

Особенности распространения волн в неоднородной плазме в окрестности электронно-циклотронного резонанса

М. С. Мальшев¹⁾, В. В. Назаров, А. В. Костров, А. Г. Галка

Институт прикладной физики РАН, 603950 Н. Новгород, Россия

Поступила в редакцию 28 июня 2019 г.

После переработки 11 июля 2019 г.

Принята к публикации 15 июля 2019 г.

Представлены экспериментальные результаты по исследованию особенностей распространения электромагнитных волн в неоднородной плазме на частотах, близких к частоте электронно-циклотронного резонанса. Установлено, что основной поток электромагнитного излучения вблизи циклотронного резонанса направлен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Амплитуда данного излучения достигает максимума при плазменной частоте ω_{pe} порядка 0.3 от циклотронной частоты ω_{He} .

DOI: 10.1134/S0370274X19160057

1. Введение. На сегодняшний день одной из основных проблем в плазменной геофизике является проблема генерации и распространения циклотронного излучения в авроральных областях околоземной плазмы и магнитосферах ряда планет Солнечной системы, таких как Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун [1–3]. Помимо процессов генерации, крайне важными являются вопросы, связанные с трансформацией и выходом излучения из магнитосферы через существенно неоднородную плазму.

Наиболее изученным типом излучения в магнитосфере Земли является авроральное километровое радиоизлучение (АКР), впервые зарегистрированное в 1965 г. на спутнике “Электрон” [4]. Дальнейшие наблюдения [5–7] показали, что излучение возникает на частотах, близких к локальной циклотронной частоте электронов ω_{He} . Основную роль в формировании АКР играют области с пониженной концентрацией плазмы в авроральной магнитосфере или, как их называют, каверны Кальверта [8–10], внутри которых для плазменной и циклотронной частот выполняется условие $\omega_{pe} < \omega_{He}$.

В данной работе представлены экспериментальные результаты по исследованию особенностей распространения электромагнитных волн в неоднородной магнитоактивной плазме на частотах как внутри линии циклотронного резонанса, так и в ее окрестности. Эмпирический подход в данном случае обусловлен тем, что расчет показателя преломления внутри резонансной линии аналитическими методами весьма затруднителен в силу сложности используемого математического аппарата.

2. Параметры экспериментальной установки. Экспериментальное исследование проводилось на крупномасштабном стенде “Ионосфера” (рис. 1). Стенд представляет собой вакуумную камеру длиной

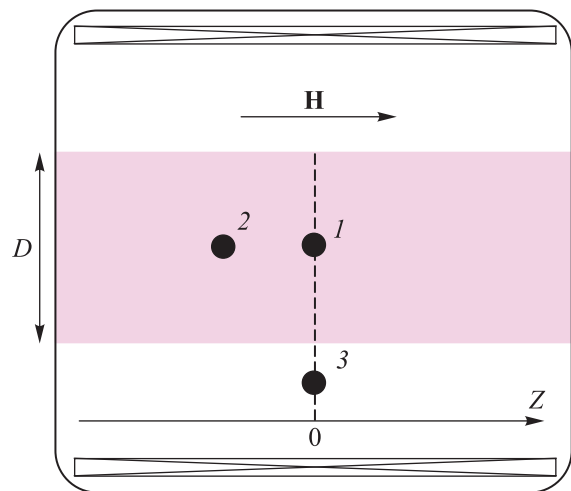


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки. 1 – излучающая антенна; 2, 3 – приемные антенны. Приемная антенна 3 может перемещаться вдоль оси Z . Поперечное и продольное распределения концентрации плазмы близки к параболическому закону с характерным масштабом по уровню 0.5 поперек оси установки $D = 40$ см, вдоль – порядка 100 см

1.5 м и диаметром 1.2 м. С помощью соленоида, размещенного внутри камеры, создавалось импульсное магнитное поле \mathbf{H} длительностью 0.5 с, максимальная величина которого достигала 400 Гс. Квазиоднородный столб магнитоактивной плазмы создавался в атмосфере аргона при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Торр.

¹⁾e-mail: malyshevms@gmail.com

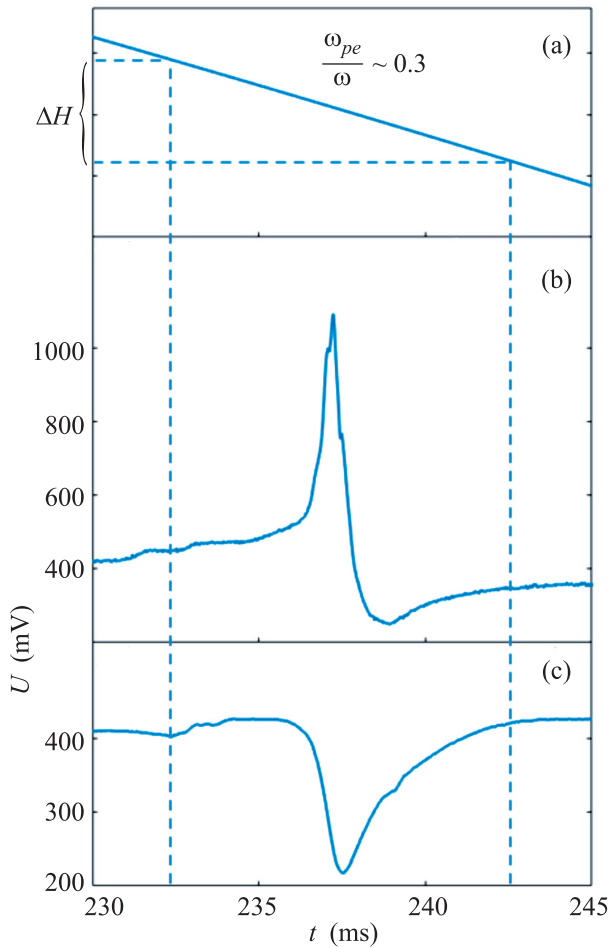


Рис. 2. (Цветной онлайн) (а) – Зависимость напряженности магнитного поля от времени. (б) – Осциллограмма сигнала, принимаемого антенной 3 поперек магнитного поля. (с) – Осциллограмма сигнала, принимаемого антенной 2 вдоль магнитного поля. Ширина области циклотронного резонанса, отмеченная пунктирными линиями, соответствует величине $\Delta H/H \sim 10^{-2}$. Эксперимент проводился при плазменной частоте $\omega_{pe} \sim 0.3\omega$

Эксперименты проводились в распадающейся плазме (после выключения плазмоздающего генератора) при температуре электронов и ионов $T_e \approx T_i \approx 0.5$ эВ. Характерное время распада составляло 8 мс. В ходе экспериментов концентрация плазмы изменялась в диапазоне от 10^{11} см⁻³ до 10^6 см⁻³. Измерения концентрации проводились с помощью резонансного СВЧ-зонда, выполненного на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии, с использованием амплитудно-фазового метода, развитого в работе [11].

Для излучения и приема электромагнитного сигнала использовались рамочные и электрические ан-

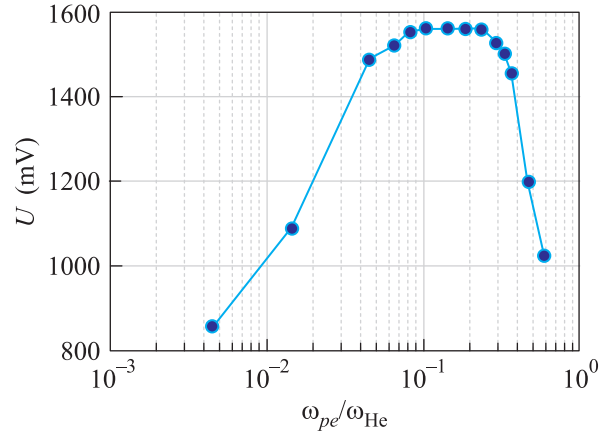


Рис. 3. (Цветной онлайн) Амплитуда сигнала в окрестности циклотронного резонанса в зависимости от концентрации плазмы вблизи излучающей антенны. По оси абсцисс отложены значения отношений плазменной и циклотронной частот

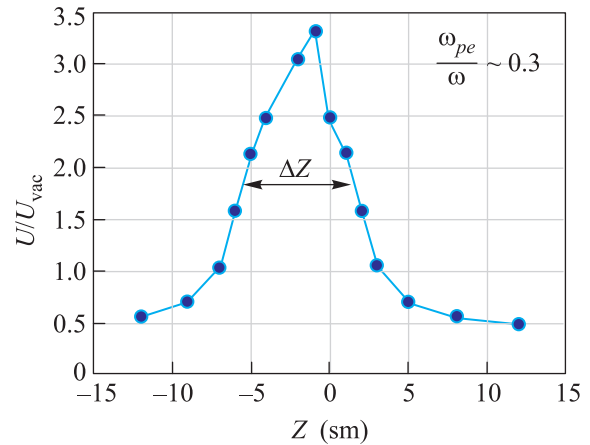


Рис. 4. (Цветной онлайн) Изменение амплитуды сигнала, принимаемого вне плазменного столба, в зависимости от положения приемной антенны на оси Z. Излучающая антенна находилась в сечении $Z = 0$. Характерная ширина максимума $\Delta Z \approx 8$ см. U_{vac} – уровень принимаемого сигнала при отсутствии плазмы

тенны с характерными размерами порядка 1 см. Излучающая антенна, к которой непрерывно подводился сигнал на частоте $f_0 = 800$ МГц, располагалась неподвижно в центре плазменного столба (рис. 1).

3. Экспериментальные результаты. Типичные осциллограммы сигналов, идущих в направлении приемных антенн вдоль и поперек магнитного поля, представлены на рис. 2. Видно, что в области циклотронного резонанса наблюдается увеличение амплитуды излучения, принятого поперек магнитного поля, и затем следует резкий спад с последующим провалом. В то же время на осциллограм-

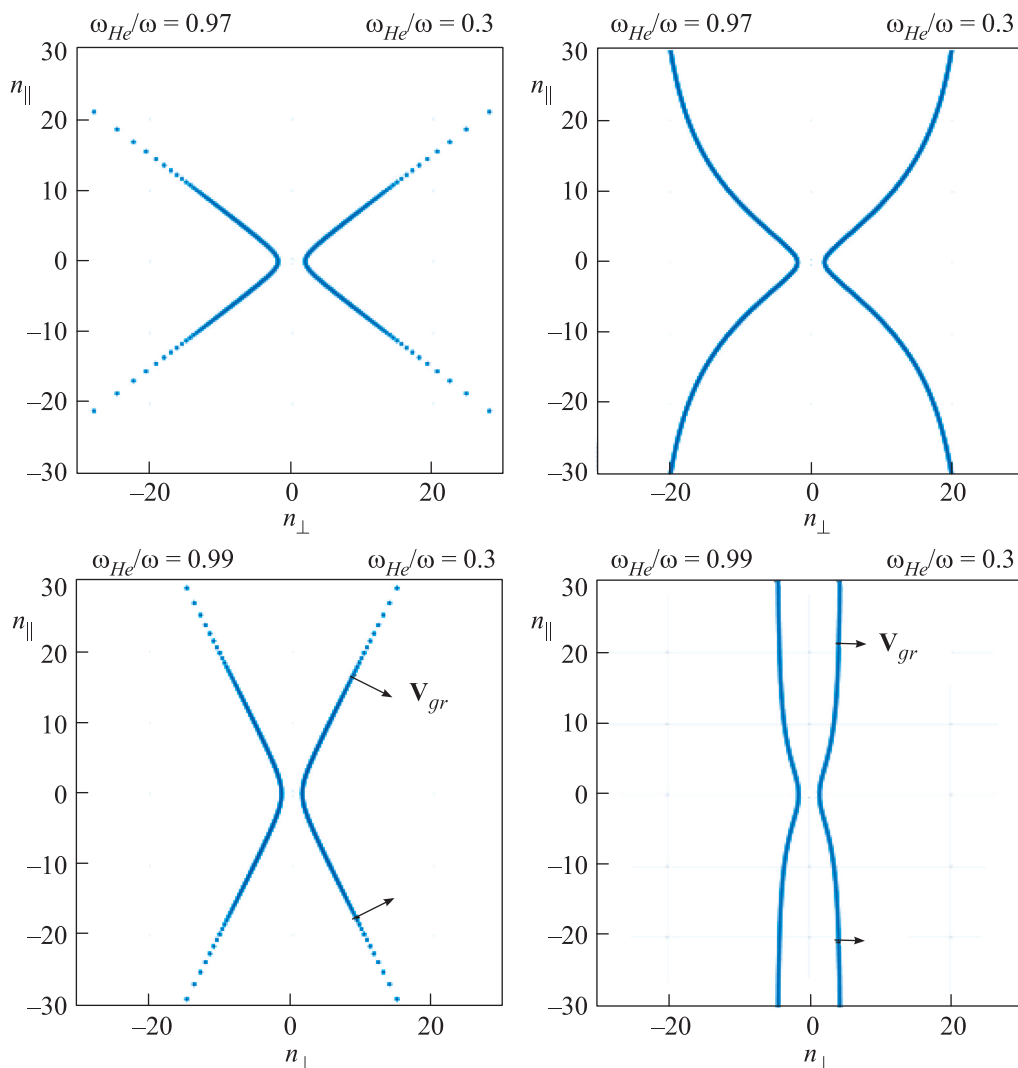


Рис. 5. (Цветной онлайн) Поверхности волновых векторов для волн на частотах вблизи циклотронного резонанса в холодной (слева) и горячей (справа) магнитоактивной плазме при двух соотношениях рабочей и циклотронной частот. Вертикальная ось направлена вдоль магнитного поля. Черными стрелками указаны направления векторов групповой скорости в конкретной точке волновой поверхности

ме сигнала, пришедшего вдоль магнитного поля, во всей окрестности циклотронного резонанса наблюдается только провал (рис. 2). Отсюда следует, что основной поток излучения вблизи циклотронной частоты направлен перпендикулярно магнитному полю. Результаты измерений также показывают, что формы осциллограмм принимаемых сигналов при излучении магнитной рамкой и электрическим щтырем качественно совпадают.

Были проведены эксперименты по исследованию эффективности излучения, направленного поперек магнитного поля, в зависимости от концентрации плазмы в центре плазменного столба. Установлено, что максимальная амплитуда сигнала наблюдалась при плазменной частоте $\omega_{pe} \sim 0.1\omega_{He}$ (рис. 3).

В плотной плазме при условии $\omega \sim \omega_{He} \sim \omega_{pe}$ амплитуда сигнала значительно уменьшалась, что, по-видимому, связано с увеличением эффективности циклотронного поглощения электромагнитных волн. Следует отметить, что особенность распространения волн вблизи циклотронного резонанса наблюдалась даже при достаточно низких плазменных частотах $\omega_{pe} < 5 \cdot 10^{-3} \sim \omega_{He}$.

С помощью подвижной антенны 3 (рис. 1) было исследовано пространственное распределение электромагнитного поля излучающей антенны вдоль оси камеры Z, расположенной в центре плазменного столба (рис. 4). Видно, что структура поля, излучаемого из столба плазмы, имеет выраженный максимум с достаточно малой шириной вблизи поперечно-

го относительно магнитного поля направления распространения, т.е. поток энергии излучения на частотах в окрестности циклотронного резонанса направлен преимущественно перпендикулярно магнитному полю.

4. Обсуждение. Для объяснения особенностей распространения электромагнитных волн вблизи ЭЦР (электронно-циклотронного резонанса) в магнитоактивной плазме был проведен анализ дисперсионного уравнения в холодном ($T_e = 0$, где T_e – температура электронов) и в теплом ($T_e \neq 0$) приближении без учета столкновительного затухания [12, 13]. В холодном приближении данное уравнение является биквадратным относительно показателя преломления. С учетом тепловых поправок дисперсионное уравнение становится бикубическим. Данное уравнение справедливо для частот, достаточно удаленных от частоты циклотронного резонанса, поскольку внутри линии необходимо учитывать мнимую часть показателя преломления (затухание Ландау), что может существенно повлиять на пространственный спектр возбуждаемых волн.

Типичные волновые поверхности для необыкновенной моды представлены на рис. 5. Видно, что учет тепловых поправок в дисперсионном уравнении приводит к качественному изменению формы данных поверхностей. При стремлении частоты волны ω к электронной циклотронной частоте ω_{He} волновые поверхности деформируются таким образом, что у подавляющего большинства собственных волн магнитоактивной плазмы волновой вектор составляет малый угол относительно внешнего магнитного поля. Наблюдаемая тенденция также приводит к тому, что групповая скорость этих волн, перпендикулярная к волновой поверхности, оказывается направлена преимущественно поперек магнитного поля (рис. 5). Экспериментальные результаты также свидетельствуют, что вблизи ЭЦР, где дисперсионное уравнение некорректно, основной поток энергии от источника в магнитоактивной плазме направлен перпендикулярно внешнему магнитному полю.

5. Заключение. На основании экспериментальных результатов и анализа дисперсионного уравнения для собственных волн в магнитоактивной плазме установлено, что в окрестности циклотронного ре-

зонанса основная часть возбуждаемых волн является квазипродольными, энергия которых направлена преимущественно поперек магнитного поля. Также установлено, что амплитуда сигнала сильно зависит от концентрации плазмы вблизи излучающей антенны и достигает максимума при плазменной частоте $\omega_{pe} \sim 0.04 - 0.4\omega_{He}$. Полученные результаты позволяют объяснить особенности условий распространения и трансформации электромагнитного радиоизлучения, исходящего из магнитосфер некоторых планет Солнечной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания #0035-2019-0010 и гранта Российского фонда фундаментальных исследований #18-32-00616мол_а.

1. B. F. Burke and K. L. Franklin, *J. Geophys. Res.* **60**, 213 (1955).
2. A. G. Smith and T. D. Carr, *Astrophys. J.* **130**, 641 (1959).
3. L. W. Brown, *Astrophys. J.* **198**, 89 (1975).
4. В. Е. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Л. В. Гришкевич, Л. М. Ерухимов, Н. А. Митяков, *Известия вузов. Радиофизика* **2**, 169 (1968).
5. R. G. Hewitt and D. B. Melrose, *Aust. J. Phys.* **36**, 725 (1983).
6. В. Р. Рыбов, *J. Geophys. Res.* **99**, 8441 (1994).
7. M. Y. Boudjada, P. H. M. Galopeau, H. O. Rucker, and A. Lecacheux, *Astron. Astrophys.* **363**, 316 (2000).
8. Т. М. Буринская, Ж. Л. Рош, *Физика плазмы* **33**, 32 (2007).
9. М. М. Могилевский, Т. В. Романцова, Я. Ханаш, Т. М. Буринская, Р. Шрайбер, *Письма в ЖЭТФ* **86**, 819 (2007).
10. М. М. Могилевский, И. Л. Моисеенко, Т. В. Романцова, Я. Ханаш, Т. М. Буринская, Д. В. Чугунин, *Письма в ЖЭТФ* **93**, 359 (2011).
11. A. G. Galka, D. V. Yanin, A. V. Kostrov, S. E. Priver, and M. S. Malyshev, *J. Appl. Phys.* **125**, 124501-1 (2019).
12. В. Л. Гинзбург, *Распространение электромагнитных волн в плазме*, 2-е изд., перераб., Наука, М. (1967).
13. Б. Н. Гершман, Л. М. Ерухимов, Ю. Я. Яшин, *Волновые явления в ионосфере и космической плазме*, Наука, М. (1984).