

**ПЕРЕНОС АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
ПОСРЕДСТВОМ КАНАЛОВ С ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ
НА ГРАНИЦЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ**

**TRANSFER OF AURORAL KILOMETRIC RADIATION
THROUGH LOW-DENSITY CHANNELS AT THE BOUNDARY OF PLASMASPHERE**

В.И. Колпак

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Троицк, Москва, Россия, lera.kolpak@yandex.ru
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»,
Москва, Россия*

М.М. Могилевский

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, mogilevsky2012@gmail.com*

Д.В. Чугунин

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, dimokch@mail.ru*

А.А. Чернышов

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, achernyshov@iki.rssi.ru*

И.Л. Моисеенко

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, moiseenko.irine@gmail.com*

V.I. Kolpak

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Troitsk, Moscow, Russia, lera.kolpak@yandex.ru
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia*

M.M. Mogilevsky

*Space Research Institute of RAS,
Moscow, Russia, mogilevsky2012@gmail.com*

D.V. Chuginin

*Space Research Institute of RAS,
Moscow, Russia, dimokch@mail.ru*

A.A. Chernyshov

*Space Research Institute of RAS,
Moscow, Russia, achernyshov@iki.rssi.ru*

I.L. Moiseenko

*Space Research Institute of RAS,
Moscow, Russia, moiseenko.irine@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты регистрации аврорального километрового радиоизлучения (АКР) вблизи плазмопаузы на спутнике ERG (Arase). Апогей орбиты спутника находится вблизи плоскости эклиптики на широтах $\pm 30^\circ$. Согласно общепринятой точке зрения, в этих областях наблюдение АКР невозможно, поскольку оно экранируется плазмосферой. Одновременные регистрация АКР и измерение локальной плотности плазмы на спутнике ERG (Arase) позволили определить, что АКР в приэкваториальных областях наблюдается в плазменных каналах — неоднородностях плотности плазмы, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля. Излучение от источников, расположенных в авроральной магнитосфере, переносится этими каналами в приэкваториальную область. В работе анализируются условия захвата АКР в каналы с пониженной плотностью плазмы и распространения в них. В приближении геометрической оптики проведено моделирование условий захвата и распространения излучения. Результаты вычислений показывают, что предложенная схема захвата АКР в плазменные каналы может объяснить результаты измерений, свидетельствующие о переносе излучения из авроральной области магнитосферы в приэкваториальную.

Ключевые слова: авроральное километровое радиоизлучение, захват излучения в канал, плазменные неоднородности, искусственный спутник земли, космический эксперимент, частота верхнего гибридного резонанса.

Abstract. We present the results of Auroral Kilometric Radiation (AKR) measurements near the plasmapause on the ERG (Arase) satellite. The apogee of the satellite's orbit is located near the ecliptic plane, at latitudes $\pm 30^\circ$. According to the generally accepted point of view, AKR observation is impossible in this region since it is shielded by the plasmasphere. Simultaneous measurements of AKR and local plasma density made it possible to determine that AKR in near-equatorial regions occur in plasma channels — density inhomogeneities elongated along magnetic field lines. AKR from sources located in the auroral magnetosphere is transferred by these channels to the equatorial region. This work analyzes the conditions for the capture and propagation of AKR in low plasma density channels. In the geometrical optics approximation, we have simulated the conditions for the radiation capture and propagation. The calculation results show that the proposed scheme for AKR capture into plasma channels can explain the measurement results — the radiation transfer from the auroral region to the near-equatorial region.

Keywords: auroral kilometric radiation, radiation capture into the channel, plasma inhomogeneities, artificial Earth satellite, space experiment, upper hybrid resonance frequency.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается распространение аврорального километрового радиоизлучения (АКР) в неоднородной плазме на внешней границе плазмосферы. АКР, впервые зарегистрированное на спутнике «Электрон-2» [Бенедиктов и др., 1965], представляет собой наиболее мощное естественное излучение магнитосферы Земли. Последующие измерения, проводившиеся на различных космических аппаратах, позволили определить основные свойства и характеристики АКР, а также условия его генерации [Wu, Lee, 1979; Gurnett, 1974; Hanasz et al., 2003; Kurth et al., 1975; Xiao et al., 2022; Zhao et al., 2019; Могилевский и др., 2007; Чернышов и др., 2022а; Чугунин и др., 2020; Baumjohann, Treumann, 2022]. АКР является результатом развития циклотронной мазерной неустойчивости в авроральных областях магнитосферы в кавернах с пониженной плотностью плазмы [Wu, Lee, 1979], где выполняется условие

$$f_{pe} < f_{Be}, \quad (1)$$

где f_{pe} и f_{Be} — плазменная частота и гирочастота электронов соответственно.

Согласно теоретической модели генерации АКР [Wu, Lee, 1979], основная часть излучения является правополяризованной необыкновенной модой, которая генерируется вблизи локальной гирочастоты электронов. В источнике, в плазме без границ, основная часть потока энергии излучения направлена поперек магнитного поля, но стенки каверны образуют волновод, который формирует распределение АКР вдоль магнитного поля [Louarn, Le Quéau, 1996; Буринская, Рош, 2007]. Стенками направляющего волновода могут быть также границы потока сверхтепловых электронов, являющихся источником энергии излучения [Буринская, Рош, 2007].

По результатам измерений на спутнике ISEE-1 впервые было обнаружено, что АКР может распространяться по плазменным каналам [Calvert, 1982] вне области генерации излучения. В работе [Могилевский и др., 2022] по данным, полученным с помощью спутника ERG (Arase), показано, что неоднородности плазмы, вытянутые вдоль магнитного поля, могут способствовать захвату АКР в плазменный канал, что приводит к трансформации спектра излучения при распространении в этом канале. Однако до сих пор не ясно, при каких физических условиях в околоземном пространстве происходят захват АКР в плазменные каналы и распространение в них.

Согласно общепринятой точке зрения [Wu, Lee, 1979], источники АКР находятся на высотах 3–10 тыс. км в авроральной области, а конус излучения, центрированный на направление магнитного поля в области излучения, имеет размер $\pm(25^\circ\text{--}35^\circ)$ [Могилевский и др., 2007]. Необыкновенная правополяризованная электромагнитная волна распространяется от Земли и отражается от плазмопаузы. Из этого следует, что АКР от источников в Север-

ном полушарии не может быть зарегистрировано в Южном полушарии, и наоборот. Однако в ряде случаев АКР от источников, расположенных в одном полушарии, наблюдается в другом полушарии [Чернышов и др., 2022б; Колпак и др., 2021]. Для объяснения этого явления была разработана теория (см., например, [Wu, 1985]), согласно которой в источнике АКР генерируется не только RX-мода, но и Z-мода, интенсивность которой много меньше, и поэтому она практически не видна вблизи источника. Однако Z-мода проходит через плазмосферу в противоположное полушарие, где может быть зарегистрирована.

Мы используем данные по АКР, полученные японским спутником ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) в приэкваториальной области магнитосферы Земли на L -оболочках $\sim 4\text{--}6$. Орбита спутника имеет апогей 32000 км и перигей 400 км, наклонение орбиты составляет 31° , период обращения спутника 570 мин [Miyoshi et al., 2018a, b]. Измерения параметров плазмы и электромагнитных полей проводятся с помощью комплекса научной аппаратуры, включающего приемники в различных диапазонах частот, а также детекторы частиц и параметров плазмы в широком диапазоне энергий [Nagai et al., 2018]. В настоящей работе использованы измерения составляющих электрического поля с помощью HFA (High-Frequency Analyzer), входящего в PWE [Kumamoto et al., 2018; Kasahara et al., 2018]. HFA предназначен для измерения электрического поля и плазменных волн в диапазоне частот от 2 кГц до 10 МГц.

В представленном исследовании мы обсуждаем возможность переноса АКР между полушариями в результате захвата излучения в каналы, образованные вблизи плазмопаузы неоднородностями плазмы, вытянутыми вдоль магнитного поля. Мы анализируем условия захвата излучения в плазменные каналы и его распространения в этих каналах из одного полушария в другое с использованием результатов измерений на спутнике ERG (Arase) и моделирования в приближении геометрической оптики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа были выбраны два интервала измерений в марте 2019 г. и декабре 2018 г.

На верхней панели рис. 1 представлена динамическая спектрограмма, построенная по измерениям мощности электрической компоненты электромагнитного поля, перпендикулярной оси вращения спутника. Ось вращения направлена в сторону Солнца. На нижней панели представлена спектрограмма параметра P ($P \in [-1 \dots +1]$), который условно можно назвать поляризацией. Описание этого параметра приведено в работах [Kumamoto et al., 2018; Могилевский и др., 2022]. Спутник ERG (Arase) вращается вокруг направления на Солнце с периодом обращения 8 с. Параметр P — проекция поляризации волны на плоскость, перпендикулярную оси вращения спутника. При наблюдении излучения от источ-

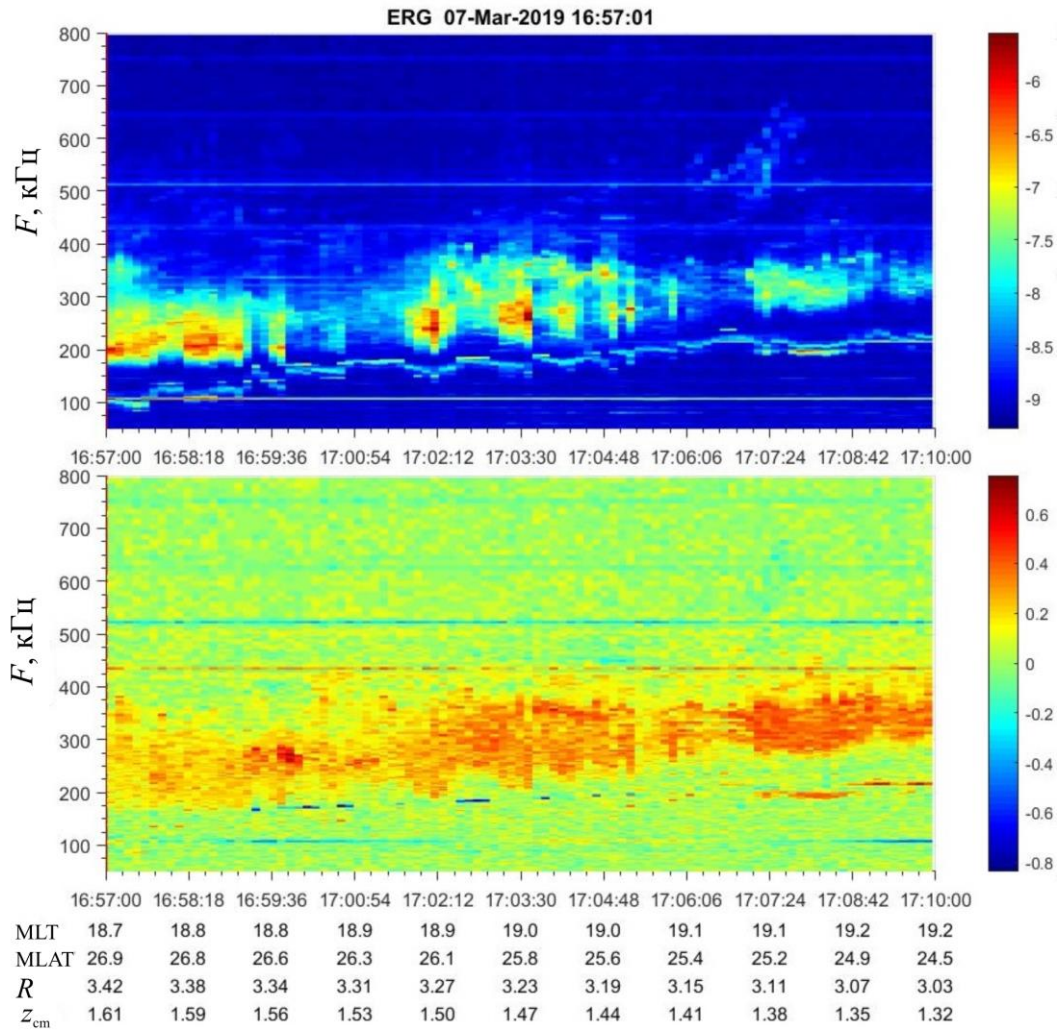


Рис. 1. АКР на участке с каналами с пониженной плотностью плазмы с 16:57 до 17:10 UT 7 марта 2019 г. (результаты обработки данных HF/A/PWE): верхняя панель — динамическая спектрограмма мощности электрической компоненты электромагнитного поля в частотном диапазоне 50–800 кГц; нижняя панель — спектрограмма параметра поляризации P

ников в авроральной области со стороны ночной магнитосферы этот параметр соответствует классическому определению поляризации, т. е. направлению вращения электрического вектора в поле электромагнитной волны. В случае наблюдения источников со стороны дневной магнитосферы этот параметр приобретает противоположный знак. В утренней и вечерней областях магнитосферы параметр P обращается в нуль (что соответствует линейной поляризации или ее отсутствию) даже для волн с круговой поляризацией из-за совпадения плоскости поляризации и плоскости, перпендикулярной направлению на Солнце.

Под рисунком приведены орбитальные параметры спутника вдоль орбиты: UT — всемирное время; MLT — магнитное местное время; MLAT — геомагнитная широта; R — расстояние до спутника в радиусах Земли; z_{sm} — координата z в системе координат SM (Solar-Magnetic).

В низкочастотной части спектрограммы наблюдается узкополосный сигнал, который изменяется в диапазоне 100–200 кГц. Это колебания компоненты электрического поля на частоте верхнего гибридного резонанса

$$f_{вгр} = (f_{pe}^2 + f_{Be}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

где f_{pe} — локальная электронная плазменная частота: $f_{pe} = (4\pi e^2 N / m_e)^{1/2}$ (в системе СГС); e — заряд электрона; N — плотность плазмы; m_e — масса электрона; f_{Be} — локальная гирочастота электронов: $f_{Be} = eB / m_e c$; B — магнитная индукция; c — скорость света.

Гирочастота электронов f_{Be} в этой области изменяется от нескольких килогерц до 10 кГц, и поэтому с хорошей точностью можно считать, что частота верхнего гибридного резонанса $f_{вгр}$ в основном зависит от плотности плазмы. Спектрограмма на верхней панели рис. 1 демонстрирует, что в областях пониженной плотности плазмы (с уменьшением $f_{вгр}$) наблюдается АКР, интенсивность которого уменьшается вне данных областей (например, в 17:02 UT). Зависимость интенсивности излучения от глубины провала плотности хорошо видна на низких частотах ($f < 200$ –250 кГц). На более высоких частотах происходит просачивание излучения за границы канала. Измерения проводились в вечернее местное

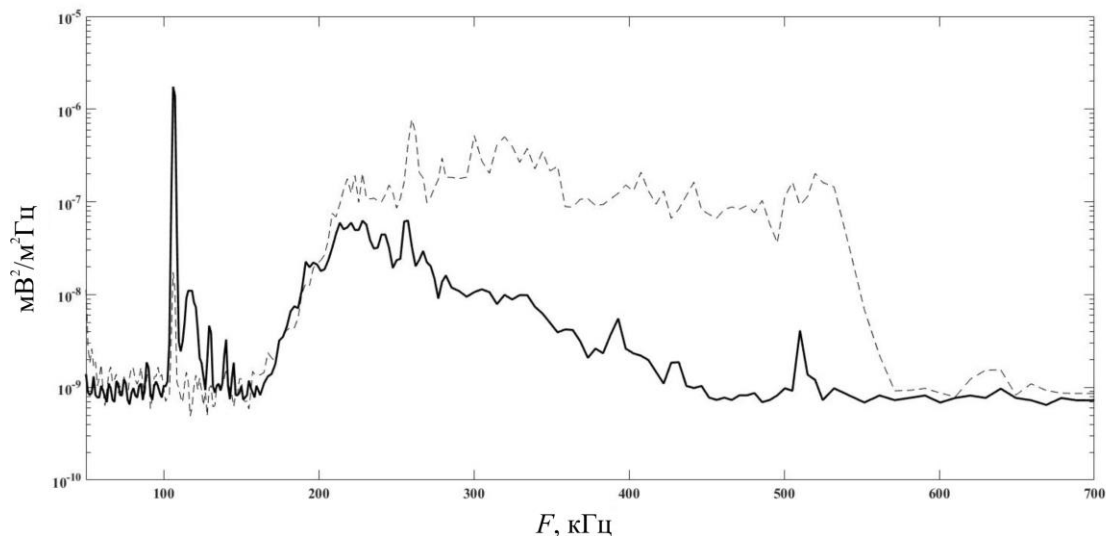


Рис. 2. «Треугольный» (сплошная линия) и «плоский» (штриховая линия) спектры АКР, зарегистрированного в 16:56:05 UT 07.03.2019 и в 19:44:51 UT 14.11.2018 соответственно

время. На этом участке орбиты спутник, приближаясь к Земле, двигался из вечернего сектора на ночную сторону магнитосферы — MLT изменяется от 18.7 до 19.2 ч. В этой области магнитосферы параметр P не точен, поскольку плоскость, в которой происходит вращение антенн спутника, почти перпендикулярна плоскости поляризации АКР. Тем не менее на нижней панели рис. 1 видно увеличение спектральной интенсивности параметра P , что свидетельствует о достаточной надежности результатов обработки. Отсюда можно заключить, что источник регистрируемого АКР находился в Южном полушарии [Колпак и др., 2021], в то время как сам спутник находился в Северном полушарии ($z > 0$).

В начале анализируемого интервала плотность плазмы была $\sim 100 \text{ см}^{-3}$, а к концу интервала она поднялась до $\sim 400 \text{ см}^{-3}$. Такие изменения плотности указывают на то, что измерения проводились на внешней стороне плазмосферы при приближении спутника к Земле. В рассматриваемом интервале

$$f_{\text{вгр}2} / f_{\text{вгр}1} = 0.6 - 0.8,$$

где $f_{\text{вгр}2,1}$ — частоты верхнего гибридного резонанса внутри и снаружи канала. Это соответствует

$$(N_1 - N_2) / N_1 = 0.36 - 0.64,$$

где N_1 — плотность фоновой плазмы; N_2 — плотность плазмы внутри канала. Таким образом, при относительной глубине канала 0.36–0.64 происходит захват излучения, по крайней мере, на частотах ниже 250 кГц.

Как видно на рис. 2, спектр АКР внутри канала с пониженной плотностью плазмы (сплошная линия) характеризуется быстрым нарастанием интенсивности на низких частотах и относительно медленным спаданием на высоких частотах, в отличие от спектра АКР в однородной плазме (штриховая линия).

При увеличении частоты от ~ 170 до ~ 225 кГц (на 55 кГц) интенсивность спектральных составля-

ющих увеличивается на два порядка, а при дальнейшем увеличении частоты от ~ 225 до ~ 450 кГц (на 225 кГц) спектральные составляющие уменьшаются на два порядка. Такая форма спектра характерна для АКР, распространяющегося в плазменных каналах [Могилевский и др., 2022]. Резкий всплеск интенсивности излучения в районе 100 кГц соответствует колебаниям на частоте верхнего гибридного резонанса.

Другой пример АКР, захваченного в плазменные каналы, приведен на рис. 3. Измерения проводились 19.12.2018 с 09:15:00 до 11:00:00 UT. Спутник находился в вечернем секторе Южного полушария ($z < 0$) и двигался в сторону ночной магнитосферы (MLT = 17.3–18.2), удаляясь от Земли.

На верхней панели рис. 3 приведена динамическая спектрограмма мощности электрической компоненты электромагнитного поля в диапазоне частот 50–800 кГц. Узкополосный сигнал в диапазоне частот 75–175 кГц — колебания электрического поля на частоте верхнего гибридного резонанса. Как и на рис. 2, измерения частоты верхнего гибридного резонанса являются результатом измерений плотности плазмы, поэтому в первом приближении можно считать, что $f_{\text{вгр}} \sim f_{\text{ре}}$. Отсюда следует, что плотность плазмы на рассматриваемом временном интервале изменяется в пределах 100–400 см^{-3} . По-видимому, плазмосфера спутник пересек вне представленного временного интервала, но вблизи него, примерно в 9 UT. Таким образом, измерения проводились на внешней границе плазмосферы, на что указывает также постепенное понижение плотности плазмы с расстоянием. В начале временного интервала, в 09:15–09:50 UT, глубина модуляции плотности больше: $M = \Delta N / N \sim 0.67$, а к концу интервала уменьшается до $M \sim 0.15 - 0.25$. Изменяются и поперечные размеры провалов плотности: в начале интервала характерный размер одной лакуны составляет несколько сотен километров, а к концу интервала уменьшается

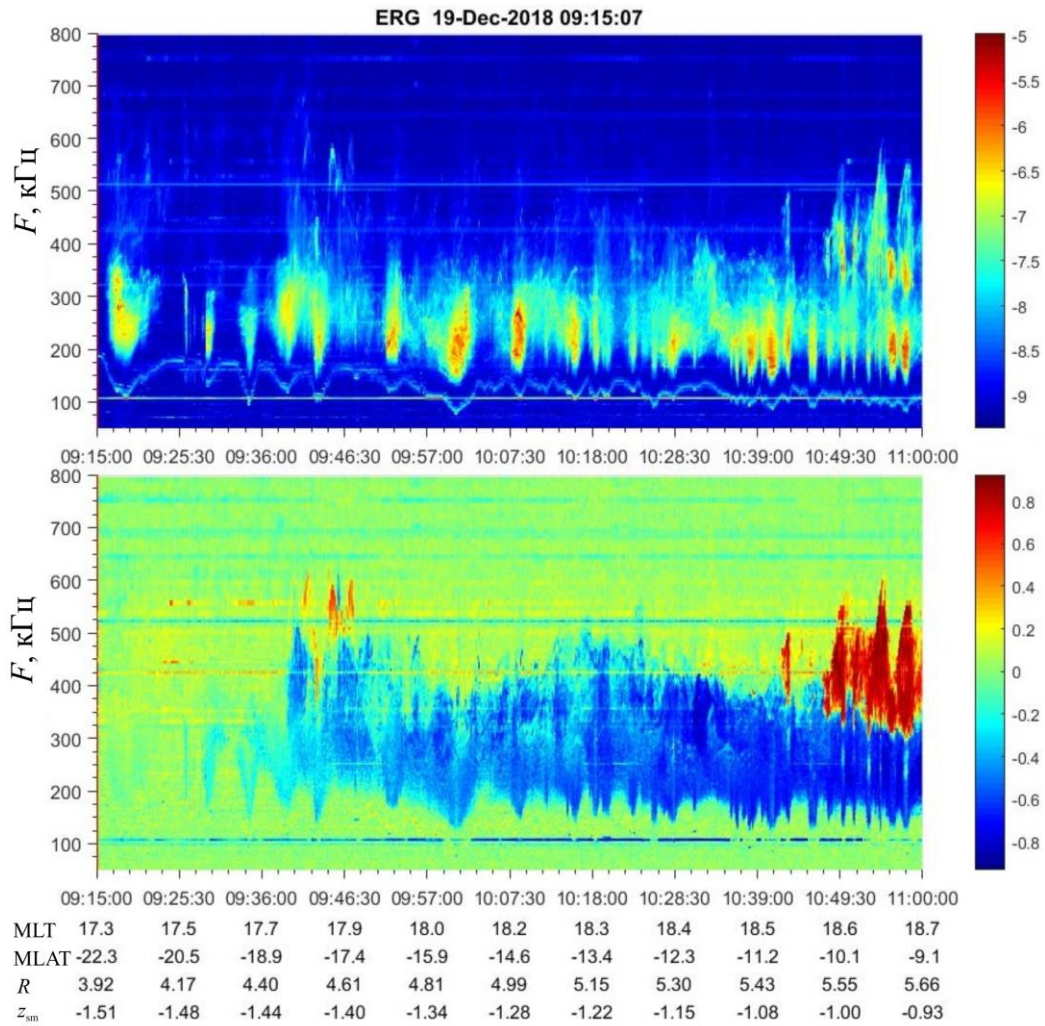


Рис. 3. АКР на участке с каналами с пониженной плотностью плазмы 19.12.2018 (представление результатов аналогично рис. 1)

до нескольких десятков километров. С использованием измерений $f_{вгр}$ была вычислена плотность плазмы внутри канала и снаружи. В 10:24:51 UT, когда спутник находился внутри канала, плотность плазмы $N_2 \approx 157 \text{ см}^{-3}$. За пределами канала $N_1 \approx 164 \text{ см}^{-3}$ за левой стенкой и $N_1 \approx 161 \text{ см}^{-3}$ за правой стенкой.

На нижней панели рис. 3 приведена спектрограмма параметра P . Поскольку сначала измерения проводились вблизи местного вечернего времени, т. е. измеряемая компонента поля была почти перпендикулярна плоскости поляризации излучения, то параметр P равен нулю. По мере смещения спутника в сторону ночного сектора магнитосферы параметр P меняется и в 10:20 UT приобретает устойчиво отрицательное значение, что указывает на расположение источника АКР в Северном полушарии. Интересно отметить, что ~10:50 UT появляется излучение от другого источника АКР. Это отчетливо видно и на динамической спектрограмме, и на спектрограмме параметра P : второй источник более высокочастотный (~300–500 кГц) и имеет положительное значение параметра P , что указывает на расположение в Южном полушарии.

Спектр излучения от двух источников (19.12.2018 в 10:53:31 UT) представляет собой суперпозицию

двух треугольных спектров (рис. 4). На верхней панели рис. 4 представлена зависимость интенсивности излучения от частоты. Острый пик слева соответствует частоте верхнего гибридного резонанса. АКР, захваченное в канал, в данном случае имеет спектр с двумя горбами. На нижней панели представлен график параметра P данного излучения. В диапазоне частот 170–320 кГц параметр P отрицательный, а на частотах 320–510 кГц — положительный. Отсюда следует, что в одном канале наблюдается излучение от двух источников, которые находятся в разных полушариях.

По результатам обработки измерений электромагнитного поля на спутнике ERG (Agase) можно заключить, что наблюдается АКР, захваченное в плазменные каналы, или лакуны, — области пониженной плотности плазмы. Из знака параметра P следует, что АКР в приэкваториальной области может генерироваться источниками, расположенными как в Северном, так и в Южном полушарии. Логично предположить, что наблюдаемые неоднородности плазмы вытянуты вдоль магнитного поля на внешней стороне плазмопаузы и образуют каналы. Размеры этих каналов поперек магнитного поля много больше длины волны АКР, что позволяет смоделировать

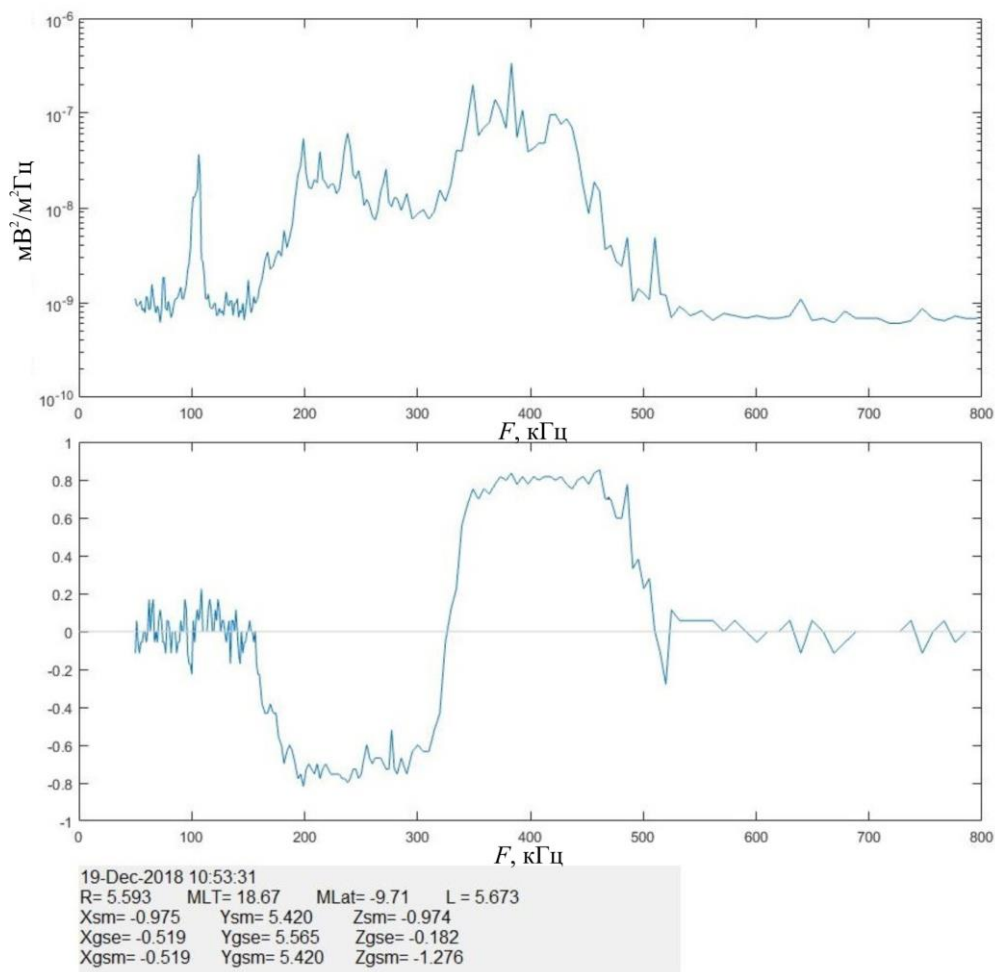


Рис. 4. Спектр АКР от двух источников, расположенных в разных полушариях: верхняя панель — зависимость интенсивности излучения от частоты; нижняя панель — параметр P

захват излучения в канал и распространение в нем в приближении геометрической оптики.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА И РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКР

Для оценки условий захвата излучения в канал и распространения в нем были проведены вычисления. Использовались следующие упрощения:

- считалось, что стенки каналов резкие, т. е. плотность изменяется скачком от N_1 к N_2 ;
- считалось, что стенки канала параллельны, т. е. канал не расширяется вдоль магнитного поля и имеет одинаковые размеры по всей длине;
- рассматривалась двумерная задача без учета эффектов, вызванных различными сечениями канала;
- пренебрегалось тем, что канал должен загибаться так же, как силовые линии магнитного поля Земли, поскольку он отслеживает силовые линии магнитного поля;
- предполагалось, что канал непрерывен и неподвижен.

Несмотря на сделанные упрощения, результаты расчетов, как будет показано ниже, дают качественно правильную картину распространения АКР в канале.

На рис. 5 справа приведена схема захвата в канал и распространения в нем излучения от источника на авроральной силовой линии. Излучение попадает в плазменный канал вблизи плазмопаузы, расположенный экваториальнее источника. Вертикальные линии — стенки канала, стрелка — излучение, попавшее в канал, горизонтальная штриховая линия — длина одного скачка при распространении, наклонные штриховые линии — излучение, просачивающееся сквозь стенки канала.

Во всех экспериментах с захватом излучения плотность плазмы в каналах была ниже фоновых значений. Поэтому при моделировании мы полагаем, что плотность плазмы внутри канала ниже, чем за его пределами ($N_2 < N_1$ на рис. 5). Угол падения излучения на стенку канала (и отражения) обозначен θ_1 , угол преломления излучения обозначен θ_2 .

Для расчета распространения излучения в канале было использовано приближение геометрической оптики. При однократном отражении от стенки канала воспользуемся общеизвестными выражениями

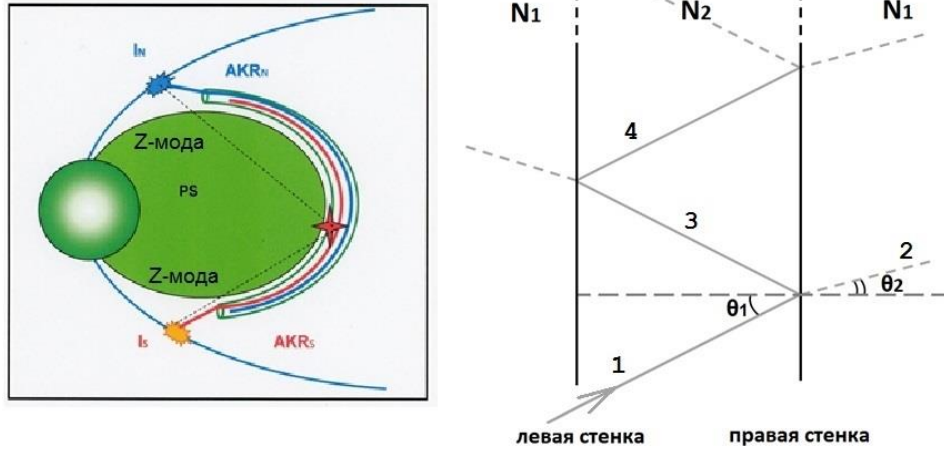


Рис. 5. Механизм переноса излучения из одного полушария в другое при помощи плазменных неоднородностей (слева), а также схема распространения излучения в канале (справа)

Таблица 1

Критические углы падения излучения на стенки канала

Плотность $N_2, \text{см}^{-3}$	$(N_1 - N_2) / N_1$	Критические углы для частоты	
		167.2 кГц	500.2 кГц
80	0.5	56.5°	80.5°
120	0.75	64.9°	83.3°
157	0.98	82.7°	88.1°

для коэффициента отражения K и коэффициента пропускания T [Ландсберг, 2003]:

$$K = \left(\frac{n_2 \cos \theta_2 - n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2 + n_1 \cos \theta_1} \right)^2, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления вне и внутри канала соответственно; θ_1 и θ_2 — углы падения и преломления; $n_{1,2}^2 = 1 - \frac{\omega_{\text{pe},1,2}^2}{(\omega - \omega_{\text{He}} \cos \theta_{1,2}) \omega}$ — показатель

преломления для необыкновенной электромагнитной волны в плазме;

$$T = 1 - K. \quad (4)$$

Цифры на рис. 5 обозначают: 1 — I_0 , излучение, попадающее в канал; 2 — $I_0 T$, где T — коэффициент пропускания; 3 — $I_0 K$, где K — коэффициент отражения; 4 — $I_0 K^2$.

На рис. 6 представлены результаты расчетов зависимости коэффициентов отражения от угла падения для минимальной (167.2 кГц, верхняя панель) и максимальной (500 кГц, нижняя панель) частот в спектре (см. рис. 3). Расчеты проводились для значений плотности плазмы N_2 внутри канала 157, 120 и 80 см^{-3} , которые соответствуют значениям, полученным в эксперименте. Фоновая плотность плазмы снаружи канала $N_1 = 160 \text{ см}^{-3}$, что также соответствует результатам измерений.

Результаты расчетов показывают, что коэффициент отражения K имеет сильную зависимость от угла падения. При достижении критического значения угла падения (см. ниже) K становится равным единице и не изменяется при дальнейшем увеличении угла падения. Это означает, что при углах больше

критического излучение может распространяться в канале без потерь, обусловленных просачиванием сквозь стенки канала.

Ограничения для угла падения, следующие из рис. 6, приведены в табл. 1. При углах меньше критических (приведенных в таблице) излучение не распространяется в канале.

При многократном отражении сигнала от стенок канала $K_m = K_1^m$, где m — количество отражений сигнала от стенок канала. Для оценки количества отражений мы использовали дипольное приближение силовой линии [Редерер, 1972]

$$dS = r_0 \cos \varphi \sqrt{4 - 3 \cos^2 \varphi} d\varphi, \quad (5)$$

где $\frac{r_0}{R_E} = L$; r_0 — расстояние до экваториальной точки силовой линии (максимальное удаление от Земли); R_E — радиус Земли; φ — магнитная широта трубки (начала канала с пониженной плотностью плазмы); φ_0 — магнитная широта спутника:

$$\varphi_0 = \arccos \sqrt{\frac{1}{L}}, \quad L = \frac{1}{\cos^2 \varphi_0}. \quad (6)$$

В этом приближении длина отрезка силовой линии

$$S = \frac{3L \sin \varphi_0 \sqrt{3 \sin \varphi_0 + 1} + \sqrt{3L} \ln \left| \sqrt{3 \sin \varphi_0 + 1} + \sqrt{3 \sin^2 \varphi_0} \right|}{6} + \frac{3L \sin \varphi \sqrt{3 \sin \varphi + 1} + \sqrt{3L} \ln \left| \sqrt{3 \sin \varphi + 1} + \sqrt{3 \sin^2 \varphi} \right|}{6}. \quad (7)$$

Из эксперимента определяем длину одного скачка ($\Delta R \text{tg} \theta_1$).

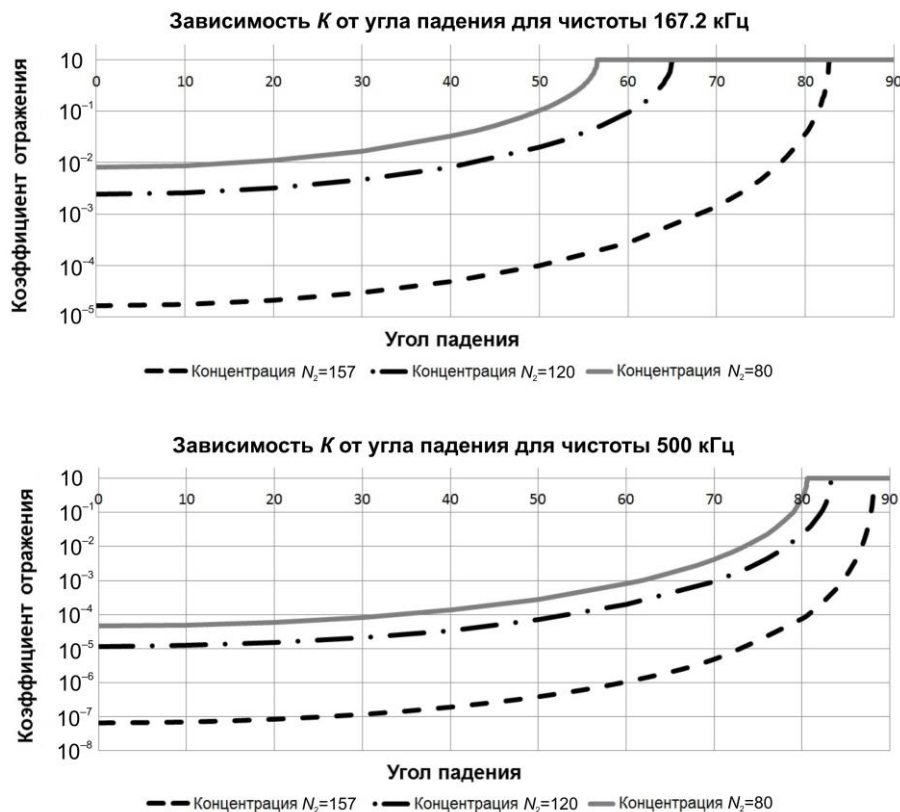


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения (в логарифмическом масштабе по вертикальной оси) от угла падения для частоты 167.2 кГц (верхняя панель) и 500 кГц (нижняя панель)

Используя оценки длины скачка и длины отрезка силовой линии, можно определить количество скачков излучения при его распространении в канале: 30–100.

При таких значениях m возрастание K_m при приближении угла падения к критическому происходит быстрее, чем показано на рис. 6. Таким образом, критические углы, приведенные в табл. 1, определяют угловую зависимость спада коэффициентов отражения: чем меньше углы, под которыми излучение попадает в канал, тем более пологим становится график K .

На рис. 7 приведены результаты расчетов значения K в зависимости от частоты для углов падения на стенку канала 85°, 80° и 75°. Расчеты проводились для частот, превышающих частоту максимума спектра, полученного в эксперименте. Все три графика показывают, что при увеличении частоты на 150–250 кГц величина K уменьшается на два порядка, что находится в хорошем соответствии с результатами измерений (см. рис. 2).

Был проведен анализ взаимного расположения источника АКР и канала, в который может захватываться излучение. Положение каналов определялось по данным спутника ERG (Arase). На основе дипольной геометрии были рассчитаны углы падения излучения на стенку канала. Расчеты проводились для трех положений источника АКР: магнитная силовая линия источника располагалась на $\varphi_I = 68^\circ$, 70° и 75° инвариантной широты. Высота источника

(расстояние от поверхности Земли до точки, из которой исходит излучение) определялась по модели дипольного поля с учетом того, что АКР генерируется вблизи локальной гирочастоты электронов

На рис. 8 приведен пример расчетов для инвариантной широты силовой линии источника АКР 68°. Используются следующие обозначения: 1 — положение источника АКР; 2 — положение нижней границы захвата излучения в канал ($\varphi = 50.6^\circ$, $R = 2.19$); 3 — касательная к силовой линии канала, проведенная из источника ($\varphi = 44.6^\circ$, $R = 2.75$); А — касательная к силовой линии в источнике 1; В — магнитная силовая линия, на которой находится источник АКР; С — магнитная силовая линия, на которой находится канал. По осям отложено расстояние в радиусах Земли. Штриховая прямая от источника АКР 1 к силовой линии канала 3 — касательная к силовой линии источника. Угол между касательной к силовой линии источника и касательной к силовой линии канала является минимальным углом, под которым излучение, выходящее из источника, может попасть в плазменный канал. Сплошная прямая, идущая от источника и пересекающая силовую линию канала в точке 2, — максимальный угол, при котором излучение может распространяться в канале без затухания (см. рис. 6).

Были проведены расчеты длины участка силовой линии магнитного поля (расстояния между точками 2 и 3 на рис. 8 равно ΔR), на котором может находиться вход в канал. Результаты расчетов (в радиусах



Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты для трех углов падения на стенку канала при фиксированных значениях $N_1 = 164 \text{ см}^{-3}$ и $N_2 = 157 \text{ см}^{-3}$

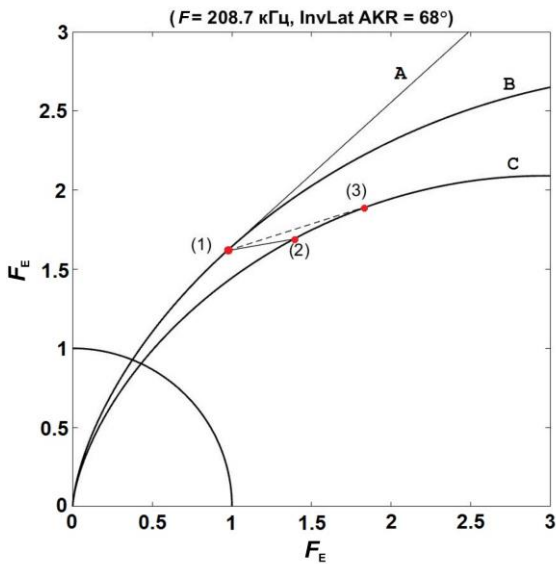


Рис. 8. Результаты расчета взаимного положения источника АКР (1) и магнитной силовой линии (2), на которой находится плазменный канал (по результатам измерений 19.12.2018). Обозначения — см. текст

Таблица 2

Результаты расчетов длины участка силовой линии магнитного поля (в радиусах Земли)

Инвар. шир.	68°	70°	75°
Частота			
167.2 кГц	0.67*	0.75	0.85
208.7 кГц	0.56*	0.63*	0.69
500.2 кГц	0.27*	0.30*	0.31

Земли) приведены в табл. 2. Согласно работе [Могилевский и др., 2007], раскрытие конуса излучения составляет $\pm(25^\circ-35^\circ)$. Значения, удовлетворяющие этим ограничениям, отмечены звездочкой.

Анализ результатов расчетов показывает, что для захвата АКР в канал его источник должен быть вблизи канала (инвариантная широта магнитной силовой линии, на которой происходит АКР, $\varphi \approx 68^\circ-70^\circ$). Можно сделать грубую оценку вероятности регистрации АКР, захваченного в плазменный канал:

$$W \approx 2\Delta R / L \approx 0.1-0.2. \quad (8)$$

Оценочные значения W по порядку величины близки к результатам измерений: при непрерывных наблюдениях захват АКР наблюдается несколько раз в месяц.

ВЫВОДЫ

Показана возможность переноса аврорального излучения из одного полушария в другое на основе результатов как измерений на спутнике ERG (Arase), так и расчетов. Было установлено следующее:

- при распространении в каналах более высокочастотная часть АКР ($f > 300-400 \text{ кГц}$) просачивается за пределы каналов в большей степени, чем низкочастотная ($f < 300-400 \text{ кГц}$);
- при распространении излучения в каналах происходит трансформация спектра АКР: быстрое падение интенсивности составляющих спектра на низких частотах ($f < 150-200 \text{ кГц}$) и относительно медленное падение на высоких частотах ($f > 150-200 \text{ кГц}$);
- результаты моделирования распространения АКР в плазменных каналах достаточно хорошо совпадают с измерениями и объясняют трансформацию спектра АКР (с $\sim 200 \text{ кГц}$ до $\sim 400 \text{ кГц}$ интенсивность уменьшается на два порядка);
- из анализа условий захвата АКР в плазменные каналы следует: захват зависит от взаимного расположения источника и канала, а также от глубины провала плотности плазмы внутри канала ($\Delta N/N$).

Тем самым подтверждены результаты измерений на спутнике ISEE-1, указывающие на возможность захвата АКР в каналы, образуемые вблизи плазмплаузы вытянутыми вдоль магнитного поля плазменными неоднородностями.

Мы выражаем признательность А. Кумамото, Й. Касахара, Ф. Тсучия за предоставление данных PWE/HFA-L2 v01.01 [Kasahara et al., 2018; Kumamoto et al., 2018]. Данные спутника ERG (Arase), а также описание и характеристики научных приборов получены из научного центра ERG (Arase) под управле-

нием ISAS/JAXA и ISEE/Университет Нагоя на сайте [<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/>] [Miyoshi et al., 2018a, b].

Работа В.И. Колпак и А.А. Чернышова поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А. и др. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц при помощи аппаратуры, установленной на спутнике «ЭЛЕКТРОН-2». *Исследования космического пространства* / под ред. Г.А. Скудрина. М.: Наука, 1965. С. 581–606.

Буринская Т.М., Рош Ж.Л. Волноводный режим циклотронной мазерной неустойчивости в областях плазмы с пониженной плотностью. *Физика плазмы*. 2007. Т. 33, № 1. С. 28–37.

Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. и др. Статистические свойства аврорального километрового радиоизлучения по наблюдениям на спутнике ERG (Arase). *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 1. С. 13–20. DOI: [10.12737/szf-71202102](https://doi.org/10.12737/szf-71202102).

Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов / 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.

Могилевский М.М., Романцова Т.В., Ханаш Я. и др. Об источнике аврорального километрового излучения. *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 86, № 11. С. 819–821.

Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А. и др. Канализование аврорального километрового радиоизлучения при геомагнитных возмущениях. *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115, № 10. С. 636–641. DOI: [10.31857/S1234567822100068](https://doi.org/10.31857/S1234567822100068).

Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем / Пер. с англ. М.: Мир, 1972. С. 192.

Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М. Авроральное километровое радиоизлучение как средство диагностики свойств магнитосферы. *Письма в ЖЭТФ*. 2022а. Т. 115, № 1. С. 28–34. DOI: [10.31857/S1234567822010050](https://doi.org/10.31857/S1234567822010050).

Чернышов А.А., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Колпак В.И. Одновременное наблюдение аврорального километрового радиоизлучения от северных и южных источников. *Известия РАН. Серия физическая*. 2022б. Т. 86, № 3. С. 370–374. DOI: [10.31857/S0367676522030073](https://doi.org/10.31857/S0367676522030073).

Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л. и др. Мониторинг области ускорения электронов при помощи аврорального километрового радиоизлучения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 5. С. 538. DOI: [10.31857/S0016794020040033](https://doi.org/10.31857/S0016794020040033).

Baumjohann W., Treumann R.A. Auroral kilometric radiation — the electron cyclotron maser paradigm. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 9, 1053303. DOI: [10.3389/fspas.2022.1053303](https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1053303).

Calvert W. Ducted auroral kilometric radiation. *Geophys. Res. Lett.* 1982. Vol. 9, no. 1. P. 56–59. DOI: [10.1029/GL009i001p00056](https://doi.org/10.1029/GL009i001p00056).

Gurnett D.A. The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, no. 28. P. 4227–4238. DOI: [10.1029/JA079i028p04227](https://doi.org/10.1029/JA079i028p04227).

Hanasz J., Panchenko M., De Feraudy H., et al. Occurrence distributions of the auroral kilometric radiation ordinary and extraordinary wave modes. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. A11, 1408 p. DOI: [10.1029/2002JA009579](https://doi.org/10.1029/2002JA009579).

Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H., et al. The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite. *Earth, Planets and Space*. 2018. Vol. 70, 86 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0842-4](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0842-4).

Kumamoto A., Tsuchiya F., Kasahara Y., et al. High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the Arase spacecraft. *Earth, Planets and Space*. 2018. Vol. 70, 82 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0854-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0854-0).

Kurth W.S., Baumback M.M., Gurnett D.A. Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80, no. 19. P. 2764.

Louarn P., Le Quéau D. Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities. II. The cyclotron maser instability in small size sources. *Planet. Space Sci.* 1996. Vol. 44, no. 3. P. 211–224. DOI: [10.1016/0032-0633\(95\)00122-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(95)00122-0).

Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., et al. Geospace Exploration Project ERG. *Earth, Planets and Space*. 2018a. Vol. 70, 155. DOI: [10.1186/s40623-018-0862-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0862-0).

Miyoshi Y., Hori T., Shoji M., et al. The ERG Science Center. *Earth, Planets and Space*. 2018b. Vol. 70, 96. DOI: [10.1186/s40623-018-0867-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0867-8).

Nagai T., Mauk B., Santolik O., et al. Special issue “Geospace exploration by the ERG mission”. *Earth, Planets and Space*. 2018. Vol. 70, 155. DOI: [10.1186/s40623-018-0926-1](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0926-1).

Wu C.S. The cyclotron maser theory of AKR and Z-mode radiation. *CNES Results of the ARCAD 3 Project and of Recent Programs in Magnetospheric and Ionospheric Physics*. 1985. P. 559–570.

Wu C.S., Lee L.C. A theory of the terrestrial kilometric radiation. *Astrophys. J.* 1979. Vol. 230. P. 621–626.

Xiao F., Tang J., Zhang S., et al. Asymmetric distributions of auroral kilometric radiation in Earth’s Northern and Southern hemispheres observed by the Arase satellite. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, no. 13, e2022GL099571. DOI: [10.1029/2022GL099571](https://doi.org/10.1029/2022GL099571).

Zhao W., Liu S., Zhang S., et al. Global occurrences of auroral kilometric radiation related to suprathermal electrons in radiation belts. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, no. 10. P. 7230–7236. DOI: [10.1029/2019GL083944](https://doi.org/10.1029/2019GL083944).

URL: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/> (дата обращения 12 сентября 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л. Перенос аврорального километрового радиоизлучения посредством каналов с пониженной плотностью на границе плазмосферы. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 1. С. 21–30. DOI: [10.12737/szf-101202403](https://doi.org/10.12737/szf-101202403).