

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ МАГНИТОСФЕРЫ ПО СВОЙСТВАМ ОНЧ – ИЗЛУЧЕНИЙ

П.А Беспалов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород



Содержание:

1. *Введение. Диагностические задачи и некоторые методы их решения*
2. *Плазменный магнитосферный мазер (МРМ)*
3. *Временные шкалы плазменного магнитосферного мазера*
4. *Основные режимы работы плазменного магнитосферного мазера*
5. *Фундаментальные уравнения*
6. *Шипения*
7. *Стационарное решение фундаментальных уравнений*
8. *ОНЧ излучения в магнитосопряженных областях*
9. *Излучения типа QP-1*
10. *Излучения типа QP-2. Эволюция волновых спектров*
11. *Размерность КНЧ-хоров*
12. *Заключение. Некоторые приложения теории плазменного магнитосферного мазера*

1. ВВЕДЕНИЕ. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Работы шестидесятых годов (К.И. Грингауз и D. Carpenter) представляют собой классический пример успешной диагностики средней магнитосферы по данным спутниковых наблюдений и с помощью дистанционной диагностики на основе анализа дисперсионных характеристик свистовых волн внутри и вне плазмопаузы.

Различные типы естественных свистовых электромагнитных излучений возбуждаются в радиационных поясах Земли. Условия такого возбуждения зависят от плазменных параметров, геометрии системы, условий распространения волн, накопления и высыпания энергичных частиц в геомагнитной ловушке. Закономерности эффективного взаимодействия волн и частиц часто хорошо описываются теорией плазменного магнитосферного мазера. Плазменный магнитосферный мазер может функционировать в нескольких основных режимах. Эти режимы ответственны за возбуждение различных типов естественных ОНЧ излучений. Например, динамика плазменного магнитосферного мазера зависит от мощности источника энергичных частиц в трубке магнитного поля. Знание теории плазменного магнитосферного мазера дает возможность использовать в диагностических целях некоторые новые свойства электромагнитных излучений.

2. ПЛАЗМЕННЫЙ МАГНИТОСФЕРНЫЙ МАЗЕР (МПМ)

- Relatively dense magnetized plasma and conjugate ends of the magnetic trap form the quasioptical resonator for electromagnetic waves
- Active substance consists of the plasma of the radiation belts having a characteristic loss cone in velocity space
- CI increment determines the balance between the processes of the induced emission and absorption
- The sources of energetic particles feel the pumping role
- The working modes in MPM are the whistler and Alfvén waves



3. ВРЕМЕННЫЕ ШКАЛЫ ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА

Wave spectrum in MPM has three regions of the time-scales

- Smallest corresponds to the nonlinear trapping frequency in the field of individual nonlinear wave Ω_k and to the bounce frequency between mirror points Ω_b .
- Slower variations of the dynamic spectrum are related to the frequency of the wave packet oscillations between the mirror points Ω_g .
- There also exist time scale of the quasi-linear relaxation processes determined mainly by growth rate γ . Precise calculation shows that the frequency of radiation spectrum modulation is described by the formula

$$\Omega_J = \left(\frac{\gamma}{T_l} \right)^{\frac{1}{2}}$$

where T_l is the energetic particles life time.

Really in many cases VLF emissions are characterized by periodic repetitions of the dynamic spectra. Corresponding periods are usually in three ranges (Helliwell 1965)

- From 0.1 to 1 seconds - "Chorus".
- From 2 to 6 seconds - Short periodic signals (SP).
- From 10 to 300 seconds - Quasiperiodic Signals (QP).

4. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА

- *Steady - state regime corresponds to a constant level of the electromagnetic turbulence \mathcal{E} and a balance between the supply of the particles from the source and their precipitation into ionosphere*
- *Relaxation regime*
- *Auto oscillatory regime*

The conditions for realization of these regimes depend largely on the power of the particle source $J(\kappa, v)$ and its angular dependence in the magnetic flux tube.

More in detail see P.A.Bespalov and V.Yu.Trakhtengerts, Dynamics of cyclotron instability in the Earth's radiation belts. Reviews of Plasma Phys., 1986. v.10. p.155-292

.

5. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ($\Delta t \gg T_b, T_g$)

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \left(\int_0^{\infty} \hat{D}\mathcal{E}F \cdot d\omega \right) - \frac{F}{T} + J$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \left(\int_0^{\infty} \int_{\kappa_{min}}^{\kappa_{max}} \hat{K}F \cdot d\kappa \cdot dv \right) \mathcal{E} - \nu \mathcal{E}$$

- $F(t, \kappa, v)$ *is the distribution function*
- $J(\kappa, v)$ *is the particles source power*
- $T(v)$ *is the disappearance time due to the collisions or transport*
- $\kappa = v_L / v$
- $\epsilon(t, \omega)$ *is the spectral energy density*
- $\nu(\omega)$ *is the rate of the decay*
- $\hat{D}(\kappa, v, \omega)$ *and* $\hat{K}(\kappa, v, \omega)$ *are known differential operators*
- κ_{min} *is the loss cone boundarie*

6. ШИПЕНИЯ

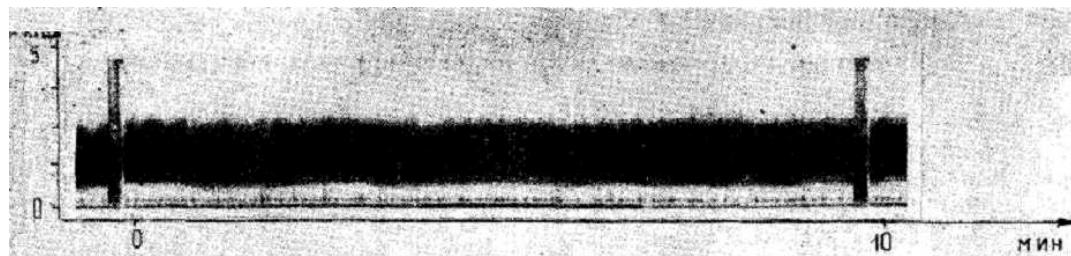
Usually conditions for the hiss-like whistler emissions excitation depend on the parameter $\beta_* = \frac{\omega_{pL}^2 v^2}{\omega_{BL}^2 c^2} \geq 1$.

If $\beta_* = \frac{\omega_{pL}^2 v^2}{\omega_{BL}^2 c^2} \geq 1$, we have hiss-like emissions in VLF band with upper frequency

$$\omega_{\max} = \omega_{BL} \left(1 - \frac{T_{\parallel}}{T_{\perp}}\right)$$

If $\beta_* = \frac{\omega_{pL}^2 v^2}{\omega_{BL}^2 c^2} \gg 1$, we have hiss-like emissions in ELF band with upper frequency

$$\omega_{\max} = \frac{\omega_{BL}}{\beta_*}$$



Thus we can estimate the parameters $\frac{T_{\parallel}}{T_{\perp}}$, β_* .

7. СТАЦИОНАРНОЕ РЕШЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Formally to each a source power of particles corresponds a stationary state with a balance between accumulation of particles from a source and their precipitation in an ionosphere and a constant level of whistler turbulence. We admit, that the effective decay coefficient taking into account absorption of whistler waves in the magnetospheric a resonator $v(\omega)$ as the power function depends on frequency ω

$$v = v_{\circ} \left(\frac{\omega}{\omega_{\circ}} \right)^p,$$

and the power of a source of particles depends on sine of an equatorial pitch angle $x = v_{\perp L} / v$ and as the power function depends from a kinetic energy of particles

$$J = J_{\circ}(x) \left(\frac{v}{v_{\circ}} \right)^{2s},$$

Then a stationary distribution function of trapped particles and spectral density of whistler waves determine by the following relations (Bespalov, 1985):

$$F = F_{\circ}(x) \left(\frac{v_{\circ}}{v} \right)^{2p+3}, \quad \varepsilon = \varepsilon_{\circ} \left(\frac{\omega}{\omega_{\circ}} \right)^s.$$

The whistler waves decay coefficient in the magnetospheric a resonator

$$\nu = (2/T_g) |\ln(R)|$$

The period of group propagation depends on frequency and below so-called nose frequency

$$T_g = \frac{l\omega_{pL}}{c\omega^{1/2}\omega_{BL}^{1/2}} \sim \omega^{-1/2},$$

where l is the length of a magnetic flux tube, ω_{pL} and ω_{BL} are plasma and cyclotron frequencies in the equatorial plane, c is the light velocity. Let assume that a reflection coefficient of whistler waves from the ionosphere $R(\omega)$ not so seriously depends from the frequency. For such a case

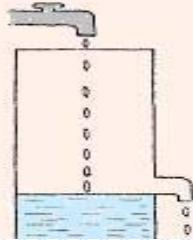
$$F = F_{\circ}(x) \left(\frac{V_{\circ}}{V} \right)^4.$$

This result practically is rather close to the experimental results. Taking into account stationary energetic distribution in the radiation belts we can to define the Q factor of magnetospheric resonator for VLF and ELF frequency bands.

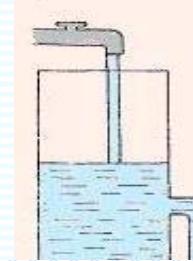
Thus we can estimate the parameters $R(\omega)$.

8. ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В МАГНИТОСОПРЯЖЕННЫХ ОБЛАСТЯХ

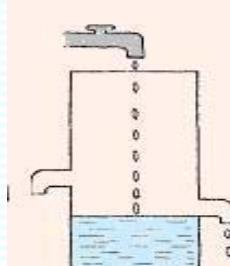
O'Brien (1962) pointed out that the accumulation of the charged particles in RB in many respects is similar to the accumulation of water in a bucket with opening in side wall.



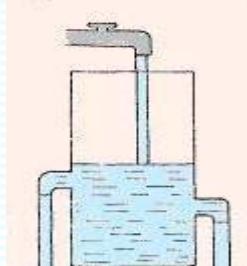
Weak pitch-angle diffusion



Moderate (Strong) pitch-angle diffusion



Actually exist a certain asymmetry of the geomagnetic trap



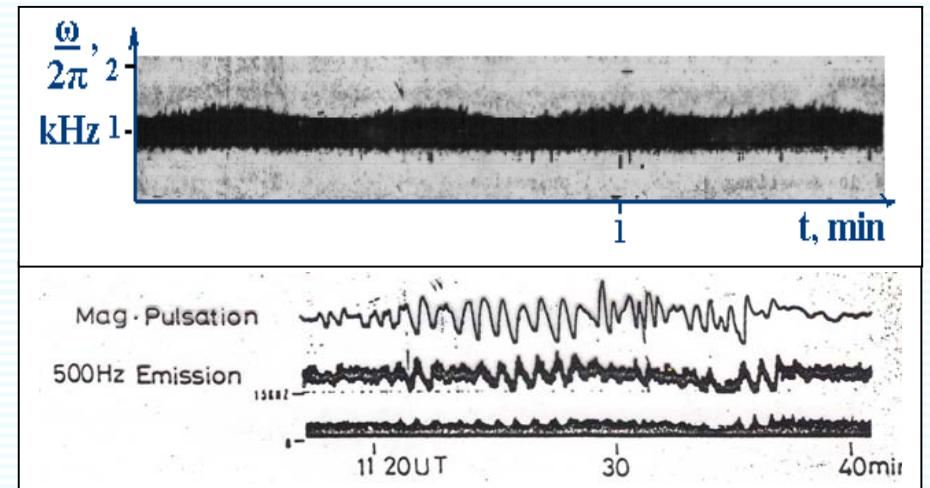
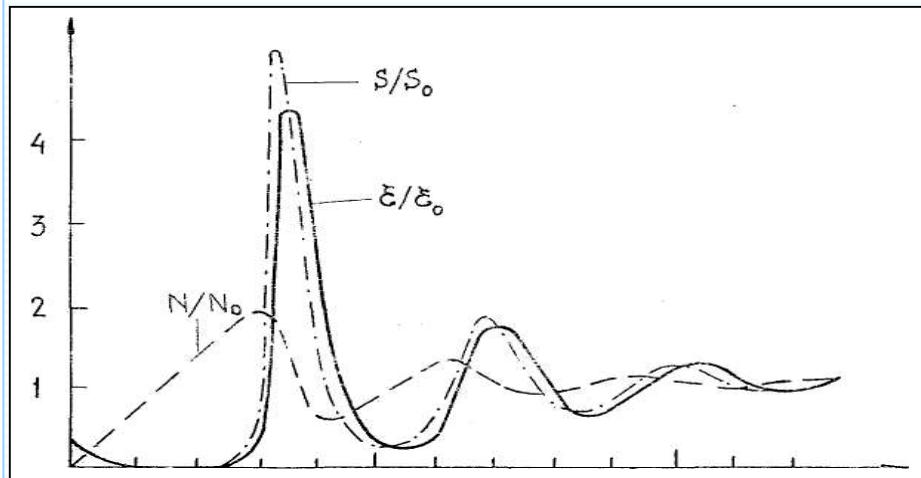
Bespalov and Chukanov (1980) showed that this lead to the noticeable asymmetry in VLF emissions in the conjugated regions of the magnetosphere, if the weak pitch-angular diffusion of particles is realized.

Mikhaylov and others found experimentally that statistically the degree of the VLF emissions symmetry grows with an increase in the magnetic activity.

Thus we can estimate the pitch-angular diffusion regime.

9. ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА QP-1

Frequently QP-1 emissions occur after the pulse external action: HM waves, magnetic pulse, pulse particle injection, strong whistler, etc.



If modulation of the electromagnetic waves intensity is not very deep, then the oscillatory frequency is equal to

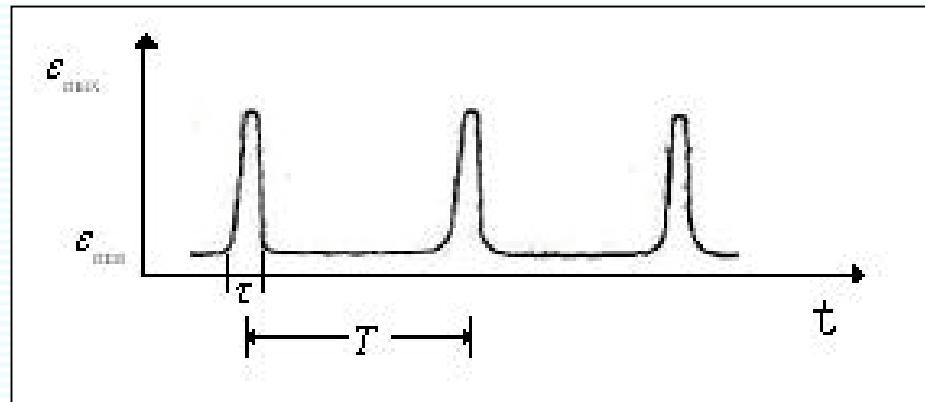
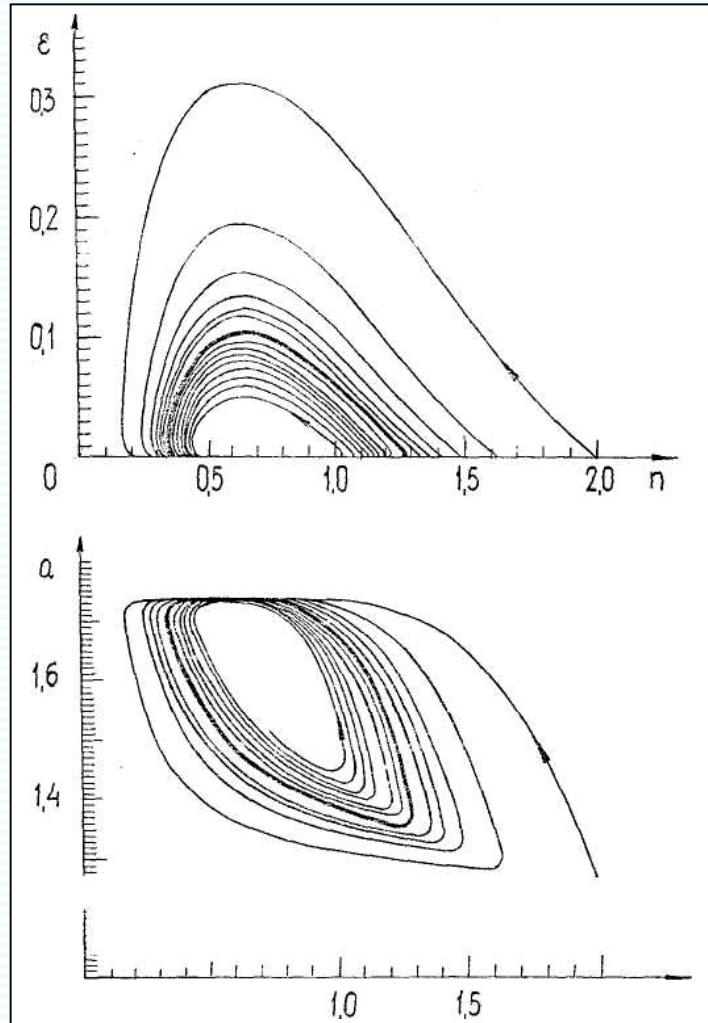
$$\Omega_J = \left(\frac{\nu}{T_l}\right)^{1/2}, \quad 10s < T_J < 150s$$

where $\nu = 2|\ln R|/T_g$, T_l is the mean particles life-time in the magnetic trap. The modulation rate of decay is equal to $\gamma_J = -1/T_l$.

If modulation of the electromagnetic waves intensity is very deep, then the oscillatory period is equal to $T_J \approx T_l$.
Thus we can estimate the mean particles life-time T_l .

10. ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА QR-2. ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛНОВЫХ СПЕКТРОВ

The regime of the generation of the periodic pulses is realized instead of the stationary generation for the appropriate types of the angular dependence of the particle source power in the regime of weak pitch-angular diffusion (Bespalov, 1982).



Time scales

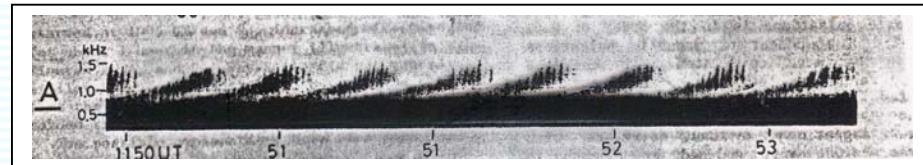
$$\frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}} = \psi\left(\frac{\tau}{T}\right),$$

where function ψ
is determined by the
particle source power

$$J(\kappa = \frac{v_{\perp L}}{v}, w)$$

Dynamics of the frequency spectrum

Let $\gamma(\omega, F)$ the averaged increment of CI. Then two frequency dependences are important: $\gamma(\omega, J\tau)$ and $\gamma(\omega, F_*)$. The mutual position of the maximums of these dependences determines direction and rate of change of the frequency within the electromagnetic pulse.

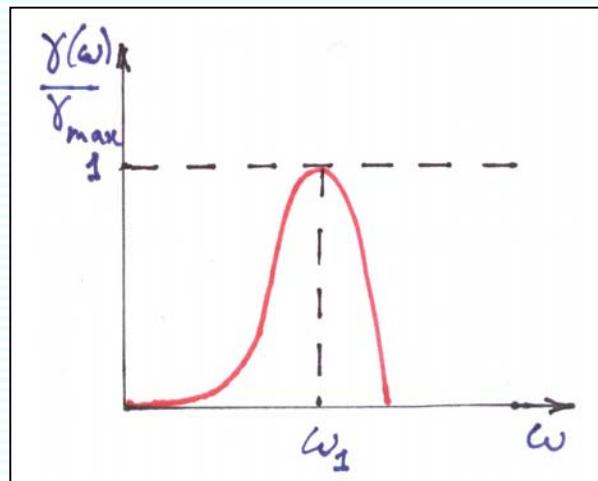


For initial problem with $\epsilon(t = 0) = 0$, $F(t = 0) = 0$

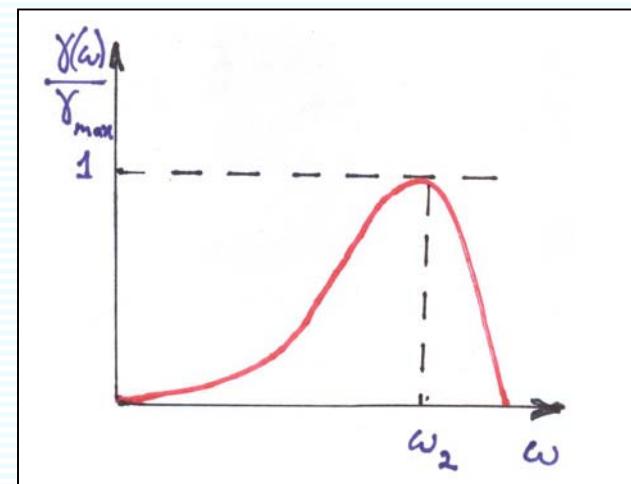
$$F = J \cdot t$$

Then average increment $\gamma(\omega, F \rightarrow J \cdot t)$

has the following form:



For the steady-state $F = F_0$ and the increment has a form:



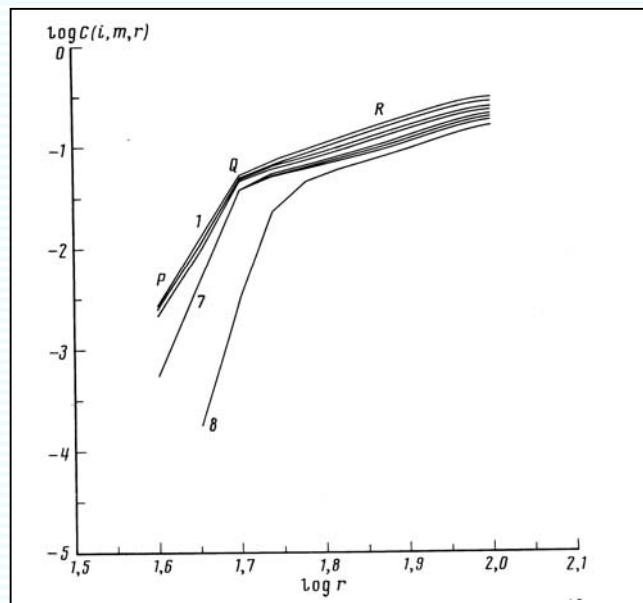
Therefore, there is a reason for shift of the wave spectrum from ω_1 to ω_2 .

Thus we can estimate the particle source power and its angular dependence.

11. РАЗМЕРНОСТЬ КНЧ-ХОРОВ

First of all, we represented electric field of signal in the numerical form $u(i) = E(t_i)$, $t_i = i\Delta$. We introduced vectors with m components $x(i) = \{u(i), \dots, u(i+m-1)\}$. The total number of such vectors is equal to N . After this, we introduce into the examination the function

$$C(i, m, r) = \frac{1}{N} \{ \text{number of vectors with } d[x(i), x(j)] < r \}$$



We produced calculation of the signal dimension, and found (Bespalov and Sidorovskaya, 1992)

$$\dim = \lim \frac{\log C}{\log r} \simeq 2.5$$

According to Takens theorem this means that for describing such type of chorus is necessary to have theory containing n ordinary differential equations of the first order. Where

$$[\dim] + 1 = 3 \leq n \leq 2 + 2[\dim] = 6$$

Thus we can estimate dimension of electromagnetic signals.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА

Теория плазменного магнитосферного мазера полезна для диагностики локальных и глобальных характеристик плазменных магнитосферных процессов.

- Верхняя частота полосы шипений определяет анизотропию функции распределения
- Нижняя частота спектра определяет концентрацию фоновой плазмы
- Период QP ОНЧ излучений определяет мощность источника энергичных частиц
- Время затухания модуляции после короткого импульса магнитосферного возмущения определяет характерное время жизни энергичных частиц в магнитной ловушке
- Разность фаз между QP-1 модуляцией и гидромагнитной волной помогает определить собственную частоту Ω_J
- Динамика спектра в QP-2 излучениях определяет анизотропию мощности источника энергичных частиц
- Уровень сопряженности электромагнитных сигналов в северном и южном полушариях определяет тип питч-угловой диффузии
- Если мы знаем энергетический спектр захваченных частиц, то можно восстановить частотную зависимость добротности магнитосферного резонатора в ОНЧ диапазоне
- QP ОНЧ сигналы более типичны для случая слабой питч-угловой диффузии