

УДК: 533.951 + 537.86 + 537.876

DOI: 10.26907/rwp29.2025.653-656

ГЕНЕРАЦИЯ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ ЛИНИИ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

А.О. Рябов

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, Россия, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23

Аннотация. В публикации представлены результаты исследования возбуждения магнитосферного циклотронного мазера, наблюдаемого в виде выделенного на фоне крайне низкочастотных шипений узкополосного излучения на частотах порядка гирочастоты протонов на высотах внешней ионосферы Земли. Была выявлена зависимость интенсивности генерации от уровня геомагнитной активности. Сделан вывод о едином механизме генерации низкочастотных излучений. Проведена оценка максимальной частоты в спектре низкочастотного излучения. Предложена картина поведения свистовых волн, запертых в плазмосферном резонаторе. В рамках работы показано, что наибольший эффект обнаружен над областью Бразильской магнитной аномалии.

Ключевые слова: ионосфера, турбулентность, геомагнитная активность.

GENERATION OF ION-CYCLOTRON LINE IN THE EARTH'S UPPER IONOSPHERE

A.O. Ryabov

Abstract. The article presents the results of the study of excitation of the magnetospheric cyclotron maser observed as a fairly narrow-band radiation isolated against the background of extremely low-frequency hisses at frequencies of the order of the proton gyrofrequency at the heights of the Earth's outer ionosphere. The dependence of the generation intensity on the level of geomagnetic activity was revealed. A conclusion was made about a single mechanism for generating low-frequency radiation. An estimate of the maximum frequency in the spectrum of low-frequency radiation was made. A behavioral pattern of whistler waves locked in a plasmaspheric resonator was proposed. Within the framework of the work, it was shown that the greatest effect was detected over the region of the Brazilian Magnetic Anomaly.

Keywords: ionosphere, turbulence, geomagnetic activity.

Введение

Изучение связи между ионосферой и магнитосферой Земли является важной 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 данном случае является заполненная холодной плазмой магнитная силовая трубка. Активным веществом являются частицы радиационных поясов, для которых из-за наличия конуса потерь в пространстве скоростей характерна инверсия населенностей. 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 контролируется 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 высокоэнергичных частиц [3]. Примером естественной шумовой генерации КНЧ излучений в магнитосфере являются плазмосферные шипения.

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.

Условия проведения экспериментов

Спутник DEMETER был запущен в июне 2004 г. на круговую солнечно-синхронную полярную орбиту с наклоном 98.3° и высотой ~ 710 км; в декабре 2005 г. высота его орбиты была понижена до ~ 660 км. Скорость спутника составляла 7.6 км/с. DEMETER был запущен на орбиту для диагностики ионосферных возмущений, связанных с землетрясениями, извержениями [4–5].

Результаты проведённых экспериментов

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

Результатом сеансов 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) [6], характеризующейся высокой интенсивностью потоков высыпающихся высокоэнергичных 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.

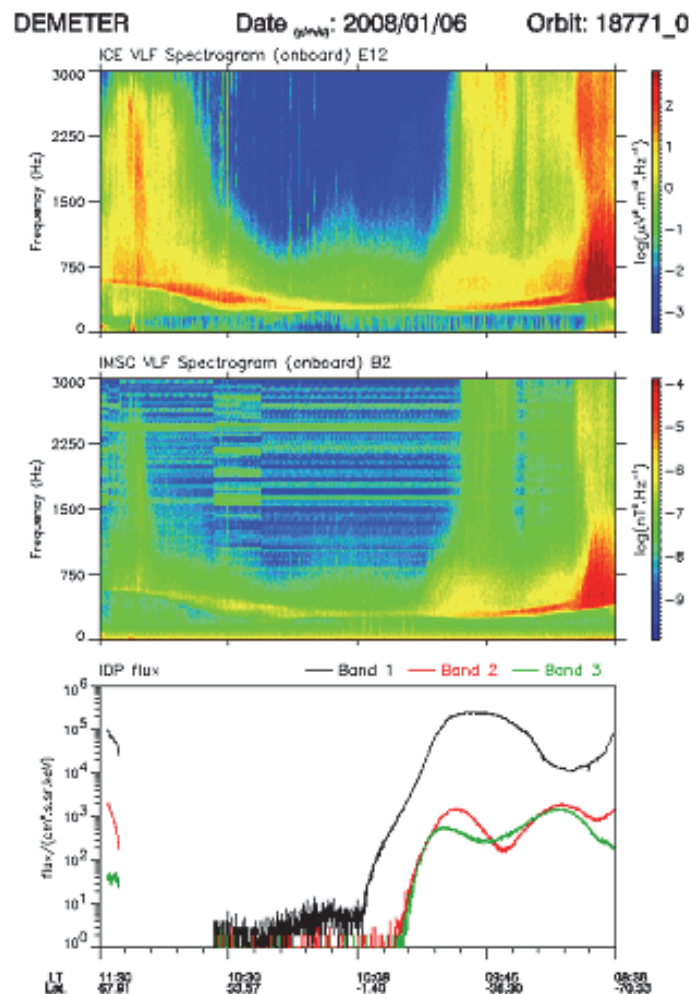


Рис. 1. Сеанс пролета ИСЗ DEMETER 06.01.2008 над долготами БМА

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 $K_p = 0+$.

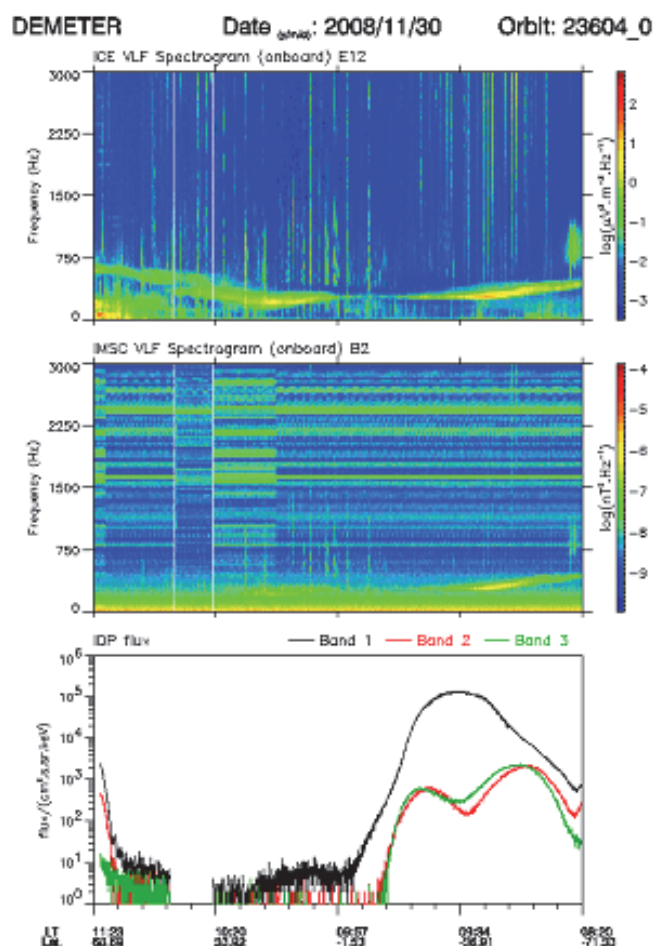


Рис. 2. Сеанс пролета ИСЗ DEMETER 30.11.2008 над долготами БМА

Сеанс на рис. 2 показывает, что произошло значительное ослабление 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 120 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.

Заключение

Присутствие ионно-циклотронной линии на фоне генерации КНЧ хиссов, а также обнаруженная зависимость эффектов возбуждения от интенсивности потоков выпадающих частиц указывают на единый механизм генерации низкочастотных излучений, обусловленный взаимодействием электромагнитных волн типа свистов с высокоэнергичными электронами радиационных поясов, находящимися с ними в циклотронном резонансе. Потоки высокоэнергичных электронов усиливают свистовые волны, запертые в плазмосферном резонаторе. Свисты при отражениях от торцов резонатора переходят с одной силовой линии на другую и диффузно заполняют весь резонатор. В результате внутри плазмосферы наблюдается генерация КНЧ хиссов.

Утром в системе ионосфера-магнитосфера Земли у свистов, усиленных в результате взаимодействия с высокоэнергичными 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.

Благодарности

Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

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 // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: тезисы докладов XV Конференции молодых ученых, 2017. – С. 92.
6. Pinto O., Gonzalez W.D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly // J. Atmos. Terr. Phys. – 1989. – V. 51. – P. 351–365.