



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Взаимодействие ультранизкочастотных волн с частицами кольцевого тока в магнитосфере Земли

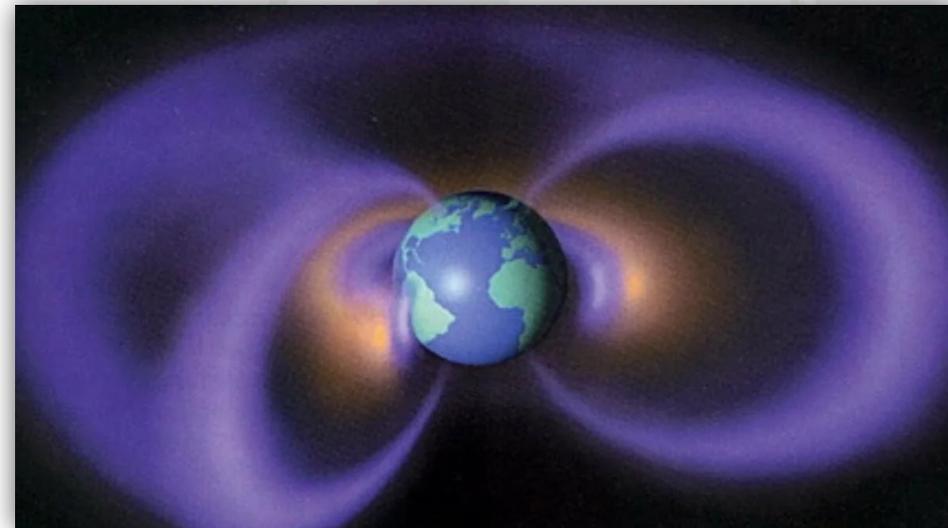
Михайлова О.С.



УНЧ-волны в магнитосфере



УНЧ-волны (геомагнитные пульсации) регулярно наблюдаются в магнитосфере Земли, участвуют в переносе энергии между различными областями космической плазмы, такими как магнитосфера и ионосфера. УНЧ-волны способны взаимодействовать с заряженными частицами кольцевого тока и радиационных поясов. Наибольшее количество УНЧ-волн наблюдается в плазмосфере в области кольцевого тока.

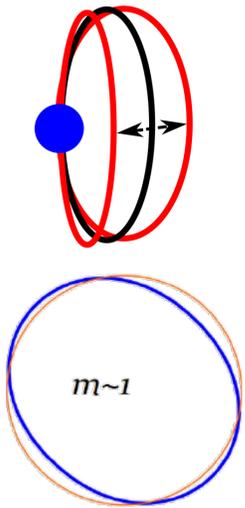




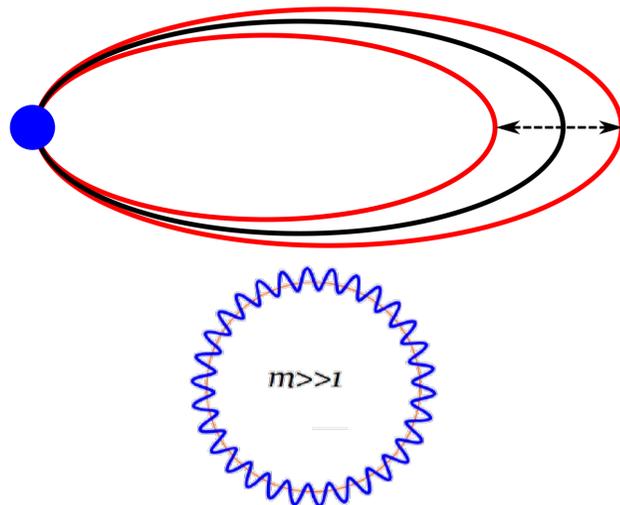
УНЧ-волны в магнитосфере

- УНЧ-волны занимают широкий диапазон частот, периоды составляют от 0.2–600 сек.
- Высокочастотный диапазон занимают волны диапазона Pc1 (0.2-5 сек). Ионно-циклотронные волны и ионно-ионные гибридные волны.
- Низкочастотный диапазон занимает класс пульсаций диапазона Pc4-5 (40-600 сек). Среди диапазона Pc4-5 выделяют альфвеновские и компрессионные волны.

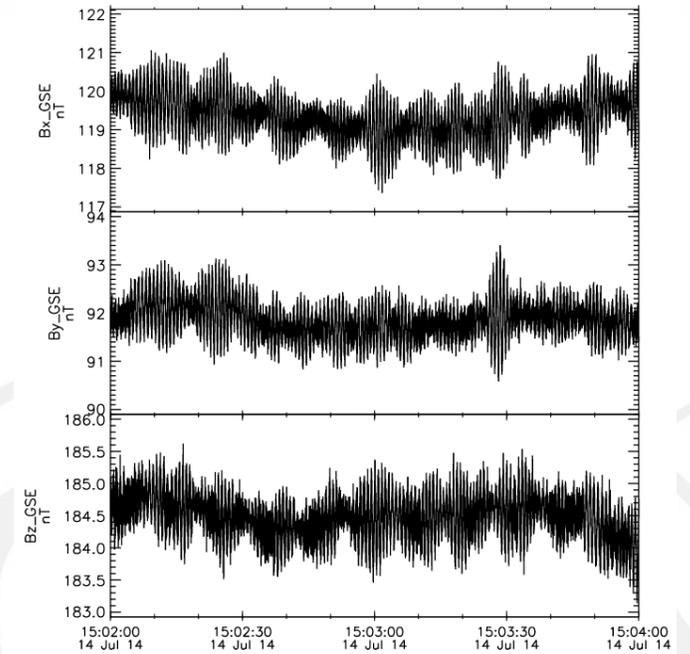
тороидальная



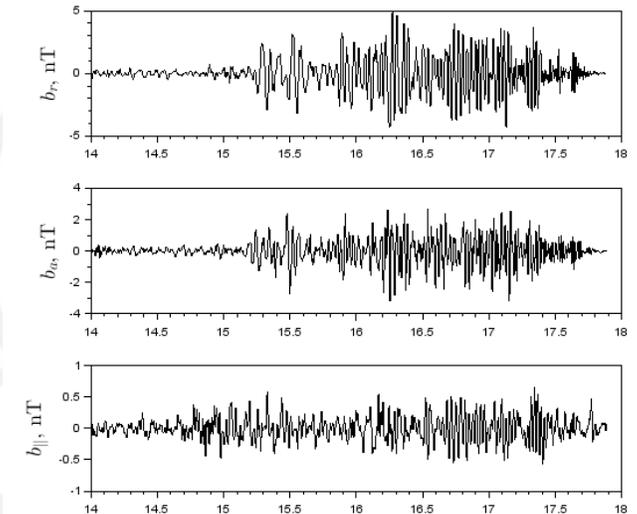
полоидальная



Pc1



Pc4

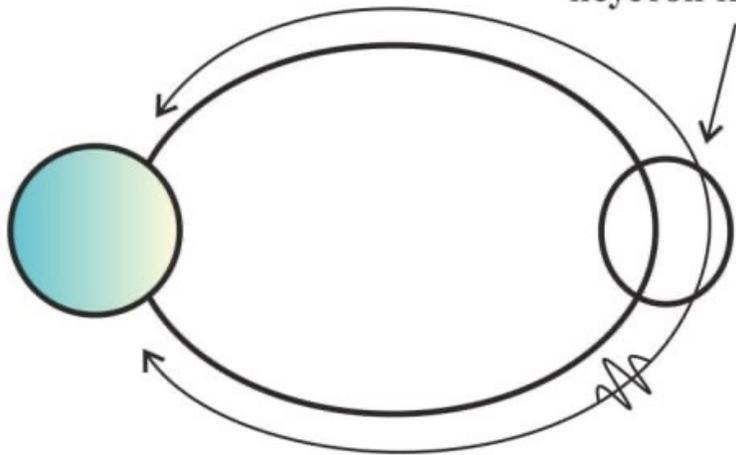




Теоретические исследования УНЧ-волн Диапазон Pc1

Старая парадигма

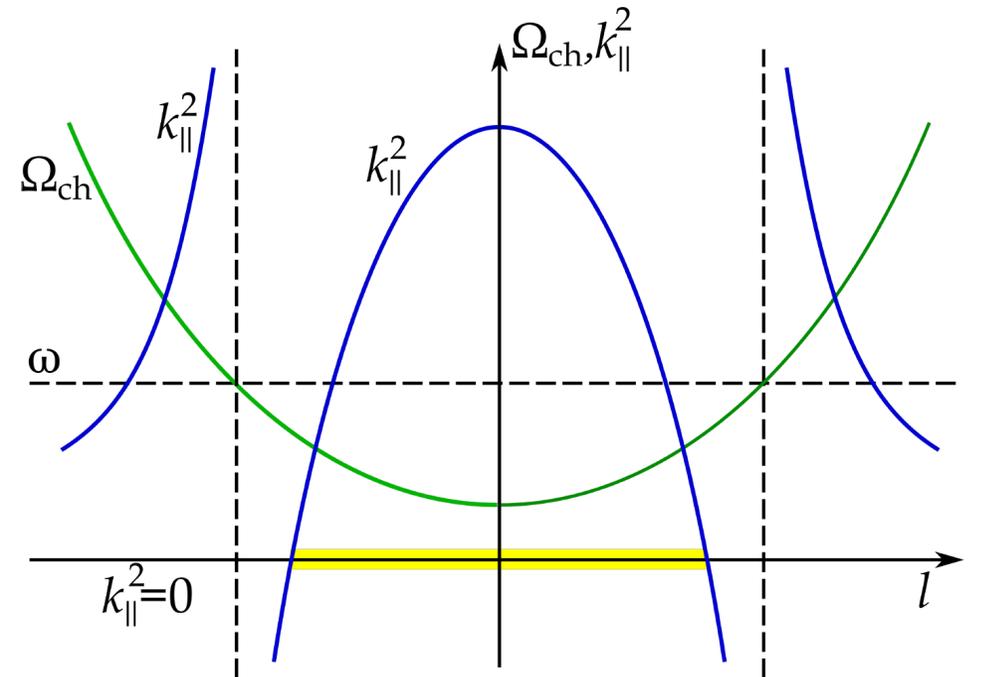
Область ионно-циклотронной неустойчивости



После учета примеси тяжелых ионов

$$k_{\parallel}^2 = \frac{\omega^2}{A_p^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega_{cp}^2}\right)} + \frac{\omega^2}{A_h^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega_{ch}^2}\right)}$$
$$A_{p,h} = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi n_{p,h} m_{p,h}}}$$

Точка отражения $\Omega_0 = \Omega_{ch} \sqrt{\frac{\frac{\rho_p}{\rho_h} + 1}{\frac{\rho_p}{\rho_h} + \frac{m_p^2}{m_h^2}}}$





Ионно-ионная гибридная волна $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$

$$\partial_1 \hat{L}_T(\omega) \partial_1 \Phi + \partial_2 \hat{L}_P(\omega) \partial_2 \Phi = 0$$

$$\hat{L}_T(\omega) = \partial_3 \frac{g_2}{\sqrt{g}} \partial_3 + \frac{\sqrt{g}}{g_1} \varepsilon_{\perp} \frac{\omega^2}{c^2}$$

$$\hat{L}_P(\omega) = \partial_3 \frac{g_1}{\sqrt{g}} \partial_3 + \frac{\sqrt{g}}{g_2} \varepsilon_{\perp} \frac{\omega^2}{c^2}$$

уравнение на тороидальную
функцию

$$\hat{L}_T(\omega) T_N(x^3) = 0$$

$$T_N(x_{\pm}^3) = 0$$

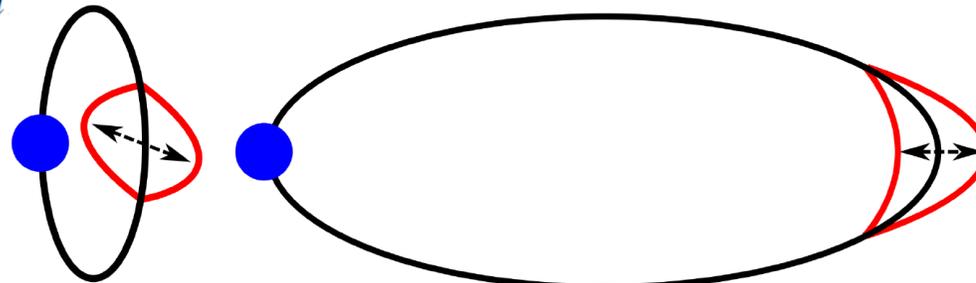
$$E_r \gg E_a, B_r \ll B_a$$

уравнение на полоидальную
функцию

$$\hat{L}_P(\omega) P_N(x^3) = 0$$

$$P_N(x_{\pm}^3) = 0$$

$$E_r \ll E_a, B_r \gg B_a$$

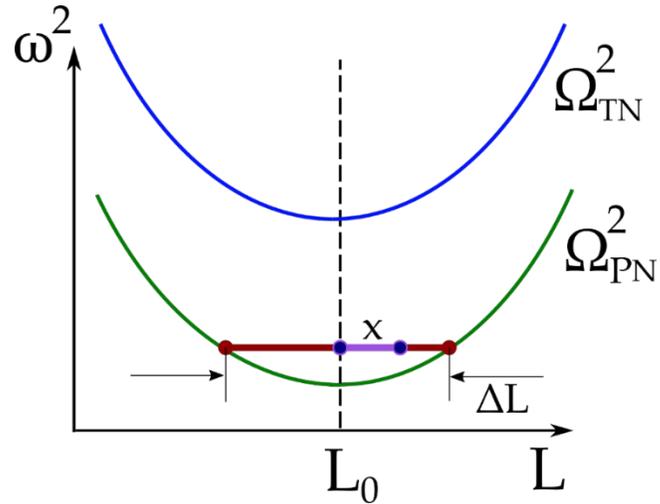


тороидальная

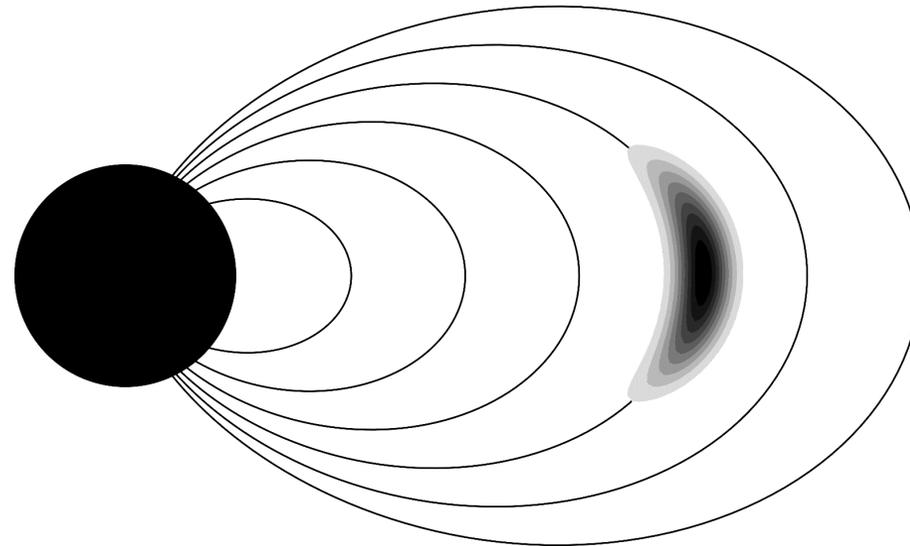
полоидальная



Поперечный резонатор



$$\Delta L(m) = 2 \sqrt{\frac{\sqrt{6} A_h l_{\perp}}{m \Omega_{PN} \sqrt{\varrho}} (2n + 1)}$$



$$m \sim 10 \quad \Delta L \approx 0.3 R_E$$
$$\omega \approx 1.7 c^{-1} \quad \Delta l = 0.8 R_E$$

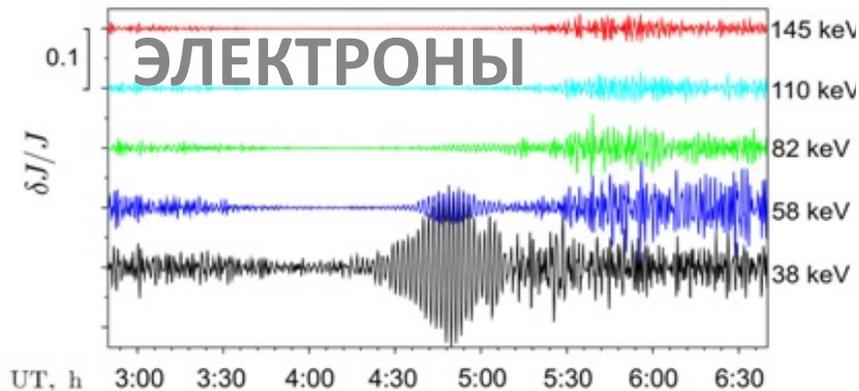
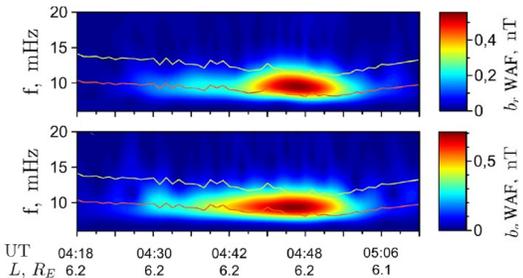
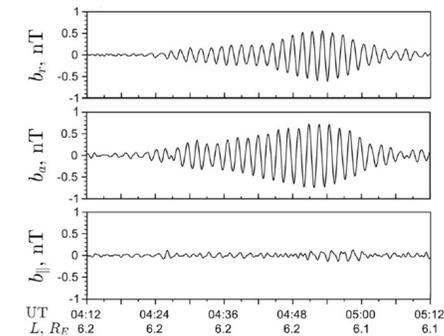
($\sim 0.3 \Gamma_{II}$)



Исследования по спутниковым наблюдениям

СОБЫТИЕ 1

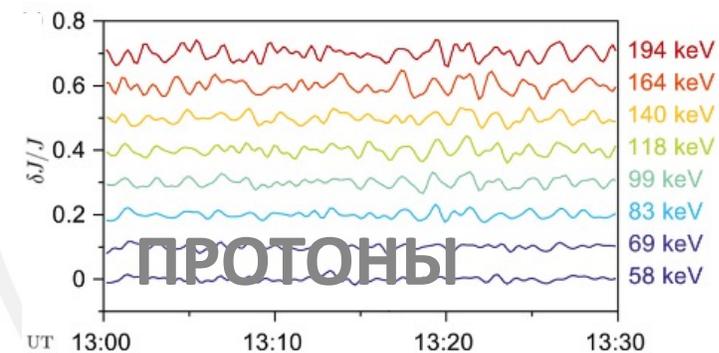
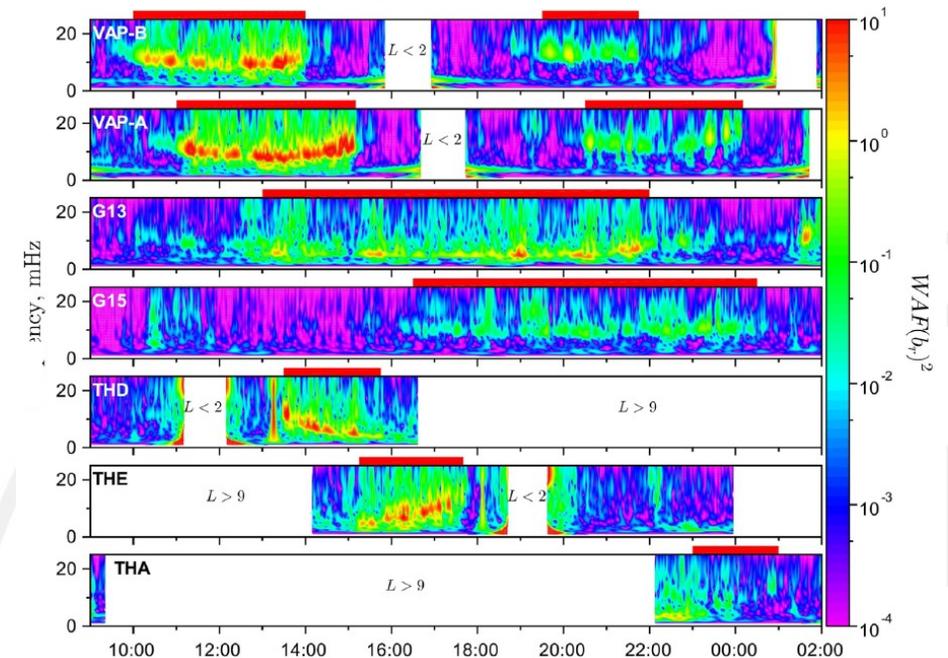
27 октября 2012



Взаимодействие волны с частицами проявляется в модуляциях потоков заряженных частиц (протонов и электронов). Одновременно с волной наблюдались модуляции потоков частиц на частоте волны. Максимальная амплитуда приходится на резонансную энергию.

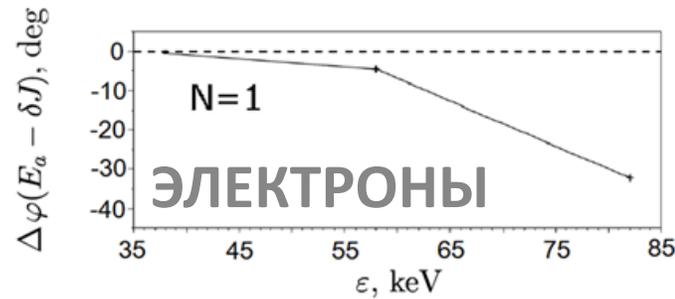
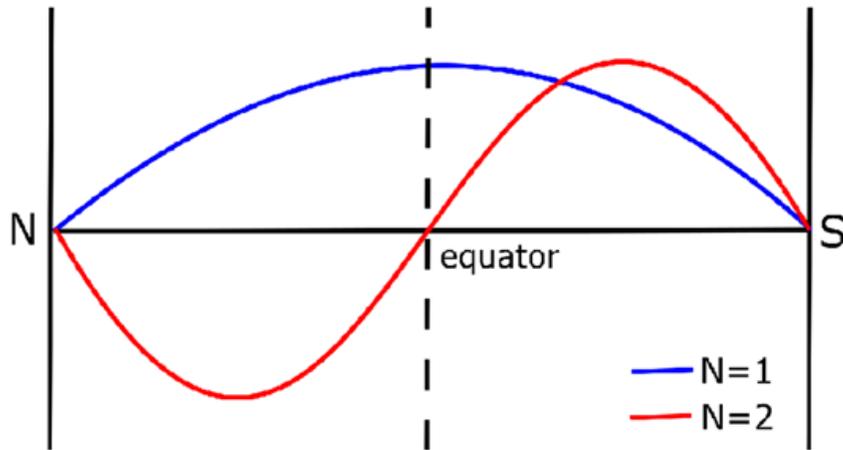
СОБЫТИЕ 2

25-26 февраля 2014



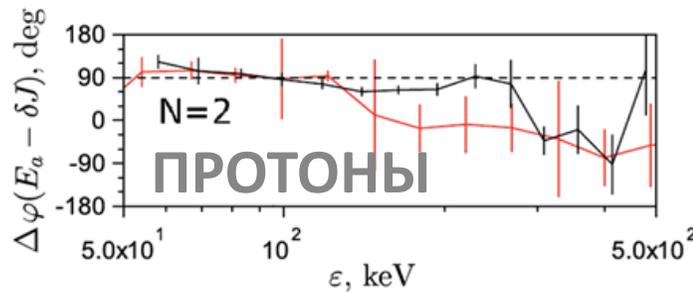


Сдвиг фаз между потоками частиц и полем волны – резонансное взаимодействие



СОБЫТИЕ 1
 $m \approx +100$

Дрейфовый резонанс – сдвиг фаз при резонансной энергии равен нулю. Фундаментальная гармоника стоячей альфвеновской волны.



СОБЫТИЕ 2
 $m \approx -200$

Баунс-дрейфовый резонанс – сдвиг фаз близок к 90°. Вторая гармоника стоячей альфвеновской волны.

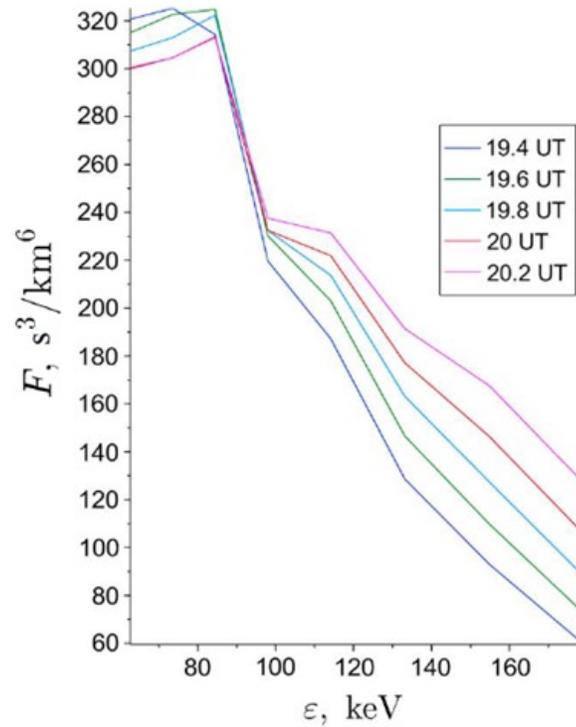


Неустойчивость

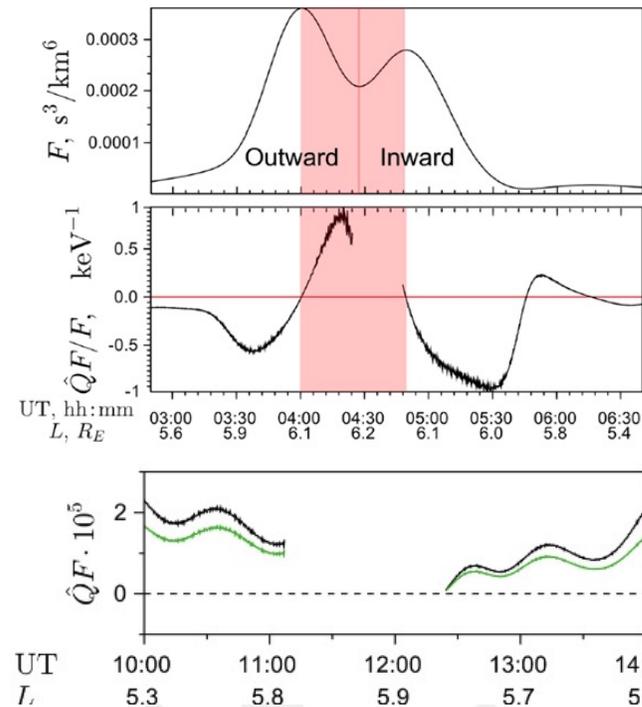
$$\hat{Q}F = \left[\frac{\partial F}{\partial \epsilon} + \frac{m}{\omega} \frac{c}{q B_{eq} L} \frac{\partial F}{\partial L} \right]_{\epsilon_{res}} > 0.$$

bump-on-tail

градиентная



Mager et al., 2018



СОБЫТИЕ 1
ЭЛЕКТРОНЫ

СОБЫТИЕ 2
ПРОТОНЫ

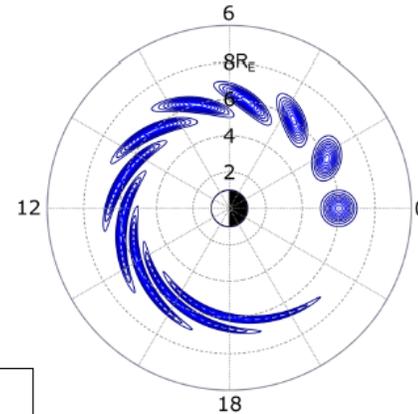
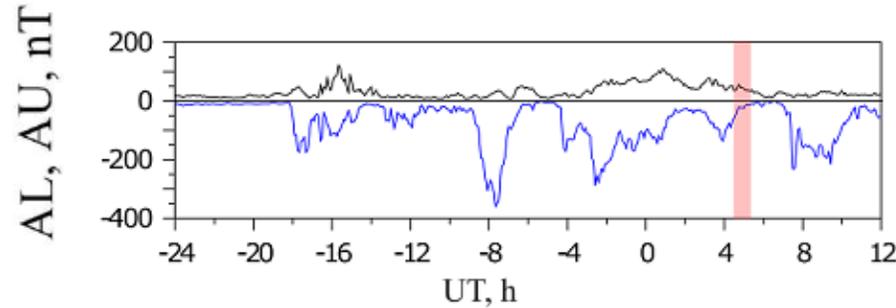
$m \cdot \frac{\partial F}{\partial L} \cdot 10^{26}$



Источники: суббури и магнитные бури

СОБЫТИЕ 1

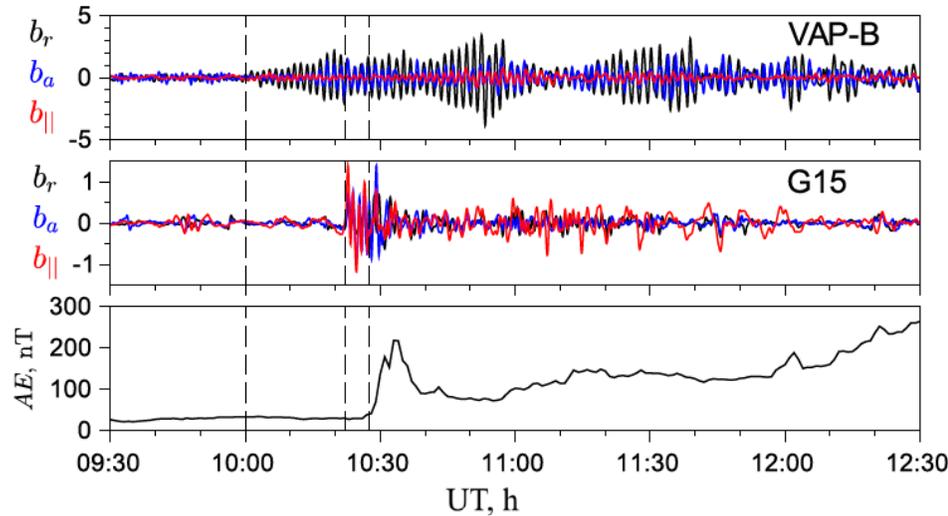
ЭЛЕКТРОНЫ



Источником являлось облако электронов, инжектированных во время взрывной фазы суббури.

СОБЫТИЕ 2

ПРОТОНЫ



Волна наблюдалась до начала суббури. Вероятно, она сгенерирована процессами, протекающими во время восстановительной фазы магнитной бури.

Публикации: Mikhailova, O. S., Smotrova, E. E., Mager, P. N. Resonant generation of an Alfvén wave by a substorm injected electron cloud: A Van Allen probe case study. *Geophysical Research Letters*. 2022. Volume 49, e2022GL100433. DOI: 10.1029/2022GL100433

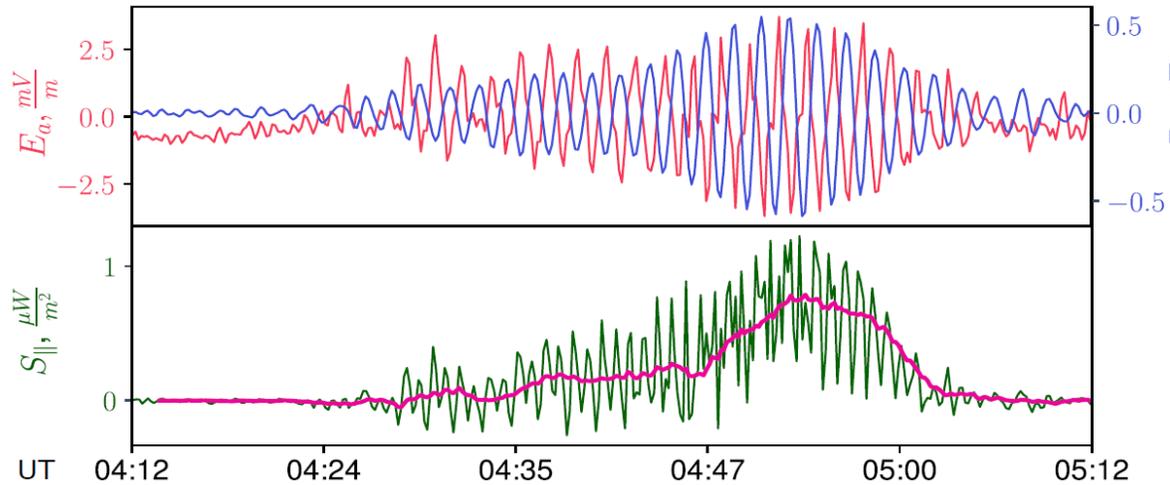
Rubtsov A.V., Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Ren J., Zong Q.-J. Multispacecraft Observation of the Presubstorm Long-Lasting Poloidal ULF Wave. *Geophysical Research Letters*. 2021. Volume 48, Issue 23, e2021GL096182 DOI: 10.1029/2021GL096182



Влияние ионосферы на структуру УНЧ-волн

СОБЫТИЕ 1

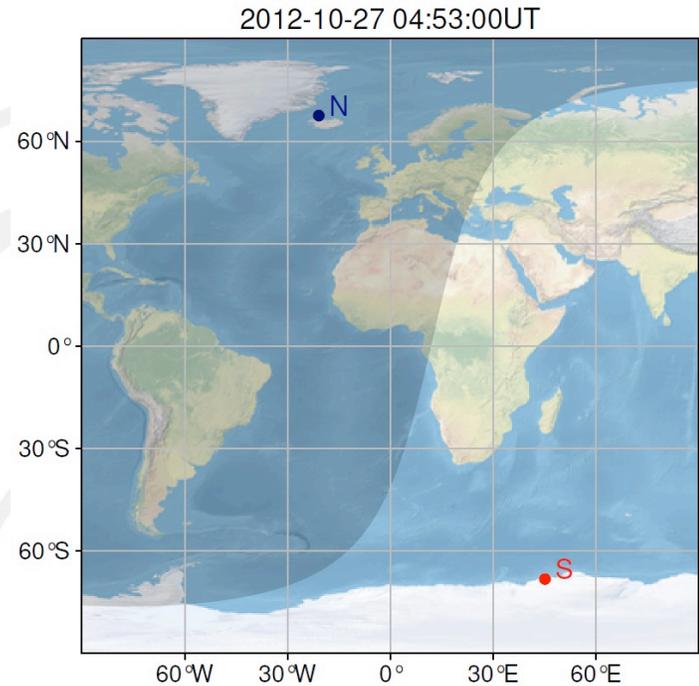
27 октября 2012



$$\frac{\partial^2 E_j}{\partial l^2} + k_{\parallel}^2 E_j = 0$$

$$E_j|_{l_{\pm}} = \mp i \frac{\epsilon^{\pm}}{k_{\parallel}} \frac{\partial E_j}{\partial l} \Big|_{l_{\pm}}$$

$$\epsilon^{\pm} = \frac{c^2}{4\pi \Sigma_P^{\pm} v_A}$$



Case	$\bar{S}_{\parallel} \left(\frac{l_I}{2} \right)$	$\Delta\phi$
$\epsilon^{\pm} \ll 1$	$S_0 (\epsilon^+ - \epsilon^-)$	$\sim 180^{\circ}, 0^{\circ}$
$\epsilon^{\pm} \gg 1$	$S_0 \left(\frac{1}{\epsilon^+} - \frac{1}{\epsilon^-} \right)$	$\sim 180^{\circ}, 0^{\circ}$
$\epsilon^+ \gg 1, \epsilon^- \ll 1$	$S_0 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\epsilon^+} - \epsilon^- \right) - \frac{1}{k_0 l_I} \left(\frac{1}{\epsilon^+} + \epsilon^- \right) \right]$	$\sim 90^{\circ}$



Важнейшие результаты

- Установлено, что ионно-ионные гибридные УНЧ-волны диапазона Pc1, которые возникают в плазме с тяжелыми ионами, могут быть тороидальными и полоидальными, при этом осциллирует не вся силовая линия, а ее экваториальная часть.
- Установлено, что ионно-ионные гибридные УНЧ-волны могут быть заперты в радиальном резонаторе на полоидальной магнитной оболочке.
- Показана резонансная генерация УНЧ-волны диапазона Pc4 облаком электронов, инжектированных во время суббури, благодаря пространственной градиентной неустойчивости. Волна взаимодействовала с электронами посредством дрейфового резонанса.
- Наблюдалась долгоживущая УНЧ-волна диапазона Pc4, зарегистрирована до начала суббури. Волна сгенерирована в результате пространственной градиентной неустойчивости, взаимодействовала с протонами с помощью баунс-дрейфового резонанса.
- Получена простая модель, позволяющая определять проводимость Петерсена в ионосфере по данным полей УНЧ-волны одним космическим аппаратом.



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Спасибо за внимание!

