на 20 дБ) по сравнению с узкополосной компонентой излучения, где уменьшение спектральной интенсивности сигнала не превышало 10 дБ.

Полученные в настоящему времени экспериментальные данные

$$f_{BH} \approx 4f_{\Theta H}$$

- 1 - 5270 кГц
- 2 - 5277 кГц
- 3 - 5288 кГц
- 4 - 5290 кГц

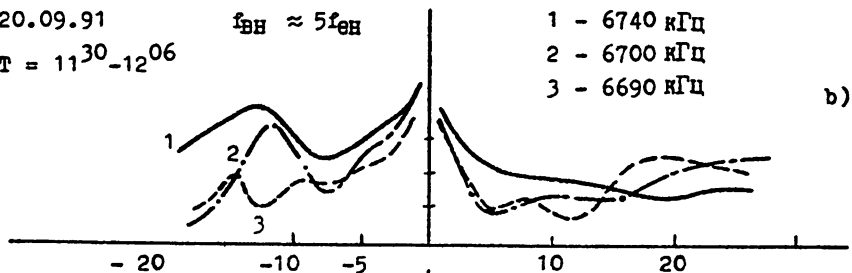


20.09.91

$$f_{BH} \approx 5f_{\Theta H}$$

$T = 11^{30} - 12^{06}$

- 1 - 6740 кГц
- 2 - 6700 кГц
- 3 - 6690 кГц

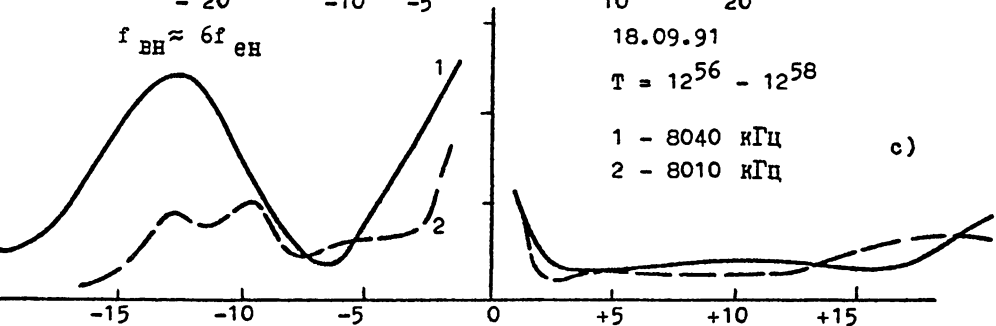


$$f_{BH} \approx 6f_{\Theta H}$$

18.09.91

$T = 12^{56} - 12^{58}$

- 1 - 8040 кГц
- 2 - 8010 кГц

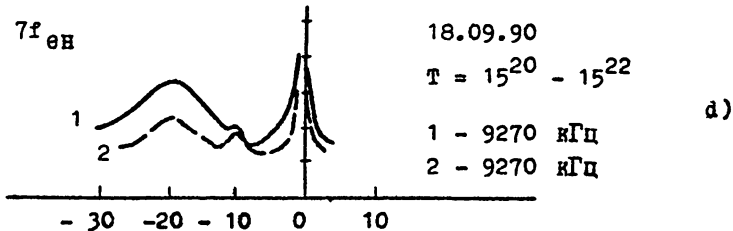


$$f_{BH} \approx 7f_{\Theta H}$$

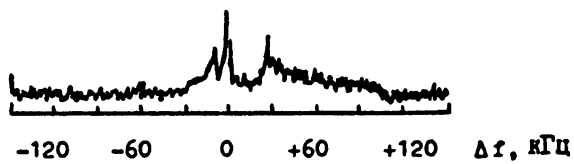
18.09.90

$T = 15^{20} - 15^{22}$

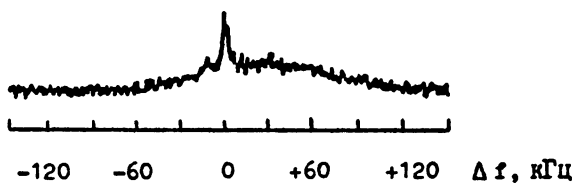
- 1 - 9270 кГц
- 2 - 9270 кГц



Р и с. 10



а)



б)

$$f_{\text{ВН}} = 6590 \text{ кГц}$$

Р и с. II

показывают, что эта компонента излучения имеет максимальную интенсивность сигнала спустя несколько десятков миллисекунд после включения ВН и, по-видимому, генерируется в непосредственной близости высоты отражения ВН в отличие от главного спектрального максимума и ШИ, генерация которых происходит вблизи уровня верхнегибридного резонанса. Поскольку анализ этих данных в полном объеме выходит за рамки настоящей работы. Мы здесь ограничимся только сделанными замечаниями. Более детальный анализ свойств узкополосной компоненты излучения, также как и излучение в области небольших положительных отстроек, будет выполнен в следующих публикациях.

При исследовании стационарных спектров ИРИ на частотах ВН между 5 и 6 гармониками гирочастоты электронов была обнаружена новая компонента излучения, которая наблюдалась только в узких (порядка десятка - нескольких десятков килогерц) областях $f_{вн} \approx 4,9 f_{ен}$ и $\approx 5,7 f_{ен}$. Это излучение отличается сильными вариациями его спектра во времени. Последнее можно видеть, сравнивая два последовательно снятых спектра через $\Delta t = 16$ с (см. рис. IIа и в). Эта компонента излучения наблюдается, главным образом, в области положительных отстроек относительно $f_{вн}$. Однако она может захватывать и область отрицательных отстроек, как это видно, например, на рис. IIв. По спектральным и временным характеристикам эта компонента излучения отличается от наблюдаемого на положительных отстройках ШМ. Ограниченность и эпизодичность полученных к настоящему времени экспериментальных данных не позволяет определить: имеет ли эта компонента ИРИ ту же природу, что и излучение, обнаруженное ранее в области больших положительных отстроек $\Delta f^+ = 50-400$ кГц /17/. Для выяснения ее природы необходимо проведение дополнительных более тщательных измерений.

2.4. Динамика развития различных компонент ИРИ

Исследования свойств ИРИ показывают, что его характеристики в значительной степени определяются мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями (МИИН), возбуждающимися вблизи уровня отражения мощной радиоволны. Эти неоднородности могут определять генерацию излучения, когда они участвуют в рассеянии ВН в плазменные волны или при рассеянии последних по пространству

волновых векторов. С другой стороны, они могут ослаблять выходящее из возмущенной области (ВО) ионосферы искусственное радиозлучение за счет эффекта его аномального ослабления (АО). По-видимому, такая двойственность влияния МИИН на формирование ИРИ и определяет ту сложную его динамику, которая наблюдается на эксперименте. Из вышесказанного ясно, что одновременные измерения динамики ИРИ и МИИН могут дать дополнительную важную информацию о механизме генерации той или иной компоненты излучения.

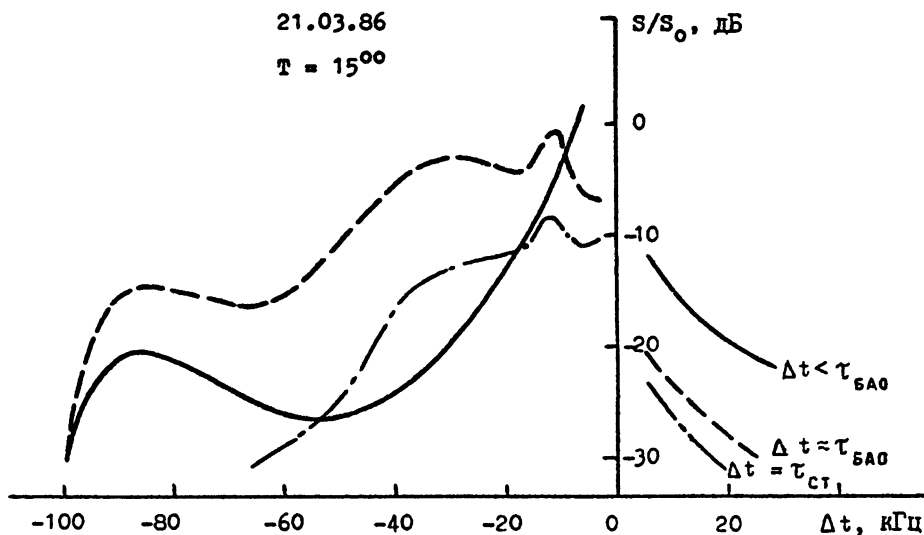
В настоящем разделе мы проанализируем свойства различных компонент ИРИ с точки зрения корреляции их динамики с развитием эффекта АО сигнала ВН в ВО ионосферы. При этом мы будем использовать, в основном, результаты наших измерений на частотах $f_{ВН} = 4,8$ и $5,8$ МГц, достаточно удаленных от гармоник гирорезонанса, где выполнено наибольшее число такого рода исследований (см., например, /6, 7, 10, 15, 17/).

На рис.12 для $f_{ВН} = 4785$ кГц и $\tilde{P}_3 = 20$ МВт ($T \approx 15^{00}$) приведены типичный вид спектров излучения в диапазоне отстройек от -100 кГц до $+30$ кГц для трех этапов его развития, отвечающих начальной стадии взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой (спустя $\Delta t \approx 0,2$ с после включения ВН, сплошная кривая), времени окончания развития быстрой стадии АО (БАО) ($\Delta t = \tau_{БАО} \approx 0,4$ с после включения ВН, пунктирная кривая) и спустя несколько секунд после начала нагрева, когда устанавливается стационарный уровень МИИН (штрих-пунктирная кривая*). Из рис.12 видно, что на временах $\Delta t < \tau_{БАО}$, когда еще не наблюдается появления интенсивных МИИН, узкополосная компонента излучения имеет свою максимальную интенсивность. Она имеет достаточно узкий спектр и сосредоточена, главным образом, в области малых (до $\Delta f \approx 20$ кГц) отрицательных отстроек. На этих временах максимальную интенсивность имеет также излучение, регистрируемое в области небольших и положительных отстроек и не обнаруживается излучение, относящееся к главному спектральному максимуму ИРИ.

Развитие эффекта АО, сопровождающееся генерацией МИИН с $f_{\perp} < 50$ м /7/, вызывает резкое уменьшение интенсивности узкополосной компоненты, так и излучения в области небольших поло-

*) Здесь значения мощности ВН \tilde{P}_3 даны с учетом линейного поглощения радиоволны в нижней ионосфере.

жительных отстройек. Одновременно с этим наблюдается развитие до максимального уровня излучения в областях его главного спектрального максимума и широкополосной компоненты ИРИ. На этом этапе взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой интегральная интенсивность ИРИ в области отрицательных отстройек имеет максимальную величину.



Р и с.12

При переходе к стационарному уровню развития МИИИ, достигаемому через несколько секунд-десятков секунд после включения и я ВН, интенсивность излучения в области отрицательных отстройек уменьшается по всему спектру и тем сильнее, чем больше величина $\Delta \varphi^-$. При этом в стационарном спектре ИРИ сохраняются все его структурные особенности, характерные для этапа развития эффекта АО: наличие выделяющегося в спектре излучения главного спектрального максимума ИРИ и уплощение спектра в области широкополосной компоненты, присутствие ослабленной узкополосной компоненты излучения.

Рис.12 демонстрирует также существование еще одной компоненты ИРИ в области больших отрицательных отстройек с $\Delta \varphi^- \approx 70 - 100$ кГц, интенсивность которой имеет значительную величину прак-

тически сразу после включения ВН, достигает максимума на временах развития БАО и уменьшается затем более чем на 20 дБ, исчезая или опускаясь ниже порога обнаружения приемо-регистрирующей аппаратуры при переходе к стадии стационарного развития искусстве н о й турбулентности. Впервые исследования свойств этого излучения было проведено в /6/. В настоящей работе мы не будем проводить ее подробный анализ и ограничимся только сделанным замечанием.

Согласно проведенным исследованиям /15, 18-20/, при доста - точно больших мощностях ВН $\tilde{P}_0 \geq 10$ МВт ($f_{ВН} \approx 5-6$ МГц) в раз - витии АО можно выделить два этапа. Первый этап (или как отмече н о выше - БАО) характеризуется резким уменьшением интенсивности от - раженного от ионосферы сигнала ВН через 0,3-0,5 с после нач а л а воздействия. Это время коррелирует с ростом интенсивности неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м. На втором этапе наблюдается дальнейшее бо - лее плавное уменьшение амплитуды принимаемого сигнала ВН в тече - ние нескольких секунд, которое по времени совпадает с развити е м декаметровых неоднородностей. Такую динамику АО и МИИН демонстрирует рис.13а, где также можно видеть, что развитие декаметров ы х ($l_{\perp} = 13$ м) неоднородностей сопровождается уменьшением интенсив - ности неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м /15, 20/. Последнее являет с я важным экспериментальным фактом, который необходимо учитывать при интерпретации особенностей динамики ИРИ. Следует подчеркнуть, что уменьшение интенсивности метровых неоднородностей при развитии де - каметровых наблюдается только при достаточно больших ($\tilde{P}_0 \geq 20$ МВт) мощностях ВН^{*}).

На рис.13в для того же сеанса наблюдений, который представ - лен на рис.13а приведено изменение огибающей амплитуды ИРИ д л я трех отстроек, относящихся к компоненте узкополосного излучени я ($\Delta f^- = 5,6$ кГц), к компоненте главного спектрального максимума ИРИ ($\Delta f^- = 10$ кГц) и к компоненте широкополосного излучения ($\Delta f^- = 43$ кГц). Видно, что на временах $\Delta t \leq \tau_{БАО} = 0,4$ с наблюда - ется быстрое уменьшение интенсивности узкополосной компоненты, про - являющейся на всех трех представленных на рис.13в отстройках в виде первоначальных максимумов интенсивности ИРИ. С развитием БАО амплитуда этого излучения (см. $\Delta f^- = 5,6$ кГц) начинает стабили -

^{*}) Измерения динамики МИИН здесь были выполнены с помощью ме - тода ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов /21/.

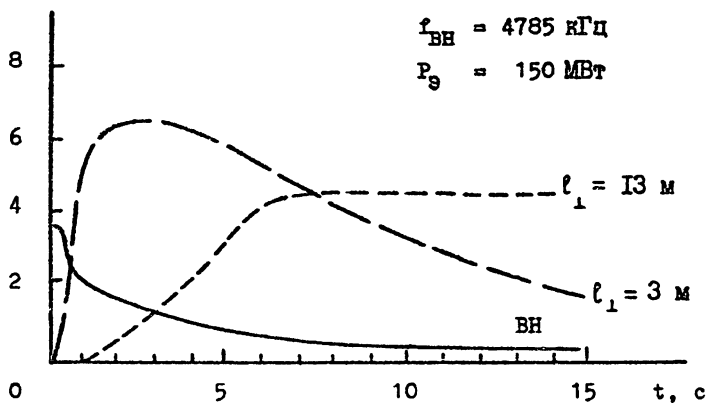
A, ОТН.ЕД.

30.03.88

$T = 16^{51} - 17^{01}$

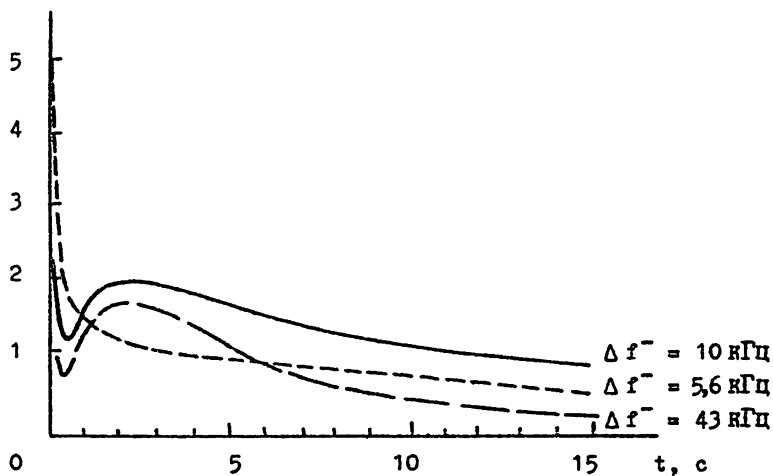
$f_{BH} = 4785 \text{ кГц}$

$P_g = 150 \text{ МВт}$



A, ОТН.ЕД.

а)



б)

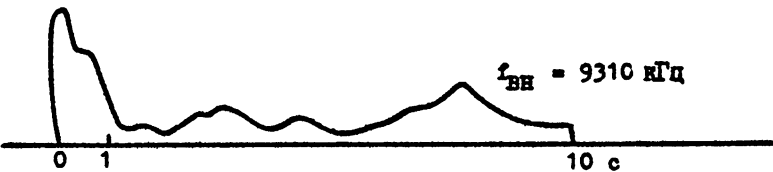
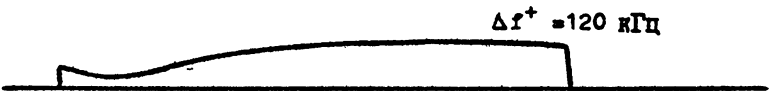
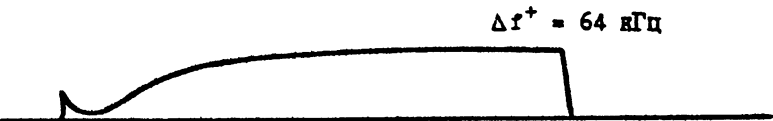
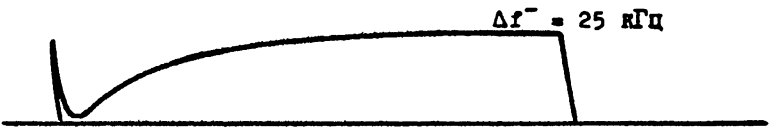
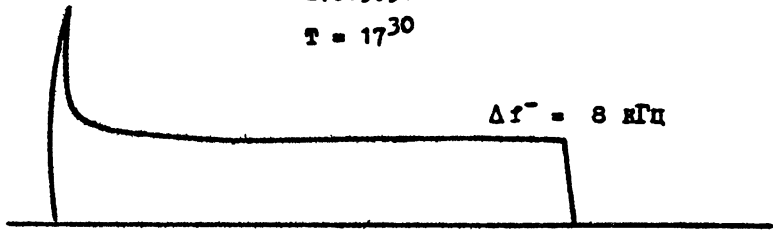
Р и с. 13

зироваться и ко второй секунде воздействия (в моменту достижения неоднородностями с $l_{\perp} = 3$ м своей максимальной интенсивности) оно практически выходит на стационарный уровень. Одновременно с развитием БАО интенсивность двух других компонент начинает быстро нарастать и они достигают уровня своего максимального развития вместе с неоднородностями с $l_{\perp} \approx 3$ м. В дальнейшем интенсивность ИРИ для этих двух компонент плавно уменьшается (как и интенсивность трехметровых неоднородностей), причем более быстро и сильнее для излучения, отвечающего большим отрицательным отстройкам. Следует отметить, что по измерениям в диапазоне $f_{\text{ВН}} = 4,8-9,3$ МГц максимум в интенсивности излучения на временах развития АО наиболее сильно проявляется на более низких частотах ВН. Этот максимум уже достаточно слабо различим для компоненты главного спектрального максимума ($\Delta f^- \approx 10-12$ кГц) при $f_{\text{ВН}} \approx 5,8$ МГц и еще более слабо проявляется для большей области отрицательных отстроек при дальнейшем увеличении значения $f_{\text{ВН}}$. Последнее можно видеть, например, из рис. 14, где приведена динамика ИРИ для $f_{\text{ВН}} = 9310$ кГц. Появление излучения в области положительных отстроек $\Delta f^+ \approx 60-120$ кГц (компонента широкополосного максимума) свидетельствует о близости значения $f_{\text{ВН}}$ к 7 гармонике гирочастоты электронов. Здесь также можно видеть, что компонента широкополосного максимума излучения развивается несколько медленнее, чем излучение в области главного спектрального максимума ($\Delta f_m^- \approx 15$ кГц) и более медленно для больших положительных отстроек. Такая динамика ИРИ характерна для этой компоненты излучения независимо от номера гармоники гирочастоты электронов. Согласно последним нашим измерениям, динамика ее различных отстроек в сильной степени зависит от близости частоты ВН к гармонике гирорезонанса. Однако детальный анализ этих экспериментальных данных выходит за рамки данной работы и будет проведен в последующих публикациях.

Многочисленные исследования свойств ИРИ показывают, что его динамика существенным образом определяется уровнем развития искусственной ионосферной турбулентности /6-10/. Последнее можно видеть, например, из рис. 15, где показана серия осциллограмм отраженного от ионосферы сигнала ВН ($f_{\text{ВН}} = 4785$ кГц) и ИРИ при циклическом излучении мощной волны с $\tau_{\text{и}} = 3$ с и периодом повторения импульсов $T_{\text{и}} = 10$ с для двух уровней ее мощности: $\tilde{P}_{\text{э}} = 6$ МВт (рис. 15а) и $\tilde{P}_{\text{э}} = 40$ МВт (рис. 15б). Справа от осциллограмм для ВН циф-

27.09.91

$T = 17^{30}$



Р и с.14

11.09.86

T = 12⁵²

[+3с-7с]

$\tilde{P}_0 = 6 \text{ MBт}$

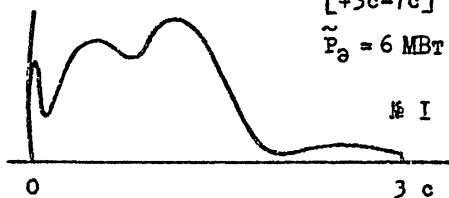
$f_{\text{ВН}} = 4785 \text{ кГц}$

$f_{\text{ИРИ}} = 4773 \text{ кГц}$

$\Delta f = 12 \text{ кГц}$

ВН

№ 1



ВН

№ 7



ИРИ

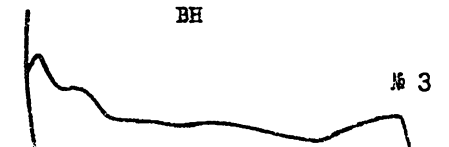


ИРИ



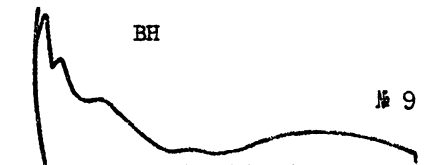
ВН

№ 3

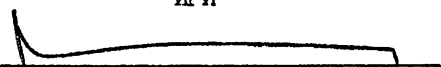


ВН

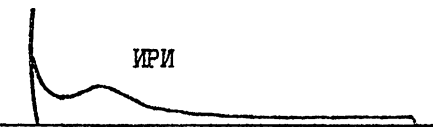
№ 9



ИРИ

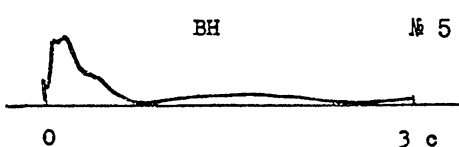


ИРИ



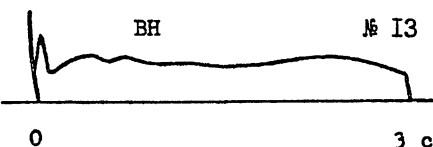
ВН

№ 5

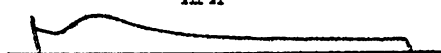


ВН

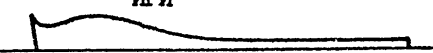
№ 13



ИРИ



ИРИ



а)

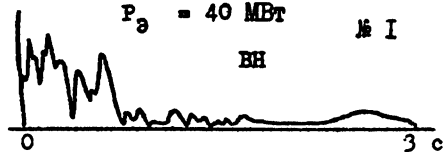
Р и с. 15

$f_{\text{ВН}} = 4785 \text{ кГц}$

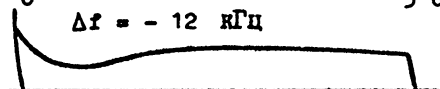
$P_{\text{э}} = 40 \text{ МВт}$

№ 1

ВН



$\Delta f = -12 \text{ кГц}$

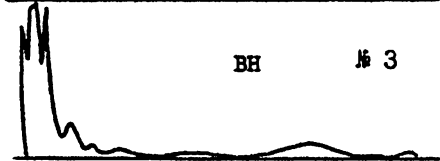


$\Delta f = -50 \text{ кГц}$



ВН

№ 3



ИРИ

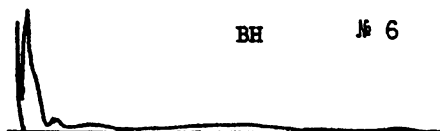


ИРИ

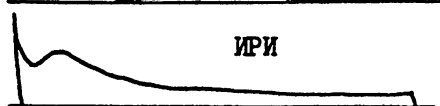


ВН

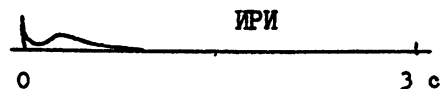
№ 6



ИРИ



ИРИ



ВН

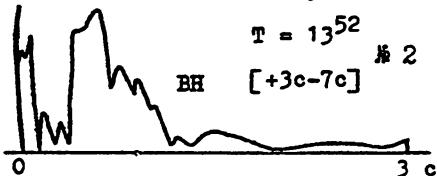
11.09.86

$T = 13^{52}$

№ 2

[+3с-7с]

ВН



ИРИ

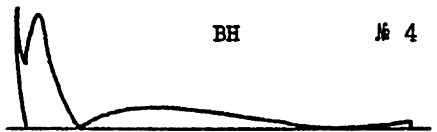


ИРИ



ВН

№ 4



ИРИ

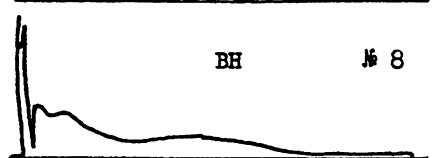


ИРИ

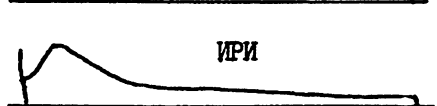


ВН

№ 8



ИРИ



ИРИ



б)

Р и с. 15

рами указаны номера импульсов мощной волны с начала их излучения после достаточно длительной паузы, в течение которой происходила полная релаксация искусственной турбулентности в ВО ионосферы. Отметим, что для более низкого уровня мощности ВН излучение обнаруживалось только для области главного спектрального максимума ИРИ ($\Delta f^- = 12$ кГц), в то время как для $\tilde{P}_3 = 40$ МВт оно надежно было зарегистрировано и в области ее широкополосной компоненты $\Delta f^- = 50$ кГц.

На рис. 15а хорошо видно, что с ростом номера импульса ВН уменьшается время развития эффекта ее аномального ослабления от $\tau_{AO} \approx 2$ с для $N = 1$ до $\tau_{AO} \approx 0,3$ с для $N \geq 7$. При этом для первых трех импульсов, в поведении амплитуды ВН не видно появления стадии БАО, а в динамике ИРИ не обнаруживается развития его временного максимума. Начиная с пятого импульса ВН, стадия БАО уже хорошо идентифицируется, и на временах $t \approx \tau_{BAO} \approx 0,5$ с появляется временной максимум в интенсивности излучения, характеристики которого испытывают достаточно слабые вариации от импульса к импульсу мощной волны.

При более высоком уровне излучения ВН $\tilde{P}_3 = 40$ МВт (с м. рис. 15б) мы наблюдаем достаточно плавное развитие ИРИ для $\Delta f^- = 12$ кГц для первых двух импульсов излучения ВН. С появлением БАО времена развития излучения резко уменьшаются и появляется его временной максимум на $t \approx \tau_{BAO}$. Более сильно изменяется динамика излучения для $\Delta f^- = 50$ кГц, где после развития быстрого АО интенсивность излучения испытывает значительное ослабление.

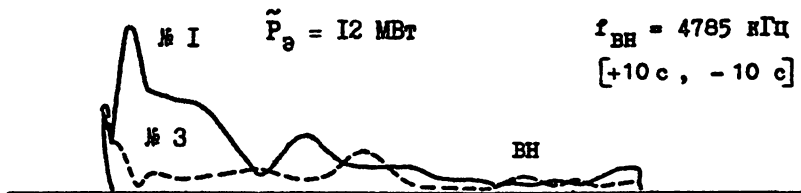
В заключение рассмотрим результаты измерений, представленные на рис. 16. Здесь режим излучения ВН был $\tau_{II} = 10$ с, $T_{II} = 20$ с, измерения проводились при двух уровнях ее мощности $\tilde{P}_3 \approx 12$ МВт и 60 МВт. Осциллограммы сигналов ВН и ИРИ для $\Delta f^- = 12$ кГц (область главного спектрального максимума) показана для первого ("холодное" включение после достаточно длительной паузы излучения мощной волны) и третьего (модификация возмущенной ионосферы) импульсов воздействия на ионосферную плазму. Здесь важно подчеркнуть следующее. В случае высокого уровня мощности ВН ($\tilde{P}_3 = 60$ МВт) на ее отраженном сигнале хорошо различима стадия развития быстрого АО с характерным временем $\tau_{BAO} = 0,3$ с как для третьего, так и для первого импульсов воздействия. Это время соответствует времени развития ИРИ до его максимального уровня. При более низ-

4.07.85

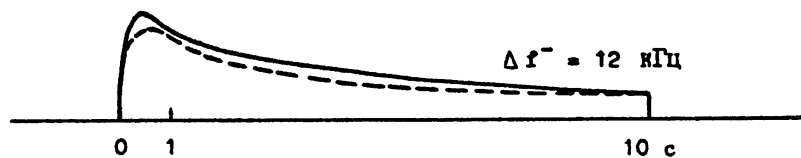
$f_{\text{ВН}} = 4785 \text{ кГц}$

[+10 с, -10 с]

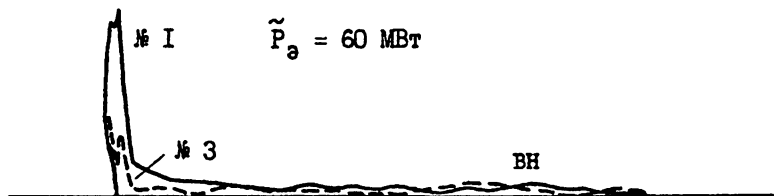
$\tilde{P}_0 = 12 \text{ МВт}$



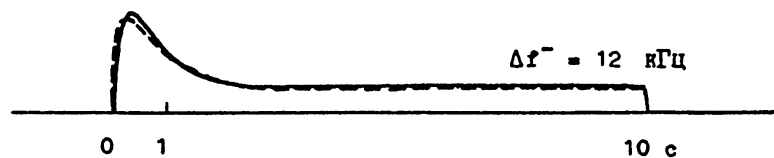
$\Delta f^- = 12 \text{ кГц}$



$\tilde{P}_0 = 60 \text{ МВт}$



$\Delta f^- = 12 \text{ кГц}$



Р и с.16

ном уровне мощности ВН ($\tilde{P}_3 = 12$ МВт) стадия БАО с характерным временем $\tau_{\text{БАО}} \approx 0,4$ с наблюдается здесь для третьего импульса ВН, в то время как для первого импульса имеет место развитие обычного АО с характерным временем $\tau_{\text{АО}} \approx 2,5$ с. Однако развитие ИРИ в обоих случаях происходит за время порядка $\tau_{\text{БАО}}$, и, не смотря на существенное разлитие в эволюции амплитуды ВН, динамика ИРИ практически не изменяется. Следовательно, при достаточно высоком уровне мощной волны (согласно измерениям /18, 23/ при $\tilde{P}_3 \geq 10$ МВт) рост интенсивности ИРИ происходит с характерным временем нарастания амплитуды МИИИ с $l_1 \approx 3$ м, которые определяют развитие быстрой стадии АО /20/. При этом возможна ситуация, когда быстрое АО не обнаруживается на отраженном сигнале ВН, поскольку область, формирующая сигнал мощной радиоволны в точке приема, имеет пространственные размеры порядка нескольких километров и характеристики МИИИ в ней могут значительно отличаться от средних по ВО, в то время как сигнал ИРИ формируется всей ВО. Вообще говоря, интегральный характер принимаемого излучения, особенно когда возмущение ионосферной плазмы осуществляется широким пучком мощных радиоволн, усложняет в ряде случаев характер наблюдаемых явлений вследствие имеющей место зависимости свойств ИРИ от угла с геомагнитным полем /10/. Последнее следует иметь в виду при анализе экспериментальных данных.

Таким образом, на основе рассмотренных выше экспериментальных результатов можно заключить, что с увеличением мощности ВН в развитии главного спектрального максимума и широкополосной компоненты ИРИ все большую роль начинают играть неоднородности с $l_1 \approx 3$ м, определяя скорость нарастания их интенсивности и формирование временного максимума на временах порядка времени развития быстрой стадии аномального ослабления мощной радиоволны в ВО ионосферы. Установление стационарного уровня ИРИ связывается с развитием более крупных (декаметровых) искусственных неоднородностей. Эти же неоднородности в большей степени определяют развитие широкополосного максимума излучения в области положительных отстроек $\Delta f^+ \approx 15-150$ кГц, когда частота ВН приближается к какой-либо гармонике гирочастоты электронов. Экспериментальные данные также показывают, что развитие неоднородностей с $l_1 \approx 3$ м приводит к подавлению генерации узкополосной компоненты излучения, эволюция которой не обнаруживает влияния декаметровой части спектра

МИИИ. Исследования свойств взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F-области ионосферы /9, 18, 23/ показали, что с ростом частоты ВН уменьшается величина эффекта ее стрижонного самовоздействия и, как следствие этого, ухудшаются условия развития первоначальной мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности вблизи уровня отражения мощной радиоволны /9, 23/. Последнее, как показали измерения /18, 23/, может изменить характер развития искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м на стадии теплового расслоения плазмы (уменьшение их интенсивности и замедление темпа роста), что, в свою очередь, может определять наблюдаемое изменение с ростом $f_{ВН}$ динамики излучения: уменьшение скорости его нарастания, ослабление или исчезновение временного максимума в его динамике. Кроме того, как указывалось выше, неоднородности с $l_{\perp} \approx 3$ м испытывают депрессию при развитии более крупных дециметровых неоднородностей /15, 22/. Свойства этого эффекта могут зависеть, в силу перечисленных причин, от величины частоты ВН, что также необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных.

Динамика различных компонент ИРИ показывает свою зависимость от таких условий проведения эксперимента, как время суток, уровень естественной возмущенности ионосферной плазмы, остаточный уровень искусственной турбулентности, высота отражения ВН, значение градиента концентрации плотности плазмы в области взаимодействия, соотношение $f_{ог_2}$ и $f_{ВН}$, уровень поглощения ВН в нижних слоях ионосферы, угол между волновым вектором мощной волны и магнитным полем Земли и др. Все это еще более усложняет картину наблюдаемых явлений и, по-видимому, обуславливает то многообразие форм динамики искусственного радиоизлучения, которые наблюдаются на эксперименте.

2.5. Зависимость интенсивности различных спектральных компонент ИРИ от мощности ВН

При исследовании зависимости интенсивности различных спектральных компонент ИРИ от мощности ВН была выбрана программа ступенчатого ее изменения сначала по нарастающей 1,25; 2,5; 5; 10; 20 и 30 МВт, а затем в сторону обратного ее уменьшения от 30 до

1,25 МВт^{*}). На каждом уровне мощности излучалось 4 импульса ВН для - тельностью 10 с с периодом их повторения 1 мин. При этом сравне - ние прямой (ветвь увеличения P) и обратной (ветвь уменьшения P) зависимостей интенсивности ИРИ (S) от P_3 позволяло изучить гис - терезистные явления в генерации излучения, связанные с остаточным влиянием предыдущих циклов нагрева на характеристики ИРИ. В дан - ной серии экспериментов регистрация излучения проводилась как с помощью спектроанализатора (при этом изучались, главным образом, стационарные спектры ИРИ), так и с помощью радиоприемников, наст - роенных на ряд фиксированных частот по спектру ИРИ. В последн е м случае мы имели возможность зарегистрировать на ленте самопис ца характер эволюции различных компонент ИРИ во время импульса В Н. Временное разрешение при этом не превышало 0,1 с в отличии от 5- -10 с, характерных для съема спектра излучения с помощью спектро - анализатора.

Рассматриваемые ниже измерения были выполнены 25 сентя б р я 1991 г. в полуденные часы местного времени (T = 12-14 час) на чво - тоте ВН $f_{ВН} = 5828$ кГц при синхронном режиме работы всех тре х секций передающей антенны стенда. По измерениям с помощью радио - приемников на фиксированных отстройках было установлено, что при $P_3 = 1,25$ МВт интенсивность ИРИ не превышала уровня шумов аппара - туры; при $P_3 = 2,5$ МВт оно носило неустойчивый (флуктуирующий) ха - рактер; при $P_3 = 5$ МВт излучение хорошо обнаруживалось, однако его характерные времена развития превышали 10 с на прямой ветви изме - нения P_3 , т.е. были больше длительности импульса ВН, что мо ж е т несколько усиливать истинную зависимость S(P_3) для этого уровн я мощности ВН. В интервале мощностей $P_3 \approx 5-20$ МВт характе р н ы е времена развития ИРИ в области отрицательных отстроек $\Delta f = 10 - - 60$ кГц были приблизительно обратно пропорциональны P_3 , состав - ляя 2,5-3 с для $P_3 \approx 20$ МВт; дальнейшее увеличение мощности P_3 до 30 МВт не приводило к заметному уменьшению времен разв и т и я излучения. Они также сохраняли свои значения на ветви уменьшения P_3 вплоть до $P_3 = 10$ МВт и резко увеличивались до 7-8 с при пере - ходе к мощности излучения $P_3 = 5$ МВт. Отмечалось также, что при $P_3 \approx 5$ МВт для обеих ветвей изменения мощности ВН не наблюдалось

^{*}) В рассматриваемом цикле измерений значение $\tilde{P} = 30$ МВт со - ответствует максимальной эффективной мощности излучения ВН с уче - том линейного поглощения радиоволн в нижней ионосфере.

появления видимого аномального ослабления (АО) амплитуды отраженного от ионосферы сигнала ВН; оно было хорошо различимым для $\tilde{P}_3 \geq 10$ МВт и его характерные времена совпадали с временами развития ИРИ. Кроме того, при $\tilde{P}_3 = 30$ МВт регистрировалась быстрая стадия развития АО (БАО) с характерными временами $\tau_{\text{БАО}} \approx 0,5$ с.

Проанализируем представленные на рис. 17 спектры излучения, полученные при различных уровнях мощности ВН. На ветви увеличения ее мощности в интервале значений $\tilde{P}_3 \leq 5$ МВт (см. рис. 17а) в спектре ИРИ присутствует только узкополосная компонента излучения. Это может частично определяться большими временами развития ИРИ на отстройках $\Delta f^- \geq 10$ кГц, чем длительность импульса ВН. Начиная с $\tilde{P}_3 = 10$ МВт (с появлением видимого АО на отраженном сигнале ВН), наблюдается появление главного спектрального максимума излучения на отстройках $\Delta f^- \approx 12$ кГц и широкополосной компоненты излучения для $\Delta f^- \approx 18-60$ кГц. На ветви уменьшения мощности (см. рис. 17 в) они исчезали только при мощностях ВН $\tilde{P}_3 \leq 5$ МВт, т.е. приблизительно при в два раза меньших значениях, чем на ветви увеличения \tilde{P}_3 . Последнее связано с наличием эффекта гистерезиса в генерации ИРИ, обнаруженного ранее в /6/. Отмечается также, что в области небольших положительных отстроек с ростом мощности ВН наиболее резко интенсивность излучения возрастала для $\Delta f^+ = 5-15$ кГц при переходе \tilde{P}_3 от 20 МВт к 30 МВт.

Зависимость интенсивности различных спектральных компонент ИРИ от мощности ВН, соответствующая представленным на рис. 17 данным, показана для отстроек $\Delta f^- = 12, 30$ и 60 кГц на рис. 18а и для $\Delta f^- = 4$ и $6,5$ кГц, а также для $\Delta f^+ = 4$ кГц на рис. 18в. Здесь при $\tilde{P}_3 \geq 5$ МВт в области отрицательных отстроек легко обнаруживается эффект гистерезиса в зависимости интенсивности ИРИ от мощности ВН. При этом на ветви увеличения мощности для $\Delta f^- = 12, 30$ и 60 кГц зависимости $S(\tilde{P}_3)$ подобны и близки к степенной с показателем степени $\alpha \approx 1,7-1,9$. Срыв эффекта гистерезиса наблюдается при $\tilde{P}_3 < 5$ МВт, когда пропадает видимое аномальное ослабление отраженного от ионосферы сигнала ВН и амплитуда ИРИ начинает носить флуктуирующий характер.

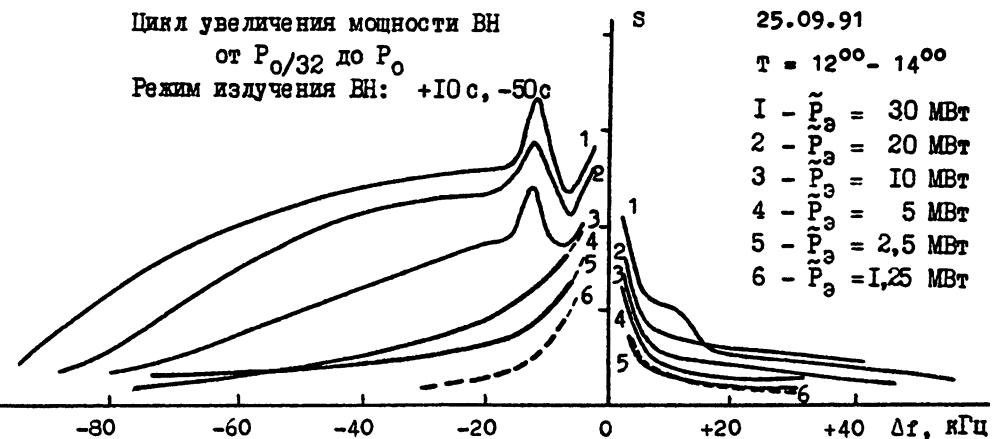
Иная зависимость стационарной интенсивности излучения от мощности ВН имеет место для малых отрицательных и положительных отстроек. Здесь для прямой ветви показатель степени $\alpha \approx 0,8$, что почти в два раза меньше, чем для отстроек, отвечающих главному

Цикл увеличения мощности ВЧ
от $P_0/32$ до P_0
Режим излучения ВЧ: +10 с, -50 с

25.09.91

$T = 12^{\circ} - 14^{\circ}$

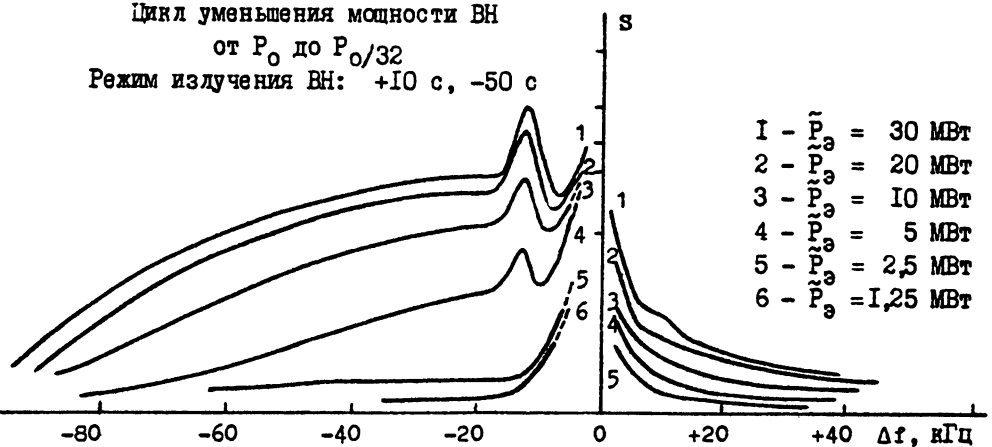
- 1 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 30$ МВт
- 2 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 20$ МВт
- 3 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 10$ МВт
- 4 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 5$ МВт
- 5 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 2,5$ МВт
- 6 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 1,25$ МВт



а)

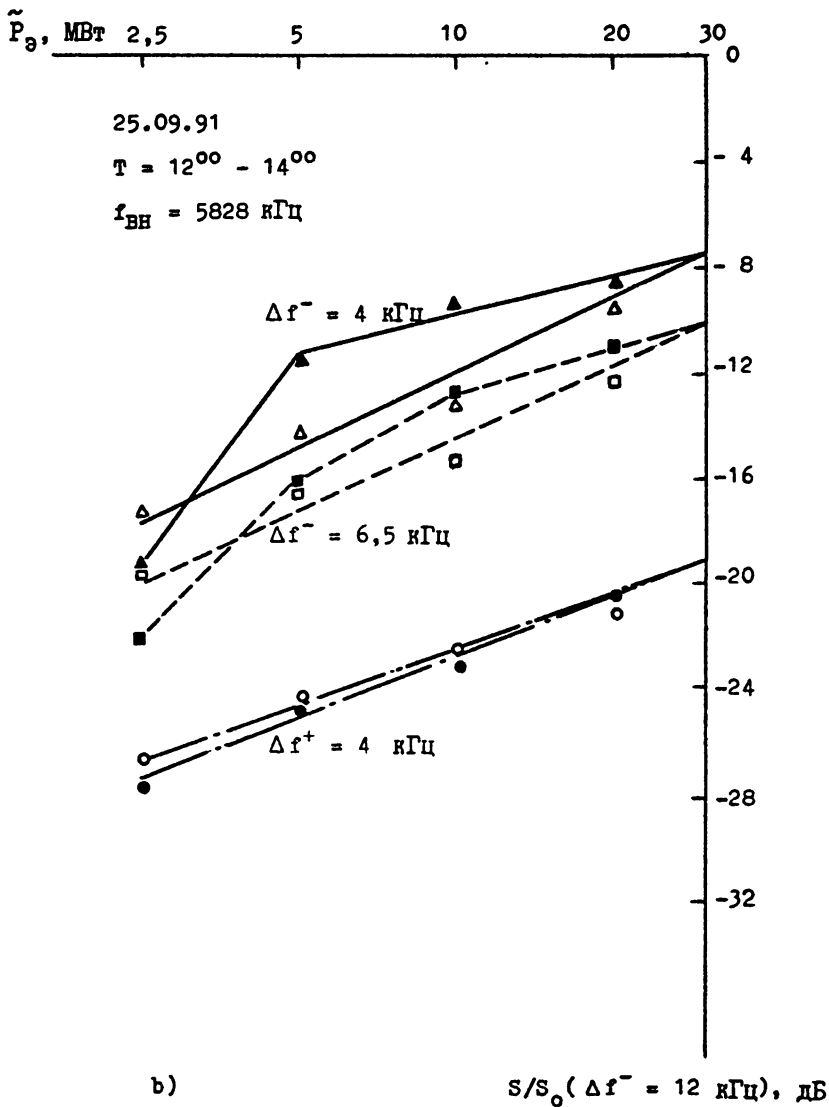
Цикл уменьшения мощности ВЧ
от P_0 до $P_0/32$
Режим излучения ВЧ: +10 с, -50 с

- 1 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 30$ МВт
- 2 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 20$ МВт
- 3 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 10$ МВт
- 4 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 5$ МВт
- 5 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 2,5$ МВт
- 6 - $\tilde{P}_{\text{э}} = 1,25$ МВт



б)

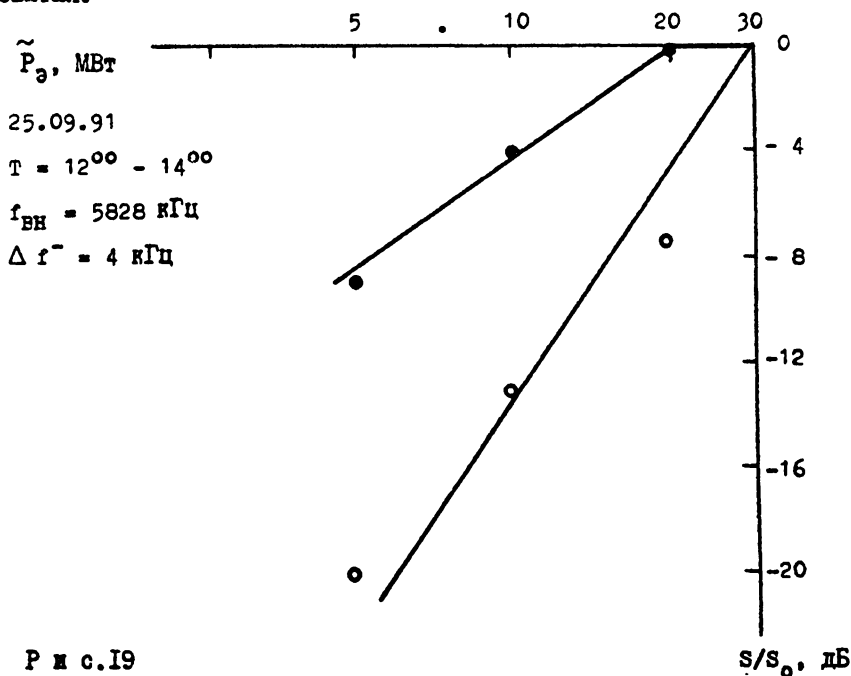
Р и с.17



Р и с.18

спектральному максимуму и широкополосной компоненте излучения. Следует также отметить, что для $\Delta f^+ = 4$ кГц не наблюдалось эффекта гистерезиса, как это имело место для отрицательных отстроек излучения.

Проведенные исследования динамики ИРИ показывают, что интенсивность узкополосной компоненты излучения максимальна практически сразу (через несколько миллисекунд) после включения ВЧ, и она быстро уменьшается до своего стационарного значения за время развития быстрого АО (см. рис. 13в). Поэтому представляется важным определение зависимости ее интенсивности от мощности ВЧ именно в начальном этапе ее развития. Результаты таких измерений представлены на рис. 19. Видно, что на ветви увеличения мощности от 5 до 30 МВт показатель степени зависимости $S(\tilde{P}_3) \propto \approx 3$, полностью соответствует данным наших более ранних измерений [10]. Отмечается также присутствие сильного эффекта гистерезиса в зависимости $S(\tilde{P}_3)$. Последнее свидетельствует о сильном влиянии МИИИ на генерацию узкополосной компоненты излучения на начальном этапе ее развития.



Таким образом, проведенные исследования показывают полную идентичность зависимостей интенсивности излучения от мощности ВЧ для его главного спектрального максимума и в области широкополосной компоненты излучения, где показатель степени α был близок к значению 2. Для узкополосной компоненты излучения характерна более сильная зависимость $S(\tilde{P}_3)$ с $\alpha \approx 3$ для фазы максимального уровня развития ее амплитуды и более слабая зависимость с $\alpha \approx 1$ для стационарного уровня интенсивности ИРИ. Полученные результаты могут указывать на существование определенной связи механизмов генерации компонент главного спектрального максимума и широкополосного излучения и их существенного отличия от механизма генерации узкополосной компоненты ИРИ.

В заключение отметим, что наблюдается насыщение стационарного уровня интенсивности ИРИ при $\tilde{P}_3 \approx 5-10$ МВт при проведении измерений в условиях вечерней ионосферы /6, 7/ и отсутствие такого насыщения вплоть до $\tilde{P}_3 \approx 30$ МВт в измерениях, рассматриваемых в настоящей работе, которые проводились в полуденные часы, указывают на сильную зависимость свойств ИРИ от состояния ионосферной плазмы. Это может быть связано с изменением высоты ВЧ ($h_{\text{во}} \approx 180-220$ км днем и ≈ 250 км вечером), более высоким уровнем естественной ионосферной турбулентности и более высокой степени однородности плазмы в вечерние часы, а также присутствием фотоэлектронов в дневной ионосфере. Влияние указанных выше параметров неоднократно отмечалось при проведении различных экспериментов по модификации плазмы F-области ионосферы /8, 18, 21/, однако в отношении ИРИ этот вопрос нельзя считать окончательно решенным и здесь необходимо проведение дополнительных целенаправленных исследований.

2.6. Замечание о природе одного типа быстрых вариаций амплитуды ИРИ на частотах вблизи его главного спектрального максимума

В экспериментах /4, 5/, проводимых группой Бу Тиде на стенде "Тромсе" (позднее аналогичные измерения были выполнены и на стенде "Сура"), было обнаружено, что в области отстроек $\Delta f \approx 6-10$ кГц, немного меньших центральной частоты главного спектрального максимума, наблюдаются резкие спорадические изменения ин -

ся для отстроек с $\Delta f \approx 15$ кГц. Отметим, рассмотренная выше модель несколько отличается от интерпретации наблюдаемого явления, предложенной в /4, 5/, где предполагалось, что скачки интенсивности излучения являются результатом переключения механизма его генерации с одного на другой. В нашей интерпретации излучение является суммой двух компонент, вклад каждой из которых определяется формой спектра главного спектрального максимума.

Из рассмотренных выше экспериментальных данных можно заключить, что имеет место определенная неустойчивость во времени механизма генерации излучения в области его главного спектрального максимума, причем это явление носит ярко выраженный пороговый эффект. На последнее указывают резкие изменения уровня сигнала ИРИ. Поскольку характерные времена изменения интенсивности излучения совпадают с характерным периодом флуктуаций отраженного от ионосферы сигнала ВН, можно полагать, что причиной появления этих вариаций являются ионосферные неоднородности. Согласно измерениям /24/, такие неоднородности могут вызывать фокусировку падающей на них мощной радиоволны и сильно изменять условия ее взаимодействия с плазмой в области усиления электромагнитного поля.

К сожалению до настоящего времени, за крайне редким исключением, мы не имели одновременных записей динамики излучения на двух близких отстройках в полосе $\Delta f \approx 6-10$ кГц, что не позволяет сделать окончательный вывод о правильности предложенной модели вариаций интенсивности ИРИ. Последние наши измерения на станции "Сура" с использованием компьютерной обработки принимаемого сигнала позволяют исследовать временную эволюцию принимаемого сигнала с частотным разрешением по его спектру не хуже, чем 1 кГц. Обработка полученной здесь информации, несомненно, позволит провести более детальный анализ наблюдаемого явления и сделать окончательные выводы относительно его природы.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущих разделах работы мы проанализировали полученные в настоящему времени экспериментальные данные, касающиеся статических и динамических характеристик основных компонент ИРИ. Ниже мы кратко обсудили возможные механизмы их генерации.

3.1. Широкополосная компонента излучения

Она характеризуется следующими основными свойствами. В спектре ИРИ эта компонента обнаруживается в виде широкополосного излучения в полосе частот $\Delta f \approx 15-60$ кГц (в некоторых случаях до 150 кГц), интенсивность которого уменьшается с ростом величины отстройки. Максимального своего развития эта компонента достигает вместе с генерацией неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м (развитием БАО). На частотах ВЧ кратных гармоникам гирочастоты электронов широкополосная компонента ИРИ испытывает сильное ослабление. В то же время было обнаружено, что наблюдается значительное усиление этой компоненты излучения, с образованием плато на ее спектре, когда значение $f_{\text{ВЧ}}$ было на 20-40 кГц ниже, чем $n f_{\text{гн}}$.

В настоящее время для объяснения генерации широкополосной компоненты ИРИ предложена модель двойной трансформации электромагнитных волн в плазменные и обратно на искусственных мелкомасштабных неоднородностях /25/. Согласно этой модели, в процессе генерации излучения можно выделить четыре этапа:

- а) возбуждение верхнегибридных плазменных волн и генерация мелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы в процессе развития тепловой параметрической неустойчивости мощной электромагнитной волны в магнитоактивной плазме /26/;
- б) многократное рассеяние верхнегибридных волн на неоднородностях плотности плазмы, в результате которого формируется широкий спектр плазменных волн в пространстве волновых векторов /27/;
- в) индуцированное рассеяние верхнегибридных волн на ионах, приводящее к образованию широкого частотного спектра плазменных волн /25, 35/;
- г) рассеяние плазменных (верхнегибридных) волн на мелкомасштабных неоднородностях /28/;

табных неоднородностях в электромагнитные волны - генерация ИРИ /25/.

Предложенная модель хорошо описывает спектр и динамику излучения в области частот ВН между гармониками гирочастоты электронов. В частности, в /28/ на основе этой теоретической модели и эмпирической модели спектра искусственных мелкомасштабных неоднородностей было проведено численное моделирование генерации широкополосной компоненты излучения, показавшее хорошее согласие по основным параметрам с экспериментальными данными. Последнее открывает новые возможности диагностики параметров ИИГ.

Ослабление и обужение спектра широкополосной компоненты ИРИ при приближении $f_{ВН}$ к $n f_{ен}$ связано, по-видимому, с обужением пространственного спектра плазменных волн за счет их циклотронного затухания: волны с достаточно большими продольными волновыми числами $k_{||} v_{те} \approx |f_{ВН} - n f_{ен}|$ перестают возбуждаться. Локальное же расширение спектра широкополосной компоненты при $f_{ВН} \approx n f_{ен} - 30$ кГц может определяться возбуждением здесь слабо затухающих бернштейновских мод с достаточно большими K_{\perp} , но малыми $K_{||}$. Однако правильность этой гипотезы необходимо подтвердить с помощью анализа дисперсионного уравнения плазменных волн при $f_{ВН} \approx n f_{ен}$ при корректном учете в нем кинетических поправок.

3.2. Главный спектральный максимум ИРИ

Эта компонента излучения является наиболее интенсивной в спектре ИРИ, проявляющаяся в виде выделяющегося спектрального максимума в области отрицательных отстроек $\Delta f \approx 10-20$ кГц, частота смещения которого относительно частоты ВН увеличивается с ростом $f_{ВН}$. Установлено, что максимальная интенсивность излучения в главном спектральном максимуме имеет слабую зависимость от $f_{ВН}$, возможно несколько возрастающая с ее ростом. Формирование этой компоненты ИРИ происходит одновременно с развитием мелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м и появлением БАО на отраженном от ионосферы сигнале ВН. Кроме того, она обнаруживалась в условиях, когда $f_{ВН}$ на 100-200 кГц превышала значение $f_{с F_2}$, что позволяет связывать область ее генерации с областью верхнегибридного резонанса. /4/.

Наблюдается подавление этой компоненты излучения, когда частота ВН приближается к одной из гармоник гирочастоты электронов. Резонансная кривая поглощения имеет узкую полосу, составляя несколько килогерц для $f_{ВН} \approx 4 f_{еН}$ и уменьшаясь до нескольких сотен герц при $f_{ВН} \approx 7 f_{еН} / \sqrt{14}$. Отмечается, что вне зависимости от значения $f_{ВН}$ верхнечастотный край главного спектрального максимума ИРИ сохраняет свое положение на спектре излучения, находясь в области отстроя $\Delta f \approx 7-8$ кГц. На высоких частотах ВН, где широкополосная компонента ИРИ имеет достаточно слабую интенсивность, спектр излучения в области отрицательных отстрой, особенно вблизи гармоник гирочастоты электронов, чаще всего представляет собой последовательность двух-трех спектральных максимумов, кратных главному, положение которых изменяется при приближении к гирорезонансу. Детальная обработка одного из сеансов наблюдений вблизи пятой гармоники гирочастоты $f_{ВН} - 5 f_{еН} < 150$ кГц (20.09.90) показала, что положение первого минимума в спектре ИРИ между узкополосной компонентой излучения и его главным спектральным максимумом сохранялось практически неизменным: $\Delta f_{1min} \approx (7,5 \pm 0,5)$ кГц, а положение главного спектрального максимума, второго максимума и минимума интенсивности ИРИ между ними могут быть аппроксимированы следующими зависимостями:

$$\Delta f_m = C_1 + K_1 (f_{ВН} - 5 f_{еН})$$

$$\Delta f_{2m} = C_2 + K_2 (f_{ВН} - 5 f_{еН})$$

$$\Delta f_{2min} = C_3 + K_3 (f_{ВН} - 5 f_{еН}),$$

где $C_3 - C_1 \approx 9$ кГц, $K_1 \approx K_3 \approx 2 \cdot 10^{-4}$, а $K_2 \approx 4 \cdot 10^{-4}$. То, что $K_1 \approx K_3 \approx K_2 / 2$, может указывать на каскадный характер процесса возбуждения плазменных волн, ответственных за генерацию первого и второго спектральных максимумов излучения. Кроме того, поскольку величина Δf_{1min} практически не зависит от $f_{ВН}$ в широких пределах ее изменения /5, 14, 29/ и близка к значению нижнегибридной частоты $f_{ЛН}$ для условий проведения эксперимента:

$$f_{ЛН}^2 = f_{рi}^2 / (1 + f_{ре}^2 / \omega_H^2) \approx 7,65 \text{ кГц},$$

где $f_{рi}$ и $f_{ре}$ - ленгмювские частоты ионов и электронов, то это позволяет сделать вывод о существенной роли нижнегибридных

волн в генерации главного спектрального максимума ИРИ. В частности, здесь рассматриваются такие процессы, как распад верхнегибридной волны на нижнегибридную и электромагнитную /30/, электромагнитной волны на верхне и нижнегибридные волны /31/, трехволновый процесс с участием двух верхнегибридных и нижнегибридной волн /32/. В последнем случае генерация главного спектрального максимума излучения происходит по схеме, сходной с генерацией его широкополосной компоненты, где вместо индуцированного рассеяния и взаимодействия волн на ионах имеет место трехволновое распадное взаимодействие. Здесь каскадный характер генерации второго и последующих спектральных максимумов излучения может служить дополнительным аргументом в пользу этой модели.

В разделе 2.1 на основе полученных экспериментальных данных была высказана гипотеза, что в ряде случаев, когда частота ВН близка к гармонике гирочастоты электронов в области взаимодействия, наблюдается появление "полос поглощения" в спектре широкополосной компоненты ИРИ, а иногда - и в области его главного спектрального максимума (см. рис. 4). При этом максимумы в спектре ИРИ кратные главному, могут являться остатками неослабленного излучения его широкополосной компоненты.

В настоящее время без проведения дополнительных целенаправленных экспериментальных исследований трудно дать предпочтение одной из рассмотренных выше гипотез. Здесь так же требуется дальнейшая разработка теории взаимодействия верхне и нижнегибридных волн в F-области ионосферы, возмущенной мощной радиоволной. Отметим, в частности, что только на основе линейной теории такого взаимодействия не удастся объяснить частотный сдвиг главного спектрального максимума относительно $f_{\text{НН}}$ в спектре ИРИ.

3.3. Узкополосная компонента излучения

Она сосредоточена, главным образом, в области малых отрицательных отстроек и обнаруживается практически сразу после включения ВН еще до появления мелкоаэштабных искусственных неоднородностей в возмущенной области ионосферы, развитие которых приводит к сильному ослаблению ее интенсивности. Отмечается, что узкополосная компонента излучения появляется только при достаточно больших уровнях мощности ВН $P_{\text{э}} \geq 10$ МВт, ее интенсивность уменьшается

с ростом $f_{\text{ВН}}$, а также наблюдается обужение ее спектра и уменьшение интенсивности при приближении частоты ВН к гармонике гиросонаса, хотя и в меньшей степени, чем это имеет место для широкополосной компоненты и главного спектрального максимума ИРИ.

Приведенные характеристики узкополосной компоненты излучения дают основание предположить, что ее генерация связана с развитием стрикционной параметрической неустойчивости мощной радиоволны вблизи уровня ее отражения с последующим рассеянием индуцируемых плазменных волн в электромагнитные на ионах плазмы /10/. Исследованию стрикционной параметрической неустойчивости посвящено большое число работ (см., например, /33, 34/), где применительно к ионосфере проанализированы как само развитие неустойчивости, так и спектр возбуждаемой высокочастотной плазменной турбулентности. Нелинейное рассеяние плазменных волн в электромагнитные рассмотрено, например, в монографиях /35 - 37/.

В рамках предлагаемой модели удается легко объяснить появление этой компоненты ИРИ практически сразу после включения ВН и подавление ее с развитием искусственных мелкомасштабных неоднородностей, спектральные характеристики излучения, сильные вариации ее амплитуды от цикла к циклу нагрева и сильную зависимость ее от $f_{\text{ВН}} / 10 /$. Однако более детальное сопоставление теории и эксперимента возможно только после теоретического расчета характеристик излучения на основе предложенной модели.

3.4. Широкополосный максимум излучения в области положительных отстроек

Он обнаруживается в области положительных отстроек $\Delta f \approx 10 - 150$ кГц, когда частота ВН немного превышает значение гармоники и гирочастоты электронов. Установлено, что с ростом величины отстройки от резонанса линейно возрастает частота максимальной интенсивности этой компоненты ИРИ, а также, что существует некоторая граничная частота, ниже которой не наблюдается генерация излучения.

Для интерпретации широкополосного максимума излучения в области положительных отстроек в настоящее время предложен ряд моделей, связанных с четырехволновым взаимодействием волны накачки, плазменных волн и нижнегибридных волн /38-40/. Однако, на

взгляд, имеются определенные трудности объяснения широкой полосы излучения (до 100–120 кГц) этой компоненты ИРИ и значения частоты отсечки Δf_{cutoff} . Альтернативный механизм генерации плазменных волн при $\Delta f > 0$ может определяться неустойчивостью, связанной с существованием в плазме неравновесной, например, кольцевой функции распределения надтепловых электронов /41/. При этом необходимые для объяснения позиции точки отсечки характерные значения энергии электронов должны составлять 50–70 э.в. Надтепловые электроны могут возникать в экспериментах по модификации ионосферной плазмы мощной радиоволной в результате ускорения электронов плазменной турбулентностью /42, 43/. Согласно /43/, энергия ускоренных электронов при частотах ВН не близких к $n f_{\text{en}}$ может достигать значений порядка 30 э.в. Было также установлено, что эффективность ускорения возрастает при $f_{\text{ВН}} \approx n f_{\text{en}}$ /44, 45/. Однако несмотря на выполненные исследования, вопрос о величине характерной энергии ускоренных электронов и возможности формирования неравновесной функции распределения в процессе ускорения остается в настоящее время открытым.

Российская группа исследователей благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку (г р а н т № 93-02-3310), оказанную при выполнении данной работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Thide B., Kopka H., Stubbe P. // Phys. Rev. Lett. - 1982. - V.49. - P.1561-1564.
2. Thide B., Derblom H., Herberg A., Kopka H., Stubbe P. // Radio Sci. - 1984. - V.89. - P.7523.
3. Stubbe P., Kopka H., Thide B., Derblom H. // J. Geophys. Res. - 1984. - V.89. - P.7523-7536.
4. Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emission in the ionosphere. Doctoral dissertation at Uppsala University, I R F Scientific Report, 1989. - 198 p.

- 5 Leyser T.B., Thide B., Derblom H., Hedberg Å., Lundborg B., Stubbe P. Копка Н. // J. Geophys. Res. - 1990. - V.95. - P.17233-17244.
6. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Динамические и спектральные характеристики искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы // Препринт № 185. - Горький: НИРФИ, 1984.
7. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Эззин В.А. и др. // Изв. вузов. - Радиофизика. - 1985. - Т.26, № 4. - С.395.
8. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. // Изв. вузов. - Радиофизика. - 1987. - Т.30, № 2. - С.208.
9. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я., Куракин Е.П. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. - 1987. - Т.27, № 5. - С.758.
10. Сергеев Э.Н., Фролов В.Л. С структуре искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы на частотах ниже частоты волны накачки // Препринт № 324. - Нижний Новгород. - НИРФИ, 1991.
11. Armstrong W.T., Massey R., Argo P., et al. // Radio Sci. - 1990 - V.25. - P.1283-1289.
12. Thide B., Hedberg Å., Fejer J.A., Sulzer M. // Geophys. Res. Lett. - 1989. - V.16. - P.369-372.
13. Leyser T.B., Thide B., Derblom H., Hedberg Å., Lundborg B., Stubbe P., Копка Н. // Phys. Rev. Lett. - 1989. - V. 63. - P.1145-1147.
14. Leyser T.B., Thide B., Goodman S., Waldenvik M., Veszelei E., Grach S.M., Karashtin A.N., Komrakov G.P., Kotik D.S. // Phys. Rev. Lett. - 1992. - V.68. - P.3299-3302.
15. Фролов В.Л. Международный симпозиум по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М.: ИЗМИРАН, 1991. - С.158-159. /Тезисы докладов/.
16. Leyser T.B., Thide B., Waldenvik M., Goodman S., Frolov V.L., Grach S.M., Karashtin A.N., Komrakov G.P., Kotik D.S. // J. Geophys. Res. - 1993. - V.98, No A 10. - P.17547-17606.
17. Фролов В.Л. Геомагнетизм и аэрномия. - 1990. - Т.30, № 6. -

18. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Результаты экспериментальных исследований свойств искусственной ионосферной турбулентности на начальной стадии взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F-слоя ионосферы//Препринт № 284. - Горький: НИРФИ, 1989.
19. Фролов В.Л.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1988. - Т.31, № 10. - С.1164-1168.
20. Беленов А.Ф., Ерухимов Л.М., Сергеев Е.Н., Фролов В.Л. Особенности динамики мелкомасштабных искусственных неоднородностей при больших мощностях волны накачки//Препринт № 314. - Нижний Новгород: НИРФИ, 1991.
21. Ерухимов Л.М., Метелев С.Л., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Урядов В.П., Фролов В.Л. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький: ИФ АН СССР, 1979. - С.7-45.
22. Беленов А.Ф., Ерухимов Л.М., Эюзин В.А., Насыров А.М., Стрелкалов В.А., Фролов В.Л. О динамике мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей//Препринт № 233. - Горький: НИРФИ, 1987.
23. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Фролов В.Л.//Геомагнетизм и аэронавтика. - 1990. - Т.30, № 6. - С.998-1002.
24. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М.//Геомагнетизм и аэронавтика. - 1990. - Т.30, № 1. - С.68.
25. Грач С.М.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1985. - Т.28, № 6. - С.684.
26. Грач С.М., Трахтенгерц В.Ю.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1975. - Т.18, № 9. - С.1288.
27. Грач С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В. Ю. Тепловая параметрическая неустойчивость в ионосферной плазме. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький. - ИФ АН СССР, 1979. - С.46.
28. Шварц М.М., Сергеев Е.Н., Грач С.М., Фролов В.Л. О возможностях исследования искусственной ионосферной турбулентности

- с помощью диагностического радиоизлучения ионосферной плазмы//Препринт № 367. - Нижний Новгород: НИРФИ, 1993.
29. Беленов А.Ф., Белов И.Ф. и др. Стенд Сура. Обзор результатов исследований//Препринт № 343.-Нижний Новгород: НИРФИ, 1992.
 30. Leuser T.V. // Geophys. Res. Lett. - 1991. - V.18, No 3. - P.408.
 31. Будько М.И., Васьков В.В.//Препринт № 95(1042). - Москва : ИЗМИРАН, 1993.
 32. Грач С.М., Шварц М.М. Третий международный симпозиум по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. Тезисы докладов. - М.: ИЗМИРАН, 1991. - С.89-90.
 33. Альбер Я.И., Кротова Э.Н., Митяков Н.А. и др.//ЖЭТФ. - 1974. - Т.66, вып.2. - С.574.
 34. Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1975. - Т.18, № 1. - С.27.
 35. Цытович В.Н. Теория турбулентной плазмы. - М.: Атомизд в т, 1971.
 36. Ситенко А.Г. Электромагнитные флуктуации в плазме. - Харьков: ХГУ, 1965.
 37. Елезняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. - М.: Наука, 1977.
 38. Будько И.И., Васьков В.В.//Геомагнетизм и аэрномия. - 1992. - Т. 32, № 1. - С.80.
 39. Goodman S., Thide B., Erukhimov L.M. // Geophys. Res. Lett. - 1993. - V.28. - P.470.
 40. Tripathi V.K., Liu C.S. // J. Geophys. Res. - 1993. - V.98. - P.1719.
 41. Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya. // Solar Phys. - 1975. - V.43. - P.431.
 42. Gurevich A.V., Pimant Ya.S., et. al. // J. Atm. Terr. Phys. - 1985. - V.47, No 11. - P.1057.

43. Грач С.М., Митяков Н.А., Трахтенгерц В.Д. // Физика плазмы. - 1986. - Т.12, № 6. - С.693.
44. Березин И.В., Васильков В.В. и др. XVI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. - Харьков, 1990. - Ч.1. - С.150.
45. Komrakov G.P., Grach S.M., et. al. XXIV General U R S I Assembly, Kyoto, 1993, Abstracts. - P.398.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
1. ВВЕДЕНИЕ.....	3
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	5
2.1. Вариации спектральных характеристик широкополосной компоненты ИРИ.....	6
2.2. Характеристики широкополосного максимума излучения в области положительных отстроек.....	16
2.3. Несколько замечаний о характеристиках некоторых других компонент ИРИ.....	20
2.4. Динамика развития различных компонент ИРИ.....	23
2.5. Зависимость интенсивности различных спектральных компонент ИРИ от мощности ВН.....	35
2.6. Замечание о природе одного типа быстрых вариаций амплитуды ИРИ на частоте вблизи его главного спектрального максимума.....	42
3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	45
3.1. Широкополосная компонента излучения.....	45
3.2. Главный спектральный максимум ИРИ.....	46
3.3. Узкополосная компонента излучения.....	48
3.4. Широкополосный максимум излучения в области положительных отстроек.....	49
ЛИТЕРАТУРА.....	50