

КОМПРЕССИЯ СВИСТОВЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

М. Е. Гуцин, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский*

*Институт прикладной физики Российской академии наук
603950, Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 19 апреля 2004 г.

Представлены результаты экспериментов, в которых исследовалось распространение свистовых волн в плазме с нестационарным возмущением магнитного поля ($B = B_0 + \delta B(t)$, $\delta B/B_0 \leq 5\%$). Параметрические и дисперсионные явления в переменном магнитном поле изучены на уникальном плазменном стенде «Крот» (длина плазменного столба 4 м, диаметр 1.5 м). Показано, что периодическое возмущение поля приводит к амплитудно-частотной модуляции свистовой волны и дроблению сигнала на отдельные частотно-модулированные волновые пакеты с их последующей компрессией. Формирование и сжатие импульсов связано с сильной дисперсией групповой скорости свистов вблизи электронной циклотронной частоты ($\omega \leq \omega_H$). Результаты могут использоваться для объяснения спектральных форм сигналов, принимаемых из магнитосферы и ионосферы Земли в электронном и ионном свистовых диапазонах.

PACS: 52.35.Hr, 52.35.Mw, 52.72.+v

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов возбуждения и распространения волн свистового диапазона частот (вистлеров) в магнитосфере и ионосфере Земли актуально для диагностики параметров плазмы, изучения нелинейных явлений, решения задач, связанных с радиосвязью в ОНЧ-диапазоне [1]. Известно, что искусственные сигналы при распространении в околоземной плазме могут существенно искажаться. Такие явления, как амплитудно-частотная модуляция, генерация сателлитов, уширение частотного спектра свистовых волн часто регистрируются в наземных и спутниковых экспериментах [2, 3]. Что касается естественных излучений, то модуляция может возникать как непосредственно в процессе их генерации в магнитосфере, так и на трассе распространения сигнала в плазме [4]. Причиной изменения амплитудно-частотных характеристик свистов могут быть нелинейные процессы в радиационных поясах Земли [1], а также параметрическое взаимодействие волн с вариациями плотности плазмы и магнитного поля [3, 5].

Традиционно при анализе параметрических яв-

лений рассматриваются резонансные процессы, при этом подразумевается, что пространственные и временные масштабы изменения параметров среды находятся в определенных соотношениях с частотой и волновым числом распространяющихся в плазме волн [5]. Однако, по нашему мнению, наиболее типичными являются нерезонансные явления [6]. В этом случае на закон изменения параметров не накладывается каких-либо специальных ограничений, он, в частности, может быть аperiодическим.

Далее будем называть параметрическим линейное взаимодействие волн с нестационарными изменениями параметров среды, вариациями, которые существуют независимо от распространяющейся пробной волны. Нелинейные эффекты, обусловленные самовоздействием достаточно интенсивных волн, также относятся к широкому классу параметрических явлений, однако в данной работе не рассматриваются.

При описании волн в среде с параметрами, являющимися сравнительно медленными функциями времени и пространственных координат, может применяться метод геометрической оптики, обобщенный на случай нестационарных сред [6, 7]. Данный метод позволяет непосредственно записать уравнение переноса частоты квазимонохроматического

*E-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru

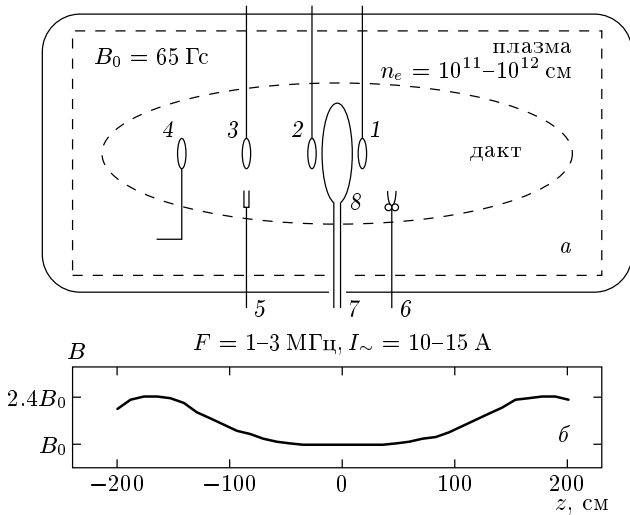


Рис. 1. *a* — Схема экспериментальной установки «Крот»: 1 — излучающая антенна, 2, 3, 4 — приемные антенны, 5 — двойной зонд, 6 — СВЧ-зонд, 7 — импульсный генератор ($F = 1-3$ МГц, $I = 10-15$ А), 8 — индуктор. *б* — Распределение магнитного поля вдоль оси вакуумной камеры

волнового поля [6]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \nabla) \omega = -\omega \frac{(\partial n / \partial t)_{\omega, \mathbf{k}}}{\partial(n\omega) / \partial \omega}, \quad (1)$$

где ω и \mathbf{k} — частота и волновой вектор, $\mathbf{v}_g = \mathbf{v}_g(\omega)$ — групповая скорость волны, n — показатель преломления среды. Уравнение (1) принципиально для понимания того, каким образом обогащается частотный спектр излучения в нестационарных средах. Из (1) видно, что модуляция показателя преломления сопровождается частотной модуляцией (ЧМ) сигнала. Дисперсия групповой скорости приводит к тому, что различные элементы сигнала распространяются с разными скоростями, а значит, может наблюдаться компрессия отдельных участков волны.

Показатель преломления продольных вистлеров с частотами

$$\omega_{LH} < \omega < \omega_H \ll \omega_p$$

(ω_H — электронная циклотронная частота, ω_p — электронная плазменная частота, $\omega_{LH} = \sqrt{\omega_H \Omega_H}$ — частота нижнегибридного резонанса, Ω_H — циклотронная частота ионов) имеет вид

$$n = \frac{\omega_p}{\sqrt{\omega(\omega_H - \omega)}}. \quad (2)$$

Ранее в работах, посвященных нерезонансным явлениям в магнитоактивной плазме, в качестве

нестационарного параметра рассматривалась только концентрация электронов [8, 9]. Однако из выражения (2) видно, что характеристики распространения свистовых волн в значительной мере определяются величиной магнитного поля. Нестационарные возмущения магнитного поля Земли регистрируются достаточно часто, особенно в периоды повышенной солнечной активности. При взаимодействии потоков плазмы солнечного ветра с магнитосферой наблюдаются как периодические (ассоциирующиеся с возбуждением магнитогидродинамических мод) возмущения, так и аperiodические вариации геомагнитного поля. Магнитное поле может также возмущаться интенсивными низкочастотными свистами, при этом модуляция поля не сопровождается колебаниями электронной плотности [10].

Особый интерес представляют ионные свисты — волны с левой поляризацией и частотами, близкими к циклотронной частоте ионов: $\omega \leq \Omega_H$ [11, 12]. Подобие дисперсии электронных и ионных свистов вблизи циклотронных частот ($n_{ion} \approx (\Omega_H - \omega)^{-1/2}$) позволяет использовать результаты, полученные в электронно-свистовом диапазоне, для интерпретации явлений в диапазоне ионных свистов.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования распространения вистлеров в плазме со слабой периодической модуляцией магнитного поля. Эксперименты проведены на стенде «Крот», специально созданном для моделирования явлений в космической плазме.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка представляет собой вакуумную камеру длиной 10 м и диаметром 3 м (рис. 1*a*). Магнитное поле пробочной конфигурации (пробочное отношение $R = 2.4$, рис. 1*б*) создается с помощью соленоида, установленного внутри вакуумного объема. В условиях эксперимента величина магнитного поля в центральном сечении соленоида составляла $B_0 = 65$ Гс. Цилиндрический плазменный столб (длина 4 м, диаметр 1.5 м), не контактирующий с металлическими стенками камеры, формируется в результате импульсного индукционного разряда ($f_{dis} = 5$ МГц, $P_{gen} \approx 250$ кВт, $\tau_{pulse} = 1$ мс) в атмосфере аргона при давлении $p = 7 \cdot 10^{-4}$ Торр. Максимальная плотность плазмы в момент разряда достигает значения порядка 10^{13} см $^{-3}$, температура электронов $T_e \approx 10$ эВ, температура ионов $T_i \leq 0.5$ эВ. Распад плазмы опреде-

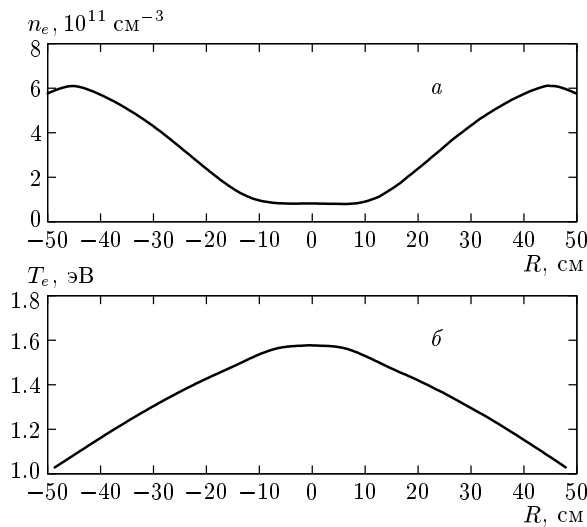


Рис. 2. *a* — Поперечное распределение плотности плазмы через 900 мкс от начала низкочастотного импульса ($F = 1.2$ МГц), *б* — поперечное распределение температуры электронов плазмы в тот же момент времени

ляется процессом амбиполярной диффузии электронов вдоль магнитного поля.

Эксперименты проводились в распадающейся плазме, после выключения плазмозадающих генераторов, когда концентрация электронов достигала значения $n_e = 10^{12}$ см⁻³. С целью уменьшения расходимости свистовых волн в плазме создавался вытянутый вдоль оси системы канал (дакт) с пониженной электронной плотностью, в котором возбуждаемые антеннами вистлеры удерживались в режиме волноводного распространения [13]. Для формирования дакта использовался дополнительный импульсный генератор ($\tau_{pulse} = 1$ мс), работавший на частотах $F = 1-3$ МГц. Генератор был нагружен на рамочную антенну (индуктор диаметром $D = 20$ см), расположенную в центре камеры. Мощность генератора составляла величину около 10 кВт, переменный ток, развиваемый генератором в антенне, достигал значений порядка $I_{max} = 30$ А. Формирование дакта происходило за счет локального нагрева электронов в ближнем поле индуктора и последующего термодиффузионного перераспределения плазмы [14]. Образование канала обусловлено процессом униполярной диффузии: немагнитные ионы диффундируют поперек магнитного поля, электроны — вдоль, а квазинейтральность обеспечивается замыканием тока по фоновой плазме. Квазистационарное распределение плотности плазмы устанавливалось за вре-

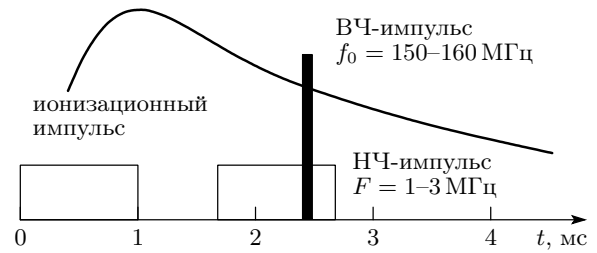


Рис. 3. Временная диаграмма работы экспериментальной установки

мя порядка 500 мкс, при этом длина канала L достигала значения порядка 3 м, а поперечный размер определялся диаметром антенны и длиной электронной теплопроводности поперек магнитного поля:

$$\Lambda_{\perp} \approx \rho_e / \delta^{1/2} \approx 20 \text{ см}$$

(ρ_e — ларморовский радиус электрона, $\delta = 2m/M$, m и M — соответственно массы электрона и иона). Радиальные распределения концентрации плазмы и температуры электронов в стационарном канале через 900 мкс от начала нагревающего импульса ($F = 1.2$ МГц) представлены на рис. 2. Измерения плотности плазмы выполнялись миниатюрным зондом с СВЧ-резонатором, изготовленным на отрезке двухпроводной линии [15], для измерения температуры электронов применялся двойной зонд. Плотность плазмы на оси канала $n_e = 10^{11}$ см⁻³, электронная температура $T_e = 1.5$ эВ.

В качестве источника нестационарного возмущения магнитного поля использовался тот же индуктор, что и для формирования канала. После установления квазистационарного распределения плотности возмущение внешнего магнитного поля определялось переменным ближним полем антенны ($F = 1-3$ МГц). Структура низкочастотного (НЧ) поля вблизи индуктора (аксиальная компонента магнитного поля) в сформированном дакте плотности совпадала с распределением поля витка с током в вакууме. Амплитуда переменного магнитного поля в плоскости индуктора достигала значения $\delta B_{max} = 3$ Гс, что соответствует относительному возмущению $\delta B_{max} / B_0 \approx 5\%$. На расстояниях $z > D$ от индуктора в плазме возбуждались низкочастотные свистовые волны с

$$k_{\perp} \approx \frac{\omega_p}{c}, \quad k_{\parallel} \approx 2 \frac{\omega_p}{c} \frac{\omega}{\omega_H}.$$

Нетрудно показать, что в волнах данного типа относительное возмущение магнитного поля значительно превосходит возмущение плотности плазмы [10]:

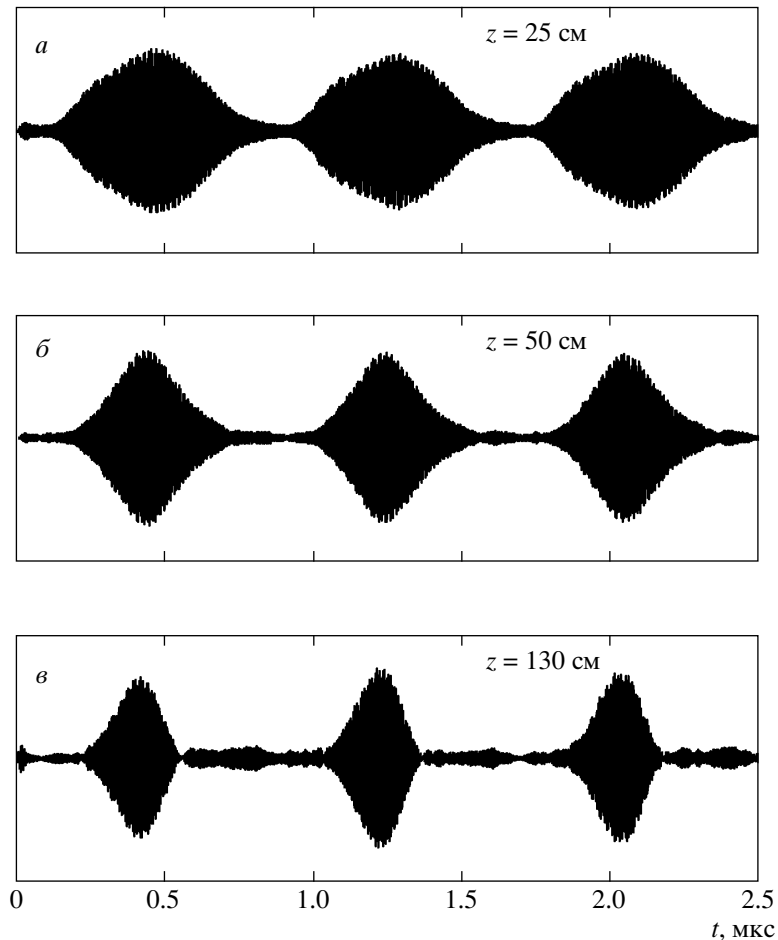


Рис. 4. Осциллограммы (а, б, в) и спектрограммы (z, d, e) высокочастотных сигналов ($f_0 = 160$ МГц), принимаемых из плазмы на различных расстояниях от излучающей антенны в присутствии возмущения магнитного поля на частоте $F = 1.2$ МГц ($\delta B/B_0 \approx 3\%$)

$$\frac{\delta n}{n_0} \approx \left(\frac{\omega_H}{\omega_p}\right)^2 \frac{\delta B}{B_0} \ll \frac{\delta B}{B_0}.$$

В условиях эксперимента $\omega_H < 0.1\omega_p$, δn и δB — возмущение концентрации плазмы и магнитное поле низкочастотной свистовой волны.

Временная диаграмма работы экспериментальной установки представлена на рис. 3. Распространение высокочастотных (ВЧ) свистов в плазме с нестационарным магнитным полем исследовалось на частотах пробной волны $f_0 = 150\text{--}160$ МГц, при этом выполнялось условие $f_H/2 < f_0 \leq f_H$ ($f_H = \omega_H/2\pi$), и квазипродольные вистлеры с длиной волны $\lambda = 2\pi/k \approx 4\text{--}5$ см удерживались каналом с пониженной концентрацией плазмы [13]. Пробная волна излучалась в плазму в виде импульса длительностью $\tau = 0.1\text{--}10$ мкс.

Выбранные частоты свистовых волн близки к

циклотронной частоте, $f_0 \approx 0.9f_H$, и дисперсия групповой скорости вистлеров достаточно сильна. В данном диапазоне свистовые волны также называют циклотронными волнами. Их характеристики распространения в значительной мере определяются столкновительным затуханием и кинетическим бесстолкновительным поглощением резонансными частицами — электронами плазмы.

Излучение и прием ВЧ-волн осуществлялись с помощью экранированных одновитковых рамочных антенн магнитного типа диаметром 1–2 см, расположенных в различных сечениях установки. Антенны были покрыты тонким слоем диэлектрика с целью уменьшения влияния плазмы на их импедансные характеристики. Как правило, при проведении экспериментов антенны устанавливались на оси плазменного дакта, причем плоскость антенн была ориен-

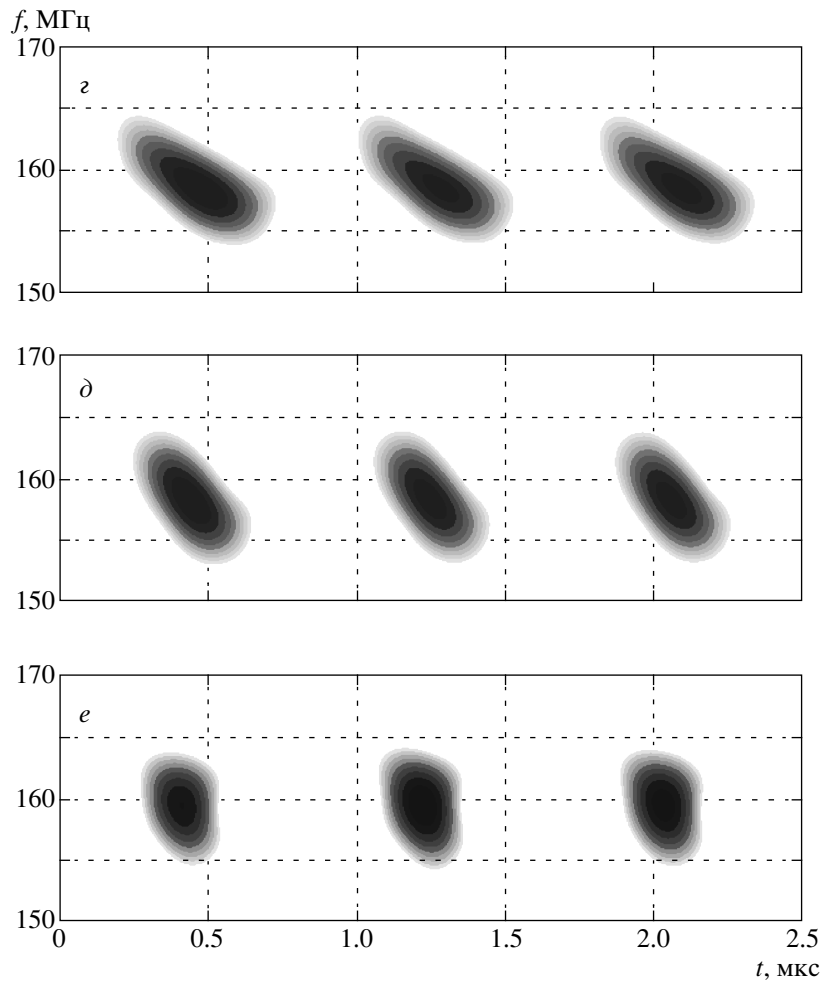


Рис. 4. Продолжение

тирована вдоль линий внешнего магнитного поля. Излучающая антенна располагалась вблизи индуктора, на расстоянии $\Delta z = 5$ см от его плоскости. В качестве приемных антенн использовались рамки, установленные с противоположной стороны индуктора на различных расстояниях от излучающей антенны (рис. 1а, 1 — излучающая антенна, 2, 3 и 4 — приемные).

Прошедшие по плазме ВЧ-сигналы регистрировались цифровым осциллографом, их спектральный анализ проводился с помощью численного преобразования Фурье.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные экспериментальные результаты представлены на рис. 4. При прохождении области с возмущенным полем непрерывный ВЧ-сигнал ($f_0 = 160$ МГц) разбивается на отдельные волновые

пакеты, следующие друг за другом с периодом модуляции поля ($F = 1.2$ МГц). Глубина амплитудной модуляции сигнала увеличивается при удалении приемной антенны от излучающей. Наблюдается компрессия ВЧ-импульсов — уменьшение их длительности по мере распространения в плазме. Спектральный анализ показывает, что принимаемый сигнал модулирован по частоте, относительная девиация частоты $\Delta f/f$ не превышает 1–3%. Частота заполнения понижается от начала к концу каждого из импульсов, с увеличением расстояния между приемной и излучающей антеннами наклон частотно-временной зависимости увеличивается (рис. 4z, d, e). Минимальная длительность, до которой сжимается ЧМ-импульс, составляет величину $\tau_{min} \approx \Delta f^{-1} \approx 100$ нс (рис. 4e), где $\Delta f \approx 10$ МГц — ширина частотного спектра свистовой ЧМ-волны (рис. 4z, d, e).

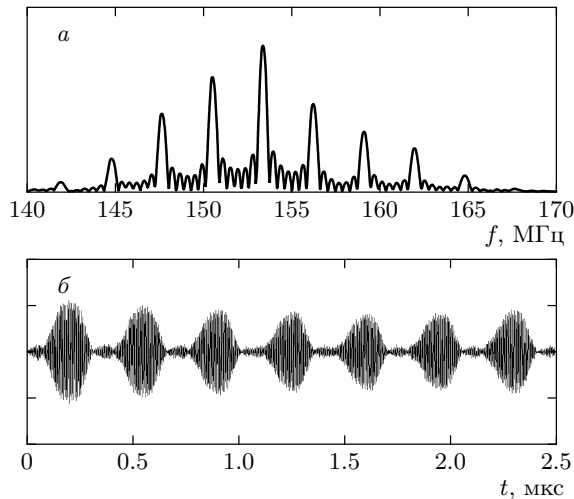


Рис. 5. Спектр (а) и осциллограмма (б) ВЧ-сигнала ($f_0 = 159$ МГц), принимаемого из плазмы в присутствии низкочастотного возмущения магнитного поля на частоте $F = 3$ МГц, $\delta B/B_0 \approx 5\%$. Расстояние между приемной и излучающей антеннами $\Delta z \approx 260$ см, обе антенны установлены на оси плазменного канала

Отчетливо наблюдается циклотронное поглощение свистовых волн (рис. 5а). На больших расстояниях от излучающей антенны ($\Delta z = 260$ см) спектр сигнала смещен как целое вниз по частоте. Наблюдаемая картина — результат неравномерного затухания различных элементов спектра ЧМ-сигнала, который в отсутствие поглощения должен был бы быть симметричен относительно несущей частоты пробной волны $f_0 = 159$ МГц.

При возбуждении и приеме ВЧ-волны вне области интенсивного возмущения магнитного поля частотная модуляция сигнала сравнительно мала. На рис. 6 представлены результаты, полученные на расстоянии $L = 70$ см от индуктора, расстояние между излучающей и приемной антеннами, установленными на оси канала, составляло $\Delta z \approx 15$ см. Амплитуда возмущения магнитного поля свистовыми НЧ-волнами ($F = 1.2$ МГц) почти в 10 раз меньше, чем возмущение поля в плоскости индуктора, полная ширина модулированного частотного спектра $\Delta f < 1$ МГц (рис. 6б). Несмотря на малую модуляцию частоты и небольшую трассу распространения волны, дисперсия групповой скорости все же приводит к заметному искажению огибающей сигнала (рис. 6а).

Преобразование частоты волны исследовалось в экспериментах с коротким импульсом ($\tau \approx 150$ нс, $f_0 = 160$ МГц), подводившимся к излучающей

антенне с различными временными задержками. Задержки выбирались таким образом, что ВЧ-импульс излучался в плазму в различных фазах периодического возмущения магнитного поля ($F = 3$ МГц, $\delta B_{max}/B_0 \sim 5\%$). В зависимости от фазы переменного поля регистрируются сигналы с частотами, сдвинутыми как в «красную», так и в «синюю» сторону (рис. 7). Сдвиг частоты при этом определяется тем, в какой момент волна проходит через плазму: в максимуме магнитного поля, когда величина периодического возмущения максимальна и переменное магнитное поле сонаправлено с внешним полем, или в минимуме, когда внешнее поле и поле витка направлены в противоположные стороны.

Если антенны разнесены на значительное расстояние ($\Delta z > 1$ м) и установлены в стороне от оси канала ($\Delta r = 5-10$ см), то можно наблюдать сигналы со сложным видом амплитудной огибающей, имеющие причудливую спектральную форму (рис. 8). Подобный вид сигналов можно объяснить сложной структурой свистовых мод широкого ($D_{duct} > 2\pi/k$) плазменного канала. Вероятно, при излучении свистов антенной, установленной в стороне от оси дукта, эффективно возбуждаются не только аксиально-симметричные моды плазменного волновода, но и асимметричные моды с ненулевыми азимутальными волновыми числами. ВЧ-поле, регистрируемое антенной в выбранной точке пространства, является результатом интерференции нескольких мод плазменного волновода с различными групповыми скоростями.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов объясняются двумя эффектами. Первый эффект заключается в нерезонансной параметрической модуляции частоты свистов в плазме с переменным показателем преломления, нестационарность которого связана с гармонической модуляцией магнитного поля.

Второй эффект — компрессия свистовой ЧМ-волны, обусловленная сильной дисперсией групповой скорости свистов на частотах, близких к электронной циклотронной частоте. Выражение для групповой скорости продольных вистлеров имеет следующий вид:

$$v_g = 2c \frac{\omega^{1/2} \omega_H^{1/2}}{\omega_p} (\omega_H - \omega)^{3/2}. \quad (3)$$

Поскольку каждая точка частотной огибающей ЧМ-сигнала движется со своей групповой скоростью, одни участки волны растягиваются, а другие

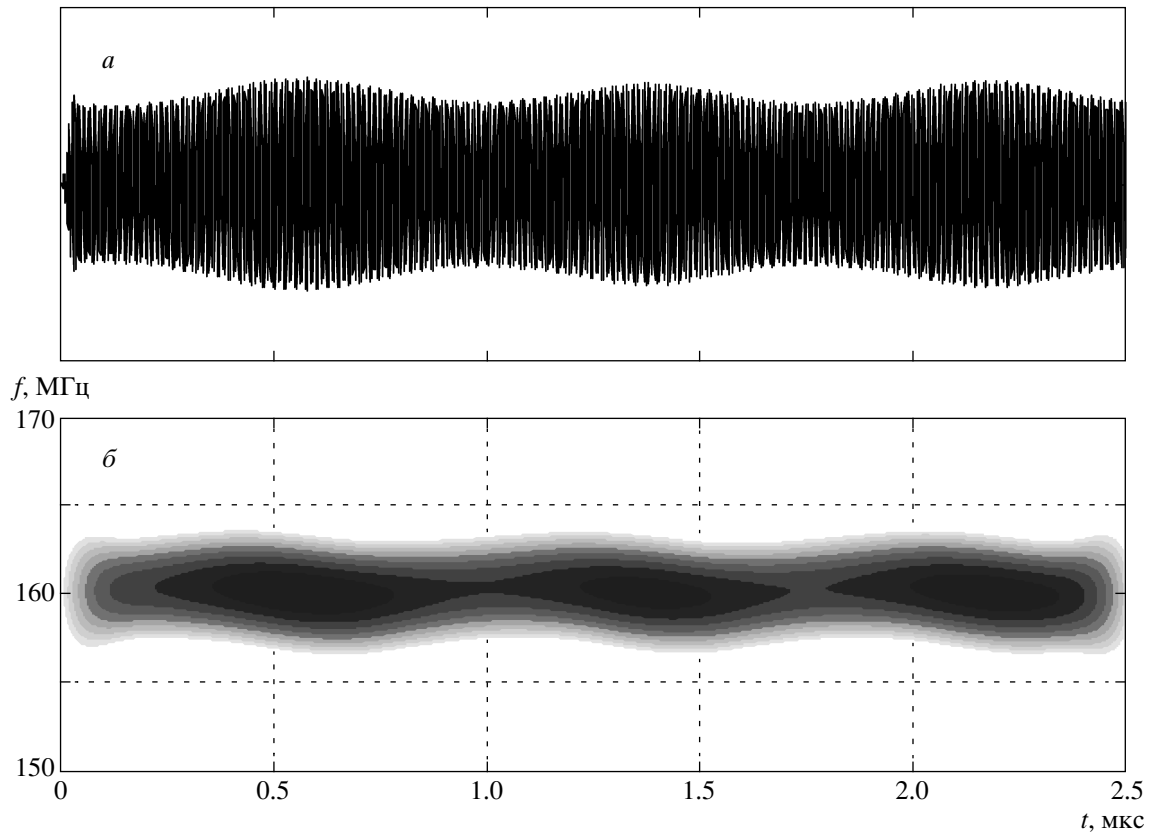


Рис. 6. Осциллограмма (а) и спектрограмма (б) высокочастотного вистлера ($f_0 = 160$ МГц), возбуждаемого и принимаемого из плазмы на расстоянии $z \approx 70$ см от низкочастотной антенны ($F = 1.2$ МГц), в области слабого возмущения внешнего магнитного поля ($\delta B/B_0 < 0.5\%$)

сжимаются. В определенных условиях энергия волны может локализоваться на коротких временных интервалах, где амплитуда поля может значительно превосходить начальную амплитуду [6]. Эффект сжатия ЧМ-импульсов в диспергирующей среде используется, в частности, при получении мощных СВЧ-импульсов [16].

Теоретический анализ распространения свистовой волны в плазме с неоднородным и нестационарным магнитным полем при учете дисперсии является достаточно сложной задачей. По этой причине для теоретических оценок предлагается использовать упрощенную геометрооптическую модель.

Для оценки эффекта преобразования частоты пренебрежем дисперсией групповой скорости свистовой волны. Предположим, что продольный вистлер с начальной частотой ω_0 распространяется в однородной плазме (вдоль оси z) с постоянным по трассе распространения внешним магнитным полем, а переменное поле индуктора представим как однород-

ное в пространстве возмущение, локализованное на участке трассы длиной L . Уравнение переноса частоты (1) для свистов принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + v_g(\omega_0) \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{\omega}{\omega_H} \frac{\partial \omega_H}{\partial t}. \quad (4)$$

Рассмотрим гармоническую модуляцию магнитного поля с частотой Ω :

$$\tilde{B} = \begin{cases} 0, & z \notin [0, L], \\ \delta B \sin \Omega t, & z \in [0, L]. \end{cases} \quad (5)$$

Решение уравнения (4) с учетом (5) показывает, что частота сигнала модулируется по гармоническому закону:

$$\omega(t) = \omega_0 + \delta \omega \sin \Omega t.$$

Максимальный сдвиг частоты

$$\delta \omega = \omega_0 \frac{\delta B}{B_0}$$

достигается в точках, удаленных от точки входа волны в переменное магнитное поле на расстояние z_1 :

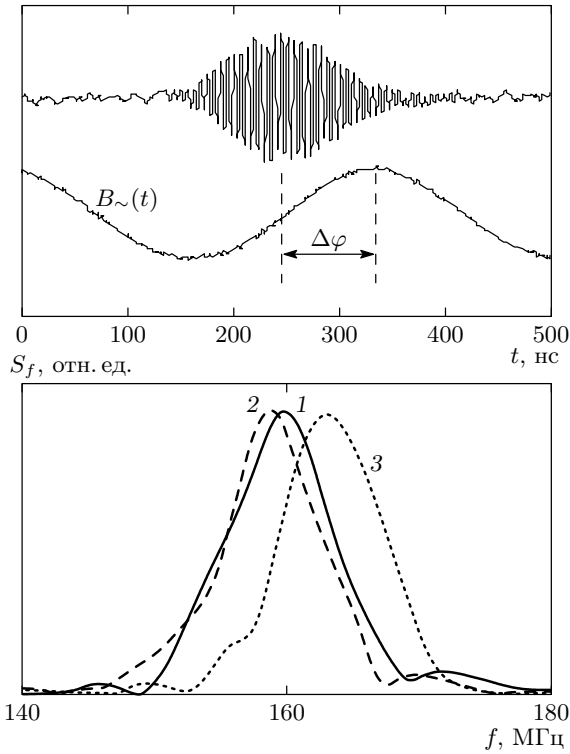


Рис. 7. Преобразование частотного спектра короткого импульса ($f_0 = 160$ МГц, $\tau \approx 150$ нс), излучаемого в плазму в различных фазах $\Delta\varphi = \pi/2$ (1), π (2), 0 (3) низкочастотного ($F = 1.2$ МГц) возмущения магнитного поля

$$z_1 = \frac{\pi v_g}{2\Omega} N, \quad N = 1, 2, \dots$$

В условиях эксперимента ($\omega_0/2\pi = 160$ МГц, $\Omega/2\pi = 1.2$ МГц, $v_g = 1.5 \cdot 10^8$ см/с) максимальный сдвиг частоты, соответствующий $N = 1$, имеет место при $z_1 = 30$ см, т. е. сильная девиация может наблюдаться при прохождении волной трассы длиной $L \sim z_1$. Характерный масштаб ближнего поля антенны — участка с интенсивным квазистатическим возмущением магнитного поля — $\Delta z \sim D = 20$ см. Таким образом, $z_1 \sim D$ и после прохождения вистлером области индуктора индекс частотной модуляции практически достигает максимального значения, что согласуется с экспериментальными данными.

Для оценки эффекта компрессии ЧМ-импульсов свистовых волн положим частотную модуляцию сигнала заданной и максимальной:

$$\omega(t) = \omega_0 \left(1 + \frac{\delta B}{B_0} \sin \Omega t \right).$$

Учет зависимости групповой скорости свистов от частоты (3) позволяет найти расстояние от точки

входа ЧМ-волны в диспергирующую среду до точки компрессии:

$$z_2 = \frac{v_g^2}{\left| \frac{\partial v_g}{\partial \omega} \right| \left| \frac{\partial \omega}{\partial t} \right|_{max}}. \quad (6)$$

Поскольку для свистов с частотами, близкими к циклотронной, выполняется условие

$$\frac{\partial v_g}{\partial \omega} < 0,$$

сжиматься будут элементы ЧМ-сигнала с

$$\left. \frac{\partial \omega}{\partial t} \right|_{t=t_0} < 0$$

(t_0 — момент входа рассматриваемого участка волнового пакета в диспергирующую среду). Оценка по формуле (6) показывает, что $z_2 \approx 60$ см при $B_0 = 65$ Гс. Заметим, что поле при расчете предполагалось однородным по всей трассе распространения волны. В условиях эксперимента, однако, длина участка с однородным магнитным полем в центре ловушки составляет всего около 40 см. Из рис. 4а видно, что сигнал разделяется на отдельные пакеты уже при прохождении волной области ближнего поля индуктора. Таким образом, на этом участке трассы оценка справедлива. Но дальнейшая компрессия волновых пакетов идет медленнее, что связано с увеличением поля по направлению к магнитной пробке и, следовательно, с уменьшением группового замедления и частотной дисперсии свистов.

Приближения метода геометрической оптики, использовавшиеся при оценках, не выполняются вблизи точки компрессии. Предельная длительность, до которой сжимается импульс, определяется полной шириной частотного спектра ЧМ-сигнала. Как уже отмечалось, циклотронное затухание высокочастотных спектральных компонент приводит к сужению спектра и препятствует эффективному сжатию свистовых волн. Кроме того, из-за затухания не наблюдается существенного увеличения амплитуды импульсов по сравнению с исходным сигналом.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показывают, что нестационарное возмущение магнитного поля приводит к частотной модуляции распространяющейся в плазме свистовой волны. Сильная дисперсия групповой скорости свистов на частотах $\omega \leq \omega_H$ является причиной деформации ЧМ-сигнала, при этом наблюдается дробление ВЧ-сигнала на отдельные волновые пакеты с ЧМ-заполнением.

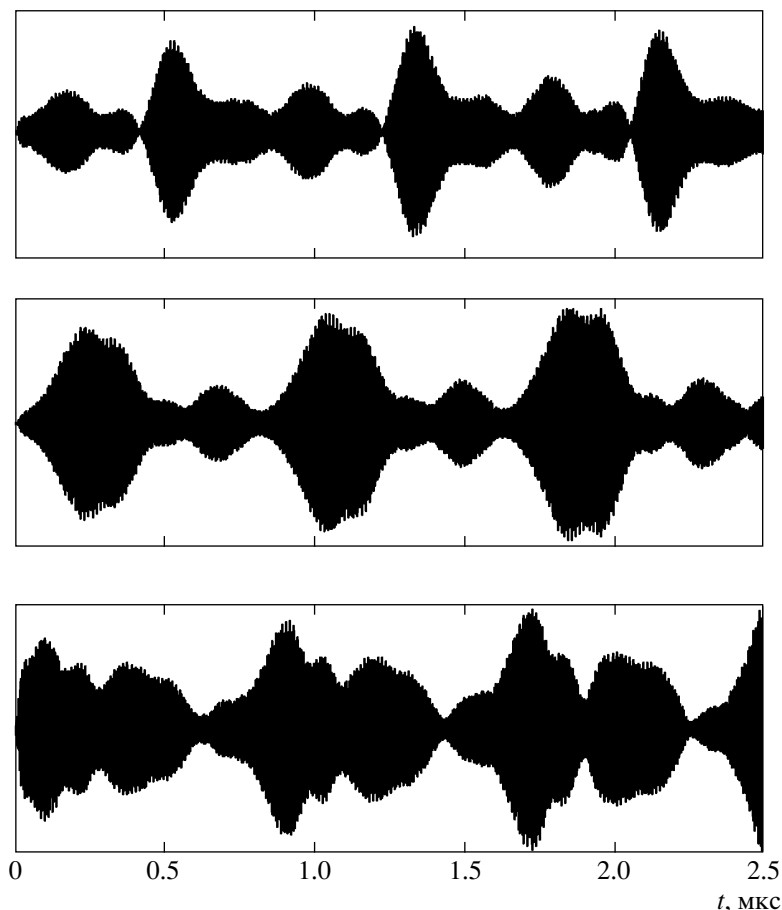


Рис. 8. Примеры осциллограмм и спектрограмм высокочастотных сигналов ($f_0 = 155$ МГц), принимаемых из плазмы в присутствии возмущения магнитного поля на частоте $F = 1.2$ МГц ($\delta B/B_0 \approx 3\%$). Расстояние между приемной и излучающей антеннами $\Delta z \approx 150$ см, обе антенны установлены в стороне от оси плазменного канала, $\Delta r \approx 5\text{--}10$ см

Принципиально то, что компрессия вызвана модуляцией магнитного поля при невозмущенной электронной плотности.

Особенности распространения свистов в плазме с нестационарным полем могут использоваться в диагностических целях. По частотной модуляции сигнала, проходящего через возмущенную область, можно, в частности, определять амплитуду вариаций магнитного поля ($\delta\omega/\omega_0 \sim \delta B/B_0$).

В заключение отметим, что осциллограммы и спектрограммы модулированных свистов напоминают записи сигналов, принимаемых из околоземной плазмы в УНЧ-диапазоне частот, — структурированных геомагнитных пульсаций типа Pc-1,2, или «жемчужин» [11]. В рамках существующих моделей предполагается, что модуляция амплитуды и частоты таких сигналов возникает непосредственно в процессе генерации, обусловленной развитием

ионно-циклотронной неустойчивости. Однако при одновременной регистрации магнитных пульсаций Pc-1,2 и более низкочастотных пульсаций Pc-3,4 часто наблюдается четкая корреляция интервалов следования ЧМ-«жемчужин» и периода низкочастотной модуляции геомагнитного поля [12]. Подобие сигналов и данные натуральных экспериментов позволяют предположить, что формирование «жемчужин» связано с параметрической модуляцией ионных свистов низкочастотными пульсациями магнитного поля Земли и их последующим дисперсионным сжатием. В этом случае принимаемый сигнал содержит информацию о наличии низкочастотного возмущения, не регистрируемого на поверхности Земли, а по частотной модуляции «жемчужин» можно диагностировать амплитуду пульсаций Pc-3,4.

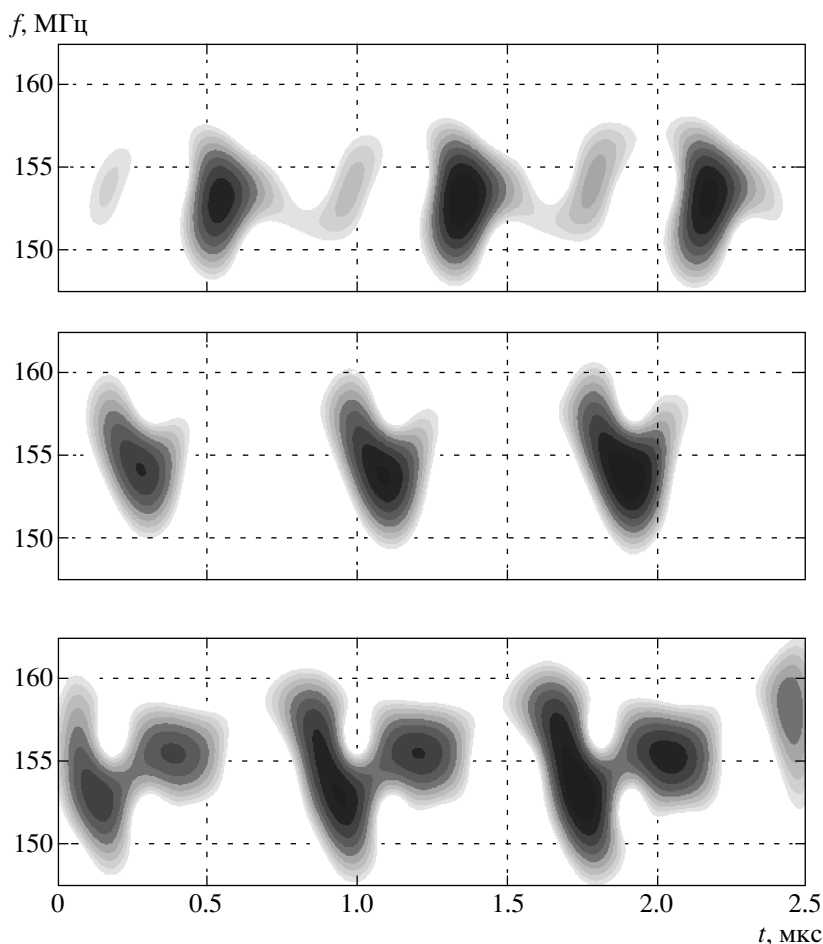


Рис. 8. Продолжение

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-02-17188) и Российского департамента науки (финансирование уникальных установок 701-18).

ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Молчанов, *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме*, Наука, Москва (1985).
2. Y. Tanaka, D. Lagoutte, M. Hayakawa et al., *J. Geophys. Res.* **92**, 7551 (1987).
3. S. Ohnami et al., *Geophys. Res. Lett.* **20**, 739 (1993).
4. N. Sato, K. Hayashi, S. Kokubun et al., *J. Atm. Terr. Phys.* **36**, 1515 (1974).
5. V. Y. Trakhtengerts and M. Hayakawa, *J. Geophys. Res.* **98**, 19205 (1993).
6. Л. А. Островский, Н. С. Степанов, *Изв. ВУЗов — радиофизика* **14**, 489 (1971).
7. Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов, *Геометрическая оптика неоднородных сред*, Наука, Москва (1980).
8. M. I. Bakunov and I. S. Grachev, *Phys. Rev. E* **65**, 036405 (2002).
9. D. K. Kalluri, V. R. Goteti, and A. M. Sessler, *IEEE Transactions on Plasma Sci.* **21**, 70 (1993).
10. А. В. Костров и др., *Письма в ЖЭТФ* **78**, 1026 (2003).
11. В. А. Троицкая, А. В. Гульельми, *УФН* **97**, 453 (1969).
12. T. A. Plyasova-Bakounina, J. Kangas, K. Mursula et al., *J. Geophys. Res.* **101**, 10965 (1996).
13. Т. М. Заборонкова, А. В. Костров, А. В. Кудрин и др., *ЖЭТФ* **101**, 1151 (1992).
14. С. В. Егоров, А. В. Костров, А. В. Тронин, *Письма в ЖЭТФ* **47**, 86 (1988).
15. И. Г. Кондратьев, А. В. Костров, А. И. Смирнов и др., *Физика плазмы* **28**, 977 (2002).
16. W. M. Manheimer and B. H. Ripin, *Phys. Fluids* **29**, 2283 (1986).