

# ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СПЕКТРА СВИСТОВОЙ ВОЛНЫ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

М. Е. Гуцин<sup>1</sup>, С. В. Коробков<sup>1,2</sup>, А. В. Костров<sup>1</sup>, А. В. Стриковский<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН,* <sup>2</sup> *Нижегородский госуниверситет*

## Введение

В последние годы интенсивно ведутся исследования разнообразных физических явлений в околоземной и космической плазме. Эти исследования проводятся как пассивными диагностическими методами с помощью приборов, установленных на поверхности Земли и на космических аппаратах (ракетах и ИСЗ), так и методами, использующими «активное» воздействие на параметры ионосферной и магнитосферной плазмы посредством мощного электромагнитного излучения в различных диапазонах частот (с поверхности Земли и с борта ракет и ИСЗ), инъекции пучков заряженных частиц и т. д. При проведении натуральных исследований приходится иметь дело с трудными и дорогостоящими экспериментами. Это обстоятельство делает оправданным изучение космических эффектов в модельных экспериментах, проводимых на лабораторных установках, тем более, что основные процессы, как в космической плазме, так и в лабораторной при правильном выборе условий эксперимента подчиняются одним и тем же закономерностям. Кроме того, в лаборатории можно использовать весь арсенал современной диагностики плазмы и многократно воспроизводить исследуемое явление, целенаправленно варьировать условия его протекания.

Волны свистового диапазона частот и связанные с ними явления представляют большой интерес при исследованиях околоземной плазмы [1]. В виде свистовых волн (диапазон КНЧ-ОНЧ) вдоль силовых линий геомагнитного поля распространяются как искусственные сигналы от наземных и спутниковых СДВ передатчиков, так и естественные электромагнитные возмущения. Первоначально известные, как «свистящие атмосферерики», возбуждаемые молниевыми разрядами, волны свистового диапазона интенсивно исследуются уже около 50 лет. Притом, что свисты играют важную роль в магнитосферных и ионосферных процессах, многие вопросы, касающиеся возбуждения, распространения и взаимодействия этих волн все еще остаются открытыми. Наибольшего внимания заслуживают нелинейные и параметрические явления в свистовом диапазоне, широко известные в космической плазме, но сравнительно мало изучавшиеся в лабораторных условиях. Распространение волн свистового диапазона в дактах повышенной и пониженной плотности плазмы теоретически и экспериментально изучено [4]. Известно, что условия волноводного удержания свистов в плазменном волноводе определяются кривизной поверхности их волновых векторов (рис. 1). В данной работе, выполненной на экспериментальном стенде «Крот», экспериментально исследуется распространение высокочастотного квазипродольного вистлера ( $\omega > \omega_H/2$ ) в дакте пониженной плотности в присутствии формирующего дакт интенсивного низкочастотного поля. Низкочастотные ( $\omega \ll \omega_H/2$ ) колебания большой амплитуды локализованы в пределах плазменного канала, они относятся к свистовому диапазону частот и приводят к нестационарному возмущению плазмы (относительное возмущение магнитного поля  $\delta B/B_0 \sim 5\%$ ). Исследовалось параметрическое преобразование спектра высокочастотного импульса свистовых волн, распространяющегося в дакте с нестационарными параметрами [7]. На больших экспериментальных установках такие эксперименты ранее не проводились, параметрическое преобразование частоты свистовой волны в плазме с нестационарным магнитным полем исследуется, возможно, впервые.

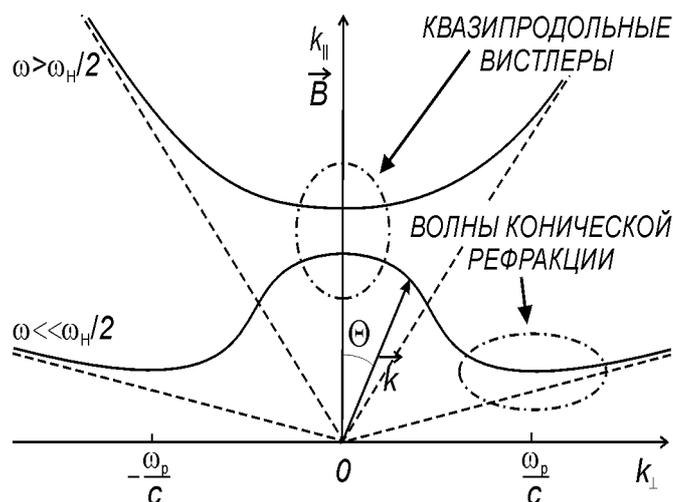


Рис. 1. Поверхность волновых векторов для волн свистового диапазона частот: два случая -  $\omega > \omega_H/2$  и  $\omega \ll \omega_H/2$

### Экспериментальный стенд «Крот» для моделирования явлений в космической и ионосферной плазме

Моделирование явлений в космической плазме целесообразно проводить на экспериментальных установках, которые позволяют создать магнитоактивную плазму высокой концентрации с равномерным распределением в большом объеме. В настоящее время в ИПФ РАН функционирует большой экспериментальный стенд «Крот», на котором можно моделировать и исследовать многие космические явления в приближении безграничной плазмы, т. е. устранить влияние стенок установки и привести условия лабораторного эксперимента к параметрам процессов в космической плазме [6].

Основные экспериментальные задачи, решаемые на «Кроте», связаны с исследованием волн свистового и нижнегибридного диапазона. Большой размер плазменного столба (длина 4 м, диаметр 1.5 м) позволяет моделировать процесс распространения волн в приближении безграничной плазмы. Обширный диагностический комплекс, созданный на установке «Крот», включает в себя ленгмюровские и СВЧ-зонды для локальных измерений концентрации и температуры плазмы, 5-канальный СВЧ-интерферометр (длина волны  $\lambda = 8$  мм), для получения усреднённых значений плотности плазмы в различных сечениях вакуумной камеры, антенны электрического и магнитного типов для возбуждения и детектирования высокочастотных полей в плазменном объеме, многосеточные анализаторы для определения энергетического спектра электронов. Использование цифровой запоминающей аппаратуры и компьютерная система регистрации данных позволяют с временным разрешением  $\delta t < 1$  нс восстанавливать пространственную структуру волновых полей, измерять мелкомасштабные ( $\delta r < 0.5$  см) возмущения плотности плазмы ( $\delta n/n_0 < 5 \times 10^{-3}$ ). С помощью дополнительного высокочастотного источника нагрева электронов в плазме можно создавать направляющий свистовые волны дакт плотности, имитирующий магнитосферный волновод.

## Описание эксперимента

Экспериментальная установка «Крот» (рис. 2-а) представляет собой вакуумную камеру длиной 10 м и диаметром 3 м. Магнитное поле пробочной конфигурации (пробочное отношение  $R \sim 2.4$ , рис. 2-б) создается с помощью соленоида, установленного внутри вакуумного объема. Цилиндрический плазменный столб формируется в результате импульсного индукционного ВЧ-разряда ( $f = 5$  МГц,  $P_{\text{генер}} = 250$  кВт,  $\tau_{\text{имп}} = 1$  мс) в аргоне при давлении  $7 \cdot 10^{-4}$  Торр, максимальная плотность плазмы в момент разряда достигает величины  $\sim 10^{13}$  см $^{-3}$ , температура электронов  $T_e = 10$  эВ, температура ионов  $T_i \sim 1$  эВ. Эксперименты проводятся в распадающейся плазме после выключения плазмозоудующих генераторов. Распад плазмы определяется процессом амбиполярной диффузии вдоль магнитного поля, характерное время распада порядка 10 мс.

Для излучения и приема свистовых волн использовались одновитковые экранированные магнитные антенны диаметром 2–3 см, установленные в различных сечениях плазменного столба. Для уменьшения влияния плазмы на импеданс антенн они были покрыты слоем диэлектрика. Концентрация плазмы измерялась с помощью миниатюрного зонда с СВЧ-резонатором, изготовленного на отрезке двухпроводной линии [5].

Возбуждение высокочастотной свистовой волны происходило с одной из антенн диаметром 2 см, к которой подводился импульс с частотой  $f_2 = 160$  МГц длительностью  $\tau = 1 \div 2$  мкс и мощностью  $P = 0.01 \div 100$  Вт. Для каналирования излучаемой волны создавался дакт пониженной плотности плазмы, вытянутый вдоль внешнего магнитного поля [4]. Дакт формировался с помощью двухвитковой рамочной антенны диаметром 20 см, расположенной в центре камеры. На антенну подавался импульс ВЧ-напряжения ( $f_1 = 3$  МГц,  $U_{\text{ВЧ}} = 300$  В,  $P = 9$  кВт,  $\tau = 1$  мс). В результате локального нагрева электронов в ближнем поле антенны происходило термодиффузионное перераспределение плазмы с образованием за время порядка  $\tau = 500$  мкс, вытянутого вдоль оси системы канала с уменьшенной концентрацией. Поперечный размер неоднородности определялся как диаметром антенны, так и длиной электронной теплопроводности поперек магнитного поля ( $\Lambda_{\perp} \sim \rho_e / \sqrt{\delta}$ , где  $\rho_e$  – ларморовский радиус электрона,  $\delta = 2m/M$ ,  $m$  и  $M$ , соответственно, массы электрона и иона). Временной сценарий эксперимента представлен на рис. 3. Импульс на частоте  $f_1 = 3$  МГц подводился к антенне в тот момент распада плазмы, когда ее плотность составляла  $N_e \sim 10^{12}$  см $^{-3}$ , величина внешнего магнитного поля выбиралась равной  $B_0 = 100$  Гс. За время порядка 500 мкс после включения нагревающего импульса устанавливался квазистационарный канал, одновременно с нагревом электронов вблизи витков антенны в дакт излучались интенсивные низкочастотные свистовые волны ( $f_1 = 3$  МГц  $\ll f_H = 260$  МГц). В момент времени 700–1000 мкс от начала низкочастотного импульса в канале возбуждалась высокочастотная свистовая волна ( $f_2 = 160$  МГц). Основная цель работы – изучение амплитудно-частотных характеристик высокочастотного вистлера, локализованного в плазменном дакте в присутствии формирующего дакт низкочастотного поля.

Для спектрального анализа высокочастотного импульса применялись два независимых метода. Первый – быстрое преобразование Фурье (БПФ) от записанных осциллограмм, второй – обработка сигнала с помощью анализатора спектра С4-80 в режиме однопериодных импульсов. Результаты, полученные обоими методами, совпадали с высокой точностью.

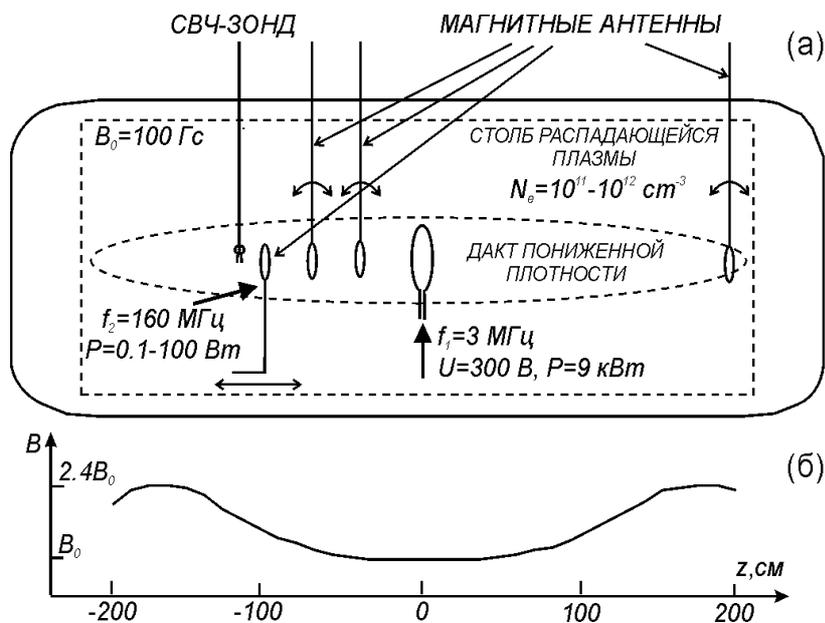


Рис. 2. Экспериментальная установка «Крот»: (а) - схема установки; (б) – распределение внешнего магнитного поля вдоль оси вакуумной камеры

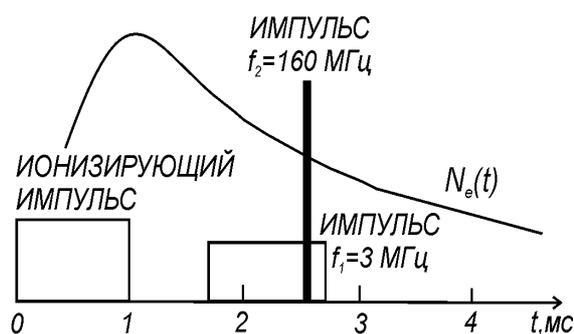


Рис. 3. Временная диаграмма работы экспериментальной установки. При достижении в процессе распада плотности плазмы порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  с помощью ВЧ-импульса  $f_1 = 3 \text{ МГц}$ ,  $\tau = 1 \text{ мс}$  формируется дакт с пониженной концентрацией, вытянутый вдоль внешнего магнитного поля. Исследуется распространяющийся в этом дакте высокочастотный импульс ( $f_2 = 160 \text{ МГц}$ ,  $P = 0.01 \div 100 \text{ Вт}$ ,  $\tau = 1-2 \text{ мкс}$ ) в присутствии интенсивных низкочастотных ( $f_1 = 3 \text{ МГц}$ ) колебаний.

### Экспериментальные результаты

Результаты измерений распределения низкочастотного магнитного поля на частоте  $f_1 = 3 \text{ МГц}$  и поперечное распределение концентрации плазмы приводятся на рис. 4. Перераспределение плотности из-за нагрева электронов плазмы в ближнем поле антенны определяется униполярными коэффициентами переноса и сопровождается вихревыми токами, замыкающимися по фоновой плазме [3]. При заданных параметрах эксперимента время диффузии ионов поперек магнитного поля  $\tau_i^\perp \sim (L_\perp/\lambda_i)^2/\nu_i \sim 500 \text{ мкс}$  ( $L_\perp \sim 25 \text{ см}$  – радиус неоднородности) значительно превышает характерное время диффузии электронов вдоль поля  $\tau_e^\parallel \sim (L_\parallel/\lambda_e)^2/\nu_e \sim 10 \text{ мкс}$  ( $L_\parallel \sim 150 \text{ см}$  – характерный продольный масштаб плазмы,  $\lambda_e \sim 50 \text{ см}$  – длина свободного пробега электрона), поэтому именно ионы определяют скорость формирования дакта плотности. В эксперименте стационарное распределение concentra-

ции устанавливалось через 500÷700 мкс после включения ВЧ-генератора, это время соответствует приведенной оценке.

Измерения проведены в момент времени  $t = 900$  мкс от начала низкочастотного импульса в квазистационарном канале. Радиус канала (рис. 4–б) определяется как размером антенны  $R_{\text{ант}} = 10$  см, так и длиной теплопроводности плазмы поперек магнитного поля  $\Lambda_{\perp} \sim 15$  см. Длина теплопроводности плазмы вдоль поля  $\Lambda_{\parallel} \sim \lambda_e / \sqrt{\delta} \sim 8$  м, поэтому в стационарном режиме канал пронизывает весь плазменный столб. Плотность плазмы на оси дакта ниже плотности фоновой плазмы более чем в 10 раз. Интенсивное низкочастотное поле ( $f_1 = 3$  МГц) локализовано в плазменном канале (рис. 4–а). Низкочастотное возмущение плазмы носит волновой характер, оно относится к свистовому диапазону частот. На моментальных снимках низкочастотного поля, сделанных через равные промежутки времени  $\Delta t = 70$  нс (рис. 4–в.), видна волна, бегущая от оси дакта в радиальном направлении. Ее длина  $\lambda_{\perp} \sim 20$  см, фазовая скорость  $V_{\phi} = 7.5 \cdot 10^7$  см/с. Такой масштаб в поперечном к магнитному полю направлении характерен для волн конической рефракции:  $\lambda_{\perp} \sim 2\pi c / \omega_p \sim 10$  см, удерживаемых в канале с пониженной плотностью [4]. Амплитуда низкочастотного магнитного поля, измеренная с помощью магнитных антенн, составляет величину  $\delta B \sim 1 \div 5$  Гс. Таким образом, относительное возмущение внешнего поля может достигать  $\delta B / B_0 \sim 1 \div 5$  %.

Основное явление, наблюдавшееся в эксперименте – амплитудно-частотная модуляция свистовой волны, проходящей через область возмущения. Осциллограмма пакета свистовых волн ( $f_2 = 160$  МГц), излучавшегося в плазму, показана на рис. 5-а. Излучающая антенна во всех экспериментах находилась на оси плазменного канала ( $\Delta r = 0$  см). Сигнал с приемной антенны, установленной в центре канала ( $\Delta r = 0$  см), слабо модулирован (рис. 5-б). При перемещении приемной антенны на край дакта ( $\Delta r = 20 \div 25$  см) амплитуда сигнала уменьшалась в несколько раз, но его модуляция становилась настолько глубокой, что приводила к дроблению исходного импульса на отдельные волновые пакеты (рис. 5-в). Углубление модуляции происходило также при увеличении расстояния между приемной и излучающей антеннами вдоль оси плазменного столба. Изменения формы сигнала сопровождались преобразованием несущей частоты, которая модулировалась с периодом модуляции огибающей.

Спектр импульса с амплитудно-частотной модуляцией уширен за счет появления сателлитов основной частоты (рис. 6-а). Чем больше длина трассы, по которой свистовая волна распространяется в плазме с низкочастотным возмущением, тем больше преобразуется ее спектр (рис. 6-б). Удаление приемной антенны от излучающей вдоль оси канала ( $\Delta r = 0$  см) на малых трассах ( $\Delta z = 0 \dots 40$  см) приводит к почти симметричному уширению спектра, центральная частота (или частота заполнения) при этом не изменяется. В то же время при смещении приемной антенны к краю плазменного канала весь спектр смещается в «красную» сторону. Представляет интерес случай, когда приемная рамка унесена далеко от излучающей антенны ( $\Delta z = 250$  см) и находится в стороне от оси канала ( $\Delta r = 15$  см) – рис. 6-б. Частотный спектр сигнала с рамки сильно уширен и смещен в «красную» сторону.

Экспериментально исследовалось влияние величины возмущения магнитного поля на эффект модуляции. Измерения проводились с помощью анализатора спектра, данные, получаемые при фиксированном значении варьировавшейся величины, усреднялись, как минимум, по 10 реализациям – «выстрелам».

Рис. 7 показывает, как преобразуется частотный спектр волны при изменении величины низкочастотного возмущения. Спектрограммы демонстрируют сохранение полной энергии, запасенной в различных спектральных составляющих сигнала. Увеличение возмущения приводит к росту амплитуды сателлитов и их числа, но сигнал на основной частоте  $f_2 = 160$  МГц уменьшается.

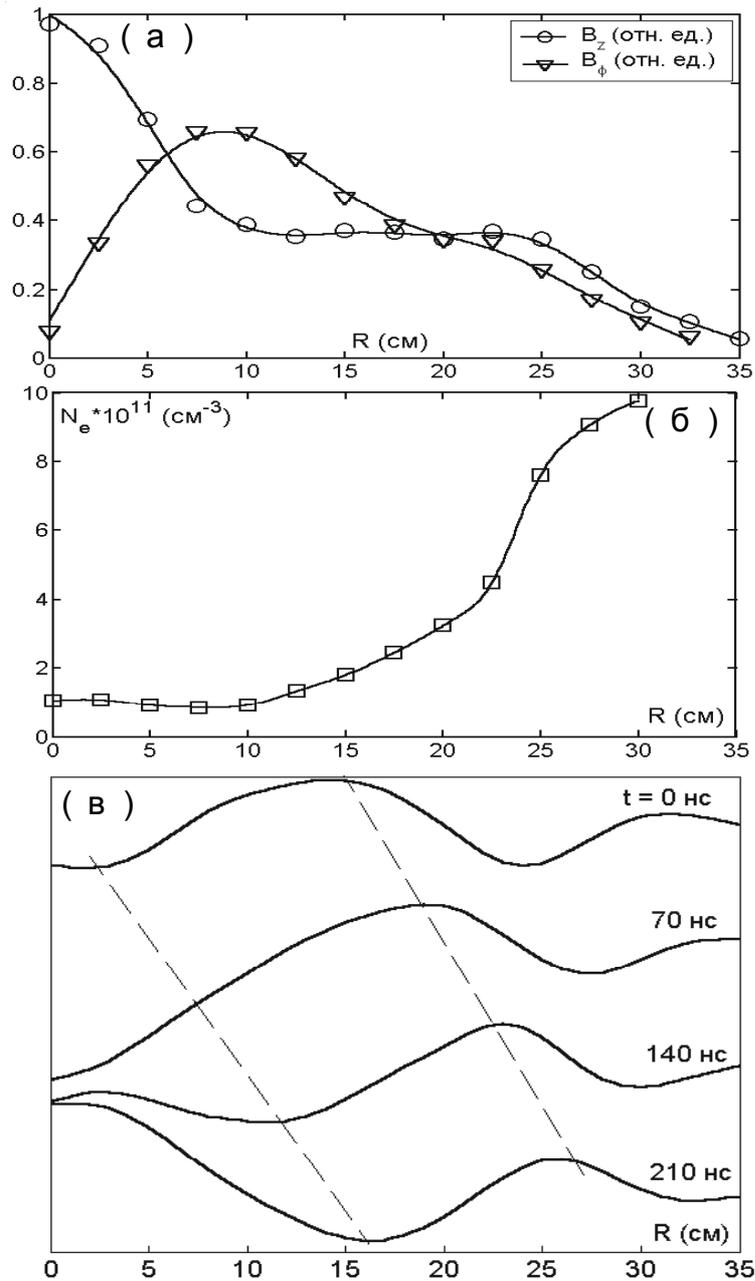


Рис. 4. а – поперечное распределение амплитуды  $B_z$  и  $B_\phi$  компонент низкочастотного магнитного поля (частота  $f = 3$  МГц);  
 б – поперечное распределение концентрации плазмы;  
 в – моментальные снимки  $B_z$  компоненты низкочастотного магнитного поля (частота  $f = 3$  МГц) в различные моменты времени.

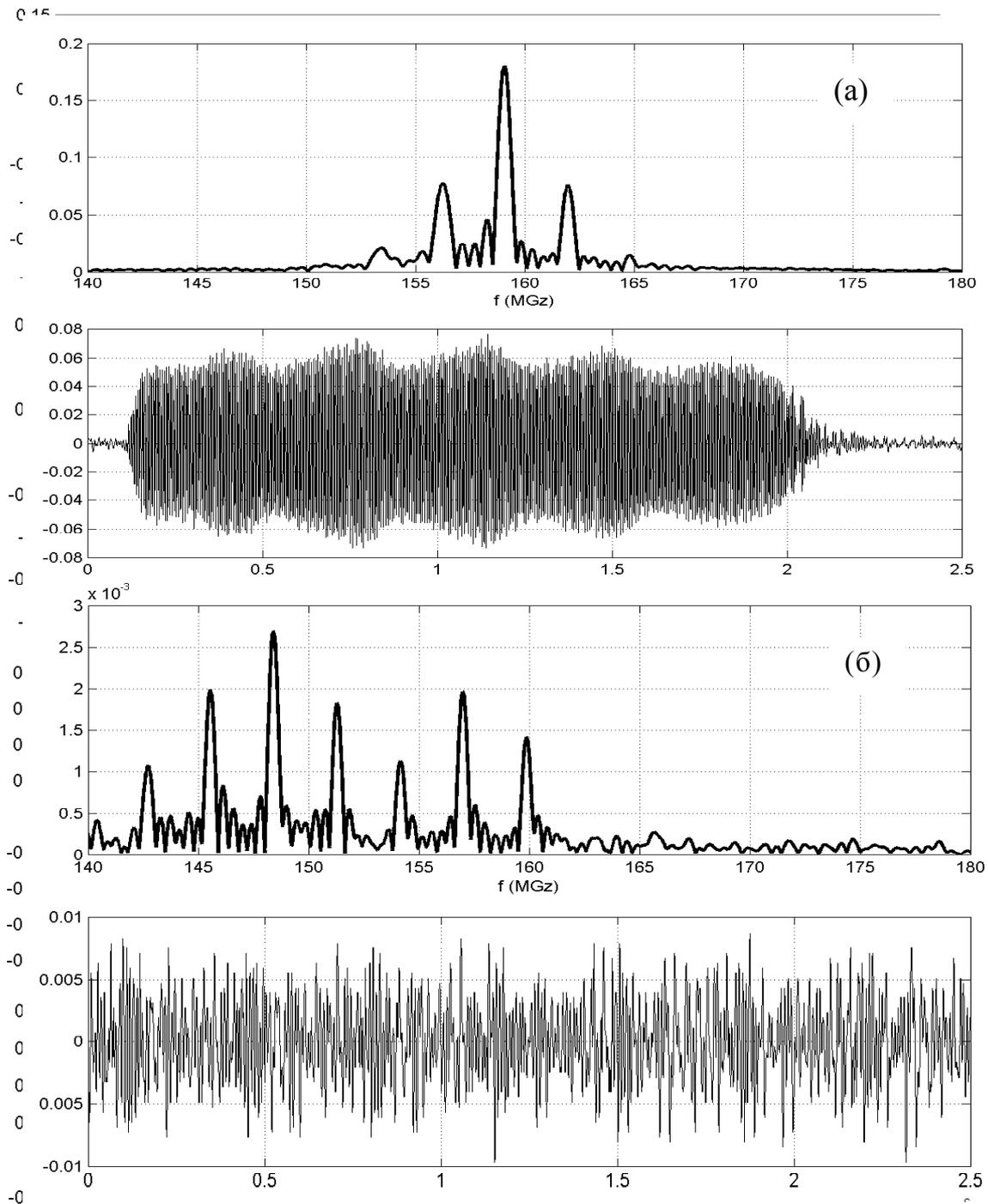


Рис. 6. а – характерная осциллограмма высокочастотного импульса, принимаемого из плазмы (с возмущением магнитного поля на частоте  $f = 3$  МГц) и его спектр, полученный с помощью преобразования Фурье;  
 б – осциллограмма высокочастотного импульса, принимаемого из плазмы (с возмущенным магнитным полем) и его спектр на большом расстоянии от излучающей антенны ( $\Delta z \approx 260$  см). Антенна расположена на оси плазменного канала.

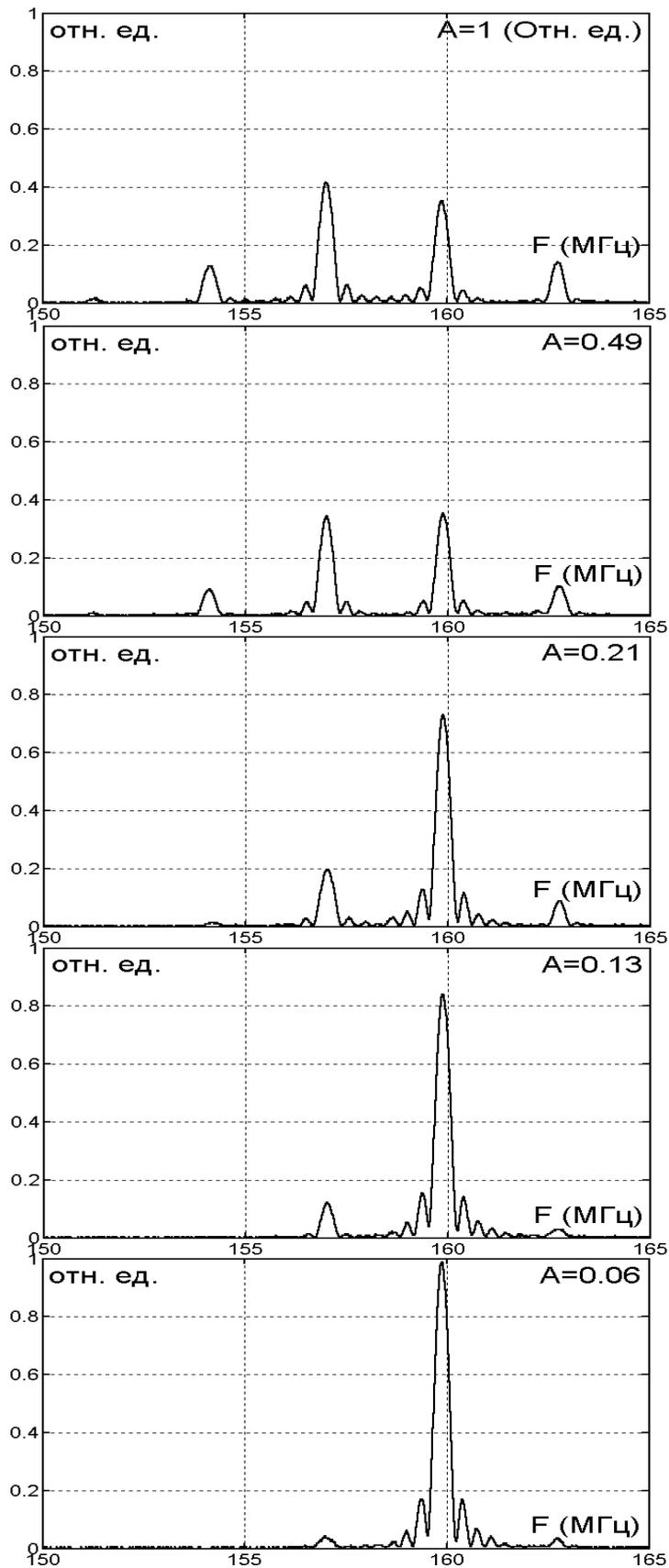


Рис. 7. Преобразование частотного спектра свистовой волны в зависимости от относительного возмущения внешнего магнитного поля переменным полем на частоте  $f_1 = 3$  МГц ( $A \sim \delta B/B_0$ ,  $A = 1$  соответствует  $\delta B/B_0 = 5\%$ ).

## Заключение

В работе рассмотрен интересный и важный механизм преобразования частотного спектра вистлера, распространяющегося в плазменном дакте в присутствии интенсивного низкочастотного поля. Экспериментальные результаты могут быть объяснены взаимодействием высокочастотной волны ( $f_2 = 160$  МГц) с низкочастотными колебаниями магнитного поля и концентрации плазмы ( $f_1 = 3$  МГц), величина возмущения внешнего магнитного поля достигает  $\sim 5\%$ . Трансформация частоты сигнала в средах с нестационарными параметрами рассматривалась, например, в [2].

В ходе экспериментов выявлен «накапливающийся» характер эффекта модуляции сигнала при увеличении длины трассы, вдоль которой он распространяется в нестационарной плазме. Понижение частоты сигнала – смещение спектра в «красную» сторону – может объясняться как структурой собственных мод плазменного волновода, так и преобразованием частоты свистовой волны на бегущей волне возмущения [2].

Предложенный механизм модуляции свистовых волн может иметь большое значение для физики магнитосферы. Механизм, подобный описанному, возможно, приводит к появлению пульсаций типа Pc-1 – «жемчужин» (в ионном свистовом диапазоне), амплитудно-частотной модуляции ОНЧ-шипений - и т. д.

### Литература:

1. Helliwell R. A. 40 Years of Whistlers. Modern Radio Sci. / Ed. H. Matsumoto / Oxford University Press. Oxford, 1993.
2. Островский Л. А., Степанов Н. С. Нерезонансные параметрические явления в распределенных системах // Известия ВУЗов, радиофизика. 1971. Т. XIV. № 4. С. 489–529.
3. Егоров С. В., Костров А. В., Тронин А. В. Термодиффузия и вихревые токи в замагниченной плазме // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. Вып. 2. С. 86-88.
4. Заборонкова Т. М., Костров А. В., Кудрин А. В. и др. Каналирование волн свистового диапазона частот в неоднородных плазменных структурах // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. Вып. 4(10). С. 1151–1161.
5. Stenzel R. L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasmas // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. № 5. P. 603–607.
6. Костров А. В., Стриковский А. В., Чугунов Ю. В. и др. Экспериментальный стенд «Крот» для лабораторного моделирования космических явлений. Препринт № 510. ИПФ РАН, 1999. 38 с.
7. Guschin M. E., Korobkov S. V., Kostrov A. V., Strikovskiy A. V. Interaction of Whistler Waves in Magnetized Plasma // Abstracts of International Conference on Physics of Low Temperature Plasma PLTP-03. May 11–15, 2003. Kyiv, Ukraine. P. 11-6-18.