

Распространение вистлеров в плазме с дактом магнитного поля

М. Е. Гуцин¹⁾, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский, Т. М. Заборонкова

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 31 января 2005 г.

Экспериментально исследовано распространение волн свистового диапазона частот в однородной магнитоактивной плазме в присутствии дакта магнитного поля. Продемонстрирована возможность эффективного удержания вистлеров узким (в масштабе длины волны) цилиндрическим каналом с увеличенным полем. Показано, что наличие сравнительно слабого возмущения внешнего магнитного поля ($\delta B/B_0 \sim 0.1$) может приводить к существенному изменению пространственной структуры и увеличению амплитуды свистовых волн вблизи оси дакта.

PACS: 52.25.Xz, 52.35.Hg, 52.72.+v

Волноводное каналирование свистов (вистлеров) играет ключевую роль в процессе распространения сигналов особо низкочастотной волны (ОНЧ) в околоземной плазме. Наличие плазменных неоднородностей (дактов), вытянутых вдоль линий геомагнитного поля, принципиально для физики магнитосферы, оно позволяет объяснить эффективную транспортировку низкочастотного излучения между магнитоспряженными точками земной поверхности. Традиционно рассматриваются только каналы с повышенной или пониженной плотностью плазмы [1]. Распространение свистовых волн в дактах плотности хорошо изучено теоретически [2] и экспериментально [3]. За счет нелинейных тепловых эффектов в ближнем поле антенн могут формироваться искусственные волноводные каналы, позволяющие управлять диаграммой направленности мощных излучателей [4, 5].

Однако, как показано в работе, существенное влияние на распространение волн свистового диапазона ($\sqrt{\omega_H \Omega_H} < \omega < \omega_H \ll \omega_p$, где ω – частота волны, ω_p – плазменная частота, ω_H и Ω_H – циклотронные частоты электронов и ионов, соответственно) могут оказывать неоднородности магнитного поля, возникающие при возмущении магнитосферы интенсивными магнитогидродинамическими (МГД) волнами, за счет диамагнетизма горячих частиц радиационных поясов Земли или из-за явлений, подобных обратному эффекту Фарадея [6], который может наблюдаться при возбуждении в плазме эллиптически поляризованных волн большой амплитуды. Ранее на возможность удержания свистовых волн в дактах магнитного поля указывалось в [2, 7], некоторые свойства дактов магнитного поля обсуждаются в [8].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию распространения свистовых волн в цилиндрическом дакте с увеличенным или пониженным магнитным полем, создаваемым в однородной плазме. В ходе исследований, проведенных на установке “Крот”, изучено влияние поперечной неоднородности магнитного поля на пространственную структуру возбуждаемых в плазме волновых полей.

Экспериментальная установка представляет собой вакуумную камеру длиной 10 м и диаметром 3 м (рис.1а). Магнитное поле пробочной конфигурации (пробочное отношение $R = 2.4$, рис.1б) создается с помощью соленоида, установленного внутри вакуумного объема (данный соленоид на рис.1 не по-

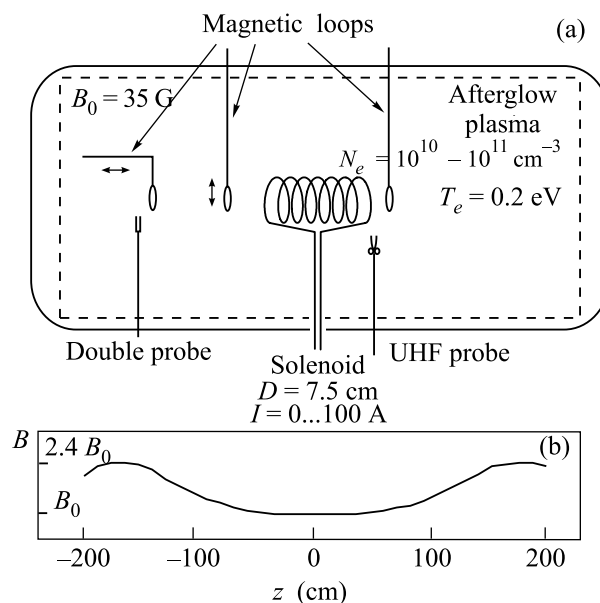


Рис.1. (а) – схема экспериментальной установки “Крот”, (б) – распределение магнитного поля вдоль оси вакуумной камеры

¹⁾e-mail: mguschin@appl.sci-nnov.ru

казан). В условиях эксперимента величина магнитного поля в центральном сечении камеры составляла $B_0 = 35$ Гс. Цилиндрический плазменный столб (длина 4 м, диаметр 1.5 м) формируется в результате импульсного индукционного ВЧ разряда ($f_{\text{dis}} = 5$ МГц, $P_{\text{ген}} \sim 250$ кВт, $\tau_{\text{pulse}} = 1$ мс) в аргоне при давлении $p = 7 \cdot 10^{-4}$ торр. Максимальная плотность плазмы в момент разряда достигает значения порядка 10^{13} см $^{-3}$, температура электронов $T_e \sim 10$ эВ, температура ионов $T_i \leq 0.5$ эВ. Распад плазмы определяется процессом амбиполярной диффузии электронов вдоль магнитного поля.

Эксперименты производились в распадающейся, спокойной плазме, через 6 ÷ 12 мс после выключения плазмосоздающих генераторов. В указанный промежуток времени плотность плазмы монотонно изменялась от $n = 1 \cdot 10^{11}$ до $n = 2 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$ при температуре электронов $T_e \leq 0.2$ эВ.

Поперечная неоднородность магнитного поля (магнитный канал) создавалась с помощью установленного в центре камеры цилиндрического 7-виткового соленоида (диаметр витков $D = 7.5$ см, расстояние между витками $l = 5.5$ см, рис.1а). Соленоид был изготовлен из изолированной медной проволоки диаметром $d = 1$ мм. Ток силой до $I_{\text{max}} = 100$ А пропускался через соленоид в виде прямоугольного импульса длительностью $\tau = 0.2 \div 1$ мс. Исследовалось распространение свистов в дакте с увеличенным и с пониженным магнитным полем. Вид канала определялся полярностью подключения соленоида к источнику питания.

Измерения плотности, выполненные зондом с СВЧ резонатором [9], показали, что введение соленоида в плазменный объем не влечет за собой существенного перераспределения плазмы (рис.2). Оседание частиц на проволоку и опорные конструкции соленоида приводит к уменьшению концентрации электронов не более, чем на 7 ÷ 10%, на масштабе, значительно превышающем диаметр витков. Кроме того, не наблюдаются никаких изменений плотности при протекании по соленоиду импульсного тока силой до 100 А.

Возбуждение и прием ВЧ свистовых волн ($f = \omega/2\pi = 20 \div 50$ МГц, $P < 1$ Вт) производились с помощью экранированных рамочных антенн магнитного типа диаметром 1 см, установленных в различных сечениях плазменного столба. Для уменьшения влияния плазмы на импедансные характеристики антенн они были покрыты тонким слоем диэлектрика. Интерферометрические измерения показали, что в указанном диапазоне параметров антенны возбуждают в плазме косые свистовые волны длиной $\lambda_{\parallel} \sim \lambda_{\perp} \sim 15 \div 30$ см. В ходе экспериментов изуча-

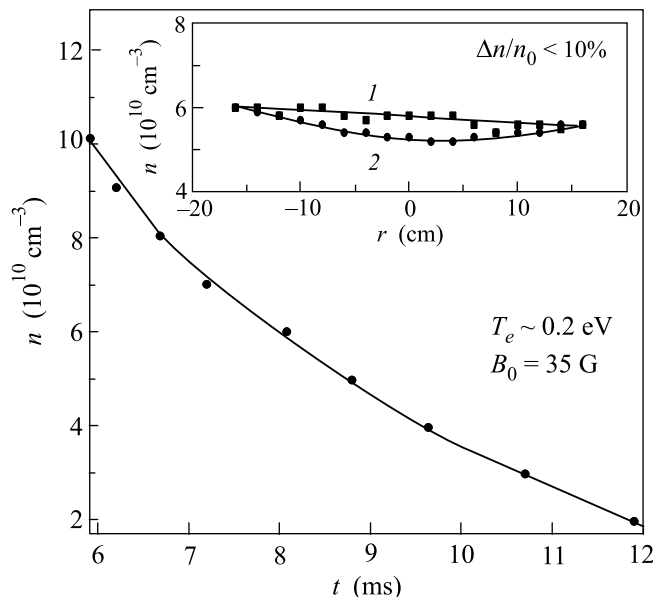


Рис.2. Зависимость концентрации распадающейся плазмы от времени; поперечное распределение плотности плазмы через 8 мс после выключения плазмосоздающих генераторов: 1 – без соленоида, 2 – в плазменный объем введен соленоид, с помощью которого создается магнитный канал (диаметр соленоида $D = 7.5$ см)

ющая антенна устанавливалась на оси системы, на расстоянии $z = 5$ см от крайнего витка соленоида. Поперечная структура ВЧ поля исследовалась с помощью диагностической антенны, которая свободно перемещалась по радиусу в плоскости, удаленной на 7 см от противоположного конца соленоида. Сигналы из плазмы регистрировались приемником с полосой $\Delta f = 100$ кГц.

На рис.3 представлены поперечные распределения амплитуды пробной волны с частотой $f = 20$ МГц в плазме с невозмущенным магнитным полем (1), в присутствии канала с увеличенным (2) и с пониженным (3) магнитным полем. Относительное возмущение магнитного поля в канале составляло $|\delta B|/B_0 = 0.2$. В случае дакта с пониженным полем амплитуда принимаемого сигнала уменьшается, поперечное распределение ВЧ поля несколько шире, чем распределение волнового поля без канала. В то же время, создание канала с увеличенным магнитным полем приводит к изменению пространственной структуры и значительному увеличению амплитуды ВЧ поля вблизи оси дакта. Во втором случае можно говорить об эффективном удержании свистовой волны магнитным каналом, именно распространение волн в канале с увеличенным полем подробно исследовалось в эксперименте.

Перераспределение ВЧ поля ($f = 20$ МГц) при увеличении тока в соленоиде от 0 А до 50 А показано на

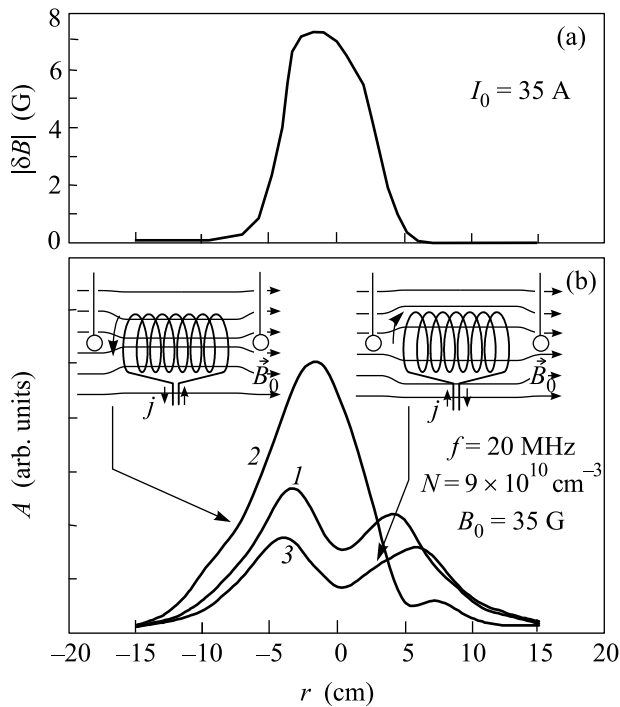


Рис. 3. (а) – поперечное распределение магнитного поля, создаваемого соленоидом; (б) – поперечное распределение амплитуды ВЧ свистойой волны ($f = 20$ МГц) в однородной плазме без магнитного канала (1), на выходе из канала с увеличенным (2) и пониженным (3) магнитным полем (относительное возмущение магнитного поля в канале $\delta B/B_0 = 0.2$)

рис.4. Следует отметить, что структура ВЧ полей изменяется уже при сравнительно малом возмущении магнитного поля при $\delta B/B_0 \sim 0.1$. По мере увеличения магнитного поля в канале до $\delta B/B_0 = 0.3$ наблюдается почти 3-кратное увеличение амплитуды ВЧ поля и его локализация вблизи оси дакта.

Поперечные распределения амплитуды волн на различных частотах, излучаемых в дакт с увеличенным магнитным полем, представлены на рис.5. Результаты получены при фиксированном малом возмущении магнитного поля, которое составляло $\delta B/B_0 = 0.1$. По мере увеличения частоты разница структур и амплитуд полей с каналом и без него становится все более заметной, на частотах $f \lesssim f_H/2$ ($f_H = \omega_H/2\pi \simeq 100$ МГц – электронная циклотронная частота) удержание свистов особенно эффективно ($f = 45$ МГц, рис.5с).

Для пояснения экспериментальных результатов проанализируем дисперсионные свойства вистлеров. Дисперсионное соотношение для волн свистового диапазона частот имеет следующий вид:

$$n = \frac{kc}{\omega} = \frac{\omega_p}{\sqrt{\omega(\omega_H \cos \Theta - \omega)}}, \quad (1)$$

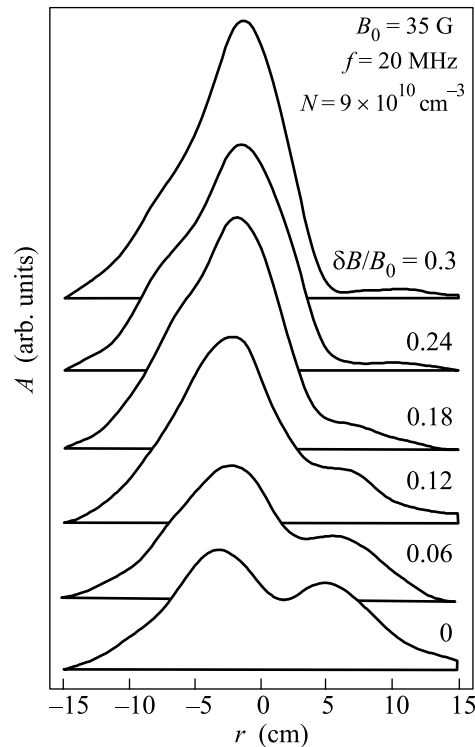


Рис.4. Поперечное распределение ВЧ поля свистойой волны ($f = 20$ МГц), распространяющейся в дакте с увеличенным магнитным полем, в зависимости от величины возмущения магнитного поля в канале

где n – показатель преломления свистойой волны, k – волновое число, c – скорость света в вакууме, Θ – угол между направлением волнового вектора и внешним магнитным полем. Из (1) видно, что при выполнении условия $\omega \ll \omega_H \cos \Theta$ свойства дактов магнитного поля, с точки зрения распространения свистовых волн, близки к волноводным характеристикам дактов плотности плазмы [7]. В частности, на низких частотах каналы с увеличенным полем эквивалентны дактам с пониженной концентрацией, эффективно удерживающим косые свистовые волны с $\lambda_{\parallel} \sim \lambda_{\perp}$ [3]. Однако при приближении частоты вистлеров к половинной гирочастоте электронов аналогия между дактами плотности и магнитного поля нарушается. В свистовом диапазоне кривизна поверхности волновых векторов на частотах $\omega \sim \omega_H/2$ очень мала, и даже небольшое изменение отношения ω/ω_H в канале может приводить к сильному изменению условий распространения и удержания волн. В этих условиях незначительные (10%) поперечные вариации магнитного поля оказывают существенное влияние на пространственную структуру ВЧ полей, что подтверждается в эксперименте (рис.5с).

Обратим внимание на некоторые особенности постановки эксперимента. Во-первых, в условиях экс-

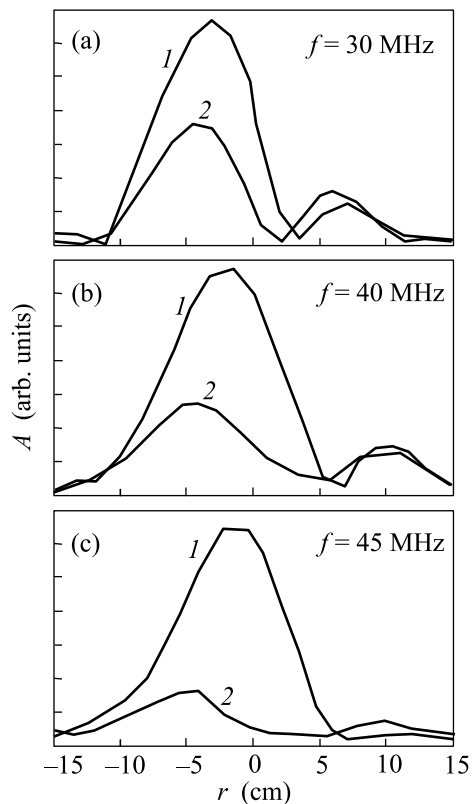


Рис. 5. Поперечные распределения ВЧ волновых полей при наличии канала с увеличенным магнитным полем (1) (относительное возмущение магнитного поля в канале $\delta B/B_0 = 0.1$) и без канала (2) на различных частотах. $N = 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $B_0 = 35 \text{ Г}$

перимента продольная длина свистовой волны превышает диаметр дакта магнитного поля. Поэтому при анализе условий удержания свистов в канале геометрикооптический подход [7] может использоваться лишь для качественных рассуждений. Во-вторых, на длине создаваемого канала укладывается не более 2-3 длин волн, и в этих условиях следует говорить не о возбуждении собственных мод магнитного волновода, а скорее о дифракции вистлера на неоднородности магнитного поля, размеры которой соизмеримы с длиной волны. Исследование волноводных мод было бы возможно при большей длине магнитного канала.

В заключение обсудим условия существования дактов магнитного поля в околоземной плазме. Известно, например, что во внутренней магнитосфере, помимо холодной ($T_e \sim T_i \sim 1 \text{ эВ}$) фоновой плазмы с плотностью n_0 , присутствует небольшая доля ($n_{\text{hot}} < 10^{-3} n_0$) горячих электронов и протонов (в радиационных поясах, области кольцевого тока) с энергиями более 10 кэВ [10]. Несмотря на крайне низкую плотность горячей компоненты, ее энергосодержание в условиях сильных геомагнитных возмущений су-

щественно возрастает, при этом может реализоваться условие

$$n_{\text{hot}} T_{\text{hot}} \lesssim \frac{B^2}{8\pi} \quad (2)$$

([11], T_{hot} – температура “горячих” частиц, $B^2/8\pi$ – плотность энергии геомагнитного поля). В данном случае азимутальная неоднородность концентрации и температуры энергичных частиц может стать причиной сильных диамагнитных возмущений, не сопровождаемых вариациями плотности холодной фоновой плазмы. Кроме того, каналирующие образования могут иметь динамический характер, возможно удержание свистовых волн в неоднородностях, создаваемых интенсивными УНЧ колебаниями (магнитными пульсациями), амплитуда которых достигает $\delta B \sim 10 \text{ нТл}$ [12] (относительное возмущение поля $\delta B/B \sim 5 \div 10\%$).

Таким образом, лабораторные эксперименты и оценки показывают, что поперечные неоднородности магнитного поля Земли могут играть роль волноводных каналов для свистов, особенно в периоды сильных возмущений магнитосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 04-02-17188, # 04-02-16344), Российского департамента науки (финансирование уникальных установок, регистрационный номер 01-18) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (грант # НШ-1639.2003.02).

1. J. C. Cerisier, *J. Atm. Terr. Phys.* **36**, 1443 (1974).
2. I. G. Kondrat'ev, A. V. Kudrin, and T. M. Zaboronkova, *Electrodynamics of Density Ducts in Magnetized Plasmas*, Amsterdam: Gordon and Breach, 1999.
3. Т. М. Заборонкова, А. В. Костров, А. В. Кудрин и др., *ЖЭТФ* **102**, 1151 (1992)
4. R. L. Stenzel, *Phys. Fluids* **19**, 857 (1976).
5. А. В. Костров, А. И. Смирнов, М. В. Стародубцев, А. А. Шайкин, *Письма в ЖЭТФ* **67**, 548 (1998).
6. Л. П. Пятаевский, *ЖЭТФ* **39**, 1450 (1960).
7. Р. Н. Кауфман, *Изв. ВУЗов, Радиофизика* **27**, 1102 (1984).
8. W. Calvert, *J. Geophys. Res.* **100**, 17491 (1995).
9. И. Г. Кондратьев, А. В. Костров, А. И. Смирнов и др., *Физика плазмы* **28**, 977 (2002).
10. R. H. W. Friedel and A. Korth, *Adv. Space Res.* **20**, 311 (1997).
11. Л. Лайонс, Д. Уильямс, *Физика магнитосферы*, М.: Мир, 1987.
12. Т. А. Plyasova-Bakounina, J. Kangas, K. Mursula et al., *J. Geophys. Res.* **101**, 10965 (1996).