

# **Наблюдение ионно-циклotronной линии в верхних слоях ионосферы Земли**

Рябов А.О.

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород*

## **Введение**

Исследование ионосферно-магнитосферной взаимосвязи Земли является важной задачей современной физики. Активное взаимодействие волновых полей и потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли часто приводит к генерации магнитосферного циклотронного мазера [1-5]. В настоящей работе изучена специфика возбуждения магнитосферного циклотронного мазера, который был обнаружен в форме выделенного на фоне крайне низкочастотных (КНЧ) шипений узкополосного излучения на частотах порядка гирочастоты протонов.

Роль активного вещества играют частицы радиационных поясов, у которых из-за наличия конуса потерь в пространстве скоростей возникает 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 протяженности магнитной силовой трубы неустойчивость носит конвективный характер. Положительная обратная связь обеспечивается частичным отражением волн от ионосферных зеркал. Порог генерации достигается при соблюдении баланса между усилением волн и потерями. Возбуждение магнитосферного мазера проявляется в значительном увеличении интенсивности возбуждаемых низкочастотных излучений (ОНЧ и КНЧ диапазонов) и высываний высокоэнергетических частиц, исчерпавших запас энергии. Примером естественной шумовой генерации КНЧ излучений в магнитосфере являются плазмосферные шипения.

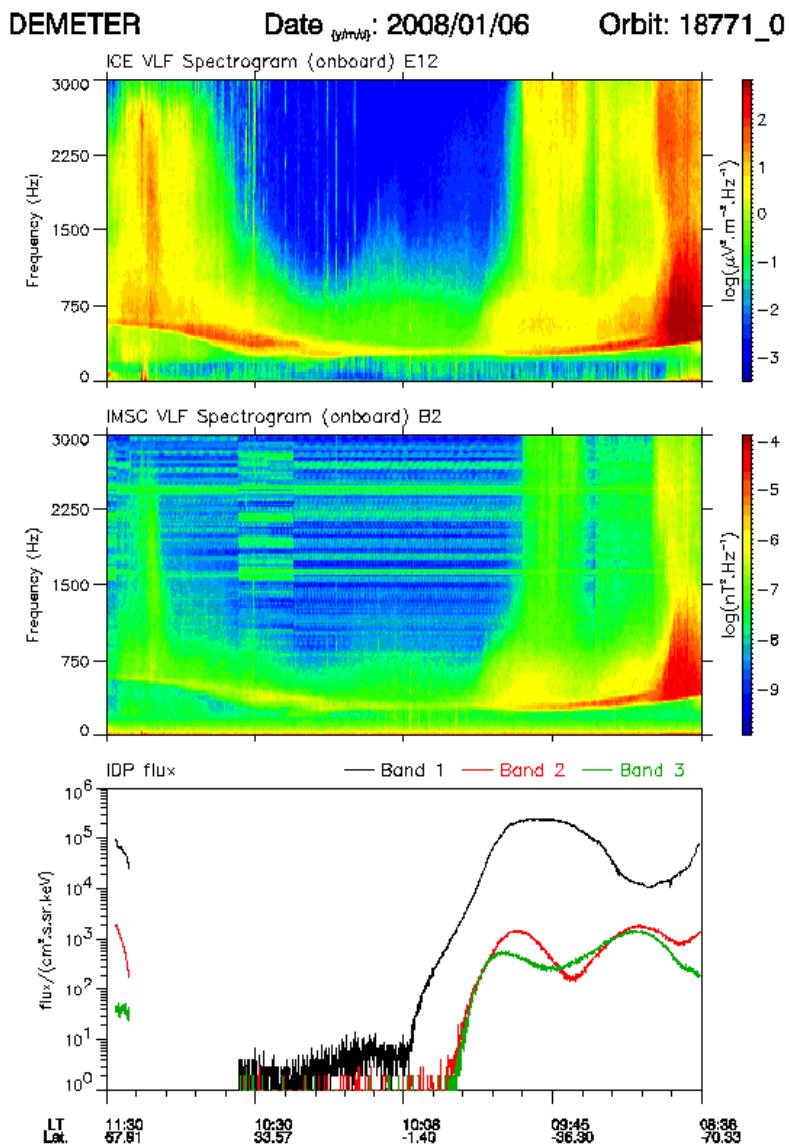
Основным результатом настоящей работы явилось исследование возбуждения магнитосферного циклотронного мазера, который проявлялся в форме узкополосного излучения, выделенного на фоне КНЧ шипений, на частотах порядка гирочастоты протонов. В работе были проанализированы данные измерений параметров плазмы и характеристик электромагнитных полей, полученные бортовыми инструментами ИСЗ DEMETER. Спутник находился на гелиосинхронной орбите и над любой выбранной областью пролетал дважды в день (утром и вечером) в определенное местное время.

ИСЗ DEMETER был запущен для диагностики ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями, извержениями вулканов, а также электромагнитными проявлениями человеческой активности. Аппарат обладает уникальным набором высокочувствительных инструментов, что позволяет исследовать влияние мощных радиоизлучений КВ-радиоцентров на ионосферу Земли, изучать механизмы распространения плазменных возмущений различной природы вдоль силовых линий геомагнитного поля и условия формирования спектра ионосферных неоднородностей плотности плазмы искусственного и естественного происхождения.

Спутник *DEMETER* был запущен на круговую солнечно синхронизированную полярную орбиту с наклонением  $98.3^{\circ}$  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.

## Наблюдаемые явления

Ионно-циклотронный мазер возбуждается во время утренней перестройки магнитосферы ( $\sim 9\text{--}10$  утра по местному времени) на частотах порядка и ниже максимальной гирочастоты протонов. Поперечный размер зоны генерации по широте составляет  $\sim 300$  км, она ограничена с юга и севера полярными областями и перемещается вслед за вращением Земли. Новым результатом наблюдений стало обнаружение генерации излучения на частотах гирочастоты протонов на высотах пролета спутника в утренние часы после прохождения терминатора. Наиболее ярко генерация наблюдалась над областью Бразильской магнитной аномалии (БМА), для которой характерны высокоинтенсивные потоки высывающихся высокоэнергетичных заряженных частиц.



**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  $K_p = 3$

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  $K_p = 3$ . Зарегистрированная на панелях генерация ионно-циклотронной линии (на рисунке – кривая на частотах 400-600 Гц) ограничена с юга и севера

высокоширотными областями. В северном полушарии и экваториальной области интенсивность этой генерации несколько ниже, чем в южном полушарии. Ионно-циклотронная линия регистрируется на фоне КНЧ-шипений. Верхняя граничная частота шипений изменяется от 1 кГц в экваториальных районах до 2-2,5 кГц в более высокоширотных областях.

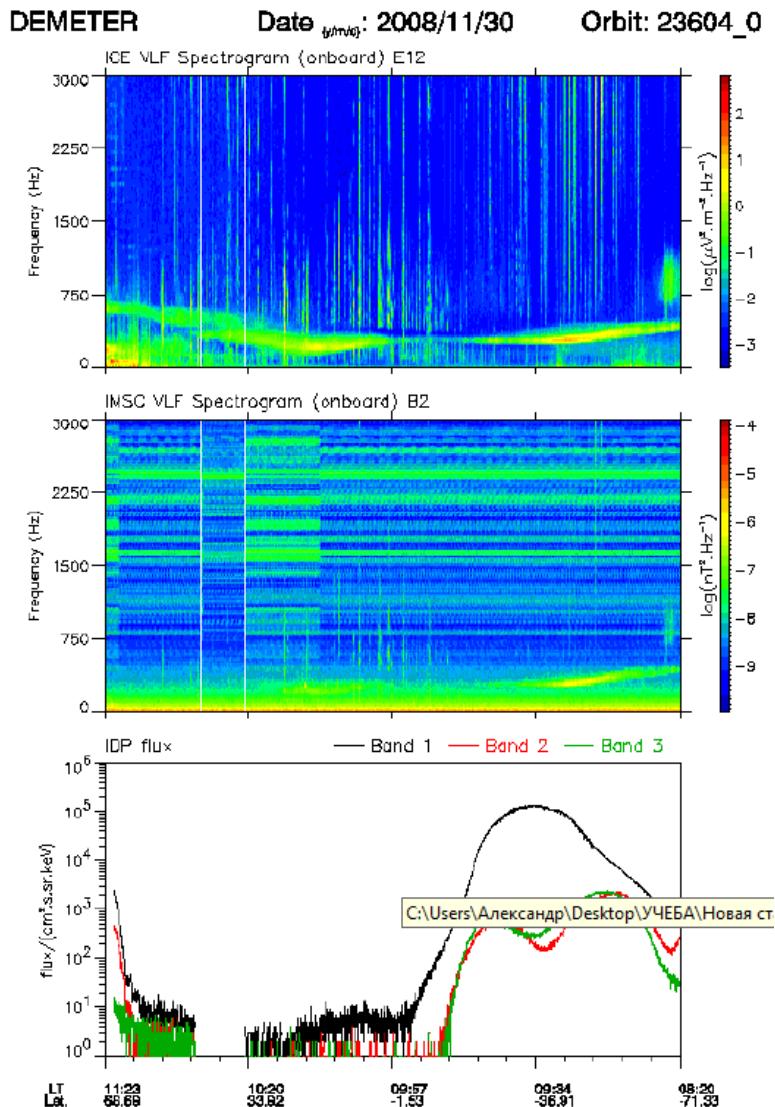


Рис. 2. Результаты измерений для сеанса пролета ИСЗ DEMETER 30.11.2008 над областью БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $K_p = 0+$

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  $K_p = 0+$ . Данные, представленные на рис. 2, показывают, что произошло значительное уменьшение интенсивности электрической составляющей наблюдавших 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.

## **Обсуждение полученных результатов**

Наличие ионно-циклотронной линии на фоне КНЧ-хиссов, а также выявленная зависимость возбуждения от интенсивности потоков высывающихся частиц свидетельствуют о едином механизме генерации низкочастотных излучений, связанном с взаимодействием электромагнитных волн свистового типа с высокоэнергетичными электронами радиационных поясов, находящимися с ними в циклотронном резонансе. Потоки высокоэнергетичных электронов усиливают свистовые волны, захваченные в плазмосферном резонаторе (область относительно холодной, плотной околоземной плазмы, расположенная между ионосферой и резким падением плотности плазмы в районе  $L \sim 5$  (плазмопаузы)). При отражении от границ резонатора свисты переходят с одной силовой линии на другую и диффузно заполняют весь его объем. В результате внутри плазмосферы наблюдается генерация КНЧ-хиссов. В утренние часы в системе ионосфера-магнитосфера у свистов, усиленных при взаимодействии с высокоэнергетичными электронами, появляется возможность с малыми потерями отразиться от верхней ионосферы обратно на ту же силовую линию, замыкая тем самым положительную обратную связь. В вечерние часы (возможно, из-за снижения высоты области отражения свистовых волн) уровень усиления волн становится недостаточным для генерации ионно-циклотронной линии.

## **Заключение**

В работе представлены результаты наблюдений генерации магнитосферного циклотронного мазера. Основная новизна заключается в обнаружении 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, для которой характерны высокоинтенсивные потоки высывающихся высокоэнергетичных заряженных частиц. Мониторинг данных КНЧ излучений позволяет получать информацию о состоянии радиационных поясов Земли и параметрах околоземной плазмы дистанционным (без внешнего воздействия) методом, что открывает дополнительные возможности для исследования околоземного космического пространства.

*Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 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. Белов А.С., Марков Г.А., Рябов А.О., Парро М. Возмущение ионосферно-магнитосферных связей мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков. ЖЭТФ. 2012. Т. 142. № 6. С. 1246-1252.
3. Park C.G., Helliwell R.A. The Formation by Electric Fields of Field-Aligned Irregularities in the Magnetosphere. Radio Sci. 1971. V. 6, P. 299-304.
4. 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.
5. Рябов А.О. Поляризационные характеристики КНЧ/СНЧ-волн, наблюдавшихся во внешней ионосфере при воздействии мощным наземным КВ-радиоизлучением. В книге: Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Тезисы докладов XV Конференции молодых ученых. 2017. С. 92.