

## Прямые измерения аврорального километрового радиоизлучения в ограниченном источнике

М. М. Могилевский<sup>1)</sup>, И. Л. Моисеенко, Т. В. Романцова, Я. Ханаш\*, Т. М. Буринская, Д. В. Чугунин

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

\* Центр космических исследований ПАН, 87-100 Торунь, Польша

Поступила в редакцию 20 января 2011 г.

После переработки 14 февраля 2011 г.

При анализе измерений аврорального километрового излучения (АКР), зарегистрированного в эксперименте ПОЛЬРАД на спутнике ИНТЕРБОЛ-2, на полярной границе авроральной области обнаружено усиление излучения вблизи нижней частоты обрезания АКР. Разница между локальной циклотронной частотой электронов и нижней частотой усиленного излучения составляет 8–20 кГц, что указывает на близость к источнику АКР. Из детального анализа низкочастотного АКР следует, что его амплитуда возрастает в 20–70 раз по сравнению с “фоновыми” значениями и имеет амплитудную модуляцию с характерными периодами 40–60 с. Повышение интенсивности на низких частотах интерпретируется как пересечение спутником области источника и регистрацией волноводных мод в нем.

1. Авроральное километровое радиоизлучение (АКР), обнаруженное в 1965 г. на спутнике “Электрон” [1], является одним из наиболее мощных излучений магнитосферы Земли. После открытия АКР в течение нескольких лет продолжалась дискуссия относительно природы и механизма генерации столь сильного излучения. В 1979 г. в работе Ву и Ли [2] для объяснения АКР был предложен механизм циклотронной мазерной неустойчивости, развивающейся в авроральной области, в так называемых кавернах Кальверта с пониженной плотностью плазмы, где выполняется условие  $f_{pe}/f_{ce} \ll 1$  ( $f_{pe}$  и  $f_{ce}$  – плазменная и циклотронная частоты электронов). В настоящее время этот механизм является общепризнанным, поскольку он объясняет большинство наблюдаемых свойств АКР: высокую интенсивность АКР, зависимость интенсивности излучения от геомагнитной активности, поляризацию и др.

Согласно работе [2], АКР должно выходить из источника почти перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Однако из результатов измерений [3] следует обратное – максимум диаграммы излучения АКР направлен вдоль силовой линии магнитного поля в источнике и имеет угол раскрытия порядка  $\pm 25^\circ$ . В теоретических работах [4, 5] было показано, что границы области генерации оказывают существенное влияние на формирование диаграммы направленности источника. Роль границы может играть либо градиент распределения фоновой плазмы поперек внешнего магнитного поля, либо границы пучка энер-

гичных электронов, инжектируемых из хвоста магнитосферы во внутренние области, являющегося источником энергии АКР [5]. В этом случае формируется волновод с характерными широтными размерами, много меньшими, чем долготными, и диаграмма направленности излучения формируется этим волноводом. Проверка этого теоретического предположения связана с рядом экспериментальных трудностей, которые удалось преодолеть в нашем эксперименте.

Мы приводим результаты измерения АКР на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 [6], которые можно интерпретировать как регистрацию волноводных мод внутри источника генерации излучения.

2. Орбита спутника ИНТЕРБОЛ-2 была выбрана таким образом, что с октября 1996 г. по февраль 1997 г. в высоких широтах скорость движения спутника относительно оболочек силовых линий магнитного поля Земли,  $v_{Btr}$ , была много медленнее, чем характерные скорости движения полярной границы авроральной области. На рис.1 приведена часть траектории спутника при его движении в высоких широтах и, в частности, при пролете авроральной области магнитосферы.  $L$  (параметр Мак-Илвайна) характеризует силовую линию магнитного поля Земли и связан с геомагнитной широтой простым соотношением  $L = 1/\cos^2 \varphi_m$ , где  $\varphi_m$  – геомагнитная широта. Рис.1 показывает, что спутник как бы скользит по  $L$ -оболочке, и его малая скорость движения относительно силовых линий магнитного поля ( $v_{Btr} \sim 30\text{--}300$  м/с) позволяет разделить пространственные и временные изменения параметров плазмы и электромагнитного поля.

<sup>1)</sup> e-mail: mogilevsky@romance.iki.rssi.ru

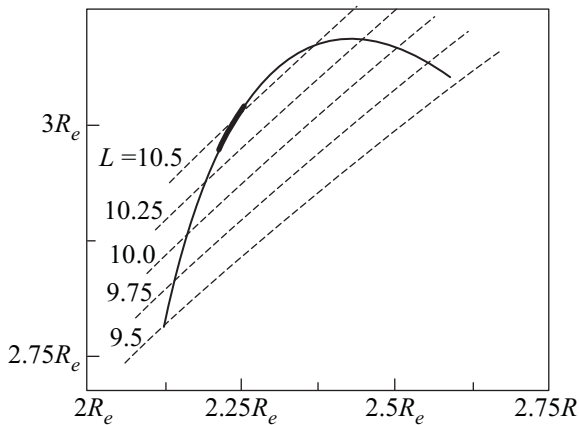


Рис.1. Траектория движения спутника ИНТЕРБОЛ-2 относительно силовых линий магнитного поля ( $L$ -оболочек) 01.12.96 г. в интервале 16:00–17:00 UT. Сплошная кривая соответствует 6-минутному интервалу времени, в котором были зарегистрированы низкочастотные всплески АКР (16:16–16:22 UT). По вертикальной и горизонтальной осям – две пространственные координаты (вдоль и поперек оси магнитного диполя), в радиусах Земли ( $R_e = 6370$  км)

В настоящей работе использованы результаты измерений электрической компоненты электромагнитного излучения, полученные в эксперименте ПОЛЬРАД на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в диапазоне частот от 4 кГц до 1 МГц. Частотное временное разрешение эксперимента составляло 4 кГц и 6 с, соответственно [7]. Анализировались амплитудно-частотные характеристики АКР. Особое внимание было уделено низкочастотной части спектра, поскольку соотношение между нижней частотой обрезания спектра АКР и локальной циклотронной частотой электронов указывает на близость спутника к источнику излучения.

**3.** На рис.2 и 3 представлены результаты анализа электромагнитного излучения, зарегистрированного 01.12.1996 г. во время геомагнитного возмущения в авроральной области ( $\varphi_m = 71.2\text{--}71.9$  градусов) в ночном секторе магнитосферы (местное магнитное время MLT = 23.1–00.1). На динамической спектрограмме, приведенной на рис.2, видна нижняя граница спектра АКР, которая наблюдалась в течение всего времени измерения. В интервале 16:16–16:22 UT (UT – мировое время) хорошо видны узкополосные всплески электромагнитного излучения на частотах 35–70 кГц, представляющие собой усиление АКР на его нижней частотной границе. Частотная ширина всплесков составляет 10–20 кГц, изменение центральной частоты всплеска со временем – 15–20 кГц и интенсивность всплесков изменяется во времени с характерным периодом 40–60 с. Скорость дрейфа

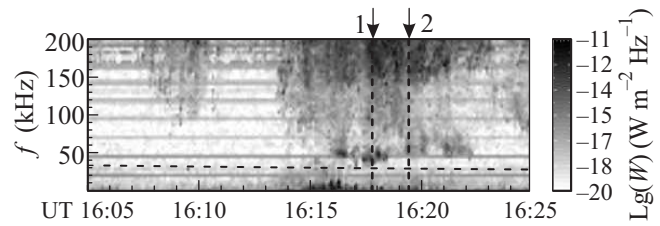


Рис.2. Динамическая спектрограмма мощности АКР по измерениям 01.12.1996 г. со спутника ИНТЕРБОЛ-2 в диапазоне частот от 4 до 200 кГц. По вертикальной оси – частота в кГц, по горизонтальной – время, UT. Мощность излучения кодирована интенсивностью черного цвета (белый цвет – отсутствие сигнала). Черная штриховая линия – локальная циклотронная частота электронов. Вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты времени, для которых строились спектры излучения (рис.3). Горизонтальные линии на спектрограмме – бортовые помехи

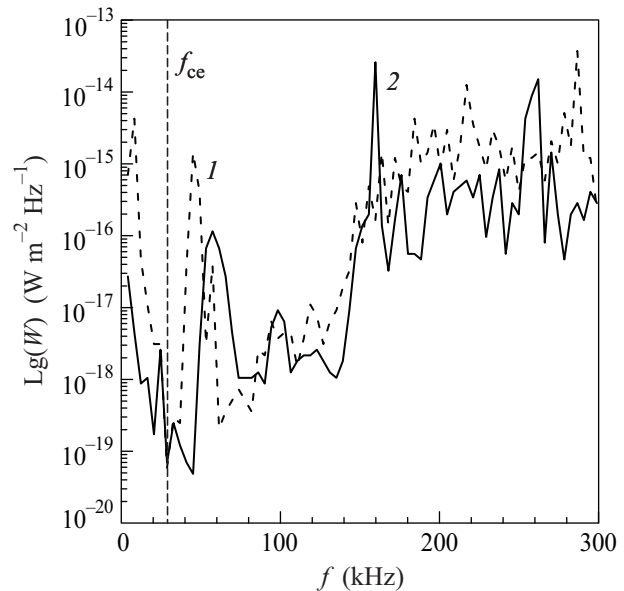


Рис.3. Спектры АКР в диапазоне частот от 4 до 300 кГц для двух моментов времени (см. рис.2): 1 –  $t = 16:17:42$  UT (пунктирная кривая), 2 –  $t = 16:19:22$  UT (сплошная кривая). Вертикальная пунктирная линия – значение локальной (вблизи спутника) циклотронной частоты электронов

всплесков по частоте составляет  $df/dt \sim 0.25$  кГц/с. Горизонтальная пунктирная линия на рис.2 – локальная циклотронная частота электронов  $f_{ce}$ , вычисленная по измерениям магнитного поля на спутнике ИНТЕРБОЛ-2. В течение всего приведенного интервала времени  $f_{ce}$  изменялась с 33 до 27.5 кГц, а в интервале 16:16–16:22 составляла  $f_{ce} = 29.7 \div 28.2$  кГц.

Центральная частота всплесков за время их регистрации изменяется не монотонно – в первом всплеске, зарегистрированном в 16:16, она составляет  $\sim 55$  кГц, в 16:17:20 понижается до 35 кГц и в конце интервала наблюдения снова повышается до 65–70 кГц. При этом высота спутника изменялась монотонно от 17144 до 17492 км над поверхностью Земли. Локальная циклотронная частота электронов в точке наблюдения, соответственно, монотонно уменьшалась,  $\Delta f_{ce} = 1.5$  кГц.

На рис.3 приведены спектры мощности излучения для двух моментов времени, отмеченных на рис.2 вертикальными пунктирными линиями ( $t_1 = 16 : 17 : 42$  UT и  $t_2 = 16 : 19 : 22$  UT). С уменьшением частоты интенсивность потока мощности излучения падает, но вблизи нижней границы спектра наблюдается сильное возрастание АКР. Отношение потока мощности излучения к “фоновым” значениям составляет  $\sim 0.5 \cdot 10^3 - 0.5 \cdot 10^4$ , что соответствует увеличению амплитуды сигнала в  $\sim 20 - 70$  раз. Подробный анализ значения нижней частоты всплесков, с учетом частотного разрешения прибора, показал, что разница между этой частотой и локальной циклотронной частотой электронов составляет 8–20 кГц.

Суммируя результаты обработки АКР, можно выделить следующее:

1) На полярной границе авроральной области наблюдается АКР, интенсивность которого увеличивается в 20–70 раз на нижней частоте обрезания.

2) Нижняя частота данного излучения на 8–20 кГц выше, чем локальная циклотронная частота электронов.

3) Период амплитудной модуляции усиленного излучения составляет  $\sim 40 - 60$  с.

4. Размеры антенны эксперимента ПОЛЬРАД,  $l$ , составляли 22 м, что много меньше, чем длина волны электромагнитного излучения в свободном пространстве,  $\lambda$ . В этом случае можно использовать приближение короткого диполя. На рис.4 приведено сравнение эффективности такого диполя при регистрации длинноволнового и коротковолнового излучений – для меньших длин волн эффективность более высокая. Таким образом, наблюдаемое в эксперименте возрастание интенсивности АКР может быть связано с тем, что на низких частотах регистрировались коротковолновые излучения. Такая ситуация характерна для распространения волн в волноводе, где волноводные моды распространяются медленнее по сравнению со свободным пространством.

На существование волноводов, вытянутых вдоль магнитного поля, и их связь с АКР указывают результаты работы [8], где по результатам измерения

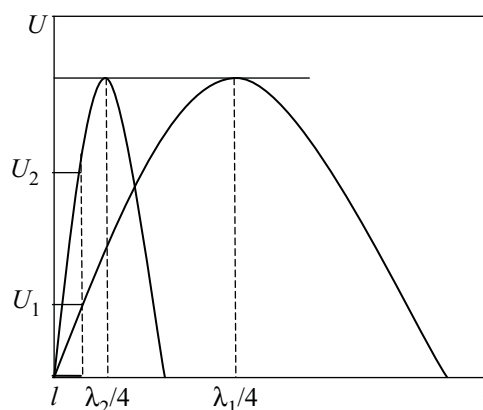


Рис.4. Схема, иллюстрирующая эффективность антенны при регистрации коротковолнового и длинноволнового излучений.  $\lambda_1$  – длина волны электромагнитного излучения в свободном пространстве,  $\lambda_2$  – длина волны волноводной моды ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ),  $l$  – эффективный размер антенны.  $U_1$  и  $U_2$  – наводимый потенциал на антенну

на спутнике Viking были обнаружены области с пониженной плотностью холодной плазмы. Размеры этих областей поперек магнитного поля составляют от нескольких километров, до нескольких десятков километров. Вне этих областей плотность холодной, фоновой плазмы составляет  $n_e^{out} > 5 \text{ см}^{-3}$ , а внутри –  $n_e^{in} \sim 1 \text{ см}^{-3}$ . Как было показано в работе [5], роль границ волновода также могут выполнять границы потоков энергичных частиц (несколько кэВ), инжектируемых из хвоста магнитосферы в авроральную область.

Размеры волновода вдоль магнитного поля можно оценить по разнице между нижней частотой всплесков АКР и локальной циклотронной частотой электронов, которая в нашем эксперименте равнялась 8–20 кГц. Трассирование положения спутника вдоль силовых линий магнитного поля на высоту генерации АКР проводилось с использованием пакета программ КАДР–2 [9]. Результаты расчетов показали, что продольный размер волновода составляет 1000–3000 км. Эти значения, в целом, соответствуют модельным размерам, принятым в теоретических оценках [4, 5].

Амплитудная модуляция волноводных мод, полученная в эксперименте, может быть связана с интерференцией в волноводе, стенки которого “гофрированы” гидромагнитными колебаниями, наблюдаемыми в этой области.

5. Таким образом, по измерениям АКР в эксперименте ПОЛЬРАД на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 найдены волноводные моды в источнике излучения. Это

указывает на то, что распределение плотности в источнике АКР неоднородно, неоднородности вытянуты вдоль магнитного поля и формируют волновод, который определяет характеристики диаграммы направленности излучения. Размеры волновода вдоль магнитного поля составляют несколько тысяч километров, что вполне согласуется с ранее опубликованными теоретическими моделями.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 10-02-93115-НЦНИЛ и НШ-3200.2010.2.

1. Е. А. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Н. А. Митяков и др., *Космические исследования* **6**, 946 (1968).
2. C. S. Wu and L. C. Lee, *Astrophys. J.* **230**, 621 (1979).
3. М. М. Могилевский, Т. В. Романцова, Я. Ханаш и др., *Письма в ЖЭТФ* **86**, 819 (2007).
4. P. Louarn and D. Le Queau, *Planet. Space Sci.* **44**, 211 (1996).
5. Т. М. Буринская, Ж. Л. Рош, *Физика плазмы* **33**, 28 (2007).
6. А. А. Галеев, Ю. И. Гальперин, Л. М. Зеленый, *Космические исследования* **34**, 339 (1996).
7. Я. Ханаш, З. Кравчик, М. М. Могилевский и др., *Космические исследования* **36**, 617 (1998).
8. P. Louarn and D. Le Queau, *Planet. Space Sci.* **44**, 199 (1996).
9. Ю. И. Гальперин, Ю. Н. Пономарев, В. М. Сеницин, *Препринт ИКИ ПР-544* (1980).