



ДИПЛОМ НА ОТКРЫТИЕ

№ 231

„Явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радионалучения — эффект Гетманцева“

В соответствии с Положением об открытиях, изобретениях и рационализаторских предложениях, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий установил, что граждане Союза Советских Социалистических Республик

ТРАХТЕНБЕРГ ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ
КАПУСТИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ
СМИРНОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ
ПЕРЦОВСКИЙ ЮРИК АЛЕКСАНДРОВИЧ
ВАСИЛЬЕВ АЛЕНСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ
РАСПОПОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ
ГЕТМАНЦЕВ ГЕРМАН ГРИГОРЬЕВИЧ
КОТИК ДМИТРИЙ САМОЙЛОВИЧ
МИТЯКОВ НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ
РАПОПОРТ ВИКТОР ОВСЕЕВИЧ

сделали открытие, определяемое следующей формулой:

„Установлено неизвестное ранее явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радионалучения, обусловленное изменением этих токов во времени с частотой модуляции коротковолнового радионалучения“.

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий выдал **Трахтенбергу Виктору Юрьевичу** настоящий диплом на открытие „Явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радионалучения“, зарегистрированное в Государственном реестре открытий СССР 22 мая 1980 г. за № 231 по заявке на открытие № ОТ-9452 от 20 декабря 1976 г. Приоритет открытия — 3 июня 1974 г. в части экспериментального доказательства явления, 20 января 1975 г. — в части теоретического доказательства и 1 апреля 1976 г. — в части экспериментального доказательства обусловленности явления изменением ионосферных токов во времени с частотой модуляции радионалучения.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИТЕТА



27. апреля 1982 г.

НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ СТРУИ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В МАГНИТОСФЕРЕ



Беспалов П.А.¹, Савина О.Н.^{2,3}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, peter@appl.sci-nnov.ru*

² *Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, Нижний Новгород*

³ *Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева*

Содержание:

Введение

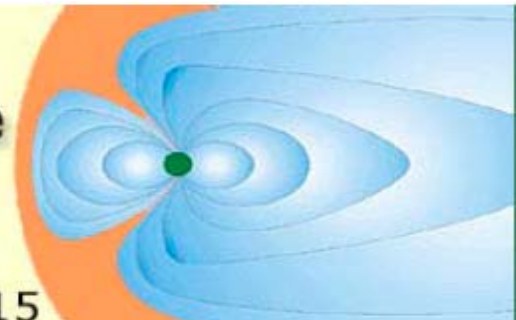
1. Условия формирования экваториальной токовой струи в рамках модели кинематического динамо
2. Расчет переменной составляющей ионосферного тока
3. Оценка эффекта возбуждения электромагнитных излучений на частоте модуляции
4. Анализ возможных магнитосферных проявлений

Заключение

Девятая ежегодная конференция
Физика плазмы в Солнечной системе

10-14 февраля 2014, ИКИ РАН

Научные программы Президиума РАН №22 и ОФН РАН №15

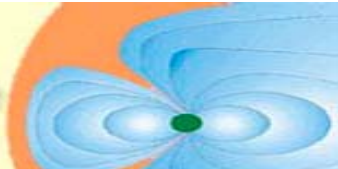
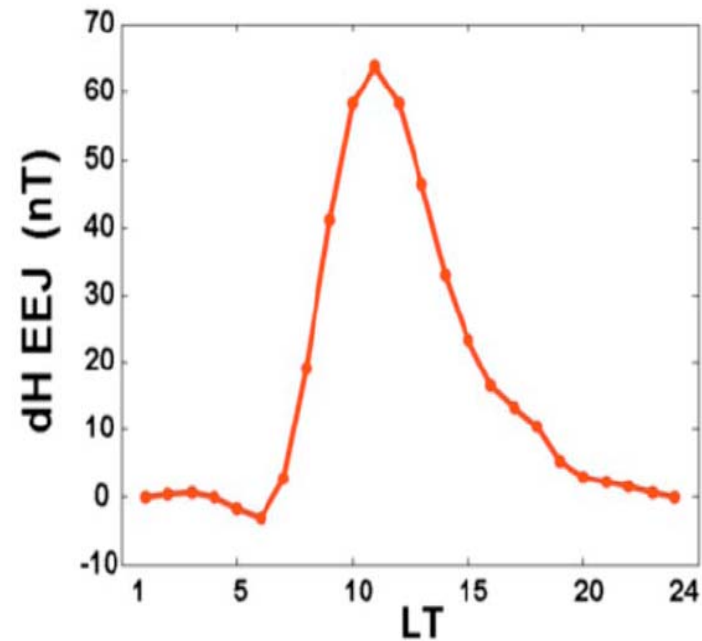


ВВЕДЕНИЕ

Обширные экспериментальные исследования показали возможность генерации низкочастотных электромагнитных сигналов при падении мощного модулированного по амплитуде коротковолнового излучения на ионосферу. В такт с модуляцией меняется температура электронов и модулируется частота столкновений электронов с нейтралами и концентрация электронов, а следовательно и проводимость плазмы. Этого достаточно для реализации токовой системы на частоте модуляции, если по ионосфере течет ток. В среднеширотной ионосфере токи относительно небольшие.

Более эффективная генерация низкочастотных электромагнитных сигналов при периодическом нагреве ионосферы возможна в области авроральной токовой струи в D-слое полярной ионосферы. Эта возможность была продемонстрирована в экспериментах на нагревном стенде HAARP. Отметим, что в последние годы был обнаружен эффект генерации низкочастотных излучений, не связанный с модуляцией токовой струи.

Еще одной ионосферной областью, в которой является направленная на востоке экваториальной ионосфере для широт $|\theta| < 4^\circ \div 6^\circ$ в интервале местного времени от 9 до 15 LT..



1. Условия формирования экваториальной токовой струи в рамках модели кинематического динамо

Модель кинематического динамо основывается на предположении о том, что скорость нейтрального ветра в атмосфере \mathbf{u}_n известна и не зависит от состояния плазмы. Поскольку на интересующих нас высотах ионосферы выполняется неравенство $v_{en}/\omega_{Be} \ll v_{in}/\omega_{Bi}$, то наличие нейтрального ветра приводит в первую очередь к увлечению ионов и возникновению электрического поля \mathbf{E} , необходимого для поддержания квазинейтральности плазмы. Электрическое поле приближенно можно считать потенциальным

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi$$

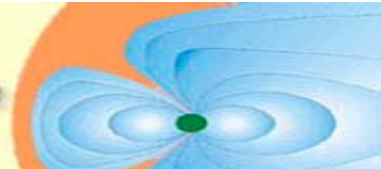
В стационарных условиях справедливо уравнение непрерывности плотности тока:

$$\text{div}\mathbf{j} = 0$$

В соответствии с обобщенным законом Ома плотность тока определяется следующим выражением:

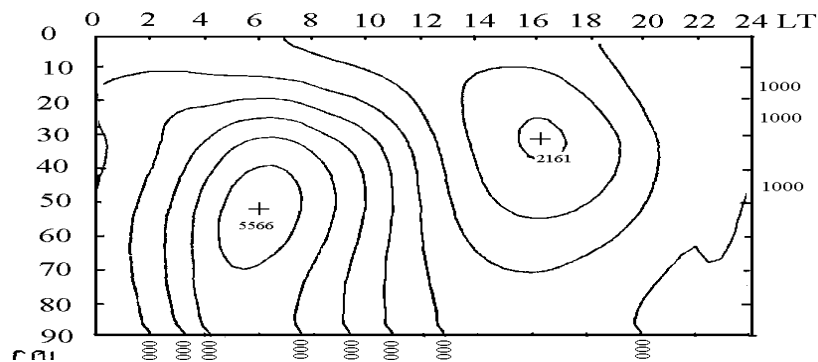
$$\mathbf{j} = \hat{\sigma} \left(-\nabla\varphi + \frac{1}{c} \mathbf{u}_n \times \mathbf{B} \right) \quad \text{где}$$

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_P & -\sigma_H & 0 \\ \sigma_H & \sigma_P & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{pmatrix}$$



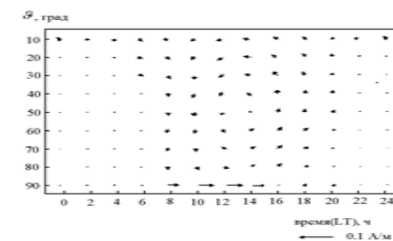
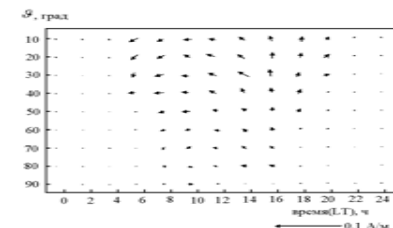
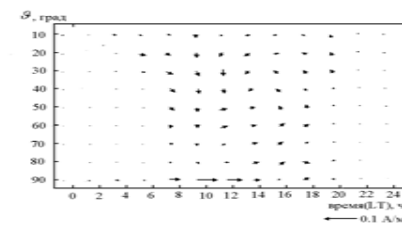
1.1. Результаты расчетов в приближении тонкой сферической оболочки

В этой модели расчеты выполняются в сферической системе координат (r, ϑ, ψ) , где r - радиус вектор от центра Земли, ϑ - коширота, ψ - долгота. Упрощения достигаются за счет предположения о малости плотности тока \dot{j}_r , но конечность производной $\partial j_r / \partial r$ учитывается. В результате довольно длинных выкладок получаются и численно интегрируются уравнения, содержащие интегральные по толщине динамо-слоя токи и проводимости. Такие расчеты неоднократно проводились для определения S_q вариации при различных распределениях скорости нейтрального ветра в атмосфере. Приведем некоторые из результатов расчетов.

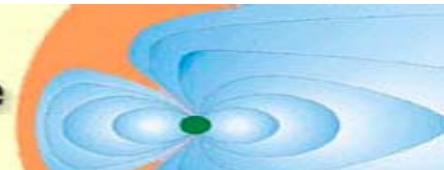


На рисунке показано распределение потенциала на высоте 90 км. Контуры нарисованы через каждые 10^3 В.

Определенным недостатком большинства теоретических моделей является ориентация исключительно на численные расчеты.



На рисунке показаны проинтегрированные по высоте токи для слоя E , слоя F и в целом по ионосфере



1.2. Причины формирования экваториальной токовой струи

Допустим, что на средних широтах ветер имеет составляющую скорости $u_{n\vartheta}$, направленную к экватору. Такой ветер обеспечивает генерацию направленного на восток электрического поля с напряженностью

$$E_{\psi} = \frac{u_{n\vartheta}}{c} B_r$$

Учитывая непрерывность тангенциальной компоненты электрического поля можно ожидать, что во всей низкоширотной ионосфере формируется направленное на восток примерно однородное электрическое поле $E_{\psi} \simeq 10^{-3}$ В/м - направленное на восток однородное электрическое поле, отвечающее скорости ветра $u_n = 100$ м/с.

Расписывая выражение для азимутальной плотности тока с учетом формулы для проводимости, находим

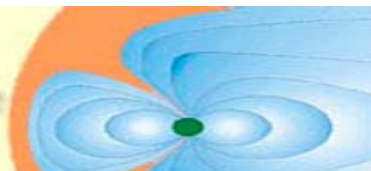
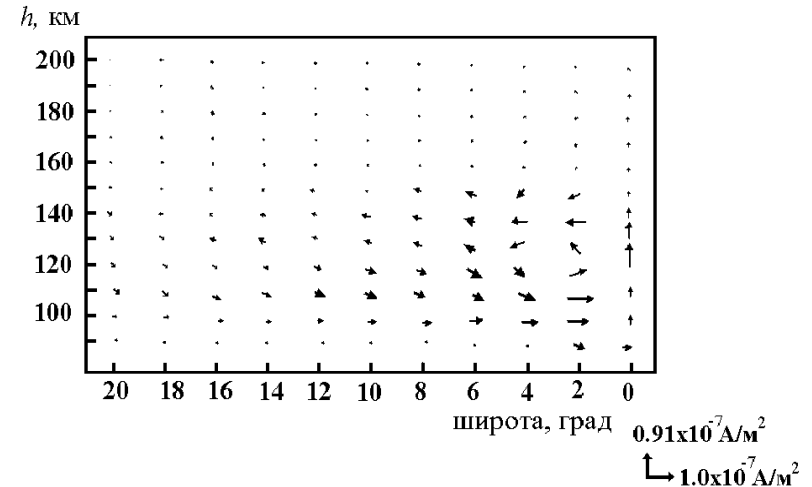
$$j_{\psi} = \frac{\sigma_P(\sigma_K + 4\sigma_{\parallel} \operatorname{tg}^2 \theta)}{\sigma_P + 4\sigma_{\parallel} \operatorname{tg}^2 \theta} E_{\psi}$$

Плотность направленного на восток тока достигает максимального значения

$$j_{\psi \max} = \sigma_K E_{\psi} \simeq (2 \div 9) 10^{-6} \text{ А/м}$$

на высоте порядка 100 км, а на больших широтах (400 км) быстро падает. Вертикальное электрическое поле в центре токовой струи

$$E_r = \frac{\sigma_H}{\sigma_P} E_{\psi}.$$



2. Расчет переменной составляющей ионосферного тока

Допустим, что на экваториальную токовую струю падает радиоизлучение мощного КВ-передатчика, промодулированное по амплитуде с частотой ω , которая лежит в ОНЧ или КПК диапазонах. В ионосфере, возмущаемой нагревным передатчиком, периодически меняются температура электронов $|\Delta T_e/T_e| \ll 1$, а с ней и проводимости.

Предположим, что невозмущенный ионосферный ток нам известен $\mathbf{j} = \hat{\sigma} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{u}_n \times \mathbf{B} \right)$

Сторонний ток на частоте модуляции удается выразить через невозмущенный

$$\mathbf{j}_{ext} = \frac{\Delta \sigma_{\parallel}}{\sigma_{\parallel}} \mathbf{j}_{\parallel} + \frac{\sigma_P \Delta \sigma_P + \sigma_H \Delta \sigma_H}{\sigma_P^2 + \sigma_H^2} \mathbf{j}_{\perp} + \frac{\sigma_H \Delta \sigma_P - \sigma_P \Delta \sigma_H}{\sigma_P^2 + \sigma_H^2} \mathbf{j}_{\perp} \times \mathbf{b}$$

После конкретизации выражений для проводимостей мы получаем применительно к экваториальной токовой струе

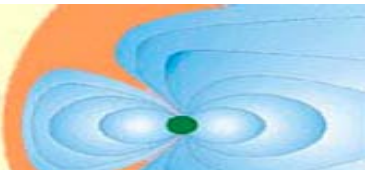
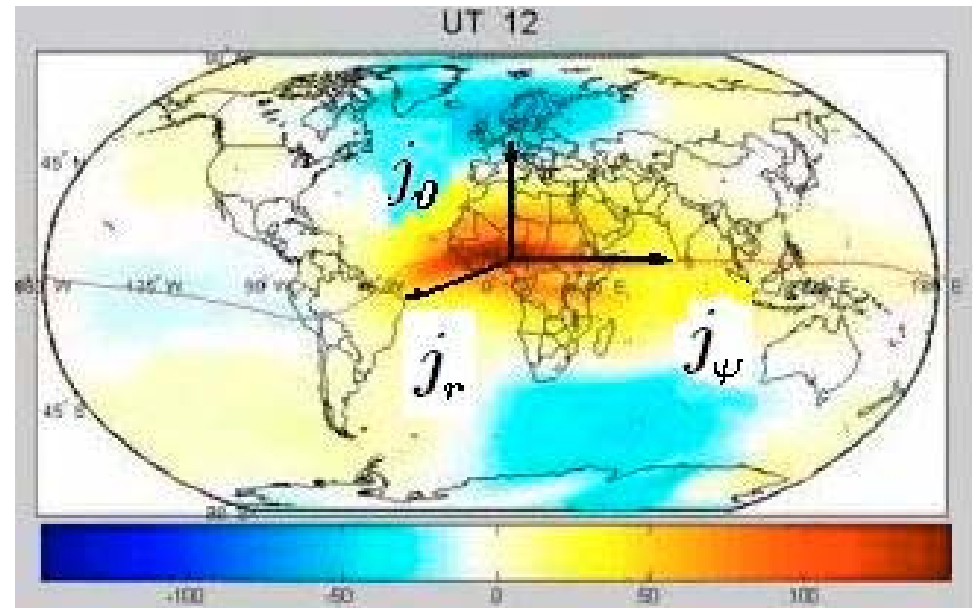
$$j_{ext,r} = -\frac{\Delta T_e \nu_{en}}{T_e \omega_{Be}} j \sin \chi$$

$$j_{ext,\vartheta} = \frac{\Delta T_e \nu_{en}}{T_e \omega_{Be}} j \cos \chi$$

$$j_{ext,\psi} = \frac{\Delta T_e}{T_e} \left(\frac{\alpha n_e}{2\alpha n_e - \omega} + \frac{\nu_{en} \sigma_P}{\omega_{Be} \sigma_H} \right) j$$

где χ - угол наклона магнитного поля с вертикалью,
 α - коэффициент диссоциативной рекомбинации,
 связанный с характерным временем изменения
 электронной концентрации соотношением

$$t_e = (2\alpha n_e)^{-1} \simeq 10 \div 10^3 \text{ с.}$$



3. Оценка эффекта возбуждения электромагнитных излучений на частоте модуляции

Для модуляции в ОНЧ диапазоне используя выражение для толщины скин-слоя и сведения о поляризации волн в ионосфере, получаем, что сторонний ток $j_{ext,y}$ эквивалентен электрическому диполю под ионосферой. Для оценки магнитного поля низкочастотной волны можно использовать простую формулу для поля диполя в дальней зоне

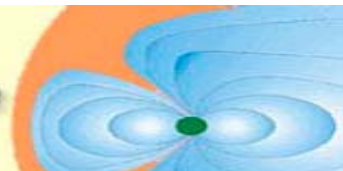
$$\mathbf{B} = k_0^2 (\mathbf{r} \times \mathbf{p}) \frac{\exp(-k_0 r)}{r^2} .$$

В результате получаем для возмущения напряженности магнитного поля под струей

$$H_{g,\sim}^{(\uparrow)} \simeq 2 \cdot 10^{-7} f \frac{\Delta T_e}{T_e} \quad [A/m],$$

где f выражено в кГц.

Значительную генерацию сигналов, связанную с вертикальным модулированным сторонним током, можно ожидать на частотах выше нижнегибридной. Полученная оценка на четыре порядка выше, чем типичные величины в средних широтах и более чем на порядок выше, чем в области авроральной струи из-за большого значения проводимости Каулинга.



В диапазоне геомагнитных пульсаций на частотах $\omega/2\pi < 1$ Гц основной вклад в плотность стороннего тока вносит модуляция концентрации электронов. В ближней зоне возмущения магнитного поля определяются формулой Био-Савара

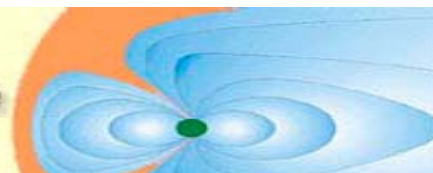
$$\mathbf{B}_{\sim} = 2 \int \frac{\mathbf{j}_{ext} \times \mathbf{r}}{cr^3} d^3r ,$$

где фактор 2 учитывает влияние проводящей Земли. Для возмущения напряжения магнитного поля на земной поверхности под струей имеем:

$$H_{\sim} \simeq 0.2 \left\langle \frac{\Delta T_e}{T_e} \right\rangle \gamma$$

где $\gamma = 10^{-5}$ Э.

Таким образом, при модуляции электронной температуры $\Delta T_e/T_e \sim 1/3$ продетектированный сигнал почти на два порядка больше, чем в среднеширотной ионосфере.



4. Анализ возможных магнитосферных проявлений

In the simplest cases, in which the strength of the particle source is rather small and coincides in its angular dependence with the distribution function in a steady-state, the dynamics of comparatively slow processes ($\Delta t \gg T_b, T_g$) in plasma magnetospheric maser is subject to a simple system of equations in total derivatives (Bespalov, Trakhtengerts, 1976)

$$\frac{dN}{dt} = -\delta \varepsilon N - \frac{N}{T} + J_\Sigma, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = h \varepsilon N - \nu \varepsilon$$

where $\delta \sim \omega_{BL} / B_L^2$, $h \sim \omega_{BL} / n_{pL} \sigma l$.

The parameters of the system can execute weakly damped oscillations

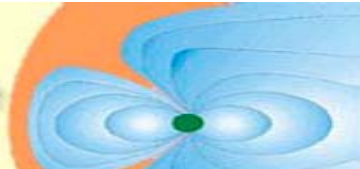
$$\Omega_J = (h J_\Sigma)^{1/2}, \quad \nu_J = h J_\Sigma / 2\nu$$

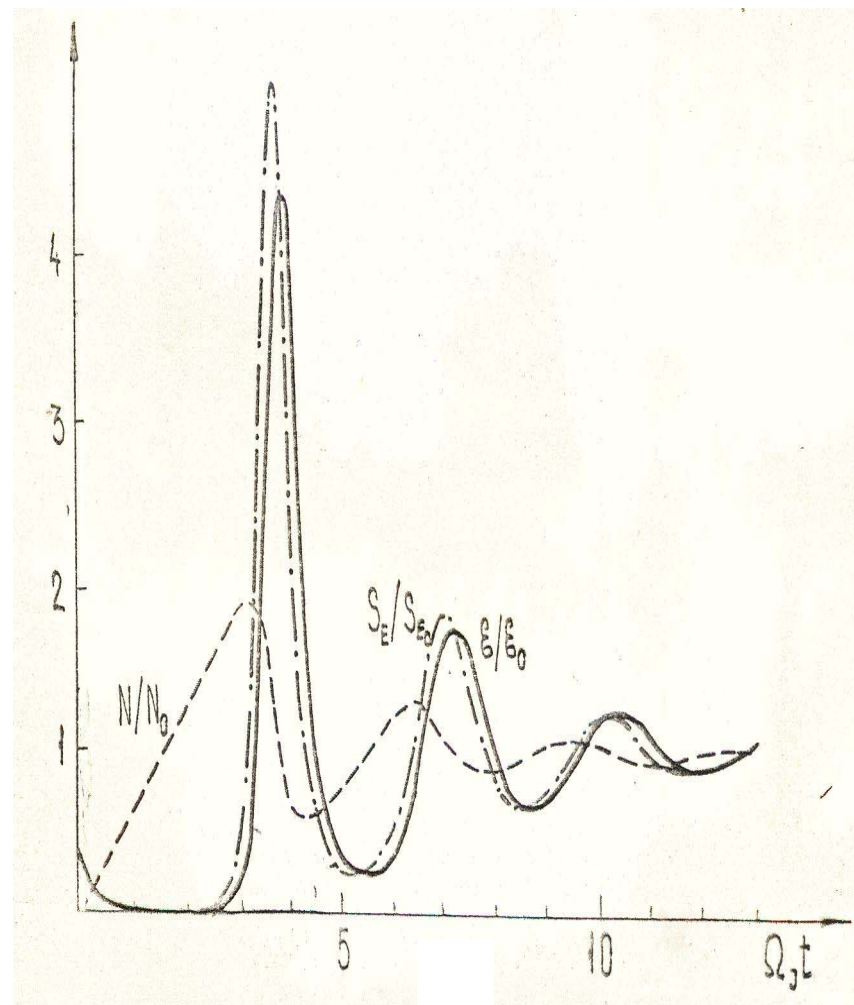
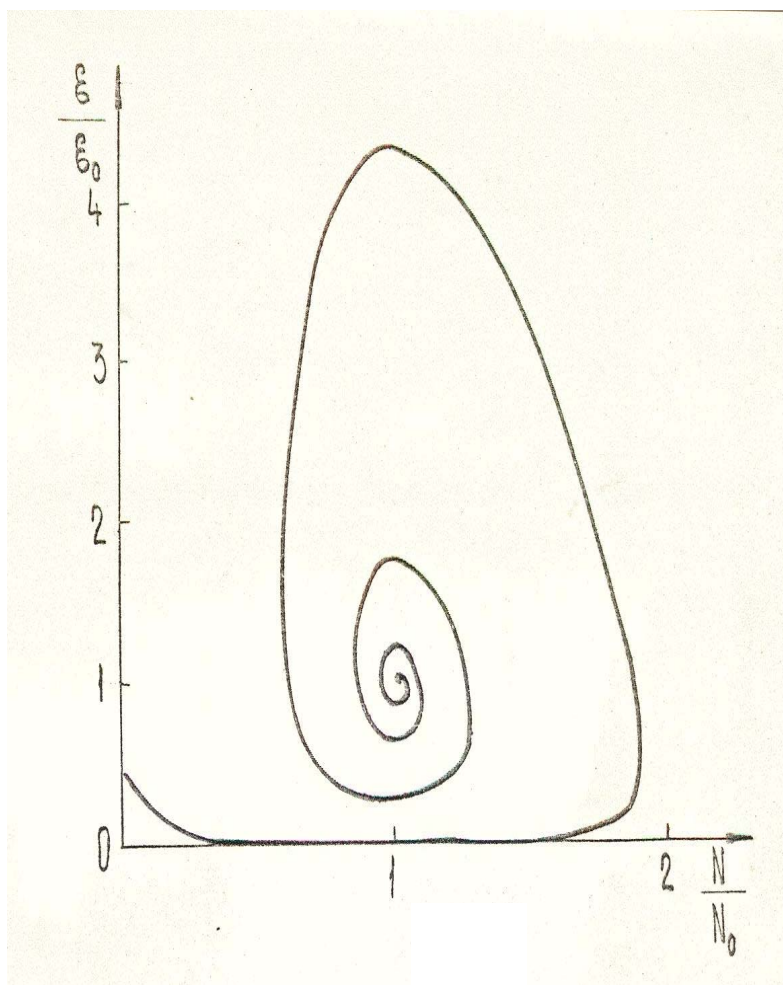
where $10s < T_J < 250s$.

If the modulation is caused by a fast magnetosonic wave with the amplitude b

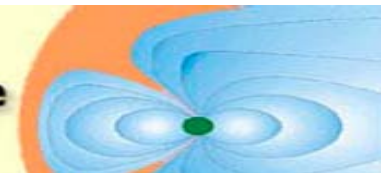
$$\varepsilon_{\sim} \simeq \frac{b \Omega_J \varepsilon_0}{B_L (\Omega^2 - \Omega_J^2)}$$

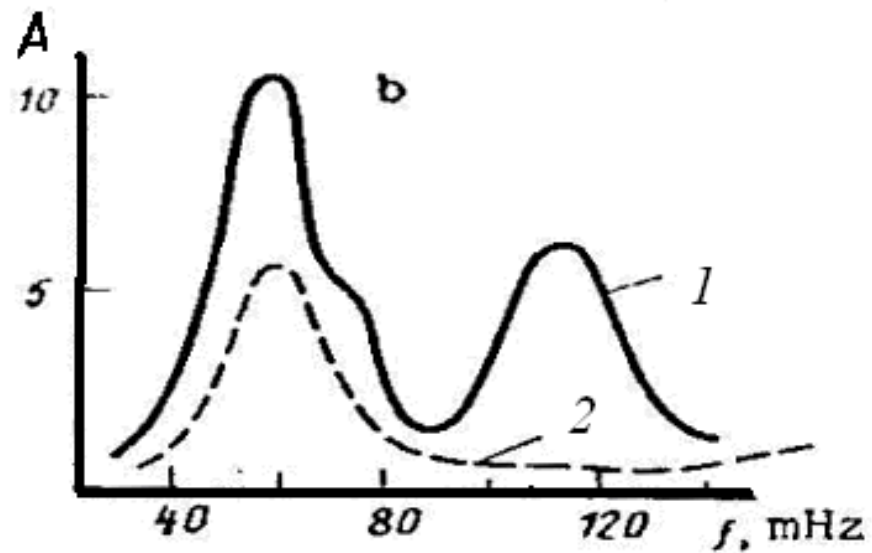
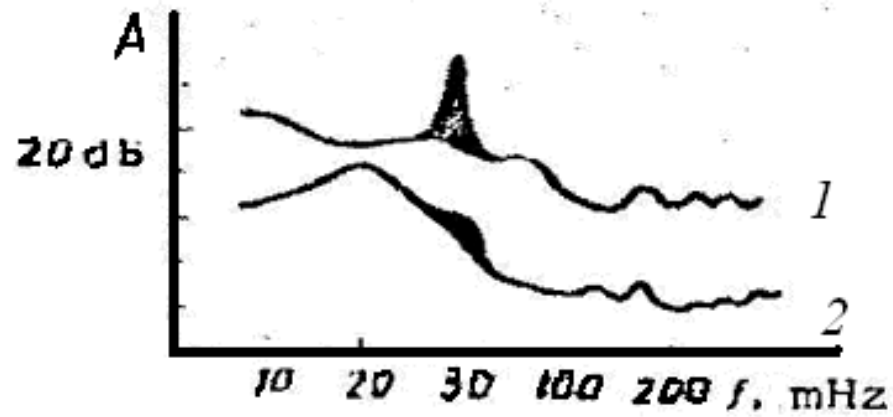
The resonance nature of the modulation confirms by the experimental data (Bespalov, Kleymenova, 1989).



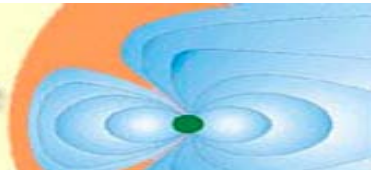


Высокочастотные слабозатухающие релаксационные колебания параметров радиационных поясов в дневной магнитосфере





Spectra of the envelope of (1) quasiperiodic VLF emission and (2) geomagnetic pulsations on terrestrial surface: a) at auroral latitudes (Syeva Observatory)? And b) at subauroral latitudes (Sora Observatory)



MODULATION OF THE SPECTRUM OF WAVES

The question of how modulation of VLF emissions is manifested at different frequencies is a more complicated one:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^{\infty} D \varepsilon_{\omega} d\omega \frac{\partial F}{\partial x} \right) - \frac{F}{T} + J$$

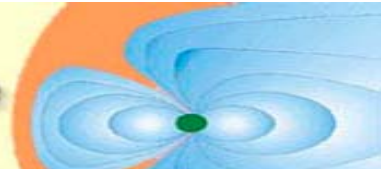
$$\frac{\partial \varepsilon_{\omega}}{\partial t} = \varepsilon_{\omega} \left(1 + \frac{b}{B} \cos \Omega t \right) \int_0^{\infty} \int_{x_c}^1 K \frac{\partial F}{\partial x} dx dv - \nu \varepsilon_{\omega}$$

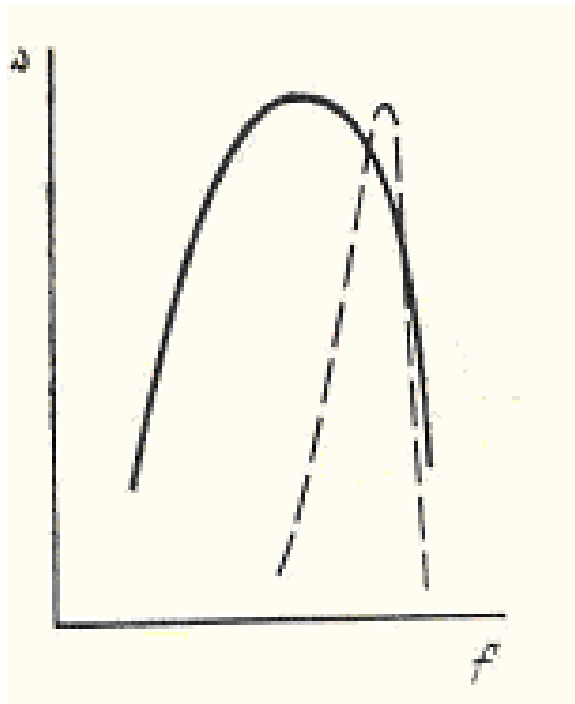
where $F(t, x, \nu)$, $x = v_{\perp L} / \nu$.

The perturbation of the energy density of whistler waves can be written in the form of a Fredholm Integral equation of the second type. We have the spectrum disturbance

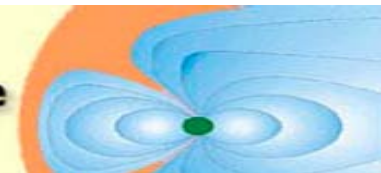
$$\varepsilon_{\omega \sim} = \frac{2ibG(\omega, \omega_m)}{\Omega(\Omega^2 - \Omega_J^2)} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_{\omega}}{T_g} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega} \right) d\omega + \frac{2ib}{\Omega T_g} \varepsilon_{\omega_0} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial B_L} \right)_0$$

where $\Omega_J^2 = \int_0^{\infty} G(\omega, \omega_m) d\omega$. Qualitatively, this result is in agreement with the observational data. The modulation is actually stronger near the upper edge of the spectrum of VLF emissions.





Типичное соотношение между полным спектром ОНЧ-излучений (сплошная линия) и спектром промодулированной части излучений (штриховая линия)



Заключение

Экваториальная электроструя, вероятно, увеличивает эффект генерации низкочастотных электромагнитных сигналов мощным коротковолновым радиоизлучением с амплитудной модуляцией в КПК диапазоне.

Для модуляции на частотах, отвечающих нижней части ОНЧ диапазона, эффект может существенно ослабляться преимущественно вертикальной ориентацией низкочастотного тока в ионосфере. Не исключено, что эффект генерации низкочастотных сигналов может стать значительным в окрестности нижней гибридной частоты. На более высоких частотах эффект генерации низкочастотных электромагнитных сигналов может превосходить рекордные уровни, характерные для области авроральной струи.

В целом, дальнейшее изучение вопросов генерации искусственных низкочастотных электромагнитных сигналов в низкоширотной ионосфере во многом зависит от результатов экспериментальных исследований.

