

# Наблюдение ионно-циклотронной 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 трубки 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 высыпаний высокоэнергетичных 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 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.

## 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. Поперечный размер зоны генерации по широте составляет ~ 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 порядка 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 высыпающихся высокоэнергетичных заряженных частиц.

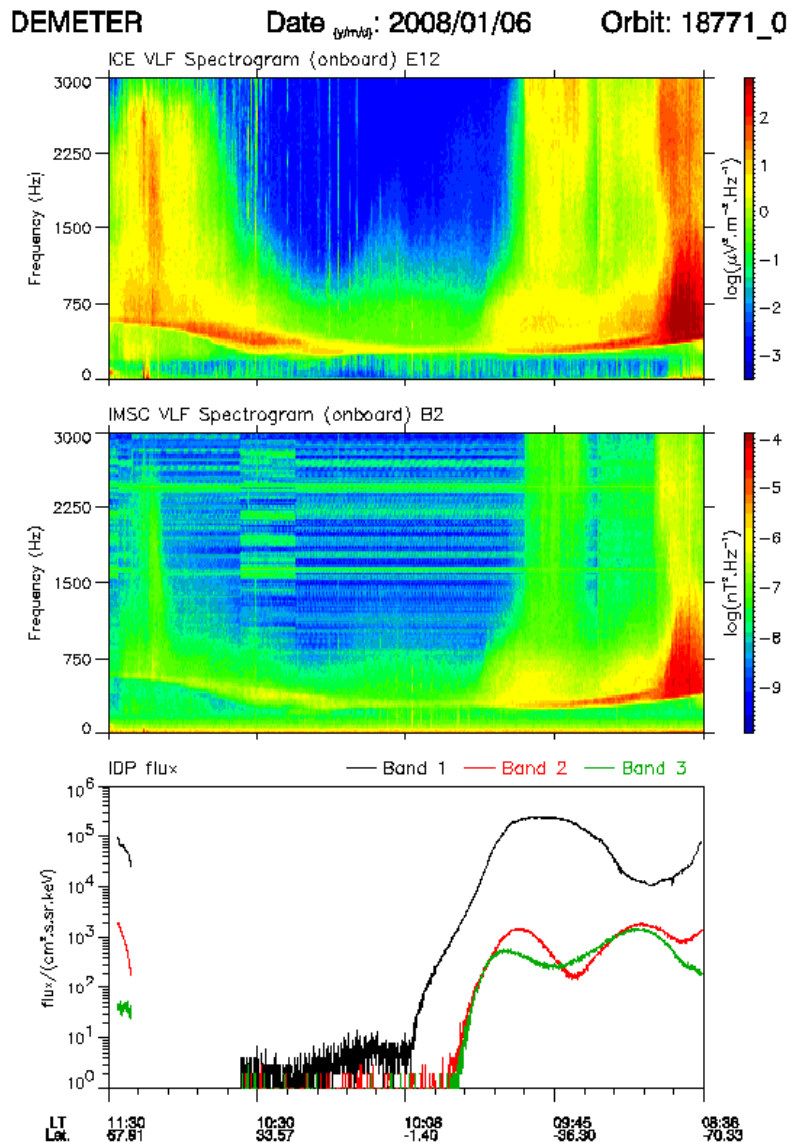


Рис. 1. Результаты измерений динамических спектров электрических (верхняя панель) и магнитных (средняя панель) полей и концентрация высокозаряженных электронов (нижняя панель) для сеанса пролета ИСЗ DEMETER 06.01.2008 над областью БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $Kp = 3$

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  $Kp = 3$ . 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.

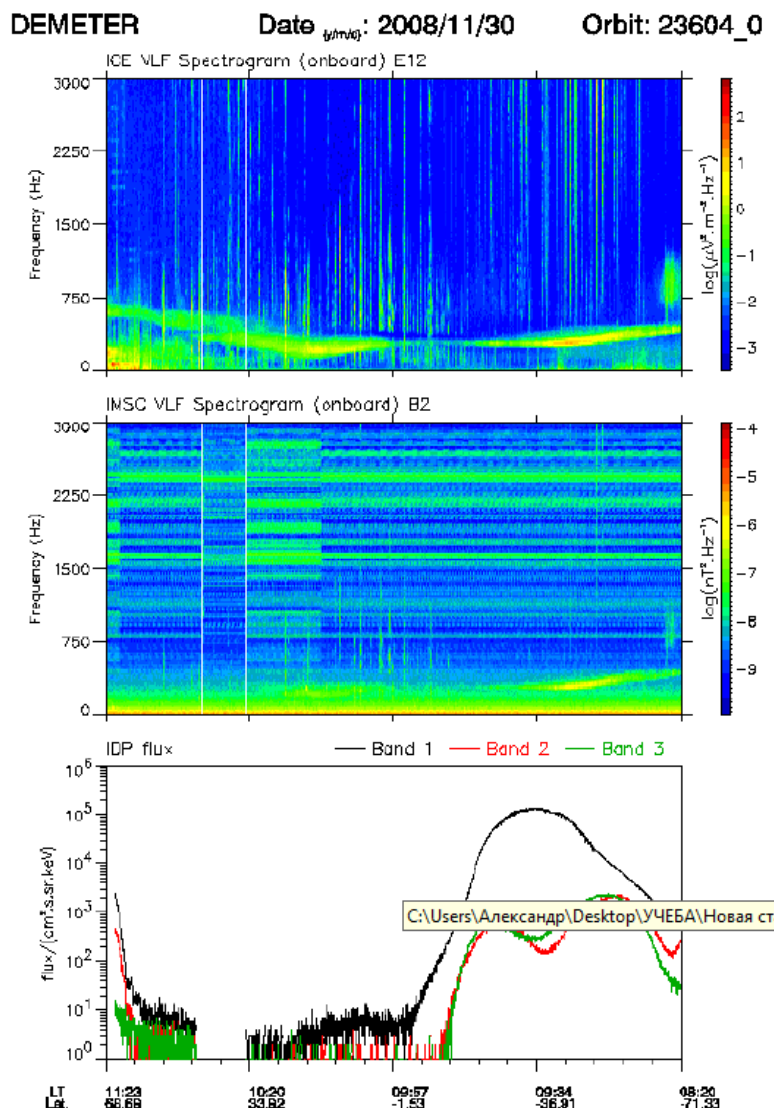


Рис. 2. Результаты измерений для сеанса пролета ИСЗ DEMETER 30.11.2008 над область БМА. Значение индекса планетарной геомагнитной активности  $Kp = 0+$

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  $Kp = 0+$ . 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.

## Обсуждение полученных результатов

Наличие ионно-циклотронной линии на фоне КНЧ-хиссов, а также выявленная зависимость возбуждения от интенсивности потоков высыпающихся 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 высыпающихся 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, наблюдаемых 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.