

Об источнике аврорального километрового излучения

М. М. Могилевский¹⁾, Т. В. Романцова, Я. Ханах⁺, Т. М. Буринская, Р. Шрайбер⁺

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

⁺ Центр космических исследований ПАН, 87-100 Торунь, Польша

Поступила в редакцию 25 октября 2007 г.

На основе сравнительного анализа результатов измерения аврорального километрового радиоизлучения (АКР) на двух, пространственно разнесенных спутниках Интербол-2 и Полар, определена диаграмма направленности излучения – излучение распространяется в конусе с раствором $\sim \pm 25^\circ$ с центральной осью, направленной вдоль магнитного поля в точке излучения. Из полученных результатов сделан вывод, подтверждающий теоретические оценки, о существенной роли границ источника в генерации АКР и формировании диаграммы направленности излучения.

PACS: 94.30.Aa, 94.30.Tz

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР), впервые зарегистрированное на спутнике ЭЛЕКТРОН [1], представляет собой наиболее мощное радиоизлучение, генерируемое в магнитосфере Земли. В работе Ву и Ли [2] был предложен механизм генерации АКР – развитие циклотронной мазерной неустойчивости в авроральной области магнитосферы с пониженной концентрацией плазмы (каверны Кальверта), где выполняется условие $\omega_p/\omega_B \ll 1$ (ω_p и ω_B – плазменная и гирочастота электронов, соответственно). В рамках этого механизма удалось объяснить целый ряд свойств АКР: зависимость интенсивности излучения от геомагнитной активности, поляризацию, частотный спектр и др. Согласно предложенному механизму, максимум потока излучения должен быть направлен от Земли под углом $80\text{--}60^\circ$ по отношению к магнитному полю.

В работах [3, 4] была рассмотрена задача о генерации АКР в ограниченной области и влиянии границ каверны на формирование спектров АКР. Для источника, поперечные размеры которого больше длин возбуждаемых волн, в работе [4] было получено общее дисперсионное уравнение для волн, распространяющихся под произвольным углом к магнитному полю. Анализ численных решений дисперсионного уравнения показал, что имеется выделенное направление распространения волн с максимальным инкрементом в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, а наличие достаточно большой компоненты волнового вектора, направленной вдоль магнитного поля, обуславливает длительность пребывания волн в области источника и, соответственно, приводит к существен-

ному увеличению коэффициента усиления волн. Таким образом, АКР распространяется из источника в конусе, образующая которого расположена под достаточно большим углом к плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Угол раствора конуса излучения в некоторой степени определяется размерами источника.

Для экспериментальной проверки влияния границ области генерации нами использованы результаты измерений АКР на двух спутниках – эксперимент ПОЛЬРАД на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 [5] и ПВИ на спутнике ПОЛАР [6]. Из анализа спектров определялось местоположение силовой линии источника и границы диаграммы направленности излучения. Для анализа был выбран интервал одновременных измерений на двух спутниках, когда спутник ИНТЕРБОЛ-2 находился экваториальнее протяженной арки полярных сияний на высотах $\sim 15000\text{--}18900$ км от поверхности Земли, а спутник ПОЛАР – полярнее арки на высотах $\sim 45000\text{--}47000$ км. При этом оба спутника двигались таким образом, что находились длительное время приблизительно на одном геомагнитном меридиане, что позволяет свести задачу к плоской и облегчает обработку результатов измерений.

На рис.1 приведены динамические спектрограммы АКР, зарегистрированных на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и ПОЛАР. В интервале 14:45 – 15:20 UT наблюдалось стационарное АКР в диапазоне частот $f = 170\text{--}600$ кГц. На фоне стационарного излучения, в отдельные моменты (14:54–14:58 UT, 15:10–15:20 UT) видны короткие и интенсивные всплески АКР, нижняя частота которого достигает 30–40 кГц. Источники этих всплесков расположены гораздо выше и по своим свойствам заметно отлича-

¹⁾e-mail: mogilevsky@romance.iki.rssi.ru

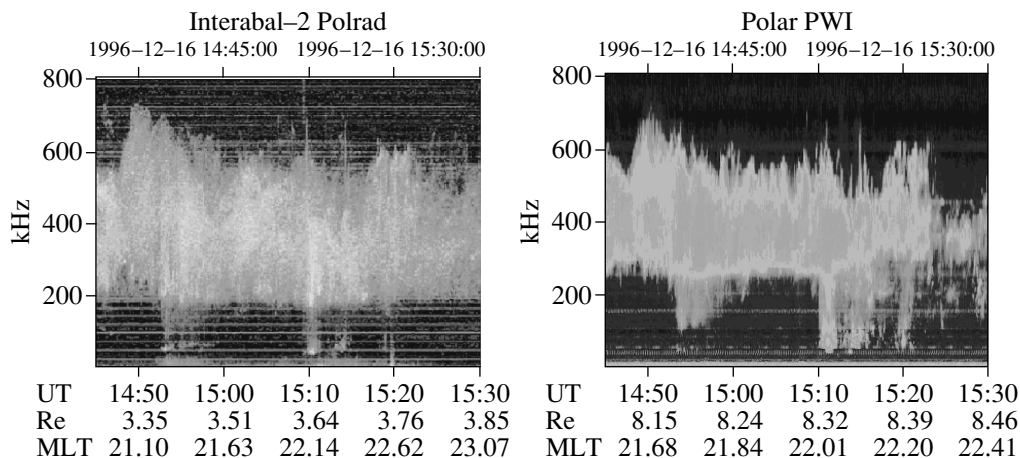


Рис.1. Динамические спектрограммы АКР, зарегистрированного на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 (верхняя спектрограмма) и на спутнике ПОЛАР (нижняя). По вертикальной оси отложена частота в килогерцах, по горизонтальной – время и соответствующие орбитальные параметры спутников. Мощность излучения кодирована интенсивностью белого цвета (отсутствие сигнала – черный цвет). Горизонтальные линии на спектрограммах – бортовые помехи

ются от стационарного АКР. В данной работе такие всплески не анализируются.

Поскольку АКР генерируется вблизи локальной гирочастоты электронов, то наблюдаемый частотный диапазон соответствует высотам генерации излучения 2500–7000 км, которые ниже высот спутников (см. рис.1). Изменения интенсивности излучений и его спектров подобны на двух спутниках, что указывает на один и тот же источник АКР. Однако наблюдается и устойчивое отличие – нижняя частотная граница АКР на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 составляет 170 кГц, а на спутнике ПОЛАР – 260 кГц. Это отличие хорошо заметно на единичных спектрах, приведенных на рис.2, и связано с тем, что на частотах ниже 260 кГц источник АКР расположен таким образом, что спутник ПОЛАР находится вне диаграммы излучения и не может зарегистрировать это излучение (см. рис.3).

Используя отличие в спектрах АКР, зарегистрированных на двух спутниках, были проведены расчеты диаграммы направленности источника АКР. Для интегрирования уравнений движения спутников использовалась программа БАЗИС [7], местоположение спутников в геомагнитных координатах определялось при помощи программы КАДР-2 [8], а параметры магнитного поля определялись при помощи модели IGRF-90 с учетом 8 гармоник. При вычислении диаграммы направленности излучения использовались следующие предположения: 1) диаграмма симметрична относительно магнитного поля в точке излучения (в полярном и экваториальном направлениях), 2) раствор диаграммы на частотах 170 и 260 кГц одинаков. Из условий, что частоты 170 и 260 кГц яв-

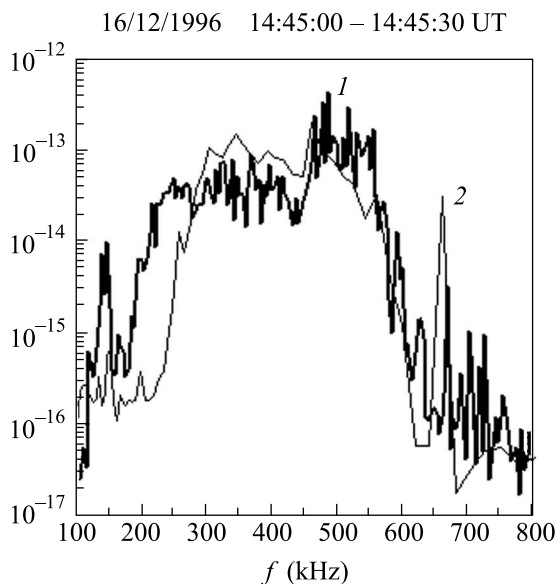


Рис.2. Усредненные спектры АКР излучения. 1 (толстая кривая) – спектр АКР, зарегистрированный на спутнике ИНТЕРБОЛ-2, 2 (тонкая кривая) – на спутнике ПОЛАР

ляются нижними границами спектров АКР, принятых на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и ПОЛАР, соответственно, вычислялась широта положения источника и максимальный раствор диаграммы направленности излучения. Результаты расчетов приведены на рис.4 в виде нормированной мощности излучения. Для повышения достоверности приведены результаты расчетов для нескольких спектров, измеренных в интервале времен 14:45–15:20 для стационарного АКР. Белыми кружками отмечены те углы, под которыми

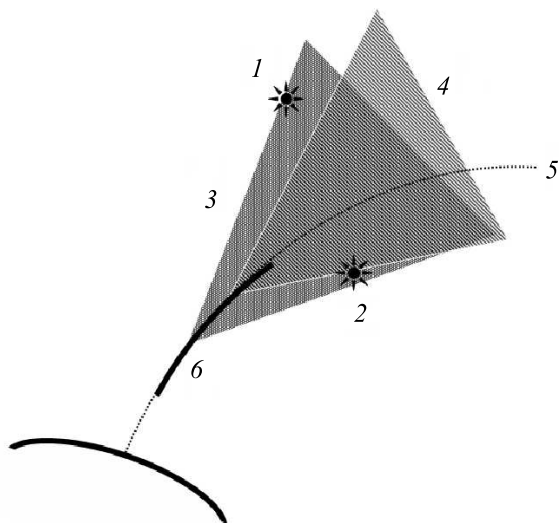


Рис.3. Схема взаимного расположения спутников и источника АКР: 1 – положение спутника ПОЛАР, 2 – положение спутника ИНТЕРБОЛ-2, 3 – конус излучения АКР на частоте выше 260 кГц, 4 – конус излучения на частоте ниже 260 кГц, 5 – силовая линия магнитного поля, 6 – источник АКР

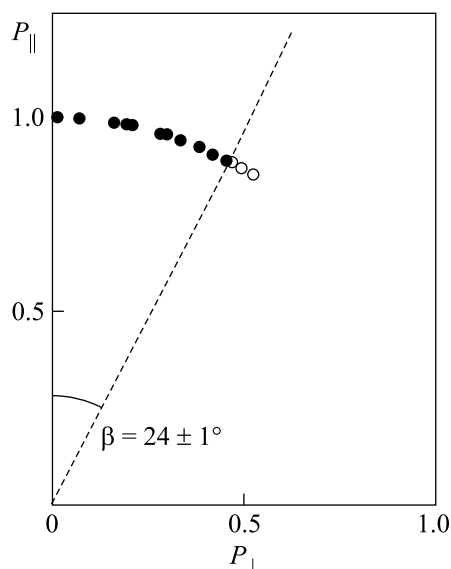


Рис.4. Результаты расчетов направления излучения АКР. По вертикальной оси отложена продольная (по отношению к магнитному полю в источнике) составляющая нормированного потока мощности АКР, по горизонтальной – перпендикулярная составляющая. Темными кружками отмечены углы излучения АКР, зарегистрированные на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и ПОЛАР, а светлыми – отсутствие сигнала на спутнике ПОЛАР

излучение (на частотах ниже 260 кГц) на спутнике ПОЛАР не наблюдалось, хотя по данным спутника ИНТЕРБОЛ, находившегося под другим углом по от-

ношению к источнику излучения, сигналы на этих частотах в спектре АКР присутствовали. Таким образом, граница между светлыми и темными кружками является предельным углом диаграммы направленности излучения АКР.

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что для исследованного нами источника АКР-стационарного и протяженного по долготе: 1) диаграмма излучения АКР направлена вдоль магнитного поля в источнике и 2) для стационарного источника АКР полный раствор диаграммы излучения составляет приблизительно $\sim \pm 25$. Это значение, в целом, согласуется с результатами определения углов излучения АКР, полученных в работах [9–11], где были использованы другие методы. Отличие использованного нами подхода от ранее применявшихся методов заключается в том, что он позволяет не только определить границу диаграммы направленности излучения, но и определить местонахождение источника излучения АКР. Исходя из этого, можно сделать вывод, что границы области генерации играют определяющую роль в формировании потока АКР.

Авторы благодарны проф. Гарнету и его сотрудникам за предоставленные данные прибора ПВИ на спутнике ПОЛАР. Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-17566, # 06-02-72560-НЦНИЛа и # НШ-5359.2006.2.

1. Е. А. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Н. А. Митяков и др., *Космические исследования* **6**, 946 (1968).
2. C. S. Wu and Lee, *Astrophys. J.* **230**, 621 (1979).
3. P. Louarn and D. Le Queau, *Planet. Space Sci.* **44**, 211 (1996).
4. Т. М. Буринская, Ж. Л. Рош, *Физика плазмы* **33**, 28 (2007).
5. Я. Ханаш, З. Кравчик, М. М. Могилевский и др., *Космические исследования* **36**, 617 (1998).
6. D. A. Gurnett, A. M. Persoon, R. F. Randall et al., *Space Sci. Rev.* **71**, 597 (1995).
7. С. Марин, Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 1994.
8. Ю. И. Гальперин, Ю. Н. Пономарев, В. М. Синицин, Препринт ИКИ ПР-544 (1980).
9. P. Louarn and D. Le Queau, *Planet. Space Sci.* **44**, 199 (1996).
10. A. Bahson, M. Jespersen, E. Ungstrup et al., *J. Geophys. Letters* **14**, 471 (1987).
11. R. Schriber, *J. Geophys. Res.* **110**, No. A11222, doi:10.1029/2004JA010903 (2005).