

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

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

П р е п р и н т № 2 8 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
С ПЛАЗМОЙ F - СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

Л.М. Ерухимов
В.Л. Фролов

Горький 1989

Е р у х и м о в Л. М., Ф р о л о в 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. - 44 с.

УДК 551.510.535

Рассмотрена динамика искусственной ионосферной турбулентности на стрижонных и "пиковых" временах взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F - слоя ионосферы. Показано, что на этом этапе на характер развития взаимодействия существенную роль оказывает образующая вблизи уровня отражения волны накачки (ВН) решетка плотности плазмы. Детально рассмотрены особенности поведения амплитуды ВН и пробных волн (ПВ) близких к $\frac{f}{f_{ВН}}$ частот. Для ПВ проанализированы появляющиеся искусственные низкочастотные биения и "пиковые" осцилляции амплитуды и установлена связь "пиков" с развитием стрижонно й параметрической неустойчивости ВН в плазме. Показано, что уже на "пиковых" временах (десятки-сотни миллисекунд) вблизи уровня отражения ВН происходит образование искусственных маломасштабных неоднородностей. Подробно анализируются связанные с этим эффекты, наблюдающиеся на ВН и зондирующих возмущенную область ионосферы сигналах ПВ, а также влияние этих неоднородностей на дальнейший ход развития искусственной ионосферной турбулентности.

І. ВВЕДЕНИЕ

Проведенные в последние годы как в СССР, так и за рубежом экспериментальные исследования взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой существенно расширили наши представления о характере развития искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ): с помощью станций некогерентного рассеяния было детально исследовано формирование спектра плазменных волн, возбуждаемых вблизи точки отражения мощной радиоволны 0-поляризации [1-8]; использование доплеровской многочастотной станции вертикального зондирования позволило подробно изучить развитие ИИТ вблизи уровня верхнегибридного резонанса [9-11]; были проведены широкие исследования спектральных и динамических характеристик искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы [12-15]; получены новые экспериментальные данные о зависимости свойств ИИТ от частоты и мощности волны накачки (ВН) [14, 16-18]; методом ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов изучена динамика развития и релаксации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) при коротких импульсах излучения ВН [19, 20]; проведено моделирование в условиях, близких к ионосферным, нагрева плазмы высокочастотным полем [21]. Эти, а также некоторые другие экспериментальные исследования позволили выявить новые моменты в понимании физических процессов возбуждения ИИТ. Вместе с тем ряд принципиальных вопросов здесь все еще остался невыясненным.

Настоящая работа посвящена одному из такого круга вопросов - детальному изучению характера взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F-слоя ионосферы в первые моменты времени после включения ВН и исследованию влияния создаваемого на этом этапе начального уровня турбулентности на дальнейший ход развития взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Мы изложим результаты наших последних экспериментов, выполненных в 1987-1989 гг. на нагревном стенде "Сура" (г. Горький). Все измерения проводились, как правило, в днев-

ное и вечернее время суток (с 13⁰⁰ до 21⁰⁰ МСК). При этом мы чаще всего сознательно ограничивались достаточно умеренными мощностями ВН ($P_3 \approx 20$ МВт), чтобы, с одной стороны, максимально приблизить условия проведения эксперимента к проведенным нами ранее исследованиям на стенде "Зименки" [23,24], а с другой - с целью исключения возможного появления дополнительных эффектов воздействия мощным радиоизлучением на нижние слои ионосферы, обычно наблюдаемых в дневных условиях при $P_3 \geq 40$ МВт [9,10]. Кроме того, не исключено, что при больших мощностях ВН ($P_3 \geq 40$ МВт) взаимодействие мощного радиоизлучения с плазмой F-области может иметь свои специфические особенности, исследование которых, представляя большой самостоятельный интерес, выходит за рамки поставленной нами задачи.

Ниже мы рассмотрим результаты исследований появления искусственных низкочастотных квазипериодических биений и "пичков" на отраженных от ионосферы сигналах (разд. 2), свойства "пичковых" осцилляций амплитуды пробных волн (ПВ) (разд. 3), а также свойства ИИТ, возбуждаемой вблизи уровня отражения ВН сразу после ее включения (разд. 4). В разд. 5 обсуждаются некоторые особенности развития эффекта аномального ослабления (АО) на ВН и ПВ различных отстроек. В заключении подводятся итоги проведенных исследований.

Отметим, что ниже, где это не оговаривается особо, эксперименты по нагреву ионосферной плазмы и зондирование ВО ионосферы выполнялись с использованием радиоволн 0-поляризации.

2. МОРФОЛОГИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ БИЕНИЙ И "ПИЧКОВ". ПОРОГОВЫЕ МОЩНОСТИ ИХ ГЕНЕРАЦИИ

До настоящего времени остается невыясненным вопрос о механизме образования "пичковых" осцилляций на отраженных от ионосферы сигналах ВН. Они были обнаружены в 1978 г. во время проведения экспериментов на стенде "Зименки" [22] и исследовались в работах [23-27]. Позднее их также наблюдали в экспериментах на стенде "Тромсе" (Северная Норвегия) [57]. С целью дальнейшего изучения этого явления нами в 1987-1989 гг. было выполнено несколько циклов исследований на нагревном стенде "Сура". В этих измерениях было обращено внимание, что при меньших, чем пороги образования "пичков", мощностях ВН 0-поляризации на отраженном сигнале ВН и

сигналах ПВ с $\int_{\text{ПВ}} \approx \int_{\text{ВН}}$ обнаруживается появление низкочастотных биений с $T \approx 1-3$ с, часто носящих почти правильную синусоидальную форму изменения амплитуды (см. рис. 1). Биения появляются практически сразу после включения ВН и наблюдаются только во время импульса нагрева. При достаточно длительном импульсе нагрева имеет место постепенное увеличение их периода. Появление биений наблюдалось только в условиях спокойной ионосферы при отсутствии быстрых и сильных естественных флуктуаций зондирующих сигналов. В некоторых случаях при хорошо развитом эффекте после окончания воздействия наблюдаются быстрозатухающие релаксационные колебания с периодом в несколько сотен миллисекунд (см., например, рис. 1, $\Delta f = -3$ кГц).

Эксперименты с использованием X-поляризации мощного радиоизлучения показали, что биения амплитуды отраженных от ионосферы сигналов наблюдаются и в этом случае (см. рис. 2).

Цикл сравнительных исследований на 0- и X-поляризациях ВН для двух значений ее частоты: 5750 кГц и 9310 кГц, выполненный в марте 1989 г. с одновременно параллельным зондированием возмущенной области (ВО) ионосферы ПВ с отстройками ± 3 кГц, ± 10 кГц и порядка ± 80 кГц позволили выявить следующие особенности наблюдаемого явления.

а. Биения на отраженном сигнале ВН X-поляризации имеют более высокий порог возникновения ($\tilde{P}_{3,X} \approx 4-8$ МВт) по сравнению с ВН обыкновенного типа ($\tilde{P}_{3,0} \leq 0,5-1$ МВт), причем пороговое значение P_3 понижается при приближении $\int_{\text{ВН}}$ к $\int_{\text{ВФ}_2}$ +).

+) Здесь \tilde{P}_3 отвечает эффективной мощности ВН с учетом линейного поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы. Конкретное пороговое значение \tilde{P}_3 может зависеть от $\int_{\text{ВН}}$ (см., например, [14]), а также от ионосферных условий. Следует заметить, что величина пороговой мощности ВН определялась нами по появлению биений на записях сигналов на ленте самописца, т.е. когда глубина модуляции амплитуды достигала значения $\sim 2\%$. Поскольку меньшие уровни модуляции амплитуды не могли быть выделены при данном методе анализа экспериментальных данных, то вопрос, является ли эффект на самом деле пороговым, остается открытым.

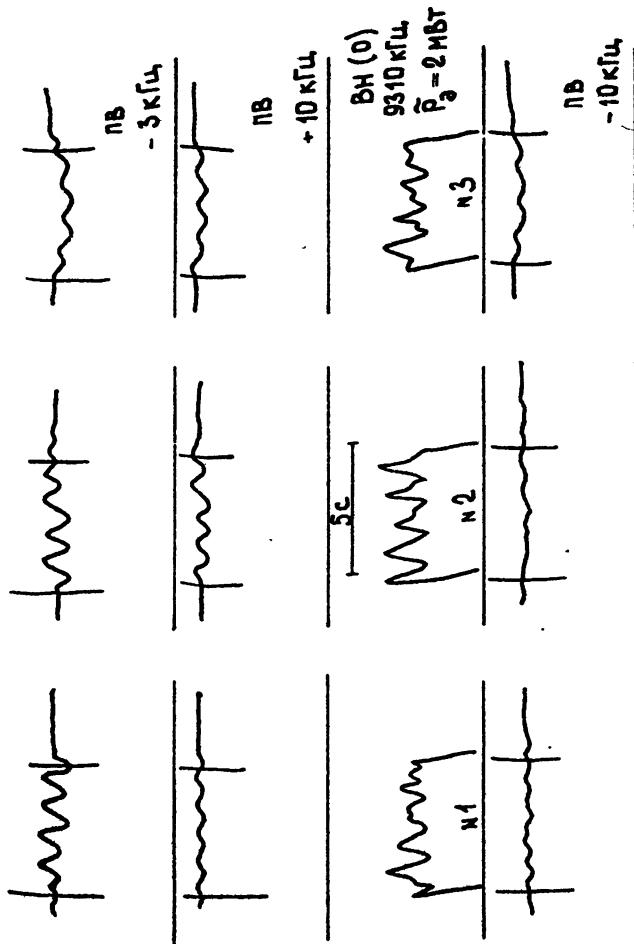


Рис. 1

б. Биения на ПВ близких отстроек $\Delta f \approx \pm 3$ кГц обнаруживаются только при мощностях воздействия приблизительно вдвое превышающих пороговые мощности их появления на ВН; с ростом Δf пороговые мощности появления биений увеличивается. Для ПВ с $\Delta f = \pm 3$ кГц при $\tilde{P}_3 \approx 10-20$ МВт они приблизительно вдвое слабее по сравнению с биениями на ВН. Для ПВ с $\Delta f \approx +10$ кГц их амплитуда еще более ослабляется, но остается тем не менее заметно большей, чем для ПВ с $\Delta f \approx -10$ кГц, где они во многих случаях уже практически не обнаружимы. С уменьшением \tilde{P}_3 ВН ослабление биений для ПВ происходит в большей степени, чем это имеет место на ВН.

в. В приблизительно одинаковых ионосферных условиях (для близких значений $h_{отр}$ и формы слоя) пороговые мощности появления биений для $f_{ВН} = 5750$ кГц (0) были приблизительно в 4 раза меньше, чем для $f_{ВН} = 9310$ кГц (0).

г. Фазировка биений на ВН и ПВ различных отстроек может не совпадать между собой, завися от величины и знака отстройки ПВ, причем сдвиг фазы может изменяться в течение импульса ВН. Последнее видно, например, из рис. 1.

д. При воздействии волнами 0-поляризации на отраженных сигналах ВН при достаточно высоком уровне ее мощности часто наблюдается появление дополнительных субгармоник частоты биений, которые практически не находят своего отражения в форме модуляции пробных волн (см. импульсы № 1 и 3 на рис. 1).

е. Для волн обеих поляризаций при увеличении мощности ВН период квазисинусоидальных биений уменьшается от $T \approx 3$ с для пороговых значений мощности их появления до $T \leq 1$ с. При этом для волн 0-поляризации при приближении \tilde{P}_3 к $P_{3п}$ (ССВ) ($P_{3п}$ (ССВ)-пороговая мощность стрикционного самовоздействия ВН) биения начинают приобретать все более сложную форму за счет появления субгармоник (см. п. д.) и для $\tilde{P}_3 \geq P_{3п}$ (ССВ) наблюдается переход к режиму образования "пичковых" осцилляций. В этом проявляется существенное отличие от случая воздействия волнами X-поляризации. Последнее может определяться существованием плазменного резонанса для обыкновенных волн, который обеспечивает более эффективную передачу энергии от ВН плазме вследствие развития стрикционной параметрической неустойчивости [44].

Рассмотренные выше данные позволяют сделать некоторые выводы

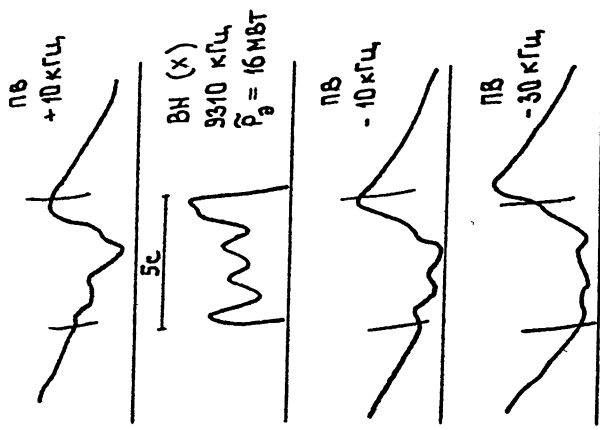


Рис. 2

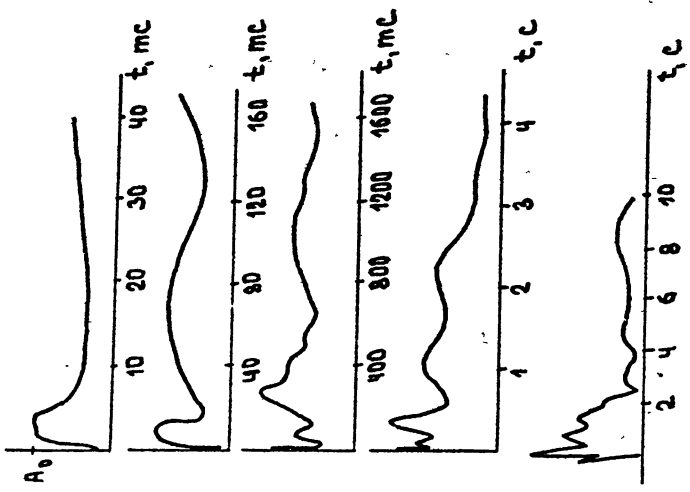


Рис. 3

относительно механизма образования биений.

Поскольку изменения амплитуды начинают регистрироваться уже спустя 50–200 мс после начала воздействия и исчезают практически сразу с выключением НН, их нельзя связывать с обычными крупномасштабными искажениями профиля концентрации плазмы вблизи уровня отражения мощного радиоизлучения, которые имеют существенно большие времена развития и релаксации [18] и объясняют результаты наших экспериментов для ПВ Х-поляризации на больших отстройках $\Delta f \approx +640$ кГц (см. разд. 4, рис. II).

Нельзя объяснить появляющиеся биения как суперпозицию прямой и рассеянной на искусственной периодической решетке плотности плазмы волн, так как коэффициент рассеяния радиоволн на этой решетке при уровнях мощности НН $P_3 < 40$ МВт очень мал: согласно [37] амплитуда рассеянных волн оказывается на 40–70 дБ ниже уровня зеркального отражения. В то же время существование биений при уровнях мощности НН, существенно меньших пороговых мощностей развития параметрических неустойчивостей, а также при воздействии НН Х-поляризации свидетельствует о том, что биения не являются результатом развития каких-либо механизмов отбора энергии от НН и ПВ. В пользу этого, по существу, говорит и квазисинусоидальная форма биений с практически постоянной амплитудой и частотой в течение, по крайней мере, нескольких секунд после начала воздействия. Представляется, что в основе эффекта биений должен, по-видимому, лежать механизм, связанный с изменением фазы отраженного от возмущенной области ионосферы сигнала. Рассмотрим одну из возможных моделей.

Хорошо известно (см., например, [41, 53, 54]), что в плоско-слоистых средах с периодически изменяющимся значением показателя преломления вблизи области пространственного резонанса решетки с падающей на нее волной имеет место их сильное взаимодействие, приводящее к заметным изменениям фазового набега распространяющейся волны. В нашем случае эта решетка образуется в поле стоячей волны мощного радиоизлучения под воздействием пондемоторной силы и легко обнаруживается в экспериментах по резонансному рассеянию [37]. Важным обстоятельством здесь является "продавливание" плазмы полем мощной радиоволны на уровне ее отражения. При этом, согласно расчетам [39, 43, 55], изменение высоты отражения может достигать несколь-

ких сотен метров, увеличиваясь с ростом мощности падающего на ионосферу радиоизлучения. Такой эффект увеличения высоты отражения ранее наблюдался в экспериментах по локации искусственной плазменной линии в Аресибо [3], а также при измерении доплеровской частоты отраженного сигнала [14], где она составляла [0,2-0,5 Гц].

В целом картина явления нам представляется следующим образом.

Мощная волна создает за счет сил стрикционного давления решетку плотности плазмы, соответствующую структуре поля стоячей волны. За счет продавливания плазмы эта решетка в первое время после включения ВЧ постепенно смещается вверх по высоте, т.е. отраженная волна оказывается сдвинутой по частоте относительно падающей. В такой периодической системе волны, бегущие в прямом и обратном направлении, оказываются сильно связанными между собой, и, в силу в настоящее время еще до конца не ясных причин, с разностной частотой оказывается промодулирована амплитуда отраженного от ионосферы сигнала. При этом с увеличением мощности ВЧ (увеличением глубины амплитудной модуляции) появляются вторые и, возможно, следующие гармоники частоты биений (как это наблюдалось в экспериментах [53] с двойной частотой накачки), и отраженный от ионосферы сигнал принимает более сложную форму.

В пользу такой модели говорят следующие экспериментальные факты.

Наблюдающиеся в некоторых случаях (см. рис. 1) после выключения ВЧ релаксационные колебания соответствуют времени быстрозатухающих осцилляций плотности плазмы при распаде решетки [37].

По полосе частот, где наблюдается появление биений на ПВ ($\Delta f \approx 3-6$ кГц), можно, следуя [54], определить коэффициент модуляции фазовой скорости волны при прохождении ею решетки, а по нему - вариации плотности плазмы. Оценки показывают, что $\frac{\Delta N}{N} \approx 10^{-5}$. Это хорошо соответствует величине изменения плотности за счет действия пондемоторной силы: $\frac{\Delta N}{N} = \frac{e^2 E^2}{4 m \omega^2 k (T_e - T_i)}$. Отсюда, кстати, следует, что с ростом частоты радиоволны величина $\frac{\Delta N}{N}$ уменьшается как ω^{-2} , и поэтому должна уменьшаться глубина модуляции биений. Последнее находит свое подтверждение в изменении пороговой мощности появления биений (по уровню глубины модуляции $\approx 2\%$) при работе на разных частотах ВЧ.

Более низкие мощности ВН, при которых начинают регистрироваться биения, для волн 0-поляризации по сравнению с X-волнами обусловлены, с одной стороны, большим эффектом разбухания поля 0-волн вблизи уровня их отражения (приблизительно на 4 дБ), а с другой — усилением решетки плотности за счет пондемоторной силы возбуждающихся плазменных волн.

Наконец, увеличение частоты биений с ростом мощности ВН соответствует увеличению скорости продавливания плазмы под действием поля мощной радиоволны.

Таким образом, рассмотренная физическая картина наблюдаемого явления представляется нам в достаточной степени адекватной основным экспериментальным данным.

Проведенные при изучении частотных биений исследования позволили также несколько уточнить динамику образования "пиковых" осцилляций. На рис. 3 приведена одна из типичных осциллограмм отраженного от ионосферы сигнала ВН с "пиковыми" колебаниями его амплитуды, записанная на ленте самописца (внизу) и воспроизведенная с ленты магнитофона при различном временном разрешении (четыре верхних дорожки). Хорошо видно, что после развития эффекта стрикционного самовоздействия нарастание уровня сигнала ВН носит осцилляторный характер с линейно увеличивающимся во времени периодом колебаний. Амплитуда наибольшего, как правило, второго после эффекта стрикционного самовоздействия максимума обычно составляет 0,5–1 от A_0 , хотя в некоторых случаях наблюдалось даже некоторое превышение над A_0 ; с появлением эффекта аномального ослабления (АО) наблюдается затухание этих осцилляций⁺.

Проведенные нами измерения порогов образования "пиков" показали, что они (как, например, на рис. 3) наблюдаются только при превышении мощности ВН приблизительно в 1,5–2 раза пороговой мощности ее стрикционного самовоздействия, т.е. при $P_3 \gtrsim 2-4$ МВт

⁺) В отличие от определения "пиков", данного в [27], здесь подчеркивается, что после стрикционного самовоздействия ВН в большинстве случаев не первый, а второй максимум осцилляций имеет наибольшую амплитуду, указывая тем самым на постепенный характер ее восстановления. Нам представляется это важным для понимания динамики "пиков".

для $f_{\text{ВН}} \approx 5-6$ МГц. Это подтверждает результаты ранее выполненных на стенде "Сура" измерений [27]. На меньших мощностях ВН здесь имеет место существование искусственных низкочастотных биений, которые были рассмотрены нами выше. Появление таких искусственных квазипериодических флуктуаций уровня отраженного сигнала ВН, период которых был сравним с длительностью импульса воздействия для измерений [23,24], и привело в этих работах к ошибочному выводу, что пороги "пичков" ниже пороговой мощности развития эффекта стрикционного самовоздействия.

Ниже, в следующем разделе работы, мы подробно рассмотрим свойства "пичковых" осцилляций и их проявление на ПВ близких к $f_{\text{ВН}}$ отстройках.

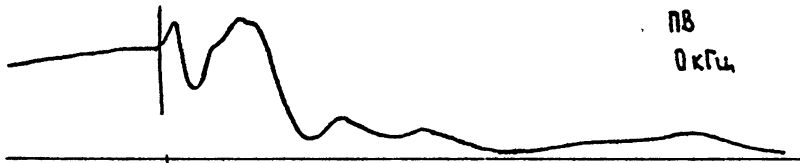
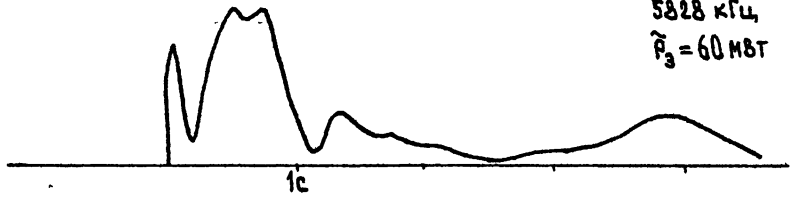
3. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПВ НА "ПИЧКОВЫХ" ВРЕМЕНАХ РАЗВИТИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВН С ПЛАЗМОЙ

Как уже отмечалось ранее, при превышении мощности ВН пороговой мощности ее стрикционного самовоздействия на отраженном сигнале ВН начинают регистрироваться быстрые характерные осцилляции ("пички"). Эти "пичковые" осцилляции сопровождаются появлением характерных, качественно отличающихся от рассмотренных выше низкочастотных биений, быстрых вариаций амплитуды сигналов ПВ на частотах $f_{\text{ПВ}} \approx f_{\text{ВН}}$ (см. также [23-27]). Исследуя их свойства, мы выявили ряд новых особенностей взаимодействия электромагнитных волн с плазмой, анализу которых и посвящен настоящий раздел.

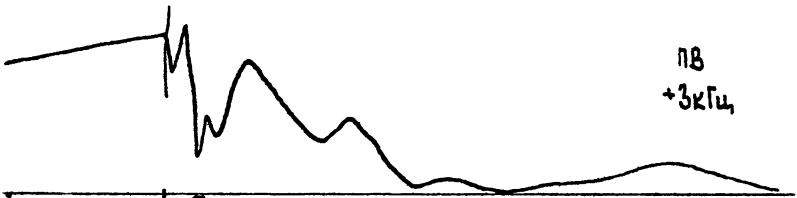
На рис. 4-8 приведены примеры записей сигналов ПВ различных отстроек Δf , иллюстрирующие многообразие наблюдаемых форм изменения их амплитуды на "пичковой" стадии взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой: сменяющие друг друга резкие провалы или всплески амплитуды ПВ, положение которых зависит от величины и знака отстройки Δf (рис. 4, 5); отсутствие подобия между вариациями амплитуд ВН и ПВ для очень близких ($|\Delta f| = 3$ КГц) отстроек (рис. 4, 5, 7), а в ряде случаев даже ВН и ПВ с $f_{\text{ПВ}} = f_{\text{ВН}}$;

⁺) Поведение ПВ с $f_{\text{ПВ}} = f_{\text{ВН}}$ изучалось при использовании режима излучения ВН с периодическими короткими паузами ($T_n \approx 3$ мс), во время которых проводилось зондирование ВО ионосферы импульсным сигналом ПВ.

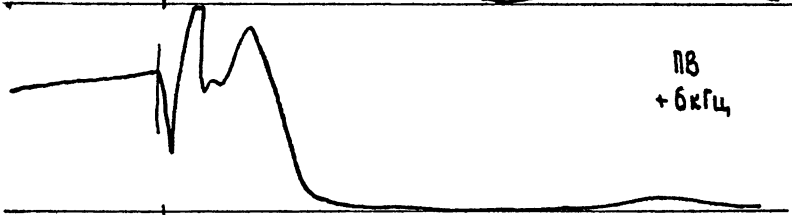
ВН
5828 кгц
 $\tilde{H}_3 = 60 \text{ МВТ}$



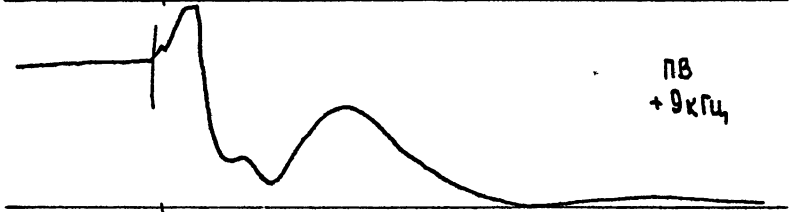
пв
0 кгц



пв
+3 кгц



пв
+6 кгц

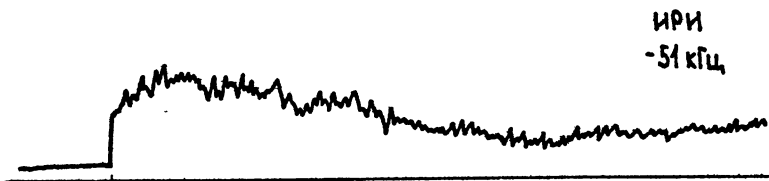
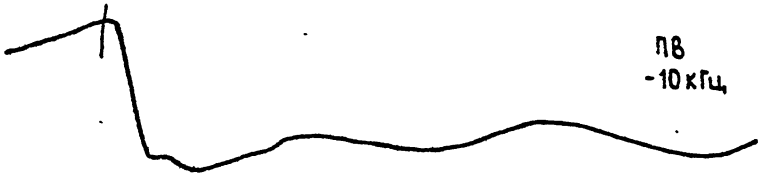
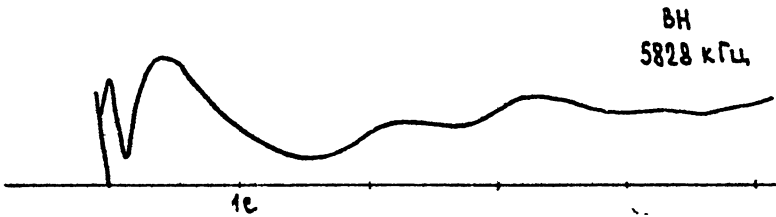
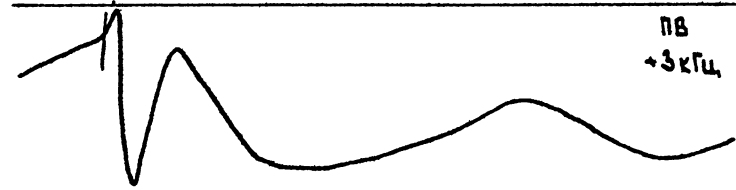


пв
+9 кгц



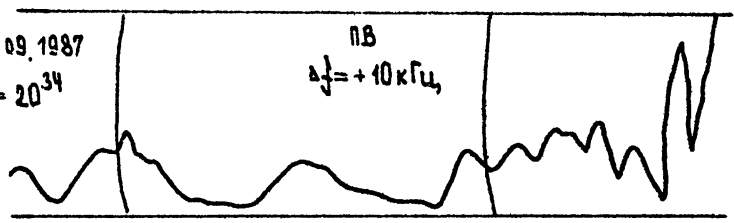
пв
+12 кгц

Рис. 4

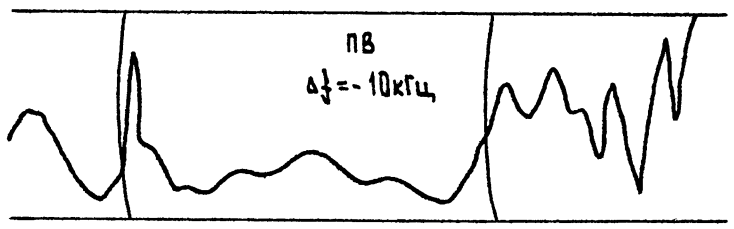


10 09. 1987
 $\tau = 20^{34}$

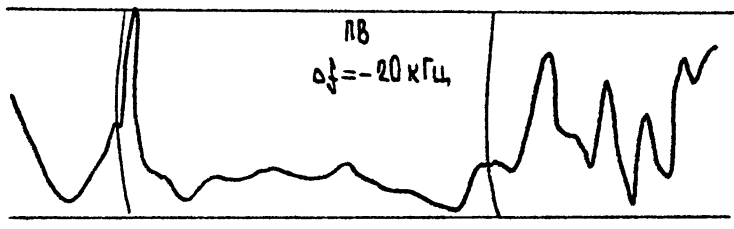
ПВ
 $\Delta f = +10 \text{ кГц}$



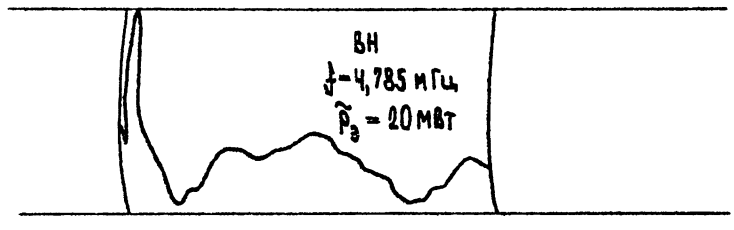
ПВ
 $\Delta f = -10 \text{ кГц}$



ПВ
 $\Delta f = -20 \text{ кГц}$



ВН
 $f = 4,785 \text{ мГц}$
 $\tilde{P}_0 = 20 \text{ мВт}$



ПВ
 $\Delta f = -5 \text{ кГц}$

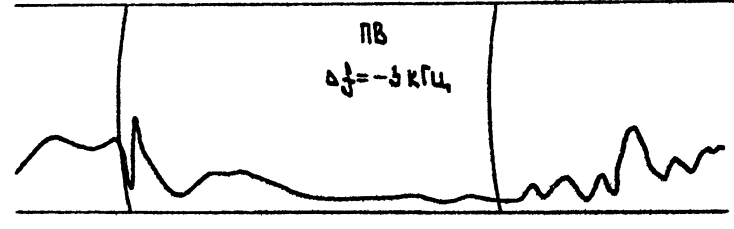


Рис. 6.

20.05.1987
T=19⁵⁵

ПВ
-10 кГц



ВН
5455 кГц
 $\tilde{\rho}_2 = 10 \text{ мВТ}$



ПВ
+10 кГц



1c

Рис. 7

появление кратковременных сильных всплесков амплитуды ПВ, приводящих к ее увеличению в 1,5-2 раза по сравнению с невозмущенным значением (рис. 6).

"Пичковые" осцилляции на ПВ хорошо проявляются до отстроек $|\Delta f| \approx 10$ кГц (см. также [26]). При увеличении Δf до ± 20 кГц колебания амплитуд ПВ по своим характеристикам уже претерпевают значительные изменения в сторону уменьшения величины вариаций и упрощения их формы (исчезают быстрые многократные осцилляции амплитуды сигнала), а при увеличении Δf до ± 40 кГц "пичковые" колебания (быстрые и резкие изменения уровня ПВ) исчезают, выделяясь на записях отраженных сигналов в виде достаточно плавных искусственных флуктуаций, более характерных для малых мощностей ВЧ (как, например, на рис. 1, 2).

Следующей важной особенностью "пичковых" осцилляций на ПВ являются обнаруженные нами релаксационные колебания их амплитуды после выключения ВЧ, если длительность воздействия была короче времени развития эффекта АО. Такие колебания хорошо видны на рис. 7 для отстроек ПВ $\Delta f = \pm 10$ кГц. Их характерный период, как и в случае появления колебаний после искусственных низкочастотных флуктуаций, обычно составляет 200-400 мс, а общая длительность релаксации возмущений не превышает 1-2 осцилляций.

Обратимся к рис. 5, для которого рассмотрим поведение амплитуд ВЧ и ПВ различных отстроек. Здесь на ВЧ хорошо видны проявления эффекта стрикционного самовоздействия (первый очень краткий всплеск амплитуды, который оказывается в значительной степени подавленным из-за превышения постоянной времени детектора $\tau_{\text{дет}} \approx 50$ мс характерного времени самого эффекта), быстрая первая осцилляция с характерным временем $\sim 0,2$ с и второй более широкий максимум, после которого наблюдается уже в полной мере развитие эффекта АО. При этом на временах первой осцилляции мы имеем увеличение амплитуды сигнала для ПВ с положительными отстройками и резкое ее уменьшение для ПВ с отрицательными отстройками, причем явно видна задержка времени начала уменьшения для $\Delta f = -10$ кГц по сравнению с $\Delta f = -3$ кГц.

Второй максимум амплитуды ВЧ ($\Delta t = 0,6$ с) хорошо выделяется на ПВ с $\Delta f = \pm 3$ кГц, но уже практически неразличим для $\Delta f = \pm 10$ кГц. Следует отметить, что довольно часто максимумы более вы-

соких, чем первый, номеров осцилляций слабо проявляются даже на ПВ с $\Delta f = \pm 3$ кГц, которые в этом случае как бы не имеют фазы постстрикционного восстановления своей амплитуды, так характерной для сигнала ВН (см. рис. 3). В этом случае, основываясь только на данных изменения средней амплитуды отраженных сигналов, мы имеем для ПВ малых отстроек более быстрое развитие эффекта АО по сравнению с собственно мощной радиоволной. Аналогичные выводы относительно зависимости $T_{AO}(\Delta f)$ для условий эксперимента, когда использовались достаточно высокие уровни мощности ВН, превышающие пороги ее стрикционного самовоздействия, мы получали и ранее, отмечая невозможность их объяснения в рамках теории теплового расслоения [31-34]. Ниже (см. разд. 5) на основе результатов зондирования ВО ионосферы ПВ в широкой полосе расстроек мы еще раз вернемся к вопросу о динамике развития эффекта АО, где более подробно рассмотрим полученные к настоящему времени экспериментальные данные.

Из рис. 5 видно, что искусственное радиоизлучение (ИРИ) ВО ионосферы на $\Delta f = -5$ кГц также начинает развиваться еще на "пиковых" временах взаимодействия ВН с плазмой, достигая максимальной амплитуды к началу развития АО на ВН. Это может указывать на то, что спектр плазменных волн, отвечающий максимуму интенсивности ИРИ, формируется вследствие развития стрикционной параметрической неустойчивости.

Проведенные эксперименты по зондированию ВО ионосферы сигналами ПВ на близких к $f_{ВН}$ частотах позволили определить некоторые характеристики стрикционного подавления их амплитуды. Обратимся к рис. 8. Здесь для ПВ с $\Delta f = -3$ кГц хорошо видно резкое уменьшение ее уровня после включения ВН за $\Delta t \approx 100$ мс. С некоторой задержкой $\delta t \approx 100$ мс такое же резкое, но меньшей глубины уменьшение амплитуды наблюдается и для ПВ с $\Delta f = -10$ кГц. Сравнение глубины наблюдаемых провалов амплитуды ПВ с величиной коэффициента стрикционного самовоздействия ВН показали, что они практически совпадают для $\Delta f = -3$ кГц; для $\Delta f = -10$ кГц глубина провала уменьшается приблизительно в 2 раза и эффект практически исчезает для еще больших отрицательных отстроек⁺⁾ . Важно также, что этот эффект

⁺⁾ Здесь, как и ранее, поведение амплитуды ВН на стрикционной фазе развития взаимодействия было восстановлено по записи сигнала на магнитную ленту.

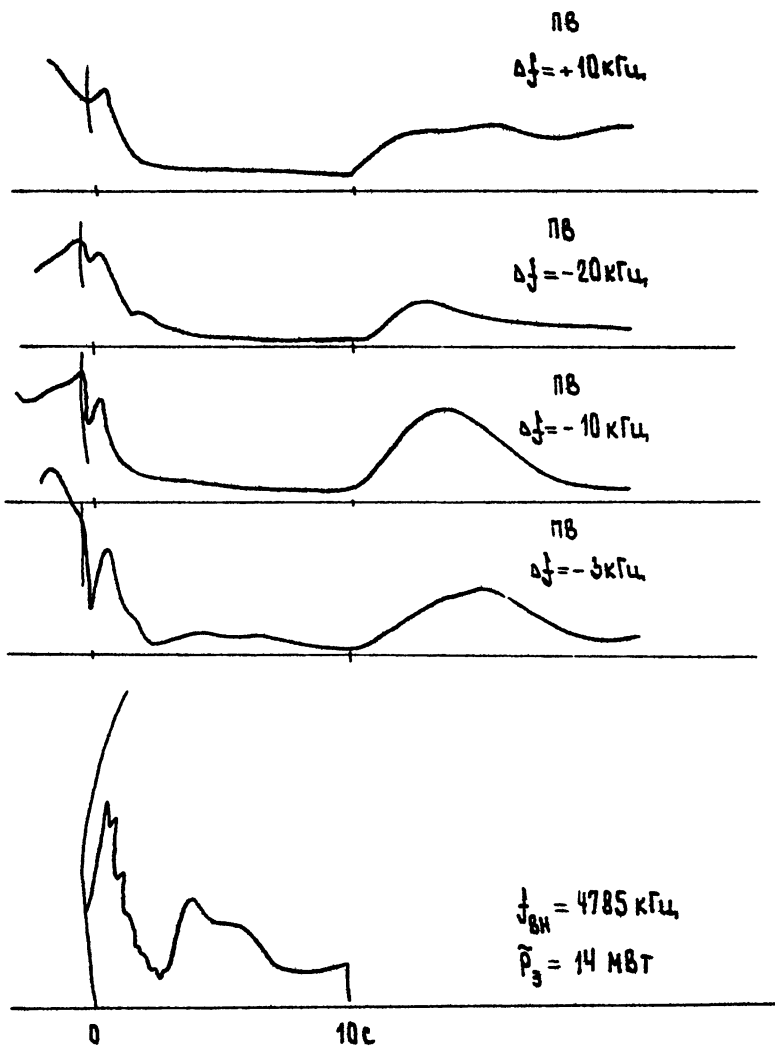


Рис. 8

либо отсутствует, либо оказывается в значительной степени подавленным для ПВ положительных отстроек. Из проведенных исследований следует, что искусственные плазменные волны возбуждаются преимущественно на частотах, меньших частоты ВН, их спектр имеет характерную ширину $\sim 10-15$ кГц, причем развитие спектра продолжается еще и на "пиковых" временах взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой. Эти выводы находятся в полном соответствии с результатами ранее выполненных измерений спектральных характеристик высокочастотной плазменной турбулентности [4,7,48].

Подводя итоги рассмотренных экспериментальных исследований проявления "пиковых" осцилляций на ПВ близких относительно отстроек, мы выделяем следующие их основные свойства.

а) Появление "пиковых" осцилляций наблюдается в достаточно узкой полосе частот с $|\Delta f| \leq 10-20$ кГц и при мощностях $ВН \bar{P}_3 > P_{3n}(c)$

б) Осцилляции на ПВ имеют малый радиус частотной корреляции $\delta t \leq 3-6$ кГц, при этом часто отмечается практическое отсутствие корреляции ПВ и ВН даже при малых $|\Delta f| = 3$ кГц отстройках, а иногда даже для $\Delta f = 0$.

в) В области отрицательных отстроек ПВ $|\Delta f| < 10$ кГц на характер поведения амплитуды сигналов может оказывать сильное влияние эффект их стрикционного подавления; при этом, как правило, после быстрого уменьшения амплитуда ПВ не восстанавливается до своего невозмущенного значения, как это имеет место для сигнала ВН. Последнее обуславливает более быстрые времена развития эффекта АО на ПВ по отношению к τ_{AO} (ВН), что необходимо учитывать при интерпретации ряда экспериментальных данных.

г) Как в области положительных, так и отрицательных отстроек обычным является увеличение амплитуды ПВ выше уровня ее невозмущенного значения, причем это увеличение может быть весьма значительным и иметь малые ($\sim 0,2-0,3$ с) характерные времена. В некоторых случаях, как, например, на рис. 6, видна явная корреляция всплесков амплитуды ПВ и возрастание уровня отраженного сигнала ВН.

Рассмотренные выше свойства "пиковых" осцилляций позволяют сделать вывод о том, что здесь мы имеем дело с проявлениями взаимодействия ВН и ПВ с изменяющимися во времени (и в пространстве) спектром плазменных волн, возбуждаемых мощной радиоволной вблизи уровня ее отражения. Весьма вероятно, что эти изменения, как и в

случае появления искусственных незкочастотных флуктуаций, могут быть следствием формирования периодической решетки концентрации плазмы в поле стоячей волны мощного радиоизлучения. Согласно оценкам, а также результатам измерений [37], характерное время образования этой решетки составляет приблизительно несколько десятков миллисекунд. Отметим, что именно по прошествии этого времени имеет место восстановление уровня сигнала ВН после ее стрикционного самовоздействия. Важно, что при больших уровнях мощности ВН вследствие развития стрикционной параметрической неустойчивости интенсивность решетки может значительно усиливаться за счет дополнительной силы стрикционного давления плазменных волн⁺⁾ .

С учетом всего вышесказанного сценарий образования "пичковых" осцилляций может быть представлен следующим образом. В первоначально гладком слое ионосферной плазмы в пучностях поля стоячей волны мощного радиоизлучения за время порядка нескольких миллисекунд развивается стрикционная параметрическая неустойчивость и возбуждаются искусственные плазменные волны. Далее за время $\sim 50-100$ мс происходит формирование полного спектра плазменных волн за счет их сателлитной перекачки и рассеянию по углам, и параллельно этому идет образование периодической решетки плотности плазмы под действием суммарной стрикционной силы электрических полей электромагнитной и плазменных волн. Появление периодической решетки изменяет первоначальный характер взаимодействия ВН с плазмой, привнося в него свои динамические свойства, в результате чего и возникают "пичковые" осцилляции как на самой ВН, так и на ПВ близких острок

$|\Delta f| \approx 20$ кГц при $f_{ВН} \approx 5$ МГц. При этом, поскольку при индуцированном рассеянии плазменных волн наблюдается формирование сателлитного характера их спектра [56], то вполне естественно, что радиус частотной корреляции "пичковых" осцилляций определяется шириной сателлита, которая обычно порядка нескольких килогерц. На больших отстройках Δf , где не ощущается взаимодействия ПВ с высоко-

⁺⁾ Отметим, что влияние периодической решетки на динамику и спектр плазменных волн рассматривалось в [42,43], где с ее помощью удалось объяснить ряд экспериментальных результатов, полученных при измерениях характеристик некогерентного рассеяния радиоволн и искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы.

частотной плазменной турбулентностью, присутствие в области отражения периодической решетки плотности плазмы проявляется как существование искусственных низкочастотных биений уровня отраженного сигнала ПВ, характерных для низких ($\tilde{P}_3 < P_{ЭП} (ССВ)$) значений мощности ВН (см. разд. 2). Последующее развитие мелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы в ВО ионосферы, вызывающих эффект АО, приводит к срыву стрикционной параметрической неустойчивости, разрушению решетки и подавлению "пичков".

К сожалению, в настоящее время отсутствует решение полной самосогласованной динамической задачи возбуждения решетки плотности плазмы в поле стоячей волны с учетом развития стрикционной параметрической неустойчивости и обратного влияния периодической решетки на взаимодействующие волны. Поэтому мы вынуждены ограничиться только приведенным качественным описанием наблюдаемых эффектов. Здесь также следует признать, что в рамках предложенной модели трудно объяснить наблюдающиеся короткие (с $\tau \approx 0,2-0,3$ с) значительные всплески амплитуды ПВ сразу после включения ВН (см. рис.6). Эти всплески даже только в силу своей малой длительности и малого радиуса частотной корреляции не могут являться следствием эффекта фокусировки волн за счет искажения профиля плазмы в масштабе размеров диаграммы направленности антенны нагревного стенда. Не исключение, что такое поведение сигнала ПВ (а возможно и отраженного сигнала ВН) может являться следствием развития локальных областей с сильной плазменной турбулентностью - плазменных солитонов, которые последнее время все чаще привлекаются для объяснения экспериментальных данных ионосферных экспериментов (см., например, [5,45-47]).

В заключении обратимся к результатам работы [38], где для больших уровней мощности ВН ($P_3 \approx 150$ МВт) в полосе отстроек $|\Delta f| \leq 40$ кГц было обнаружено быстрое изменение фазы отраженных от ионосферы сигналов, а также появление в первый момент воздействия около точки отражения ВН дополнительных рассеянных сигналов, амплитуда которых соизмерима с амплитудой зеркального. В связи с этим появление "пичковых" осцилляций рассматривалось в [38] как биения зеркальной компоненты и дополнительного рассеянного сигнала. Однако эта модель образования "пичков" противоречит таким основным его свойствам, как малый радиус частотной корреляции, и их существо-

ванию при достаточно низком уровне мощности ВН ($\tilde{P}_3 \approx 3-5$ МВт при $f_{ВН} \approx 5-6$ МГц), когда рассеяние на решетке остается еще очень слабым и не наблюдается, как показали измерения [23], быстрого изменения фазы сигнала в первый момент времени после начала воздействия. Поэтому следует заключить, что предложенная в [38] модель образования "пичков" не может служить в качестве основы для их интерпретации. В то же время полученные здесь экспериментальные результаты являются дополнительным свидетельством важности учета изменения профиля плотности при исследовании характера взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F-слоя ионосферы.

4. СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ВБЛИЗИ УРОВНЯ ОТРАЖЕНИЯ ВН НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЛАЗМОЙ

Целый ряд полученных к настоящему времени экспериментальных фактов указывает на то, что вблизи уровня отражения ВН уже на стрикционных и "пичковых" временах взаимодействия мощного радиоизлучения обыкновенной поляризации с плазмой имеет место генерация искусственных мелкомасштабных неоднородностей, т.е. низкочастотной турбулентности. С целью определения характеристик начальной турбулентности была проведена локация уровня отражения ВН пробными волнами O-поляризации, частота которых для $f_{ВН} \approx 5750$ кГц приблизительно на 150-170 кГц выше $f_{ВН}$, так что область их верхнегибридного резонанса (ВГР) совпадала с высотой отражения ВН. При этом образование вытянутых вдоль \vec{H}_0 мелкомасштабных неоднородностей на высоте отражения ВН должно приводить к появлению эффекта АО для этих ПВ.

Зондирование области отражения ВН возможно также волнами X-поляризации, частота которых приблизительно на $\frac{f_H}{2} \approx 650$ кГц (f_H - гирочастота электронов) превышает значение $f_{ВН}$. Естественно, эти ПВ прямо не участвуют во взаимодействии с искусственной высокочастотной плазменной турбулентностью, но дают возможность исследовать возникающие под действием мощного радиоизлучения крупномасштабные деформации профиля плазмы.

Рассмотрим основные полученные в этих экспериментах результаты.

На рис. 9, 10 приведена динамика ПВ различных отстроек: $\Delta f = +5$ кГц, 17 кГц – близкие относительно $f_{\text{ВН}}$ отстройки ПВ, для которых наблюдается появление "пиковых" осцилляций; $\Delta f = -150$ кГц – для этих ПВ высота их отражения совпадает с областью ВГР для ВН⁺); $\Delta f = 130-170$ кГц – ПВ, область ВГР которых находится на высоте отражения ВН, и $\Delta f = 640$ кГц (X) – пробная волна X-поляризации, высота отражения которой также примерно совпадает с областью отражения ВН. Из рисунков хорошо видно, что "пички" на ВН сопровождаются появлением "пиковых" колебаний на ПВ близких отстроек. На этих временах ($\Delta t \approx 0,4-0,6$ с) не наблюдается еще никаких изменений амплитуды ПВ с $\Delta f = -150$ кГц, чьи вариации начинают регистрироваться только после окончания "пиковых" осцилляций. В то же время сразу после включения ВН для отстроек $\Delta f \approx 130-170$ кГц в этих измерениях было обнаружено уменьшение их амплитуды с характерным временем $\tau_1 \approx 0,2-0,4$ с, которая также быстро начинала восстанавливаться с началом развития эффекта АО на ВН, появляющийся здесь значительно позднее, спустя $\sim 1-3$ с после включения ВН. Величина начального быстрого уменьшения амплитуды для ПВ с $\Delta f \approx 150$ кГц может достигать 30-70% от ее невозмущенного уровня А; полоса частот, где наблюдается этот эффект, порядка 50 кГц; $\tau_1 \propto \tilde{r}_3^{-2}, \alpha \approx 0,7$.

Полученные экспериментальные результаты быстрого уменьшения амплитуды для ПВ с $\Delta f \approx 150$ кГц могут быть интерпретированы как АО этих ПВ на мелкомасштабных неоднородностях с $l_1 \leq 3$ м, развивающихся еще на стрикционных и "пиковых" временах непосредственно вблизи уровня отражения ВН (возможно, за счет самофокусирующей неустойчивости плазменных волн [29, 30, 58] ++). Можно предпо-

+) Эта схема диагностики возмущенной области ионосферы подробно исследовалась в работах [10, 35, 47]. В следующем разделе мы рассмотрим некоторые полученные здесь результаты.

++) В [30] рассматривался случай возбуждения высокочастотной плазменной турбулентности в результате прямой конверсии электромагнитных волн в плазменные. Однако, как показывают оценки, выполненные А.Н. Караштиным, основные выводы работы сохраняются и в случае спектра плазменных волн, получающегося в результате развития стрикционной параметрической неустойчивости.

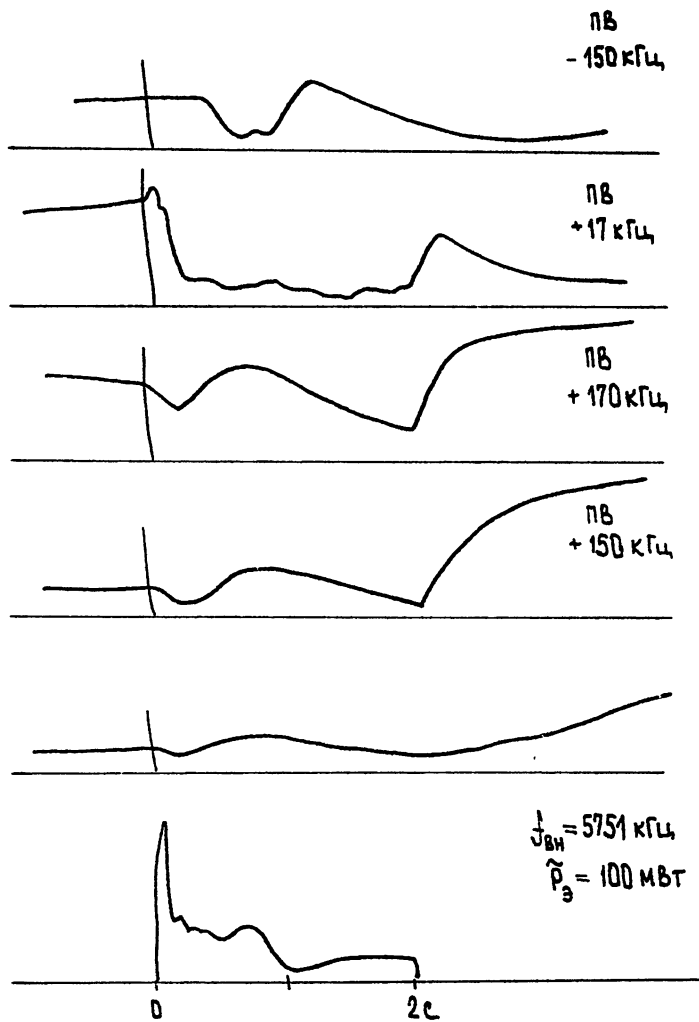


Рис. 9.

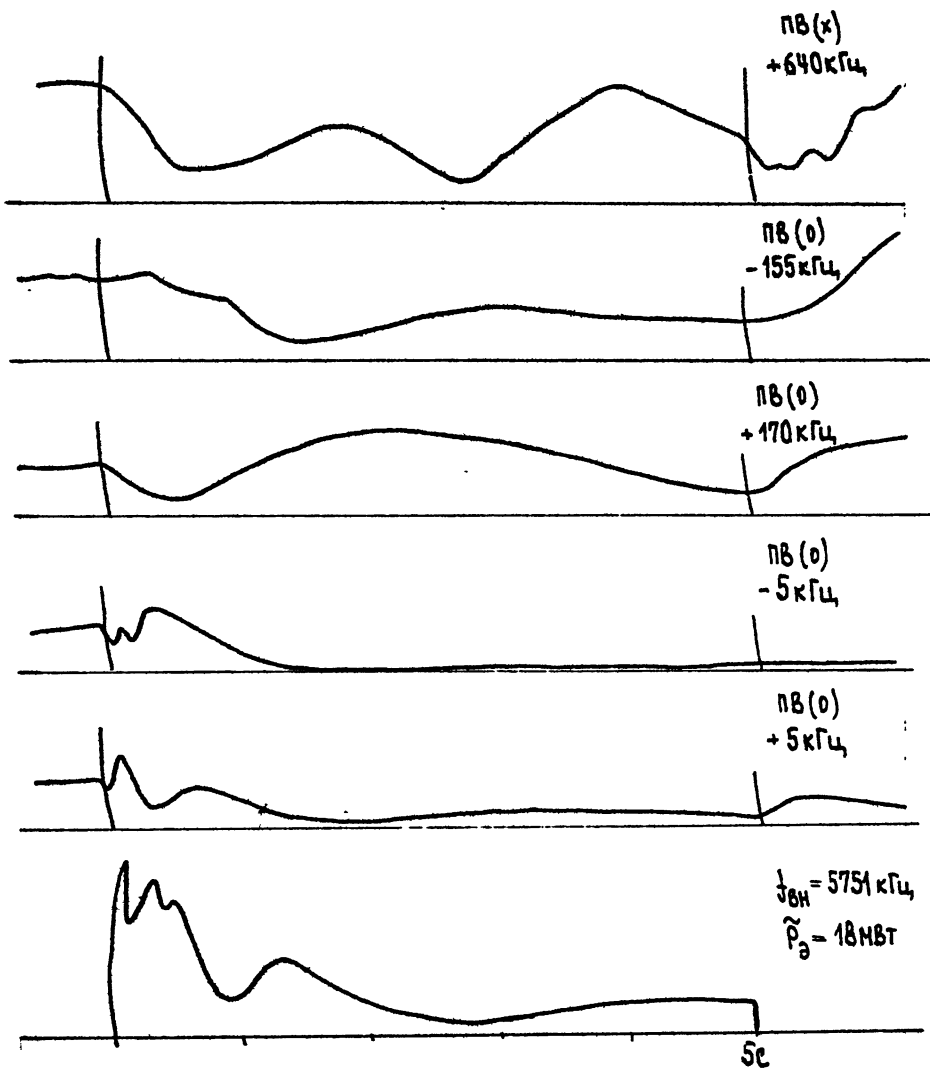


Рис. 10

ложить, что, вытягиваясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, возмущения плотности плазмы достигают уровня ВГР для ВН, где служат в качестве затравочных неоднородностей для развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [31-34]. При этом появление АО на ВН (развитие мелкокомасштабных неоднородностей на уровне ВГР для ВН) приводит к срыву стрикционной параметрической неустойчивости и, следовательно, к прекращению генераций стрикционных неоднородностей⁺).

Подтверждением предложенной выше модели могут служить наши эксперименты по исследованию влияния стрикционной фазы взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой на последующий ход развития искусственной турбулентности. В этих экспериментах воздействие на ионосферу осуществлялось импульсами длительностью 5с с периодом их повторения, равным 2 мин. Перед каждым вторым включением ВН в течение 1 мин излучалась серия коротких импульсов с длительностью $\tau_{\text{и}} = 5-20$ мс и периодом повторения $T_{\text{и}} = 50-1000$ мс. Были получены следующие результаты. "Стрикционный подогрев" ионосферной плазмы⁺ приводил к более быстрому в течение 5-секундного импульса ВН развитию спектра искусственной мелкокомасштабной турбулентности, выражавшемуся в уменьшении времени развития АО и увеличении времени его релаксации по сравнению со случаем воздействия на предварительно не возмущенную ионосферу. Наблюдалось также исчезновение развитой (осцилляторной) формы "пичков" на ВН и "пичковых" колебаний на ПВ. Эффект "стрикционного подогрева" проявлялся только при коротких (~ 40 мс) паузах между импульсами ВН (режим излучения [+5 мс, -45 мс] и [+10 мс, -40 мс]) и более сильно для $\tau_{\text{и}} = 10$ мс, чем для $\tau_{\text{и}} = 5$ мс. Последнее указывает, что необходимо некоторое минимальное время воздействия ~ 5 мс, чтобы стрикционные эффекты стали оказывать свое влияние на после-

⁺) Следуя принятой градации временной шкалы будем называть их "стрикционными" в отличие от неоднородностей, появляющихся позднее при развитии тепловой параметрической неустойчивости.

⁺⁺) Под "стрикционным подогревом" мы будем понимать воздействие на ионосферу короткими импульсами радиоизлучения, длительность которых достаточна для развития эффекта стрикционного самовоздействия ВН, в то время как их средняя мощность мала, чтобы развивался эффект АО.

дующий ход развития турбулентности. При паузе между импульсами подогрева ~ 180 мс изменения свойств "пичков" уже не обнаруживалось, но отмечалось еще некоторое изменение характерных времен развития и релаксации эффекта А0. При паузах ~ 980 мс влияние подогрева отсутствовало. Таким образом, можно считать, что релаксация эффектов, связанных со "стрикционным подогревом", длится не более нескольких сотен миллисекунд.

Как и в случае рассмотренных ранее результатов зондирования уровня отражения ВН ПВ с $\Delta f = +150$ кГц, измерения при "стрикционном подогреве" ионосферной плазмы могут быть объяснены, если предположить, что уже на стрикционной фазе развития взаимодействия мощного радиоизлучения 0-поляризации с плазмой в первые десятки миллисекунд после ее включения вблизи уровня отражения ВН имеет место генерация мелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы с $l_1 \leq 3$ м, которые служат затравочным уровнем турбулентности для последующего эффекта теплового расщепления плазмы и изменяют динамику развития А0 по сравнению со случаем невозмущенной ионосферы.

Существование "стрикционных" неоднородностей может определять наблюдающееся на эксперименте более быстрое и интенсивное развитие искусственной турбулентности с $l_1 \leq 3$ м в первый момент времени после включения ВН [52] и связанное с этим появление максимума в спектре флуктуаций плотности плазмы в области масштабов $l_1 \sim 3-5$ м [16-18]. Существование "стрикционных" неоднородностей может объяснить также ряд особенностей эффекта переноса амплитудной модуляции ВН на ПВ: симметрию частотной зависимости величины эффекта относительно $f_{\text{ПВ}}$, характерные времена его развития и релаксации, срыв эффекта при достаточно большой длительности мощного радиоимпульса [17, 22, 36, 49].

Наличие "стрикционных" мелкомасштабных неоднородностей, по-видимому, может иметь прямое отношение к механизму генерации начального ("нетеплового") спектра искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) и к появлению временных максимумов интенсивности излучения в области отрицательных отстроек [12, 28] (см. рис. 5). В рамках рассматриваемой модели можно предположить, что исчезновение временных максимумов интенсивности ИРИ на отстройках $\Delta f = -10 - -60$ кГц при приближении $f_{\text{ВН}}$ к $f_{\text{ср}2}$ [12] связано с уда-

лением по высоте двух уровней: уровня отражения ВН и уровня ее ВГР. При этом из-за конечной степени вытянутости $l_{\text{н}} \approx 2-5$ км для условий F-области ионосферы "стрикционные" неоднородности могут не достигать уровня ВГР, что приведет к изменению характера взаимодействия мощной волны с плазмой. Отметим, что резкое уменьшение характерных времен депрессии ИРИ с уменьшением времени нагрева ионосферы [28] также может говорить о существенности на начальном этапе развития взаимодействия ВН с плазмой "стрикционных" мелко-масштабных неоднородностей⁴⁾.

Завершая данный раздел, приведем коротко результаты зондирования уровня отражения ВН с помощью ПВ X-поляризации, частоты которых выбирались на 0,6-0,7 МГц выше $f_{\text{ВН}}$ (рис. II). Проведенные измерения показали появление квазипериодических осцилляций уровня принимаемых сигналов ПВ, которые наблюдались в течение до десятков секунд после окончания воздействия. Характерный период биений обычно составлял 1-3 с. Они хорошо обнаруживались в полосе частот $\delta f \approx 0,3$ МГц с величиной максимального эффекта на отстройках $\Delta f = 600-700$ кГц. Биения начинали надежно регистрироваться спустя $\Delta t \approx 0,5-1$ с после включения ВН, что приблизительно соответствовало времени окончания "пичков". Для более ранней стадии взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой не отмечено появление каких-либо вариаций амплитуды отраженных сигналов этих ПВ. Важно, что наибольшая амплитуда флуктуаций при достаточно коротком импульсе ВН ($\tau_{\text{н}} \approx 1-3$ с) имела место уже после его окончания. Появление биений не наблюдалось при мощностях ВН $\tilde{P}_3 \approx 1$ МВт, а при $\tilde{P}_3 = 20$ МВт - при длительности импульса воздействия $\tau_{\text{н}} \approx 0,5$ с. С увеличением \tilde{P}_3 или $\tau_{\text{н}}$ амплитуда биений возрастала. Следует также заметить, что при периодическом режиме нагрева ионосферы (использовался, например, режим [+3 с - 27 с]) наблюдался эффект накопления воздействия от импульса к импульсу ВН, выражавшийся в увеличении времени релаксации биений. При этом возникала ситуация, когда флуктуации амплитуды ПВ уже не исчезали в течение всей паузы между импульсами ВН.

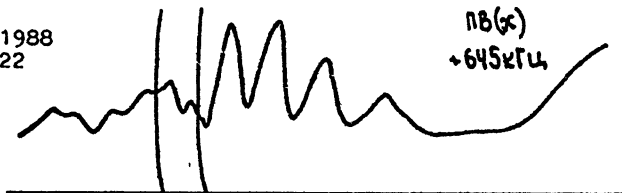
Полученные результаты могут быть интерпретированы как появле-

⁴⁾ Более подробно связь динамики МИИН с развитием АО и ИРИ на начальной стадии взаимодействия ВН с плазмой будет рассмотрена нами в следующих работах.

19.02.1988

$T=16^{22}$

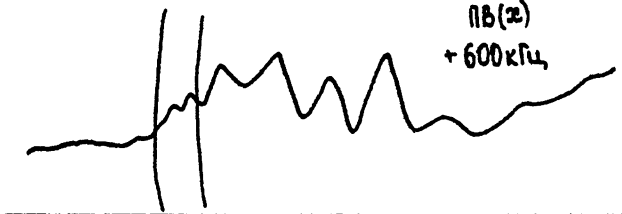
$\Pi B(x)$
 $+645 \text{ кГц}$



$\Pi B(x)$
 $+620 \text{ кГц}$



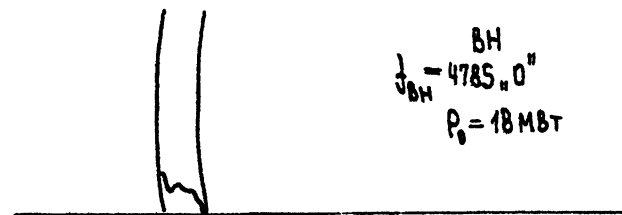
$\Pi B(x)$
 $+600 \text{ кГц}$



$\Pi B(x)$
 $+660 \text{ кГц}$



$\Delta_{BH} = 4785.0''$
 $P_0 = 18 \text{ МВТ}$



3с

Рис. 11

ние крупномасштабных возмущений профиля плотности плазмы, приводящие к формированию многолучевого отраженного сигнала, которые возникают вблизи уровня отражения ВН уже к моменту завершения "пиковых" колебаний. Важно, что эти возмущения могут продолжать развиваться и после окончания воздействия, указывая тем самым на существование эффекта аккумуляции энергии ВН в плазме, захватывающего большие ее объемы и на начальном этапе еще не вызывающие изменения концентрации. Исходя из измерений пороговой мощности ВН и характерного времени появления осцилляций амплитуды ПВ Х-поляризации, мы и здесь должны допускать определяющую роль стрикционной параметрической неустойчивости в формировании таких крупномасштабных возмущений ионосферной плазмы.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при воздействии на F-слой ионосферы радиоизлучением 0-поляризации, мощность которого превышает порог стрикционной параметрической неустойчивости, еще на стрикционных и "пиковых" временах вблизи уровня отражения ВН наблюдается развитие мелкомасштабных с $l_1 \leq 3$ м флуктуаций плотности плазмы, а несколько позднее (с окончанием "пиков") - и крупномасштабные искажения ионосферного профиля.

5. НЕСКОЛЬКО ЗАМЕЧАНИЙ О ДИНАМИКЕ РАЗВИТИЯ АО РАДИОВОЛН В ВО ИОНОСФЕРЫ И СВОЙСТВ ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДЫ ПВ, ОТРАЖАЮЩИХСЯ ОТ УРОВНЯ ВГР ДЛЯ ВН

Выше при анализе полученных экспериментальных данных мы неоднократно отмечали, что с ростом мощности ВН при $\tilde{P}_3 > P_{3п}$ (ССВ) наблюдается качественное изменение динамики АО, выражающееся в появлении резкого уменьшения амплитуды отраженного сигнала ВН через $\Delta t \approx 0,2-1$ с (Δt зависит от \tilde{P}_3 и предыстории воздействия) после ее включения. Часто после такого быстрого АО (БАО) легко различимо дополнительное более медленное уменьшение амплитуды ВН еще в течение нескольких секунд, по времени совпадающее с изменением амплитуды ПВ больших ($\sim 100-200$ кГц) отстроек⁺. Пример развития

⁺ О существовании БАО упоминалось в работах [14,17], где оно связывалось с интенсифицированным развитием искусственных мелкомасштабных неоднородностей с $l_1 \leq 3$ м и отмечалось его преимущественное появление при $f_{ВН} \leq 5$ МГц. Считалось, что последнее определяется уменьшением пороговой мощности стрикционного самовоздействия ВН при понижении $f_{ВН}$. При больших уровнях мощности ВН $\tilde{P}_3 \approx 150$ МВт появление БАО фактически регистрировалось в [49].

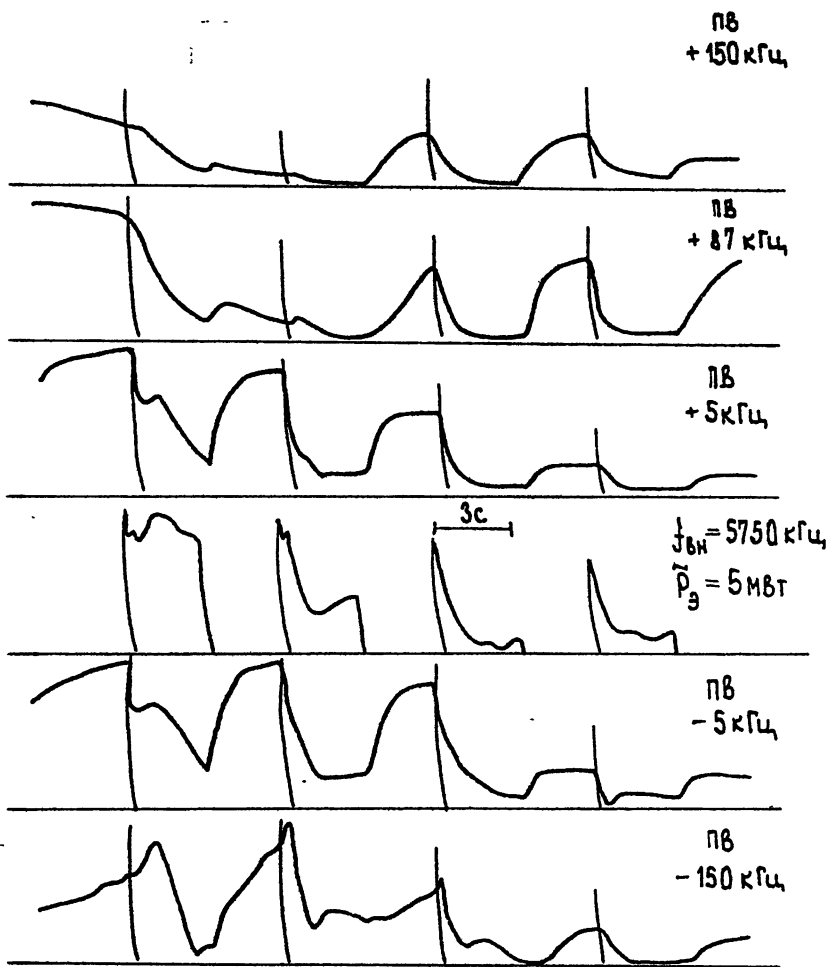


Рис. 12

БАО на ВН приведен на рис. 12. Хорошо видно, как от импульса к импульсу воздействия происходит его усиление и уменьшение времен развития. Такого рода эффект последствия нагрева сохраняется еще и при паузах между импульсами ВН до несколько десятков секунд.

С существованием БАО мы теперь связываем уменьшение времени релаксации АО (τ_p) при переходе к коротким ($\tau_{и} \leq 1$ с) длительностям импульса ВН, которое наблюдалось в экспериментах [17]. Эти измерения были нами продолжены, и на рис. 13 представлена полученная для ПВ с $|\Delta f| \leq -15$ кГц зависимость τ_p от $\tau_{и}$ (+). Здесь для $\tau_{и} = 0,3$ с, 1 с и 3 с с ростом $\tau_{и}$ время релаксации АО достаточно плавно возрастает от $\tau_p \approx 0,06-0,1$ с до $\sim 0,4-0,5$ с; в интервале $\tau_{и} = 3-10$ с происходит резкое увеличение τ_p до ~ 10 с, а при $\tau_{и} > 10$ с наблюдается опять плавное увеличение τ_p до своего стационарного значения ~ 15 с. Важно, что при $P_3 \approx 20$ МВт для $\tau_{и} \leq 3$ с наблюдается развитие только БАО, более медленная составляющая АО развивается при больших временах воздействия. В силу этого малые времена релаксации АО $\tau_p \leq 0,5$ с можно отнести к процессу, приводящему к развитию БАО. Следует также заметить, что при $\tau_{и} \approx 10$ с на стадии релаксации АО можно еще выделить быстрое начальное увеличение амплитуды отраженного сигнала ПВ до уровня $\sim 0,2-0,4$ от невозмущенного значения амплитуды с последующим более медленным ее восстановлением.

Основываясь на полученных к настоящему времени данных, разумно предположить, что БАО вызывается генерацией мелкокомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с $h' \leq 3$ м на начальном этапе взаимодействия мощного радиоизлучения 0-поляризации с плазмой. Эти неоднородности возбуждаются вблизи уровня отражения ВН и по своим временным характеристикам соответствуют свойствам "стрикционных" неоднородностей, рассмотренных нами ранее в разд. 4.

Как теперь становится ясным, развитие БАО может иметь прямое отношение к появлению эффекта переноса модуляции (ПМ) амплитуды ВН на ПВ [17, 22, 24, 36, 49], который иллюстрируется на рис. 12. Проведенное в наших экспериментах параллельное зондирование ВО ионосферы ПВ в широком диапазоне отстроек при различных уровнях мощности

+) Представленные на рис. 13 данные получены при достаточно длительной паузе излучения ВН, когда эффектами последствия можно было пренебречь.

34

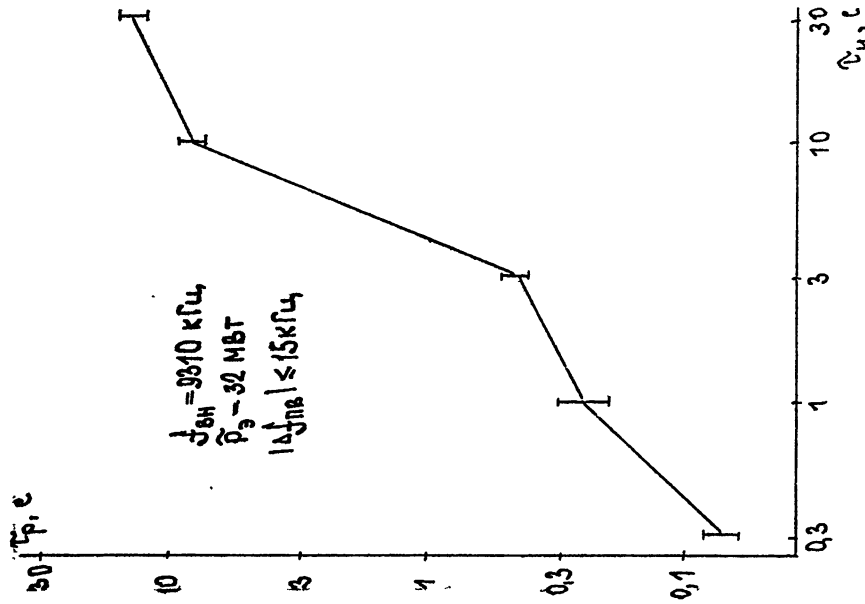


Рис. 13

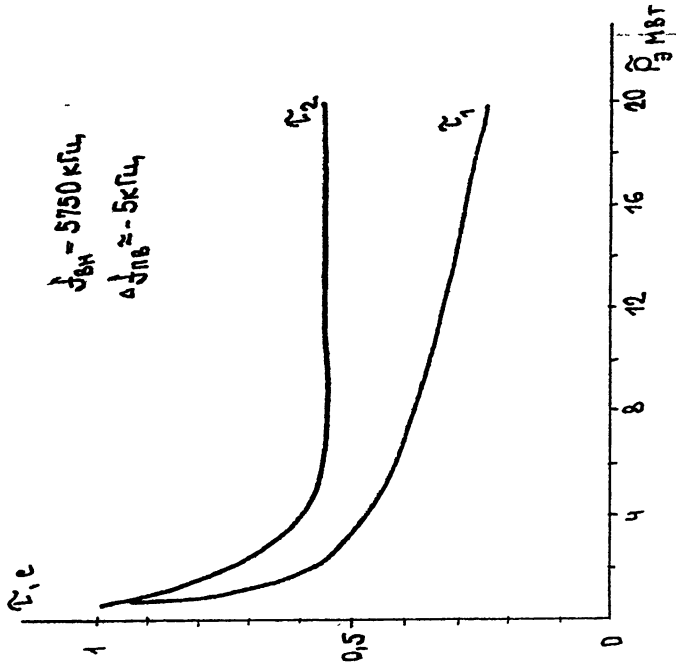


Рис. 14

ВН позволило установить, что эффект ПМ на малых $|\Delta f| \approx 5$ кГц начинает появляться при мощностях ВН даже несколько меньших, чем

$P_{3n}(\text{ССВ})$. С ростом мощности ВН полоса частот, где наблюдается эффект ПМ, расширяется, но с увеличением $|\Delta f|$ возрастает время задержки начала развития эффекта, которая для $\Delta f \approx \pm 150$ кГц составляет $\delta t \sim 0,4-1,5$ с, имея меньшие значения δt для положительных отстроек. Измерения показали, что с развитием БАО эффект ПМ значительно усиливается, а его характерные времена уменьшаются в 2-3 раза. Последнее видно из рис. 14, на котором приведены зависимости характерных времен падения амплитуды τ_1 и ее восстановления τ_2 , полученные для ПВ с $\Delta f = -5$ кГц по первым импульсам излучения ВН после длительной паузы. Отметим, что значение уровня мощности ВН $\bar{P}_3 \approx 3$ МВт, при которой наблюдаются изменения характера зависимости τ_1 и τ_2 от \bar{P}_3 , соответствует пороговой мощности ее стрикционного самовоздействия.

Приведенные на рис. 14 результаты измерений могут быть интерпретированы как уменьшение характерного масштаба возбуждаемой вблизи уровня отражения ВН начальной турбулентности с ростом \bar{P}_3 , что соответствует, в целом, результатам теории самофокусировочной неустойчивости плазменных волн [30]. Здесь также следует иметь в виду, что турбулентность, создаваемая на начальном этапе взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой, обладает свойствами, отличными от ее стационарных характеристик, благодаря чему релаксация искусственных неоднородностей может происходить с более высокой скоростью, чем после длительного нагрева ионосферной плазмы. Последнее, например, наблюдалось в экспериментах по ракурсному рассеянию радиоволн [19,20].

Отметим еще одну, на наш взгляд, важную особенность эффекта ПМ. Из рис. 12, 15 видно, что начало развития БАО на ВН и ПВ близких отстроек совпадает по времени с окончанием здесь "пиковых" осцилляций. Вместе с тем для ПВ с $\Delta f = 87$ кГц, где "пички" уже не наблюдаются, начало развития эффекта ПМ может наступать заметно раньше. Из этого можно сделать вывод, что, хотя генерация мелко-масштабной турбулентности с $l_1 \sim 3$ м, вызывающей эффект ПМ, начинается еще на "пиковых" временах, однако в начальной фазе развития ее влияние на ВН и ПВ близких отстроек маскируется более сильными эффектами, приводящими к образованию "пиков".

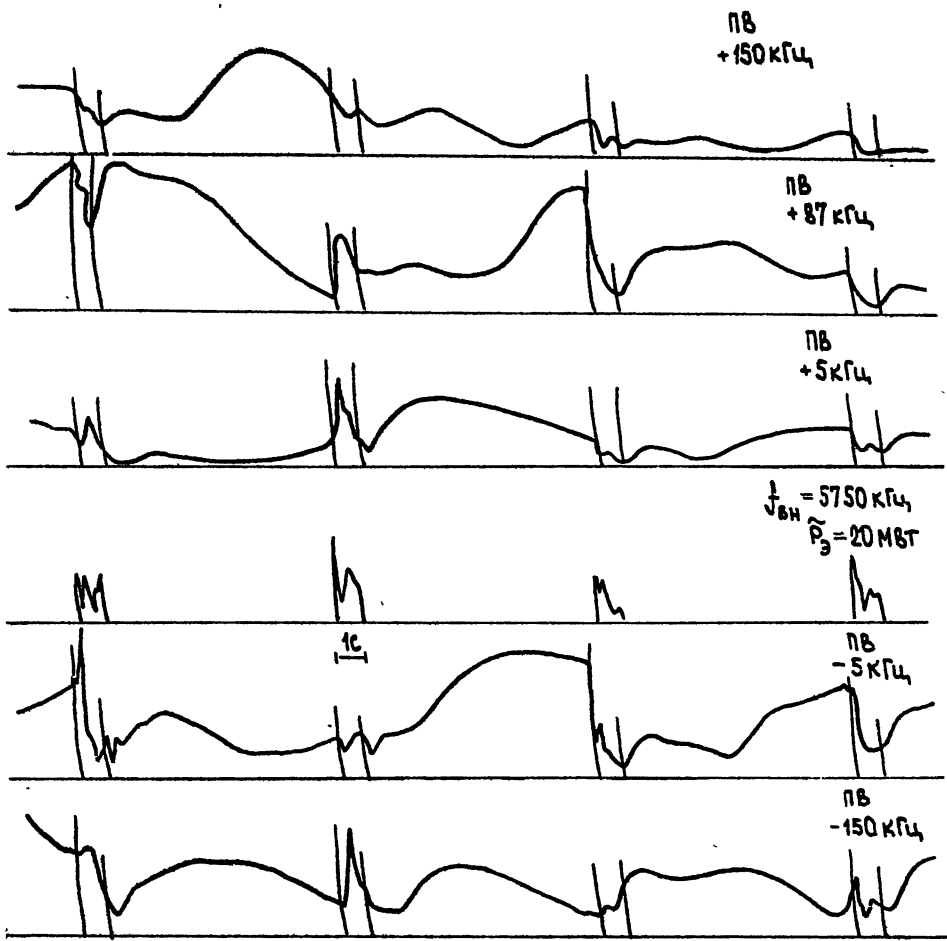


Рис. 15

В заключение сделаем несколько замечаний относительно свойств вариаций амплитуды ПВ с $\Delta f \approx -150$ кГц ($f_{ВН} = 5750$ кГц)⁺). По сравнению с исследованиями [9-11] наши измерения имели более высокое временное разрешение, что позволило выявить некоторые новые свойства наблюдаемых флуктуаций амплитуды отраженных сигналов ПВ.

На рис. 16 приведен один из характерных примеров регистрации сигналов ВН и ПВ с $\Delta f = -148$ кГц. Хорошо видно, что изменения амплитуды начинают регистрироваться некоторое время спустя после включения ВН (в данном сеансе $\Delta t \approx 0,2$ с). Это время задержки соответствует времени быстрого уменьшения амплитуды для ПВ с Δf 150 кГц (см., например, рис. 9). При достаточно длительном импульсе ВН вариации амплитуды на ПВ с $\Delta f = -150$ кГц оканчиваются с развитием здесь эффекта АО. В том случае, когда импульс ВН был короче времени развития АО на ПВ с $\Delta f \approx -150$ кГц, то после его окончания затухающие искусственные флуктуации амплитуды продолжают наблюдаться еще в течение $\sim 1-2$ с, причем релаксация начинается, как правило, с задержкой $\sim 0,2-0,4$ с относительно момента окончания воздействия (см. рис. 16, 17). Отмечается, что искусственные вариации амплитуды на ПВ с $\Delta f \approx -150$ кГц появляются, только когда мощность ВН превышает пороговую мощность ее стрикционного самовоздействия.

В работе [11] предложена модель "плазменного рефлектора", которая объясняет наблюдаемые всплески амплитуды эффектом фокусировки ПВ на уровне поверхности Земли. Однако, как показали наши измерения, имеет место не только увеличение, но достаточно часто и уменьшение амплитуды отраженных ПВ, причем знак эффекта может быть различен для соседних импульсов ВН, разнесенных по времени на несколько секунд, или даже для одного и того же импульса ВН, но для различных частот ПВ (см. рис. 17). При этом радиус частотной корреляции вариаций амплитуды ПВ, как правило, не превышает 5 кГц. Таким образом, полученные результаты ставят под сомнение модель "плазменного рефлектора", для которой, по оценкам работы [11], полоса эффекта должна быть не менее 100 кГц. Нам представляется весьма вероятным, что вариации амплитуды ПВ с $\Delta f \approx -150$ кГц связаны с присутствием на уровне ВГР для ВН высокого уровня высоко-

⁺) Напомним, что особенностью этих ПВ является совпадение уровня их отражения в ионосфере с высотой ВГР для ВН.

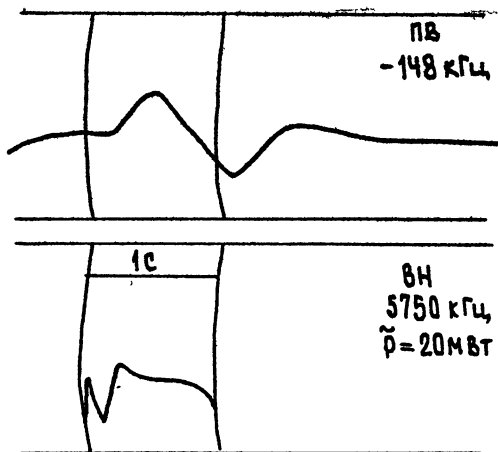


Рис. 16

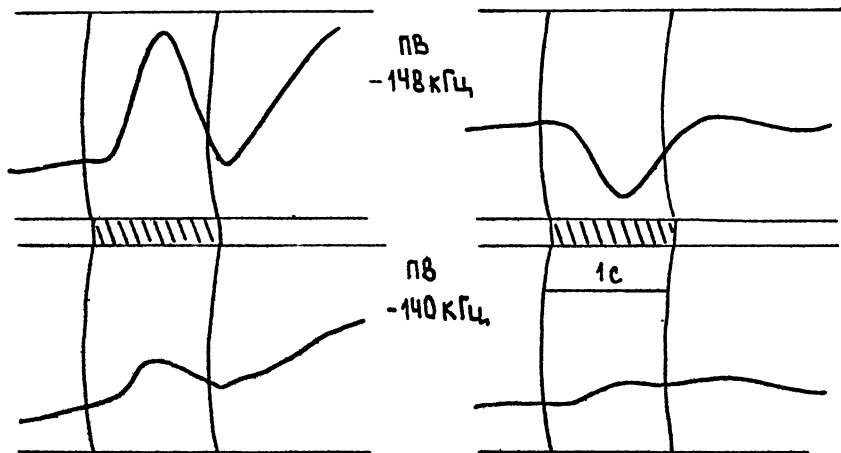


Рис. 17

частотной плазменной турбулентности, возбуждаемой в результате развития тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости. При этом, как и в случае генерации "пиковых" осцилляций на ПВ с $f_{ПВ} \approx f_{ВН}$, наличие сильной плазменной турбулентности изменяет характеристики отражающихся от этой области высот ПВ.

Выше мы коснулись наблюдаемых на ПВ с $\Delta f \approx -150$ кГц эффектов лишь в той мере, чтобы показать их некоторые общие свойства с характером поведения ПВ для $f_{ПВ} \approx f_{ВН}$. Нам представляется это весьма интересным с точки зрения развития диагностики ВО ПВ различных отстроек, примеры которых приведены на рис. 9, 10, 12, 15.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы рассмотрели основные экспериментальные результаты, касающиеся взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F-слоя ионосферы на стрикционных и "пиковых" временах его развития. Эти измерения показывают, что в динамике развития искусственной ионосферной турбулентности на начальном этапе ее развития важен учет нескольких факторов, на которые ранее не обращалось должного внимания. Во-первых, необходимо учитывать влияние стратификации плотности плазмы в поле стоячей волны вблизи уровня отражения мощного радиоизлучения. Ее время формирования составляет для условий нижней части F₂-области несколько десятков миллисекунд, а вариации плотности плазмы оказываются вполне достаточными для изменения характера генерации высокочастотной плазменной турбулентности и появления значительных вариаций амплитуды и фазы отраженных от ионосферы радиоволн. Во-вторых, многочисленные экспериментальные факты показывают, что мелкомасштабная искусственная ионосферная турбулентность с $h_1 \approx 3$ м начинает образовываться вблизи уровня отражения НЧ еще на стрикционных и "пиковых" временах взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой. Влияние этой начальной турбулентности находит свое отражение в динамике развития искусственных неоднородностей, в появлении эффекта переноса модуляции мощного радиоизлучения на ПВ и в развитии быстрого АО. Ее влияние, несомненно, находит также свое отражение в динамике развития и свойствах искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы. Последнее представляет значительный самостоятельный интерес, и анализ по-

лученных здесь экспериментальных данных будет выполнен в следующих публикациях.

До сих пор каждое явление, наблюдаемое при воздействии мощным радиоизлучением на ионосферную плазму, мы изучали в значительной степени обособленно. Настоящая работа является следствием формирования новых наших представлений о динамике искусственной ионосферной турбулентности в мелкомасштабной ее части, где определяющим является установление внутренних взаимодействий различного рода явлений, имеющих место в В.Ионосферы. Это, несомненно, дает более глубокое понимание наблюдаемых эффектов и открывает новые возможности управления свойствами искусственной ионосферной турбулентности.

Авторы выражают свою признательность всем сотрудникам лаборатории "Васильсурск" за обеспечение программ экспериментальных исследований, С.М.Грачу и А.Н.Караштину - за обсуждение затронутых в работе вопросов, а также В.В.Беликовичу и Е.А.Бенедиктову - за предоставленную возможность ознакомления с содержанием работы [38] до ее опубликования.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Muldrew D.B., Showen R.L. - J.Geophys.Res., 1977, v.82, N 29, p.4793 - 4004.
2. Duncan L.M. - J.Atm.Terr.Phys., 1985, v.47, N 12, p.1267-1281.
3. Duncan L.M., Sheerin J.P. - J.Geophys.Res., 1985, v.90, N A9, p. 8371 - 8376.
4. Djuth F.T., Conzales C.A., Ierkic H.M. - J.Geophys.Res., 1986, v.91, N 12089 - 12107.
5. Isham B., Birkmayer W., Hagfors T., Kofman W. - J.Geophys. Res., 1987, v.92, N A5, p.4629 - 4637.
6. Hagfors T., Kofman W. 2et al. - Radio Sci., 1983, v.18, N 6, p.861 - 866.
7. Jones T.B., Robinson T.R., Stubbe P., Kopka H. - J.Atm.Terr. Phys., 1986, v.48, N 9-10, p.1027-1035.
8. Hedberg A., Thide B., et al. - J.Geophys.Res., 1984, v.89, N A12, p.11038 - 11042.

9. Васьков В.В., Голян С.Ф., Гуревич А.В. и др. - Исследование эффектов искусственной ионизации ионосферы в поле мощных радиоволн - Препринт ИЗМИР АН СССР № 5(479), Москва, 1984.
10. Васьков В.В., Голян С.Ф., Гуревич А.В. и др. - Международный симпозиум "Модификация ионосферы мощным радиоизлучением" (Суздаль, 1986 г.), Тезисы докладов, Москва, ИЗМИР АН СССР, с. 17-20, с. 51-52.
11. Васьков В.В., Голян С.Ф., Гуревич А.В. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1986, т. 43, вып. II, с. 512-515.
12. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. - Динамические и спектральные характеристики искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы - Препринт НИРФИ № 185. Горький, 1984.
13. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Зюзин В.А. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1985, т. 28, № 4, с. 395-405.
14. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я. и др. - Геомагнетизм и аэрномия, 1987, т. 27, № 5, с. 758-763.
15. Stubbe P., Корка Н., Thide B., Derblom H. - J.Geophys.Res., 1984, v.89, N A9, p.7523-7536.
16. Беликович В.В., Ерухимов Л.М., Зюзин В.А. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1988, т. 31, № 3, с. 251-255.
17. Фролов В.Л. Изв. вузов. Радиофизика, 1988, т. 31, № 10, с. 1164-1168.
18. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1987, т. 30, №2, с. 208-225.
19. Беленов А.Ф., Ерухимов Л.М., Зюзин В.А. и др. - О динамике мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей.
20. Зюзин В.А., Комраков Г.П., Насыров А.М. и др. - Геомагнетизм и аэрномия, 1987, т. 27, № 6, с. 942-947.
Препринт НИРФИ № 235. Горький, 1987
21. Васьков В.В., Голубятников Г.Ю., Егоров С.В. и др. - Международный симпозиум "Модификация ионосферы мощным радиоизлучением" (Суздаль, 1986), Тезисы докладов, Москва, ИЗМИР АН СССР, с. 157-158.
22. Фролов В.Л. Экспериментальные исследования воздействия мощным коротковолновым радиоизлучением на плазму F-слоя ионосферы. Диссертация. Горький, 1979.
23. Метелев С.А. Начальная стадия взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой верхней ионосферы. Диссертация, Горький, 1984.

24. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митяков Н.А., Фролов В.Л. Геомagnetизм и аэрономия, 1983, т. 23, № 3, с. 433-439.
25. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е. и др. - В сб. Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький, ИПФ АН СССР, 1979, с. 7-45.
26. Бойко Г.Н., Эюзин В.А., Комраков Г.П. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1985, т. 28, № 5, с. 656-658.
27. Березин И.В., Бойко Г.Н., Волков В.М. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1987, т. 30, № 6, с. 702-710.
28. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Разумов Д.В. - Изв. вузов. Радиофизика, 1988, т. 31, № II, с. 130I-1308.
29. Васьков В.В., Гуревич А.В. - Геомagnetизм и аэрономия, 1982, т. 22, № 4, с. 565-572.
30. Васьков В.В., Гуревич А.В., Караштин А.Н. - Геомagnetизм и аэрономия, 1981, т. 21, № 6, с. 973-980.
31. Грач С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. - В сб. Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький, ИПФ АН СССР, 1979, с. 46-79.
32. Васьков В.В., Гуревич А.В. - там же, с. 8I-138.
33. Литвак А.Г., Миронов В.А. - там же, с. 19I-215.
34. Inhester В. - J.Atм.Terr.Phys., 1982, v.44, N 12, p.1049-1059.
35. Васьков В.В., Голян С.Ф., Гуревич А.В. и др. - Международный симпозиум "Модификация ионосферы мощным радиоизлучением" (Суздаль, 1986). Тезисы докладов, Москва, ИЗМИР АН СССР, с. 53-54.
36. Фролов В.Л. - Изв. вузов. Радиофизика, 1981, т. 24, № 5, с.529-532.
37. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гольцова Ю.К. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1986, т. 29, № 2, с. 13I-138.
38. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Эюзин В.А. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1989 (в печати).
39. Muldrew D.B. - J.Geophys.Res., 1986, v.91, NA4, p.4572-4580.
40. Fejer J.A., Sulzer M. - Radio Sci., 1984, v.19, N 2, p.675-682.
41. Fejer J.A. - J.Geophys.Res., 1983, v.88, NA1, p.489-492.
42. Leyser T.B., Thide B. - J.Geophys.Res., 1988, v.93, NA8, p.8681-8688.

43. Fejer J.A., Ierkić H.M., Woodman R.R. et al. - J.Geophys.Res., 1983, v.88, N A3, p.2083-2092.
44. Силин В.П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. - М.: Наука, 1973.
45. Wong A.Y., Tanigawa T., Kuthi A. - Phys.Rev.Lett., 1987, v.53, N 13, p.1375-1378.
46. Миронов В.А., Сергеев А.М., Химич А.В. - ЖЭТФ, 1988. № 94, вып. 3, с. 76-82.
47. Wong A.Y., Santoru J. et al. - Radio Sci., 1983, v.18, N 6, p.815 - 830.
48. Караштин А.Н., Коробков Ю.С., Фролов В.Л., Цимринг М.Ш. - Изв. вузов. Радиофизика, 1986, т. 29, № 1, с. 28-32.
49. Эюзин В.А. - Изв. вузов. Радиофизика, 1987, т. 30, № 6, с.795-797.
50. Wong A.Y., Morales G.J. et al. - Phys.Rev.Lett., 1981, v.47, N 18, p.1340-1343.
51. Muhlhus E., Fla T. - J.Geophys.Res., 1984, v.89, N A6, p.3921-3928.
52. Ерухимов Л.М., Эюзин В.А. и др. - Изв. вузов. Радиофизика, 1982, т. 25, № 7, с. 843-844.
53. Huang Z.H., Fejer J.A. - Radio Sci., 1987, v.22, N 4, p.663-670.
54. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979.
55. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1979.
56. Альбер Я.И., Кротова З.Н., Митяков Н.А. и др. - ЖЭТФ, 1974, т. 66, вып. 2, с. 574-578.
57. Fejer J.A., Корка Н. - J.Geophys.Res., 1981, v.A86, N 7, p.5746-5750.
58. Perkins F.W. - Radio Sci., 1974, v.9, N 11, p.1065-1070.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВН - волна накачки
ПВ - пробная волна
ВО - возмущенная область ионосферной плазмы
ИИТ - искусственная ионосферная турбулентность
АО - аномальное ослабление
БАО - быстрое аномальное ослабление
ССВ - стрикционное самовоздействие ВН
МИИИ - мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности
ИРИ - искусственное радиоизлучение ионосферы
ВГР - верхнегибридный резонанс
 \tilde{P}_ω - эффективная мощность излучения ВН, вычисленная с учетом линейного поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы
 $P_{\text{ЭП}}$ (ССВ) - пороговая мощность стрикционного самовоздействия ВН
ПМ - эффект переноса модуляции амплитуды ВН на ПВ
 $f_{\text{ВН}}$ - частота ВН
 $f_{\text{ПВ}}$ - частота ПВ

Лев Михайлович Ерухимов

Владимир Леонтьевич Фролов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
С ПЛАЗМОЙ Г - СЛОЯ
ИОНОСФЕРЫ

Подписано к печати 01. 11. 89 г. МЦ 00925 . Формат 60x84/16
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 2,75 усл. п. л.
Заказ 4978. Тираж 120. Бесплатно.

Отпечатано на ротативе НИРФИ