

Каналирование аврорального километрового радиоизлучения при геомагнитных возмущениях¹⁾

М. М. Могилевский⁺²⁾, Д. В. Чугунин⁺, А. А. Чернышов⁺, В. И. Колпак^{+*×}, И. Л. Моисеенко⁺,
 Ё. Касахара^{°3)}, Ё. Миёши^{∇3)}

⁺ Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

^{*} Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000 Москва, Россия

[×] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

[°] Университет Каназава, 920-1192 Каназава, Япония

[∇] Университет Нагоя, 464-8601 Нагоя, Япония

Поступила в редакцию 19 апреля 2022 г.

После переработки 22 апреля 2022 г.

Принята к публикации 22 апреля 2022 г.

Представлены результаты измерений электромагнитных полей на спутнике ERG и проведен их сравнительный анализ с измерениями на спутнике WIND. Подтверждена возможность захвата аврорального километрового радиоизлучения (АКР) в плазменные каналы, впервые обнаруженная на спутнике ISEE. Плазменные неоднородности, образующиеся при увеличении геомагнитной активности, вытягиваются вдоль магнитного поля и формируют каналы, вдоль которых происходит перенос излучения. Спектр захваченного радиоизлучения искажается, что связано с относительным положением источника и канала на низких частотах. Искажение спектра АКР на высоких частотах связано с частотной зависимостью условий распространения в канале. Обнаружена несимметричность протекания процессов формирования плазменных каналов и источников АКР в северной и южной авроральных областях.

DOI: 10.31857/S1234567822100068, EDN: dytmkz

1. Распространение электромагнитных волн в плазме с неоднородностями подробно исследовалось для низкочастотных (НЧ) полей [1, 2]. Для прохождения электромагнитного импульса, вызванного молниевым разрядом, в сопряженное полушарие необходимо в районе экватора “довернуть” волновой вектор, что может быть реализовано при распространении сигнала в плазменных каналах, так называемых дактах – неоднородностях плазмы, вытянутых вдоль магнитного поля. Такие дакты формируются в результате вытягивания вдоль поля ионосферных неоднородностей, а захват излучения происходит в верхней ионосфере. Аналогичным образом происходит и распространение из одного полушария в другое сигналов наземных низкочастотных передатчиков [3, 4]. Последовательные теоретические исследования распространения НЧ излучения в плазменных каналах с увеличенной ($\Delta N/N > 0$)

и уменьшенной ($\Delta N/N < 0$) плотностью плазмы были рассмотрены в работах [5, 6]. О другом механизме формирования дактов сообщалось в работе [7]. По результатам быстрых измерений плотности плазмы было показано, что при геомагнитных возмущениях плазмосфера приближается к Земле и вблизи экваториальной плоскости от нее отделяются сгустки плазмы, которые затем вытягиваются вдоль магнитного поля. В образовавшиеся плазменные каналы захватывается излучение, генерируемое в приэкваториальной области, например, плазмосферные шипения, которые по этим каналам проникают в ионосферу.

В 1982 году на спутнике ISEE-1 было обнаружено, что авроральное километровое радиоизлучение (АКР) также может быть захвачено в плазменные каналы, дакты, и распространяться по этим каналам из авроральных областей во внутренние области магнитосферы, плазмосферу [8]. В отличие от ОНЧ-излучений, АКР захватывается только в каналы с пониженной плотностью ($\Delta N/N < 0$) и распространяется в нем на значительные расстояния.

¹⁾ См. дополнительный материал к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ac.ru

²⁾ e-mail: mogilevsky2012@gmail.com

³⁾ Y. Kasahara, Y. Miyoshi.

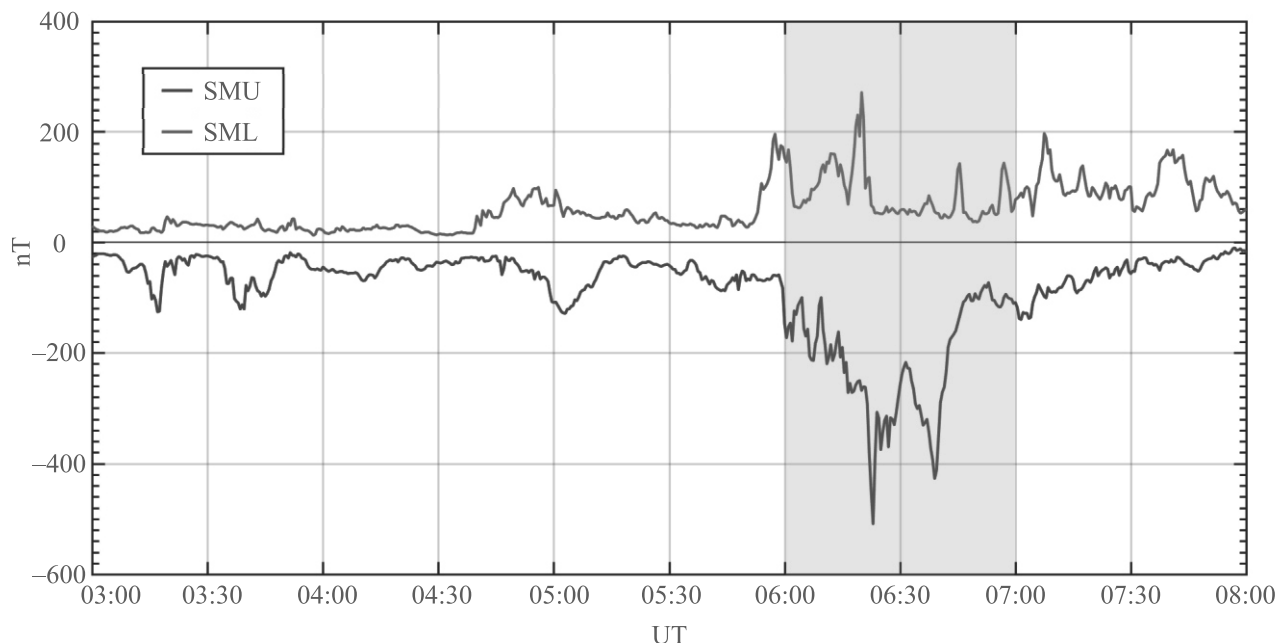


Рис. 1. (Цветной онлайн) Индексы геомагнитной активности SMU и SML. Серым цветом выделено время регистрации излучения на спутнике ERG

2. В этой работе мы рассматриваем результаты измерений захвата АКР в плазменный канал и распространение этого излучения в таком канале. Для этого мы используем результаты измерений на спутнике ERG (Arase), который был запущен 20 декабря 2016 г. на эллиптическую орбиту с высотой апогея $\sim 32\,110$ км ($\sim 6.0 R_e$), высотой перигея ~ 460 км, наклоном орбиты 31° и периодом вращения 8 с [9]. Наблюдения, используемые в этой статье, были сделаны с помощью высокочастотного анализатора (HFA) [10], входящего в комплекс приборов для измерения плазменных волн (PWE) [11]. HFA вычисляет спектры электрического поля в диапазоне частот 2 кГц–10 МГц для двух компонент, перпендикулярных оси вращения спутника, которая направлена на Солнце. Временное разрешение составляет 8 с, а частотное $-\Delta f/f < 2.5\%$. Данные спутника ERG и особенности его орбиты, были использованы ранее для изучения АКР и “континуума” излучения вблизи экваториальной области [12–14].

Для выявления особенности спектра излучения, захваченного в плазменный волновод, проводилось сравнение измерений на борту спутника Arase с наблюдениями на спутнике WIND. Спутник WIND был запущен 1 ноября 1994 г. в точку Лагранжа L1 и благополучно работает в настоящее время. В этой работе мы использовали измерения электрического поля в эксперименте Waves в диапазоне частот 20–1040 кГц (RAD1) [15].

3. На рисунке 1 приведены индексы геомагнитной активности SMU и SML в авроральных областях [16]. Время регистрации излучений на спутнике ERG отмечено серым фоном. В течение 6 ч до начала измерений геомагнитная обстановка была спокойной, а в 8:50 UT началось небольшое геомагнитное возмущение, до 500 нТл, активная часть которого продолжалась до 10:30 UT, а затем стало ослабевать. Наличие небольшого возмущения подтверждается измерениями магнитного поля в солнечном ветре, которые вызвали суббурю (см. дополнительный материал).

4. Результаты измерений электрической компоненты поля, выполненных 19.12.2018 г. на спутнике ERG (Arase), приведены на рис. 2. Во время измерений спутник находился, в основном, в южном полушарии ($Z_{sm} < 0$, здесь Z_{sm} – координата Z в солнечно-магнитной системе координат) и двигался по восходящей части орбиты, удаляясь от Земли: в 09:00 UT спутник находился на границе плазмосферы, а в 11:00 UT вблизи апогея. На верхней части рис. 2 приведена динамическая спектрограмма амплитуды электрического поля в диапазоне частот 20–800 кГц. Как следует из этого рисунка, в диапазоне частот 200–400 кГц наблюдаются всплески АКР, которые до 10:10 UT следуют со средним характерным интервалом около 6 мин, а затем чаще, с характерным интервалом 2–3 мин. Узкополосный сигнал на частоте, понижающейся от ~ 200 до ~ 100 кГц – колебания поля на частоте верхнего гибридного резонан-

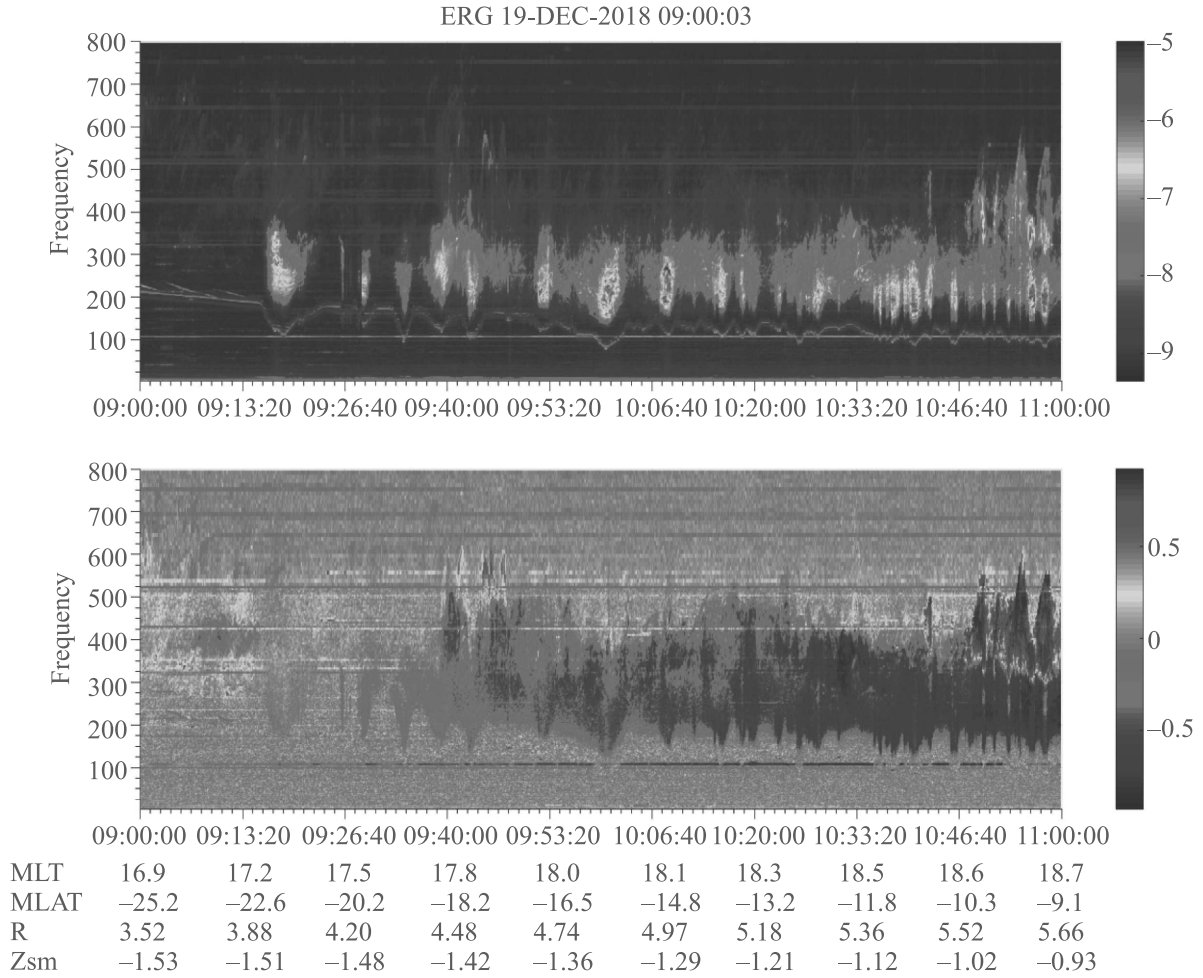


Рис. 2. (Цветной онлайн) Верхняя панель – динамическая спектрограмма электрической составляющей излучения, зарегистрированного 19.12.2018, в интервале 09–11 UT. Нижняя панель – спектрограмма коэффициента поляризации

са (ВГР): $\omega_{\text{UHR}} = (\omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2)^{1/2}$, где ω_{pe} и ω_{Be} – плазменная частота и гирочастота электронов. Вариации частоты ВГР ($\Delta\omega_{\text{UHR}}/\omega_{\text{UHR}} \sim 0.5$) связаны с изменениями плотности плазмы, поскольку магнитное поле в интервале наблюдения плавно изменяется от ~ 460 нТл до ~ 120 нТл (что соответствует значениям циклотронной частоты 13–4.5 кГц) и не может быть причиной столь значительных изменений гибридной частоты. Горизонтальные полосы на спектрограмме на частоте 110 кГц и гармониках этой частоты – бортовые помехи.

Всплески АКР регистрируются синхронно с понижением частоты ВГР, что указывает на распространение радиоизлучения внутри каналов с пониженной плотностью плазмы.

На нижней панели приведена спектрограмма коэффициента поляризации излучения, вычисленного на борту относительно оси вращения спутника [9], для чего используются две взаимно перпендикуляр-

ные компоненты электрического поля E_u и E_v . Используя эти компоненты вычисляются проекции левой и правой составляющих на плоскость UV:

$$|\widetilde{E}_L|^2 = \widetilde{E}_u + \widetilde{E}_v \exp[-(\pi/2)i]^2/2 = (|\widetilde{E}_u|^2 + |\widetilde{E}_v|^2)/2 - \text{Im} \widetilde{E}_u \widetilde{E}_v^*, \quad (1)$$

$$|\widetilde{E}_R|^2 = \widetilde{E}_u + \widetilde{E}_v \exp[(\pi/2)i]^2/2 = (|\widetilde{E}_u|^2 + |\widetilde{E}_v|^2)/2 + \text{Im} \widetilde{E}_u \widetilde{E}_v^*, \quad (2)$$

где \widetilde{E}_u и \widetilde{E}_v – комплексные Фурье коэффициенты E_u и E_v соответственно, знак * – комплексное сопряжение, а Im обозначает мнимую часть.

После усреднения за один оборот спутника, 8 с, строится коэффициент поляризации:

$$K(f) = (|\langle \widetilde{E}_R \rangle|^2 - |\langle \widetilde{E}_L \rangle|^2) / (|\langle \widetilde{E}_R \rangle|^2 + |\langle \widetilde{E}_L \rangle|^2). \quad (3)$$

Поскольку ось вращения спутника направлена на Солнце, то коэффициент поляризации зависит не

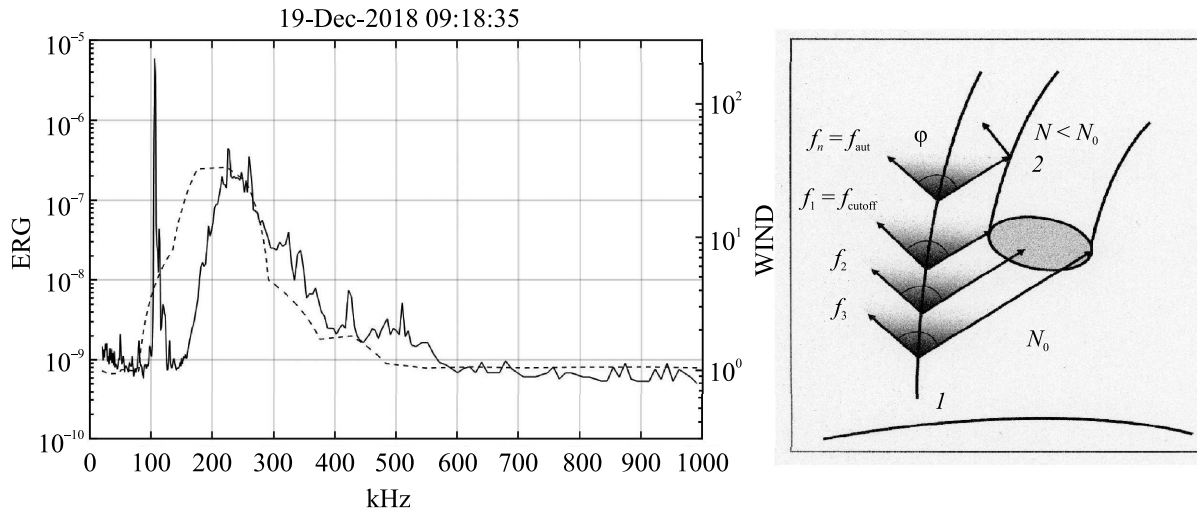


Рис. 3. Левая часть: спектры АКР, одновременно зарегистрированных на спутниках ERG (сплошная кривая) и WIND (пунктирная). Всплеск на частоте 100–130 кГц – верхняя гибридная частота. Правая часть: схематическая иллюстрация, поясняющая отсечку составляющих спектра на низких частотах при захвате излучения в канал. 1 – силовая линия, на которой находится источник АКР, 2 – плазменный канал с пониженной плотностью, φ – раствор конуса излучения АКР на выходе из источника. Ограниченный раствор конуса излучения и размеры канала ограничивают попадание в канал частот ниже f_1 , источник которых расположен выше. На частоте f_2 сигнал попадает в канал частично, а на частоте f_3 и выше попадает полностью

только от поляризации излучения, но и от взаимного расположения источника излучения и спутника. Всплеск АКР в 09:17 UT на рис. 2 практически линейно поляризован ($K(f) = 0$), а затем, по мере перемещения спутника на ночную сторону магнитосферы, поляризация всплесков АКР меняется (уменьшается) и в 11:00 UT достигает значения – 0.8, что указывает на правую поляризацию излучения от источника, находящегося в северном полушарии.

Относительное положение спутников ERG, WIND и источника АКР, приведенное на рис. S2 в дополнительном материале, позволяет проводить сравнение сигналов АКР, принятых на двух спутниках, как показано на рис. S3 (см. дополнительный материал).

На рисунке 3 приведены спектры излучения АКР, зарегистрированных одновременно на двух спутниках в 09:18:35 UT. Часть излучения на низких частотах (100–200 кГц) наблюдается на спутнике WIND, но не видна на ERG. Такое обрезание низкочастотной части спектра связано с ограничениями при захвате излучения в канал и определяется соотношениями размеров канала, раствором конуса излучения и зависимостью частоты генерации АКР от высоты [17, 18]. Поскольку АКР генерируется на локальной гирочастоте электронов, зависящей от высоты, то более высокочастотное излучение, генерируемое на меньшей высоте, попадает в канал

полностью. Излучение, приходящее с больших высот попадает в канал частично, а частоты выше f_1 (на рис. 3) вообще не попадают в канал, поскольку конус излучения и размеры канала ограничивают условия захвата.

Спадание спектра на высоких частотах связано с условиями отражения излучения от стенок плазменного канала. Поскольку поперечный размер канала много больше длины волны излучения, то можно воспользоваться приближением геометрической оптики для коэффициента отражения от неоднородной плазмы [19]:

$$r = \frac{N_1 \cos \varphi_1 - N_2 \cos \varphi_2}{N_1 \cos \varphi_1 + N_2 \cos \varphi_2}, \quad (4)$$

где N_1 – показатель преломления внутри канала, N_2 – показатель преломления вне канала, $\varphi_{1,2}$ – угол падения и угол преломления соответственно.

Поскольку $N^2 \sim (1 - \omega_0^2/\omega^2)$ [20], то при увеличении частоты излучения показатель преломления приближается к 1 и коэффициент однократного отражения уменьшается. Суммарная мощность сигнала в противоположном полушарии формируется многократным отражением ($\sum r = r^n$, где n – количество отражений и для конкретного примера n может достигать значения нескольких десятков), что приводит к более быстрому уменьшению сигнала с повышением частоты.

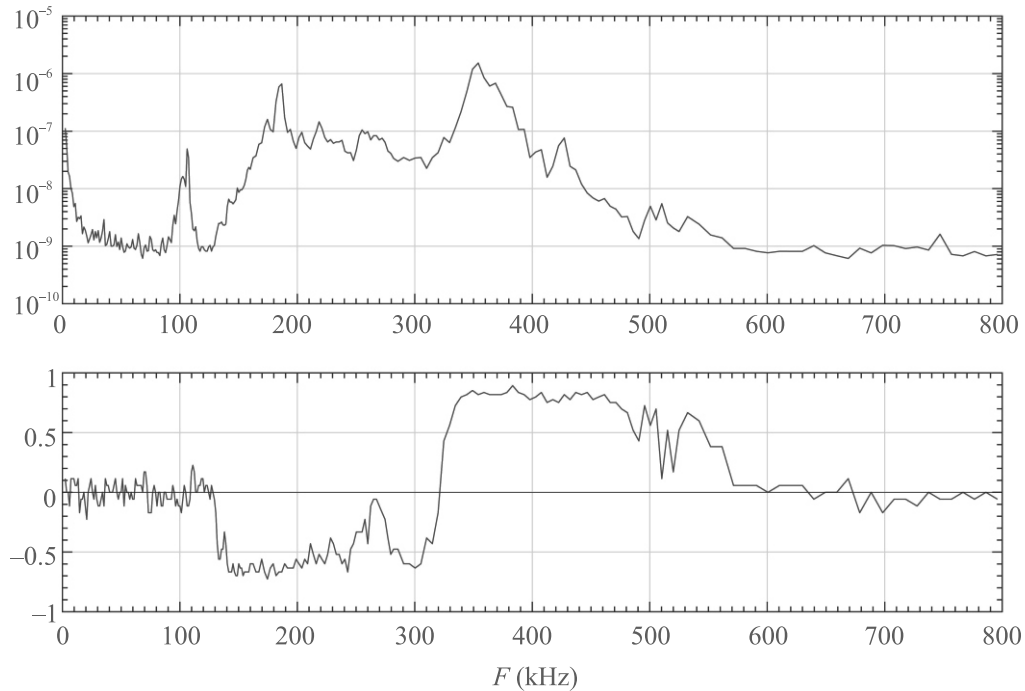


Рис. 4. (Цветной онлайн) Результаты измерений характеристик АКР в 10:49:55 UT 19.12.2018. Верхняя панель – спектр амплитуды сигнала в диапазоне частот 2 кГц–1 МГц. Нижняя панель – спектр коэффициента поляризации. Отрицательные значения этого коэффициента соответствуют источникам, расположенным в северном полушарии, положительные – в южном. Всплеск на 100 кГц на амплитудном спектре – частота верхнего гибридного резонанса

Пример одновременного захвата в канал излучений от двух источников, одного в северном, а другого в южном полушарии, приведен на рис. 4.

Первый максимум в спектре АКР наблюдается на частоте 190 кГц, что соответствует высоте генерации ~ 6900 км. Второй максимум наблюдается на частоте 350 кГц и высота генерации АКР должна быть ~ 4300 км. При переходе от первого максимума ко второму изменяется поляризация излучения – от отрицательного к положительному. Такое изменение поляризации указывает на то, что на низких частотах доминирует излучение от северных источников, а на более высоких частотах, выше ~ 310 кГц, доминирующим становится излучение от южных источников. Отличие “северных” и “южных” максимумов в спектре АКР может быть связано с различной скоростью формирования канала в северном и южном полушарии, что приводит к различной высоте торца канала над поверхностью земли. Другое объяснение отличия частоты максимумов в спектре может быть связано с различным положением силовой линии источника АКР по отношению к входу в канал. В этом случае “южная” силовая линия источника должна быть расположена ближе к полюсу и дальше от канала, а “север-

ная” – ближе к экватору и, соответственно, ближе к каналу.

5. По результатам измерения АКР на спутнике ERG можно сделать следующие выводы:

- Подтвержден результат, ранее полученный на спутнике ISEE-1: АКР может быть захвачено в канал, образованный плазменными неоднородностями на внешней границе плазмосферы.

- Плазменные каналы, как и АКР, могут формироваться при небольшой геомагнитной активности.

- При захвате АКР в плазменный канал происходит изменение спектра излучения: относительно быстро возрастает интенсивность излучения на низких частотах ($\sim 1 \text{ мВ}^2/\text{м}^2\text{Гц}$) и относительно медленно спадает на высоких частотах ($-(0.15-0.25) \text{ мВ}^2/\text{м}^2\text{Гц}$).

- Наблюдается несимметричность протекания процессов формирования плазменных каналов и формирования источников АКР в северной и южной авроральных областях.

Отсюда следует, что по измерениям спектра циклотронного излучения от планет и экзопланет можно определить относительное положение оси магнитного поля: из высокоширотных областей магнитосферы должно регистрироваться широкополосное излу-

чение с “прямоугольным” спектром; спектр излучения из приэкваториальной области будет искаженным, “треугольным”.

Данные спутника ERG (Arase) получены от научного центра ERG <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp> [10], в исследовании анализируются данные прибора PWE HFA-L2 v01.01 [11]. Данные спутника WIND доступны на сайте https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/waves/wav_h1/. Мы благодарны организациям и национальным агентствам, входящим в SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu/info>] за предоставление данных по индексам геомагнитной активности. А. Чернышов и В. Колпак выражают благодарность за поддержку Фонду развития теоретической физики и математики “Базис”.

Работа М. Могилевского поддержана грантом Министерства высшего образования и науки РФ 075-15-2020-780 (# 13.1902.21.0039).

1. R. A. Helliwell, *Whistlers and related ionospheric phenomena*, Stanford Univ. Press, Stanford (1965).
2. О. А. Молчанов, *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме*, Наука, М. (1985).
3. Я. И. Лихтер, О. А. Молчанов, В. М. Чмырев, Письма в ЖЭТФ **14**, 457 (1971).
4. А. А. Петрукович, М. М. Могилевский, А. А. Чернышов, Д. Р. Шкляр, УФН **185**(6), 649 (2015).
5. В. И. Карпман, Р. Н. Кауфман, Геомагнетизм и аэронавтика **23**(3), 451 (1983).
6. В. И. Карпман, Р. Н. Кауфман, Геомагнетизм и аэронавтика **23**(5), 791 (1983).
7. C. Beghin, J. F. Karczewski, B. Poirier, R. Debrie, and N. Masevitch, *Annales de Geophysique* **38**(5), 615 (1982).
8. W. Calvert, *Geophys. Res. Lett.* **9**(1), 56 (1982).
9. Y. Miyoshi, I. Shinohara, T. Takashima et al. (Collaboration), *Earth, Planets and Space* **70**(1), 101 (2018).
10. A. Kumamoto, F. Tsuchiya, Y. Kasahara et al. (Collaboration), *Earth, Planets and Space* **70**(1), 82 (2018).
11. Y. Kasahara, Y. Kasaba, H. Kojima et al. (Collaboration), *Earth, Planets and Space* **70**(1), 86 (2018).
12. М. М. Могилевский, Д. В. Чугунин, А. А. Чернышов, Т. В. Романцова, И. Л. Моисеенко, А. Кумамото, Й. Касахара, Письма в ЖЭТФ. **114**(1), 18 (2021).
13. В. И. Колпак, М. М. Могилевский, Д. В. Чугунин, А. А. Чернышов, И. Л. Моисеенко, А. Кумамото, Ф. Тсучия, Е. Касахара, М. Шойи, Е. Миэши, И. Шинохара, *Солнечно-земная физика* **7**(1), 13 (2021).
14. А. А. Чернышов, М. М. Могилевский, Д. В. Чугунин, В. И. Колпак, *Известия РАН, Серия физическая* **86**(3), 370 (2022).
15. R. Harten and K. Clark, *Space Sci. Rev.* **71**(1-4), 23 (1995).
16. P. T. Newell and J. W. Gjerloev, *J. Geophys. Res. (Space Physics)* **116**(A12), A12211 (2011).
17. М. М. Могилевский, Т. В. Романцова, Я. Ханаш, Т. М. Буринская, Р. Шрайбер, Письма в ЖЭТФ **86**(11), 819 (2007).
18. А. А. Чернышов, Д. В. Чугунин, М. М. Могилевский, Письма в ЖЭТФ **115**(1), 28 (2022).
19. Г. С. Ландсберг, *Оптика*, 5-е изд., Наука, М. (1976).
20. В. Л. Гинзбург, *Распространение электромагнитных волн в плазме*, Наука, М. (1967).