

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

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

Препринт № 185

ДИНАМИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ
ПЛАЗМЫ

Л.М.ЕРУХИМОВ

В.Л.ФРОЛОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований динамики развития искусственного радиоизлучения плазмы F-слоя ионосферы при воздействии на нее мощным КВ-излучением. Приводятся данные о характерных временах развития и релаксации радиоизлучения, зависимости интенсивности радиоизлучения от мощности волны накачки и спектральные измерения его интенсивности в области расстроек $\Delta f = -110 \pm 30$ кГц относительно частоты возмущающего передатчика. На основе полученных экспериментальных данных рассматривается модель образования искусственного радиоизлучения.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- ИРИ — искусственное радиоизлучение ионосферы
 V_H — волна накачки
 VO — возмущенная область
 ИИТ — искусственная ионосферная турбулентность
 AO — аномальное ослабление
 BH — вторая гармоника
 P — эффективная мощность излучения волны накачки
 \bar{P} — с учетом линейного поглощения радиоволны в нижней ионосфере)
 F — частота модуляции волны накачки
 $|\Delta f^-|, |\Delta f^+|$ — соответственно, обозначение отрицательных ($f_{ИРИ} < f_{BH}$) и положительных ($f_{ИРИ} > f_{BH}$) расстроек ИРИ.

Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ), возникающее при воздействии на F-слой пучком мощных КВ радиоволн, было обнаружено в экспериментах на стенде "Тромсе" (Северная Норвегия) [1, 2]. С 1983 г. исследования этого излучения проводятся в НИРФИ (г. Горький) [3, 4]. Уже в первых экспериментах было установлено, что ИРИ в F-слое ионосферы генерируется только при воздействии мощными волнами O-поляризации в условиях их отражения от ионосферы, само соответствует O-моду распространения, имеет шумовой характер и занимает интервал частот от $f_{\text{ВН}} + 30 \text{ кГц}$ до $f_{\text{ВН}} - 80 \text{ кГц}$ ($f_{\text{ВН}}$ - частота волны накачки)⁺. Было также установ-

⁺) Данные о ширине спектра ИРИ относятся к эффективной мощности нагрева $P_3 = P_0 G = 20 \text{ МВт}$ (P_0 - мощность передатчика, G - коэффициент усиления антенны); ширина спектра определялась на уровне $\approx -30 \text{ дБ}$ относительно интенсивности ИРИ при расстройке $\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_{\text{ВН}} = -12 \text{ кГц}$.

лено, что излучение наблюдается на расстояниях до 100 км и более от места расположения нагревного стенда [1, 4].

Поскольку наиболее вероятным источником ИРИ являются плазменные волны, возбуждаемые ВН вблизи уровня ее отражения за счет стрикционной и тепловой параметрических неустойчивостей [5-7], изучение свойств искусственного излучения является средством получения информации о динамике как высокочастотных плазменных волн, так и ответственной за их образование и обратную трансформацию низкочастотной искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ).

Целью настоящей работы является по возможности полное изложение экспериментальных результатов исследования динамических и спектральных характеристик ИРИ, полученных в последнее время в НИРФИ на нагревном стенде "Зименки". Эффективная мощность излучения ВН 0-поляризации составляла $P_3 = P_0 G = 20$ МВт при ширине диаграммы направленности зенитной антенны $12^\circ \times 15^\circ$ ($G \approx 130$); частота излучения $f_{ВН} = 5750$ кГц. Прием ИРИ осуществлялся также с помощью остронаправленной зенитной антенны круговой поляризации шириной $9^\circ \times 12^\circ$ ($G \approx 200$), которая была расположена на удалении 2 км от нагревного стенда. Более узкая диаграмма направленности приемной антенны позволяла проводить исследование свойств ИРИ, относящихся к центральной части возмущенной области (ВО) ионосферы по диаграмме направленности антенны нагревного стенда. Принимаемое

радиоизлучение усиливалось с помощью радиоприемников типа "Катран", обладающих большим динамическим диапазоном по уровню входных сигналов. Как правило, использовалась полоса приема $\Delta f_{\Pi} = 1$ кГц. Регистрация исследуемого излучения велась на ленте быстродействующего многоканального самописца (типа Н-338-6П), постоянная времени детектора составляла $\tau_{\text{дет}} = 0,05$ с.

В настоящей работе рассматривается только поведение ИРИ при временах, больших 0,2 с с начала воздействия и на расстройках $|\Delta f| > 5$ кГц. При этом влияние ВН оказывалось несущественным даже без принятия специальных мер ее подавления на входе приемников. Мы также не будем подробно останавливаться на характеристиках ИРИ в области положительных расстроек ($f_{\text{ИРИ}} > f_{\text{ВН}}$), так как его параметры еще в недостаточной степени исследованы.

1. ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ИРИ

На рис. 1а-г приведено несколько примеров одновременной регистрации принимаемых сигналов отраженной от ионосферы ВН ($f_{\text{ВН}} = 5750$ кГц) и ИРИ при различных величинах расстройки Δf ⁺). Анализ подобного рода из-

⁺) Резкие выбросы на записях сигналов ИРИ являются реакцией радиоприемных устройств на включение ВН. Именно эти выбросы не дают возможности проведения уверенных измерений в первые 0,2 с после начала воздействия.

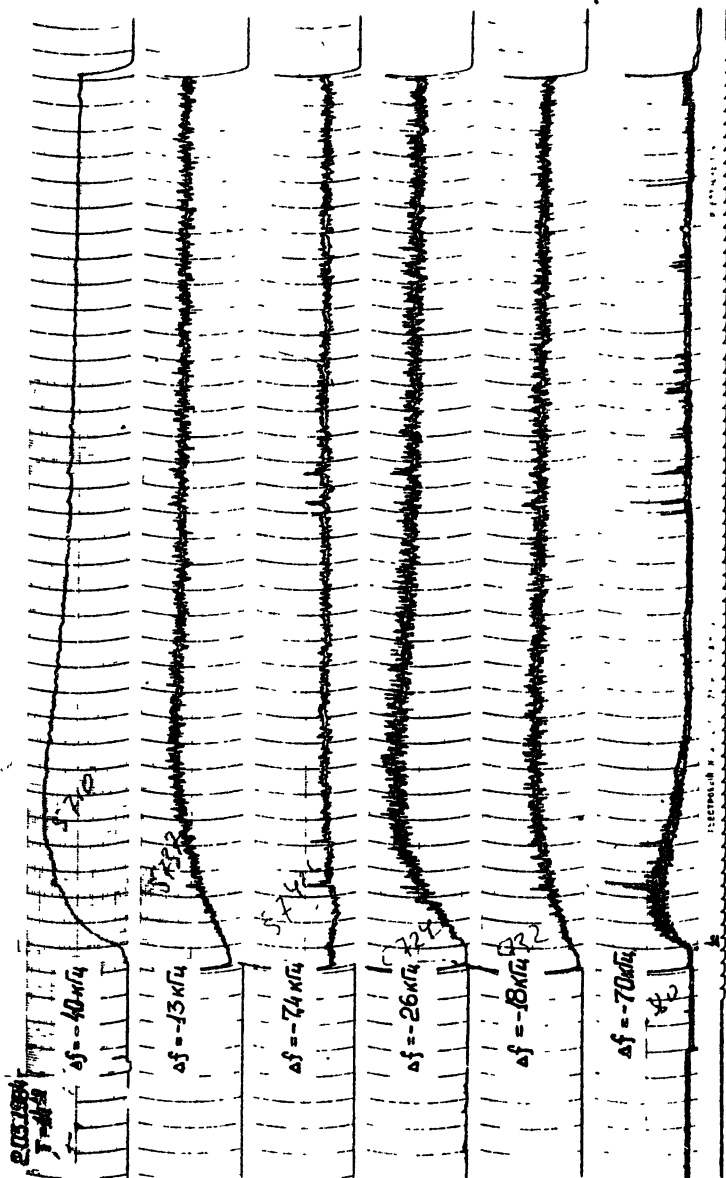


Рис. 1а)

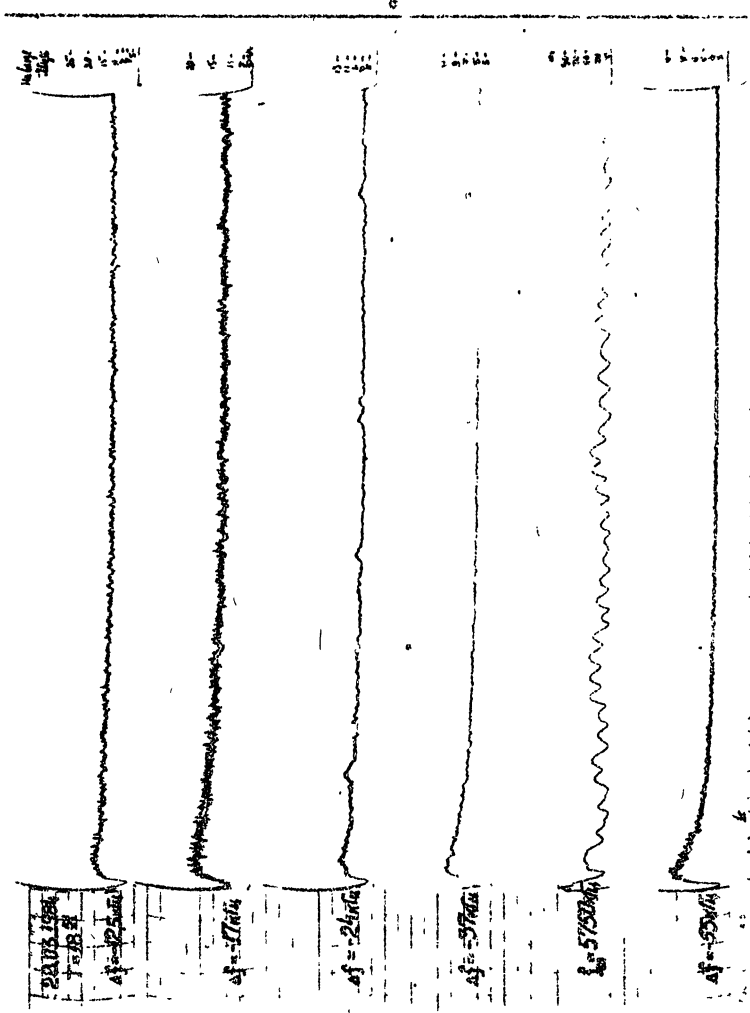


FIG. 16)

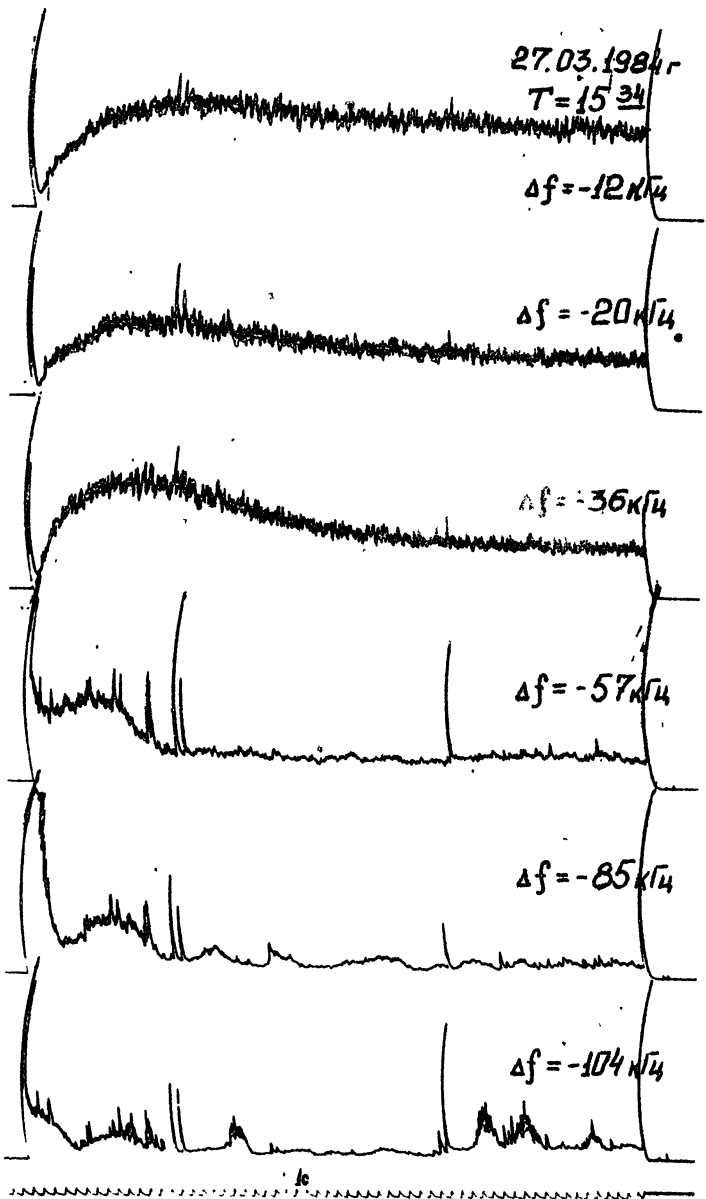


Рис. 1в)

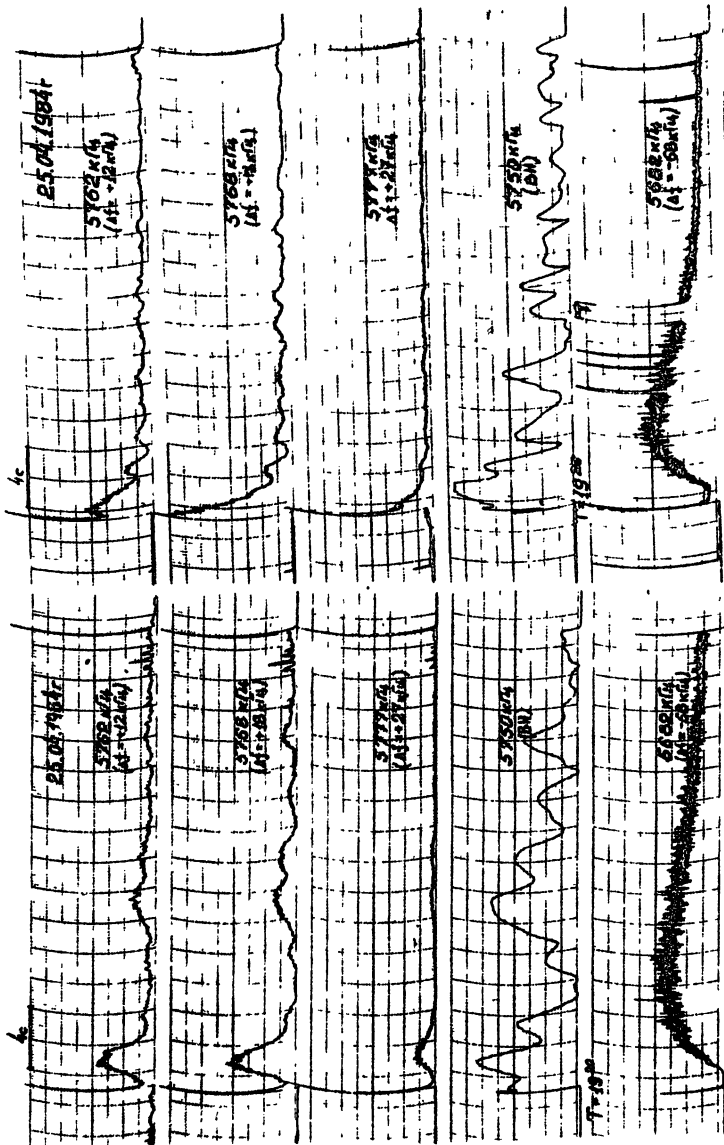


Рис. 1г)

...лений позволил установить ряд закономерностей, характеризующих развитие искусственного радиоизлучения в омуленной области (ВО) ионосферной плазмы. В первую очередь обнаруживается существование максимума амплитуды сигнала ИРИ с последующим выходом ее на более низкий стационарный уровень, если воздействие продолжается достаточно длительное время [3, 4]. Положение максимума во временном ходе интенсивности ИРИ (характерные времена роста и спада излучения), а также величина перепада амплитуды сигнала от максимального уровня к стационарному зависят как от расстройки Δf и мощности ВН, так и от предыстории нагрева ионосферы. Рассмотрим раздельно влияние этих параметров на характеристики ИРИ.

1. Влияние предыстории воздействия. Согласно проведенным исследованиям временные характеристики ИРИ в значительной степени зависят от длительности паузы $T_{\text{п}}$ между циклами нагрева. На рис. 2 приведена усредненная по нескольким циклам наблюдений зависимость времени достижения максимума интенсивности излучения $\tau_{\text{м}}$ от величины $T_{\text{п}}$ (при скважности излучения ВН 3+4). Можно видеть, что предыстория нагрева проявляется даже при длительности паузы между последовательными циклами нагрева, достигающей 7 мин. При $T_{\text{п}} < 3$ мин наблюдается значительное усиление зависимости $\tau_{\text{м}}$ от $T_{\text{п}}$, и для $T_{\text{п}} < 30$ с времена развития ИРИ при всех расстройках не превышают 1-2 с. Полученные данные указывают на тот факт, что действие предыстории нагрева определяется не

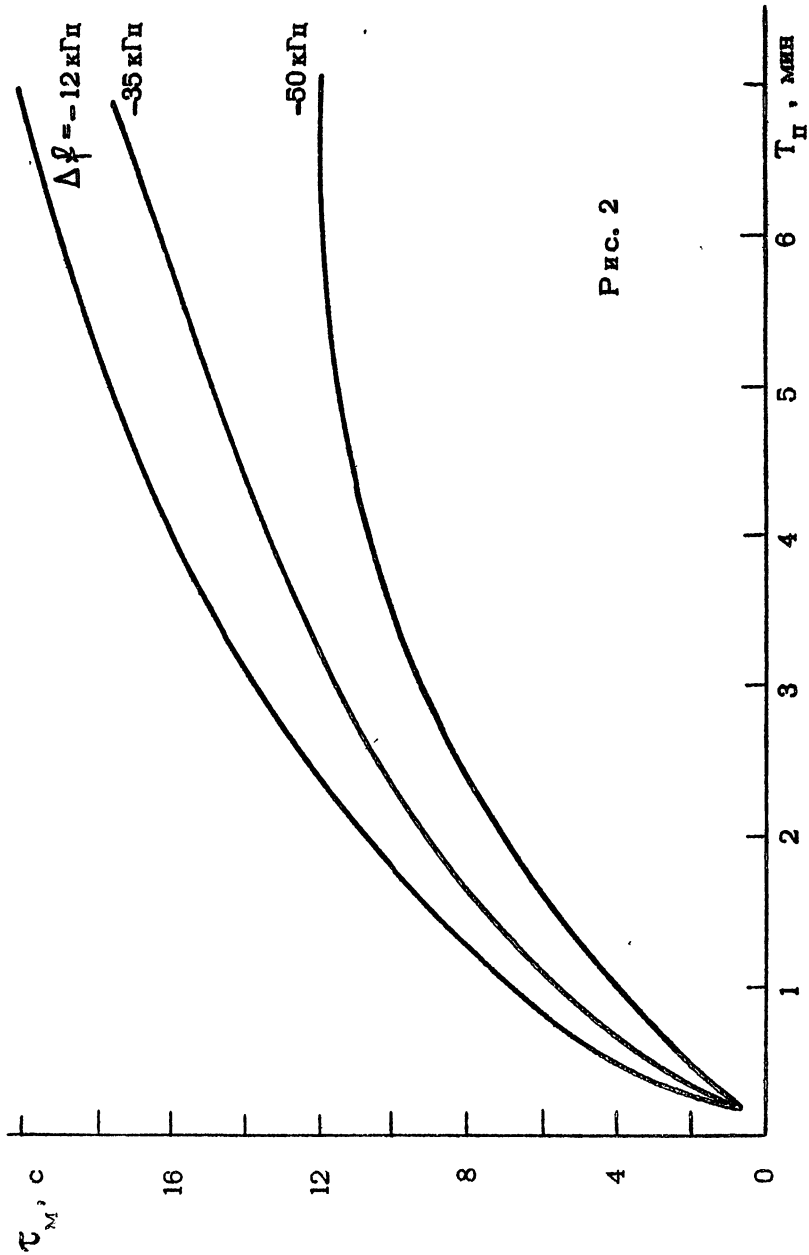


Рис. 2

только наличием мелкомасштабных ($l_{\perp} < 50$ м) искусственных неоднородностей ионосферной плазмы, влияние которых, по-видимому, проявляется в резком уменьшении времени τ_M при $T_{\Pi} < 30$ с и которые ответственны за трансформацию ВН в плазменные волны [6]. Оно также должно быть связано и с крупномасштабными ($l_{\perp} \geq 1$ км) возмущениями электронной концентрации, имеющих времена релаксации $\tau_{\text{рел}}^N \approx 3 + 10$ мин в ВО ионосферы⁺).

В описываемых экспериментах мы, как правило, выбирали длительность излучения ВН не более 0,5 – 1 мин при величине $T_{\Pi} \sim 2 + 3$ мин, чтобы по возможности ослабить влияние предыстории нагрева. При этом, как следует из рис. 2, хотя времена развития ИРИ по сравнению с более длительной паузой несколько уменьшаются, однако общий вид кривых и амплитудные соотношения между ними сохраняются (происходит некоторое временное сжатие исследуемого сигнала). С другой стороны, в ряде случаев эффект "перегрева" ионосферной плазмы был использован для разделения наблюдаемых явлений, например (как и в [8]), для подавления стрикционного самовоздействия ВН в условиях развитой мелкомасштабной ИИТ.

2. Зависимость τ_M от расстройки. При мощности ВН

⁺ Следует заметить, что характерное время релаксации собственно ИРИ после выключения ВН составляет ~ 6 мс [4] и соответствует времени столкновительной диссипации плазменных волн: $\tau_{\text{дисс}} \approx (\nu_e/2)^{-1}$, где $\nu_e \approx 300$ Гц – эффективная частота соударений электронов на высоте отражения мощного радиоизлучения.

$P_3 \approx 10 + 20$ МВт в области отрицательных расстроек наибольшее значение τ_M ($\tau_M \approx 10 + 15$ с) имеет место для $|\Delta f^-| \approx 10 + 20$ кГц. При меньших величинах $|\Delta f^-|$ максимум ИРИ выражен либо очень слабо, либо вовсе не обнаруживается на записи сигнала (см., например, рис. 1а). С ростом величины расстройки до $|\Delta f^-| \approx 50-60$ кГц τ_M плавно уменьшается до значений $5 + 10$ с. При дальнейшем увеличении $|\Delta f^-|$ наступает резкое уменьшение τ_M до величины $\sim 1+3$ с в области расстроек $|\Delta f^-| = 80 + 100$ кГц (рис. 3).

В области положительных расстроек $|\Delta f^+|$ времена, отвечающие максимуму интенсивности ИРИ, как правило, не превышали 1 с, а характер поведения интенсивности излучения $I(t)$ во времени был аналогичен наблюдавшемуся при расстройках $|\Delta f^-| = 80-100$ кГц. Последнее можно видеть из рис. 4, где вместе с сигналом ВН приведена одновременная запись ИРИ на сетке частот. Из рисунка, кроме сходства временных характеристик сигналов при $|\Delta f^+|$ и $|\Delta f^-| > 80$ кГц, существенно отличающихся от свойств ИРИ при $|\Delta f^-| = 10 + 60$ кГц, хорошо виден часто имеющий место флуктуирующий характер принимаемого излучения при положительных и больших отрицательных отстройках, не коррелирующий с флуктуациями отраженного от ионосферы сигнала ВН. Последнее является важной особенностью искусственного излучения, на которой мы остановимся ниже подробнее.

3. ИРИ и аномальное ослабление (АО) ВН. Важным

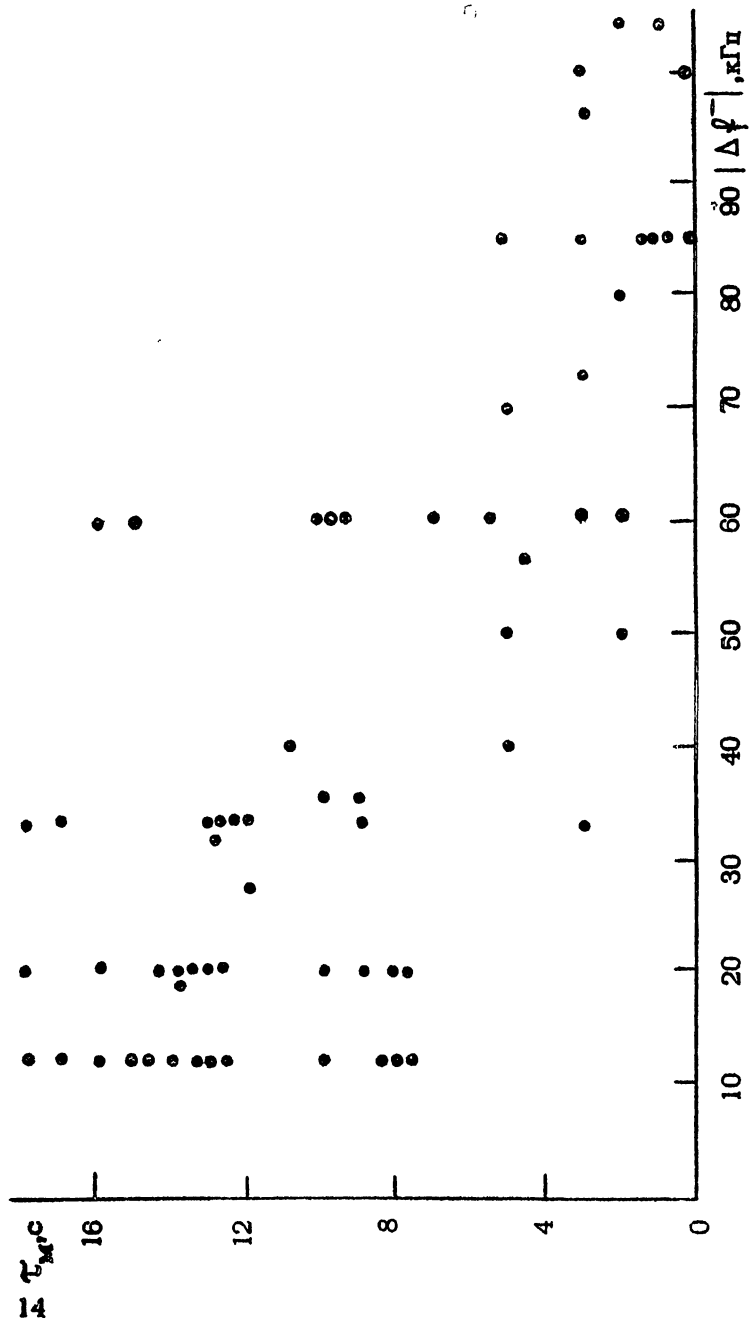


Рис. 3

28.03.1984г

$T = 16^{25}$

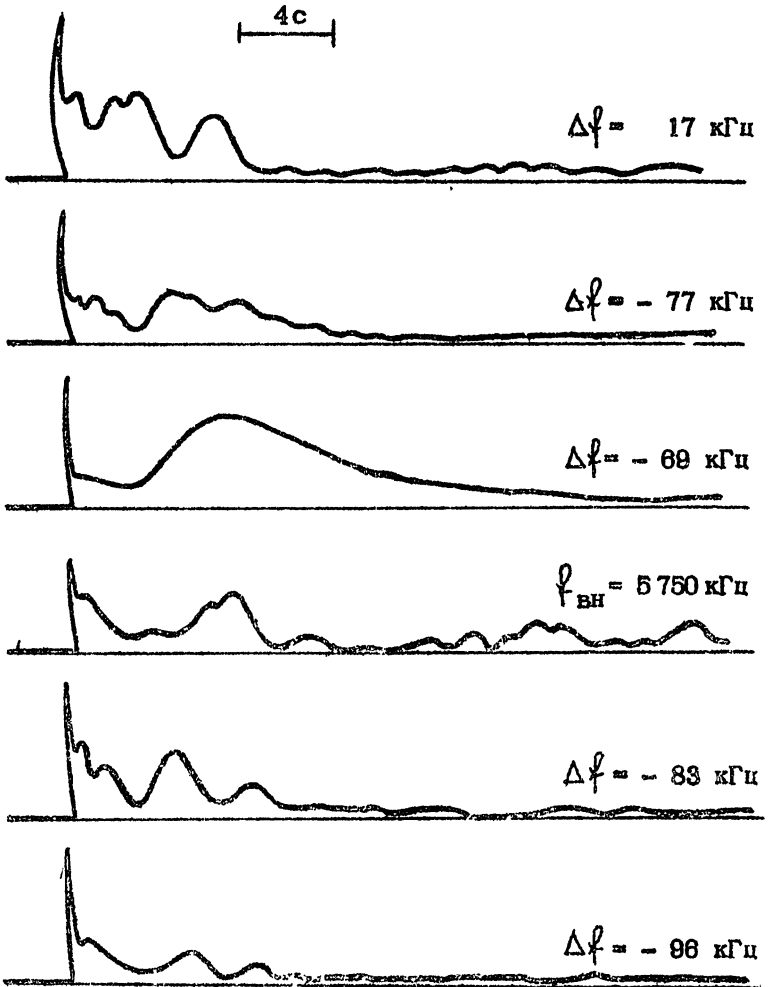


Рис. 4

моментом в понимании динамики ИРИ служит определение его взаимосвязи с развитием АО радиоволн в ВО ионосферы, которое (см., например, [6]) является результатом трансформации на искусственных мелкомасштабных ($t_{\perp} < \lambda_0$, где $\lambda_0 \approx 50$ - длина волны мощного радиоизлучения) неоднородностях вблизи уровня отражения ВН. Обратимся к рис. 1б, г, з (см., также рис. 6), где приведена динамика ИРИ для положительных и отрицательных расстройек совместно с записями сигнала ВН. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что времена развития АО соответствуют характерным временам роста ИРИ ($\tau_{AO} \approx \tau_M$) при $7 \text{ кГц} \leq |\Delta f| < 70 \text{ кГц}$, в то время как для больших отрицательных $|\Delta f| \geq 80 \text{ кГц}$ и положительных расстройек развитие АО приводит к значительному уменьшению интенсивности принимаемого излучения. Такое "слежение" динамики ИРИ за развитием АО хорошо видно на рис. 5, где представлено поведение сигналов после длительной паузы (пунктир), характеризующее большими временами τ_{AO} и τ_M , и после кратковременного ($T_{\text{п}} = 20 \text{ с}$) прекращения нагрева (сплошная линия). Во втором сеансе нагрева видно синхронное уменьшение времени развития для ИРИ и АО. Следует заметить, что развитие ИРИ может иметь место и в отсутствие для ВН видимого АО [4]. Однако в этом случае развитие максимума излучения не наблюдается и рост интенсивности ИРИ до стационара носит монотонный характер.

4. Зависимость интенсивности ИРИ от мощности ВН.

4c

12.04.1984г.

$T = 18^{46}$

$T_{II} = 20c$



Рис. 5

Как показали измерения [4], пороговая мощность генерации излучения (при условии, что ИРИ является пороговым эффектом) не превышает для расстройек $|\Delta f^{-1}| = 10 \pm 50$ кГц в обычных условиях значения $\tilde{P}_{3, \text{пор}} \approx 1 \text{ МВт}$ и, согласно одновременным измерениям, заведомо ниже пороговой мощности появления видимого АО ВН^{+) . Для мощностей ВН $\tilde{P}_3 > \tilde{P}_{3, \text{пор}}$ обнаруживаются определенные закономерности в изменении интенсивности ИРИ. Обратимся к рис. 6, на котором в зависимости от \tilde{P}_3 представлены амплитудно-временные характеристики сигналов отраженной от ионосферы ВН и искусственного излучения при различных величинах $|\Delta f^{-1}|$. В первую очередь следует отметить исчезновение характерного максимума ИРИ при уменьшении мощности ВН ниже значения $\tilde{P}_3 > 2 \pm 3 \text{ МВт}$ и отсутствие зависимости (или очень слабую зависимость) стационарного уровня излучения от мощности при $\tilde{P}_3 > 2 \pm 3 \text{ МВт}$. Этот уровень \tilde{P}_3 соответствует пороговому значению, необходимому для генерации мелкомасштабной ИИТ, ответственной за АО отраженных от ионосферы сигналов и ракурсное рассеяние КВ и УКВ [9].}

Согласно экспериментальным данным, наиболее часто зависимость интенсивности ИРИ в максимальной фазе $I_{\text{п}}^{\text{от}}$ от мощности ВН близка к степенному закону. При такой аппро-

+) Значение \tilde{P}_3 меньше величины $P_3 = P_0 G$ на фактор $e^{-\Gamma}$, где Γ определяется линейным затуханием радиоволн в ионосфере на пути их распространения до точки отражения.

23.03.1984 г.

\tilde{P}_Θ

$T = 20^{30}$

20 МВт

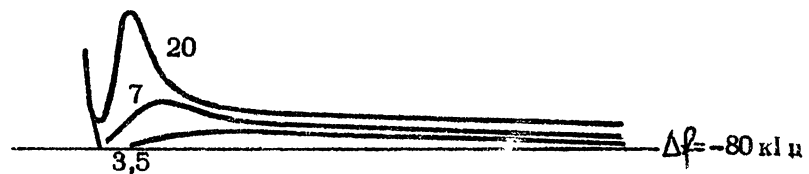
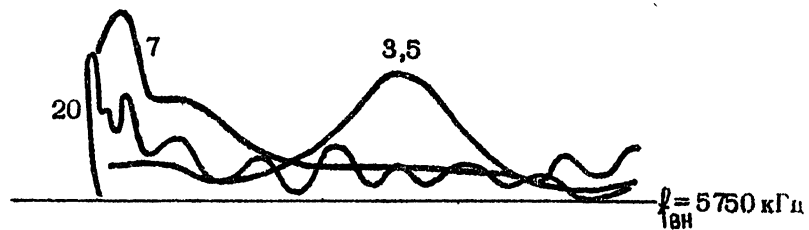
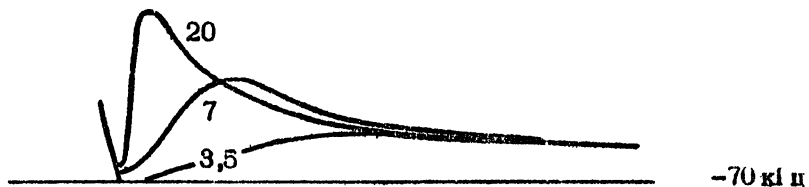
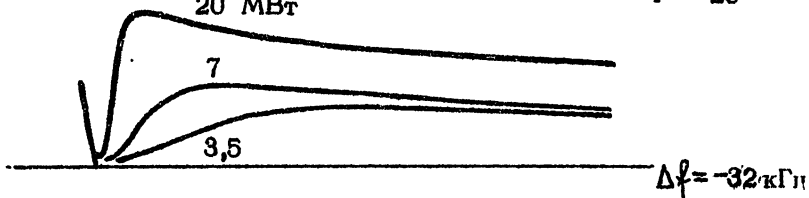


Рис. 6

ксимации $I_m \propto \tilde{P}_3^\alpha$ для отстроек $20 \text{ кГц} \leq |\Delta f^-| < 70 \text{ кГц}$ наиболее характерно значение показателя степени $\alpha \approx 1$, однако в некоторых случаях (особенно при малых уровнях мощности \tilde{P}_3 и с ростом $|\Delta f^-|$) величина α может увеличиваться и лежать в пределах от 1 до 2. В области больших отрицательных отстроек ($|\Delta f^-| > 70 \text{ кГц}$), как правило, значение показателя степени $\alpha \approx 2$. Более сложно ведет себя зависимость $I(\tilde{P}_3)$ для стационарного уровня ИРИ. Уже отмечалось, что существует некоторое значение $\tilde{P}_3^* \approx 3 \text{ МВт}$, при превышении которого интенсивность ИРИ перестает возрастать ($\alpha \approx 0$). В области $\tilde{P}_3 < \tilde{P}_3^*$ с уменьшением мощности \tilde{P}_3 величина α начинает расти (более быстро для больших отстроек), достигая значений $\alpha \approx 2$ при малых уровнях мощности. Такой характер зависимости $I_{CT}(\tilde{P}_3)$ отвечает отстройкам $10 \text{ кГц} \leq |\Delta f^-| < 70 \text{ кГц}$. Для более далеких отрицательных отстроек насыщение стационарного уровня ИРИ при $\tilde{P}_3 \leq 20 \text{ МВт}$ не наблюдается и $\alpha \approx 1+2$. Указанная зависимость $I_{CT}(\tilde{P}_3)$ проявляется в среднем. В каждом же конкретном случае величины α и \tilde{P}_3^* могут варьироваться и зависеть более сложным образом от величины $|\Delta f^-|$. Это можно видеть из рис. 7, где приведены результаты одной серии измерений.

В настоящее время еще недостаточно полно исследована зависимость $I(\tilde{P}_3)$ в области $|\Delta f^+|$. Однако имеющиеся данные указывают на схожесть поведения положительных и дальних отрицательных отстроек. Для $|\Delta f^+|$,

23.03.1984г. T = 20²⁵ ÷ 20⁴⁵

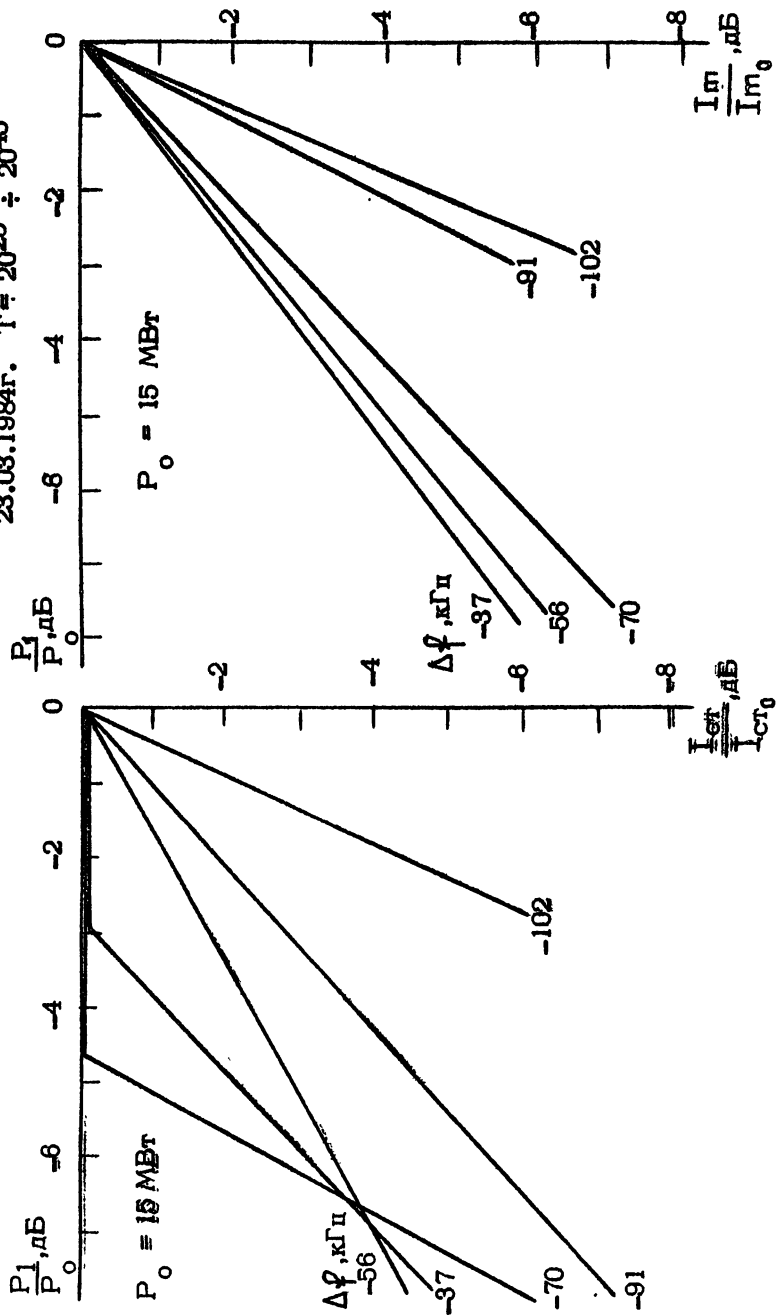


Рис.7

по-видимому, характерной пороговой мощностью генерации ИРИ следует считать \tilde{P}_3^* , при которой начинается формирование максимума во временном ходе интенсивности излучения.

При уменьшении мощности ВН кроме изменения интенсивности ИРИ меняется и характер поведения сигнала. Это проявляется в нарастании времени развития излучения: $\tau_M \propto \tilde{P}_3$, что, в целом, отвечает зависимости от \tilde{P}_3 времени развития мелкомасштабной ИИТ [9]. Кроме этого, при уменьшении \tilde{P}_3 область отрицательных расстройек, где проявляются флуктуации амплитуды ИРИ, расширяется в сторону меньших $|\Delta\varphi^-|$, а уровень флуктуаций на положительных и дальних отрицательных расстройках значительно возрастает. С уменьшением мощности \tilde{P}_3 , как уже отмечалось выше, исчезает регулярный временной максимум интенсивности излучения.

На рис. 8 представлен ряд осциллограмм принимаемого излучения для $|\Delta\varphi^-| = 70$ кГц при различных \tilde{P}_3 . Видно, что при $\tilde{P}_3 \approx 5$ МВт флуктуирующий характер сигнала ИРИ становится обычным явлением. Для более близких отстроек $|\Delta\varphi^-| = 10 \div 50$ кГц флуктуации ИРИ выражены гораздо слабее и проявляются только при малой надпороговости мощности ВН. Характерный период флуктуаций излучения совпадает с периодом флуктуаций принимаемого сигнала ВН (см., например, рис. 1г, 4), хотя точного совпадения осциллограмм ВН и ИРИ не наблюдается. По сопоставлению характера флуктуации ИРИ на сетке частот

28.03.1984г.

$T = 16^{30} - 17^{00}$

$\Delta f = - 70 \text{ кГц}$

A_i
мкВ

$\tilde{P}_g = 15 \text{ МВт}$

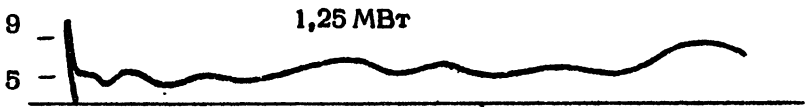
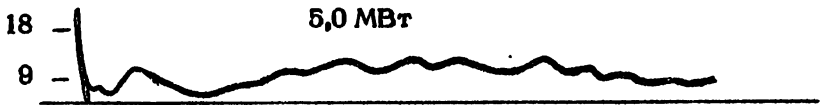
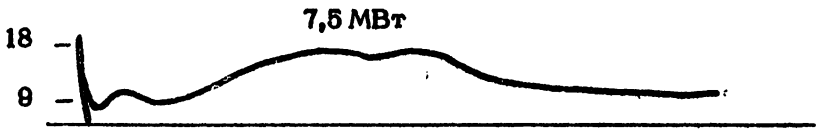


Рис. 8



СНИМ № 3023 ГОС176...-МС. А.В.С.1
 ИСПОЛНЕНИЕ № 3023 ГОС176...-МС. А.В.С.1

Рис. 9

можно сделать заключение, что радиус частотной корреляции принимаемого излучения не превышает 6–10 кГц.

В заключение следует заметить (см. рис. 9), что даже при малых $\tilde{P}_3 \approx 2,5$ МВт уровень ИРИ в максимумах флуктуаций сигнала может значительно превышать стационарный уровень излучения, почти сравниваясь по амплитуде с интенсивностью ИРИ в максимальной фазе при $\tilde{P}_3 = 15$ МВт.

II. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИРИ

1. Спектр излучения вблизи частоты ВН. Взаимосвязь развития отдельных спектральных составляющих ИРИ более полно можно проследить, изучая динамический спектр излучения. Результаты этих исследований рассматриваются в настоящем разделе, где на всех представленных рисунках спектральная интенсивность выражена в единицах потока излучения S [Вт/м².Гц] на уровне поверхности Земли.

На рис. 10а приведен один из примеров динамического спектра ИРИ, на котором индексами 0, 1, 3, 8, С обозначена последовательность спектров ИРИ через 0,2 с, 1 с, 3 с, 8 с после включения ВН и при достижении стационарного значения интенсивности излучения (с). К сожалению, в силу указанных ранее технических причин, данные о $S(f)$ в области $|\Delta f| < 5$ кГц отсутствуют. Из рисунка можно

17.03.1983г.

T = 15 20

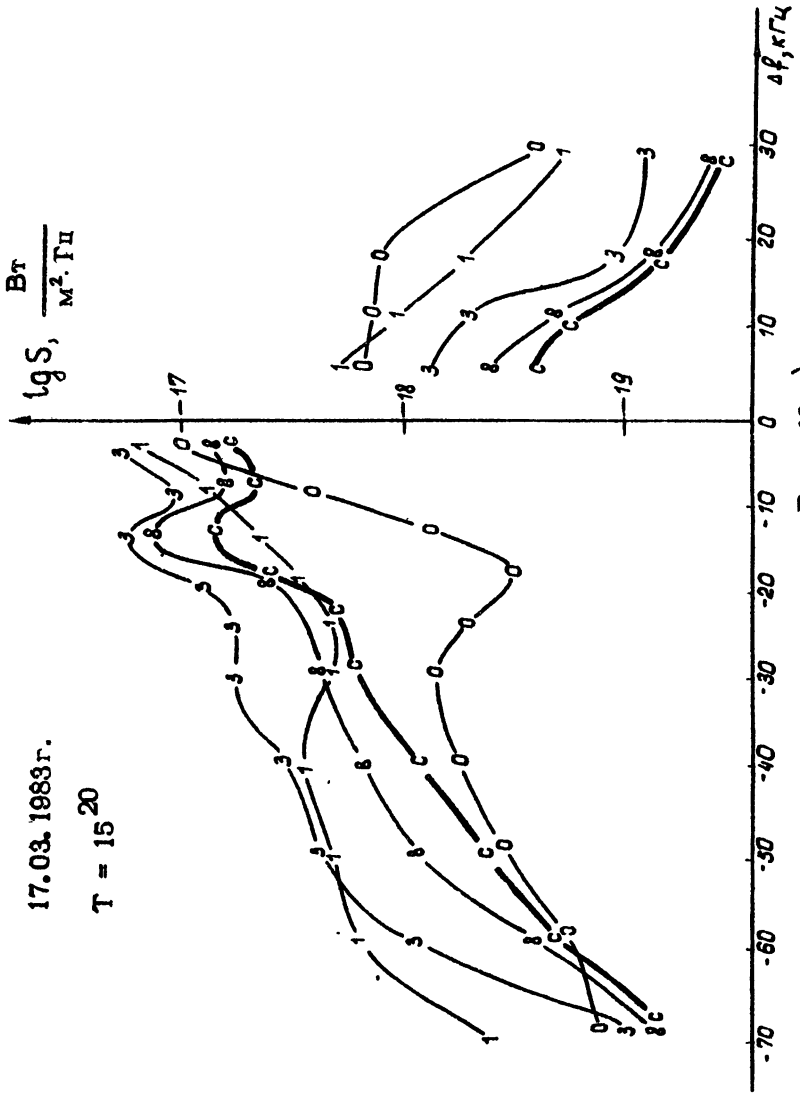


Рис. Ю-а)

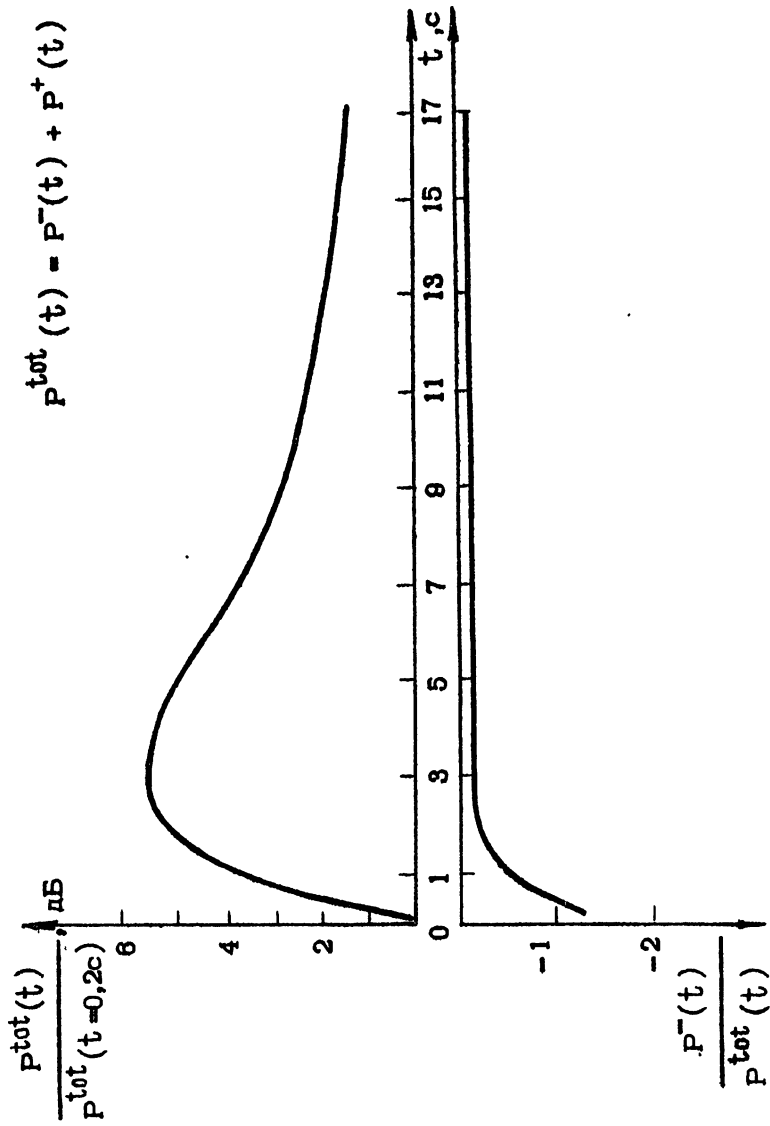


Рис. 106)

видеть, что через 0,2 с после включения ВН в области малых отрицательных отстроек наблюдается выделяющаяся линия ИРИ, максимум при $|\Delta f^-| \approx 30$ кГц и достаточно мощное излучение (около 25% всей принятой энергии ИРИ) в области $|\Delta f^+|$.

При продолжении воздействия на ионосферную плазму мощным радиоизлучением в области $|\Delta f^-|$ в течение 3 с происходит увеличение интенсивности и уширение спектра излучения. Отчетливо видно и появление новой "линии" излучения при $|\Delta f^-| \approx 12$ кГц. При $t > 3$ с наблюдается уменьшение S по всему диапазону отстроек Δf и переход к стационарному спектру. Заметим, что время 3 с здесь соответствовало времени аномального ослабления ВН.

В области $|\Delta f^+|$ интенсивность излучения с течением времени непрерывно уменьшается и тем сильнее, чем больше Δf , составляя для стационарного спектра только 3% от полной мощности излучения. При этом даже для максимального уровня сигнала интенсивность ИРИ при $\Delta f = +10$ кГц на 10-20 дБ ниже интенсивности излучения при $\Delta f = -10$ кГц. На рис. 10б построено для спектра, изображенного на рис. 10а, изменение во времени полной мощности излучения (P^{tot}) и мощности, заключенной в области $|\Delta f^-|$ (P^-). Видно, что интегральная интенсивность ИРИ максимальна для $t = 3$ с, превышая на 4 дБ уровень излучения для стационарной фазы развития⁺.

⁺) Необходимо иметь в виду, что здесь не учтена доля энергии в спектре ИРИ при малых ($|\Delta f| < 5$ кГц) расстройках, хотя ее вклад может быть существенным.

Детальные исследования свойств ИРИ, проведенные в январе-апреле 1984 г., показали, что максимумы в спектре ИРИ при $|\Delta f^-| \approx 12$ кГц и $|\Delta f^-| \approx 35$ кГц наблюдаются регулярно, а в ряде случаев они весьма значительны. На рис. 11 приведен один из примеров типичного динамического спектра ИРИ, снятого в области $|\Delta f^-|$. Можно видеть, что, если при $t = 1$ с излучение главным образом сосредоточено в области малых отрицательных расстроек, то уже при $t = 3$ с мы наблюдаем развитие максимумов в спектре ИРИ. Максимум при $|\Delta f^-| \approx 12$ кГц хорошо выделяется на спектре и при переходе к стационарной фазе, в то время как второй (при $|\Delta f^-| \approx 30-40$ кГц), как правило, в значительной степени сглаживается и его интенсивность обычно на 7-10 дБ ниже значения $S(|\Delta f^-|) \approx 12$ кГц). В редких случаях последнее соотношение может нарушаться, как, например, на рис. 12, где $S(|\Delta f^-| = 40 \text{ кГц}) > S(|\Delta f^-| = 12 \text{ кГц})$, а сама "линия" излучения может захватывать широкую область расстроек $|\Delta f^-| = 30+60$ кГц.

На рис. 13, 14 приведены динамические спектры ИРИ при разных уровнях \tilde{P}_3 мощности ВЧ. Анализ проведенных измерений показывает, что форма спектра излучения для $10 \text{ кГц} \leq |\Delta f^-| < 70 \text{ кГц}$ сохраняется при уменьшении \tilde{P}_3 вплоть до значений, близких к 1 МВт. И только при слабой надпороговости (см. [4]) ширина спектра ИРИ значительно уменьшается и излучение наблюдается при расстройках до $|\Delta f^-| \approx 8+15$ кГц.

По предварительным данным максимум в спектре ИРИ

17. 02. 1984 г.

$T = 14^{\circ} \text{C}$

$\tilde{P}_s = 8 \text{ МВт}$

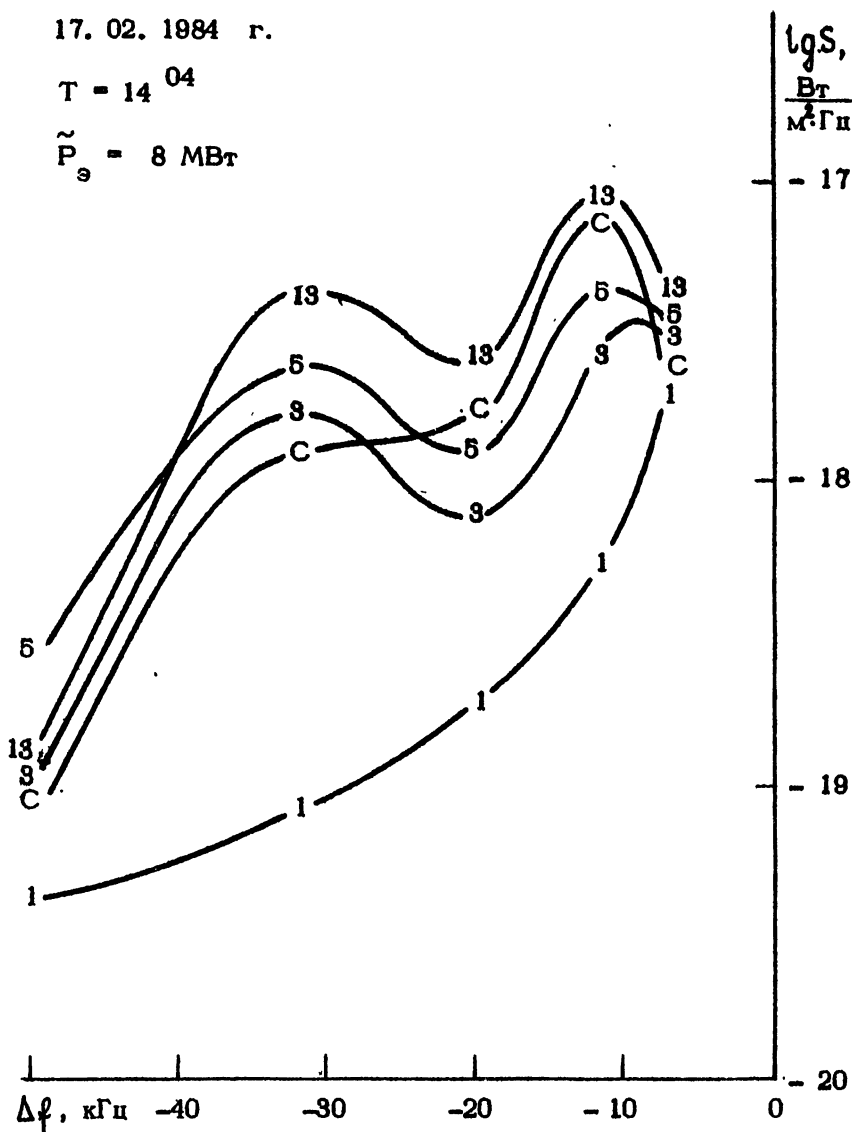


Рис. 11

2.09.1984г.

$T = 14^{52}$

$\tilde{P}_e = 8 \text{ МВт}$

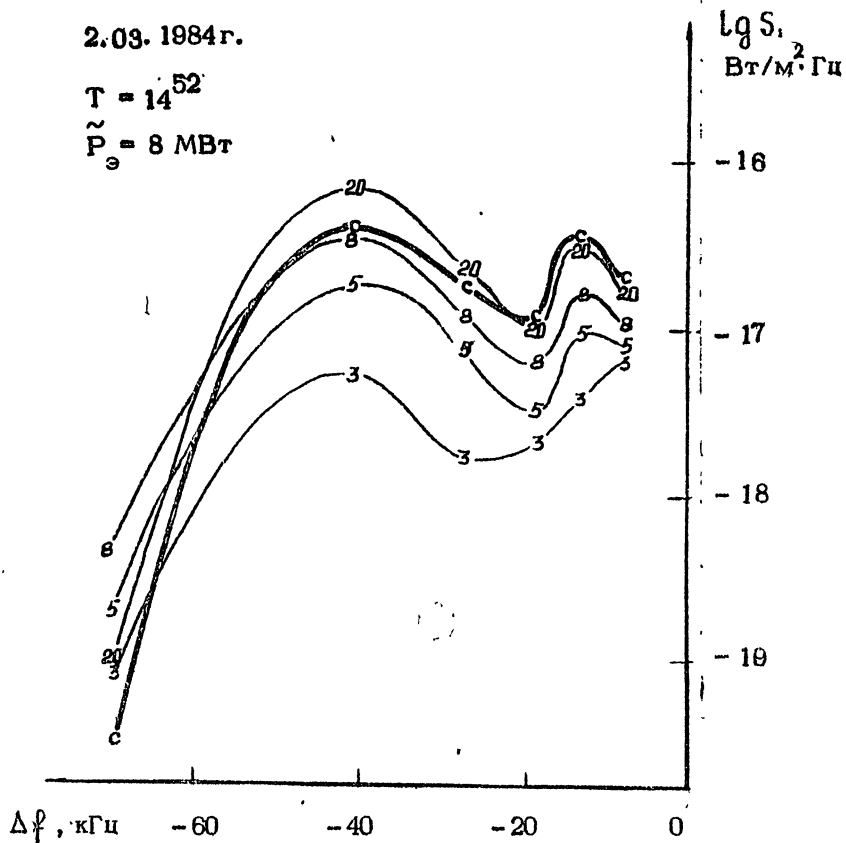
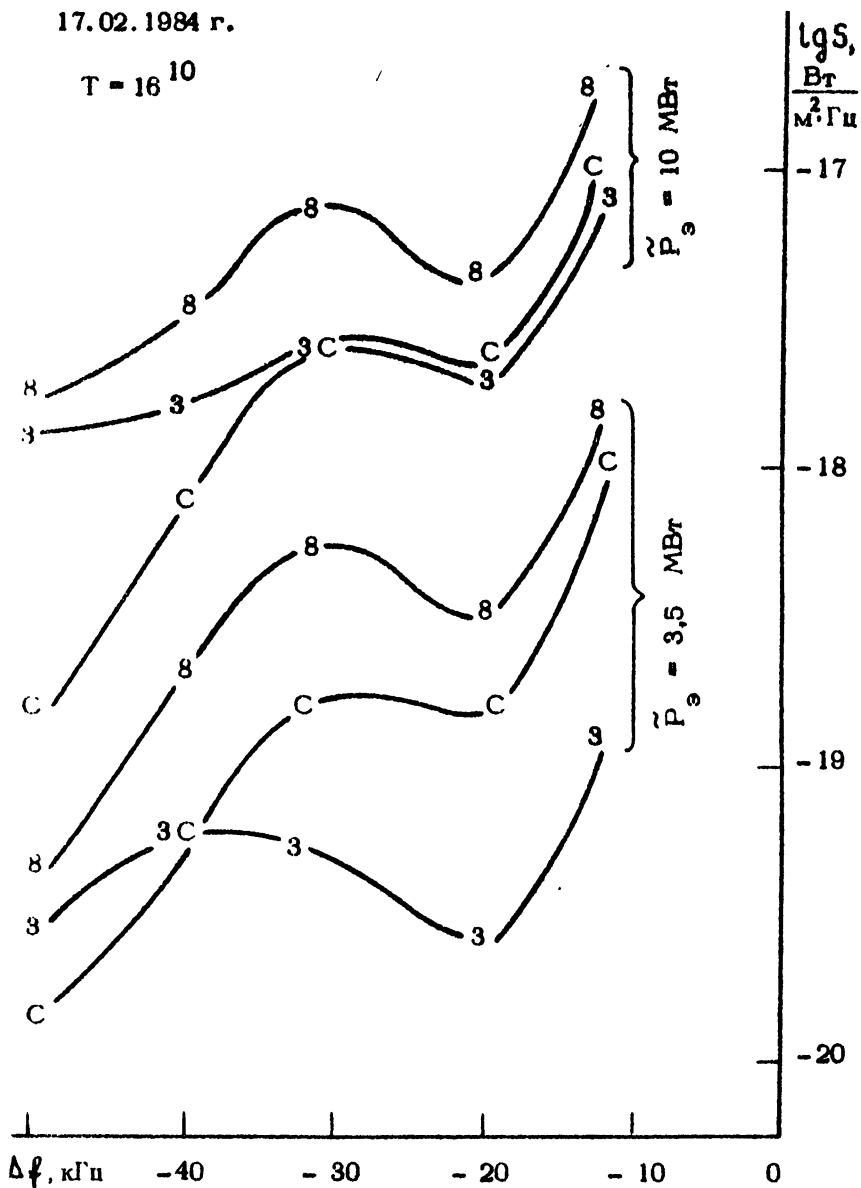


Рис. 12

17.02.1984 г.

$T = 16^{10}$



Р и с . 13

3.02.1984г.

$T = 11^{45}$

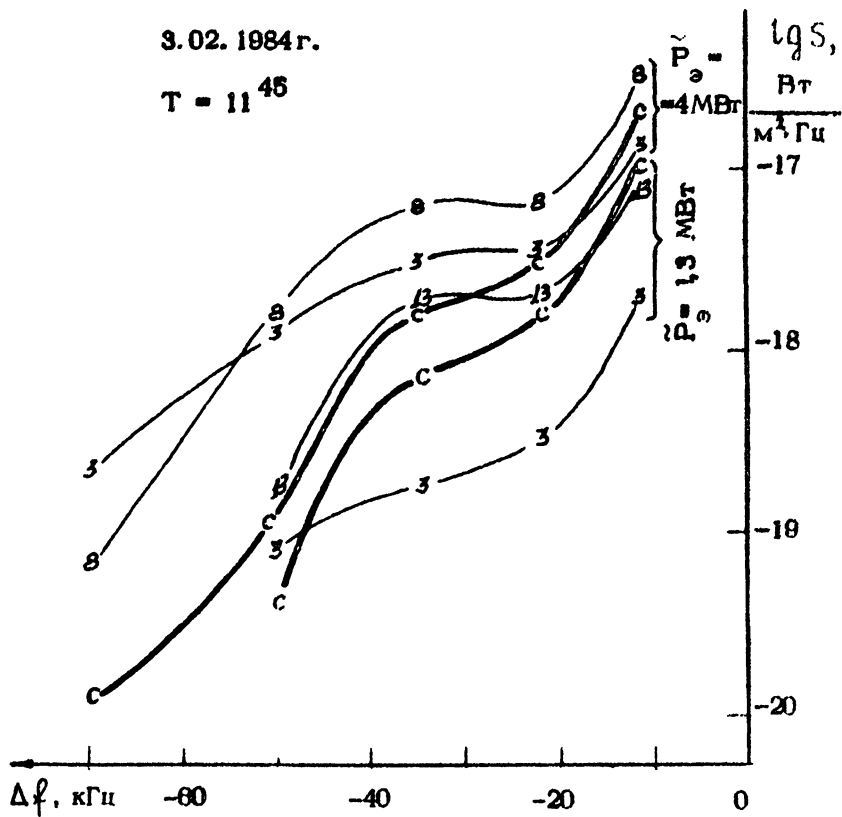


Рис. 14

$|\Delta f^-| \approx 35$ кГц исчезает при приближении частоты ВН к критической частоте слоя F_2 ($f_{ВН} \approx f_{0F_2}$).

Исследования свойств ИРИ в области $70 \text{ кГц} \leq |\Delta f^-| \leq 110 \text{ кГц}$ показали, что в спектре излучения существует еще один максимум при $|\Delta f^-| \approx 80 + 90 \text{ кГц}$ (рис. 15). Характерной особенностью ИРИ в области таких расстройек является сильное ослабление излучения при развитии АО ВН и в этом смысле (см. п. 1.3) оно повторяет динамику развития при $\Delta f > 0$.

Таким образом, в спектре искусственного радиоизлучения ВО ионосферной плазмы в области $|\Delta f^-|$ обнаруживаются четыре выделяющихся максимума излучения, параметры которых приведены в табл. 1. При переходе к стационарному состоянию излучения спектр ИРИ в значительной степени сглаживается, и в области $|\Delta f^-| > |\Delta f_1^-|$

Таблица 1

	Отстройка центральной частоты максимума $ \Delta f^- $	Полоса излучения δf по уровню -3 дБ	Уровень излучения относительно $S(\Delta f^- = 12 \text{ кГц})$
1.	5 кГц	5 кГц	
2.	10 + 12 кГц	10 кГц	0
3.	30 + 40 кГц	15 кГц	-(3+5) дБ
4.	80 + 90 кГц	25 + 30 кГц	-(20+25) дБ

($|\Delta f_1^-| \approx 5 + 10$ кГц - минимальная отстройка, при которой проводились измерения) он может быть очень часто

27.03.1984 г.

$T = 15^{37}$

$\tilde{P}_\Theta = 15 \text{ MBт}$

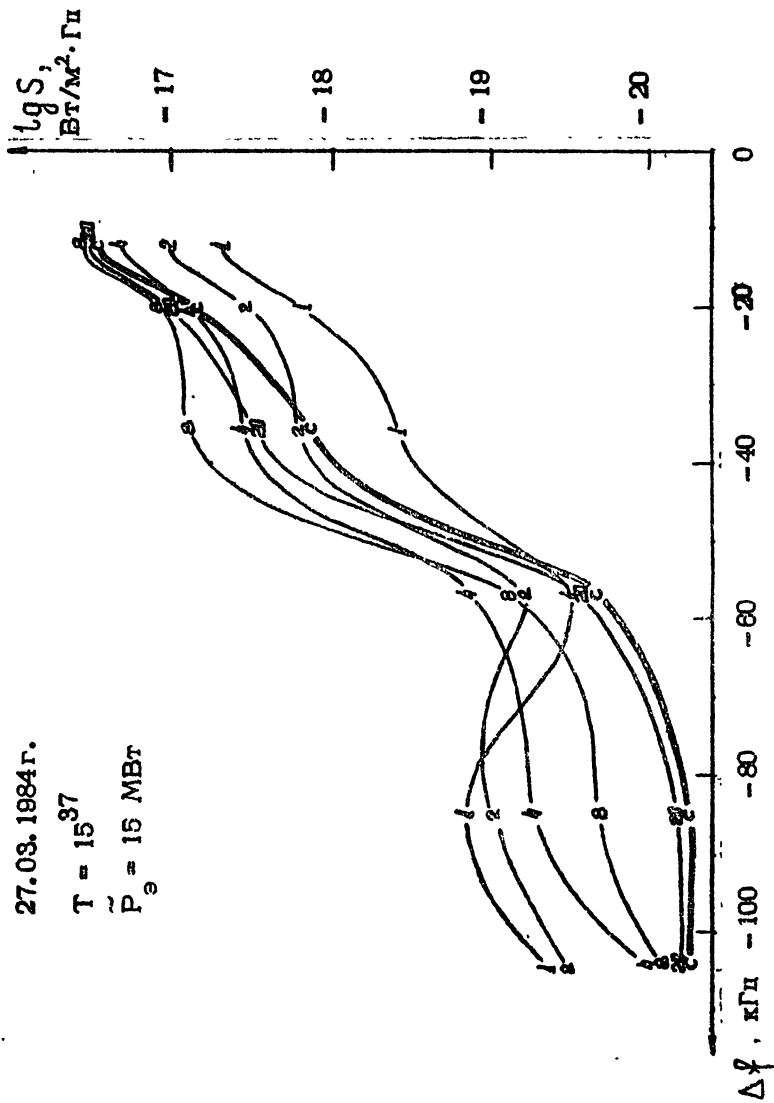


Рис. 15

аппроксимирован зависимостью вида

$$S = S(|\Delta f_1^-|) e^{-\frac{|\Delta f^-|}{\Delta f_0}}.$$

Величина Δf_0 имеет достаточно малый разброс и в среднем находится в интервале 9 ± 12 кГц. Очевидно, что при этом суммарная энергия излучения в области $|\Delta f^-| > |\Delta f_1^-|$ будет определяться выражением

$$P^- = \int_{|\Delta f^-| > |\Delta f_1^-|} S(f) d(|\Delta f^-|) \approx S(|\Delta f_1^-|) \Delta f_0.$$

При этом, принимая во внимание ранее полученные зависимости $I(\tilde{P}_3, \Delta f)$ (см. п. 1.4) и учитывая, что в стационаре $P^{\text{tot}} \approx P^-$, имеем

$$P^{\text{tot}} \propto \tilde{P}_3^{\alpha}, \quad \text{где } \alpha \approx \begin{cases} 0, & \tilde{P}_3 > \tilde{P}_3^* \approx 3 \text{ МВт} \\ 1, & \tilde{P}_3 < \tilde{P}_3^* \end{cases}$$

Еще раз подчеркнем, что приведенная зависимость отражает только общую тенденцию характера изменения интенсивности ИРИ. В деталях же эта связь может проявляться более сложным образом. Последнее видно, например, из

рис. 16, где приведены спектры на стационарной фазе излучения в зависимости от мощности ВН.

2. Излучение ионосферной плазмы вблизи второй гармоники частоты ВН. Первые эксперименты по исследованию радиоизлучения ВО ионосферной плазмы на частотах порядка $2f_{ВН}$ были выполнены в феврале-апреле 1984 года [10]. Приемная антенна линейной поляризации имела зенитную диаграмму направленности и состояла из 6 синфазных волновых диполей, подвешенных на высоте $h \approx \lambda/4$ над поверхностью Земли. Коэффициент усиления такой антенны $G \approx 30$. Антенна располагалась в 2 км от нагревного стэнда. Усиление принятых сигналов осуществлялось РПУ "Катран" с полосой пропускания 300 Гц, что позволяло проводить измерения при расстройках $|\Delta f| > 1$ кГц относительно частоты $2f_{ВН}$.

Всего было проведено несколько сеансов наблюдений. Один из примеров зарегистрированных сигналов приведен на рис. 17. Анализ полученных экспериментальных данных показал:

а) сигналы ИРИ вблизи второй гармоники (ВГ) ВН имеют шумовой характер изменения амплитуды, и их генерация происходит только при воздействии мощным радиоизлучением 0-поляризации в условиях, когда наблюдается ее стрикционное самовоздействие.

б) максимальная интенсивность ВГ с $S \approx (0,3-3) \cdot 10^{-20}$ Вт/м²·Гц имеет место при расстройке $|\Delta f_{ВГ}^-| = 2$ кГц. При $|\Delta f_{ВГ}^-| > 2$ кГц темп уменьшения интенсивно-

23.04.1984г.

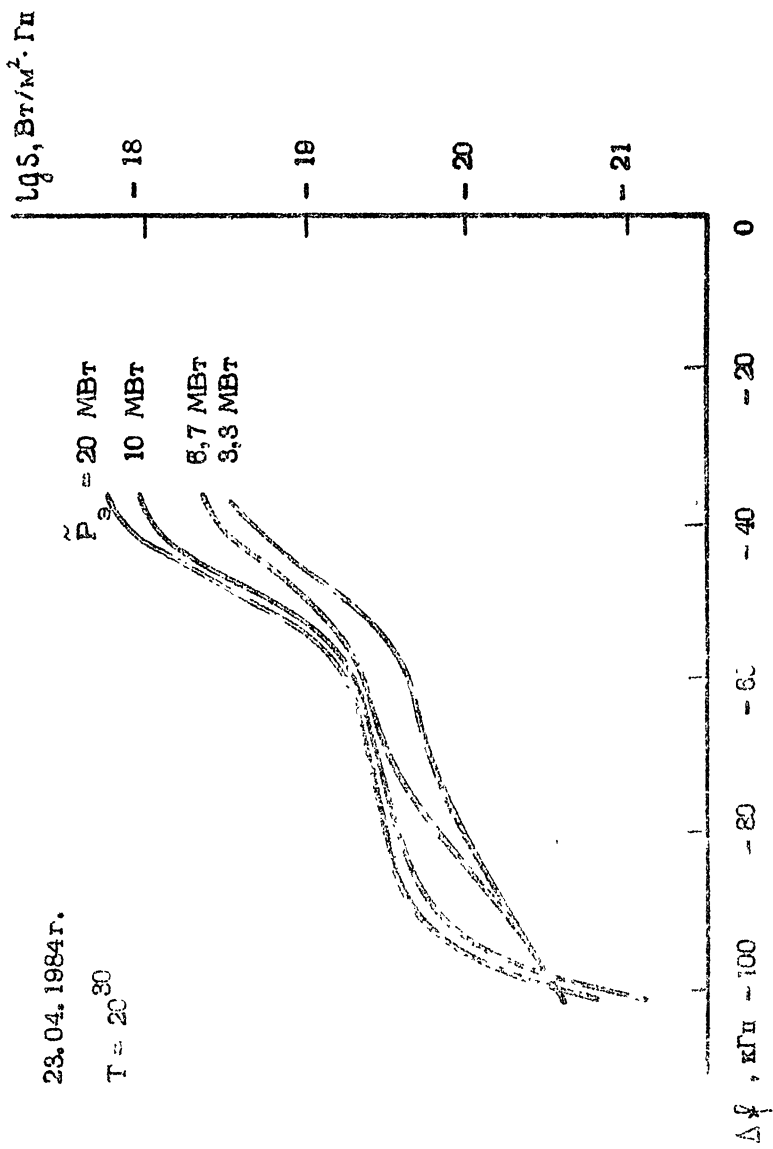
T = 20³⁰

Рис. 16

10.04.1984г.

T = 19³³

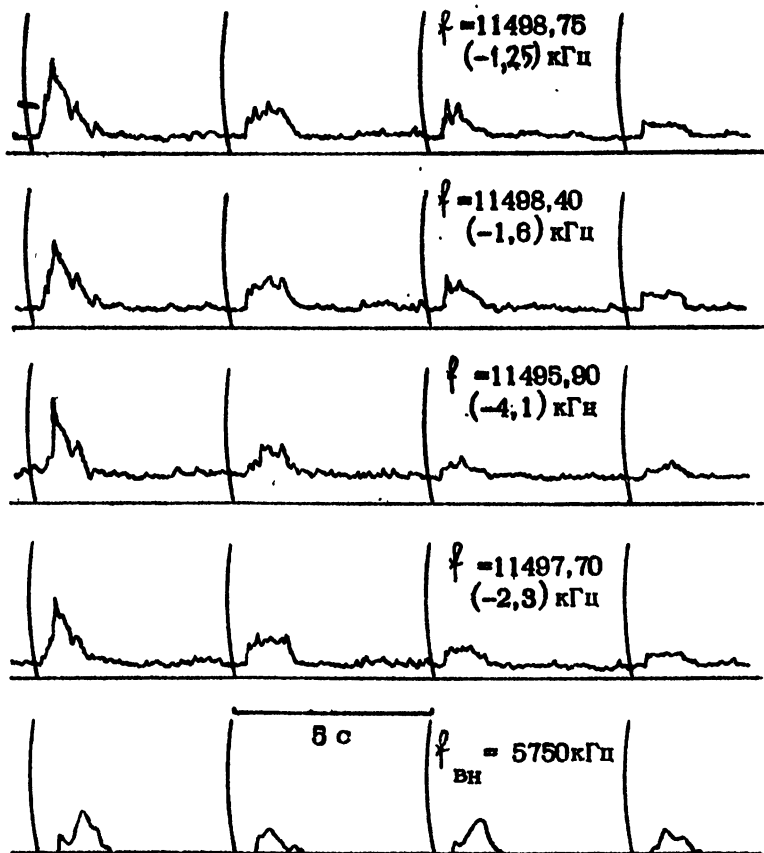


Рис. 17

сти излучения составляет в среднем 1 дБ/кГц. В области $|\Delta f^+|$ сигнал надежно зарегистрирован не был; по оценкам его интенсивность не превышала, по крайней мере, величины 10^{-21} Вт/м²·Гц.

в.) наибольшая интенсивность ВГ наблюдается в начале воздействия мощным радиоизлучением; во время нагрева амплитуда сигнала непрерывно уменьшается. Отмечается подавление генерации ВГ при развитии АО волны накачки.

г.) время релаксации сигнала ВГ составляет 6–8 мс и примерно соответствует времени столкновительного затухания плазменных волн.

Совокупность полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что генерация ВГ обусловлена взаимодействием искусственных плазменных волн, возбуждаемых в ионосферной плазме в результате стрикционной параметрической неустойчивости ВН.

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИНАМИКА ИРИ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ НАГРЕВА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

1. Эффект гистерезиса. При исследовании свойств искусственных мелкомасштабных неоднородностей концентрации ионосферной плазмы был обнаружен и исследован эффект гистерезиса в величине сечения ракурсного рассеяния радиоволн [11], связанный с различием пороговых

мощностей возбуждения и срыва генерации ИИТ: $P_{п.срыва} < P_{п.803б}$. При исследовании свойств ИРИ были проведены эксперименты по обнаружению эффекта гистерезиса в интенсивности искусственного радиоизлучения (см. также [4]). В этих измерениях, как и прежде, нагрев начинался на мощности $P_{з1} < P_{з\max}$, потом мощность ВН быстро повышалась до максимального уровня и, спустя 1-2 мин нагрева на полной мощности, устанавливалась опять первоначальная мощность $P_{з1}$. Сравнивая значения интенсивности излучения до и после воздействия на максимальной мощности, делался вывод о наличии эффекта гистерезиса.

Проведенные в феврале-апреле 1984 г. исследования показали существование в некоторых случаях эффекта гистерезиса для $P_{з1} \approx 3$ МВт с увеличением приблизительно на 2 дБ интенсивности излучения после нагрева на $P_{з\max}$. Отмечается сохранение формы стационарного спектра ИРИ, включая и существование характерного максимума при $|\Delta f| = 30$ кГц, для всех трех фаз нагрева. Для $\tilde{P}_{з1} > 3$ МВт в этой серии измерений эффект гистерезиса не наблюдался.

Обнаружился также ряд особенностей поведения ИРИ в выбранном режиме нагрева ионосферной плазмы. Во-первых, начальная генерация излучения даже очень слабой интенсивности ($S(|\Delta f|) \leq 10^{-20}$ Вт/м²·Гц) при воздействии на ионосферу ВН малой мощности ($P_{з} \approx 0,5 \div 1$ МВт) приводила к исчезновению характерного временного максимума излу-

ния для расстроек $|\Delta f^{-1}| = 10 + 50$ кГц при переходе к режиму нагрева плазмы на полной мощности.

Второй момент, который следует отметить, — это появление характерных "провалов" в амплитуде ИРИ при переходе от мощности $\tilde{P}_{3 \max}$ к \tilde{P}_{31} . Этот эффект иллюстрирует рис. 18, а результаты обработки характерной длительности провала одной серии наблюдений приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\tilde{P}_3, \text{МВт}$ $ \Delta f^{-1} , \text{кГц}$	3,5	7	10,5	14
12	6 с	7 с	5 с	1 с
36	12 с	9 с	5 с	1,5 с

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы:

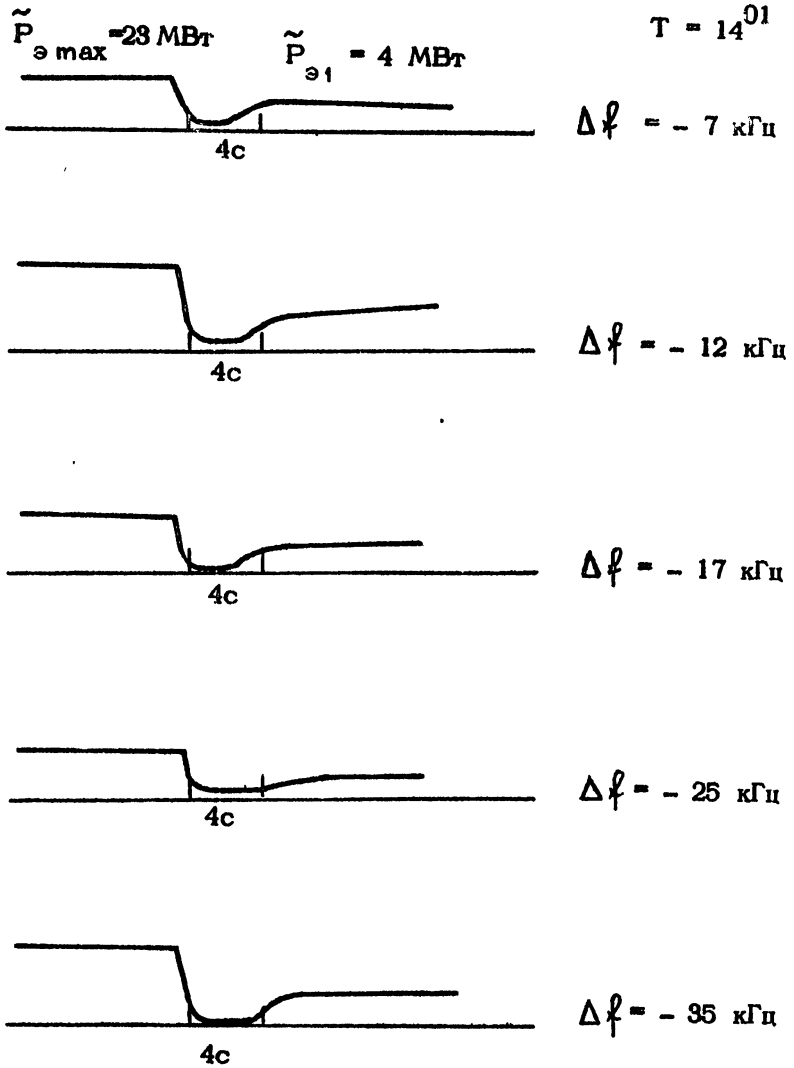
а) характерная длительность "провала" в амплитуде ИРИ для $|\Delta f^{-1}| = 10 + 40$ кГц увеличивается с ростом величины $|\Delta f^{-1}|$.

б) с ростом мощности \tilde{P}_{31} (уменьшением разницы $\tilde{P}_{3 \max} - \tilde{P}_{31}$) время установления уровня излучения уменьшается и особенно резко — при $\tilde{P}_{31} > 10$ МВт.

Интересны свойства эффекта гистерезиса, которые наблюдались нами в течение нескольких сеансов одного дня наблюдений (см. рис. 19). Здесь можно видеть, что после перехода от максимальной мощности нагрева $\tilde{P}_{3 \max}$

14.03.1984 г.

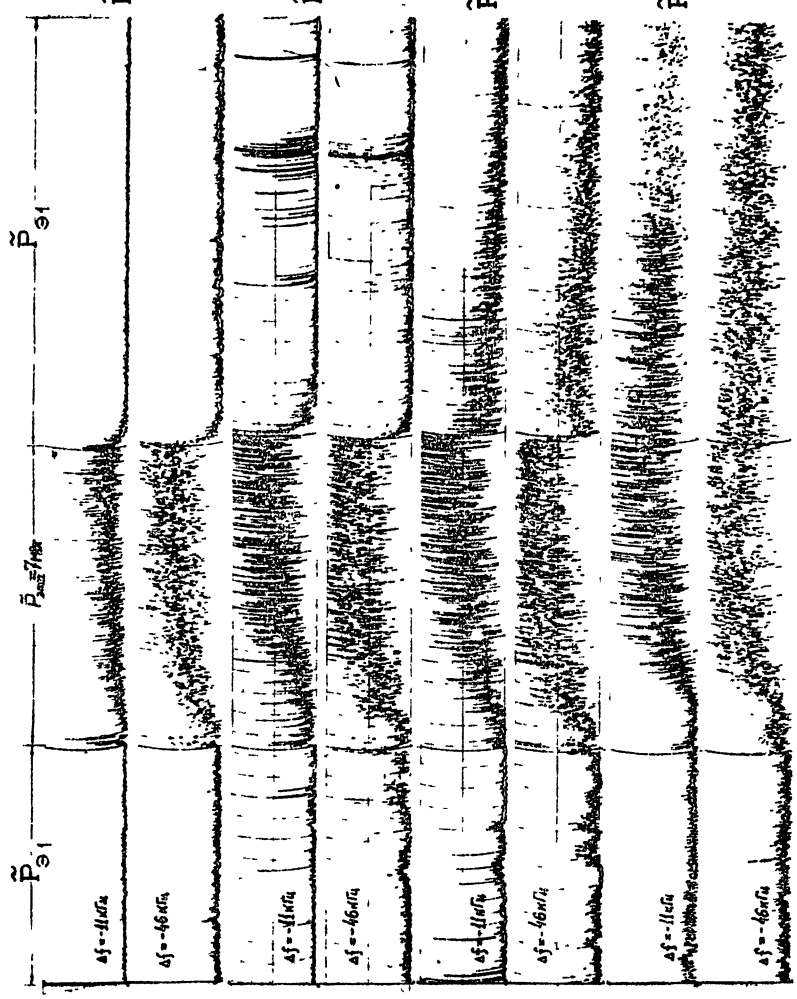
$T = 14^{01}$



Р и с. 18

17.05.1983г.

00:00
T = 16 $\frac{1}{2}$ 17



$\tilde{P}_{эп} = 0,9$ МВТ

$\tilde{P}_{эп} = 0,7$ МВТ

$\tilde{P}_{эп} = 1,5$ МВТ

$\tilde{P}_{эп} = 3,0$ МВТ

Рис. 19

7 МВт к ее первоначальному значению $P_{31} \approx 3$ МВт интенсивность ИРИ постепенно уменьшается. При этом с увеличением \tilde{P}_{31} происходит изменение времени установления стационарного состояния: при $\tilde{P}_{31} < 1$ МВт время установления $\tau_{уст} \approx 1 + 2$ с, для $\tilde{P}_{31} = 1,5$ МВт оно увеличивается до $20 - 40$ с и $\tau_{уст} \approx 30 - 50$ с для $\tilde{P}_{31} = 3$ МВт. Причем для $\tilde{P}_{31} = 1,5 + 3$ МВт наблюдается эффект гистерезиса, а для $\tilde{P}_{31} < 1$ МВт он отсутствует.

2. Нагрев ионосферной плазмы периодической последовательностью импульсов. Режим воздействия на ионосферную плазму периодической последовательностью импульсов использовался нами для изучения особенностей влияния искусственных неоднородностей различных масштабов на динамику развития ИРИ на разных Δf . При этом использовались полученные ранее данные о зависимости времени развития и релаксации искусственных ионосферных неоднородностей от их поперечного (относительно силовых линий геомагнитного поля \vec{H}_0) размера l_{\perp} [9]. Изменяя частоту и скважность посылок, мы надеялись ослабить (или усилить) неоднородности разных масштабов и исследовать таким образом механизм генерации ИРИ. Ниже приводятся первые результаты экспериментов в этом направлении.

На рис. 20 представлен пример регистрации сигналов ИРИ в широком диапазоне расстроек Δf при режиме "злучения ВН ± 10 с ($F_M = 0,05$ Гл) в течение

12.04.1984г.

$T = 20$

$\Delta f = 18 \text{ кГц}$

- 20 кГц

- 40 кГц

- 60 кГц

- 85 кГц

f
ВВ -

-5750 кГц

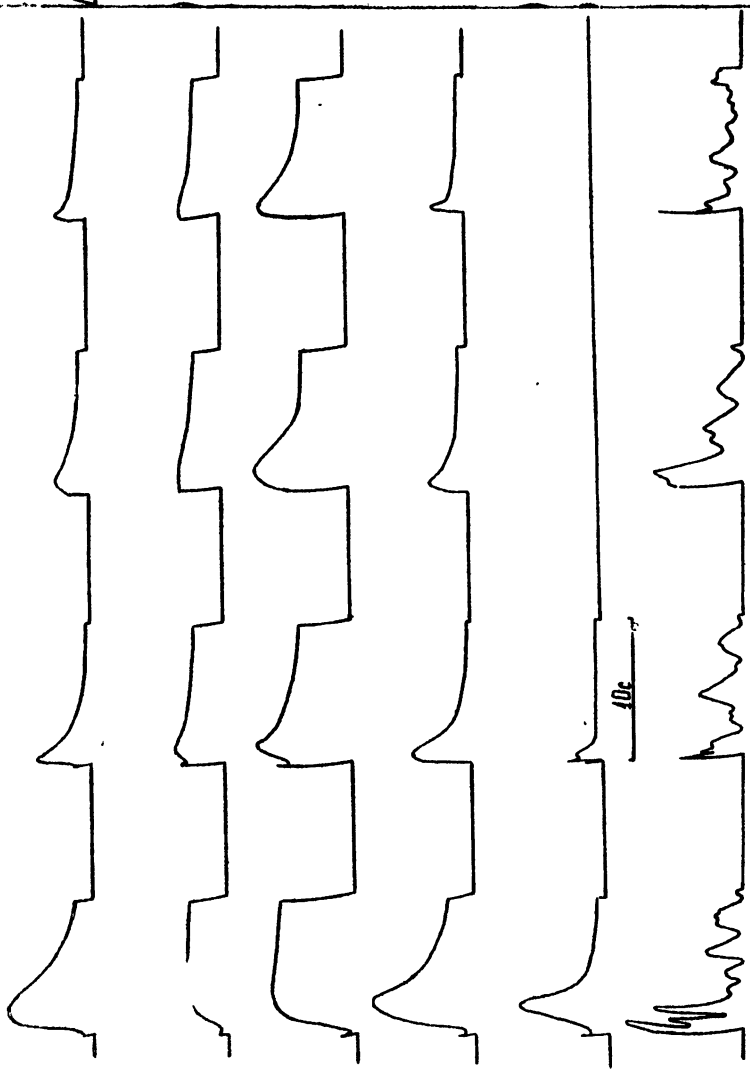


Рис. 20

3 мин с последующей двухминутной паузой. В таком режиме воздействия для ВН характерно уменьшение времени развития АО от цикла к циклу включения мощного радиоизлучения, а также исчезновение быстрых флуктуаций ("пиков") ее амплитуды [8]. Для ИРИ накопление эффекта последействия для расстроек $|\Delta f^-| = 10 + 50$ кГц проявляется в уменьшении времени его развития, которое как бы "следит" за изменением времени АО ВН. При этом амплитудные соотношения для максимума к стационарного уровня интенсивности ИРИ (как это и отмечалось в п.1.1 для эффекта последействия) практически не изменяются.

По иному ведут себя положительные и дальние отрицательные отстройки, для которых наблюдается уменьшение от цикла к циклу нагрева амплитуды максимумов ИРИ вплоть до полной их подавления.

Такой характер развития ИРИ отвечает частотам модуляции $F_M \approx 0,05$ Гц.

Важен с точки зрения исследования механизмов, лежащих в основе генерации ИРИ, эксперимент, когда осуществлялся попеременный нагрев ионосферной плазмы непрерывным радиоизлучением и в импульсном режиме излучения ВН с различной скважностью посылок (см. рис. 21). Для малых отстроек (см. $|\Delta f^-| = 12$ кГц) при короткой паузе между посылками (режимы работы передатчика $[+10 - 2 \text{ с}]$ и $[+1 \text{ с} - 5 \text{ с}]$ ⁺⁾) устанавливающаяся амплитуда

⁺⁾ Здесь (+) указывает время работы мощного передатчика, а (-) отвечает паузе излучения.

7.02.1984г.

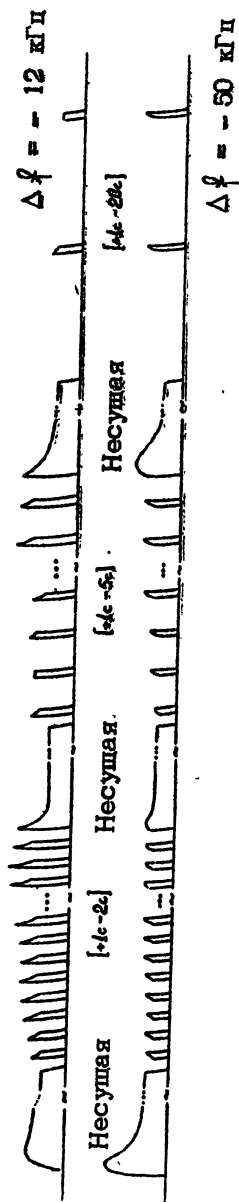
 $T = 16^{\text{30}} \div 16^{\text{50}}$ 

Рис. 21

ИРИ в импульсном режиме значительно (до 4 дБ) выше уровня излучения при режиме "несущая", а при следующем включении ВН в режиме "несущая" наблюдается необычный резкий максимум излучения. С увеличением длительности паузы (см. режим $[+1 \text{ с} - 2 \text{ с}]$) такого возрастания амплитуды импульсов ИРИ уже не наблюдается. Вместе с тем для расстроек $|\Delta f^-| = 50 \text{ кГц}$ при режиме излучения ВН $+1 \text{ с} - 2 \text{ с}$ амплитуда импульсов ИРИ остается на уровне стационарного излучения в режиме "несущая", а максимум излучения при следующем включении непрерывной ВН оказывается подавленным. С увеличением скважности посылок (при переходе к режиму $[+1 \text{ с} - 20 \text{ с}]$) амплитуда импульсов ИРИ возрастает до уровня, отвечающего максимуму излучения при первом после длительной паузы включении ВН в режиме "несущая".

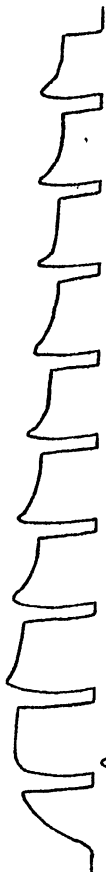
В этом эксперименте важным моментом является предварительный разогрев ионосферной плазмы непрерывным излучением, поскольку воздействие короткими ($\approx 1 \text{ с}$) импульсами с большой скважностью излучения не приводит к полному развитию ИРИ.

По результатам измерений, представленных на рис.21, можно сделать вывод, что для малых расстроек ($|\Delta f^-| \approx 12 \text{ кГц}$) времена развития агента, вызывающего депрессию ИРИ, $\tau_1^g \approx 1 \text{ с}$, а времена его релаксации $\tau_2^g \approx 1 \text{ с}$. Эти времена с ростом расстройки увеличиваются, составляя для $|\Delta f^-| \approx 50 \text{ кГц}$ $\tau_1^g = 4 \text{ с}$, а $\tau_2^g \approx 10 \text{ с}$.

Рассмотрим теперь на примере, приведенном на рис.22,

27.08.1984г.

T = 16°09

 $\Delta \varphi = -12 \text{ кГц}$ 

- 20 кГц

- 38 кГц

- 57 кГц

- 85 кГц

- 104 кГц

Рис. 22

ситуацию, в которой наоборот излучение ВН прерывалось через каждые 5 с на короткие паузы с $T_{\text{п}} = 1$ с. Здесь в стационарном режиме для расстроек $|\Delta f^-| = 12$ кГц, 20 кГц, 36 кГц после каждой паузы излучения уровень ИРИ заметно повышается, что практически не наблюдается для $|\Delta f^-| = 50$ кГц. Это подтверждает ранее сделанный вывод о временах релаксации агента, вызывающего депрессию радиоизлучения из ВО в установившемся режиме при различных $|\Delta f^-|$. Однако картина развития ИРИ оказывается совершенно иной в первые 20 с после включения ВН. Здесь наоборот всплески излучения после паузы нагрева наблюдаются на дальних отстройках ($|\Delta f^-| = 57$ кГц, 85 кГц, 104 кГц) при монотонном нарастании интенсивности ИРИ при меньших $|\Delta f^-|$.

Остановимся подробнее на характеристиках ИРИ в условиях воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением с амплитудой модуляции типа "меандр". В настоящее время исследования в этом направлении проведены при $F_M = 0,1 + 1$ Гц для расстроек $|\Delta f^-| = 10 + 50$ кГц. Приведенная импульсная мощность ВН с учетом линейного поглощения в ионосфере обычно составляла $\tilde{P}_3 = 10$ МВт.

Эксперименты показали проявление определенных закономерностей в зависимости характеристик сигналов ИРИ от Δf и F_M . В первую очередь это касается трансформации формы импульса принимаемого излучения в течение одного сеанса нагрева: постепенного перехода от растущей во время импульса ВН амплитуды сигнала к форме импульса с

уменьшающейся амплитудой. Это хорошо видно на рис.23, где частота модуляции ВН составляла 0,17 Гц (точками на рис. 23 показан временной ход ИРИ для режима "несущая", взятый по соседнему сеансу измерений). На рис. 24 представлены первые 6 импульсов излучения при $F_M = 0,1$ Гц, а на рис. 25 – три фрагмента сигнала ИРИ в начале, середине и конце одного цикла нагрева при $F_M = 1$ Гц

Переход от растущей к падающей форме импульса принимаемого излучения, очевидно, должен характеризовать наступление этапа развития ИРИ, когда эффекты, вызывающие его ослабление (при непрерывном режиме нагрева в этом случае происходит уменьшение амплитуды ИРИ, приводящее к образованию максимума во временном ходе $I(t)$), начинают существенно влиять на изменение интенсивности излучения. По результатам измерений время этого перехода с начала воздействия для исследуемого диапазона в 1,5–2 раза превосходит время достижения максимума интенсивности ИРИ при непрерывном режиме нагрева ионосферы, что, по-видимому, является следствием уменьшения в 2 раза средней эффективной мощности ВН. Касаясь первого этапа развития, характеризуемого растущей амплитудой импульсов радиоизлучения, следует отметить накопление эффекта послепействия нагрева, приводящее к убыстрению от импульса к импульсу ВН темпа роста интенсивности ИРИ и увеличению его начального (для $\Delta t \approx 0,2$ с) уровня для всего исследуемого диапазона расстроек (см. рис. 20, 23–

7.02.1984 г.

$T = 14^{42}$

$F_M = 0,17 \text{ Гц}$

$\varphi_{\text{вн}} = 5750 \text{ кГц}$

$\Delta\varphi = -12 \text{ кГц}$

$\Delta\varphi = -22 \text{ кГц}$

$\Delta\varphi = -32 \text{ кГц}$

$\Delta\varphi = -50 \text{ кГц}$

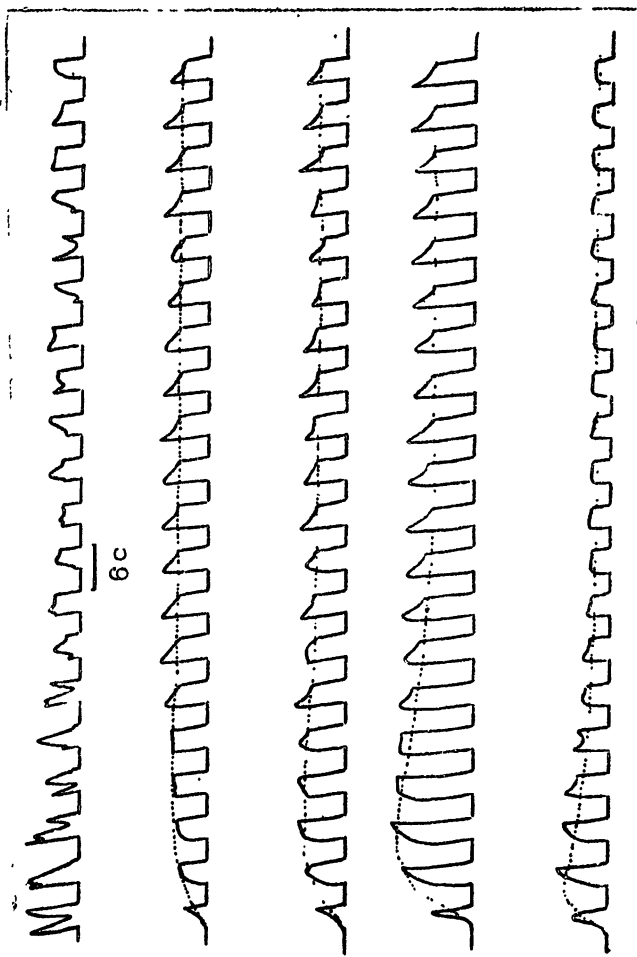


Рис. 23

25)⁺⁾ . Из рис. 24 также легко видеть, что с увеличением $|\Delta f^-|$ скорость роста этого начального уровня ИРИ уменьшается. Последнее может свидетельствовать о более быстрой с увеличением $|\Delta f^-|$ релаксации источника, поддерживающего генерацию ИРИ: $\tau_2^r \geq 10$ с для $|\Delta f^-| = 12$ кГц и $\tau_2^r \approx 3$ с для $|\Delta f^-| \approx 50$ кГц. В то же время, как легко видеть из приведенных примеров регистрации, для этого источника характерно возрастание его времени развития с ростом величины отстройки: $\tau_1^r < 0,2$ с для $|\Delta f^-| = 12$ кГц и $\tau_1^r \approx 0,3$ с для $|\Delta f^-| = 50$ кГц.

Обратимся теперь к анализу свойств сигнала в установившемся режиме при достаточно долгом воздействии, для которого характерным является либо "мгновенное" (в масштабе времени $\Delta t = 0,2$ с) начало уменьшения амплитуды ИРИ во время импульса ВН, либо первоначальный его рост с последующим уменьшением (см. рис. 20, 23-25). Из проведенных измерений следует, что для времени $\Delta t \geq 0,2$ с после начала воздействия для расстройки $|\Delta f^-| = 12$ кГц рост амплитуды ИРИ внутри импульса наблюдается только при $F_M < 0,05$ Гц, для $|\Delta f^-| = 22$ кГц и 32 кГц - при $F_M \leq 0,1$ Гц, а для $|\Delta f^-| = 50$ кГц - при $F_M \leq 0,17$ Гц. Таким образом, в установившемся режиме с ростом отстройки $|\Delta f^-|$ источник,

⁺⁾ Напомним, что время $\Delta t \approx 0,2$ с определяется временем возможных неконтролируемых переходных процессов в цепях приемо-регистрирующей аппаратуры.

7.02.1984 г.

$T = 15^{48}$

$F_M = 0,1 \text{ Гц}$

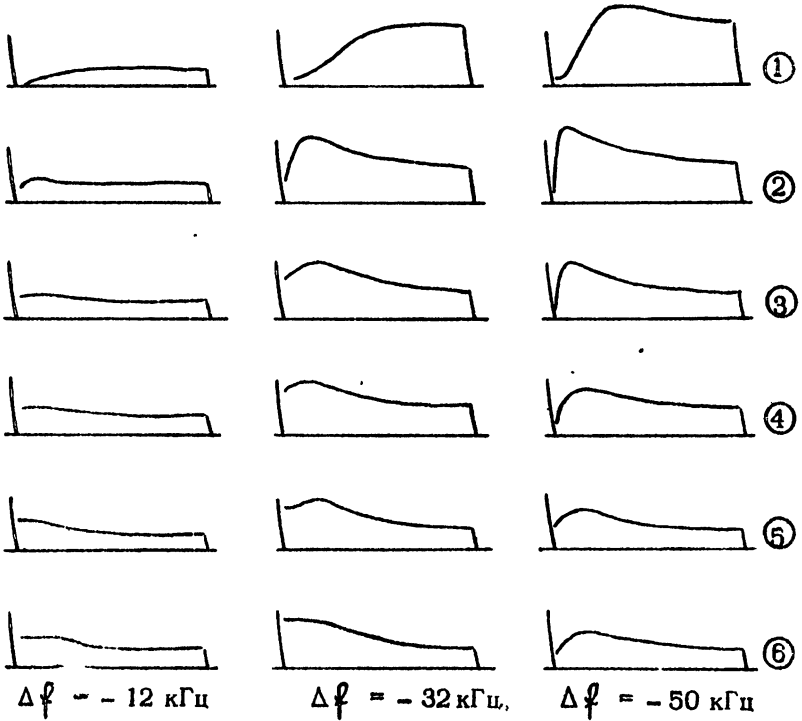


Рис. 24

7.02.1984 г.

T = 15⁵²

F = 1 Гц
M

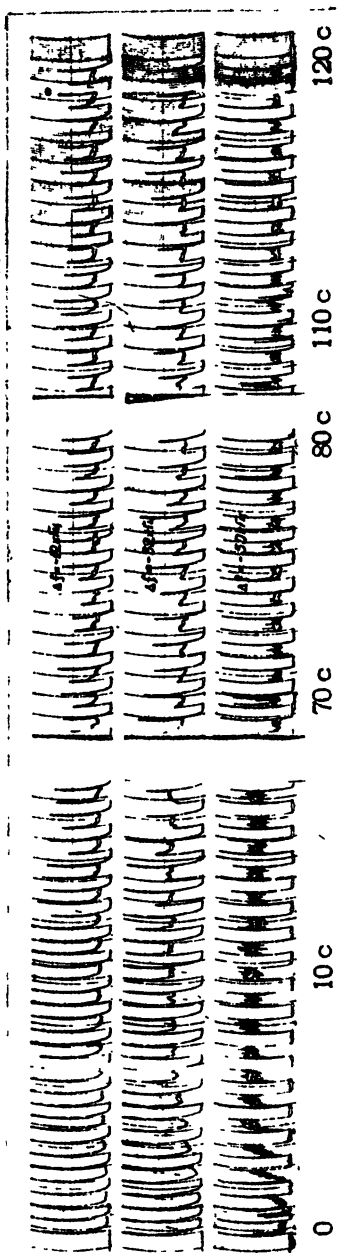


Рис. 25

поддерживающий генерацию ИРИ, имеет все более короткие времена релаксации. Этот вывод вплоть до количественных результатов совпадает с сделанным выше заключением.

Наоборот, частота F_M^* модуляции ВН, ниже которой уже во время импульса нагрева наблюдается хорошо выраженное падение уровня ИРИ, уменьшается с ростом отстройки: $F_M^* \approx 1$ Гц - для $|\Delta f^-| = 12$ кГц, $F_M^* \approx 0,5$ Гц для $|\Delta f^-| = 32$ кГц и $F_M^* \approx 0,1$ Гц - для $|\Delta f^-| \approx 50$ кГц. Здесь с ростом $|\Delta f^-|$ необходимы все большие паузы нагрева для подавления эффекта, вызывающего развитие "депрессии" ИРИ. Это заключение подтверждает вывод, сделанный ранее на основе экспериментальных данных, представленных на рис. 21. При низких частотах модуляции уменьшение влияния депрессии ИРИ может даже приводить к увеличению на 1 - 2 дБ максимальной амплитуды импульсов излучения для соответствующей расстройки при непрерывном режиме нагрева (см. рис. 23, а также 21). Однако, если при $F_M = 0,5$ Гц небольшое увеличение амплитуды сохраняется для $|\Delta f^-| = 12$ кГц, то для $|\Delta f^-| = 22$ кГц и 32 кГц увеличения сигнала ИРИ по сравнению с несущей не наблюдается, а для $|\Delta f^-| = 50$ кГц имеет место даже уменьшение максимальной амплитуды излучения по сравнению с величиной максимума его интенсивности в режиме "несущая".

В табл. 3 сведены данные, относящиеся к характерным временам развития и релаксации источника, поддерживающе-

го генерацию ИРИ, и агента, вызывающего его депрессию, определенные для стадии развитой турбулентности в ВО ионосферы.

Таблица 3

$ \Delta f^- $	Источник, поддерживающий генерацию ИРИ		Агент, вызывающий "депрессию" ИРИ	
	Время развития	Время релаксации	Время развития	Время релаксации
12 кГц	$\ll 0,2$ с	≥ 10 с	1 с	≈ 1 с
50 кГц	0,3 с	3 с	4 с	10 с

В заключение отметим, что максимум в спектре ИРИ при расстройке $|\Delta f^-| \approx 30$ кГц в случае излучения ВН с амплитудной модуляцией типа "меандр" с $F_M = 0,1 + 1$ Гц проявляется в меньшей степени, чем при нагреве плазмы непрерывным излучением с той же самой средней мощностью.

1У. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные к настоящему времени экспериментальные результаты указывают, что по шкале Δf существует, по крайней мере, четыре области ИРИ, значительно отличающиеся между собой по характеристикам излучения.

1. Область малых $|\Delta f^-| \leq 5$ кГц отрицательных расстроек от $f_{ВН}$. Здесь в спектре ИРИ в первый мо-

мент после начала воздействия выделяется узкий максимум излучения (см., например, рис. 10а, 11). Прямые исследования свойств ИРИ здесь в силу технических причин затруднены, однако в пользу такого утверждения могут служить результаты измерений вблизи второй гармоники ВН.

2. Область расстройк $10 \text{ кГц} \leq |\Delta f^-| < 70 \text{ кГц}$.

Определяющим свойством ИРИ в этой области $|\Delta f^-|$ является рост его интенсивности одновременно с развитием АО мощной радиоволны. Здесь наиболее адекватным экспериментальным данным механизмом генерации ИРИ является процесс возбуждения высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности за счет тепловой параметрической неустойчивости [12].

3. Область расстройк $|\Delta f^-| > 70 \text{ кГц}$. При больших $|\Delta f^-|$ наоборот характерным является уменьшение интенсивности ИРИ с развитием аномального ослабления ВН, а также флуктуирующей характер интенсивности принимаемого излучения даже при $\tilde{P}_3 = 10\text{--}15 \text{ МВт}$ в отличие от регулярной формы сигнала, которая наблюдается в области меньших отрицательных отстройк.

4. Область положительных расстройк. Специфика ИРИ при $\Delta f > 0$ связана с невозможностью прямой генерации плазменных волн с $\omega > \omega_{\text{ВН}}$ за счет эффектов рассеяния и распада мощной электромагнитной волны в равновесной плазме. По своим временным характеристикам поведение ИРИ в этой области отвечает изменению амплитуды излу-

чения в области дальних отрицательных расстройек.

На основе полученных экспериментальных данных, учитывая различное проявление действия АО в различных участках спектра ИРИ, а также разную зависимость от мощности ВН интенсивности излучения для его максимальной фазы τ и стационарного уровня, все излучение можно представить как сумму двух компонент. Первая (условно мы будем называть ее "быстрой") развивается быстрее, чем происходит рост мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы, и спектр ее определяется интенсивностью ИРИ в первые моменты времени после включения ВН. Важной ее отличительной особенностью является падение интенсивности излучения с развитием мелкомасштабной ИИТ вблизи уровня отражения ВН, вызывающей аномальное ослабление мощного радиоизлучения и пробных волн, зондирующих ВО. Вторая компонента ИРИ (условно назовем ее "медленной") развивается вместе с развитием мелкомасштабных искусственных неоднородностей, ответственных за АО мощного радиоизлучения, и ее спектральные характеристики определяются стационарным спектром ИРИ. Сложение двух указанных компонент ИРИ с учетом значения и временного хода их интенсивностей и определяет характер зависимости динамики развития излучения от величины и знака Δf . В этой модели временной максимум ИРИ является проявлением его "быстрой" компоненты, а стационарный уровень - "медленной". При этом, поскольку наблюдается отсутствие максимума излучения при

малых мощностях ВН, а также после предварительного нагрева ионосферной плазмы радиоизлучением малой мощности с $\tilde{P}_3 \approx 0,5$ МВт, можно сделать вывод о более высоком пороге генерации "быстрой" компоненты ИРИ по сравнению с "медленной" и подавление генерации "быстрой" компоненты при наличии мелкомасштабной ИИТ даже малой интенсивности.

Следующей важной отличительной особенностью характеристик ИРИ является отсутствие видимых флуктуаций излучения при $\tilde{P}_3 > 5$ МВт для $|\Delta f^-| = 10+50$ кГц, появление здесь флуктуаций излучения при меньших мощностях ВН и ярко выраженный переменный характер интенсивности ИРИ в области $|\Delta f^+|$ и $|\Delta f^-| > 70$ кГц даже при $\tilde{P}_3 = 15$ МВт. Наблюдаемый характерный период мерцаний порядка длительности флуктуаций отраженного от ионосферы сигнала ВН. Это позволяет сделать заключение, что в формировании сигнала ИРИ в области $|\Delta f^-| = 10+60$ кГц (определяющегося в основном "медленной" компонентой излучения) участвует вся или значительная часть ВО ионосферы, находящаяся внутри диаграммы направленности антенны нагревного передатчика, а само излучение имеет широкую (сравнимую или большую угловых размеров ВО) индикатрису рассеяния (см. также [1, 2, 4]). Только при малых мощностях ВН излучение может генерироваться в отдельных выделенных областях ВО, имеющих малые размеры. Тогда естественно наблюдать мерцающий характер излучения, если оно проходит через

область с неоднородностями концентрации $h_p \approx 1$ км. Следует предположить, что генерация излучения в отдельных центрах ВО является обычной для положительных и дальних отрицательных отстроек, что может являться следствием более высокого порога их генерации. При этом увеличение амплитуды поля ВН вблизи уровня её отражения обеспечивается за счет фокусировки радиоизлучения на естественных крупномасштабных неоднородностях ионосферной плазмы или за счет самофокусировочной неустойчивости мощных радиоволн [7, 13]. В последнем случае энергия ВН оказывается сконцентрированной в областях с пониженной концентрацией плазмы. Это может приводить при работе вблизи критической частоты f_{0F_2} к просачиванию поля по образованным каналам во внешнюю ионосферу, что вызовет подавление "быстрой" компоненты ИРИ и, как следствие этого, будет наблюдаться исчезновение максимума во временном ходе развития излучения.

Влияние крупномасштабных неоднородностей с $h_p \approx 0,5$ км также проявляется в эффектах последствия нагрева. Здесь присутствие искусственных крупномасштабных неоднородностей вблизи уровня отражения ВН может создать условия для линейной трансформации O-волн в Z-моду (эффект утроения сигнала [14]) и являться причиной заметного убыстрения времени развития АО и ИРИ при паузах нагрева $T_{\Pi} \approx 1 + 3$ мин. Резкое уменьшение времени развития ИРИ при $T_{\Pi} < 1$ мин объясняется влиянием уже мелкомасштабной части ИИТ. Как отмечается в [7], су-

ществование значительного начального уровня мелкомасштабных неоднородностей может приводить к резкому ускорению развития неустойчивости.

В заключение заметим, что исследование времени развития и депрессии ИРИ в области $|\Delta f^-| = 10 \div 50 \text{ кГц}$ позволяют сделать вывод, что с увеличением величины отстройки размер неоднородностей l_{\perp} , определяющих генерацию излучения, уменьшается от $l_{\perp} \approx 10 \text{ м}$ до $l_{\perp} \approx 5 \text{ м}$, а размер неоднородностей, вызывающих депрессию ИРИ (подавление максимума излучения или, согласно предлагаемой модели, "быстрой" компоненты ИРИ), увеличивается от $l_{\perp} \approx 3 \text{ м}$ до $l_{\perp} \approx 10 \text{ м}$ ⁺).

Предложенная выше модель двухкомпонентного состава ИРИ не учитывает, естественно, всех особенностей генерации излучения. Это, в первую очередь, касается наблюдаемых спектральных максимумов излучения на отстройках $|\Delta f^-| \approx -12 \text{ кГц}$, -35 кГц и -85 кГц , которые могут являться результатом распадных процессов с участием, например, ионно-циклотронных и нижнегибридных волн. Не исследовано еще в достаточной степени излучение при малых отстройках от ВН, хотя некоторые результаты указывают, что в этой области Δf возможно имеет место мощная линия излучения. Предстоит еще детально исследовать развитие ИРИ при малых временах ($\Delta t \leq 0,1 \text{ с}$) после вклю-

⁺) Размеры l_{\perp} определялись по временам релаксации ИИТ согласно результатам работы [9].

чения ВН и при больших ($\tilde{P}_3 > 20$ МВт) уровнях ее мощности. Первые эксперименты [4] показывают наличие здесь временного максимума излучения для $\Delta t \approx 10$ мс, а также появление в некоторых случаях дополнительного максимума на $\Delta t \approx 0,1$ с. Важным, несомненно, также является исследование характеристик ИРИ в зависимости от частоты ВН.

Продолжение экспериментальных исследований во всех этих направлениях позволит построить более полную картину генерации искусственного радиоизлучения в F-слое ионосферной плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thide B., Kopka H., Stubbe P. Observations of stimulated scattering of a strong high-frequency radio wave in the ionosphere. - Phys.Rev.Lett., 1982, v.49, N 21, pp.1561 - 1564.
2. Stubbe P., Kopka H., Lauche H., Rietveld M.T., Brekke A., Holt O., Jones T.B., Robinson T., Hedberg A., Thide B., Crochet M., Lotz H.J. Ionospheric modification experiments in northern Scandinavia. - J.Atm.Terr.Phys., 1982, v.44, N 12, p.1025 - 1041.

3. Метелев С.А., Фролов В.Л. Динамические характеристики стимулированного радиоизлучения ионосферной плазмы. — В кн.: Эффекты искусственного воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу Земли. (Материалы Всесоюзного симпозиума. Суздаль, сентябрь 1983), М.: ИЗМИРАН, 1983, с. 66–67.
4. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Зюзин В.А., Комраков П.П., Метелев С.А., Митяков Н.А., Никонов В.А., Токарев Ю.В., Фролов В.Л., Юрищев М.А. Динамические характеристики стимулированного радиоизлучения ионосферной плазмы. — Изв. вузов — Радиофизика, 1985 (в печати).
5. Perkins F.W., Oberman C.R., Valeo E.J. Parametric instabilities and ionospheric modifications. — J. Geophys. Res., 1974, v. 79, N 10, pp. 1478 — 1483.
6. Грач С.М., Караштин А.Н., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. К теории тепловой параметрической неустойчивости в неоднородной плазме — Физика плазмы, 1978, т. 4, №6, с. 1321–1329 и с. 1330–1340.
7. Васильков В.В., Гуревич А.В. Самофокусирующая и резонансная неустойчивость в F-области ионосферы — В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. ИПФ АН СССР, Горький, 1979, с. 81–138.
8. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митяков Н.А., Фролов В.Л. О начальной стадии взаимодействия мощного радиоизлуче-

ния с плазмой верхней ионосферы. Геомагнетизм и аэрномия, 1983, т. 23, №3, с. 433-439.

9. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Урядов В.Л., Фролов В.Л. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме, ИПФ АН СССР, Горький, 1979, с.7-45.
10. Караштин А.Н., Коробков Ю.С., Фролов В.Л., Цимринг М.Ш. Искусственное радиоизлучение ионосферной плазмы на второй гармонике частоты волны накачки. Изв. вузов - Радиофизика, 1985 (в печати).
11. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митяков Н.А., Фролов В.Л. Явление гистерезиса при искусственном возбуждении неоднородностей в ионосферной плазме. - Изв. вузов - Радиофизика, 1978, т. 21, №12, с. 1738-1741.
12. Грач С.М. Об электромагнитном излучении искусственной плазменной турбулентности ионосферы. Изв. вузов - Радиофизика, 1985 (в печати).
13. Васьков В.В., Гуревич А.В., Димант Я.С. Крупномасштабное расщепление плазмы при возмущении ионосферы мощной радиоволной. Геомагнетизм и аэрномия, 1981, т.21, №3, с. 809-815.
14. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. - М.: Наука, 1967.

Дата поступления статьи
6 августа 1984 г.

Лев Михайлович ЕРУХИМОВ

Владимир Леонтьевич ФРОЛОВ

**ДИНАМИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ
ПЛАЗМЫ**

Подписано к печати 09.08.84г. МЦ 00470 Формат 60х
84/16. Бумага множительная. Печать офсетная. Объем
3,88 усл. п.л. Тираж 120. Заказ 4094. Бесплатно.

Отпечатано на ротационной НИРФИ