

УДК: 52-77

DOI: 10.26907/rwp29.2025.348-351

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

М.С. Малышев, А.Г. Галка, А.В. Костров

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46

E-mail: malyshev@ipfran.ru

**Аннотация.** Работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей распространения высокочастотных волн вблизи электронной гирочастоты в магнитоактивной плазме при наличии вытянутого вдоль магнитного поля дакта пониженной плотности в рамках решения проблемы формирования диаграммы направленности аврорального километрового радиоизлучения. В работе сравнивались пространственно-временные распределения амплитуды принимаемых сигналов в однородной и неоднородной магнитоактивной плазме при различных параметрах окружающей среды. Установлено, что плазменный дакт наиболее эффективно канализирует быстрые волны с показателем преломления плазмы меньше единицы, при этом поле замедленной волны также сосредоточено внутри канала, но на незначительном расстоянии от источника по сравнению с полем быстрой волны. Таким образом, показано, что дакт пониженной плотности плазмы является эффективным каналом переноса аврорального километрового радиоизлучения в широком диапазоне частот вдоль магнитного поля из области источника генерации (каверны Кальверта) в окружающее пространство.

**Ключевые слова:** авроральное километровое радиоизлучение; электронный циклотронный резонанс; однородная и неоднородная плазма; каверна Кальверта; дакт пониженной плотности; канализование; обыкновенная и необыкновенная мода

## LABORATORY MODELING OF THE DIRECTIONAL PATTERN FORMATION OF AURORAL KILOMETRIC RADIATION IN AN INHOMOGENEOUS MAGNETOACTIVE PLASMA

M.S. Malyshev, A.G. Galka, A.V. Kostrov

**Abstract.** The paper is devoted to an experimental study of the propagation features of high-frequency waves near the electron gyrofrequency in magnetoactive plasma in the presence of a low-density duct extended along the magnetic field in the context of solving the problem of directional pattern formation of auroral kilometric radiation. The paper compares the spatio-temporal distributions of the amplitude of received signals in homogeneous and inhomogeneous magnetoactive plasma under different environmental parameters. It is found that the plasma duct most effectively channels fast waves with a plasma refractive index less than unity, while the field of the slow wave is also concentrated inside the channel, but at an insignificant distance from the source compared to the field of the fast wave. Thus, it is shown that the low-density plasma duct is an effective channel for transferring auroral kilometric radiation in a wide frequency range along the magnetic field from the region of the generation source (Calvert cavern) to the surrounding space.

**Keywords:** auroral kilometric radiation; electron cyclotron resonance; homogeneous and inhomogeneous plasma; Calvert cavern; low-density duct; channeling; ordinary and extraordinary mode

### Введение

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) представляет собой спорадическое излучение естественного происхождения, наблюдаемое в полярных областях околоземной плазмы. Генерация АКР происходит, как правило, на локальной электронной гирочастоте в диапазоне примерно от 30 до 700 кГц с максимумом в интервале от 100 до 300 кГц. Источники данного излучения расположены в приполярных зонах в областях с пониженной концентрацией плазмы  $\sim 1-10 \text{ см}^{-3}$  (кавернах Кальверта), где характерное отношение плазменной  $f_{pe}$  и циклотронной  $f_{ce}$  частот электронов много меньше единицы, преимущественно на высотах от 5 до 15 тыс. км на магнитных широтах, превышающих  $65^\circ$  [1,2].

Полная мощность излучения в одном событии составляет как правило  $\sim 10^7$  Вт, хотя в отдельные периоды её значение может достигать  $10^9$  Вт, что составляет примерно 0,01–1% от полной энергии магнитосферной суббури (учитывая, что её средняя мощность  $\sim 10^{11}$  Вт) [3].

Таким образом, АКР является одним из наиболее мощных естественных излучений, генерируемых в магнитосфере Земли, и потому играет важную роль в глобальной динамике авроральной плазмы.

Спутниковые измерения показывают, что генерация АКР происходит преимущественно в виде быстрой правополяризованной необыкновенной волны (R-X мода) на частотах вблизи локальной частоты отсечки  $f_x = (f_{ce} + (f_{ce}^2 + 4f_{pe}^2)^{1/2})/2$  почти перпендикулярно силовым линиям магнитного поля [4]. Между тем, результаты других измерений [5] показывают, что максимум диаграммы направленности АКР расположен вдоль силовой линии магнитного поля в источнике и имеет угол раскрытия примерно  $\pm 25^\circ$ . Данное несоответствие требует объяснения.

Измерения параметров плазмы внутри области источника АКР с высоким разрешением на спутнике *Viking* показали, что излучение генерируется в узких областях с поперечной толщиной несколько километров [6], распространяется от Земли и регистрируется спутниками на высоте несколько тысяч километров. На сегодняшний день проблема переноса километрового излучения на такие большие расстояния остаётся нерешённой. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей распространения электромагнитных волн вблизи электронной циклотронной частоты ( $f \approx f_{ce} > f_{pe}$ ) в магнитоактивной плазме при наличии искусственно созданного дакта пониженной плотности, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля.

### Плазменный стенд «Ионосфера»

Лабораторное моделирование проводилось на крупномасштабном плазменном стенде «Ионосфера», который представляет собой вакуумную камеру объёмом  $2 \text{ м}^3$ , оснащённую датчиками для контроля параметров магнитоактивной плазмы и измерения электромагнитных полей. Внутри заполненной аргоном камеры с помощью импульсного индукционного разряда формировался цилиндрический столб плазмы длиной 1 м и диаметром 0,8 м. В процессе пробоя концентрация электронов достигала значения  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . После окончания работы источника разряда плазма распадалась, и концентрация электронов экспоненциально уменьшалась с характерным временем порядка 5 мс. Внутри установки также создавалось импульсное внешнее магнитное поле, направленное вдоль оси камеры. Характерное время изменения магнитного поля составляло примерно 150 мс, что намного превышает время распада плазмы. Данная особенность позволяла считать магнитное поле квазистационарным в течение одного импульса источника плазмы.

В ходе экспериментов излучение и приём сигналов осуществлялся миниатюрными электрическими штыревыми антennами (длина 5 мм, диаметр 0,2 мм) и магнитными экранированными рамками с разрезом (диаметр 15 мм, толщина экрана 1 мм). Антенны располагались в центральной части плазменного столба, где концентрация и магнитное поле характеризуются высокой степенью однородности (рис. 1). Частота сигнала составляла  $f = 800 \text{ МГц}$ , электронная циклотронная частота  $f_{ce}$  считалась постоянной, концентрация распадающейся плазмы менялась в диапазоне от  $10^{10}$  до  $10^8 \text{ см}^{-3}$ , соответственно, безразмерные параметры  $u = (f_{ce}/f)^2$  и  $v = (f_{pe}/f)^2$  удовлетворяли соотношениям  $u = \text{const} < 1$  и  $v < 1$ . Для исключения возможности появления различных нелинейных эффектов мощность излучения выбиралась на минимальном уровне.

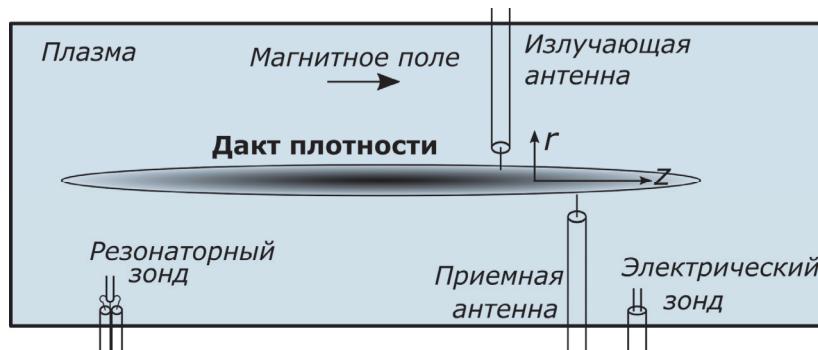


Рис. 1. Схематическое изображение области проведения экспериментов

Плазменный дакт пониженной плотности, вытянутый вдоль внешнего магнитного поля, создавался с помощью диэлектрического стержня. Характерный поперечный размер канала в рабочей зоне составлял примерно 50 мм, при этом в течение одного акта экспериментов пространственные масштабы сформированной плазменной неоднородности оставались неизменными.

Эксперименты проводились в режиме распадающейся плазмы, что исключало влияние шумов источника на получаемые результаты, а также позволяло исследовать процессы распространения волн в широком диапазоне концентраций.

### Экспериментальные результаты

В ходе экспериментов приёмная антенна перемещалась в горизонтальной плоскости по окружности радиуса 5 см относительно неподвижной излучающей антенны, фиксируя угловое распределение амплитуды принимаемого сигнала. В первой части экспериментов внешнее магнитное поле соответствовало безразмерному параметру  $u = 0.7$ . В процессе распада однородной плазмы в диапазоне параметров  $1 - u < v < 1$  наблюдалось явное увеличение амплитуды сигнала, распространяющегося под характерным углом  $\theta = \theta_{res}$  ( $0 < \theta_{res} < \pi/2$ ) к внешнему магнитному полю (Z-мода), который изменяется в зависимости от концентрации плазмы (рис. 2а). В результате в пространстве формируется определённый конус излучения или резонансный конус. Вблизи точки выхода из области отсечки для необыкновенной волны ( $v \sim 1 - u^{1/2}$ ) зафиксировано усиление поля излучения в продольном направлении  $\theta = 0$ .

При проведении экспериментов в условиях наличия плазменного дакта пониженной плотности излучающая антенна располагалась непосредственно в центре канала ( $r = 0$ ) на расстоянии  $z = 80$  мм от торца диэлектрического стержня. Относительное уменьшение концентрации плазмы в месте установки излучающей антенны составляло порядка 20%. В данном случае характерная структура резонансных конусов Z-моды во всём диапазоне значений концентрации фоновой плазмы не наблюдалась. Вместо этого в области параметров  $v < 1 - u^{1/2}$ , соответствующих быстрой необыкновенной волне X-моды, зафиксировано существенное увеличение амплитуды принимаемого сигнала в продольном направлении, чего не наблюдалось в случае однородной плазмы (рис. 2б). Таким образом, наличие дакта пониженной плотности плазмы приводило к локализации высокочастотного поля излучения вблизи середины канала.

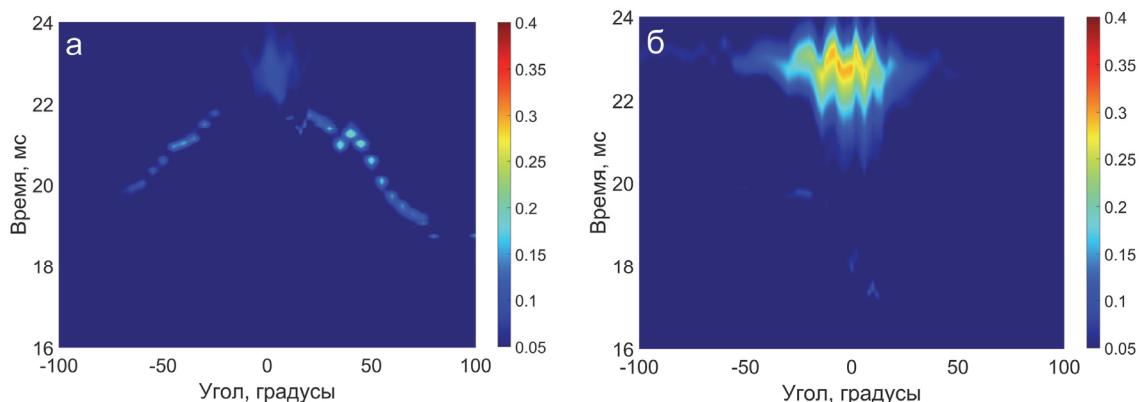


Рис. 2. Угловое распределение амплитуды принимаемого сигнала в разные моменты времени в однородной плазме (а) и при наличии плазменного дакта пониженной плотности (б)

В другой серии экспериментов значение внешнего магнитного поля выбиралось с прицелом на максимальную близость частоты излучаемого сигнала к электронной циклотронной частоте ( $u = 0.9$ ). В данных условиях распределения амплитуды принимаемого сигнала в однородной и неоднородной плазме имели схожий характер. Максимальный поток энергии излучения в обоих случаях был направлен преимущественно поперёк внешнего магнитного поля, что соответствует граничной точке области резонансного конуса с предельным значением угла  $\theta_{res} \approx \pi/2$ .

Отметим, что подобный плазменный канал для быстрых волн является аналогом диэлектрического волновода в вакууме для электромагнитной волны. В обоих случаях показатель преломления среды на оси неоднородности больше чем на периферии. При этом в системе с волноводом возбуждается поверхностная гибридная мода, переносящая энергию вдоль его оси как внутри диэлектрика, так и снаружи в вакууме. В нашем эксперименте аналогично продемонстрировано канализирование необыкновенной моды в узком плазменном дакте пониженной плотности с характерным поперечным размером, меньшим вакуумной длины волны.

Таким образом, результаты данной работы позволяют сделать вывод, что регистрация в ходе спутниковых измерений необыкновенной моды аврорального километрового радиоизлучения под малым углом к силовым линиям локального магнитного поля на больших расстояниях от области источника генерации является следствием канализирования вышеуказанных волн в каверне с низкой плотностью плазмы (каверне Кальверта) и их последующего переноса вдоль магнитного поля в окружающее космическое пространство.

### Заключение

По результатам проведённых экспериментов показано, что в однородной плазме эффективно возбуждается квазистатическая замедленная волна (Z-мода), которая распространяется под определённым углом к внешнему магнитному полю, формируя резонансный конус. При увеличении частоты сигнала  $f < f_{ce}$  угол образующей данного конуса изменяется от 0 до 90 градусов и при достижении электронного циклотронного резонанса  $f \approx f_{ce}$  основной поток энергии оказывается направлен перпендикулярно внешнему магнитному полю.

Наличие плазменного дакта пониженной плотности, ориентированного вдоль магнитного поля, существенно изменяет картину распространения высокочастотных волн. Такой дакт, в частности, эффективно канализирует быстрые необыкновенные волны, для которых показатель преломления плазмы меньше единицы. Резонансный конус в таких условиях не формируется, и поле замедленной волны также сосредоточено внутри плазменной неоднородности, хоть и на меньшем расстоянии от излучающей антенны, чем поле быстрой волны. При этом вблизи электронной циклотронной частоты излучение наблюдалось в основном поперёк внешнего магнитного поля также, как и в однородной плазме.

На основании вышесказанного можно утверждать, что плазменная каверна пониженной плотности в полярных областях Земли является эффективным каналом распространения быстрых электромагнитных волн аврорального километрового радиоизлучения вдоль магнитного поля из области источника в околоземное космическое пространство, тем самым формируя узкую диаграмму направленности данного излучения.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН (шифр темы FFUF-2024-0036).

### Список литературы

1. Alexander J.K. Terrestrial kilometric radiation. 1. Spatial structure studies / J.K. Alexander, M.L. Kaiser // Journal of Geophysical Research. – 1976. – Vol. 81. – No. 34. – P. 5948–5956.
2. Kurth, W.S. Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation / W.S. Kurth, M.M. Baumbach D.A. Gurnett // Journal of Geophysical Research. – 1975. – Vol. 80. – No. 19. – P. 2764–2770.
3. Gurnett D.A. The Earth as a radio source: terrestrial kilometric radiation / D.A. Gurnett // Journal of Geophysical Research. – 1974. – Vol. 79. – No. 28. – P. 4227–4238.
4. Louarn P. Generation of auroral kilometric radiation in bounded source regions / P. Louarn // Lecture Notes in Physics. – 2006. – Vol. 687. – P. 55–86.
5. Об источнике аврорального километрового излучения / М.М. Могилевский, Т.В. Романцова, Я. Ханаш [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 86. – Вып. 11. – С. 819–821.
6. Louarn P. Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities — II. The cyclotron maser instability in small size sources / P. Louarn, D. Le Queau // Planetary and Space Science. – 1996. – Vol. 44. – No. 3. – P. 211–224.