ОСОБЕННОСТИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

П.А. Беспалов[1,2], О.Н. Савина[1], Г.М. Нещеткин[1]

[1] *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*
[2] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Содержание:

- Введение
- Исходные положения и новые горизонты
- Квазипериодические излучения QP 2
- Периодические чередующиеся всплески излучений
- Более сложные последовательности всплесков
- КНЧ излучения в облаках плотной плазмы
- Усредненные квазилинейные уравнения
- Причина возбуждения QP 2 излучений
- Нелинейная и неавтономная теоретическая модель
- Некоторые результаты расчетов
- Заключение

Восемнадцатая ежегодная конференция
Физика плазмы в солнечной системе
6 – 10 февраля 2023, ИКИ РАН

ВВЕДЕНИЕ

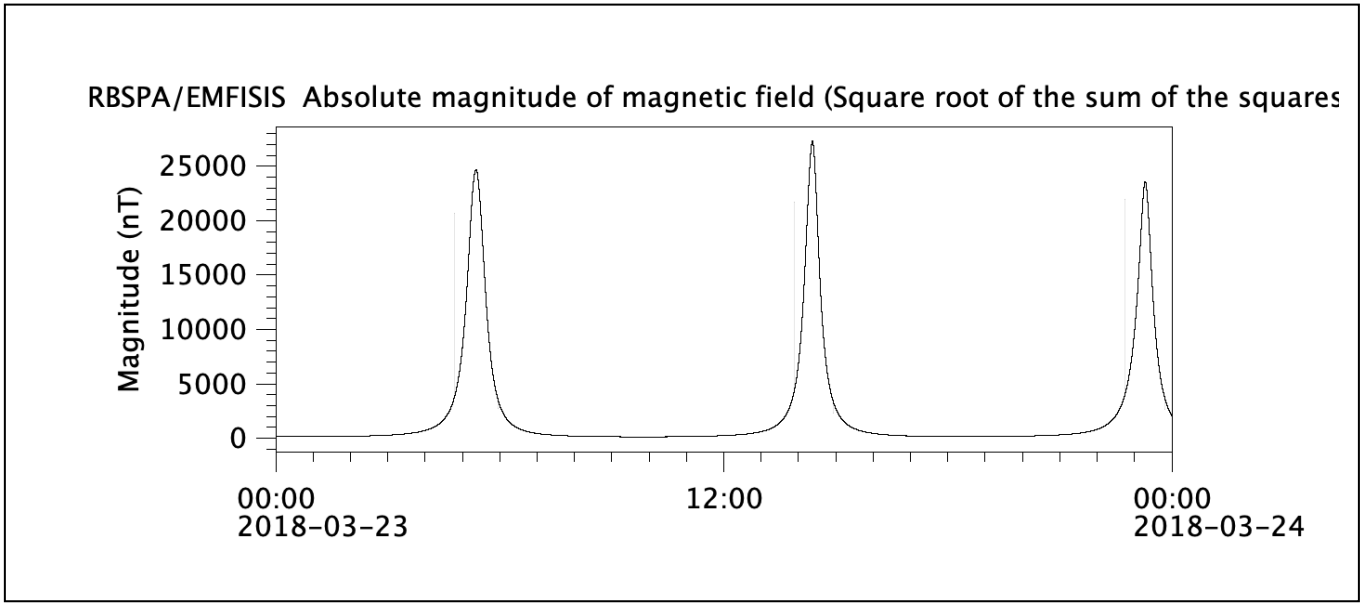
В работе рассматриваются новые сведения о структурированных КНЧ излучениях за пределами плазмосферы, содержащиеся в данных наблюдений, выполненных на космических аппаратах Van Allen probes. Вблизи апогея траектории отмечались квазипериодические последовательности всплесков электромагнитных излучений на частотах ниже 2 кГц с периодом глубокой модуляции интенсивности порядка 60-150 с. Морфологически отдельный всплеск излучений подобен фрагменту излучений QP 2. Рассматриваемые последовательности всплесков могут иметь разную временную структуру. Во-первых, они могут быть четко периодическими. Во-вторых, в них могут периодически чередоваться импульсы разной интенсивности. В-третьих, последовательность импульсов может быть случайной. Возбуждение рассматриваемых шумовых по своей природе излучений, вероятно, происходит при развитии циклотронной неустойчивости в облаках оторвавшейся плазмы, которые существуют за пределами плазмосферы после сильных магнитных возмущений. Многие свойства излучений объясняет теория плазменного магнитосферного мазера, допускающая существования автоколебательного процесса генерации излучений, обусловленного модуляцией анизотропии функции распределения энергичных электронов. Теория объясняет новые результаты наблюдений квазипериодических излучений с более сложной временной структурой при наличии периодического внешнего воздействия на динамику плазменного магнитосферного мазера. Во всех рассмотренных случаях было проверено по данным магнетометра космического аппарата отсутствие признаков геомагнитных пульсаций с периодами, сравнимыми с периодами повторения спектральных форм на спектрограммах КНЧ излучений. Модельные расчеты показали, что акустико-гравитационные волны в ионосфере в основании трубки магнитного поля с облаком оторвавшейся плазмы могут обеспечить формирование рассмотренных излучений со сложной временной динамикой.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

GEOS

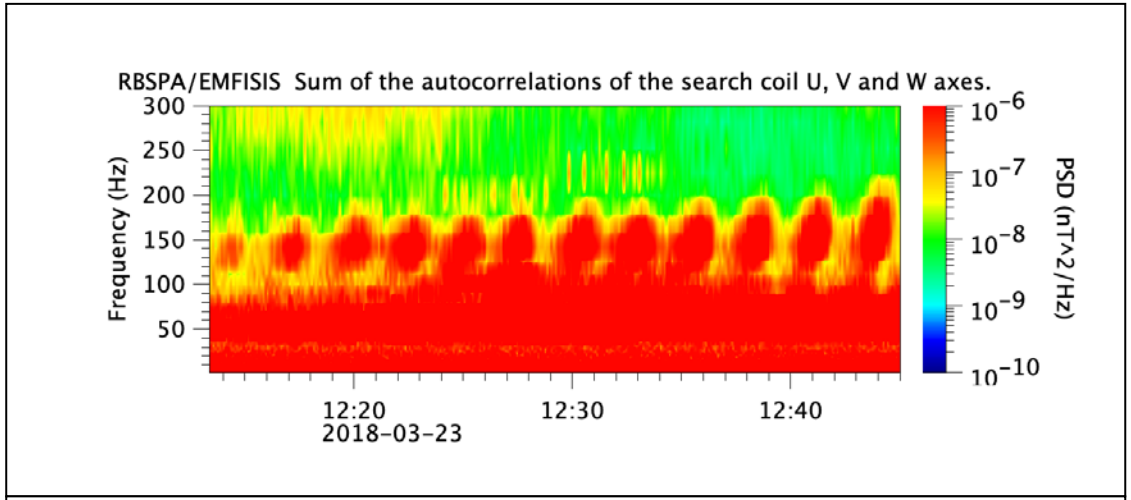
Tixier, M., Cornilleau-Wehrlin, N. How are VLF quasi-periodic emissions controlled by harmonics of field line oscillations? The results of a comparison between ground and GEOS satellites measurements, J. Geophys. Res., 91, 6899-6919, 1986

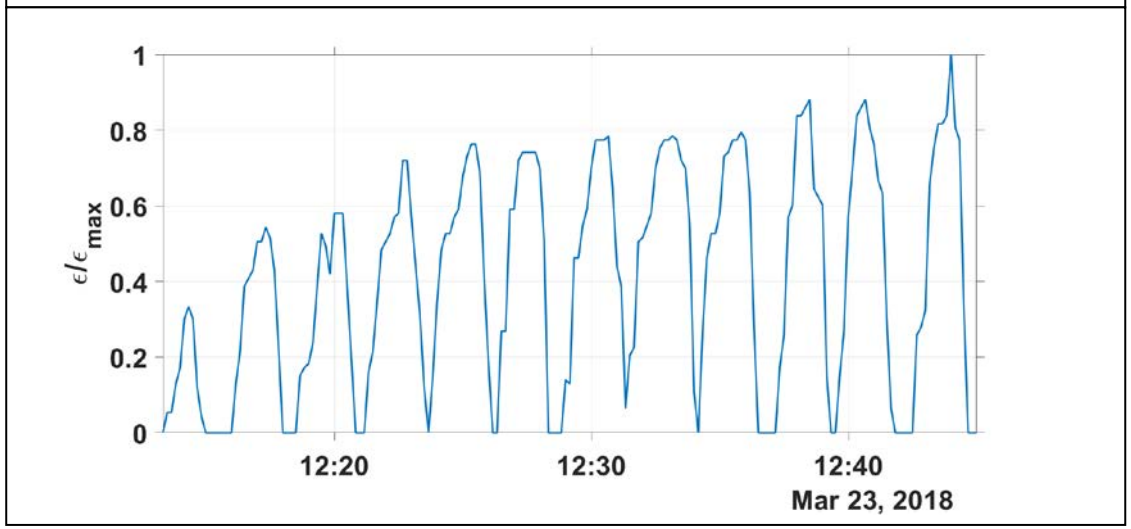
Van Allen probe

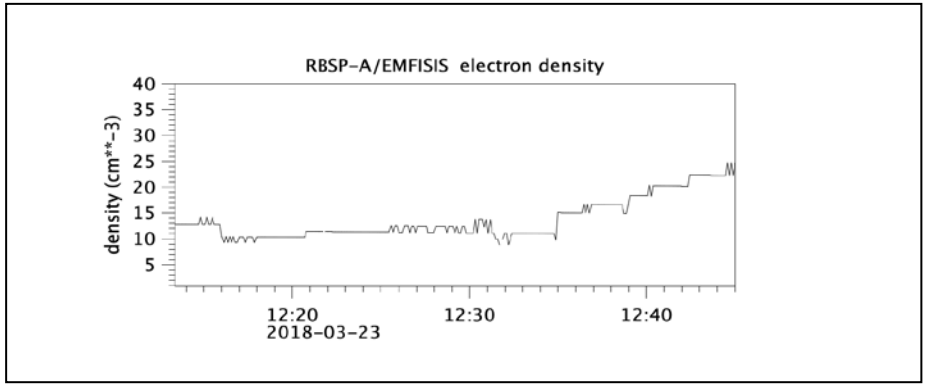


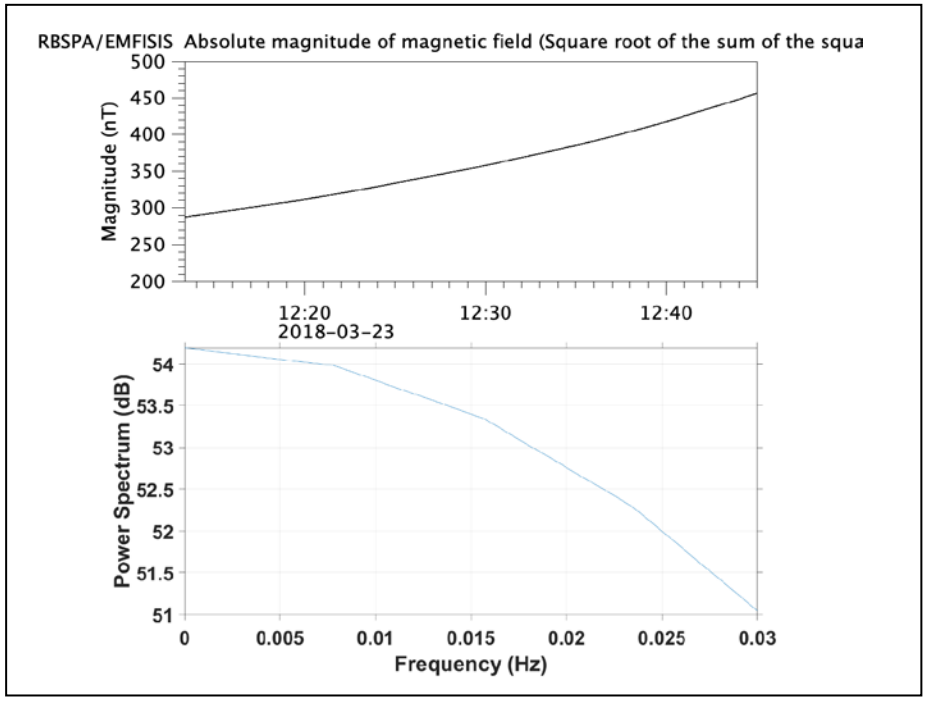
http://emfisis.physics.uiowa.edu/Flight/

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ (QP 2)

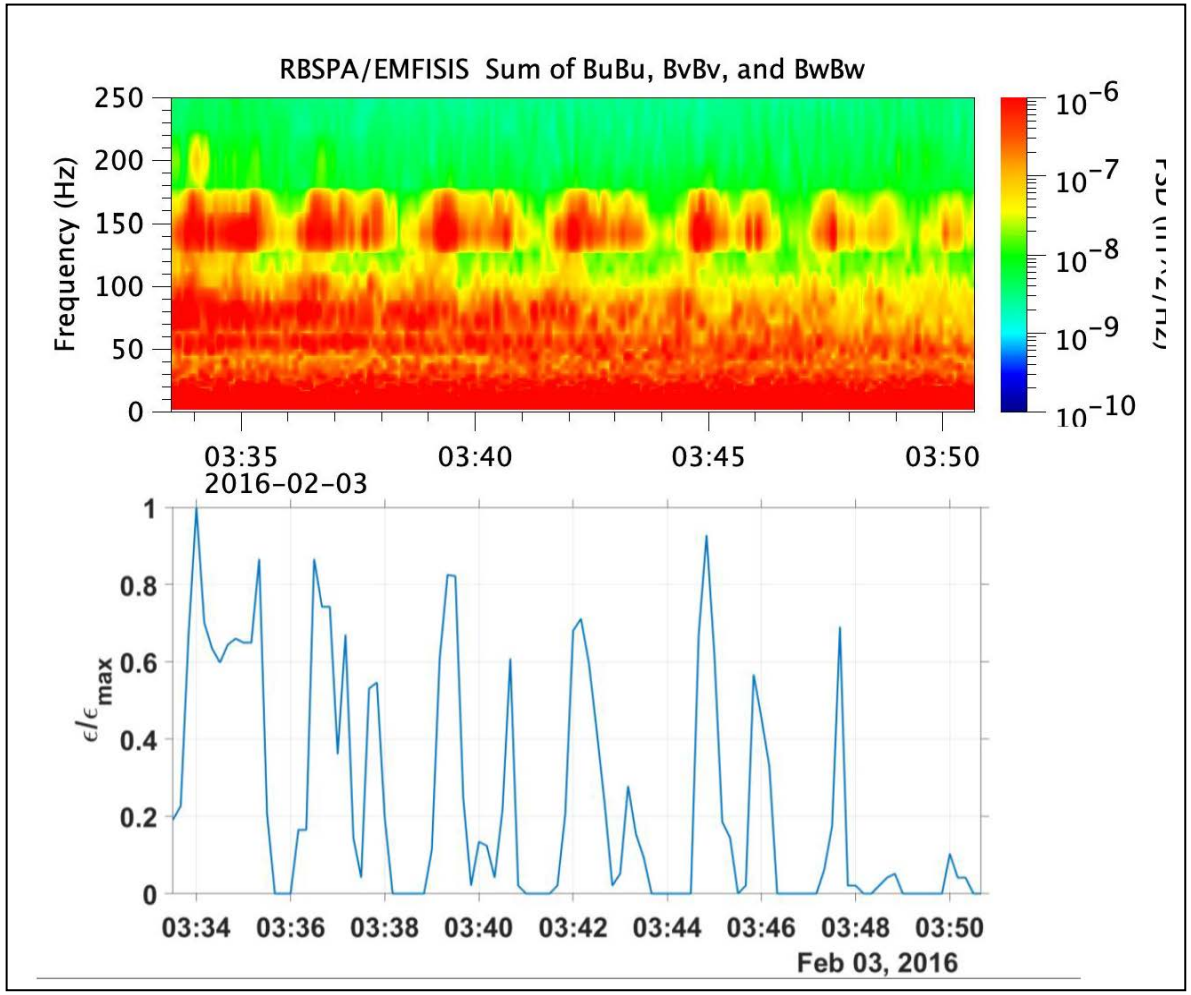


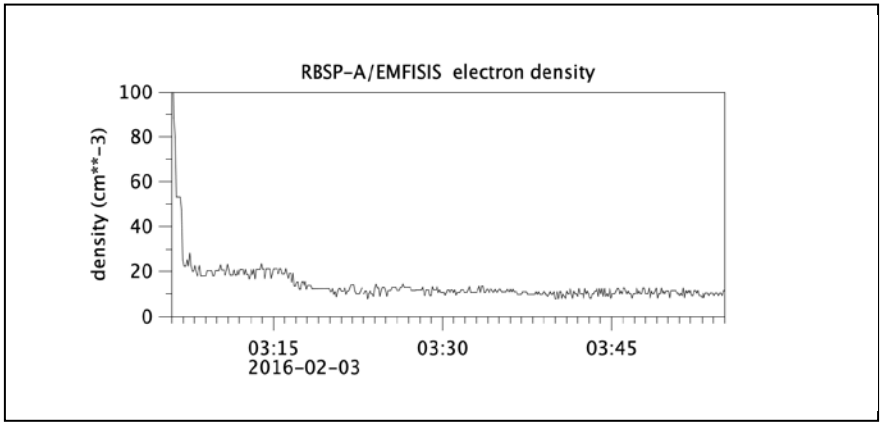


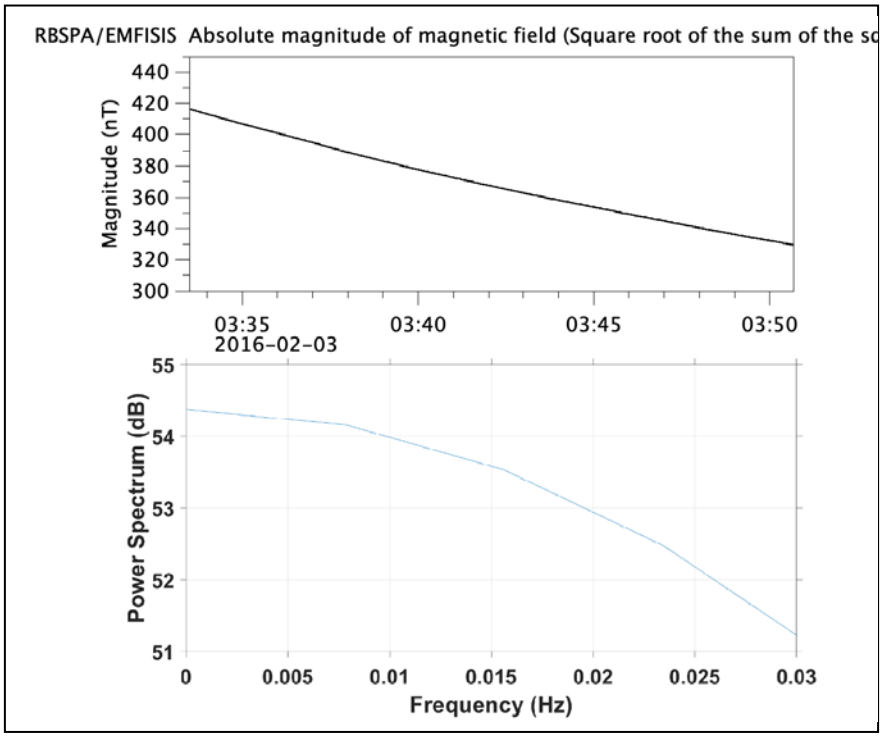




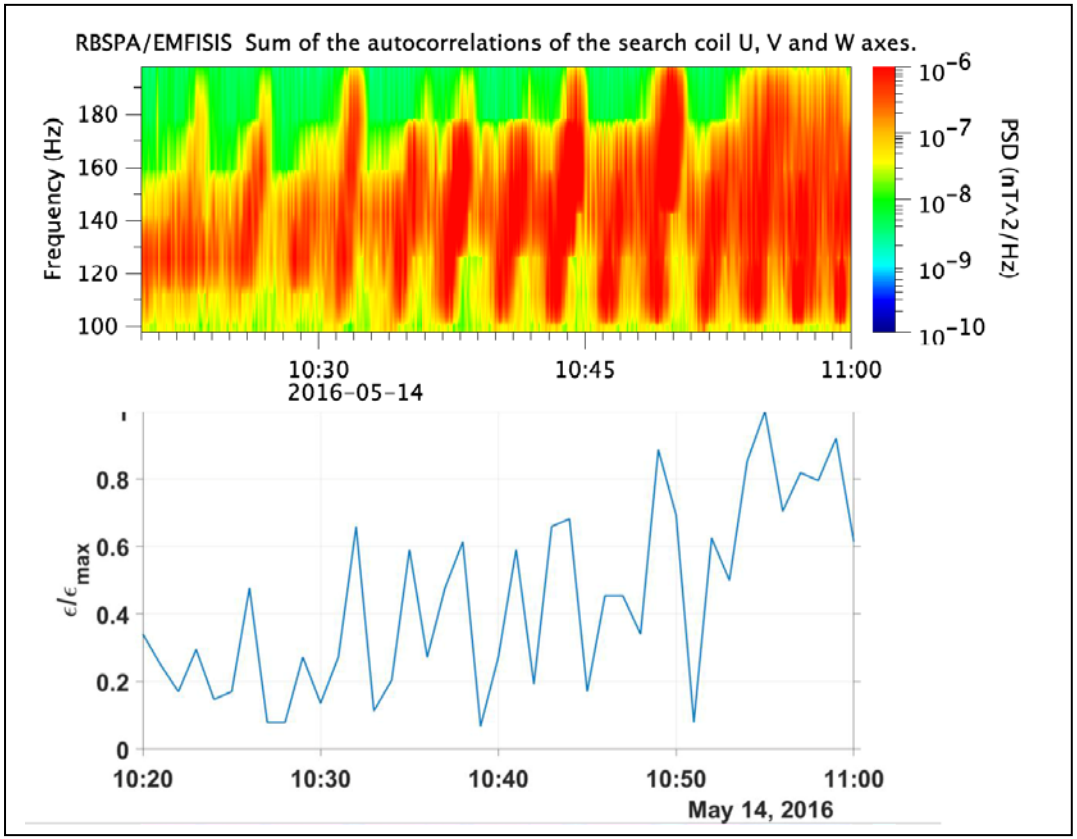
ПЕРИОДИЧЕСКИ ЧЕРЕДУЮЩИЕСЯ ВСПЛЕСКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

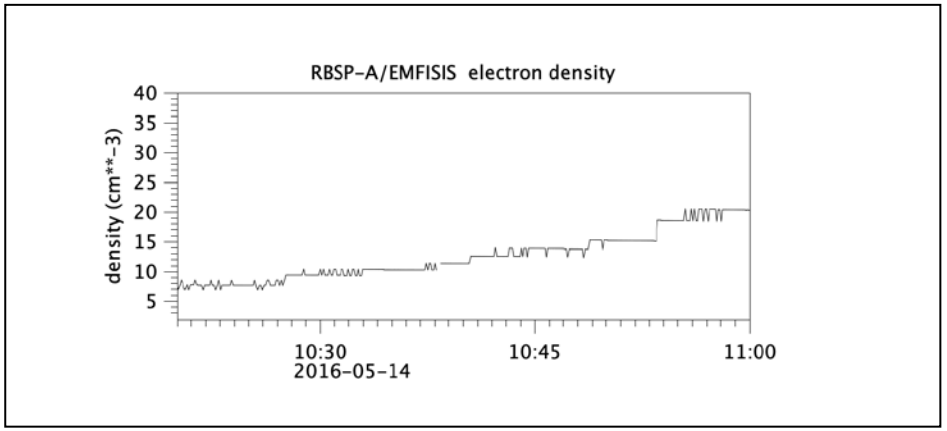


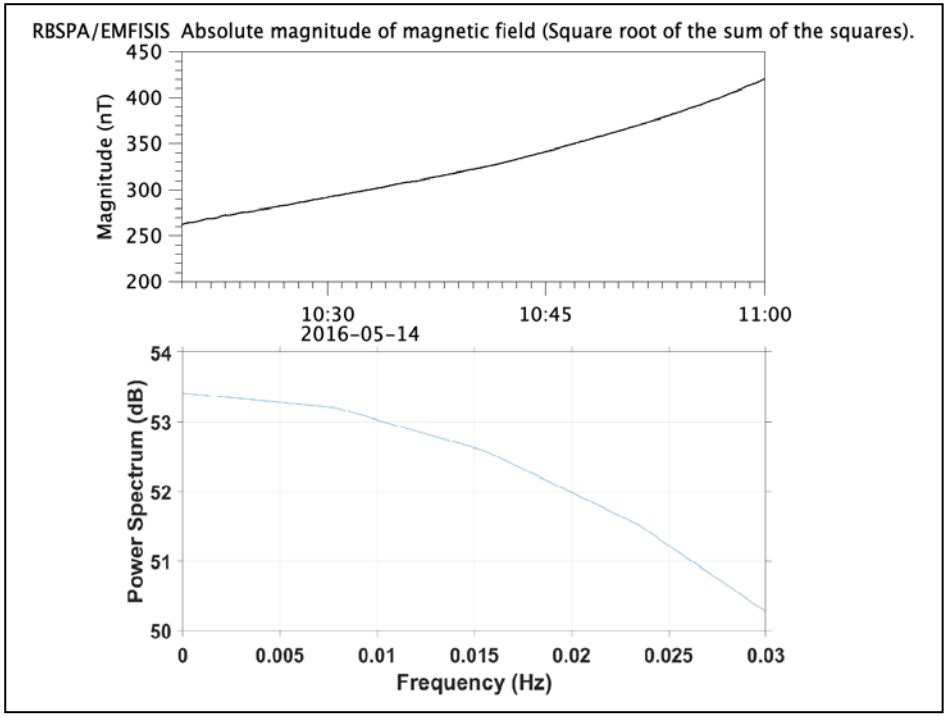




БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВСПЛЕСКОВ







ЦИКЛОТРОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕТРОННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛАЗМОСФРЫ

$$W_{\perp} > W_{\parallel}$$

$$\beta_* = \frac{\omega_p^2 < V_{\parallel}^2 >}{\omega_B^2 c^2} = \frac{\omega_p^2 W_{\parallel}}{\omega_B^2 256} \simeq 0.03W > 2$$

$$\omega \sim \frac{\omega_B}{\beta_*} < \omega_B (1 - \frac{W_{\perp}}{W_{\parallel}})$$

ЦИКЛОТРОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛАЗМОСФРЫ

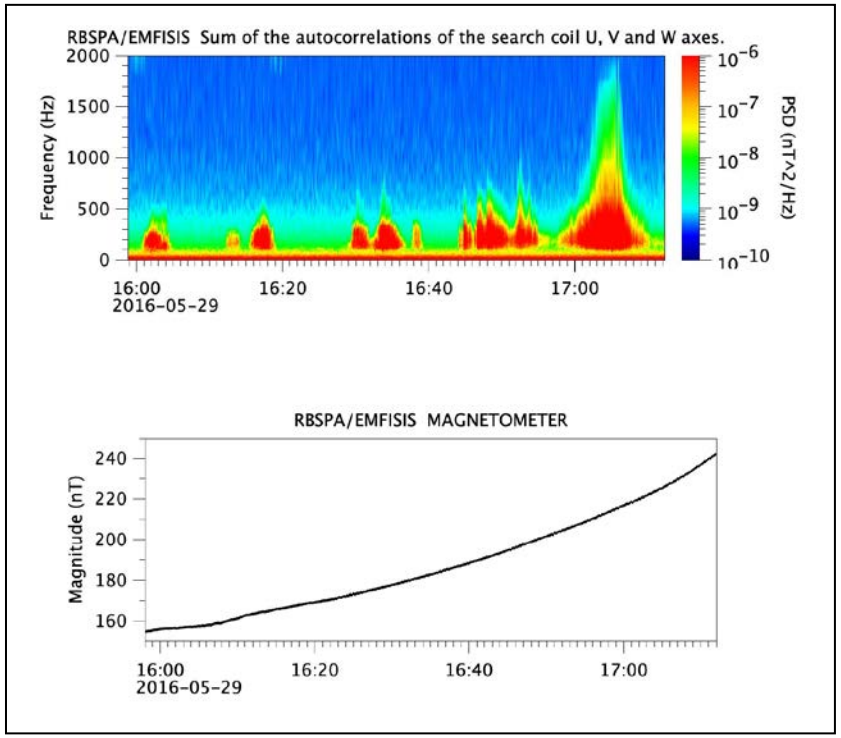
$$W_{\perp} > W_{\parallel}$$

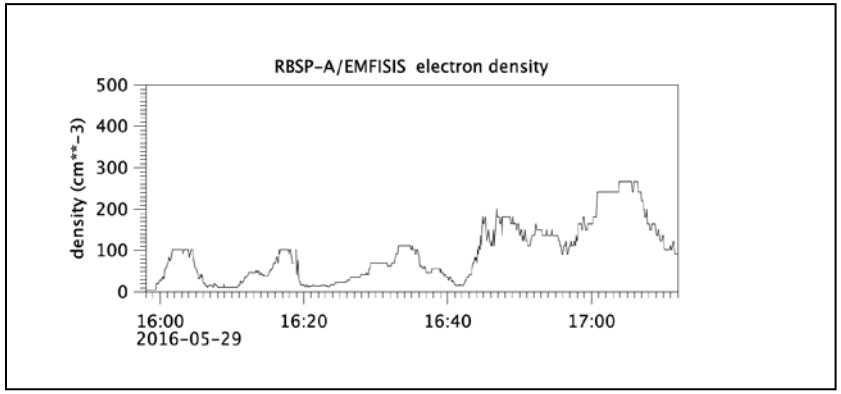
$$\beta_* = \frac{\omega_p^2 < V_{\parallel}^2 >}{\omega_B^2 c^2} = \frac{\omega_p^2 W_{\parallel}}{\omega_B^2 256} \simeq 0.03W > 2$$

$$\omega \sim \frac{\omega_B}{\beta_*} < \omega_B (1 - \frac{W_{\perp}}{W_{\parallel}})$$

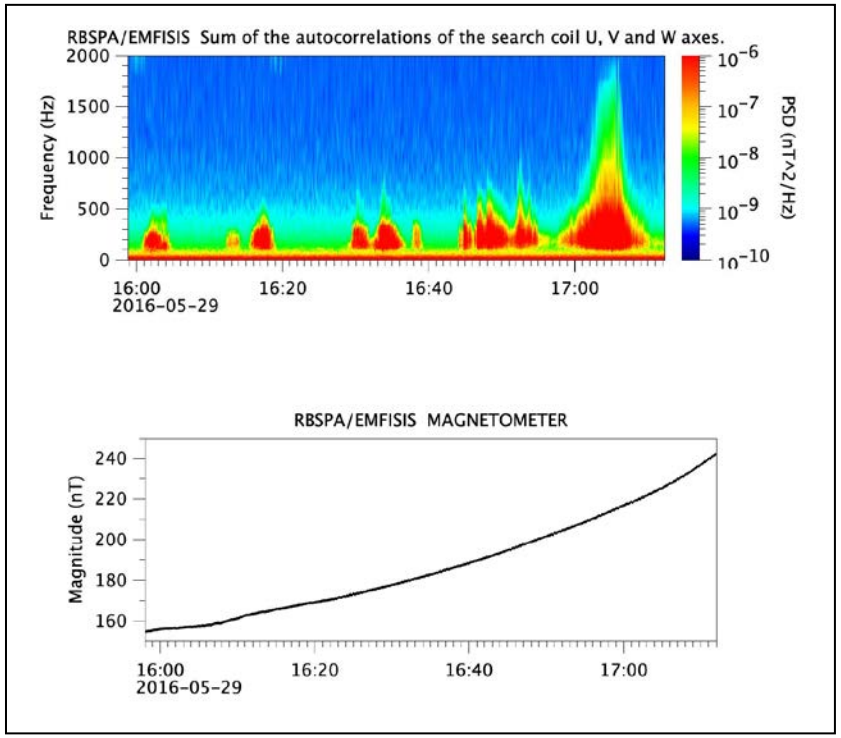
В приведенных примерах $\beta_* > 10$. Такие условия возможны в облаках оторвавшейся плазмы.

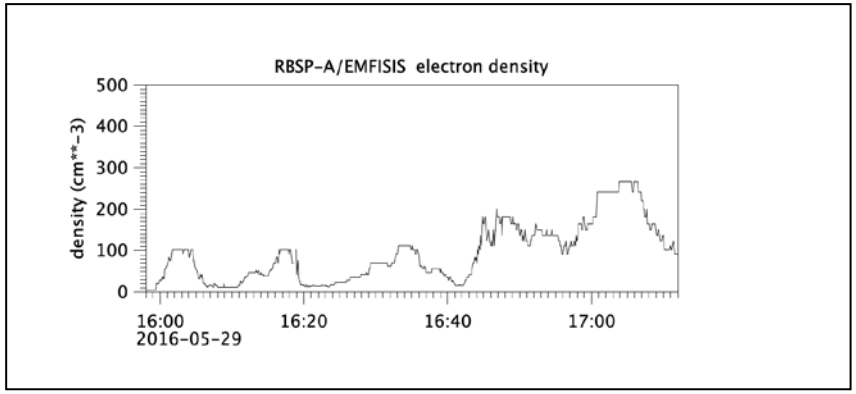
КНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАКАХ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

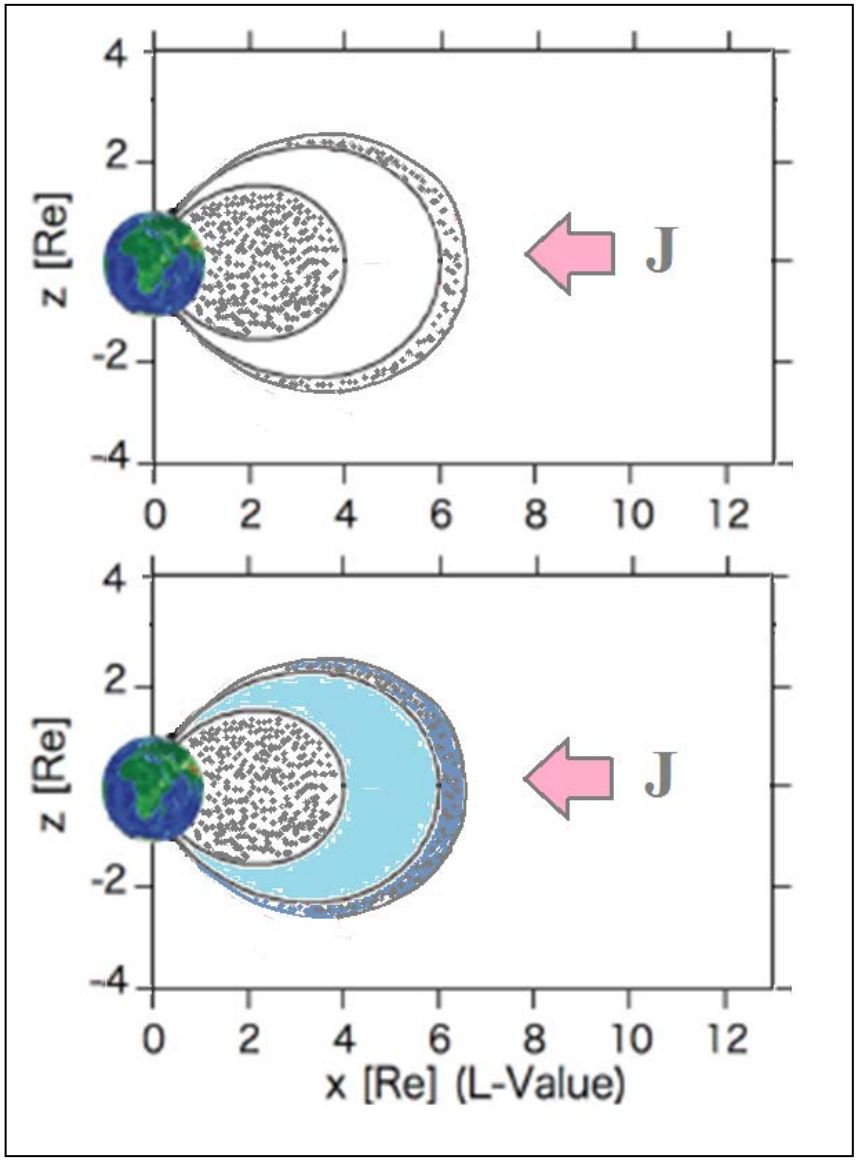




КНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ОБЛАКОВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ







УСРЕДНЕННЫЕ КВАЗИЛИНЕЙНЫЕ УРАВНЕНИЯ

(Bespalov P.A., Trakhtengerts V.Yu., 1980)

To analyze relatively slow ($\Delta t > T_b, T_{gr}$) nonsteady processes in PMM we can use a self-consistent system of quasilinear equations averaged over the oscillations of energetic particle (T_b is the period of bounce oscillations) and waves (T_{gr} is the period of group propagation) between reflection points. Under typical magnetospheric condition the spectrum of the electromagnetic waves is relatively narrow and localized in a region of frequencies low in comparison with the gyrofrequency ($\omega \ll \omega_B$). Then the system of quasilinear equations is written as (

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\varepsilon \frac{\partial F}{\partial x} \right) - \frac{F}{T} + J, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \left(\int_0^{\infty} \int_{x_c}^{x_{\max}} K \frac{\partial F}{\partial x} dx d\upsilon \right) \varepsilon - \nu\varepsilon.$$

Here $F(t,x,\nu)$ is the distribution function, $J(x,\nu)$ is the particles source power, $T(\nu)$ is the time of disappearance (due to collisions, for example), $x = \upsilon_\perp / \upsilon$ is the sine of the pitch angle at the center of the magnetic trap, $\varepsilon(t)$ is the energy density of the waves, $\nu = 2|\log R| / T_{gr}$ is the decrement. In these expression $D(x,\upsilon)$, $K(x,\upsilon)$, and $x_{\max}(\upsilon)$ are known positive functions and x_c is the boundary of the loss cone in velocity space.

ПРИЧИНА ВОЗБУЖДЕНИЯ QP 2 ИЗЛУЧЕНИЙ

(Bespalov P.A., 1982)

The study of the stationary generation stability lead to the expressions

$$\Omega_J = \left(\int_0^{\infty} \int_{\kappa_{\min}}^{\kappa_{\max}} K \frac{\partial J}{\partial \kappa} d\kappa dv \right)^{1/2} = \left(\frac{\nu}{T_l} \right)^{1/2}$$

$$\gamma_J = \frac{\varepsilon_\circ}{2\Omega_J^2} \left(\int_0^{\infty} \int_{\kappa_{\min}}^{\kappa_{\max}} K \frac{\partial^2}{\partial \kappa^2} \left(D \frac{\partial J}{\partial \kappa} \right) d\kappa dv \right)^{1/2} = \frac{1}{T_l}$$

For certain angular dependence of the build up of the parameters oscillations is possible. This is due to the anisotropy modulation of $F(t,\kappa,V)$ **.**

НЕЛИНЕЙНАЯ И НЕАВТОНОМНАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

$$J \to j = j_1 Z_1(x) + j_2 Z_2(x)$$

$$F \to f = N_1(\tau) Z_1(x) + N_2(\tau) Z_2(x)$$

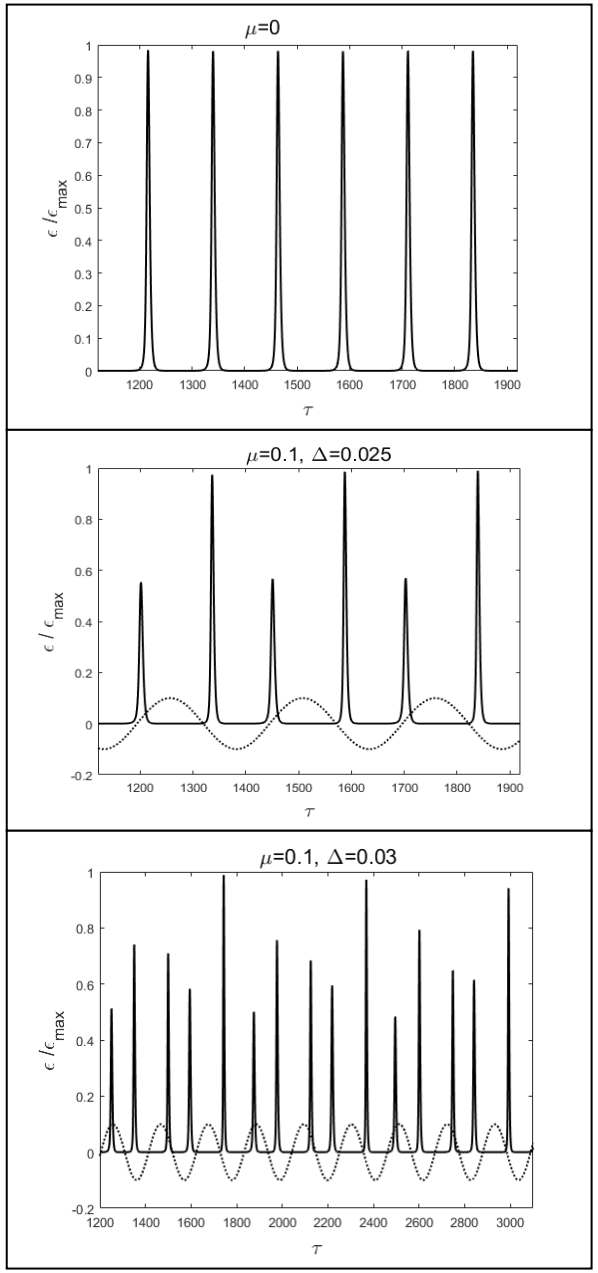
$$\nu = \nu_\circ (1 + \mu \cos(\Omega t)) \to (1 + \mu \cos(\Delta\tau))$$

$$\frac{dN_1}{d\tau} = -p_1^2 \varepsilon N_1 - \eta N_1 + j_1$$

$$\frac{dN_2}{d\tau} = -p_2^2 \varepsilon N_2 - \eta N_2 + j_2$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = h_1 \varepsilon N_1 + h_2 \varepsilon N_2 - (1 + \mu \cos(\Delta\tau))\varepsilon$$

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ



$$\mu = 0$$

$$\mu \neq 0, \quad \Omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\mu \neq 0, \quad \Omega \neq \frac{2\pi}{T}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- **Приведены примеры не сопровождающихся заметными геомагнитными пульсациями электромагнитных квазипериодических КНЧ излучений за пределами плазмосферы, в которых шумовые всплески повторяются с периодами 60-150 с.**

- **Квазипериодические излучения с глубокой модуляцией плотности энергии волн могут быть четко периодическими, в них могут периодически чередоваться всплески разной интенсивности и также они могут иметь более сложную временную структуру.**

- **Обосновано предположение о возбуждении квазипериодических излучений за пределами плазмосферы в облаках оторвавшейся плазмы.**

- **Теория ПММ, учитывающая модуляцию анизотропии функции распределения энергичных электронов объясняет основные свойства квазипериодических излучений.**

- **Временную структуру квазипериодических излучений можно объяснить, предполагая что коэффициент отражения электромагнитных волн от ионосферы сверху испытывает периодические изменения, обусловленные наличием акустико-гравитационных возмущений на ионосферных высотах.**

Работа выполнена при поддержке РНФ по проекту № 22-22-00397.