

ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА ГЕКТОМЕТРОВЫЙ КОНТИНУУМ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

MAIN STATISTICAL PROPERTIES OF HECTOMETRIC CONTINUUM RADIATION IN NEAR-EARTH SPACE

Д.А. Дорофеев

Высшая школа экономики,
Москва, Россия, dadorofeev_1@edu.hse.ru
Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия

А.А. Чернышов 

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, achernyshov@cosmos.ru

Д.В. Чугунин 

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

М.М. Могилевский

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

D.A. Dorofeev

Higher School of Economics,
Moscow, Russia, dadorofeev_1@edu.hse.ru
Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia

A.A. Chernyshov

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, achernyshov@cosmos.ru

D.V. Chuginin

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, dimokch@iki.rssi.ru

M.M. Mogilevsky

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

Аннотация. В работе исследуется недавно обнаруженное гектометровое континуум-излучение в околоземной плазме. С использованием данных спутника ERG (Arase) проведен подробный статистический анализ возникновения гектометрового континуума вблизи Земли на расстояниях 1.1–2 радиуса Земли за двухлетний период. Установлена зависимость генерации гектометрового излучения от местного магнитного времени. Показано, что данный тип континуум-излучения возникает в основном в ночное и утреннее время. Исследована зависимость возникновения гектометрового излучения от геомагнитной активности, и продемонстрировано, что нет прямой зависимости возникновения гектометрового излучения от геомагнитных возмущений. Кроме того, статистический анализ позволил выявить локализацию источника (источников) такого типа радиоизлучения в околоземном пространстве и показать, что источник (источники) гектометрового континуум-излучения расположен на низких широтах.

Ключевые слова: радиоизлучение, гектометровое континуум-излучение, магнитосфера, спутниковые измерения.

Abstract. In this work, we have studied the recently discovered hectometric continuum radiation in near-Earth plasma. We have carried out a detailed statistical analysis of the occurrence of a hectometric continuum near Earth at distances 1.1–2 R_e , where R_e is the Earth radius, for a two-year period, using data from the ERG (Arase) satellite. We have established that the generation of the hectometric radiation depends on the local magnetic time. The continuum radiation of this type is shown to occur mainly at night and in the morning. We have also studied the dependence of the occurrence of hectometric radiation on geomagnetic activity and have demonstrated that there is no direct dependence of the occurrence of hectometric radiation on geomagnetic disturbances. Moreover, the statistical analysis made it possible to localize sources of radio emission of this type in near-Earth space and to show that the source(s) of generation of the hectometric continuum radiation is located at low latitudes.

Keywords: radio emission, hectometric continuum radiation, magnetosphere, satellite measurements.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют три естественных электромагнитных излучения, которые генерируются в околоземном пространстве на частотах выше гирочастот электронов и могут быть исследованы только с помощью космических аппаратов: авроральное километровое радиоизлучение (АКР), излучение типа нетепловой континуум и недавно открытое гектометровое излучение.

АКР представляет собой мощное нетепловое радиоизлучение в диапазоне частот 30–800 кГц, генерируемое вблизи локальной циклотронной частоты

электронов в авроральной области магнитосферы Земли. Впервые АКР было зарегистрировано на спутнике «Электрон-2» в 1965 г. [Бенедиктов и др., 1965]. Многочисленные измерения, проводившиеся на высокоапогейных спутниках, позволили определить основные параметры АКР, его свойства и условия, при которых происходит генерация этого излучения [Gurnett, 1974; Treumann, 2006; Louarn, Le Quéau, 1996; Benson, Calvert, 1979; Hanasz et al., 2001; Чугунин и др., 2020; Колпак и др., 2021; Чернышов и др., 2022]. Более десятилетия выдвигались различные теории генерации такого излучения, пока для

объяснения возникновения АКР не был предложен механизм циклотронной мазерной неустойчивости [Wu, Lee, 1979], который является общепризнанным в настоящее время. Такая неустойчивость развивается в авроральной магнитосфере в областях с пониженной плотностью плазмы (кавернах), где электронная плазменная частота меньше, чем локальная циклотронная частота электронов [Wu, Lee, 1979]. Излучение типа АКР наблюдается в магнитосферах других планет с сильным собственным магнитным полем, например, Юпитера, Урана и Сатурна [Zarka, 1998].

Нетепловой континуум также является фундаментальным электромагнитным излучением в планетарных магнитосферах и наблюдается в очень широком диапазоне частот — от 5 кГц [Gurnett, 1975; Brown, 1973] до 800 кГц [Hashimoto et al., 1999; Курильчик и др., 1992]. Хотя название «нетепловой континуум» и говорит об излучении с непрерывным спектром, но в действительности это относится только к самой низкочастотной его части. Фактически нетепловой континуум состоит из дискретных полос излучения, а в некоторых случаях оказывается связанным с сильным узкополосным электростатическим излучением на плазмплаузе на низких широтах [Kurth, 1982]. Нетепловое непрерывное (континуум) излучение часто подразделяют на «захваченное» (trapped) в магнитосфере Земли и на «убегающее» (escaping) из магнитосферы [Green et al., 2004]. Отдельно выделяют компонент нетеплового континуума, называемый километровым континуумом. Излучение километрового континуума генерируется только в высокочастотной части спектра (выше 100 кГц) по тому же механизму, что и низкочастотное нетепловое континуум-излучение [Green et al., 2004]. Вопрос о физическом механизме (или механизмах) генерации континуум-излучения в настоящее время окончательно не решен.

Кроме того, в земной магнитосфере наблюдается более высокочастотное излучение, 600–1700 кГц, спектр которого представляет собой набор отдельных частот (линейчатый спектр). Это излучение получило название «гектометровое континуум-излучение» [Могилевский и др., 2021; Курильчик, 2007; Hashimoto et al., 2018]. Недавно по измерениям электрической составляющей электромагнитного поля в диапазоне частот 2 кГц – 10 МГц на японском спутнике ERG (Arase) было проведено сравнение и были определены области генерации излучения типа километровый континуум и нового излучения типа гектометровый континуум [Могилевский и др., 2021]. Оба излучения имеют линейчатый спектр. Показано, что километровый континуум наблюдается в основном на дневной стороне магнитосферы, его источник расположен вблизи плоскости геомагнитного экватора, а размеры источника не превышают $\pm(0.1 \div 0.3)R_E$ поперек этой плоскости, где R_E — радиус Земли. Гектометровое излучение, наблюдаемое в основном в ночной магнитосфере, скорее всего, имеет две области генерации: одна расположена вблизи плазмосферы на расстояниях до $3R_E$; вторая — вблизи

Земли на расстояниях от $1.1R_E$ до $2R_E$. Было отмечено, что спектральные и частотные характеристики гектометрового излучения обоих источников практически идентичны, единственное отличие — расположение источника. Поскольку ранее при исследовании гектометрового излучения использовались либо отдельные случаи наблюдения (case study) [Могилевский и др., 2021], либо крайне ограниченная статистика, на результаты которой существенно влияла орбита спутника [Hashimoto et al., 2018], необходимо провести детальный статистический анализ для определения основных свойств и характеристик излучения такого типа.

Механизм возбуждения радиоизлучения такого типа в околоземной плазме является открытым вопросом. До сих пор не ясен физический механизм генерации нетеплового километрового континуум-излучения, несмотря на более давнюю историю его исследования по сравнению с гектометровым излучением. Наиболее вероятными выглядят нелинейные модели трехволнового взаимодействия: слияние электростатической бернштейновской волны с низкочастотной и их последующее преобразование в электромагнитную моду [Melrose, 1981], либо распад электростатической волны на низкочастотную и электромагнитную X- или O-моду [Ronmark, 1985]. Альтернативные механизмы связаны с линейным преобразованием Z-моды излучения в обыкновенную волну вблизи плазменной частоты [Jones, 1980] или с предположением, что обыкновенная мода способна возбуждаться электростатическими флуктуациями [Okuda et al., 1982]. Возможно, что предложенные ранее механизмы генерации нетеплового континуума могут быть применены и для гектометрового излучения. Этот вопрос требует отдельного исследования. Кроме того, может иметь место механизм двойного плазменного резонанса [Железняков и др., 2016], когда совпадают частоты либо верхнего, либо нижнего гибридного резонанса с одной из гармоник гирочастоты, в результате чего возбуждаются плазменные волны, которые трансформируются в интенсивное электромагнитное излучение посредством механизма трехволнового взаимодействия.

Поскольку гектометровое излучение было обнаружено совсем недавно, то существует много открытых вопросов, например, его зависимость от геомагнитной и солнечной активности. Этот вопрос до настоящего времени вообще не исследовался. На подобную зависимость в случае километрового континуума существуют разные точки зрения. Авторы работы [Hashimoto et al., 2005] отмечали, что километровый континуум наблюдался чаще во время солнечного минимума, чем солнечного максимума. Однако Курильчик и др. [2004] обнаружили лишь небольшую разницу в повторяемости с солнечным циклом и зафиксировали больше случаев генерации километрового континуума во время солнечного максимума, чем во время солнечного минимума. Километровый континуум наблюдался в периоды как низкой, так и сильной геомагнитной активности, при этом значимой корреляции интенсивности волн

с K_p -индексом не наблюдалось [Green et al., 2004]. Однако статистически максимальная наблюдаемая частота излучения километрового континуума имеет тенденцию к увеличению с увеличением K_p -индекса, эффект более выражен вблизи солнечного максимума, но также обнаруживается вблизи солнечного минимума. Имеются веские доказательства того, что область источника километрового континуума находится близко к экваториальной плазмопаузе в периоды, когда положение плазмопаузы значительно смещается к Земле [Green et al., 2002]. В то же время АКР усиливается во время магнитных возмущений и хорошо коррелирует с высокоширотным геомагнитным индексом AE [Voots et al., 1977], который отражает величину тока, протекающего в ионосфере. Другими словами, АКР регистрируется только во время повышенной геомагнитной активности. Кроме того, существует явная зависимость интенсивности АКР от сезона [Kasaba et al., 1997], поскольку излучение более активно на высоких частотах в зимней полярной области. В работе [Mogooka, Mukai, 2003] обнаружена сезонная зависимость профиля высот области ускорения и высказано предположение, что изменение высоты области продольного ускорения частиц зависит от плотности фоновой плазмы, источником которой является ионосфера. Поскольку свойства ионосферной плазмы изменяются в зависимости от сезона, то и среднее положение области излучения отличается по высоте в зимнее и летнее время [Могилевский и др., 2005]. Для гектометрового излучения сезонная зависимость является также открытым вопросом.

В настоящей работе впервые проводится изучение основных статистических свойств гектометрового континуума на расстояниях до $2.1R_E$ включительно за два полных года с использованием данных, полученных на спутнике ERG (Arase). Ранее было показано [Могилевский и др., 2021], что источники излучения гектометрового континуума наблюдаются как вблизи Земли на расстояниях $(1.1 \div 2)R_E$ (назовем этот тип гектометрового излучения «тип А»), так и в области плазмосферы на расстояниях $(4 \div 6)R_E$ (тип Б). Источники нетеплового километрового континуума, который ранее исследовался с помощью различных космических аппаратов, как предполагают, находятся также вблизи плазмосферы [Green et al., 2002, 2004; Carpenter et al., 2000]. Мы выбрали гектометровый континуум типа А для подробного анализа с целью выявления свойств нового континуума, что в будущем должно помочь в построении физического механизма генерации гектометрового излучения. За период 2018–2019 гг. в данных спутника ERG (Arase) было найдено 279 случаев наблюдения гектометрового континуума, что позволяет достаточно точно определить локализацию источников гектометрового излучения, а также выявить зависимости генерации гектометрового континуума от местного магнитного времени (MLT) и от сезона. Кроме того, такая обширная статистика позволяет выяснить, существует ли зависимость возникновения гектометрового излучения в магнитосфере Земли от геомагнитной активности.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Японский спутник ERG — Exploration of energization and Radiation in Geospace (после выхода на орбиту переименован в Arase) [Miyoshi et al., 2018a, b] был запущен 20.12.2016. Параметры орбиты: апогей ~ 32000 км, перигей ~ 400 км, наклонение 31° . Период обращения спутника ~ 570 мин. Спутник ERG (Arase) ориентирован на Солнце и стабилизирован вращением вокруг этого направления с периодом 8 с. Более детальное представление об орбите спутника ERG (Arase) и ее изменениях можно получить, обратившись к работе [Miyoshi et al., 2018a] и приведенным в ней рисункам. Первоначально магнитное местное время апогея было девять, а затем MLT апогея сместилось от рассвета к закату в течение ночи. Линия апогея смещается по местному времени со скоростью примерно 260° в год по часовой стрелке. Следовательно, необходимо иметь большую статистику для минимизации влияния орбиты космического аппарата ERG (Arase) на полученные результаты.

Научное оборудование спутника предназначено для изучения в первую очередь физических процессов в радиационных поясах Земли, однако широкие измерительные возможности комплекса научных приборов также позволяют изучать радиоизлучение различных типов нашей планеты. Для исследования гектометрового континуум-излучения были использованы измерения электрической составляющей поля в эксперименте PWE/HFA [Kasahara et al., 2018; Kumamoto et al., 2018].

На верхней панели рис. 1 приведен пример гектометрового континуум-излучения типа А, зарегистрированного спутником ERG (Arase) 16 августа 2019 г. Все время наблюдения спутник находится в Северном полушарии — координата z в солнечно-магнитной системе координат (z_{sm}) изменяется от $1.0R_E$ до $\sim 2.7R_E$, а L -параметр Мак-Илвейна — от ~ 2.6 до ~ 7.0 . MLT изменяется от ~ 00 до ~ 05 , что соответствует ночной/утренней стороне магнитосферы. Линейчатый спектр в диапазоне частот $850\text{--}1700$ кГц на расстоянии порядка $R=1.8R_E$ представляет собой гектометровое континуум-излучение, которое длится ~ 3 ч ($\sim 09:02\text{--}11:02$ UT) и заканчивается на расстоянии $R=5.0R_E$. Излучение достигает максимальной интенсивности 10^{-7} мВ/м Гц примерно через 10 мин после начала наблюдения в $09:12$ UT, что соответствует расстоянию $R=2.2R_E$. Стоит отметить, что в промежуток времени $09:02\text{--}09:50$ UT наблюдается излучение типа А, интенсивность которого начинает падать после максимума в $09:12$ UT. Затем около $10:00$ UT было зарегистрировано, скорее всего, излучение другого источника, расположенного на большем расстоянии от Земли (порядка $3.7R_E$) — вблизи плазмопаузы, что свидетельствует о генерации гектометрового континуума типа Б. Интересно, что на верхней панели рис. 1 начиная с $09:00$ UT на частотах ниже 1000 кГц заметно авроральное километровое радиоизлучение (АКР), которое также возникает во время рассмотренного события, причем мощность АКР существенно выше, чем мощность гектометрового излучения. Слева от гектометрового континуума и ниже его наблюдается также

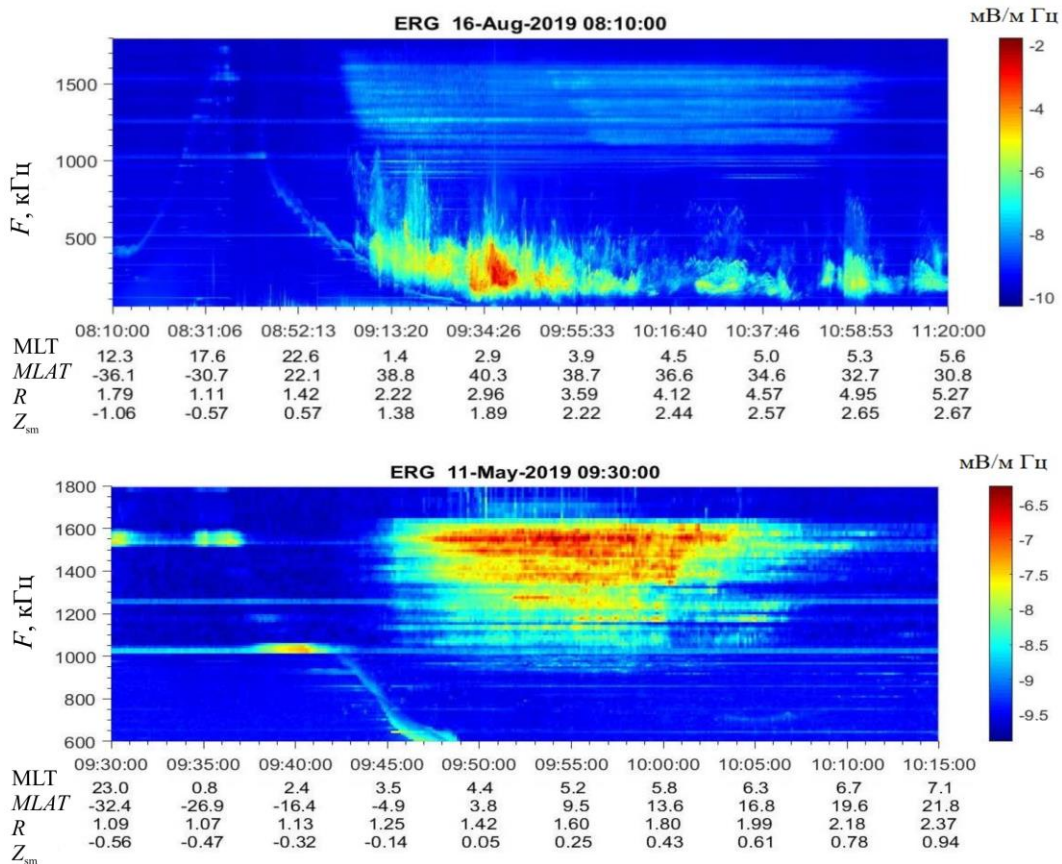


Рис. 1. Гектометровое континуум-излучение на спектрограммах электрической компоненты поля за 16 августа 2019 г. в диапазоне частот 50–1800 кГц (верхняя панель) и за 11 мая 2019 г. в диапазоне частот 600–1800 кГц (нижняя панель)

область излучения на частоте верхнего гибридного резонанса.

На нижней панели рис. 1 представлен аналогичный случай менее продолжительного гектометрового континуум-излучения, зарегистрированного 11 мая 2019 г. Наблюдаемый диапазон частот для данного события несколько меньше: ~1000–1650 кГц. Регистрация гектометрового континуум-излучения начинается на расстоянии $R=1.3R_E$, длится 26 мин (~09:45–10:11 UT) и заканчивается при $R=2.2R_E$. MLT изменяется от ~3.5 до ~7, что также соответствует ночной/утренней стороне. В представленном событии спутник пересекает плоскость геомагнитного экватора из Южного полушария в Северное — z_{sm} изменяется от -0.1 до $0.8R_E$. L -параметр увеличивается от 1.3 до 2.6. Максимальной интенсивности (более 10^{-7} мВ/м Гц) излучение достигает через 8 мин после начала наблюдения, в ~09:53 UT, на расстоянии $R=1.5R_E$. Как и в предыдущем случае, на спектре слева от гектометровой области и ниже ее наблюдается область повышенной интенсивности на частоте верхнего гибридного резонанса.

Далее исследовалась зависимость возникновения гектометрового континуум-излучения от геомагнитной активности, для чего рассматривались значения геомагнитного индекса Dst . Были использованы оценки Dst в моменты максимальной интенсивности

гектометрового излучения и построены соответствующие гистограммы (рис. 2). На верхней гистограмме представлено распределение случаев наблюдения гектометрового излучения в зависимости от значений Dst -индекса [World Data Center for Geomagnetism, 2015]. На средней панели представлено распределение вероятности значений Dst -индекса за 2018–2019 гг. Видно, что это распределение похоже на распределение случаев регистрации гектометрового континуума на спутнике ERG (Arase) на верхней панели рис. 2, поэтому для более корректного анализа была построена гистограмма с нормированным числом случаев на вероятность распределения значений Dst -индекса за 2018–2019 гг., приведенная на нижней панели. Эта гистограмма (нижняя панель рис. 2) показывает, что на самом деле нет прямой зависимости между возникновением гектометрового континуума и геомагнитной активностью.

Статистический анализ был проведен и для других параметров гектометрового излучения. На рис. 3 приведены гистограммы распределения событий по месяцам за 2018 и 2019 г. по отдельности и суммарно. Сравнивая гистограммы за 2018 г. (верхняя панель) и 2019 г. (средняя панель), можно заметить отсутствие событий типа А с мая по август 2018 г., однако уже в 2019 г. гектометровый континуум не наблюдается только в марте, а с мая по август заре-

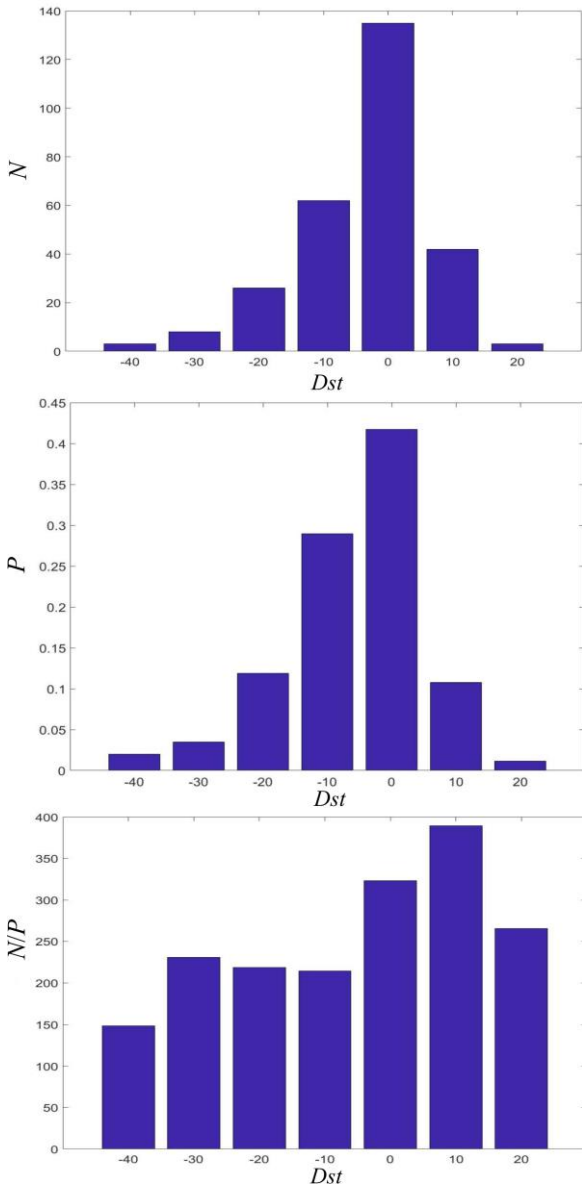


Рис. 2. Распределение случаев наблюдения гектометрового континуум-излучения в зависимости от величины *Dst*-индекса (вверху), вероятность распределения *Dst*-индекса за 2018–2019 гг. (посередине) и нормированное число случаев на вероятность распределения *Dst*-индекса за 2018–2019 гг. (внизу)

гистрировано достаточное количество событий. Такие различия в наблюдениях возникают из-за прецессии орбиты спутника ERG (*Arase*), поскольку на гистограмме за два года гектометровое излучение наблюдается каждый месяц, и отсутствуют промежутки в распределении. Это еще раз доказывает, что для корректных выводов необходимо иметь большую статистику, позволяющую минимизировать влияние орбиты космического аппарата.

На следующем этапе анализа данных была построена двумерная гистограмма распределения магнитной широты (*MLAT*) орбиты спутника в зависимости от месяца, а также *MLAT* спутника в момент наблюдения гектометрового континуум-излучения от месяца (рис. 4). На первой из них (левая панель рис. 4) прослеживается явная зависимость, вызванная влиянием орбиты японского спутника ERG (*Arase*). Аналогичную зависимость можно проследить и на

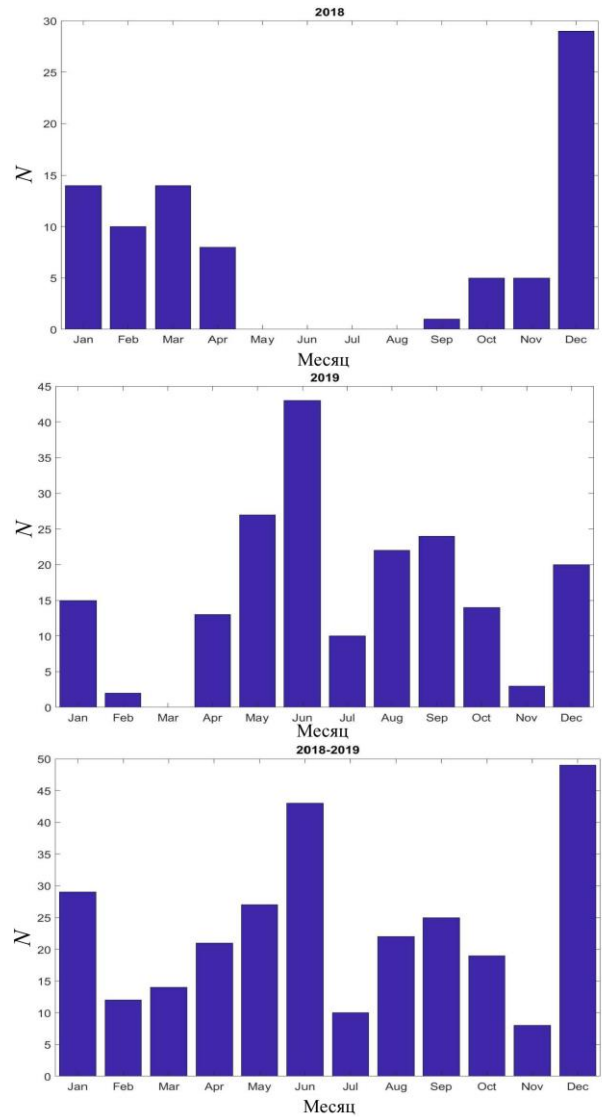


Рис. 3. Распределение случаев наблюдения гектометрового излучения по месяцам за 2018 г. (вверху), 2019 г. (посередине) и за два года (внизу)

второй гистограмме (правая панель рис. 4). Однако на правой панели отчетливо заметны дополнительные случаи, помимо лежащих на основной зависимости, — наибольшее число в январе и декабре, что не согласуется с гистограммой орбиты спутника на левой панели. Наличие таких случаев говорит о влиянии физических процессов в околоземном пространстве на результаты наблюдения гектометрового излучения. Заметим, что в отличие от зимнего периода, когда излучение данного типа в основном регистрировалось в районе геомагнитного экватора, в другие месяцы гектометровое излучение наблюдается на широтах до 30° северной и южной широты.

Был проведен анализ зависимости возникновения гектометрового континуума от местного магнитного времени (*MLT*). Из приведенной на рис. 5 гистограммы видно, что гектометровое излучение наблюдается преимущественно в ночное и утреннее время. Таким образом, подтверждено предположение о зависимости генерации гектометрового континуума от местного магнитного времени, высказанное в работе [Могилевский и др., 2021]. По результатам статистического анализа гектометровое излучение

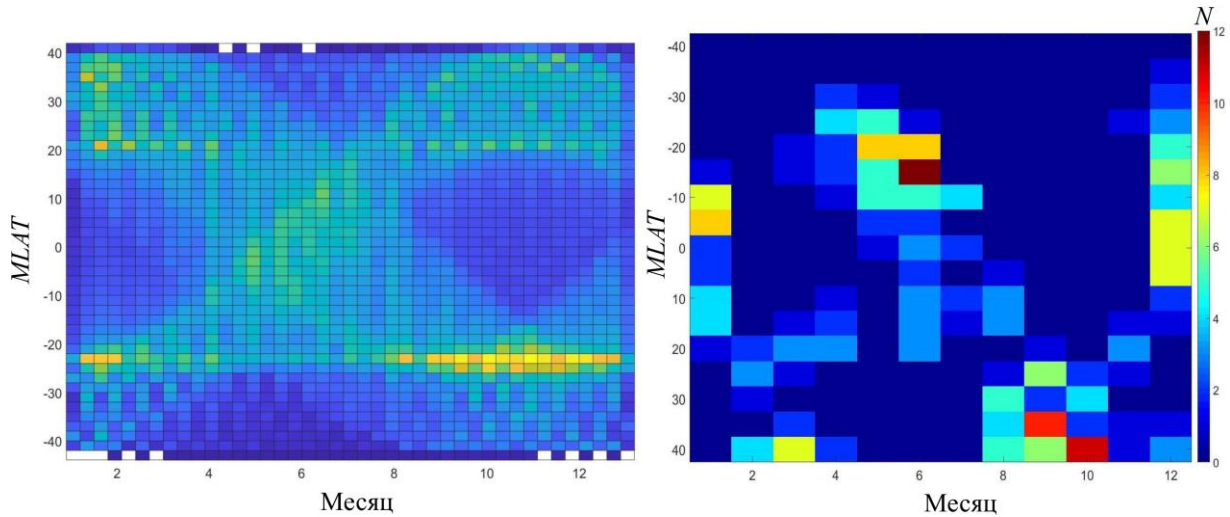


Рис. 4. Гистограммы распределения по месяцам $MLAT$ орбиты спутника (левая панель) и $MLAT$ спутника в моменты начала наблюдения гектометрового континуума (правая панель)

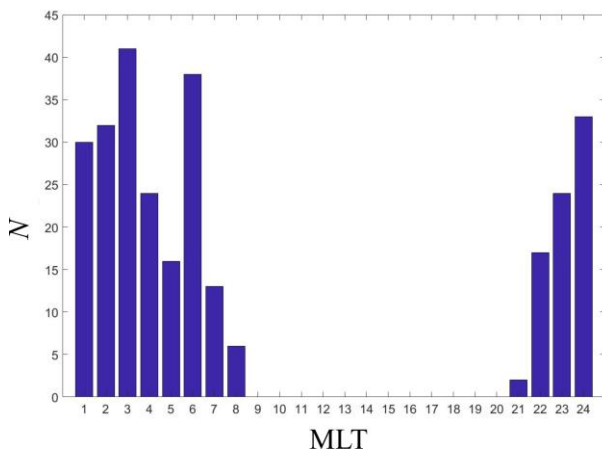


Рис. 5. Распределение случаев наблюдения гектометрового континуума в зависимости от местного магнитного времени

наблюдается от 21 до 08 MLT, следовательно, генерация данного континуума может зависеть от освещенности ионосферы.

На рис. 6 представлены двумерные гистограммы распределения координаты z в солнечно-магнитной системе координат (z_{sm}) в зависимости от параметра Мак-Илвейна L и расстояния R , позволяющие понять локализацию источников гектометрового континуума. Как явствует из рис. 6, большинство наблюдений гектометрового континуум-излучения попадает в диапазон от -0.5 до 0.5 по z_{sm} , от 1 до 1.4 по параметру L и от 1.1 до 1.25 по расстоянию R , что указывает на положение источников излучения на низких широтах. Кроме того, заметно, что с увеличением расстояния от Земли максимум числа наблюдений гектометрового излучения удаляется от экваториальной области. Другими словами, модуль координаты z увеличивается с R .

Кроме того, были построены гистограммы распределения случаев наблюдения гектометрового континуума в зависимости от R и L (рис. 7). На правой панели заметно явное преобладание случаев наблюдения гектометрового континуума на малых

расстояниях порядка $(1.1 \div 1.2)R_E$, максимально дальние случаи находились на расстояниях порядка $2.1R_E$. Относительно L наблюдается схожая зависимость: большинство случаев регистрации гектометрового излучения приходится на малые значения параметра L до 1.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По измерениям электрической компоненты электромагнитного поля на японском спутнике ERG (Arase) (эксперимент PWE/HFA) обнаружено 279 случаев наблюдения гектометрового континуум-излучения типа А за два полных года — 2018 и 2019. Проведен подробный статистический анализ различных параметров излучения данного типа, и выявлены его некоторые свойства в магнитосфере Земли.

Все случаи гектометрового континуума типа А зарегистрированы на расстояниях до $2.1R_E$ включительно. Заметим, что в каждом случае на спектрограммах присутствует частота верхнего гибридного резонанса, около которой возникает данный тип излучения. В большинстве случаев наблюдение излучения начинается на расстояниях порядка $(1.1 \div 1.25)R_E$, что соответствует высотам верхней ионосферы и нижней магнитосферы. Гектометровое излучение наблюдалось в основном при малых значениях параметра Мак-Илвейна L от 1 до 1.4, расстояние R изменялось от 1.1 до 1.25, в то время как значение координаты z_{sm} варьировало от -0.5 до 0.5 , что может быть связано с орбитой спутника. Таким образом, статистический анализ позволил выявить локализацию источников радиоизлучения такого типа в плазме: гектометровый континуум наблюдается в основном в низкоширотной области околоземного пространства, а следовательно, источник (или источники) данного излучения расположен на низких широтах.

Было также установлено, что нет прямой зависимости возникновения гектометрового излучения от геомагнитных возмущений. Отсутствие явной зави-

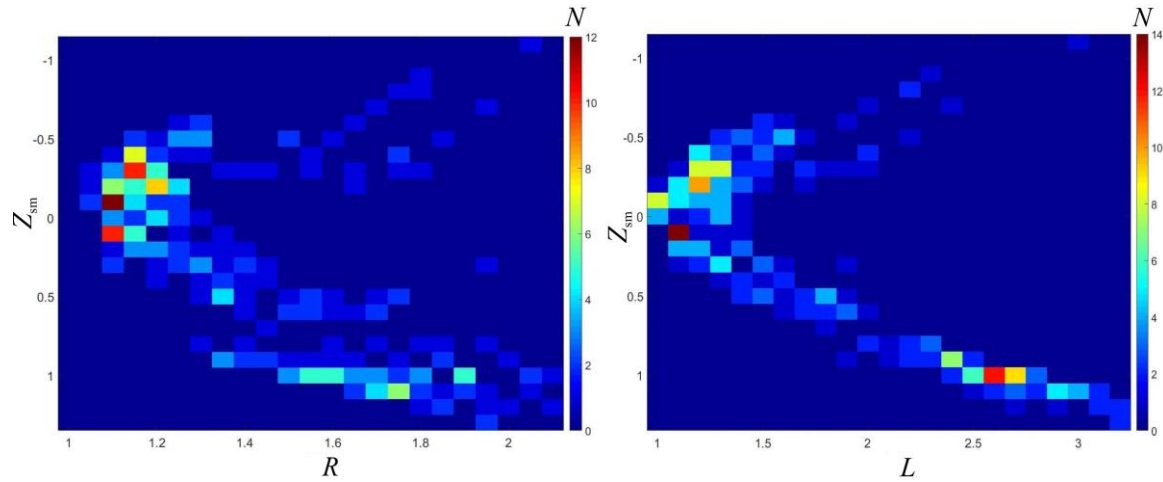


Рис. 6. Двумерные гистограммы распределения z -координаты (в солнечно-магнитной системе координат) по расстоянию R (левая панель) и по параметру Мак-Илвейна L (правая панель)

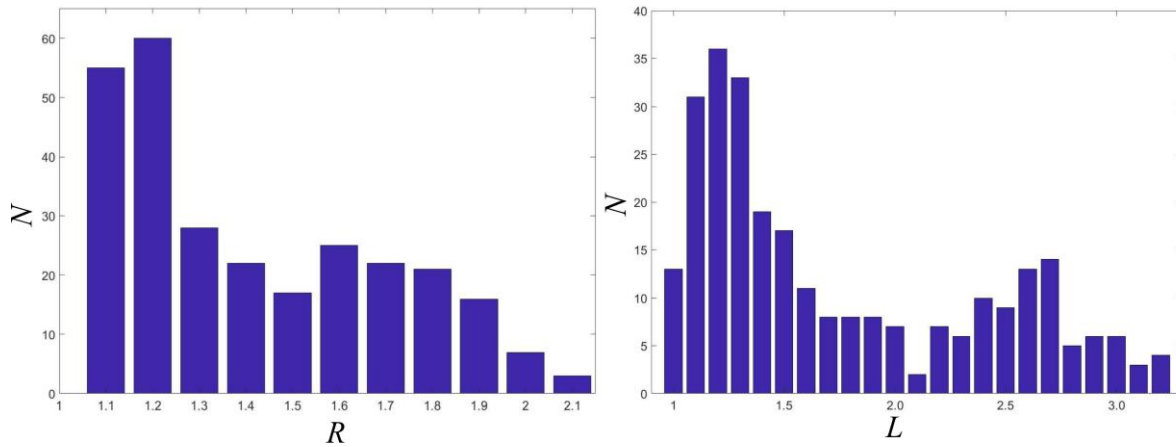


Рис. 7. Распределения случаев наблюдения гектометрового континуума в зависимости от расстояния R (слева) и параметра Мак-Илвейна L (справа)

симости от значений геомагнитного индекса Dst (мера изменения магнитного поля из-за кольцевых токов, возникающих в магнитосфере во время магнитных бурь) свидетельствует о том, что гектометровый континуум может наблюдаться как в спокойное время, так и при сильной геомагнитной активности. Ранее в статье [Hashimoto et al., 2018] на основе не полной статистики за 2017 г. не было выявлено существенной зависимости от другого геомагнитного индекса K_p (характеризует глобальную возмущенность магнитного поля Земли в трехчасовом интервале времени), при этом общее число случаев для $K_p \geq 6$ было очень мало. Заметим, что другие типы радиоизлучения — АКР и нетепловой континуум — наблюдаются в основном только во время геомагнитных возмущений [Kasaba et al., 1998; Kurth et al., 1998]. Поскольку, как известно, АКР и километровый континуум наблюдаются у всех обладающих магнитным полем планет Солнечной системы [Zarka, 1998; Kurth, 1982], то стоит ожидать, что и гектометровое излучение является характерным для планет, обладающих магнитным полем. В этом случае гектометровое излучение может быть использовано в качестве дополнительного маркера планет (экзопланет) с магнитным полем. Основным маркером является

АКР, время существования которого зависит от геомагнитной активности. Согласно [Turner et al., 2021], по результатам обработки измерений LOFAR зарегистрированы радиосигналы, которые могут быть циклотронным излучением экзопланеты с магнитным полем. Другими словами, было найдено излучение типа АКР от экзопланеты, что еще раз показывает важность изучения свойств радиоизлучения различных диапазонов.

В данной работе на основе статистики за полных два года подтверждена зависимость генерации гектометрового континуума от местного магнитного времени, высказанная ранее в работе [Могилевский и др., 2021]. Излучение такого типа наблюдается в ночное и утреннее время. Это может быть связано с уменьшением в ночное время электронной концентрации в верхней ионосфере и нижней магнитосфере.

Стоит отметить также, что изменения орбиты спутника ERG (Arase) оказывают существенное влияние на регистрацию гектометрового континуума. Например, в 2018 г. меньше случаев наблюдения излучения типа А, чем в 2019 г. Распределение гектометрового континуума по месяцам за два года не имеет таких явных провалов и пиков, как если рассматривать отдельно 2018 или 2019 г. В работе [Hashimoto et al.,

Характеристики АКР, нетеплового и гектометрового континуума

Параметры	Авроральное километровое излучение	Нетепловое континуум-излучение	Гектометровое континуум-излучение
Диапазон частот	30–800 кГц	5–800 кГц	600–1700 кГц
Зависимость от геомагнитной активности	высокая	присутствует	отсутствует
Локализация источника излучения	высокие широты	экваториальные широты	низкие широты
Механизм генерации	циклотронная мазерная неустойчивость	Линейное или нелинейное преобразование мод	на данный момент неизвестен
Время регистрации (MLT)	в ночное время	преимущественно днем	в ночное и утреннее время

2018], в которой использовалась ограниченная статистика за 2017 г., были получены сильно различные результаты для каждого месяца, что является следствием особенностей орбиты спутника ERG (Arase). Все это явно указывает на важность статистики за как можно больший период времени, чтобы минимизировать влияние эволюции орбиты космического аппарата при изучении и определении свойств гектометрового излучения.

Схожее излучение наблюдалось во время эксперимента АКР-Х на спутнике «Интербол-1» на частотах 1463 и 1501 кГц [Курильчик, 2007], и за период более пяти лет было обнаружено не более 50 таких событий. Однако оно регистрировалось днем, тогда как на спутнике ERG (Arase) все случаи гектометрового континуум-излучения наблюдались в ночное и утреннее время. В статье [Курильчик, 2007] высказано также предположение о возникновении гектометрового излучения вблизи минимума цикла солнечной активности. Аналогичное предположение о влиянии солнечной активности на генерацию гектометрового континуум-излучения сделано в [Hashimoto et al., 2021], где генерация данного излучения связывается с экваториальными плазменными баблами (пузырями), поскольку во время солнечного минимума частота возникновения баблов после полноты растет в летнее солнцестояние [Dao et al., 2011; Otsuka, 2018].

Полученные в данной работе характеристики гектометрового излучения в магнитосфере Земли, а также, для сравнения, аналогичные характеристики километрового континуума и АКР приведены в таблице.

Основные результаты данного исследования следующие:

- Проведен статистический анализ случаев наблюдения гектометрового континуум-излучения для источника (источников) типа А за двухгодичный период (279 случаев).
- Подтверждена зависимость генерации гектометрового континуума от местного магнитного времени. Излучение такого типа наблюдается в ночное и утреннее время.
- Установлено, что нет прямой зависимости возникновения гектометрового излучения от геомагнитных возмущений.
- Источник (источники) гектометрового континуум-излучения расположен на низких широтах.

Мы выражаем признательность А. Кумамото, Й. Касахара, Ф. Тсучия за предоставление данных прибора PWE/HFA спутника ERG (Arase), 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/>] [Miyoshi et al., 2018a, b]. В исследовании анализируются данные прибора PWE HFA-L2 v01.01. [Kasahara et al., 2018; Kumamoto et al., 2018]. Мы благодарны также сотрудникам Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>] за предоставление данных по индексу геомагнитной активности *Dst*. Работа 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». *Иссл. космического пространства* / под ред. Скудрина Г.А. М.: Наука, 1965. 581 с.
- Железняков В.В., Злотник Е.Я., Зайцев В.В. и др. Эффект двойного плазменного резонанса и его роль в радиоастрономии. *Успехи физ. наук*. 2016. Т. 186, № 10. С. 1090–1116. DOI: [10.3367/UFNr.2016.05.037813](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.05.037813).
- 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).
- Курильчик В.Н. Наблюдение аврорального гектометрового радиоизлучения со спутника «Интербол-1». *Космические исследования*. 2007. Т. 45, № 3. С. 264–269.
- Курильчик В.Н., Григорьева В.П., Тирпак А. и др. Наблюдения нетеплового континуума в южной субполярной области земной магнитосферы со спутника «Прогноз-10-Интеркосмос». *Космические исследования*. 1992. Т. 30, № 2. С. 231–242.
- Курильчик В.Н., Копаева И.Ф., Миронов С.В. Наблюдения километрового «континуума» земной магнитосферы со спутника «Интербол-1». *Космические исследования*. 2004. Т. 42, № 1. С. 3–10.
- Могилевский М.М., Моисеенко И.Л., Ханаш Я. Изменение спектра и длиннопериодные вариации интенсивности аврорального километрового радиоизлучения по измерениям на спутнике «Интербол-2». *Письма в Астрономический журнал*. 2005. Т. 31. № 6. С. 474–479.

Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А. и др. Локализация источников двух типов «континуум» излучения. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2021. Т. 114, № 1. С. 18–23. DOI: [10.31857/S123456782113005X](https://doi.org/10.31857/S123456782113005X).

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

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., Calvert W. ISIS-1 observations of the source of AKR. *Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 6. P. 479. DOI: [10.1029/GL0061006P00479](https://doi.org/10.1029/GL0061006P00479).

Brown L.W. The galactic radio spectrum between 130 kHz and 2600 kHz. *Astrophys. J.* 1973. Vol. 180. P. 359–370.

Carpenter D.L., Anderson R.R., Calvert W., et al. CRRES Observations of density cavities inside the plasmasphere. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 23323–23338. DOI: [10.1029/2000JA000013](https://doi.org/10.1029/2000JA000013).

Dao E., Kelley M.C., Roddy P., et al. Longitudinal and seasonal dependence of nighttime equatorial plasma density irregularities during solar minimum detected on the C/NOFS satellite. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, iss. 10, L10104. DOI: [10.1029/2011GL047046](https://doi.org/10.1029/2011GL047046).

Green J.L., Sandel B.R., Fung S.F., et al. On the origin of kilometric continuum. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A7, 1105. DOI: [10.1029/2001JA000193](https://doi.org/10.1029/2001JA000193).

Green J.L., Boardsen S., Fung S.F., et al. Association of kilometric continuum radiation with plasmaspheric structures. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A03203. DOI: [10.1029/2003JA010093](https://doi.org/10.1029/2003JA010093).

Gurnett D.A. The Earths as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, iss. 28. P. 4227–4238. DOI: [10.1029/JA079I028P04227](https://doi.org/10.1029/JA079I028P04227).

Gurnett D.A. The Earth as a radio source: The nonthermal continuum. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 2751–2763. DOI: [10.1029/JA080I019P02751](https://doi.org/10.1029/JA080I019P02751).

Hanasz J., de Feraudy H., Schreiber R., et al. Wideband bursts of auroral kilometric radiation and their association with UV auroral bulges. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 3859–3872. DOI: [10.1029/2000JA900098](https://doi.org/10.1029/2000JA900098).

Hashimoto K., Calvert K.W., Matsumoto H. Kilometric continuum detected by GEOTAIL. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 28645–28656. DOI: [10.1029/1999JA900365](https://doi.org/10.1029/1999JA900365).

Hashimoto K., Anderson R.R., Green J.L., et al. Source and Propagation characteristics of kilometric continuum observed with multiple satellites. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A09229. DOI: [10.1029/2004JA010729](https://doi.org/10.1029/2004JA010729).

Hashimoto K., Kumamoto A., Tsuchiya F., et al. Hectometric line spectra detected by the Arase (ERG) satellite. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, iss. 21. P. 11555–11561. DOI: [10.1029/2018GL080133](https://doi.org/10.1029/2018GL080133).

Hashimoto K., Shinbori A., Otsuka Y., et al. Propagation mechanism of medium wave broadcasting waves observed by the Arase satellite: Hectometric line spectra. *J. Geophys. Res.* 2021. Vol. 126, iss. 11, e2021JA029813. DOI: [10.1029/2021JA029813](https://doi.org/10.1029/2021JA029813).

Jones D. Latitudinal beaming of planetary radio emissions. *Nature*. 1980. Vol. 288. P. 225–229. DOI: [10.1038/288225A0](https://doi.org/10.1038/288225A0).

Kasaba Y., Matsumoto H., Hashimoto K., et al. The angular distribution of auroral kilometric radiation observed by GEOTAIL spacecraft. *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. P. 2483–2486.

Kasaba Y., Matsumoto H., Hashimoto K., et al. Remote sensing of the plasmopause during substorms: GEOTAIL observation of nonthermal continuum enhancement. *J. Geophys. Res.* 2023. T. 9, № 4. С. 71–79. DOI: [10.12737/szf-94202308](https://doi.org/10.12737/szf-94202308).

ophys. Res.: Atmos. 1998. Vol. 103, no. A9. P. 20389–20406. DOI: [10.1029/98JA00809](https://doi.org/10.1029/98JA00809).

Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H., et al. The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Erase (ERG) satellite. *Earth, Planets and Space*. 2018. Vol. 70, 86. 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. DOI: [10.1186/s40623-018-0854-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0854-0).

Kurth W.S. Detailed observations of the source of terrestrial narrowband electromagnetic radiation. *Geophys. Res. Lett.* 1982. Vol. 9. P. 1341–1344.

Kurth W.S., Murata T., Lu G., et al. Auroral kilometric radiation and the auroral electrojet index for the January 1997 magnetic cloud event. *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, iss. 15. P. 3027–3030. DOI: [10.1029/98GL00404](https://doi.org/10.1029/98GL00404).

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.

Melrose D.B. A theory for the nonthermal radio continuum in the terrestrial and Jovian magnetospheres. *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 30–36. DOI: [10.1029/JA086IA01P00030](https://doi.org/10.1029/JA086IA01P00030).

Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., et al. Geospace exploration project ERG. *Earth, Planets and Space*. 2018a. Vol. 70, 101. 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).

Moroooka M., Mukai T. Density as a controlling factor for seasonal and latitudinal variations of the auroral particle acceleration region. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. A7, 1306. DOI: [10.1029/2002JA009786](https://doi.org/10.1029/2002JA009786).

Okuda H., Chance M.S., Ashour-Abdalla M., et al. Generation of nonthermal continuum radiation in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, no. A12. P. 10457–10462.

Otsuka Y. Review of the generation mechanisms of post-midnight irregularities in the equatorial and low-latitude ionosphere. *Progress Earth Planet. Sci.* 2018. Vol. 5, iss. 1, 57. DOI: [10.1186/s40645-018-0212-7](https://doi.org/10.1186/s40645-018-0212-7).

Ronnmark K. Generation of magnetospheric radiation by decay of Bernstein waves. *Geophys. Res. Lett.* 1985. Vol. 12. P. 639–642. DOI: [10.1029/GL012i010p00639](https://doi.org/10.1029/GL012i010p00639).

Treumann R.A. The electron-cyclotron maser for astrophysical application. *Astron. Astrophys. Rev.* 2006. Vol. 13, no. 4. P. 229–315. DOI: [10.1007/s00159-006-0001-y](https://doi.org/10.1007/s00159-006-0001-y).

Turner J., Zarka P., Griebmeier J.-M., et al. The search for radio emissions from the exoplanetary systems 55 Cancri, υ Andromedae, and τ Boötis using LOFAR beam-formed observations. *Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 645, A59. 28 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201937201](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937201).

Voots G.R., Gurnett D.A., Akasofu S.I. Auroral kilometric radiation as an indicator of auroral magnetic disturbances. *J. Geophys. Res.* 1977, Vol. 82, iss. 16. P. 2259.

Wu C.S., Lee L.C. A theory of the terrestrial kilometric radiation. *Astrophys. J.* 1979. Vol. 230. P. 621. DOI: [10.1086/157120](https://doi.org/10.1086/157120).

Zarka P. Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 20159–20194. DOI: [10.1029/98JE01323](https://doi.org/10.1029/98JE01323).

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto: Geomagnetic Dst index. 2015. DOI: [10.17593/14515-74000](https://doi.org/10.17593/14515-74000).

URL: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/> (дата обращения 5 июля 2023 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата обращения 5 июля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Дорофеев Д.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М. Основные статистические свойства излучения типа гектометровый континуум в околоземном пространстве. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 71–79. DOI: [10.12737/szf-94202308](https://doi.org/10.12737/szf-94202308).