Локализация источников двух типов "континуум" излучения

М. М. Могилевский[+ 1)], *Д. В. Чугунин*[+], *А. А. Чернышов*[+], *Т. В. Романцова*[+], *И. Л. Моисеенко*[+], *А. Кумамото*[* 2)], *Й. Касахара*[× 2)], *Ф. Тсучия*[* 2)]

[+]*Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия*

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

[×]*Университет Тохоку, 980-8578 Сендай, Япония*

Поступила в редакцию 19 мая 2021 г.
После переработки 31 мая 2021 г.
Принята к публикации 1 июня 2021 г.

По измерениям электрической составляющей электромагнитного поля в диапазоне частот 2 кГц–10 МГц на японском спутнике ERG определены области генерации километрового излучения типа километровый "континуум" и нового излучения типа гектометровый "континуум". Показано, что километровый "континуум" наблюдается, в основном, на дневной стороне магнитосферы, его источник расположен вблизи плоскости геомагнитного экватора, а размеры источника не превышают $\pm(0.1{-}0.3R_e)$ поперек этой плоскости, где R_e – радиус Земли. Гектометровое излучение, наблюдаемое, в основном, в ночной магнитосфере, имеет два источника. Один из них расположен вблизи плазмосферы и может достигать $3R_e$. Второй источник наблюдается вблизи Земли на расстояниях от $1.1R_e$ до $2R_e$.

DOI: 10.31857/S123456782113005X

1. Излучение типа нетепловой "континуум" впервые было зарегистрировано на спутнике ИМП-6 [1] и более подробно описано в работах [2] и [3], где приведены характерные спектры этого излучения, выделены две компоненты – излучение, захваченное в плазмосфере и выходящее из нее, а также зарегистрирована связь электромагнитного излучения и электростатическими колебаниями вблизи частоты верхнего гибридного резонанса. В работах [2, 3] также было показано, что источник излучения расположен вблизи плазмопаузы, а интенсивность излучения зависит от геомагнитных обстановки – увеличивается на ~ 20 дБ при геомагнитных возмущениях и коррелирует с плотностью потоков надтепловых электронов с энергиями $1-30$ кэВ. Последующие исследования [4, 5] показали, что спектр "континуум" излучения является линейчатым и достаточно стабильным – отдельные частотные полосы этого спектра сохраняют свои характеристики – частоту и амплитуду, более одного часа. Само излучение по своему характеру разделяется на низкочастотную часть, которая захвачена в магнитосфере, и более высокочастотную, которая ее покидает. Уходящее из магнитосферы "континуум" излучение наблюдается, как правило, на ночной стороне (18–04 MLT) [6] и, в некоторых случаях, оно было зарегистрировано на значительных расстояниях от Земли – $41R_e$ (R_e – радиус земли) [3].

Измерения на спутниках Geotail [7] и Прогноз-10 [8, 9] позволили обнаружить более высокочастотное "континуум" излучение в диапазоне частот 100–800 кГц. Это излучение также генерируется внутри плазмосферы и имеет линейчатый спектр. Особенностью этого излучения является распространение строго в плоскости магнитного экватора, что было подтверждено позже на спутнике CRRES и одновременных наблюдениях километрового "континуума" на аппаратах Geotail и Image [10].

Вопрос о механизме генерации "континуум" излучения до настоящего времени окончательно не решен. Первоначально была предложена модель синхротронного излучения [11], однако такой механизм оказался в 10 раз слабее, чем механизм генерации нетеплового континуума [6], что объясняет интерес к моделям линейного и нелинейного преобразования мод. Ряд авторов полагает (например, [5]), что изначально возбуждаются электростатические колебания на частотах $f \approx (n+1/2)f_g \approx f_{\mathrm{UHR}}$, где f_g – циклотронная частота, f_{UHR} – частота верхнего гибридного резонанса, а затем они трансформируются в электромагнитное излучение в результате нелинейного трехволнового взаимодействия с участием ионно-циклотронных волн. Альтернативный механизм связан с линейным преобразованием Z-моды из-

1)e-mail: mogilevsky2012@gmail.com
2)A. Kumamoto, Y. Kasahara, F. Tsuchiya.

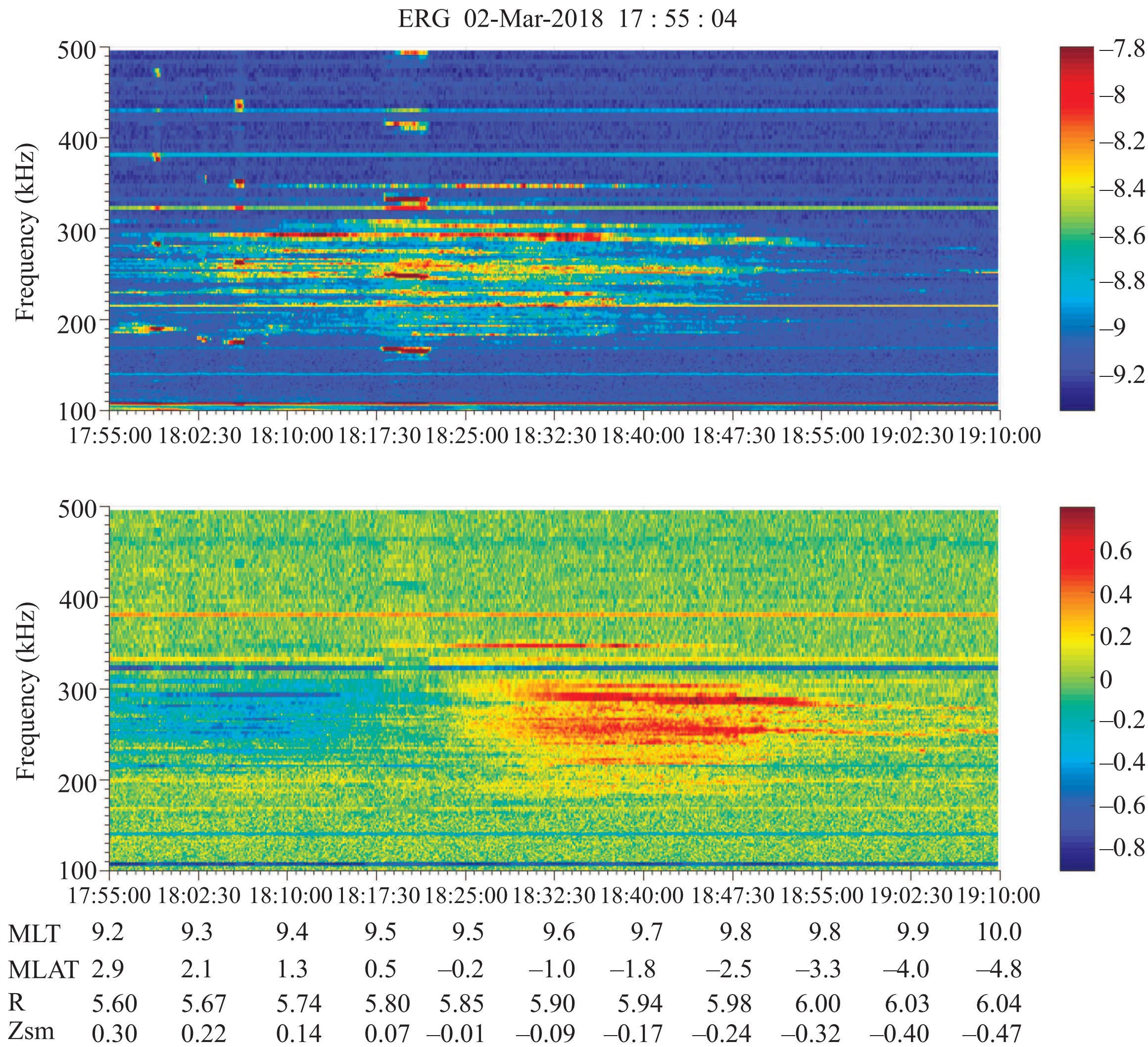


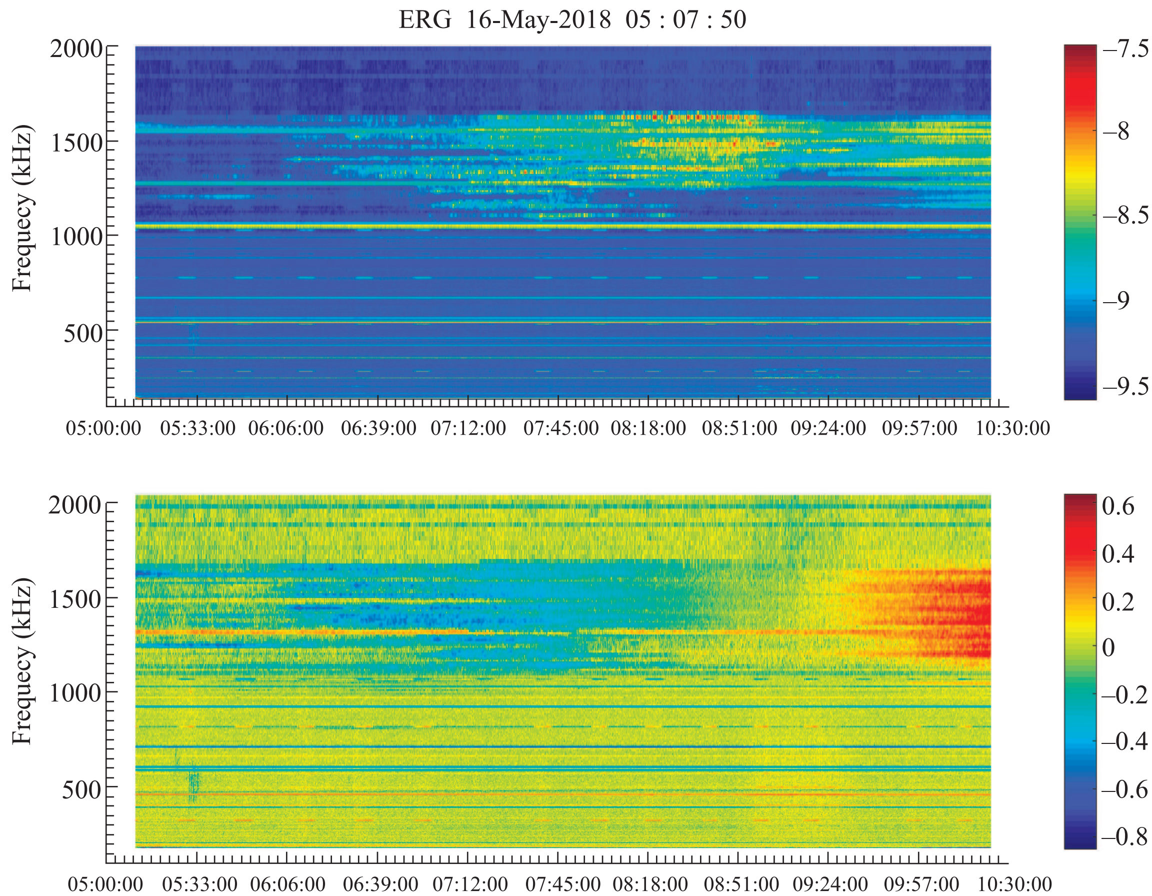
Рис. 1. (Цветной онлайн) Верхняя панель – динамическая спектрограмма электрической компоненты поля в диапазоне частот 100–500 кГц. Нижняя панель – спектрограмма коэффициента поляризации том же диапазоне частот

лучения в обыкновенную волну вблизи плазменной частоты [12].

В статье [13] авторы приводят результаты измерений излучения с линейчатым спектром в диапазоне частот 500 – 1700 кГц на спутнике ERG – Exploration of energization and Radiation in Geospace и анализируют возможные механизмы генерации этого излучения.

В настоящей работе приведены результаты измерения “континуум” излучения двух типов на спутнике ERG, различающихся по своим свойствам (частотному диапазону, вариациям отдельных составляющих и др.) и по местоположению источника излучения.

2. Японский спутник ERG (после выхода на орбиту был переименован в Arase) [14, 15], запущен 20 декабря 2016 г. и продолжает успешно работать в настоящее время. Его орбита – апогей $\sim$32000 км, перигей $\sim$400 км и наклонение 31°, и состав приборов были подобраны для исследования физических процессов в радиационных поясах. Однако измерительные возможности приборов для волновых измерений гораздо шире поставленных задач и позволяют исследовать процессы не только в плазмосфере, но и в авроральной области [16]. Спутник ERG ориентирован на Солнце и стабилизирован вращением вокруг этого направления с периодом 8 с. В этой работе мы используем результаты измерения электрической компоненты поля в диапазоне частот от 2 кГц до 10 МГц, а также измерения параметра поляризации в плоскости, перпендикулярной направлению на Солнце, вычисляемого на борту спутника [17, 18].



MLT	4.2	4.6	5.0	5.4	5.7	6.0	6.4	6.8	7.2	7.7	8.3
MLAT	–13.7	–17.0	–19.1	–20.8	–22.1	–23.1	–23.9	–24.6	–25.2	–25.7	–25.8
R	4.52	5.10	5.53	5.83	6.00	6.06	6.00	5.83	5.53	5.10	4.51
Zsm	–0.93	–1.35	–1.69	–1.96	–2.15	–2.28	–2.35	–2.35	–2.28	–2.13	–1.89

Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектральные характеристики гектометрового радиоизлучения типа "континуум", зарегистрированного вдали от плоскости геомагнитной эклиптики. Аналогично рис. 1: верхняя панель – динамическая спектрограмма амплитуды электрической компоненты поля (в логарифмическом масштабе), нижняя панель – спектрограмма поляризационного коэффициента (в линейном масштабе)

3. На рисунке 1 приведен пример "континуум" излучения, зарегистрированного на борту спутника ERG 2 марта 2018 г.

Измерения проводились на утренней/дневной стороне плазмосферы на расстоянии $R = 5.6{-}6.04R_e$ (радиусов Земли) вблизи апогея в течении 1 ч 15 мин. За это время спутник пересек плоскость геомагнитного экватора и опустился в южную полусферу – Z_{sm} изменялось от 0.3 до $-0.47R_e$ (Z_{sm} – координата Z в солнечно-магнитной системе координат). На рисунке 1 "континуум" излучение – набор горизонтальных линий в диапазоне частот 210–350 кГц, на верхней и нижней панелях появляется сразу с началом измерений, в 17 : 55 UT, и продолжается до 18 : 55 UT. Непрерывные горизонтальные линии на частотах 140, 215, 320 и 380 кГц – бортовые помехи. На верхней панели излучение наблюдается непрерывно в течение всего часа – 17 : 55 – 18 : 55 UT, а на нижней панели в интервале от 18 : 17 до $\sim$18 : 30 UT излучение "исчезает". Это связано с изменением поляризации сигнала, что хорошо видно на рис. 4.

В интервале анализа усредненная интенсивность излучения имеет максимум в $\sim$18 : 23, а поляризационный коэффициент в это время меняет знак с "–" на "+". Такое изменение поляризации может быть связано с пересечением спутником центра источника излучения, который, в этом предположении, должен лежать в плоскости $Z_{sm} = 0$. Анализ около 4-х десятков случаев пересечения спутником ERG плоскости геомагнитного экватора вблизи апогея на дневной стороне показал, что практически каждый раз наблюдалось аналогичное излучение, и при $Z_{sm} = 0$

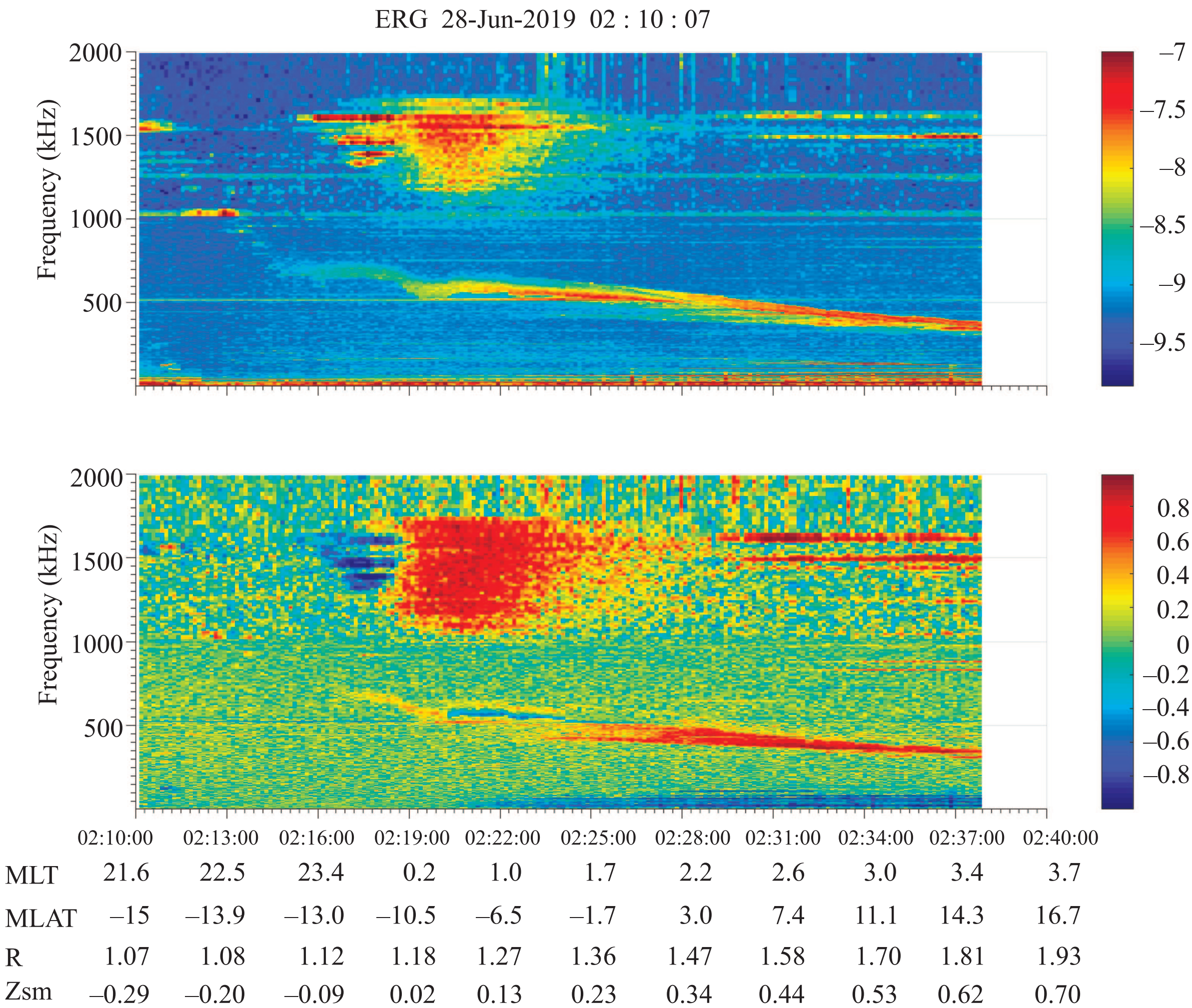


Рис. 3. (Цветной онлайн) Результаты измерений электрической компоненты поля вблизи Земли, проведенные на спутнике ERG 28 июня 2019 г. Верхняя панель – аналогично рис. 1 и 2 – динамическая спектрограмма интенсивности излучения, нижняя панель – спектрограмма одновременных измерений поляризационного коэффициента. Излучение в полосе 700–400 кГц – возбуждение колебаний на верхней гибридной частоте

наблюдалась смена поляризации. Таким образом, измерения на спутнике ERG показали, что в диапазоне частот ниже 500 кГц источники "континуум" излучения находятся вблизи плоскости геомагнитного экватора, $Z_{sm} = 0$, а их размер по Z_{sm} не превышает $0.3{-}0.5R_e$. Подавляющее большинство источников было расположено на дневной стороне магнитосферы на расстоянии $R = 4{-}6R_e$, т.е. вблизи плазмопаузы, что подтверждает результаты работ [2, 3, 6].

4. На ночной стороне плазмосферы наблюдаются более высокочастотные излучения, 600–1600 МГц, спектр которых также представляет собой набор отдельных частот – линейчатый спектр. Следуя традициям [9, 13], будем называть это излучение гектометровым "континуум" излучением. Пример такого излучения приведен на рис. 2. Измерения проводились в ночном/утреннем секторе магнитосферы в течении 5.5 ч. Из амплитудной спектрограммы можно определить область наблюдения максимальной амплитуды сигнала – она расположена вблизи апогея орбиты спутника на расстоянии $5.5{-}6R_e$, т.е. вблизи плазмопаузы. Однако в отличие от сигнала, приведенного на рис. 1, область наблюдения сигнала гораздо более обширная и сильно смещена от плоскости геомагнитного экватора, в данном примере – в южное полушарие, а максимум излучения наблюдается при $Z_{sm} \sim -2.35R_e$.

Интегральная интенсивность излучения в диапазоне частот 1135.2–1721.2 кГц представлена на рис. 5. Максимум излучения наблюдается в 08 : 38 : 24 UT, когда спутник находился на максимальном удалении от плоскости "геомагнитной

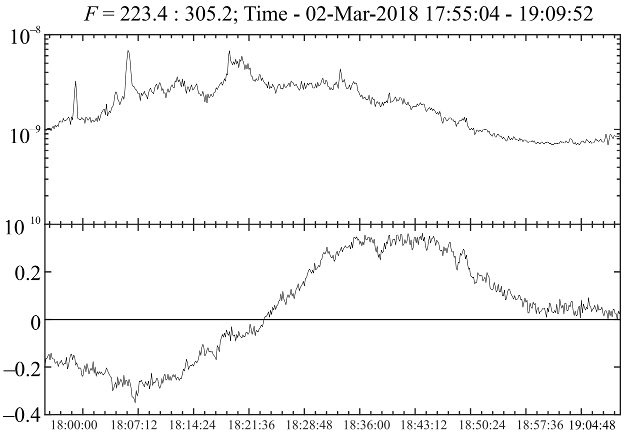


Рис. 4. Верхняя панель – интенсивность “континуум” излучения, усредненная в частотном интервале 228.3−305.2 кГц (в логарифмическом масштабе). Нижняя панель – коэффициент поляризации с аналогичным усреднением в линейном масштабе

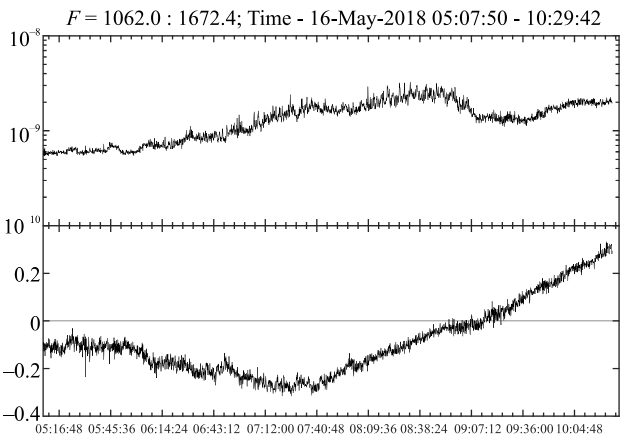


Рис. 5. Верхняя панель – интегральная интенсивность электрической компоненты поля в диапазоне частот 1062.0−1672.4 кГц. Нижняя панель – усредненное значение поляризационного коэффициента в том же диапазоне частот

эклиптики”. Поляризация излучения менялась от отрицательной (рис. 5, нижняя панель) к положительной. Максимум отрицательной поляризации наблюдался в $\sim$07 : 25 UT. В 09 : 07 UT поляризация обращается в ‘0’, а затем становится положительной и до окончания измерений она возрастает. Предполагая, что максимум поляризации может находится вблизи 10 : 30, можно оценить размеры источника излучения – $\Delta R \sim 1.5 R_e$, $\Delta Z_{sm} \sim 1 R_e$.

5. Источники излучения типа гектометрового “континуума” наблюдаются не только в области плазмосферы, т.е. на расстояниях $4{-}6 R_e$, но и вблизи Земли, на расстояниях $\sim 1.1{-}2 R_e$. На рис. 3 приведены результаты измерения электрической компоненты и поляризационного коэффициента при пролете спутника вблизи перигея. С 02 : 15 по 02 : 18 UT спутник находился в южном полушарии, вблизи местной геомагнитной полуночи. В 02.18.30 UT спутник пересек плоскость геомагнитного экватора и вошел в северное полушарие. В этот момент изменилась поляризация излучения (см. рис. 6), что указывает на

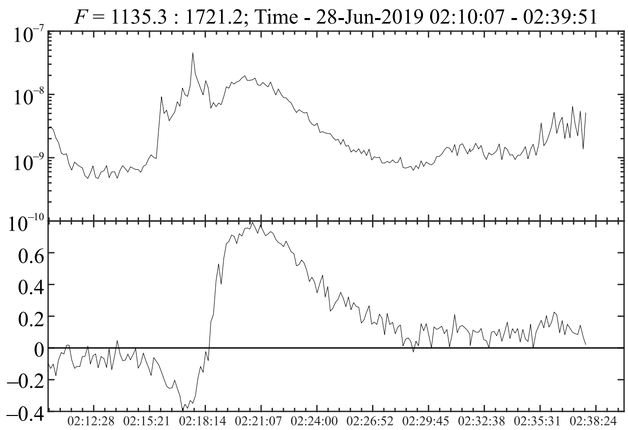


Рис. 6. Аналогично рис. 4 и 5 для 28 июня 2019 г. Полоса усреднения 1295−1696 кГц

пересечение спутником области расположения источника излучения. Далее спутник двигался в северном полушарии, постепенно удаляясь от Земли, и на расстоянии $R = 1.24 R_e$ интенсивность излучения достигает максимума $\sim 10^{-7}$ мВ/м Гц, а ширина его спектра расширяется до 600 кГц – от 1.1 до 1.7 МГц. При дальнейшем удалении от Земли интенсивность излучения спадает и в конце интервала измерений почти сравнивается с фоновым уровнем. Следует отметить, что спектральные и частотные характеристики этого излучения практически идентичны характеристикам излучения, приведенного на рис. 2 и 5. Единственное их существенное отличие – расположение источника излучения.

6. Таким образом, по результатам измерений электрической компоненты электромагнитного поля на спутнике ERG можно выделить два излучения типа “континуум”. Оба излучения имеют сходный по виду, линейчатый спектр. Отличия гектометрового излучения типа “континуум” от километрового собраны в табл. 1.

Долговременные и повторяющиеся измерения дали возможность оценить стационарность гектометрового излучения – оно сохраняется с минимальными изменениями спектра в течении нескольких дней. В работе [19] было показано, что “континуум” излучение наблюдается у всех планет с магнитным полем нашей солнечной системы. Стабильность “контину-

Таблица 1. Отличия "континуум" излучений

Параметры	Излучение типа километровый "континуум"	Излучение типа гектометровый "континуум"
Диапазон частот	3–500 кГц	600–1700 кГц
Скорость дрейф частоты	0 ± 1 кГц/мин	Не наблюдается
Удаленность области генерации от Земли (R)	Вблизи плазмосферы ($5{-}6R_e$)	1) Вблизи плазмосферы ($5{-}6R_e$); 2) Вблизи Земли ($1.1 - 2R_e$)
Размеры области генерации (поперек плоскости магнитной эклиптики)	$\pm(0.1{-}0.3R_e)$	1) $2{-}3R_e$; 2) $0.5 - 1.5R_e$
Время регистрации (Местное магнитное время – MLT)	Преимущественно днем	Преимущественно ночью

ум" излучения в сочетании с результатами работы [19] указывают на возможность использовать это излучения в качестве второго маркера планет с магнитным полем. Первым маркером является Авроральное Километровое Радиоизлучение (АКР) [20], которое характеризуется большой амплитудой, но, относительно коротким временем существования, которое зависит от геомагнитной активности (например, [21, 22]). "Континуум" излучение на 3 – 5 порядков слабее АКР, однако стабильность его существования позволяет проводить длительное накопление сигнала и таким образом сформировать второй маркер. Наличие второго маркера позволит в 8 раз увеличить достоверность обнаружения экзопланет с магнитным полем.

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/ [15]. В исследовании анализируются данные прибора PWE HFA-L2 v01.01 [17].

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства высшего образования и науки РФ 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

1. L. W. Brown, Astrophys. J. **180**, 359 (1973).
2. D. A. Gurnett and R. R. Shaw, J. Geophys. Res. **78**, 8236 (1973).
3. D. A. Gurnett, J. Geophys. Res. **80**(19), 2751 (1975).
4. W. S. Kurth, D. A. Gurnett, and R. R. Anderson, J. Geophys. Res. **86**(A7), 5519 (1981).
5. W. S. Kurth, Geophys. Res. Lett. **9**(12), 1341 (1982).
6. J. L. Green and S. Boardsen, URSI Radio Science Bulletin **2006**(318), 34 (2006).
7. K. Hashimoto, W. Calvert, and H. Matsumoto, J. Geophys. Res. **104**(A12), 28645 (1999).
8. В. Н. Курильчик, В. П. Григорьева, А. Тирпак, С. В. Миронов, Л. Фишер, А. Ярошевич, Космические исследования **30**(1), 107 (1992).
9. В. Н. Курильчик, В. П. Григорьева, А. Тирпак, С. В. Миронов, Л. Фишер, А. Ярошевич, Космические исследования **30**(2), 231 (1992).
10. K. Hashimoto, R. R. Anderson, J. L. Green, and H. Matsumoto, J. Geophys. Res. **110**(A9), A09229 (2005).
11. M. S. Frankel, Radio Sci. **8**(11), 991 (1973).
12. D. Jones, Nature **288**(5788), 225 (1980).
13. K. Hashimoto, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, Y. Kasahara, and A. Matsuoka, Geophys. Res. Lett. **45**(21), 11555 (2018).
14. Y. Miyoshi, I. Shinohara, T. Takashima et al. (Collaboration), Earth, Planets, and Space **70**(1), 101 (2018).
15. Y. Miyoshi, T. Hori, M. Shoji et al. (Collaboration), Earth, Planets, and Space **70**(1), 96 (2018).
16. В. И. Колпак, М. М. Могилевский, Д. В. Чугунин, А. А. Чернышов, И. Л. Моисеенко, А. Кумамото, Ф. Тсучия, Е. Касахара, М. Шойи, Е. Миеши, И. Шинохара, Солнечно-земная физика **7**(1), 11 (2021).
17. A. Kumamoto, F. Tsuchiya, Y. Kasahara, Y. Kasaba, H. Kojima, S. Yagitani, K. Ishisaka, T. Imachi, M. Ozaki, S. Matsuda, M. Shoji, A. Matsuoka, Y. Katoh, Y. Miyoshi, and T. Obara, Earth, Planets, and Space **70**(1), 82 (2018).
18. Y. Kasahara, Y. Kasaba, H. Kojima et al. (Collaboration), Earth, Planets, and Space **70**(1), 86 (2018).
19. W. S. Kurth, in *Planetary Radio Emissions III*, ed. by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and M. L. Kaiser, Austrian Academy of Sciences Press, Wien (1992).
20. Е. А. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Ю. А. Сазонов, А. Ф. Тарасов, Космические исследования **3**, 614 (1965).
21. Д. В. Чугунин, А. А. Чернышов, И. Л. Моисеенко, М. Е. Викторов, М. М. Могилевский, Геомагнетизм и аэрономия **60**(5), 538 (2020).
22. М. М. Могилевский, Т. В. Романцова, Я. Ханаш, Т. М. Буринская, Р. Шрайбер, Письма в ЖЭТФ **86**(11), 819 (2007).