

## **Исследование интенсивности низкочастотных излучений в верхней ионосфере приборами искусственного спутника Земли**

А. О. Рябов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия, 603950, Россия, г. Нижний Новгород,  
проспект Гагарина, 23, RyabovAIOI@yandex.ru*

*Представлены результаты исследования возбуждения магнитосферного циклотронного мазера, наблюдаемого в виде выделенного на фоне КНЧ шипений достаточно узкополосного излучения на частотах порядка гирочастоты протонов на высотах внешней ионосферы Земли. Была выявлена зависимость интенсивности генерации от уровня геомагнитной активности. Кроме того, был сделан вывод о едином механизме генерации низкочастотных излучений (ионно-циклотронный мазер и КНЧ хиссы), обусловленный взаимодействием электромагнитных волн типа свистов с высокоэнергетичными электронами радиационных поясов, находящимися с ними в циклотронном резонансе. Проведена оценка максимальной частоты в спектре низкочастотного излучения, и она соответствовала представленным результатам наблюдений. Была предложена картина поведения свистовых волн, запертых в плазмосферном резонаторе, в утренние и вечерние часы. В рамках работы показано, что наибольший эффект обнаружен над областью Бразильской магнитной аномалии.  
Ключевые слова: ионосфера, гирочастота, мазер, Бразильская магнитная аномалия.*

## **Investigation of the intensity of low-frequency radiation in the upper ionosphere by instruments of an artificial Earth satellite**

A. O. Ryabov

*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod - National Research University  
603950 Nizhniy Novgorod, 23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue)  
E-mail: RyabovAIOI@yandex.ru*

*The paper presents the scientific results of magnetospheric cyclotron maser investigation, which was observed in the form of highlighted narrow-band radiation in the background of ELF hiss at frequencies of the order of proton gyrofrequency at altitudes of the topside ionosphere. The entire period of operation of the satellite was from 2004 to 2010. The dependence of the generation intensity from the geomagnetic activity level was defined. In addition, it was concluded that there is the same mechanism of different types of low frequency radiation (ion cyclotron maser and ELF hiss) due to the interaction of electromagnetic waves type whistles with high-energy electrons of the radiation belts, which they carry with them to the cyclotron resonance. The estimation of the maximum frequency in the spectrum of low-frequency radiation was defined, and it is consistent with the presented observations. The picture of the behavior of Whistler waves trapped in plasmosphere resonator was offered. The work shows that the greatest effect was observed over the area of the Brazilian magnetic anomaly.*

*Keywords: ionosphere, gyrofrequency, maser, Brazilian magnetic anomaly*

### **I. Введение**

Изучение ионосферно-магнитосферных связей является актуальной задачей современной физики в связи с постоянным увеличением техногенной электромагнитной нагрузки на окружающую среду. Резонансные взаимодействия волновых полей и потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли могут привести к генерации магнитосферного циклотронного мазера [1-2]. Электродинамической системой в мазере является заполненная холодной плазмой магнитная силовая трубка.

Роль активного вещества выполняют частицы радиационных поясов, для которых из-за наличия конуса потерь в пространстве скоростей характерна инверсия населенностей, проявляющаяся в поперечной анизотропии функции распределения. Инверсия населенностей по поперечным скоростям частиц радиационного пояса создает условия для развития циклотронной неустойчивости, в результате которой малые электромагнитные возмущения экспоненциально нарастают. В пределах длины магнитной силовой трубки неустойчивость носит конвективный характер. Положительная обратная связь обеспечивается частичным отражением волн от ионосферных зеркал. Порог генерации достигается при балансе усиления волн и потерь. Возбуждение магнитосферного мазера проявляется в значительном увеличении интенсивности возбуждаемых низкочастотных излучений (ОНЧ и КНЧ диапазонов) и высыпаний отработавших высокоэнергетических частиц [3]. Примером естественной шумовой генерации КНЧ излучений в магнитосфере являются плазмосферные шипения [4].

Результатом настоящей работы стали исследования возбуждения магнитосферного циклотронного мазера, который был обнаружен в форме выделенного на фоне КНЧ шипений узкополосного излучения на частотах порядка гирочастоты протонов. В работе были проанализированы результаты измерений параметров плазмы и характеристик электромагнитных полей, полученных бортовыми инструментами ИСЗ DEMETER. Спутник имел гелиосинхронную орбиту и над любой выбранной областью пролетал дважды в день (утром и вечером) в определенное местное время.

## **II. Искусственный спутник Земли Demeter**

ИСЗ DEMETER (*Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*) был запущен для диагностики ионосферных возмущений, связанных с землетрясениями, извержениями вулканов, электромагнитных проявлений человеческой активности [5-7]. Он обладает уникальным набором высокочувствительных инструментов, что позволяет решать задачи, связанные с изучением влияния мощных радиоизлучений существующих КВ радиостанций на ионосферу Земли, изучать механизмы распространения плазменных возмущений различной природы вдоль силовых линий геомагнитного поля, условия формирования спектра ионосферных неоднородностей плотности плазмы как искусственной, так и естественной природы.

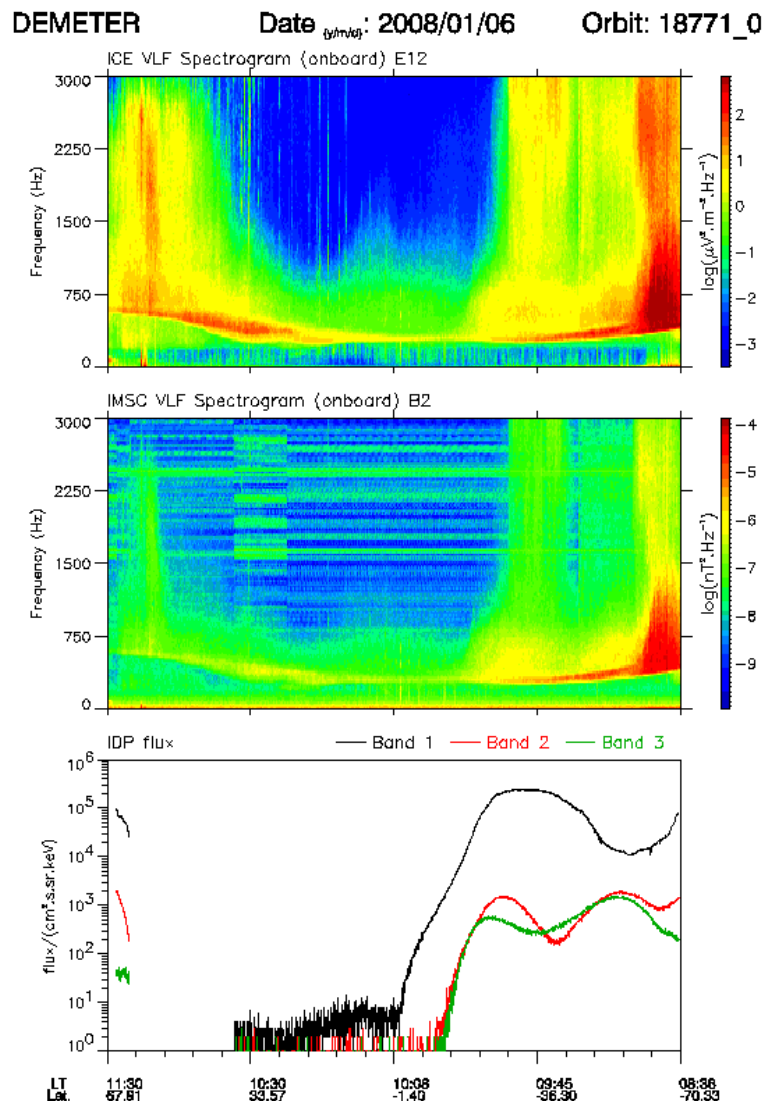
Спутник DEMETER был запущен на круговую солнечно синхронизированную полярную орбиту с наклоном  $98.3^\circ$  и высотой 710 км 29 июня 2004 года российской ракетой «Днепр» с космодрома «Байконур». В декабре 2005 года высота орбиты спутника была снижена до 660 км.

## **III. Наблюдаемые явления**

Ионно-циклотронный мазер возбуждается во время утренней перестройки магнитосферы (~ 9–10 утра по местному времени) на частотах порядка и ниже максимальной гирочастоты протонов. Ширина полосы зоны генерации по широте ~  $30^\circ$ , с юга и севера ограничена полярными областями и перемещается вместе с вращением Земли.

Новым результатом наблюдений явилось обнаружение генерации излучения на частотах порядка гирочастоты протонов на высотах пролета спутника в утренние часы после прохождения терминатора. Наиболее ярко генерация наблюдалась над областью Бразильской магнитной аномалии (БМА) [8], характеризуемой высокой интенсивностью потоков высыпающихся высокоэнергетических заряженных частиц.

На рис. 1 приведены результаты измерений динамических спектров электрических (верхняя панель) и магнитных (средняя панель) полей и концентрация высокозаряженных электронов (нижняя панель) при пролете ИСЗ DEMETER 06.01.2008 над долготами БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной активности было  $Kp = 3$ . Наблюдаемая на панелях генерация ионно-циклотронной линии (на рисунке – кривая на частотах 400-600 Гц) с юга и севера ограничена высокоширотными областями. В северном полушарии и экваториальной области интенсивность наблюдаемой генерации несколько слабее, чем в южном полушарии. Ионно-циклотронная линия регистрируется на фоне генерации КНЧ шипений. Верхняя граничная частота наблюдаемых шипений изменяется от 1 кГц в районе экватора до 2-2,5 кГц в более высокоширотных областях.

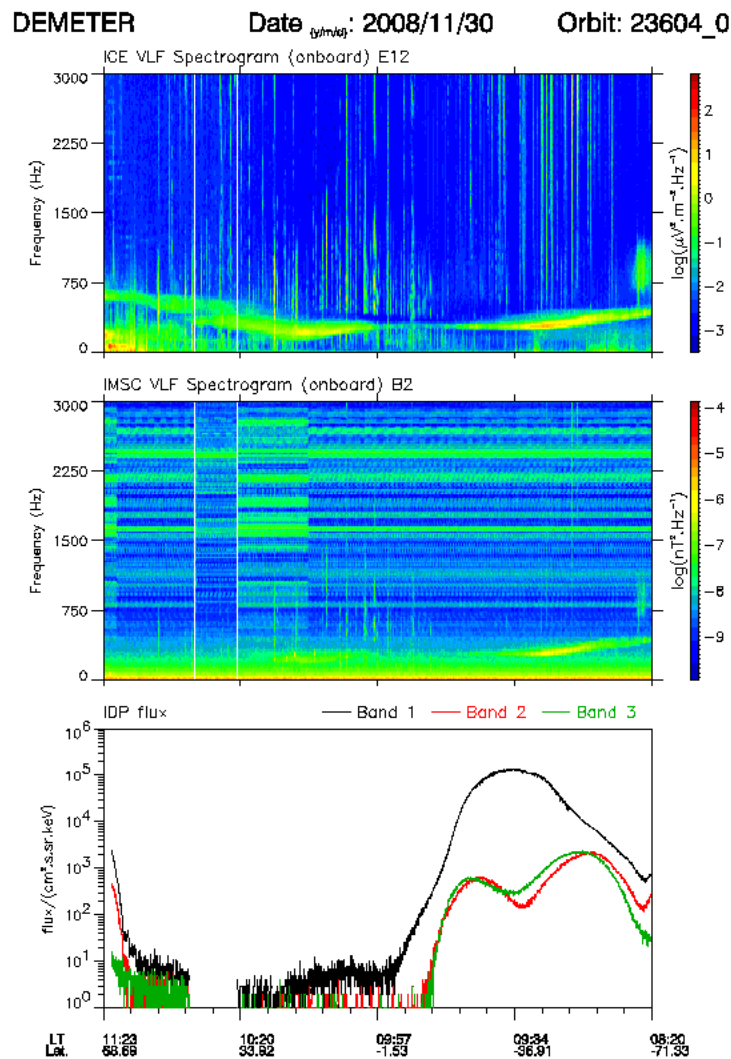


**Рис. 1. Результаты измерений динамических спектров электрических (верхняя панель) и магнитных (средняя панель) полей и концентрация высокозаряженных электронов (нижняя панель) для сеанса пролета ИСЗ DEMETER 06.01.2008 над область БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $Kp = 3$**

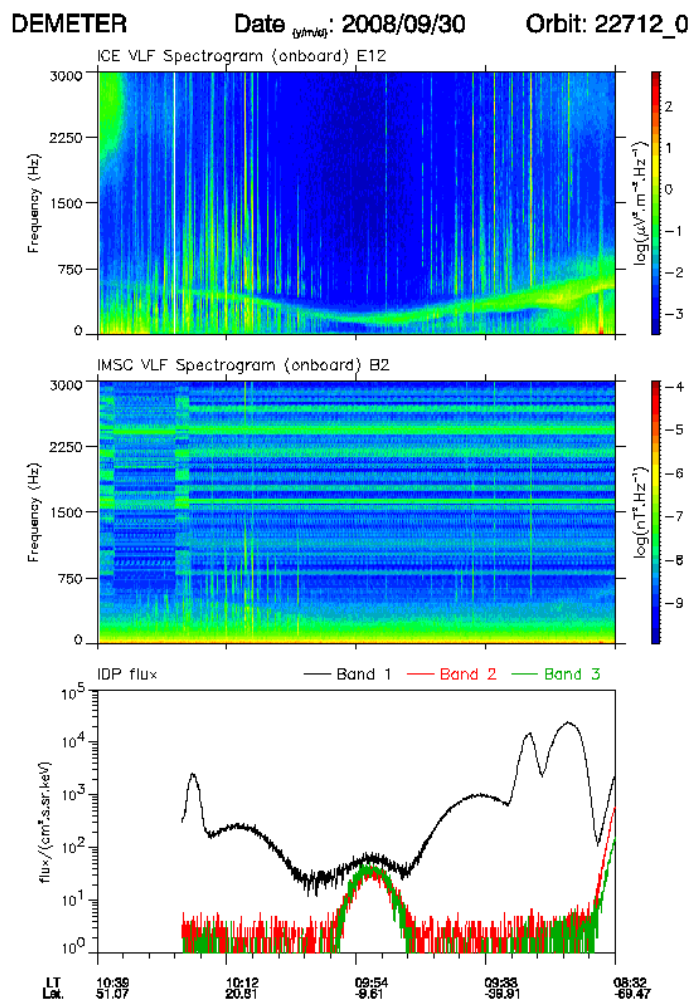
Интенсивность наблюдаемой генерации существенно зависит от уровня геомагнитной активности. На рис. 2 представлены результаты измерений при пролете 30.11.2008 над областью БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной

активности  $Kp = 0+$ . Данные, представленные на рис. 2, показывают, что произошло значительное уменьшение интенсивности электрической составляющей наблюдаемых излучений по сравнению с результатами измерений для пролета 06.01.2008. При этом магнитная составляющая сигнала в окрестности гирочастоты протонов не наблюдается совсем.

Был проведен анализ более 100 сеансов пролетов ИСЗ *DEMETER* над областью БМА аномалии и сделан вывод о зависимости между геомагнитной активностью и наблюдаемыми явлениями. Данные представленные на рис. 1-2 являются характерными.



**Рис. 2.** Результаты измерений для сеанса пролета ИСЗ *DEMETER* 30.11.2008 над областью БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $Kp = 0+$



**Рис. 3. Результаты измерений для сеанса пролета ИСЗ DEMETER 30.09.2008 над Австралией. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $Kp = 4$**

Кроме того, на Рис. 3 приведены результаты измерений при пролете 30.09.2008 над Австралией. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $Kp = 4$ . Можно отметить, что интенсивности электрического и магнитного полей значительно меньше, чем в случае Рис. 1, когда ИСЗ *DEMETER* пролетал над областью БМА при большом значении  $Kp$ . Данный случай (см. Рис. 3) характерен: был проведен анализ более 150 сеансов пролетов спутника над областями, отличными от БМА и установлено, что рассматриваемые явления наблюдаются значительно хуже.

Таким образом, новым результатом наблюдений явилось обнаружение внутри плазмосферы генерации излучения на частотах порядка гирочастоты протонов на высотах пролета ИСЗ *DEMETER* в утренние часы, после прохождения терминатора. Наиболее ярко эффект наблюдается над областью Бразильской магнитной аномалии. Выявлена зависимость интенсивности генерации от уровня геомагнитной активности.

#### **IV. Обсуждение полученных результатов**

Наличие ионно-циклотронной линии на фоне генерации КНЧ хиссов, а также обнаруженная зависимость эффектов возбуждения от интенсивности потоков высыпающихся частиц указывают, по-видимому, на единый механизм генерации низкочастотных излучений, обусловленный взаимодействием электромагнитных волн

типа свистов с высокоэнергетичными электронами радиационных поясов, находящимися с ними в циклотронном резонансе.

Максимальная частота наблюдаемых низкочастотных излучений

$$\omega_{\max} = \frac{q}{q+1} \omega_{He_0} \quad (1)$$

где  $q$  – параметр анизотропии,  $\omega_{He_0}$  – гирочастота электронов в центральном сечении магнитной силовой трубки. Для типичного значения параметра анизотропии  $q=1/4$  при  $L = 4$  (параметр Мак-Илвейна) получаем, что максимальная частота в спектре низкочастотного излучения не должна превосходить 2,5 кГц, что соответствует представленным результатам наблюдений.

Потоки высокоэнергетичных электронов усиливают свистовые волны, запертые в плазмозферном резонаторе (область относительно холодной, плотной околоземной плазмы, расположенная между ионосферой и резким падением плотности плазмы в районе  $L \sim 5$  (плазмопауза)). Свисты при отражениях от торцов резонатора переходят с одной силовой линии на другую и диффузно заполняют весь резонатор. В результате внутри плазмозферы наблюдается генерация КНЧ хиссов.

В утренние часы в системе ионосфера-магнитосфера Земли у свистов, усиленных в результате взаимодействия с высокоэнергетичными электронами, появляется возможность с малыми потерями отразиться от верхней ионосферы обратно на ту же силовую линию и замкнуть обратную связь нужного знака.

В вечерние часы (возможно, из-за снижения высоты области отражения свистовых волн) величина усиления волн становится уже недостаточной для генерации ионно-циклотронной линии.

## V. Заключение

В работе представлены результаты по наблюдению генерации магнитосферного циклотронного мазера. Новым в них явилось обнаружение внутри плазмозферы генерации излучения на частотах порядка гирочастоты протонов на высотах пролета ИСЗ *DEMETER* в утренние часы, после прохождения терминатора. Наиболее ярко эффект наблюдается над областью Бразильской магнитной аномалии, характеризующейся высокой интенсивностью потоков высыпавшихся высокоэнергетичных заряженных частиц. Выявлена зависимость интенсивности генерации от уровня геомагнитной активности.

Мониторинг представленных КНЧ излучений позволяет получать информацию о состоянии радиационных поясов Земли и параметрах околоземной плазмы невозмущающим (без внешнего воздействия) методом, что открывает дополнительные возможности для исследования окружающей среды.

*Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.*

## Литература

1. Santolik O., Parrot M. Propagation analysis of electromagnetic waves between the helium and proton gyrofrequencies in the low-altitude auroral zone // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, No. A9. P.20469-20480.
2. Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y., Mogilevsky M.M., Zelenyi L. M. Current problems in studies of magnetospheric cyclotron masers and new space project “resonance” // Adv. Spa Res. 2003. V. 32, P.355-374.
3. Park C.G. and Helliwell R.A. The Formation by Electric Fields of Field-Aligned Irregularities in the Magnetosphere // Radio Sci. 1971. V. 6, P.299-304.

- Pinto O., Gonzalez W.D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. V. 51. P.351-365.
4. Thorne R.M., Smith E. J., Burton R.K., Holzer R.E. Plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, No. 10. P.1581-1596.
5. Cussac T., Clair M.A., Ultré-Guerard P. Ultré-Guerard P., Buisson F., Lassalle-Balier G., Ledu M., Elisabelar C., Passot X., Rey N. The Demeter microsatellite and ground segment // *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P.413-427.
6. Рябов А.О. Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы стенда «СУРА». // *Физика плазмы.* – 2018. – Т. 44, № 11. – С. 916-921.
7. Рябов А.О., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопряженной относительно стенда «Сура» области ионосферы. *Изв. вузов. Радиофизика*, 2020. – Т. 63, № 4. – С. 285-296.
8. Pinto O., Gonzalez W.D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. V. 51. P.351-365.