

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АВРОРАЛЬНОГО
КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
НА СПУТНИКЕ ERG (ARASE)**

**STATISTICAL PROPERTIES OF AURORAL KILOMETER RADIATION:
BASED ON ERG (ARASE) SATELLITE DATA**

В.И. Колпак

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, lera.kolpak@yandex.ru
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»,
Москва, Россия, lera.kolpak@yandex.ru*

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*

А. Кумамото

*Университет Тохоку,
Сэндай, Япония, kumamoto@stpp.gp.tohoku.ac.jp*

Ф. Тсучия

*Университет Тохоку,
Сэндай, Япония, tsuchiya@pparc.gp.tohoku.ac.jp*

Е. Касахара

*Университет Канадзава,
Канадзава, Япония, kasahara@is.t.kanazawa-u.ac.jp*

М. Шойи

*Университет Нагойя,
Нагойя, Япония, masafumi.shoji@nagoya-u.jp*

Е. Миёши

*Университет Нагойя,
Нагойя, Япония, miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp*

И. Шинохара

*Институт космонавтики и астронавтики,
Японское агентство аэрокосмических исследований,
Токио, Япония, iku@stp.isas.jaxa.jp*

V.I. Kolpak

*Space Research Institute of RAS,
Moscow, Russia, lera.kolpak@yandex.ru
National Research University "Higher School of Economics",
Moscow, Russia, lera.kolpak@yandex.ru*

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*

A. Kumamoto

*Tohoku University,
Sendai, Japan, kumamoto@stpp.gp.tohoku.ac.jp*

F. Tsuchiya

*Tohoku University,
Sendai, Japan, tsuchiya@pparc.gp.tohoku.ac.jp*

Y. Kasahara

*Kanazawa University,
Kanazawa, Japan, kasahara@is.t.kanazawa-u.ac.jp*

M. Shoji

*Nagoya University,
Nagoya, Japan, masafumi.shoji@nagoya-u.jp*

Y. Miyoshi

*Nagoya University,
Nagoya, Japan, miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp*

I. Shinohara

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency,
Tokyo, Japan, iku@stp.isas.jaxa.jp*

Аннотация. В данной работе впервые исследованы одновременно зарегистрированные одним спутником сигналы аврорального километрового радиоизлучения (АКР) от источников в авроральных областях Северного и Южного полушарий. В ходе выполнения настоящего исследования проведена подробная статистическая обработка непрерывных измерений АКР продолжительностью более двадцати месяцев на спутнике ERG (Arase), которая позволила подтвердить ранее полученные результаты о расположении источников АКР и сезонных изменениях интенсивности излучения. Открытые вопросы о процессах в источнике АКР могут быть решены с использованием данных о диаграмме направленности

Abstract. In this work, we have studied the signals of auroral kilometer radiation (AKR) from sources in the auroral regions of the Northern and Southern hemispheres simultaneously recorded by one satellite. We have carried out a detailed statistical analysis of more than 20 months of continuous AKR measurements made by the ERG satellite (also known as Arase). This made it possible to confirm the previously obtained results on the location of AKR sources and seasonal changes in the radiation intensity. Open questions about the processes in the AKR source can be solved using data on the radiation pattern under various geomagnetic conditions. To answer these questions, we have estimated the cone angle of directional

излучения в различных геомагнитных условиях. Для ответа на эти вопросы сделана оценка угла раствора конуса диаграммы направленности АКР в вечернем и утреннем секторах магнитосферы Земли.

Ключевые слова: авроральное километровое радиоизлучение, магнитосфера, авроральная активность, спутниковые измерения.

diagrams in the dusk and dawn sectors of Earth's magnetosphere.

Keywords: auroral kilometer radiation, magnetosphere, auroral activity, satellite measurements.

ВВЕДЕНИЕ

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) представляет собой мощное естественное электромагнитное излучение в диапазоне частот 30–800 кГц (максимум излучения наблюдается от 100 до 300 кГц), генерируемое в околоземной плазме и распространяющееся от Земли. Впервые АКР было зарегистрировано на спутнике «Электрон-2» в 1965 г. [Бенедиктов и др., 1965]. Уже в первых исследованиях АКР определены важные свойства этого излучения — частотный диапазон, поляризация излучения, зависимость интенсивности излучения от геомагнитной активности и другие. [Gurnett, 1974; Kurth et al., 1975; Benson, Calvert, 1979]. В ранних работах, посвященных исследованию природы АКР, было установлено, что источники этого излучения расположены в авроральной области, связаны с дискретными полярными сияниями и находятся в вечернем и ночном секторах магнитосферы на инвариантных широтах около 70° на высотах $(2\div 10)10^3$ км [Kurth et al., 1975; Benson, Calvert, 1979]. Механизм генерации АКР оставался неизвестным более десяти лет после обнаружения излучения вплоть до появления статьи [Wu, Lee, 1979], в которой для интерпретации АКР был предложен механизм циклотронной мазерной неустойчивости. Такая неустойчивость развивается в авроральной магнитосфере в областях с пониженной плотностью плазмы, где электронная плазменная частота ниже, чем локальная гирочастота электронов $\omega_{pe} = (4\pi e^2 N/m)^{1/2} < \omega_{ce} = eB/(mc)$. Источником энергии излучения являются сверхтепловые электроны (несколько килоэлектронвольт), которые инжектируются из хвоста магнитосферы в ее внутренние области во время геомагнитных возмущений. АКР генерируется на локальной гирочастоте электронов и в источнике направлено поперек магнитного поля. В последующих исследованиях [Louarn, Le Quéau, 1996; Буринская, Рош, 2007] было показано, что источник излучения включает в себя волновод, который «вытягивает» излучение вдоль силовых линий магнитного поля, а стенками этого волновода может быть не только градиент плотности фоновой плазмы, но и граница потока сверхтепловых частиц [Буринская, Рош, 2007].

В работе [Чугунин и др., 2020] исследовано регулярное изменение вейвлет-спектров флуктуаций АКР вдоль магнитной силовой линии, причем на большой высоте спектр флуктуаций носит степенной характер, а на малой распределение флуктуаций становится равномерным по всем характерным временам, что указывает на сложные нелинейные процессы в источнике АКР.

Генерация излучений типа АКР является результатом взаимодействия потоков плазмы от Солнца (звезды) с магнитным полем планет. Аналогичные по природе (но не по частоте) излучения были обнаружены от Юпитера, Сатурна, Урана, спутника Юпитера Ио, поскольку такой тип излучения является характерным свойством космических тел, обладающих магнитным полем [Zarka, 1998].

В настоящее время основные свойства АКР достаточно хорошо изучены, что позволяет использовать это излучение для диагностики процессов в магнитосфере Земли. Открытые вопросы, касающиеся процессов в источнике АКР могут быть решены с использованием данных о диаграмме направленности излучения в различных геомагнитных условиях. Решению этих задач посвящена настоящая работа.

СПУТНИК ERG И ЕГО ОРБИТА

Японский спутник ERG (Exploration of Energization and Radiation in Geospace) был запущен 20 декабря 2016 г., после выхода на орбиту переименован в Arase (в честь реки у точки старта) [Miyoshi et al., 2018a, b] и продолжает успешно работать в настоящее время. Данный космический аппарат имеет массу ~350 кг, орбиту с апогеем ~32 000 км, перигеем ~400 км и наклоном 31° и период обращения ~570 мин. Основная задача этой космической миссии — исследование физических процессов в радиационных поясах. Для ее решения орбита спутника была выбрана таким образом, что апогей эволюционирует с периодом ~14 мес. как в плоскости XY, так и по оси Z.

Измерения АКР на спутнике ERG представляют большой интерес, поскольку дают возможность непосредственного сравнения излучения от источников, расположенных в Северном и Южном полушариях. Хотя изучение АКР не входит в приоритетные задачи программы измерений спутника, измерительные возможности бортовых приборов позволяют проводить такие исследования. Для исследования АКР мы использовали измерения электрической составляющей поля в эксперименте PWE/HFA [Kumamoto et al., 2018], предназначенном для измерения постоянного электрического поля и плазменных волн, в диапазоне частот от постоянного поля до 10 МГц для электрического поля и от нескольких герц до 100 кГц для магнитного поля [Kasahara et al., 2018].

Для внутренней магнитосферы Земли в первом приближении можно полагать, что плотность плазмы изменяется пропорционально величине модуля магнитного поля. Результаты моделирования показывают,

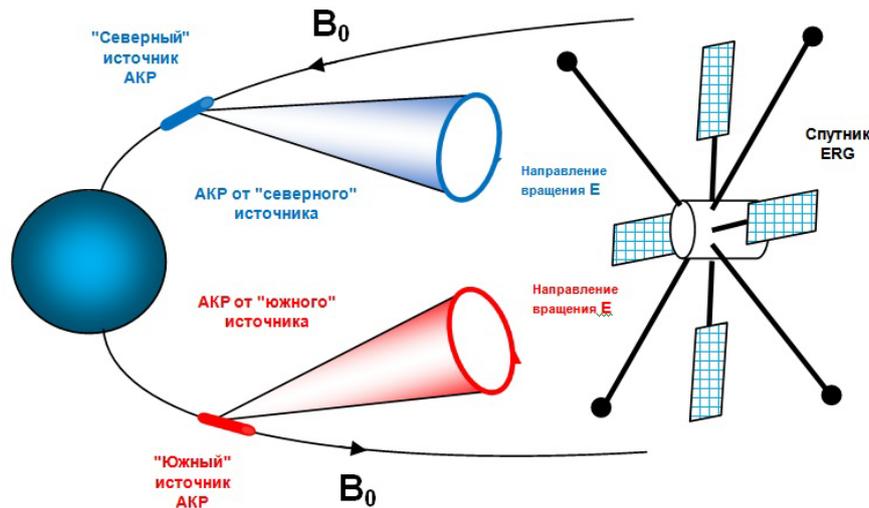


Рис. 1. Схема, поясняющая различие параметра $(E_r^2 - E_i^2)/(E_r^2 + E_i^2)$ в зависимости от положения источника. B_0 — постоянное магнитное поле Земли.

что на частотах выше 100 кГц влияние плазмосферы на распространение излучения незначительно и можно использовать простую геометрическую схему [Xiao et al., 2016].

Известно, что на выходе из источника АКР имеет в основном электронную (правую) поляризацию в Северном полушарии. Спутник ERG может регистрировать излучения с противоположными направлениями поляризации от северных и южных источников, что позволяет определить местоположение источника АКР. На поляризационной спектрограмме (рис. 1) синий цвет соответствует северным источникам, красный — южным. Для анализа АКР важна не столько величина параметра относительной поляризации, сколько переход этого параметра через ноль, что указывает на преимущественное положение потока мощности. Совместное рассмотрение спектра мощности излучения и спектра поляризации позволяет проанализировать одновременные явления, происходящие в северной и южной авроральных областях.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ АКР НА СПУТНИКЕ ERG И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе использованы результаты первичной обработки полученных в эксперименте PWE измерений электромагнитных полей в диапазоне частот от нескольких килогерц до 15 МГц [Kasaba et al., 2017; Kasahara et al., 2018].

Отбор измерений АКР проводился с помощью стандартной спектральной обработки сигналов. Данные спутника ERG представлены на сайте проекта [https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp]. Измерения электрических компонент проводились практически непрерывно, что после статистической обработки позволяло получить однородную картину распределения интенсивности излучений на длительных интервалах времени с марта 2017 по декабрь 2018 г.

За это время в результате эволюции орбиты спутника z -компонента апогея совершила почти полный цикл от Северного полушария до Южного (рис. 2, а). Магнитное локальное время MLT апогея орбиты показано на панели б. В выбранном интервале времени изменения MLT апогея превышают 24 ч, что позволяет получить полную картину распределения интенсивности АКР, т. е. апогей спутника совершил полный оборот в плоскости эклиптики.

Измерения электрической компоненты, представленные на сайте [https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/cef/test/erg_test.cgi?site] были разделены на двухчасовые интервалы, в каждом из которых анализировалась интенсивность излучения в диапазоне частот 100–800 кГц и определялось характерное значение АКР. Полученный ряд использовался для анализа интегральной интенсивности, и на первом этапе проводилось усреднение за 30 дней (больше периода обращения Солнца), чтобы повысить достоверность значений и минимизировать влияние геомагнитной активности. Результирующая кривая зависимости интегральной интенсивности АКР показана на рис. 2, в. Можно выделить несколько характерных интервалов в зависимости от условий наблюдений (отмечены красным цветом):

- интервал 1, 23.03.2017–01.06.2017 — апогей орбиты спутника находился в утреннем секторе магнитосферы вблизи плоскости эклиптики в Северном полушарии;
- интервал 2, 01.06.2017–23.10.2017 — большая часть орбиты находилась в Северном полушарии в полуночном и вечерних секторах магнитосферы;
- интервал 3, 23.10.2017–01.06.2018 — основная часть орбиты находилась в дневной магнитосфере;
- интервал 4, 01.06.2018–10.10.2018 — апогей орбиты был в Южном полушарии в области, благоприятной для генерации АКР — в ночном и утреннем секторах;
- интервал 5, 10.10.2018–23.12.2018 — аналогичен интервалу 1, но для Южного полушария.

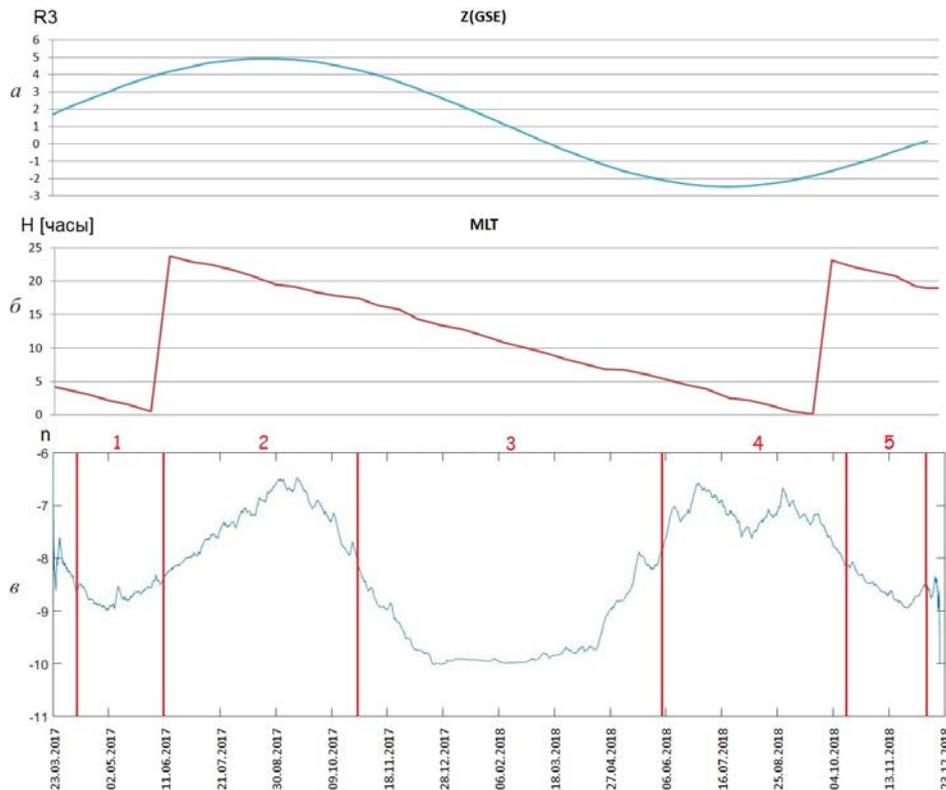


Рис. 2. Результаты статистической обработки измерений АКР с марта 2017 по декабрь 2018 г.

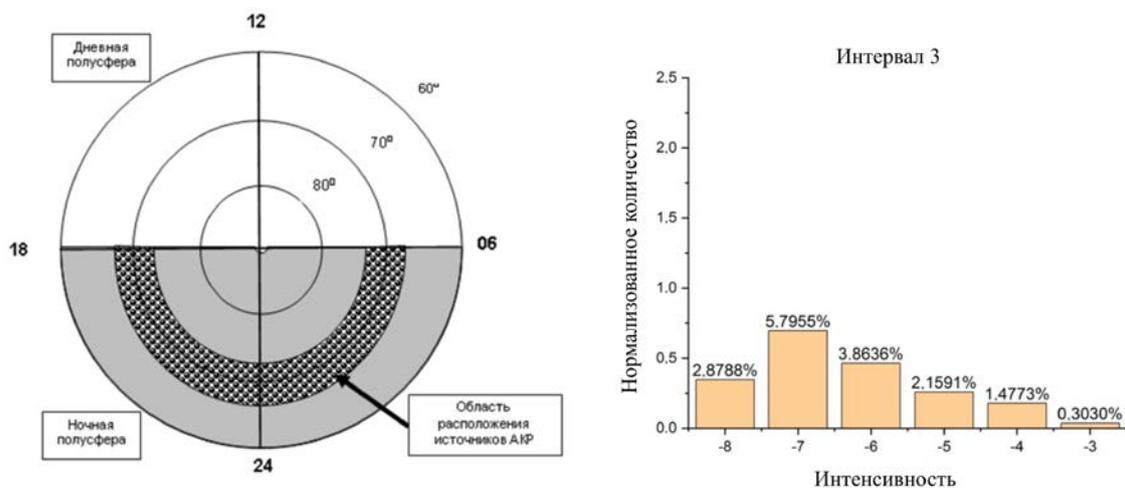


Рис. 3. Слева — общепринятая область расположения источников АКР в координатах ϕ_m (геомагнитная широта) и MLT. Справа — схематический спектр АКР в интервале 3. Интенсивность — степени десяти, $\text{mB}^2/(\text{m}^2 \text{ Гц})$. Над нормализованным количеством двухчасовых интервалов указан процент наблюдавшихся излучений от общего количества измерений

Наименьшие значения интегральной интенсивности АКР наблюдаются на интервале 3. Как было показано в целом ряде работ, например [Benson, Calvert, 1979], источники АКР расположены в вечернем, ночном и утреннем секторах магнитосферы между 18 и 06 MLT (рис. 3). Однако на рис. 2, в мы видим так называемое «затекание» АКР в дневной сектор: излучение регистрируется за границами расположения источников — в вечернем (15–18 MLT) и утреннем (6–8 MLT) секторах. Это связано с конечными размерами диаграммы направленности

излучения: в вечернем секторе затекание на три часа MLT соответствует раствору конуса излучения $\sim \pm 45^\circ$ ($3^\circ \times 15^\circ$), а в утреннем секторе раствор составляет $\sim \pm 30^\circ$. Такое отличие может быть связано с различными условиями в источнике. Возможно, из-за градиентного дрейфа плотность сверхтепловых электронов в утреннем секторе выше, что приводит к увеличению длины волновода и сужению конуса излучения. Полученные значения раскрытия конусов излучения в целом согласуются с результатами исследований, полученных ранее другим спо-

собом [Могилевский и др., 2007; Benson, 1982]. Однако для полного понимания различия растворов конуса излучения в вечернем и утреннем секторах требуется дальнейшее исследование.

В интервале 2 (рис. 2) положение апогея спутника было смещено в сторону Северного полушария ($z > 0$) и поэтому наблюдались излучения преимущественно от северных источников. Такой вывод можно сделать на основании анализа отношения амплитуд левой и правой поляризации. Максимальное значение интегральной мощности АКР наблюдается в 20 MLT, а затем начинается постепенное уменьшение интенсивности (рис. 2). Можно предположить, что это уменьшение связано с уменьшением значения координаты z_{GSE} , что приводит к ухудшению условий наблюдения АКР от источников в Северном полушарии. На рис. 4 показаны результаты спектрального анализа АКР, зарегистрированного 6 июня 2017 г. как типичные измерения излучений на интервале 2, а также схематическая спектрограмма интенсивности АКР на всем интервале 2. При сравнении схематических спектрограмм на рис. 3, 4 выделяются следующие отличия:

- интенсивности (количество интервалов) всех амплитуд на интервале 2 существенно больше, чем на интервале 3;
- схематический спектр на интервале 3 имеет падающий характер (минимальное значение недостоверно, поскольку зашумлено), а на интервале 2 спектр практически плоский.

Отличие интенсивностей связано с отсутствием источников излучения на дневной стороне, а различие в характере схематических спектров связано, по-видимому, с затеканием излучения в эту область и отсутствием самих источников.

На спектрограммах АКР (рис. 4, слева) можно выделить излучения трех типов. Наиболее низкочастотное излучение от 100 до 300 кГц имеет максимум интенсивности в ~12:40, его источник находится в Южном полушарии, а длительность превышает почти 2 ч. Эти излучения отображаются на поляризационной спектрограмме (нижней) красным цветом. Излучение другого типа в полосе частот от 300 до 600 кГц (с отдельными всплесками до ~800 кГц), имеет интенсивность, сравнимую с южным излучением, регистрируется в течение всего времени наблюдения и имеет источник в Северном полушарии (на поляризационной спектрограмме отображается синим или голубым цветами). Переход от синего цвета к голубому и обратно может быть связан с одновременной регистрацией в одних и тех же диапазонах частот излучений двух типов от северных и южных источников. В этом случае при неизменной амплитуде излучения происходит уменьшение поляризационных коэффициентов, что и наблюдается на нижней спектрограмме. В интервале 12:20–13:16 наблюдается еще более высокочастотное излучение 500–700 кГц. Поляризация этого излучения указывает на источник, расположенный на юге. По-видимому, это вторая или третья гармоника АКР от тех же южных источников [Benson, 1982]. Кроме того, заметим, что может происходить частотное разделение разнесенных в пространстве

источников: излучение дальних (более полярных) источников регистрируется на спектрограмме на низких частотах, а излучение от ближних (более экваториальных) источников — на более высоких.

В интервале 4 (рис. 2) положение апогея спутника было смещено в сторону южного полушария ($z < 0$) и на спутнике наблюдались излучения, преимущественно от южных источников. В южном полушарии в это время была местная зима и поэтому средняя интенсивность заметно выше, чем в предыдущем интервале (больше максимумов).

Аналогично интервалу 2, на верхней спектрограмме изображён участок АКР, характерный для данного интервала. По нижней спектрограмме можно определить, из какого полушария пришло излучение. На спектрограмме преобладает красный цвет, а это значит, что излучение пришло от южных источников.

На рис. 5 на спектрограммах отмечается излучение на частотах выше 800–1000 кГц, которые являются гармониками основного излучения от южного источника, но такие гармоники от северного источника отсутствуют. Такая картина наблюдается, в том числе и в 11:46, когда доминирующим является излучение от северного источника. Это указывает на пространственную фильтрацию, которая обсуждалась выше. Схематический спектр мощности АКР, зарегистрированного на интервале 4, по мощности и интенсивности близок измерениям на интервале 2 — распределение по интенсивности близко к плоскому.

В 11:00–11:23 в диапазоне частот 1.3–1.5 МГц наблюдается континуум-излучение — синхротронное излучение электронов радиационного пояса.

На схематических спектрах мощности на рис. 4, 5 каждое последующее значение отличается на порядок от предыдущего и поэтому наибольшая мощность соответствует самому правому столбику — $10^{-3} \text{ мВ}^2/(\text{м}^2\text{Гц})$. Сравнение значений на рис. 4, 5 показывает, что на интервале 4 средняя интенсивность излучения почти в два раза выше, чем на интервале 2. Это связано с сезонной зависимостью интенсивности излучения АКР. Измерения на интервале 2 проводились летом в Северном полушарии ($z > 0$), а на интервале 4 в Южном полушарии была локальная зима ($z < 0$). В работах [Kasaba et al., 1997; Могилевский и др., 2005] было показано, что в летний период потоки разогретой ионосферной плазмы поднимаются из авроральной ионосферы в магнитосферу и подавляют генерацию излучения АКР на малых высотах. В результате этого спектр АКР становится более узким, что приводит к уменьшению интегральной интенсивности излучения.

При сравнении средней интенсивности АКР в интервалах 2 и 4 можно отметить наличие двух максимумов интенсивности в интервале 4. Подъем интенсивности в интервале 08–05 MLT вполне объясним и связан с размерами конуса излучения источника АКР (см. выше). Но последующее уменьшение средней интенсивности и минимум в ~2.5 MLT в настоящее время не имеют объяснения. Наличие такого минимума представляется особенно странным, если учесть, что апогей орбиты спутника в это время находился при минимальном значении z , таким образом,

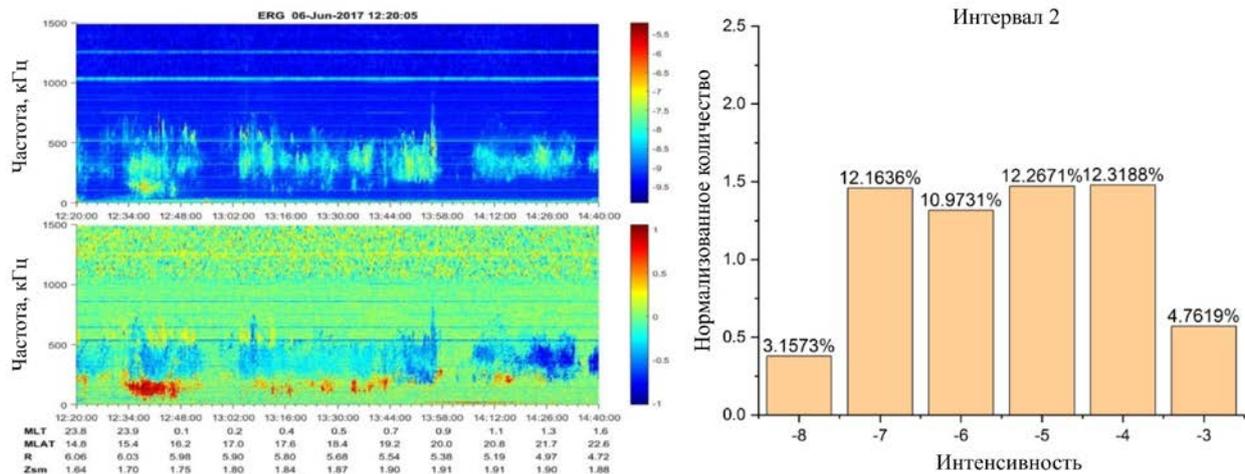


Рис. 4. Слева — спектральный анализ АКР, зарегистрированного 6 июня 2017 г. Вверху — динамическая спектрограмма спектра мощности, внизу — спектрограмма поляризационных параметров $(E_r^2 - E_i^2)/(E_r^2 + E_i^2)$. Справа – схематический спектр мощности АКР, зарегистрированного на всем интервале 2 (аналогично рис. 3)

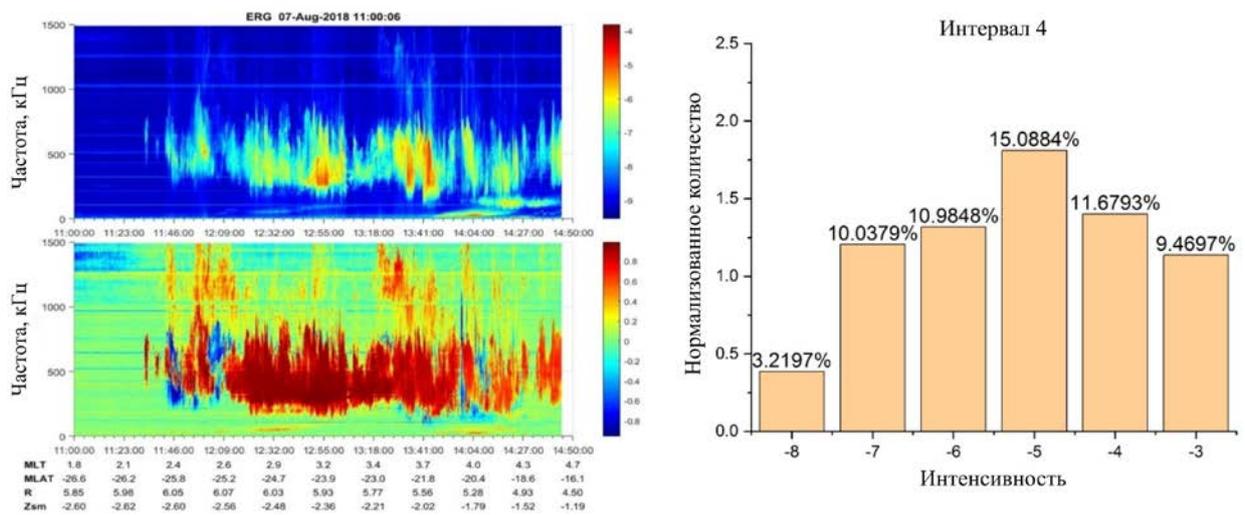


Рис. 5. Слева — спектральный анализ АКР, зарегистрированного 7 августа 2018 г. Вверху — динамическая спектрограмма спектра мощности, внизу — спектрограмма поляризационных параметров. Справа – схематический спектр мощности АКР, зарегистрированного на всем интервале 2

были наилучшие условия регистрации АКР от южных источников. Эту особенность планируется детально проанализировать в будущих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые исследованы одновременно зарегистрированные сигналы АКР от источников в авроральных областях Северного и Южного полушарий на одном спутнике (ERG). Статистическая обработка большого массива измерений АКР (более 20 мес. непрерывных измерений) дала следующие результаты.

- Проведено подробное исследование АКР вблизи экваториальной области и проанализированы свойства излучения.
- Подтверждены ранее полученные результаты о расположении источников АКР, в частности, о возможности появления нескольких источников в авро-

ральной области и сезонных изменениях интенсивности излучения — уменьшение интенсивности в летнее время и повышение в зимнее.

- Сделана оценка величины конуса диаграммы направленности излучения АКР: в вечернем секторе магнитосферы раствор конуса излучения составляет $\pm 45^\circ$, в утреннем — $\pm 30^\circ$.

Данные спутника ERG (Arase), а также описание и характеристики научных приборов получены от научного центра ERG под управлением Института космонавтики и астронавтики Японского агентства аэрокосмических исследований и ISEE/Университет Нагоя [https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp, Miyoshi et al., 2018b]. В исследовании анализируются данные прибора PWE HFA-L2 v01.01. [Kumamoto et al., 2018].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-21037).

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» // Иссл. космического пространства / под ред. Скудрина Г.А. М.: Наука, 1965. 581 с.

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.

Могилевский М.М., Моисеенко И.Л., Ханаш Я. Изменения спектра и длинноволновые вариации интенсивности АКР по измерениям на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 // Письма в АЖ, 2005. Т. 31, № 6. С. 474.

Могилевский М.М., Романцова Т.В., Ханаш Я. и др. Об источнике аврорального километрового излучения // Письма в ЖЭТФ, 2007. Т. 86. Вып. 11. С. 819–821.

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. 566–575. DOI: [10.31857/S0016794020040033](https://doi.org/10.31857/S0016794020040033).

Benson R.F. Harmonic auroral kilometric radiation of natural origin // *Geophys. Res. Lett.* 1982. Vol. 9. P. 1120–1123. DOI: [10.1029/GL009i009p01120](https://doi.org/10.1029/GL009i009p01120).

Benson R.F., Calvert W. ISIS-1 observations of the source of AKR // *Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 6. P. 479.

Gurnett D.A. The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79. P. 4227.

Kasaba Y., Matsumoto H., Hashimoto K., Anderson R.R. The angular distribution of auroral kilometric radiation observed by GEOTAIL spacecraft // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. P. 2483.

Kasaba Y., Ishisaka K., Kasahara Y., et al. Wire Probe Antenna (WPT) and Electric Field Detector (EFD) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arase satellite: specifications and initial evaluation results // *Earth, Planets and Space*. 2017. Vol. 69, iss. 1. Article id. 174. 18 p. DOI: [10.1186/s40623-017-0760-x](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0760-x).

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, iss. 1. Article id. 86. 28 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, iss. 1. Article id. 82. 14 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0854-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0854-0).

Kurth W.S., Baumbach M.M., Gurnett D.A. Direction finding measurements of auroral kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. 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.

Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., et al. Geospace Exploration Project ERG // *Earth, Planets and Space*. 2018a. Vol. 70, iss. 1. Article id. 101. 13 p. 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, iss. 1. Article id. 96. 11 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0867-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0867-8).

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

Xiao F., Zhou Q., Su Z., et al. Explaining occurrences of auroral kilometric radiation in Van Allen radiation belts // *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43. P. 11971–11978. DOI: [10.1002/2016GL71728](https://doi.org/10.1002/2016GL71728).

Zarka P. Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 20159.

URL: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/cef/test/erg_test.cgi?site (дата обращения 18 июня 2020 г.).

REFERENCES

Benediktov E.A., Getmancev G.G., Mitjakov N.A., Rapoport V.A., Sazonov Ju.A., Tarasov A.F. Results of measuring the intensity of radio emission at 725 and 1525 kHz frequencies using the equipment installed on “ELECTRON-2” satellite. *Issledovanija kosmicheskogo prostranstva*: [Space exploration]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 581 p. (In Russian).

Benson R.F. Harmonic auroral kilometric radiation of natural origin. *Geophys. Res. Lett.* 1982, vol. 9, pp. 1120–1123. DOI: [10.1029/GL009i009p01120](https://doi.org/10.1029/GL009i009p01120).

Benson R.F., Calvert W. ISIS-1 observations of the source of AKR. *Geophys. Res. Lett.* 1979, vol. 6, p. 479.

Burinskaja T.M., Rosh Zh.L. Waveguide regime of cyclotron maser instability in plasma regions with reduced density. *Fizika plazmy* [Plasma Phys.]. 2007, vol. 33, no. 1, p. 28. (In Russian).

Chugunin D.V., Chernyshov A.A., Moiseenko I.L., Viktorov M.E., Mogilevskij M.M. Monitoring of the electron-acceleration region with auroral kilometric radiation. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020, vol. 60, iss. 5, p. 538–546. DOI: [10.1134/S0016793220040039](https://doi.org/10.1134/S0016793220040039).

Gurnett D.A. The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, p. 4227.

Kasaba Y., Matsumoto H., Hashimoto K., Anderson R.R. The angular distribution of auroral kilometric radiation observed by GEOTAIL spacecraft. *Geophys. Res. Lett.* 1997, vol. 24, p. 2483.

Kasaba Y., Ishisaka K., Kasahara Y., Imachi T., Yagitani S., Kojima H., Matsuda S., Shoji M., Kurita S., Hori T., Shinbori A., Teramoto M., Miyoshi Y., Nakagawa T., Takahashi N., Nishimura Y., Matsuoka A., Kumamoto A., Tsuchiya F., Nomura R. Wire Probe Antenna (WPT) and Electric Field Detector (EFD) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arise satellite: specifications and initial evaluation results. *Earth, Planets and Space*. 2017, vol. 69, iss. 1, article id. 174, 18 p. DOI: [10.1186/s40623-017-0760-x](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0760-x).

Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H., Yagitani S., Ishisaka K., Kumamoto A., et al. The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite. *Earth, Planets and Space*. 2018, vol. 70, iss. 1, article id. 86, 28 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0842-4](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0842-4).

Kumamoto A., Tsuchiya F., Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H., Yagitani S., Ishisaka K., Imachi T., Ozaki M., Matsuda S., Shoji M., Matsuoka A., Katoh Y., Miyoshi Y., Obara T. High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the Arase spacecraft. *Earth, Planets and Space*. 2018, vol. 70, iss. 1, article id. 82. 14 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0854-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0854-0).

Kurth W.S., Baumbach M.M., Gurnett D.A. Direction finding measurements of auroral kilometric radiation. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, 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.

Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., Asamura K., Higashio N., Mitani T., Kasahara S., Yokota S., Kazama Y., Wang S.-Yu, Tam S.W.Y., Ho P.T.P., Kasahara Y., Kasaba Y., Yagitani S., Matsuoka A., Kojima H., Katoh Y., Shiokawa K., Seki K. Geospace Exploration Project ERG. *Earth, Planets and Space*. 2018a, vol. 70, iss. 1, article id. 101, 13 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0862-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0862-0).

Miyoshi Y., Hori T., Shoji M., Teramoto M., Chang T.F., Segawa T., Umemura N., Matsuda S., Kurita S., Keika K., Miyashita Y., Seki K., Tanaka Y., Nishitani N., Kasahara S., Yokota S., Matsuoka A., Kasahara Y., Asamura K., Takashima T.,

В.И. Колпак, М.М. Могилевский, Д.В. Чугунин,
А.А. Чернышов, И.Л. Моисеенко, А. Кумamoto, Ф. Тсучия,
Е. Касахара, М. Шойи, Е. Миешу, И. Шинохара

Shinohara I. The ERG Science Center. Earth. *Planets and Space*. 2018b, vol. 70, iss. 1, article id. 96, 11 p. DOI: [10.1186/s40623-018-0867-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0867-8).

Mogilevsky M.M., Moiseenko I.L., Hanasz J. Spectral variations and long-period intensity variations of auroral kilometric radiation from INTERBALL-2 satellite measurements. *Pis'ma v Astronomicheskii zhurnal* [Astronomy Lett.]. 2005, vol. 31, iss. 6, pp. 422–426. DOI: [10.1134/1.1940115](https://doi.org/10.1134/1.1940115).

Mogilevsky M.M., Romancova T.V., Hanash Ja., Burinskaja T.M., Shrajber R. About the source of auroral kilometric radiation. *Pis'ma v ZhETF* [J. Experimental and Theoretical Phys. Lett.]. 2007, vol. 86, iss. 11, pp. 819–821. (In Russian).

Wu C.S., Lee L.C. A theory of the terrestrial kilometric radiation. *Astrophys. J.* 1979, vol. 230, p. 621.

V.I. Kolpak, M.M. Mogilevsky, D.V. Chuginin,
A.A. Chernyshov, I.L. Moiseenko, A. Kumamoto, F. Tsuchiya,
Y. Kasahara, M. Shoji, Y. Miyoshi, I. Shinohara

Xiao F., Zhou Q., Su Z., He Z., Yang C., Liu S., He Y., Gao Z. Explaining occurrences of auroral kilometric radiation in Van Allen radiation belts. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, pp. 11971–11978. DOI: [10.1002/2016GL71728](https://doi.org/10.1002/2016GL71728).

Zarka P. Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, p. 20159.

URL: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp> (accessed June 18, 2020).

URL: https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/cef/test/erg_test.cgi?site (accessed June 18, 2020).

Как цитировать эту статью:

Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л., Кумamoto А., Тсучия Ф., Касахара Е., Шойи М, Миешу Е., Шинохара И. 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).