

УДК 551.510.537

ОДНОВРЕМЕННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СЕВЕРНЫХ И ЮЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2022 г. А. А. Чернышов^{1, *}, М. М. Могилевский¹, Д. В. Чугунин¹, В. И. Колпак^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*E-mail: achernyshov@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Показаны результаты наблюдения аврорального километрового радиоизлучения от источников в авроральных областях северного и южного полушарий, которые одновременно регистрируются и анализируются с использованием данных спутника ERG (Arase). Отмечены различия в генерации аврорального километрового радиоизлучения в северном и южном полушариях. Показано, что в разное время преобладают северные или южные источники аврорального километрового радиоизлучения.

DOI: 10.31857/S0367676522030073

ВВЕДЕНИЕ

Измерения на борту искусственных спутников Земли позволили обнаружить новые природные явления, одним из которых является авроральное километровое излучение (сокращенно АКР). АКР представляет собой мощное радиоизлучение в диапазоне частот 30–1000 кГц, генерируемое в околоземной плазме. Впервые АКР было зарегистрировано на спутнике Электрон-2 в 1965 г. [1]. Последующие измерения, проводившиеся на высоко апогейных спутниках, позволили определить основные свойства АКР и условия, при которых происходит генерация этого излучения [2–4]. Следует отметить, что аналогичное по природе излучение были обнаружены у Юпитера, Сатурна, Урана, спутника Юпитера Ио и это излучение является характерным свойством космических тел, обладающим магнитным полем [5], т.е., АКР может быть маркером магнитного поля на экзопланетах [2]. По результатам проведенных измерений установлено, что АКР связано с дискретными полярными сияниями и его источники находятся над авроральной ионосферой, в основном, в вечернем и ночном секторах магнитосферы Земли, на инвариантных широтах около 70° [6] и на высотах ~2–10 тыс. км. [7]. Генерация излучения типа АКР происходит вблизи локальной гирочастоты электрона Ω_e ; а источник АКР расположен в областях с пониженной плотностью плазмы, где

плазменная частота меньше гирочастоты электронов (так называемая каверна Кальверта) [8]. Излучение распространяется, как правило, в быстрой необыкновенной R-X моде [9].

Таким образом, исследования с участием различных космических аппаратов позволили определить основные свойства излучения АКР. Однако спутники обычно регистрировали АКР либо в северном, либо в южном полушарии из-за особенности их орбит и научного оборудования на борту. Были попытки по одновременному наблюдению как северных, так и южных АКР с использованием двух спутников [10]. В настоящей работе представлены результаты, когда на одном спутнике одновременно регистрируются сигналы АКР от источников в авроральных областях северного и южного полушарий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

В представленном исследовании используются данные японского спутника ERG – Exploration of energization and Radiation in Geospace, (другое название – Arase) [11, 12], который был запущен 20.12.2016 г. и продолжает успешно работать в настоящее время. Его орбита – апогей ~32000 км, перигей ~400 км и наклонение 31°, а состав научного оборудования спроектирован для изучения, в первую очередь, физических процессов в радиа-

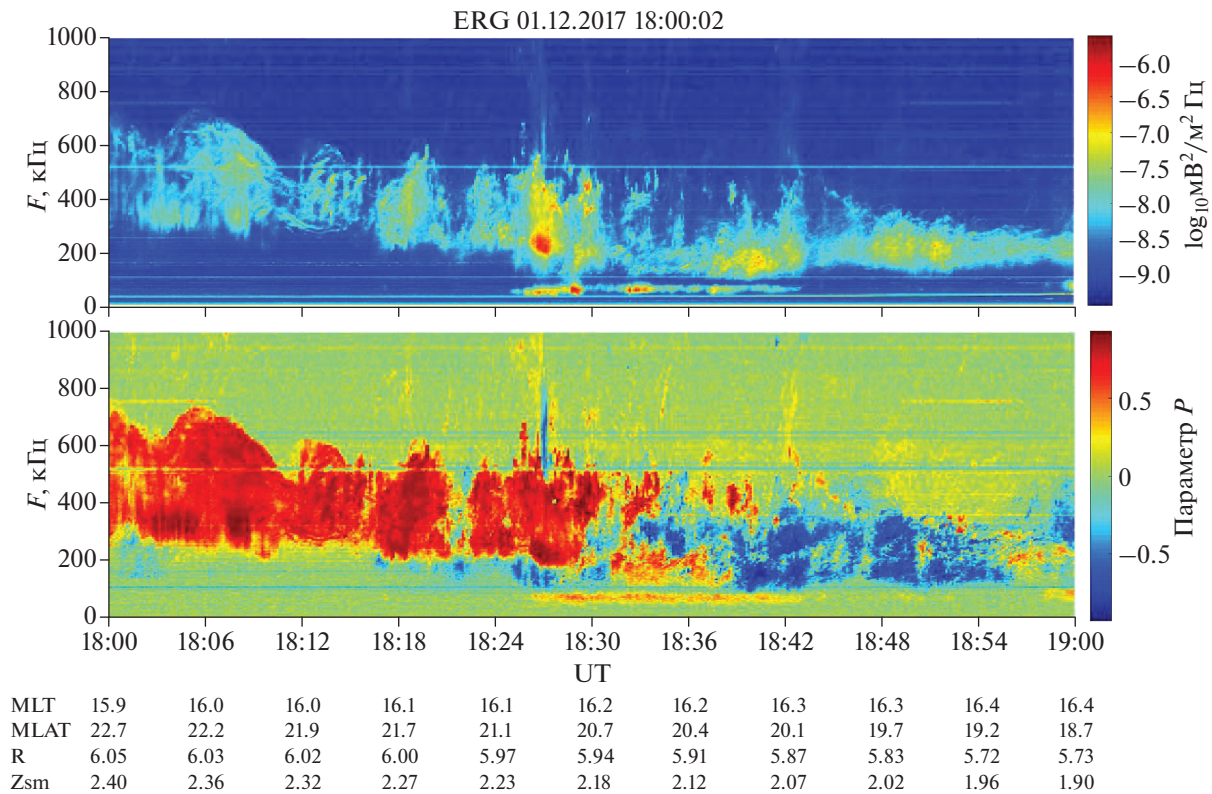


Рис. 1. Спектральный анализ АКР, зарегистрированного 01 декабря 2017 г.: на верхней панели – динамическая спектрограмма спектра мощности, на нижней панели – спектрограмма поляризационных параметров.

ционных поясах. Однако широкие измерительные возможности приборов позволяют исследовать процессы не только в радиационных поясах, но и в авроральной зоне [13]. Спутник ERG ориентирован на Солнце и стабилизирован вращением вокруг этого направления с периодом 8 с. Для исследования АКР мы использовали измерения электрической составляющей поля в эксперименте PWE/HFA [14], предназначенном для измерений постоянного электрического поля и плазменных волн, в диапазоне частот от постоянного поля до 10 МГц и от нескольких герц до 100 кГц для магнитного поля [15]. На борту спутника измеряются две взаимно перпендикулярные компоненты электрического поля, что позволяет вычислить компоненты с левой и правой поляризацией.

Для внутренней магнитосферы Земли в первом приближении можно полагать, что плотность плазмы изменяется пропорционально величине модуля магнитного поля. Используя это свойство при моделировании было показано, что на частотах выше 100–200 кГц влияние плазмосферы на распространение излучения незначительно и можно использовать простую геометрическую схему [16].

На рис. 1 показан пример одновременной регистрации АКР на спутнике ERG из нескольких источников от 01 декабря 2017 г., где на верхней

панели динамическая спектрограмма спектра мощности, а на нижней – спектрограмма поляризационных параметров $P = (\langle |\tilde{E}_r|^2 \rangle - \langle |\tilde{E}_l|^2 \rangle) / (\langle |\tilde{E}_l|^2 \rangle + \langle |\tilde{E}_r|^2 \rangle)$. Как уже упоминалось выше, в данной работе мы используем результаты расчетов поляризации, выполненных на борту спутника в рамках эксперимента PWE/HFA. Направления E_u и E_v перпендикулярны оси вращения космического аппарата, которая находится в пределах 15° по направлению к Солнцу [15]. \tilde{E}_u и \tilde{E}_v – комплексные коэффициенты Фурье для E_u и E_v соответственно. Далее, используя измеренные значения \tilde{E}_u и \tilde{E}_v , проводятся вычисления левополяризованного электрического поля \tilde{E}_l и правополяризованного электрического поля \tilde{E}_r :

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

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

где Im обозначает мнимую часть, а $*$ – комплексное сопряжение.

После вычислений левой (1) и правой (2) составляющих поля эти значения усредняются за один оборот спутника (8 с) и затем находится поляризаационное отношение $(\langle \tilde{E}_r \rangle^2 - \langle \tilde{E}_l \rangle^2) / (\langle \tilde{E}_l \rangle^2 + \langle \tilde{E}_r \rangle^2)$ [15]. Важно отметить, что здесь поляризация вычисляется относительно оси вращения спутника, а не относительно вектора магнитного поля. Поэтому вблизи локальной полуночи излучения от источников в северном и в южном полушариях будут иметь противоположную поляризаацию. На поляризаационной спектрограмме (см. рис. 1, нижняя панель) синий цвет соответствует источникам из северного полушария, а красный — из южного. Поскольку поляризация на борту спутника определяется по направлению против Солнца, а магнитное поле находится в направлении Солнца в северном полушарии на ночной стороне, то положительное значение параметра P (красный цвет) указывает на левую поляризаацию по отношению к магнитному полю; а отрицательное (синий цвет) — на правую поляризаацию по отношению к магнитному полю [15]. Таким образом, результаты бортового расчета поляризации позволяют определить местонахождение источника АКР. Поэтому совместное изучение спектра мощности и спектра поляризации позволяет анализировать одновременные явления в северной и южной авроральной зоне.

На рис. 1 приведены результаты измерений 01 декабря 2017 г., когда наблюдается изменения доминирования АКР излучения. С 18:00 до 18:30 UT регистрировалось достаточно сильное АКР, источник которого находился в южном полушарии. Максимум интенсивности АКР приходится на ~18:27 UT. С 18:30 до 18:40 UT попеременно регистрируются излучения и от южного, и от северного источников, а после 18:40 UT доминирующим излучением является уже АКР от северного источника. Остается открытым вопрос либо это изменение высвпааний энергичных частиц из хвоста магнитосферы в ионосферу в южном полушарии к северному, либо это одновременная регистрация излучения от двух источников, но изменение их относительной интенсивности. Дальнейшие исследования необходимы, чтобы ответить на этот вопрос. Однако следует отметить, что авроральные явления зависят от сезона и солнечных циклов, что связано с изменением условий в ионосферной плазме [17]. Регистрация АКР 01 декабря 2017 г., приведенная на рис. 1, проводилась в то время, когда в северном полушарии была зима, а в южном — лето. Изменение условий развития циклотронной мазерной неустойчивости, которая ответственной за генерацию АКР в околоземной плазме, зависит от плотности фоновой плазмы, источником которой является ионосфера. Поскольку свойства ионосферной плазмы существенно изменяются в зависимости от сезона, то

и среднее положение области генерации отличается в зимнее и летнее время.

Для того чтобы выделить отдельно спектр мощности для северной и южной части АКР от общего спектра мощности S , мы в данном исследовании используем следующие выражения для получения спектра для южного полушария:

$$S_S = S \left(\frac{1+P}{2} \right) \quad (3)$$

и для северного полушария:

$$S_N = S \left(\frac{1-P}{2} \right). \quad (4)$$

Применяя формулы (3) и (4), на рис. 2 приводятся отдельно спектр мощности северных (верхняя панель) и южных (нижняя панель) источников АКР для случая, показанного на рис. 1. Хорошо видно, что до ~18:20 UT АКР от северных источников было слабое и преобладала только южная часть АКР. После ~18:40 UT несмотря на то, что северный источник АКР более заметен (см. рис. 2), в южном полушарии также генерировалось АКР.

Необходимо заметить, что АКР генерируется на локальной гирочастоте и диаграмма излучения центрирована на направление магнитного поля в точке генерации [2]. Поскольку магнитное поле наклонено в противосолнечном направлении, то, в зависимости от положения приемника, будет регистрироваться различная часть спектра излучения. Таким образом, может происходить частотное разделение разнесенных в пространстве источников АКР: излучение “дальних” (более полярных) источников регистрируется на спектрограмме на низких частотах, а излучение от “ближних” (более экваториальных) источников регистрируется на более высоких частотах.

Кроме того, для более глубокого анализа рассмотренного случая, мы высчитываем интегральную спектральную мощность отдельно для северного и южного АКР. Интегральная спектральная мощность рассчитывается как

$$U_{N,S} = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{N,S} df, \quad (5)$$

здесь в формуле (5) U_N соответствует АКР из северного полушария, а U_S — из южного соответственно.

Рисунок 3 демонстрирует интегральную спектральную мощность для северного АКР, показана пунктирной линией, и южного АКР — сплошной линией, для события, приведенного на рис. 1. Как явствует из рис. 3, четко наблюдается смена доминирования АКР из южного полушария до 18:30 UT на АКР из северных источников после 18:40 UT, то есть подтверждаются результаты, полученные

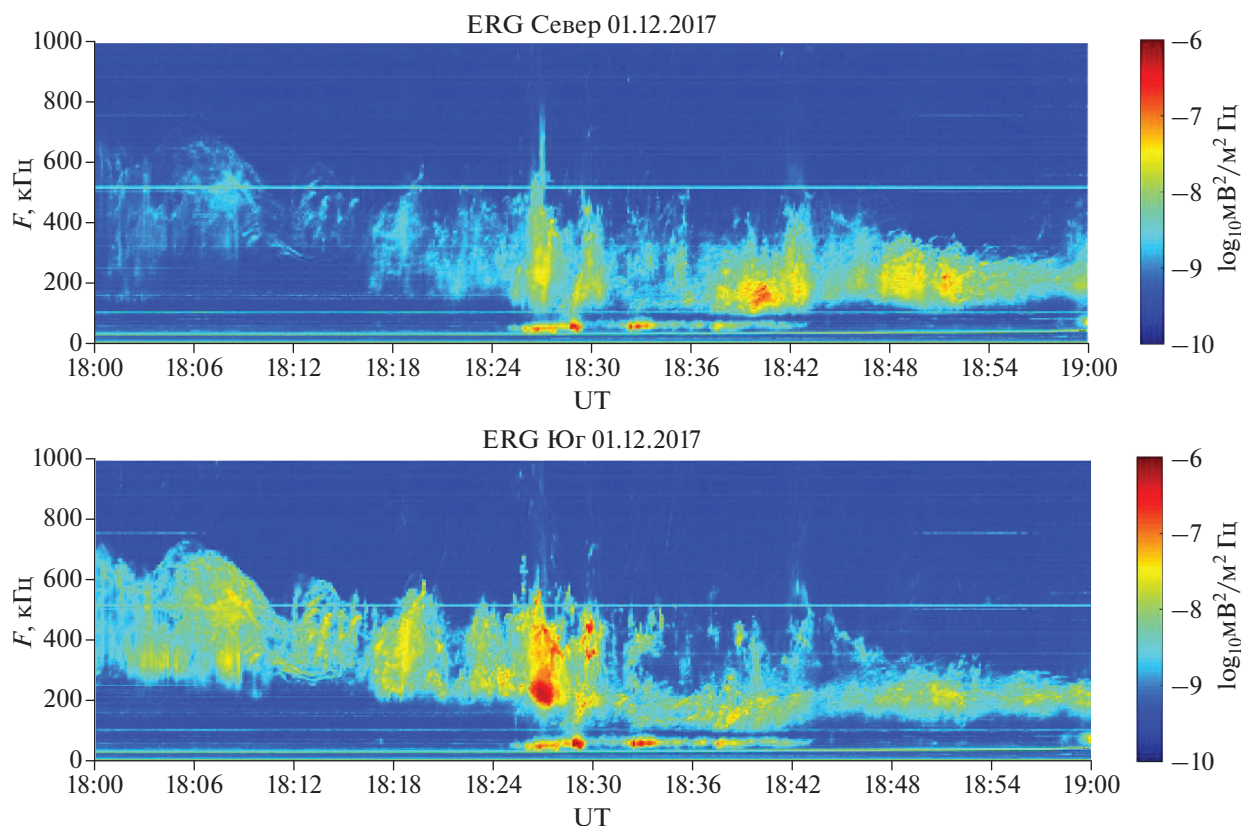


Рис. 2. Для случая, показанного на рис. 1. Спектр мощности северных (верхняя панель) и южных (нижняя панель) источников АКР.

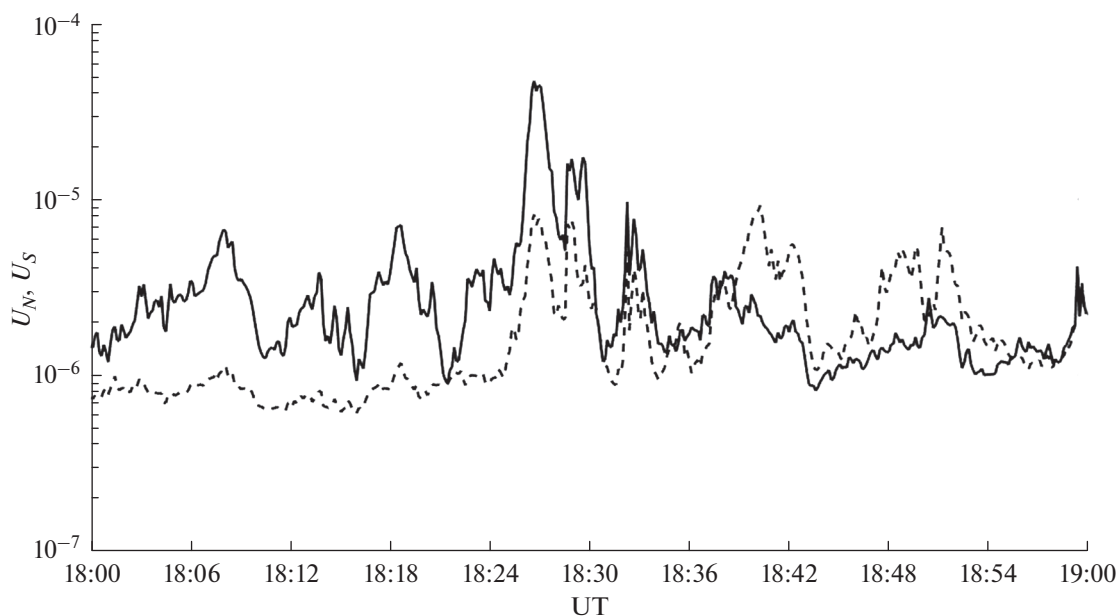


Рис. 3. Для случая, показанного на рис. 1. Интегральная спектральная мощность для северного (пунктирная линия) и южного (сплошная линия) АКР.

ранее из анализа динамических спектрограмм спектров мощности и спектрограммы поляризационных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя данные японского спутника ERG и особенности его орбиты, мы провели первые ис-

следования АКР вблизи экваториальной области и проанализировали свойства излучения. Используются результаты расчетов поляризации для разделения источников генерации АКР в северном и южном полушариях. АКР можно использовать для удаленной диагностики области аврорального ускорения частиц [18]. Известна зависимость интенсивности АКР от геомагнитной активности, а также суточные и сезонные вариации частоты генерации. Таким образом, АКР может выступать индикатором развития геомагнитной активности. Следовательно, наблюдения за изменением АКР, асимметрии между южным и северным источниками, могут дать дополнительную информацию о состоянии околоземной плазмы. Наличие на орбите спутника, способного разделить одновременный прием излучения от разных источников, — удобный инструмент для детального исследования геомагнитных возмущений в будущем. Кроме того, анализ развития циклотронной неустойчивости и возбуждения АКР в околоземной плазме позволит лучше понимать процессы и генерацию излучения типа АКР на других планетах и экзопланетах с магнитным полем.

Мы выражаем признательность А. Кумамото, Й. Касахара, Ф. Тсучия за предоставление данных прибора PWE/HFA, которые использовались в работе. 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/> [11, 12]. В исследовании анализируются данные прибора PWE HFA-L2 v01.01. [14, 15]. Чернышов А.А. и Колпак В.И. выражают признательность Фонду развития теоретической физики и математики “Базис”. Работа Могилевского М.М. выполнена при поддержке гранта Министерства высшего образования и науки РФ № 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039), работа Чернышова А.А. и Чугунина Д.В. поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-29-21037).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Сазонов Ю.А., Тарасов А.Ф.* // Космич. иссл. 1965. Т. 3. С. 492; *Benediktov E.A., Getmantsev G.G., Sazonov Yu.A., Tarasov A.F.* // *Cosm. Res.* 1965. V. 36. No. 6. P. 791.
2. *Treumann R.A.* // *Astron. Astrophys. Rev.* 2006. V. 13. No. 4. P. 229.
3. *Louarn P., Le Quéau D.* // *Planet. Space Sci.* 1996. V. 44. No. 3. P. 211.
4. *Могилевский М.М., Романцова Т.В., Ханаши Я. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 11. С. 819; *Mogilevsky M.M., Romantsova T.V., Hanash J. et al.* // *JETP Lett.* 2007. V. 86. No. 11. P. 709.
5. *Zarka P.* // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. Art. No. 20159
6. *Kurth W.S., Baumbach M.M., Gurnett D.A.* // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 2764.
7. *Benson R.F., Calvert W.* // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. P. 479.
8. *Wu C.S., Lee L.C.* // *Astrophys. J.* 1979. V. 230. P. 621.
9. *Viktorov M., Chernyshov A., Chugunin D., Mogilevsky M.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2021. V. 63. Art. No. 075014.
10. *Morioka, A., Miyoshi, Y., Tsuchiya, F. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. Art. No. A04211.
11. *Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 101.
12. *Miyoshi Y., Hori T., Shoji M. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 96.
13. *Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. и др.* // Солн.-земн. физ. 2021. Т. 7. № 1. С. 13; *Kolpak V., Mogilevsky M., Chugunin D. et al.* // *Sol.-Terr. Phys.* 2021. V. 7. No. 1. P. 11.
14. *Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 86.
15. *Kumamoto A., Tsuchiya F., Kasahara Y. et al.* // *Earth Planets Space.* 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 82. P. 14.
16. *Xiao F., Zhou Q., Su Z. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. Art. No. 11971.
17. *Morooka M., Mukai T.* // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. No. A7. P. 1306.
18. *Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л. и др.* // Геомагн. и аэроном. 2020. Т. 60. № 5. С. 566; *Chugunin D.V., Chernyshov A.A., Moiseenko I.L. et al.* // *Geomagn. Aeron.* 2020. V. 60. No. 5. P. 538.

Simultaneous observation of auroral kilometric radiation from northern and southern sources

A. A. Chernyshov^{a, *}, M. M. Mogilevsky^a, D. V. Chugunin^a, V. I. Kolpak^{a, b}

^a Space Research Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, 117997 Russia

^b National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia

*e-mail: achernyshov@iki.rssi.ru

The results of auroral kilometric radiation (AKR) observations from sources in the auroral regions of the northern and southern hemispheres, which are simultaneously recorded and analyzed using data of the ERG (Arase) satellite are presented. It is noted that there are differences in the AKR generation in the northern and southern hemispheres. It is shown that either northern or southern sources of AKR prevail at different times.