

УДК 551.510.537

ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В НЕОДНОРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

© 2024 г. В. И. Колпак^{1, 2, *}, М. М. Могилевский¹, Д. В. Чугунин¹, А. А. Чернышов¹, И. Л. Моисеенко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт космических исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Проанализированы характеристики электрической компоненты аврорального километрового радиоизлучения (АКР), измеренного на двух спутниках — во внутренней магнитосфере Земли (спутник ERG) и в солнечном ветре (спутник WIND). Показано, что при распространении АКР в плазменных каналах происходит изменение спектра излучения — подавляются высокие частоты. Приведены результаты вычислений по модели, которые подтверждают эти измерения.

DOI: 10.31857/S0367676524030143, EDN: QLPYQZ

ВВЕДЕНИЕ

Развитие циклотронной мазерной неустойчивости в авроральной области магнитосферы Земли приводит к генерации аврорального километрового радиоизлучения (АКР) — одного из наиболее интенсивных естественных излучений в магнитосфере Земли [1–4]. Это излучение генерируется на высотах $2\text{--}3 R_E$ (R_E — радиус Земли) на локальной гирочастоте электронов и уходит от Земли. Согласно теоретическим оценкам [5, 6] и результатам прямых измерений на космических аппаратах [7] конус излучения составляет $25^\circ\text{--}35^\circ$ относительно направления магнитного поля в источнике. Отсюда следует, что излучение от источников АКР в авроральных областях не должно попадать на дневную сторону магнитосферы вблизи плоскости эклиптики.

При наличии в плазме неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля, АКР может захватываться в каналы, сформированные этими неоднородностями, и распространяться по ним. Впервые такой перенос излучения был зарегистрирован на спутнике ISEE-1 [8]. В работе [9] было показано, что при распространении АКР по плазменным каналам происходит трансформация спектра излучения. В этой работе мы приводим результаты расчетов, которые показывают, что трансформация спектра вызвана зависимостью показателя преломления волны от частоты.

В работе использованы одновременные измерения двух спутников: ERG и WIND. Спутник ERG [10, 11] был запущен во внутреннюю магнитосферу 20 декабря 2016 г. для изучения процессов в радиационных поясах. Для регистрации электрической компоненты используются датчики, расположенные на концах четырех штанг. Орбитальный период спутника ERG составляет 8 ч, а наклонение орбиты к плоскости эклиптики $\varphi = \pm 30^\circ$. Для анализа направления распространения АКР в данной работе используются измерения электрической составляющей поля, зарегистрированной в эксперименте PWE/HFA [12, 13]. Этот эксперимент предназначен для измерения в диапазоне частот от 2 кГц до 10 МГц электрического поля [13], что позволяет изучать свойства АКР [14, 15].

Спутник WIND был запущен 1 ноября 1994 г. в окрестность точки либрации L1 для измерения параметров солнечного ветра. Он вращается вокруг этой точки с $r \approx 70R_E$ (где r — радиус орбиты спутника WIND) и проводит непрерывные измерения параметров плазмы, а также электромагнитного поля в диапазоне частот от 20 до 1040 кГц [16].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 приведен пример одновременной регистрации интенсивности излучения на двух спутниках: верхний график — изменение средних

значений интенсивности излучений, зарегистрированных на спутниках WIND, на нижнем графике — аналогичные измерения на спутнике ERG. Для анализа был выбран интервал времени 09:36:00—13:26:24 UT 2 мая 2019 г. Во время этих измерений спутник WIND находился заведомо вне конуса излучения АКР, в точке с координатами $X_{gsm} = 204.7 R_E$; $Y_{gsm} = 70.6 R_E$; $Z_{gsm} = -9.86 R_E$ (т.е. был удален от Земли в сторону Солнца на 204.7 радиусов). Спутник ERG также был на дневной стороне магнитосферы ($MLT = 9.3-13.2$), вблизи плазмопаузы и тоже вне конуса излучения АКР (рис. 2а и 2б). Изменения интенсивности на двух спутниках подобны: два всплеска интенсивности наблюдаются синхронно на обоих спутниках в 11:35—12:03 UT (WIND) и в 11:40—12:06 UT (ERG). Точность измерений не позволяет определить задержку, связанную с распространением сигнала от спутника ERG до спутника WIND ($204.7 R_E \approx 1.3 \times 10^6$ км). Последовательность интенсивных импульсов

начиная с 12:00 — бортовая калибровка на спутнике ERG. Таким образом, измерения на двух спутниках показывают, что АКР наблюдается вне конуса излучения и на значительных расстояниях от источника.

На рис. 2а представлено взаимное расположение спутников относительно источника АКР. Спутник WIND находился в солнечном ветре, вращался вокруг точки либрации L1 ($256.4 R_E$) на расстоянии $\sim 70 R_E$. Спутник ERG находился в вечернем секторе внутренней магнитосферы ($MLT = 18.8$) на расстоянии $3.3 R_E$. Отсюда следует, что излучение от источника, расположенного в авроральной области ночной магнитосферы, не могло напрямую прийти к спутникам WIND и ERG. На рис. 2б показан процесс захвата излучения в плазменный канал. Мы предполагаем, что $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$. Излучения на частотах $f \leq f_1$ не попадают в канал, поскольку торец канала находится вне конуса излучения на этих частотах. В диапазоне частот от f_1 до f_3 суммарная мощность

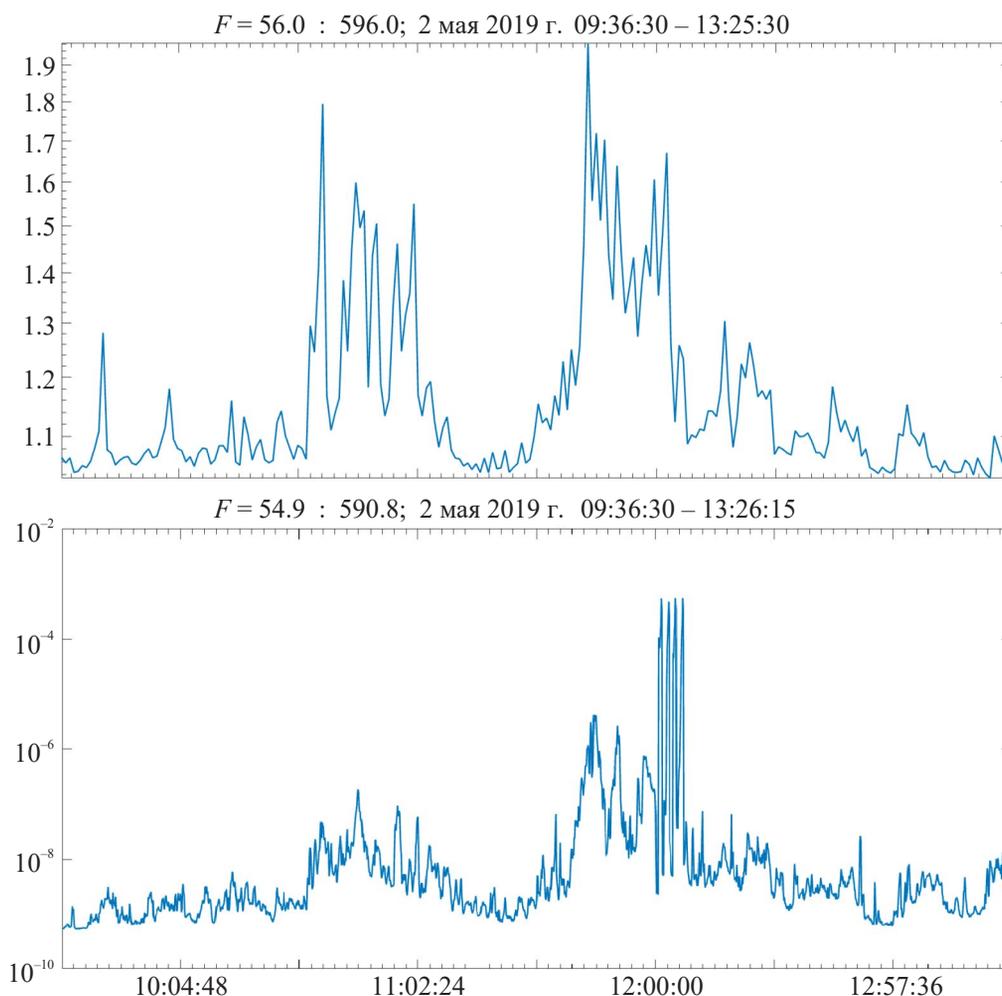


Рис. 1. Одновременные измерения средней мощности излучения (усреднение по частотам F): от 56 до 596 кГц для WIND с шагом 60 с, от 54.9 до 596 кГц для ERG с шагом 8 с. Измерения выполнены 02.05.2019 на двух спутниках: с 9:36 до 13:26, на борту спутника WIND (верхняя панель) и на борту спутника ERG (нижняя панель).

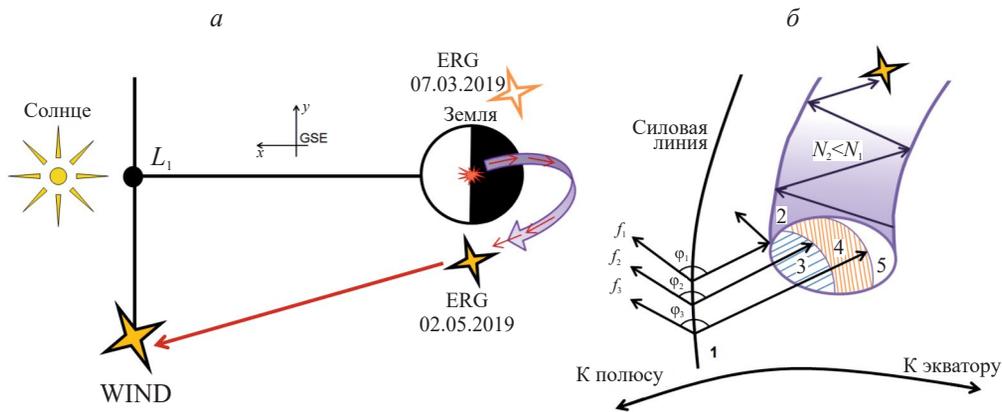


Рис. 2. Схема взаимного расположения источника АКР и спутников ERG и WIND во время измерений 07.03.2019 и 02.05.2019 (а). Представлен вид на плоскость эклиптики со стороны $(-Z_{GSE})$. 07.03.2019 координаты для спутника ERG: $X = -0.6$; $Y = 3.3$; $Z = 0.4$; для спутника WIND: $X = 256$; $Y = -42$; $Z = 8.8$ (в системе GSE, в единицах R_E). 02.05.2019 координаты для спутника ERG: $X = -3.3$; $Y = -1.7$; $Z = 0.6$; для спутника WIND: $X = 205$; $Y = -71$; $Z = 1.5$. Схема захвата излучения в плазменный канал (б): 1 — силовая линия, на которой расположен источник АКР; 2 — канал плазмы, вытянутый вдоль силовой линии магнитного поля; 3 — область засветки торца канала для частот $f_1 \leq f \leq f_2$; 4 — область засветки для частот $f_2 \leq f \leq f_3$; 5 — область засветки для частот более f_3 ; f_1, f_2, f_3 — частоты АКР, где $f_1 > f_2 > f_3$; φ — раcтвор конуса излучения АКР; N_1 — плотность плазмы вне канала; N_2 — плотность плазмы в канале. Стрелками показано распространение излучения из источника и в канале.

излучения, попадающая в канал, изменяется в зависимости от частоты: по мере увеличения частоты высота источника понижается и все большая площадь торца канала попадает в конус излучения этого источника. На частотах $f \geq f_3$ торец канала всегда попадает в конус излучения и суммарная мощность на этих частотах не зависит от частоты.

На рис. 3 представлены спектры АКР, зарегистрированные одновременно на двух спутниках 07.03.2019 в 17:00:30 UT. Оба спектра подобны: быстрое нарастание спектральных составляющих на низких частотах, затем максимум и относительно медленное уменьшение интенсивности с повышением частоты. Наряду с подобием спектров наблюдается и их отличие: частота максимума на спектре, зарегистрированном на спутнике WIND, составляет 230 кГц, а на спутнике ERG — 200 кГц. Однако на высоких частотах интенсивность излучения спадает примерно по одинаковому закону на обоих спутниках (WIND и ERG). Заметим, что при изменении частоты от 200 до 400 кГц амплитуда спектральных составляющих уменьшается, приблизительно, на два порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Измерения на спутнике показывают, что размеры плазменного канала много больше, чем длина волны захваченного излучения [9]. Это дает возможность проводить вычисления в приближении геометрической оптики. Были проведены расчеты распространения необыкновенной электромагнитной волны в плазменном канале, вытянутом вдоль магнитного поля. Результаты расчетов коэффициентов отражения, характеризующих

сохранение мощности излучения в канале, приведены на рис. 4. Расчеты проводились для трех углов (75, 80 и 85°) для канала с пониженной плотностью $((N_1 - N_2) / N_1 = 0.67$, где N_1 — плотность фоновой плазмы, N_2 — плотность плазмы внутри канала), что соответствует результатам измерений. Просачивание излучения за пределы канала (Т) связано с коэффициентом отражения (К) следующим образом [17]:

$$K + T = 1,$$

где К — коэффициент отражения; Т — коэффициент пропускания.

Коэффициент отражения

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

Здесь n_1 и n_2 — показатели преломления вне и внутри канала соответственно; θ_1 и θ_2 — углы преломления и падения соответственно.

Показатель преломления для необыкновенной электромагнитной волны в квазипродольном приближении [18]

$$n^2_{1,2} = 1 - \frac{\omega_{pe1,2}^2}{(\omega - \omega_{He} \cos \theta_{1,2})\omega}$$

при условии, когда $\omega_{He} < \omega_{pe}$. Здесь $\omega_{He} = \frac{eH}{mc}$; $\omega_{pe1,2} = \frac{4\pi e^2 N_{1,2}}{m}$.

Приведенные на рис. 4 результаты расчетов показывают, что для угла падения излучения на

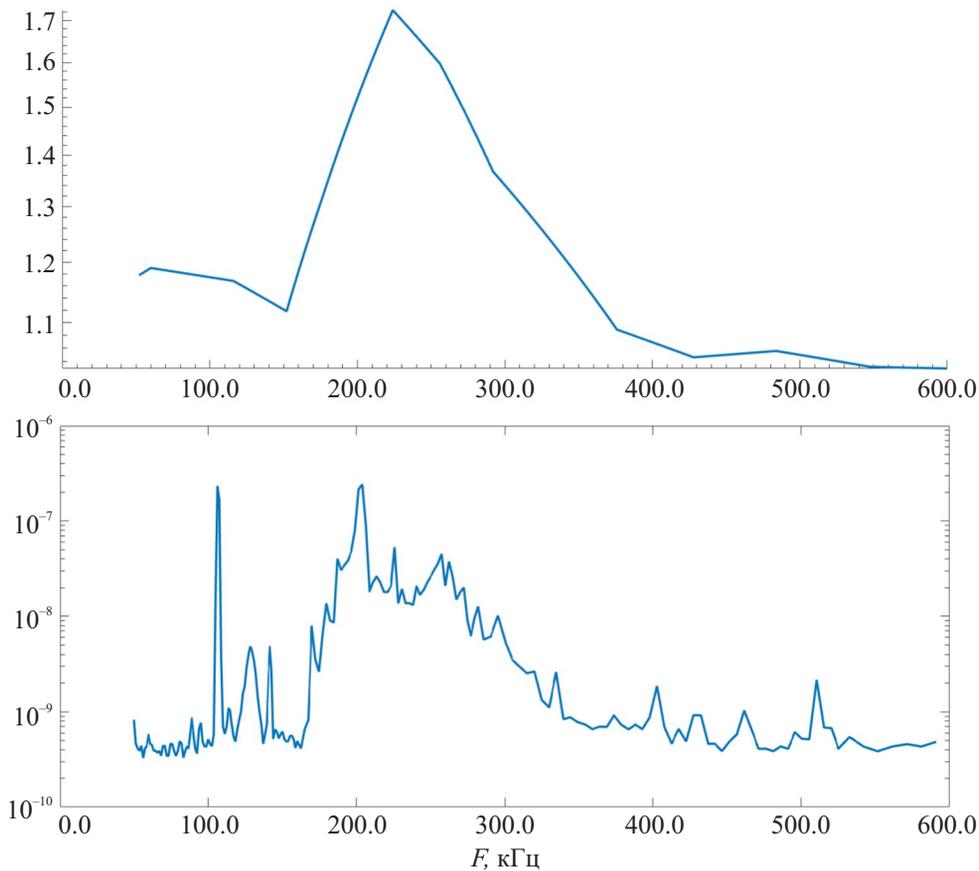


Рис. 3. Спектры АКР, зарегистрированные 07.03.2019 в 17:00:30 на спутниках WIND (верхняя панель) и ERG (нижняя панель).

стенку канала 80° в интервале частот от 200 до 400 кГц амплитуда сигнала изменяется на два порядка, что соответствует измерениям, приведенным на рис. 3. Таким образом, результаты расчета находятся в хорошем согласии с экспериментальными измерениями.

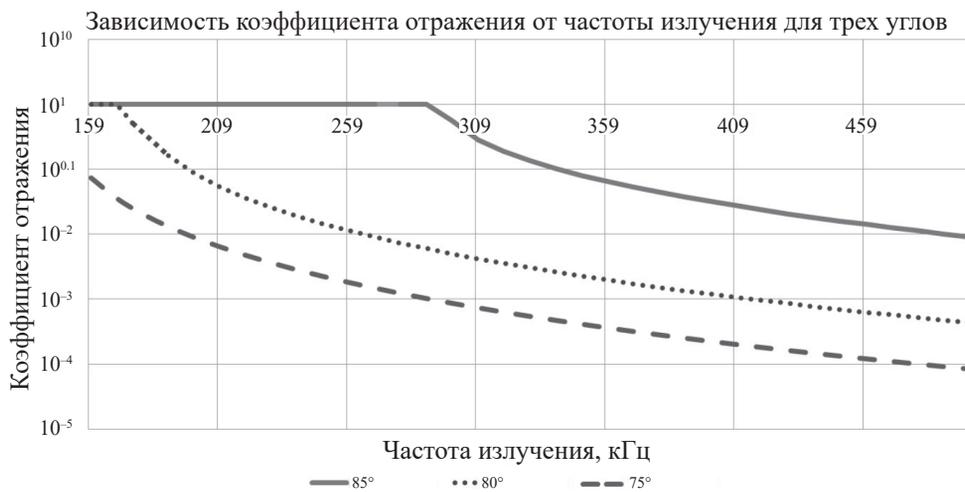


Рис. 4. Результаты расчета коэффициентов отражения от стенки канала (для случая $(N_1 - N_2) / N_1 = 0.67$) для трех углов: 85° (сплошная линия), 80° (точечная линия), 75° (пунктирная линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения АКР на двух спутниках: ERG, находившегося во внутренней магнитосфере Земли, и WIND — в солнечном ветре, перед магнитосферой Земли подтвердили результат, полученный в работе [8] с использованием данных спутника ISEE-1 о возможности захвата АКР в плазменные каналы — неоднородности плотности, вытянутые вдоль магнитного поля. Показано, что распространение АКР по каналам приводит к переносу излучения в области, которые были недоступны для этого излучения — оно не попадает в эти области при отсутствии плазменных каналов. Установлено, что при распространении излучения в каналах происходит трансформация спектра — уровень высокочастотных составляющих спектра уменьшается, поскольку часть энергии на этих частотах уходит из канала — просачивается через стенки.

Данные спутника ERG (Arase), а также описание и характеристики научных приборов, получены от научного центра ERG под управлением ISAS/JAXA и ISEE/Университет Нагоя на сайте <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/> [10, 11]. В исследовании анализируются данные прибора PWE HFA-L2 v01.01. [12, 13]. Данные спутника WIND доступны по адресу <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/>. Исследования В. И. Колпак и А. А. Чернышова поддержаны Фондом развития теоретической физики и математики “БАЗИС”. Авторы благодарны А. Г. Демехову за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А. и др.* // В кн: Исследования космического пространства. М.: Наука, 1965.
2. *Gurnett D.A.* // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. No. 28. P. 4227.
3. *Wu C.S., Lee L.C.* // *Astrophys. J.* 1979. V. 230. P. 621.
4. *Baumjohann W., Treumann R.A.* // *Front. Astron. Space Sci.* 2022. V. 9. Art. No. 1053303.
5. *Louarn P., Le Quéau D.* // *Planet. Space Sci.* 1996. V. 44. No. 3. P. 211.
6. *Буринская Т.М., Рош Ж.Л.* // *Физика плазмы.* 2007. Т. 33. № 1. С. 28.
7. *Могилевский М.М., Романцова Т.В., Ханаш Я. и др.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2007. Т. 86. № 11. С. 819; *Mogilevsky M.M., Romantsova T.V., Hanasz J. et al.* // *JETP Lett.* 2007. V. 86. No. 11. P. 819.
8. *Calvert W.* // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9. No. 1. P. 56.
9. *Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А. и др.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2022. Т. 115. № 10. С. 636; *Mogilevsky M.M., Chugunin D.V., Chernyshov A.A.* // *JETP Lett.* 2022. V. 115. No. 10. P. 636.
10. *Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 101.
11. *Miyoshi Y., Hori T., Shoji M. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 96.
12. *Kumamoto A., Tsuchiya F., Kasahara Y. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 82.
13. *Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 86.
14. *Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. и др.* // *Солн.-земн. физ.* 2021. Т. 7. № 1. С. 13; *Kolpak V.I., Mogilevsky M.M., Chugunin D.V. et al.* // *Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 7. No. 1. P. 11.
15. *Чернышов А.А., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Колпак В.И.* // *Изв. РАН.* 2022. Т. 86. № 3. С. 370; *Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Chugunin D.V., Kolpak V.I.* // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2022. V. 86. No. 3. P. 295.
16. *Bougeret J.L., Kaiser M.L., Kellogg P.J. et al.* // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 231.
17. *Ландсберг Г.С.* *Оптика.* М.: Физматлит, 2003. 848 с.
18. *Гинзбург В.Л.* *Распространение электромагнитных волн в плазме.* М.: Наука, 1967. С. 684.

Modification of auroral kilometric radiation spectra caused propagation in inhomogeneous cosmic plasma

V. I. Kolpak^{1,2,*}, M. M. Mogilevsky¹, D. V. Chugunin¹, A. A. Chernyshov¹, I. L. Moiseenko¹

¹Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

**e-mail: lera.kolpak@yandex.ru*

We have analyzed characteristics of electric components of the auroral kilometric radiation (AKR) detected onboard of two satellites, in the Earth's inner magnetosphere (ERG) and in the solar wind (WIND). It is shown that spectra are modified as the result of AKR the propagation in plasma channels — high frequencies are suppressed. The computer simulation confirms experiments.

Keywords: auroral kilometric radiation, plasma inhomogeneities, planetary radio emission, outer plasmasphere