

Плазменная турбулентность верхней ионосферы в поле мощных коротких радиоволн. Физические основы.

С. М. Грач

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского



**УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО**



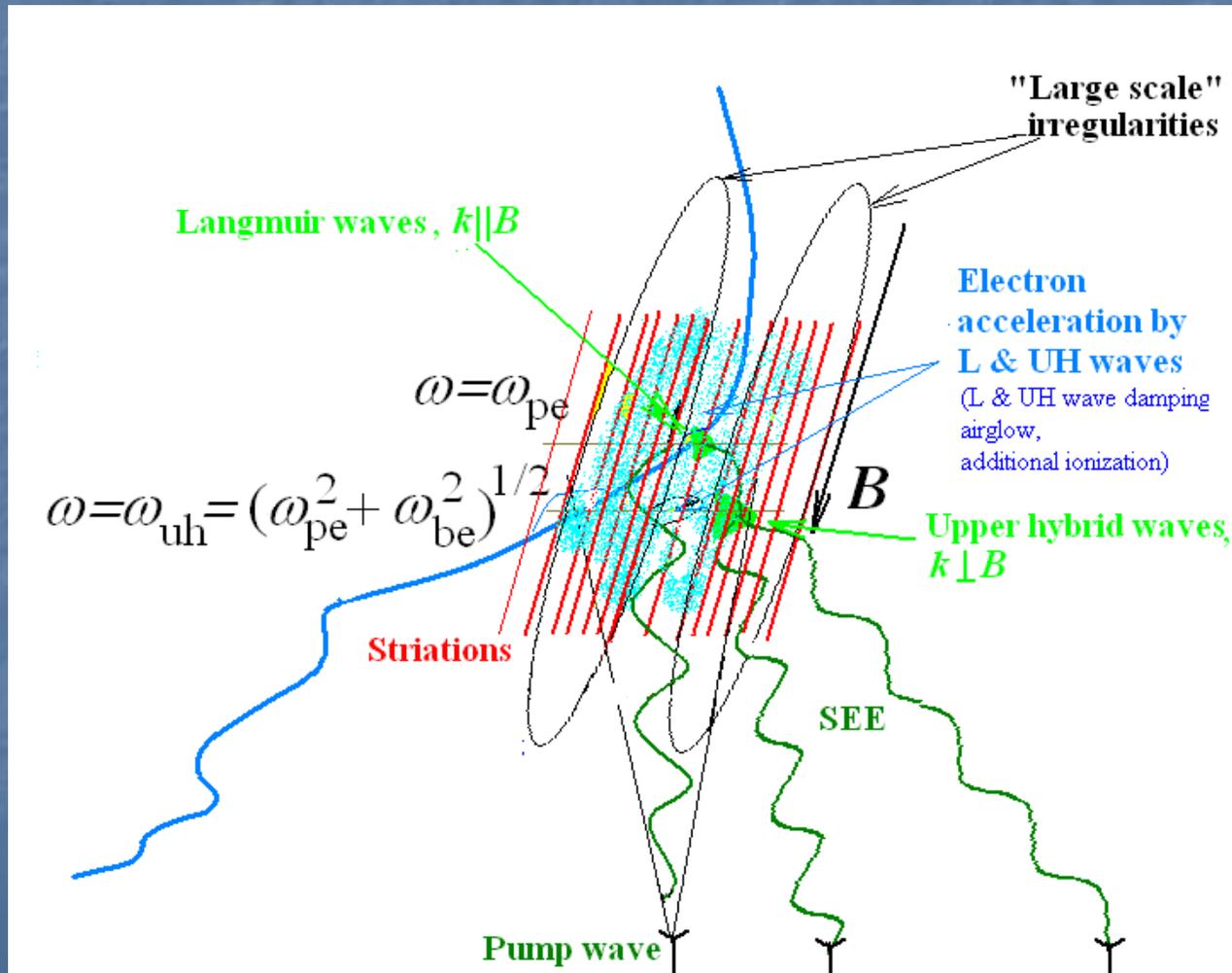
Систематические исследования процессов взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с ионосферой начали проводиться с начала 70-х годов в США в Платтевилле (olorадо) и Аресибо (Пуэрто-Рико), а также в СССР (стенд «Ястреб», НИРФИ Нижегородская область). Инициатором начала этих исследований в НИРФИ Г. Г. Гетманцев. Уже в первых экспериментах был обнаружен целый ряд новых явлений. К этим явлениям, в частности, относятся возбуждение искусственной турбулентности в области плазменного резонанса в ионосфере и крупномасштабное расслоение ионосферной плазмы. Хотелось бы отметить значительный вклад в исследования проблемы взаимодействия мощных радиоволн с ионосферой ушедших их жизни представителей научной школы В.Л. Гинзбурга, ее московской и нижегородской ветвей: В.Ю. Трахтенгерца и В. В. Васькова в области построения теоретической картины, Л.М. Ерухимова и Н.А. Митякова (НИРФИ) в области экспериментальных исследований.

*Viktor Yu. Trakhengertz
(14.04.1939-04.12.2007)*



1. Введение. Существующие экспериментальные установки. Явления в F-области ионосферы вблизи точки отражения мощной обыкновенной волны.
2. Стрикционная параметрическая неустойчивость
3. Тепловая параметрическая неустойчивость
4. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ)
5. Механизм генерации ИРИ в области верхнего гибридного резонанса
6. Зависимость вида спектров ИРИ от соотношения f_0 and nf_{ce} .
7. Конкуренция «стрикционной» и «верхнегибридной» ИИТ
8. Ускорение электронов
9. Генерация искусственного оптического свечения
10. Дополнительная ионизация ионосферной плазмы.

Искусственная ионосферная турбулентность в F-области ионосферы вблизи точки отражения обыкновенной волны.



Heating facility	Frequency range (MHz)	ERP(MW)	GM field inclination	Number of working hours per year
«Cypa»	4.3 – 9.5	150 – 270	71.5°	100 – 150
EISCAT	4.0 – 8.0	300 (4.0 – 5.4 MHz) 1200 (5.4 – 8.0 MHz)	78°	≈ 200
HAARP	2.8 – 10.0	400 – 3600	76°	≈ 2000
Arecibo	3.5, 5.1, 7.8	<150	45 °	

ИИТ возбуждается в области, где могут одновременно распространяться электромагнитные и плазменные (квазипотенциальные) волны. На рисунке показана зависимость квадрата показателя преломления

$$n^2(v), \quad v = \omega_{pe}^2/\omega^2, \quad (\omega_{pe}^2 = 4\pi e^2 N/m)$$

для $u \ll 1$ $u = \omega_{be}^2/\omega^2$

Вблизи точки отражения $v = 1$

$$\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{B}_0$$

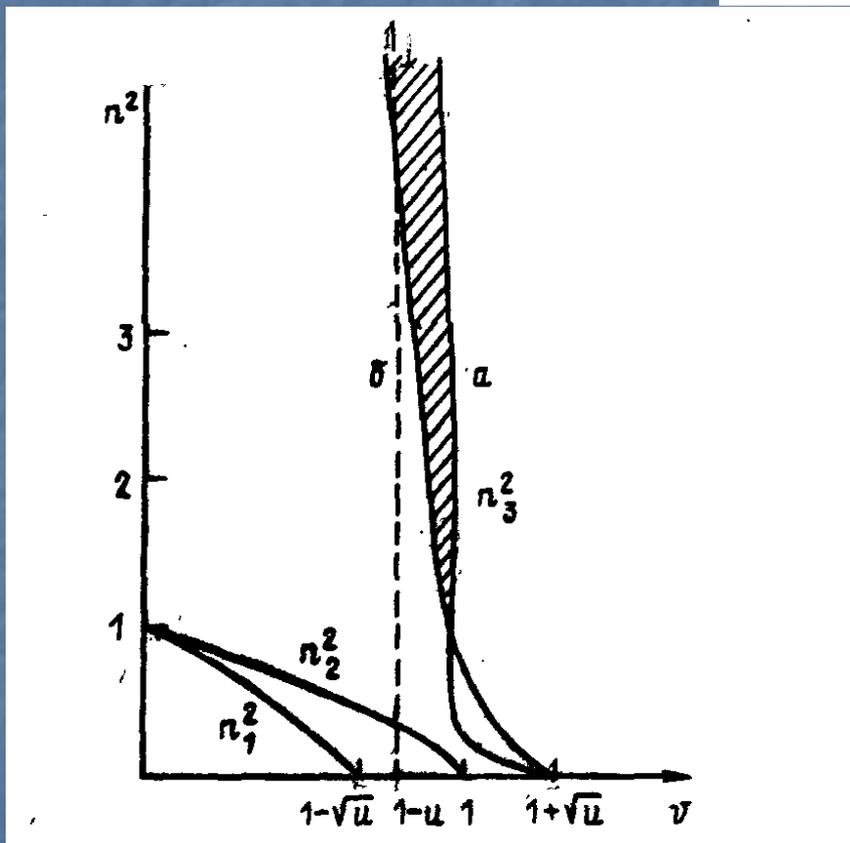
Вблизи верхнего гибридного резонанса

$$\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{B}_0$$

$$v = 1 - u$$

Частота плазменных волн:

$$\omega_{\text{col}}^2 \approx \omega_{pe}^2 + \omega_{be}^2 \sin^2 \theta$$



2. Ponderomotive parametric instability (PPI) near the PW reflection point. $\tau \sim 0.5 - 5 \text{ ms} <$

$$m \cdot \partial \mathbf{V} / \partial t = -\nabla \Phi \quad \Phi = q^2 |\mathbf{E}|^2 / 4m\omega^2 \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{pl} \quad \text{and} \quad |\mathbf{E}|^2 \quad \text{contains the term} \quad \mathbf{E}_0 \mathbf{E}_1 + c.c.$$

$$\mathbf{E}_0 \propto \exp\{-i\omega_0 t + i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}\} + c.c.$$

$$\mathbf{E}_{pl} \propto \exp\{-i\omega_1 t + i\mathbf{k}_1 \mathbf{r}\} + c.c.$$

$$\Phi \propto \exp\{-i(\omega_0 - \omega_1)t + i(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1)\mathbf{r}\} + c.c.$$

$-\nabla \Phi$ - **the Miller force**

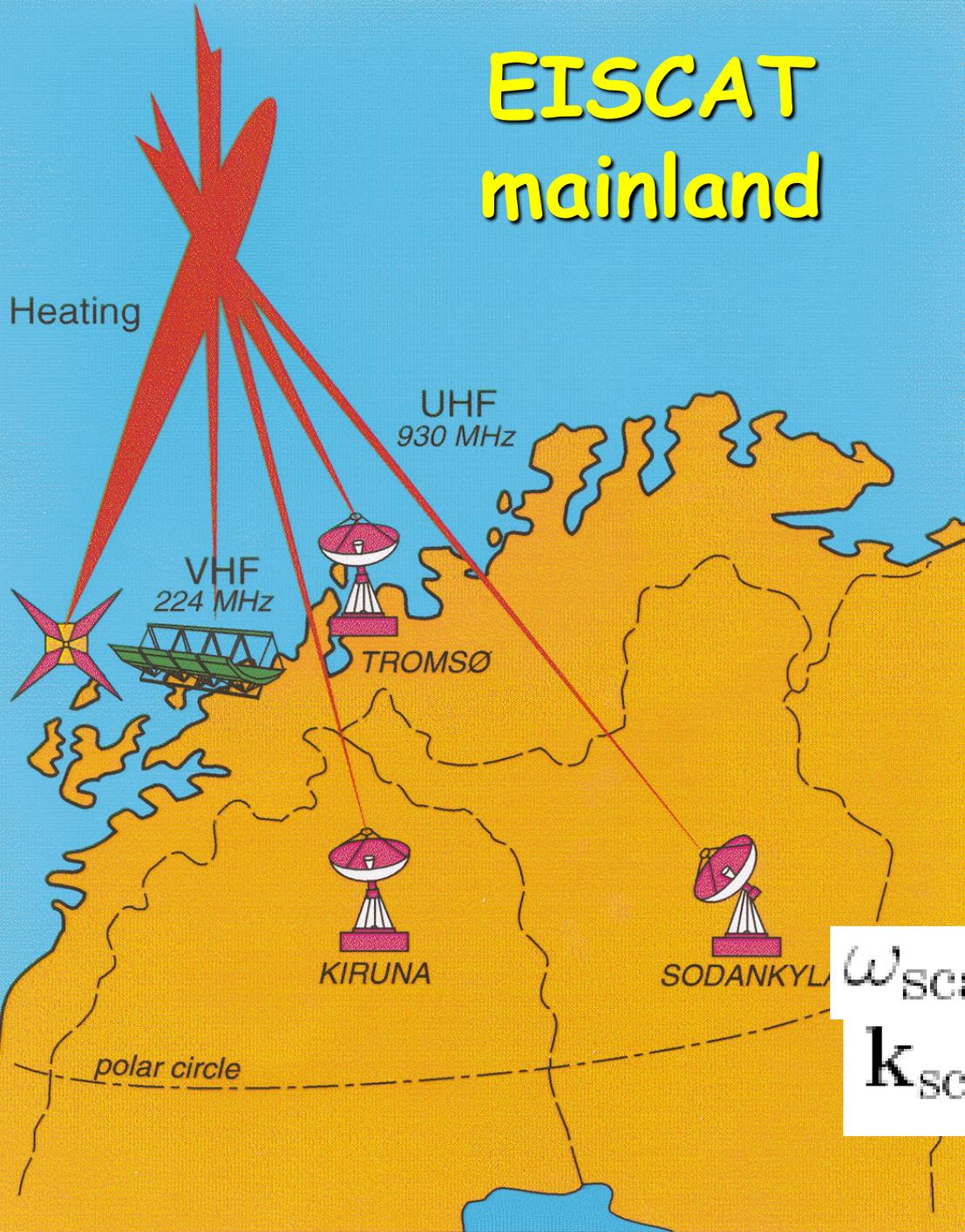
$$\partial \mathbf{E}_1 / \partial t + \nu_e \mathbf{E}_1 \propto \mathbf{E}_0 \mathbf{V}^* \quad (2)$$

(1) and (2) provide positive feedback and, therefore, an instability, $(e^{\gamma t})$

Instability threshold:

$$\frac{|E_0|_{P,th}^2}{4\pi N T_e} = \frac{\nu_e}{\omega_0}$$

EISCAT mainland

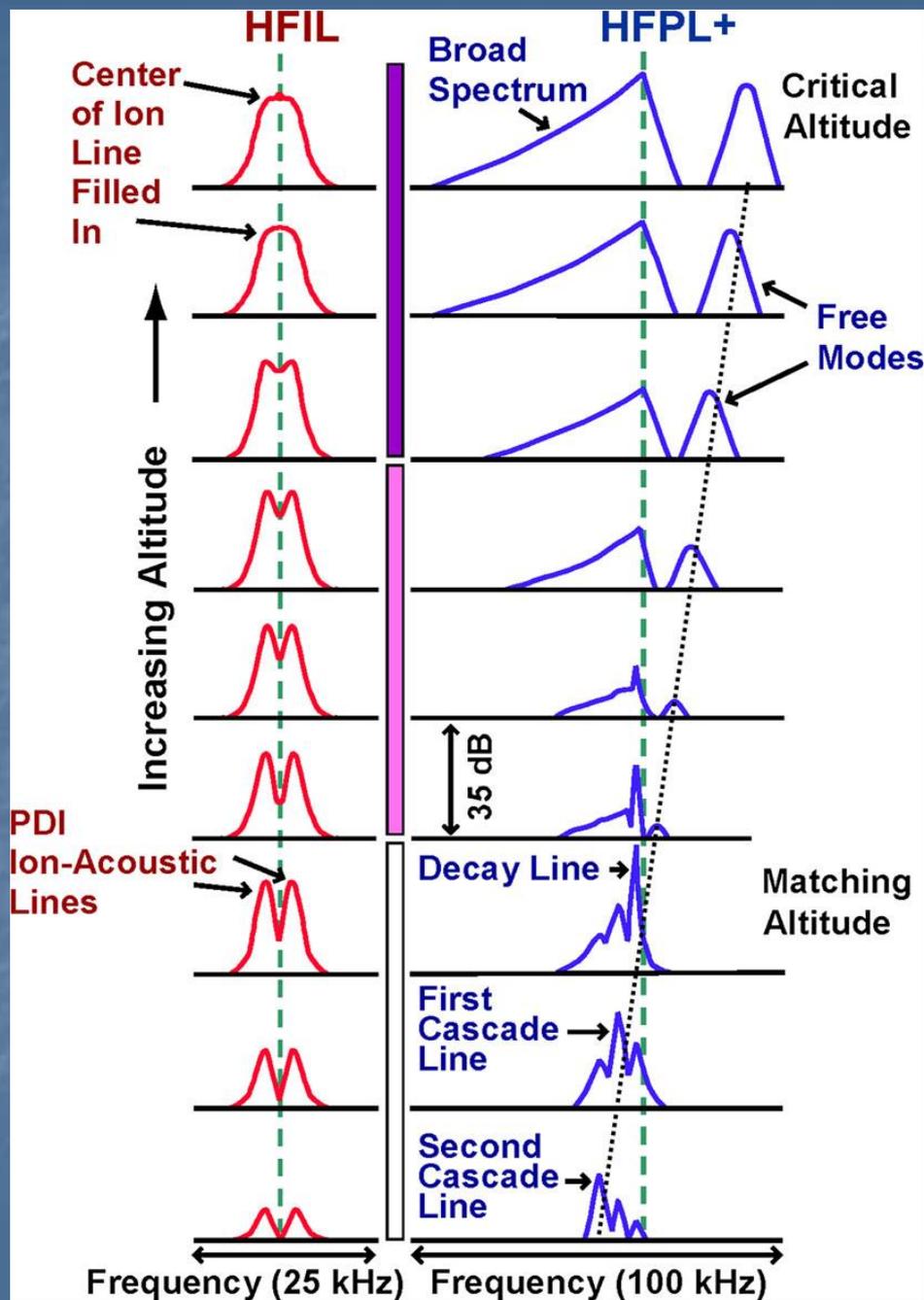


Как СПН
исследуется на
эксперименте?

EISCAT consists of much more than just radars. It possesses the high-frequency (HF) ionospheric modification facility, called HEATING or simply the HEATER.

$$\omega_{\text{scat}} = \omega_{\text{sound}} \pm \omega_{\text{pl}}$$

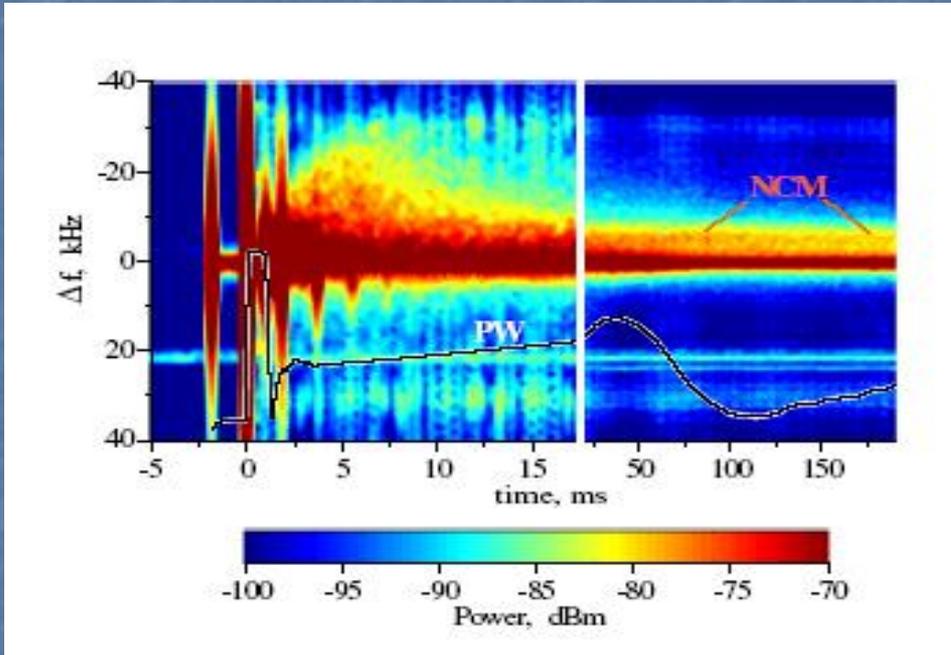
$$\mathbf{k}_{\text{scat}} = \mathbf{k}_{\text{sound}} \pm \mathbf{k}_{\text{pl}}$$



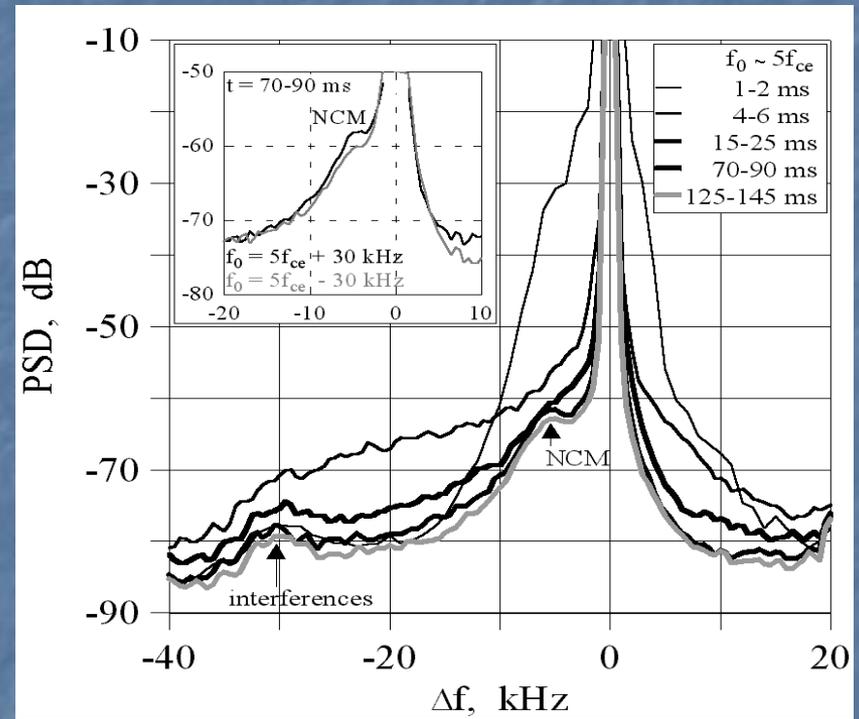
Caricature of HFIL spectra (left) and HFPL+ spectra (right) versus height (ordinate) 10–20 ms after HF turn-on in a smooth, stratified, stable plasma. The dashed green lines correspond to the radar frequency plus f_0 (HFPL+) and the radar center frequency (HFIL). The HFPL– spectrum is not shown. The black dotted line connecting the HFPL free mode frequencies at the baselines represents the LW dispersion curve in the plasma. SLT with caviton formation occurs near the critical altitude (purple bar), and the PDI is detected near the matching altitude (white bar). The magenta bar indicates the region where the PDI and SLT coexist. Adopted from F. T. Djuth, D. F. DuBois, *Earth Moon Planets*, 2015, DOI 10.1007/s11038-015-9458-x

4. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) или **Stimulated Electromagnetic Emission (SEE)** is known as a structured, wide-band secondary radiation escaping the PW-plasma interaction region.

SEE related to ponderomotive parametric instability:

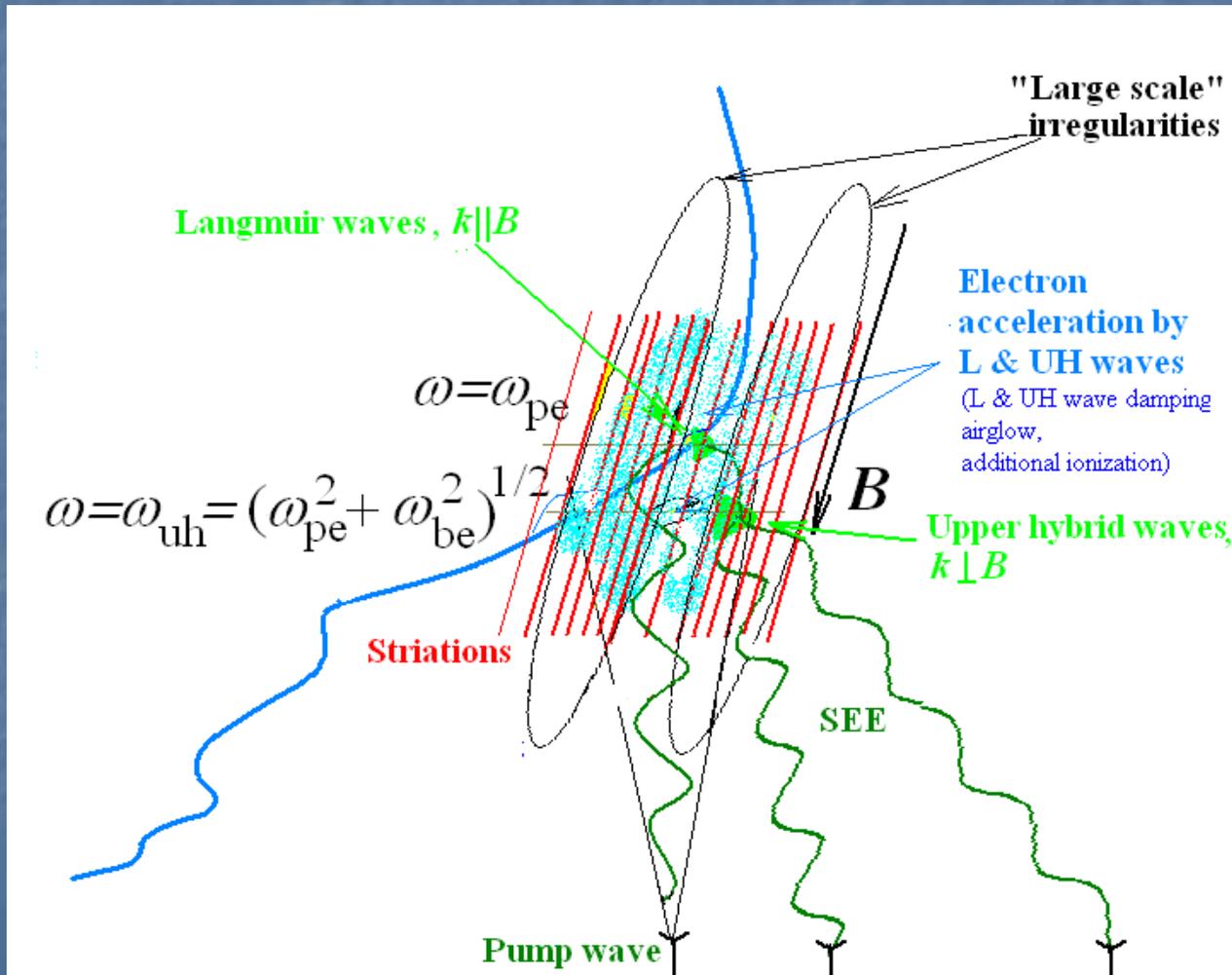


SEE spectrogram for first 200 ms of pumping. Black line shows the temporal evolution of PW reflected signal (PSA). $f_0 = 6778$ kHz $\approx 5f_{ce}$. Pump power ~ 180 MW.



A succession of SEE spectra obtained at different times after PW turn on.

Искусственная ионосферная турбулентность в F-области ионосферы вблизи точки отражения обыкновенной волны.



3. Thermal parametric instability (TPI) in the ionosphere causes excitation of UH waves with $\mathbf{k}_u \perp \mathbf{B}$ and small-scale striations elongated along geomagnetic field (process: EM \rightarrow UH+ N, matching conditions $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_u \pm \boldsymbol{\kappa}$, $\omega_0 = \omega$). $\tau < (\delta\nu_e)^{-1} \sim 0.5-5$ s.

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\hat{\chi}_e}{N} \nabla T_e \right) + Q - \delta\nu_e (T_e - T),$$

$Q = (2/3N_e)(\mathbf{E}\hat{\sigma}_\omega^H\mathbf{E}^*)$ - **Joule heating**, again beating and positive feedback

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \nabla \cdot \hat{D}_a \nabla n - k_T \frac{N}{T_{e0}} \nabla \hat{D}_a \nabla T_e = 0$$

Instability threshold:

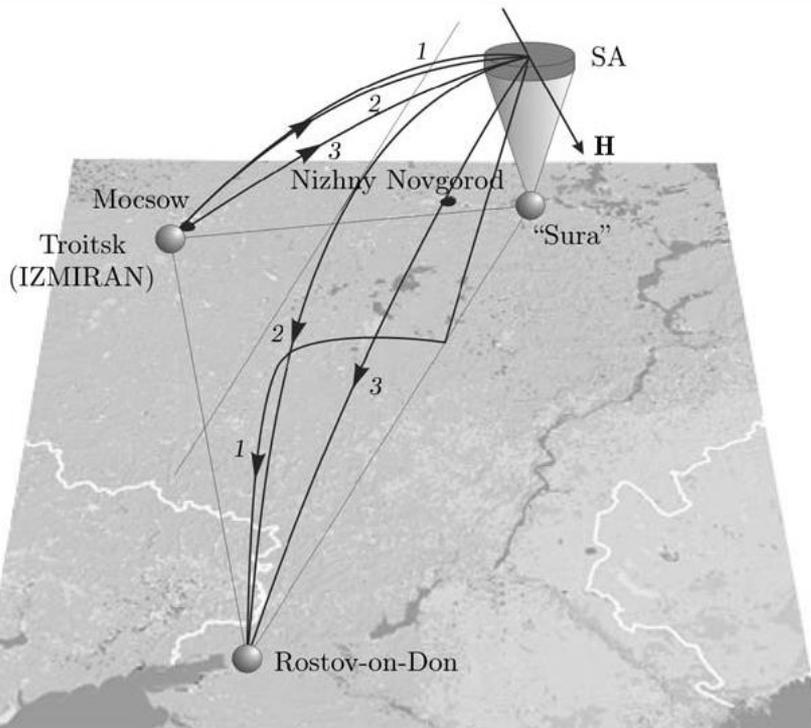
$$\frac{|E_0|_{T,th}^2}{4\pi N T_e} = \frac{3\nu_e}{k_T \omega_0} (\delta + \kappa_z^2 l_e^2 + \kappa_\perp^2 \rho_e^2)$$

Регулярная неоднородность среды существенна для ТПН: размер области взаимодействия волны накачки, плазменных волн и ММН, оказывается малым по сравнению с продольным размером ММН и с характерной длиной затухания плазменной волны l_3 , $l_c \ll l_3, L_T$. Величина l_c определяется длиной синхронизма плазменных волн и ВН, L_T характерной продольной волной теплопроводности, ($L_T = l_e \delta^{-1/2}$), $b = v_e / V$, V - вертикальная компонента групповой скорости плазменных волн. Эффективность источника нагрева при развитии ТПН уменьшается, таким образом, по сравнению с однородной средой в $(l_c^2 / l_3 L_T)^{-1} \approx L_T \omega / L v_e$ раз, L - локальный масштаб градиента концентрации плазмы в области ТПН. Соответственно образом повышается порог ТПН в неоднородной среде. В результате ($L_{T\perp} = \rho_e \delta^{-1/2}$)

$$\frac{E_{th}^2}{4\pi N_e T_e} \sim \frac{1}{|\mathbf{a}_0 \mathbf{a}_1|^2} \frac{L_T}{L} (1 + \kappa_{\perp}^2 L_{T\perp}^2)^{1/2}$$

Как исследуется ТПН (ММН и ВГ волны) в эксперименте?

Ракурсное рассеяние КВ и УКВ на ММН. Внизу - схема эксперимента и траектории распространения радиоволн на трассе ИЗМИРАН - «Сура» - Ростов-на Дону. [В.П. Урядов, Г.Г. Вертоградов и др. Изв. вузов Радиофизика, 2009, т. 52, №4.]

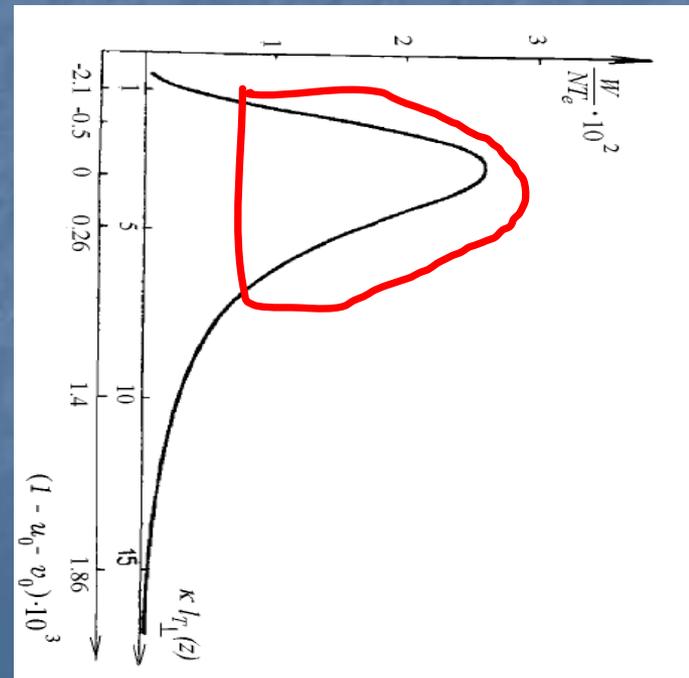


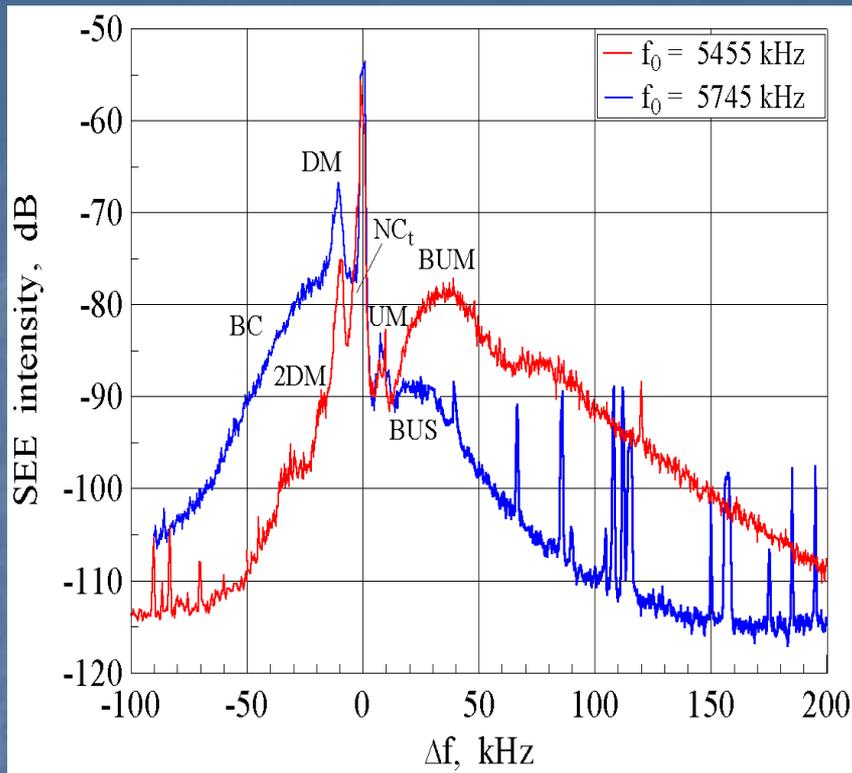
Для УКВ –
прямолинейное
распространение.

Для КВ существенно
рефракция в
ионосфере (см. рис.)

$$W_{k_{\perp}}(z) = \frac{k_{\perp}^2}{V_{g\perp}^2} \overline{\left(\frac{k_{\perp}^2}{V_{g\perp}^2} \right)^{-1}} \frac{W_{\text{tot}}(z)}{\pi k_{\text{max}}^2} \approx \frac{a W_0 \exp\{-\Gamma(z)\} n_{\kappa(z)}^2}{\nu_e k_{\text{max}}^2 |dz_m/d\kappa^2(z)|}$$

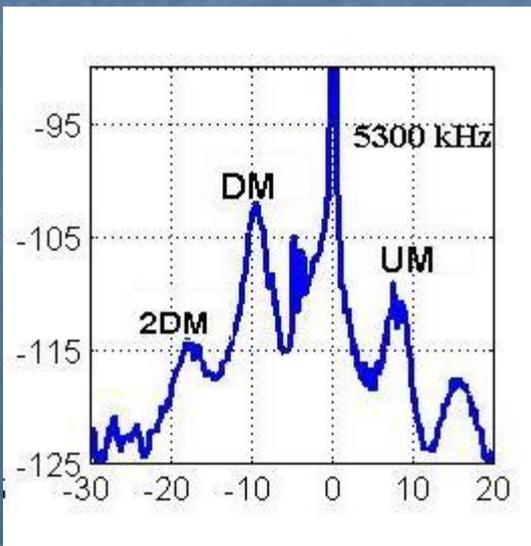
From this relation an altitude dependence of plasma (upper hybrid) wave energy density can be obtained. **Essential consequence:** near the maximum the threshold of PPI is exceeded, and e.g. induced scattering or 3-wave decay provide a wide frequency spectrum of UH waves(!!)





4. Most prominent SEE spectral features for long pumping ("upper hybrid" features") related to the thermal parametric instability.

- Downshifted maximum (DM), is situated at the frequency shifts $\Delta f_{DM} < 0, |\Delta f_{DM}| > f_{LH}$, DM disappears at $f_{DM} \approx n f_c \approx f_{uh}$



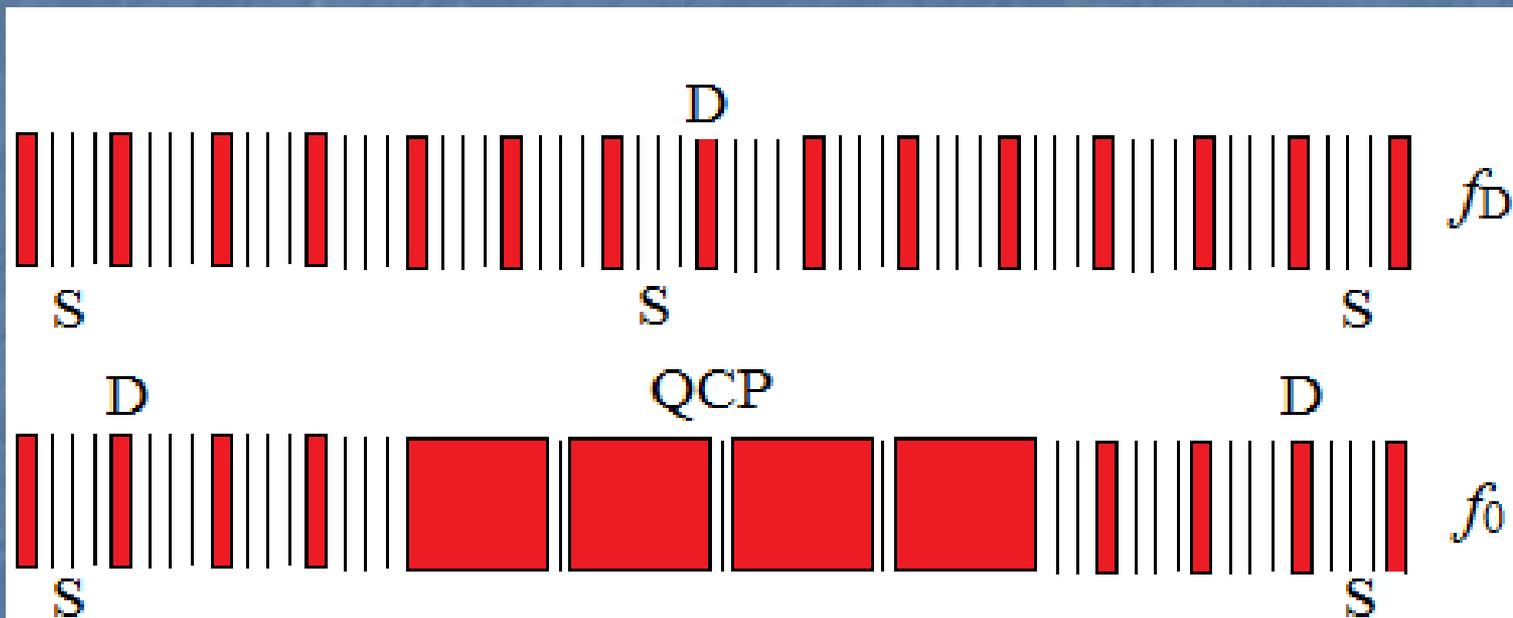
- Broad upshifted maximum (BUM), at

$$\Delta f_{BUM} \sim f_0 - n f_{ce} + \delta f \quad (1)$$

exists for $f_0 \geq n f_{ce}$

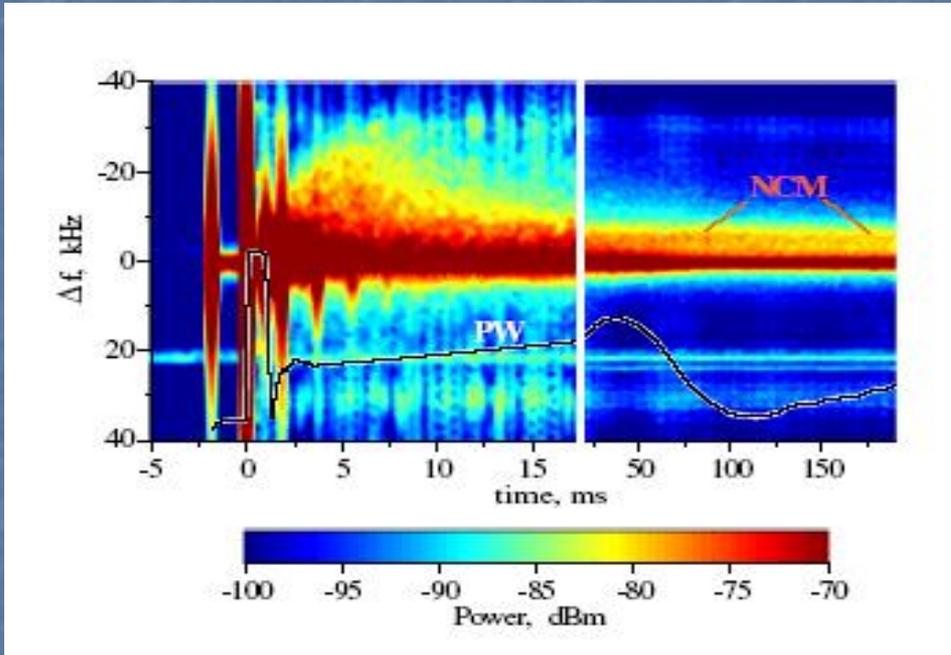
$\delta f = 15-20$ kHz

Режимы излучения волны накачки (f_0) и
диагностической волны (f_D) для исследований
искусственной турбулентности с помощью ИРИ,

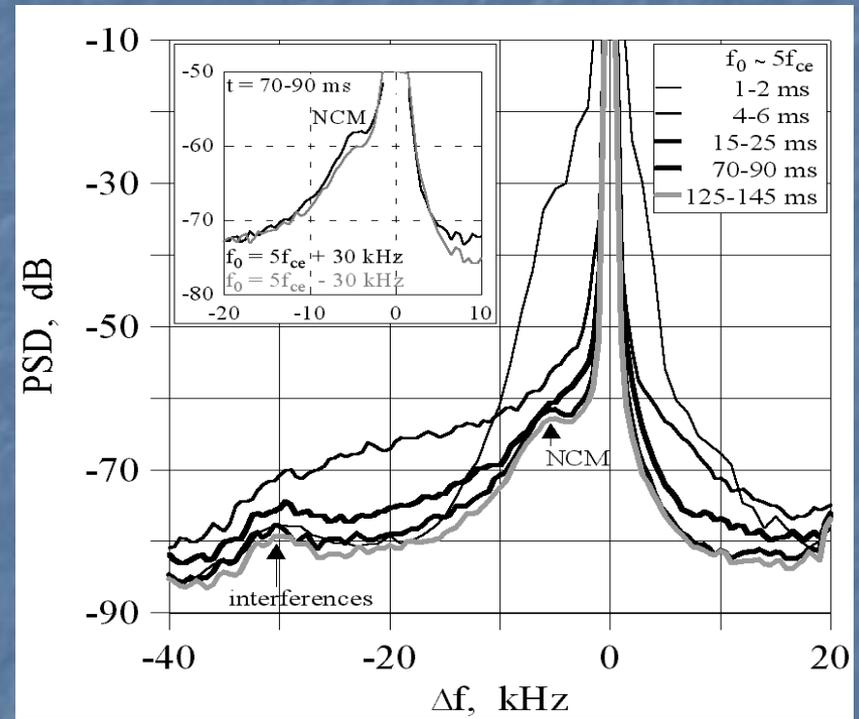


4. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) или **Stimulated Electromagnetic Emission (SEE)** is known as a structured, wide-band secondary radiation escaping the PW-plasma interaction region.

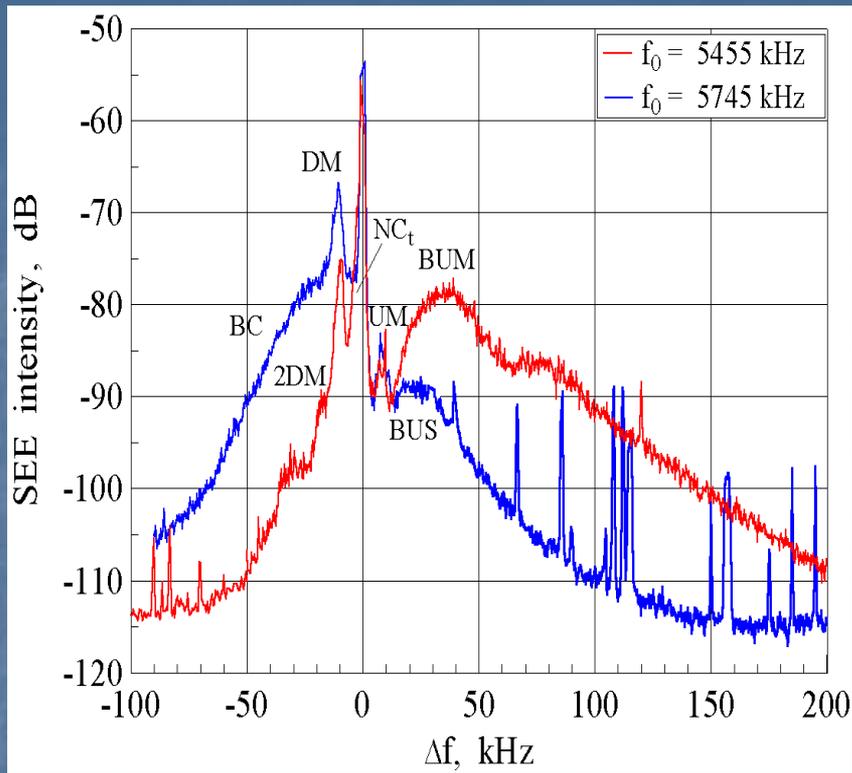
SEE related to ponderomotive parametric instability:



SEE spectrogram for first 200 ms of pumping. Black line shows the temporal evolution of PW reflected signal (PSA). $f_0 = 6778$ kHz $\approx 5f_{ce}$. Pump power ~ 180 MW.

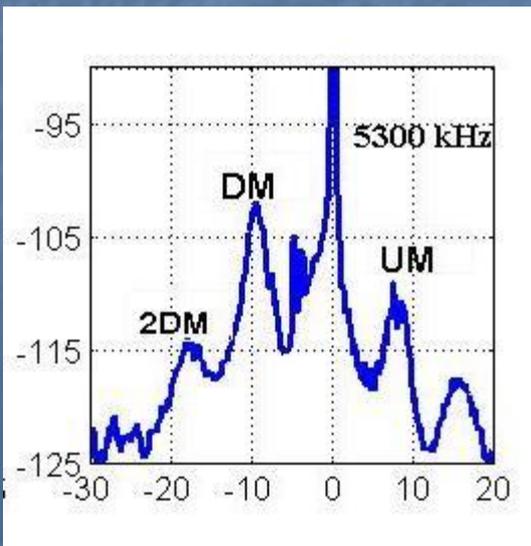


A succession of SEE spectra obtained at the different times after PW turn on.



4. Most prominent SEE spectral features for long pumping ("upper hybrid" features") related to the thermal parametric instability.

- Downshifted maximum (DM), is situated at the frequency shifts $\Delta f_{DM} < 0, |\Delta f_{DM}| > f_{LH}$, DM disappears at $f_{DM} \approx n f_c \approx f_{uh}$

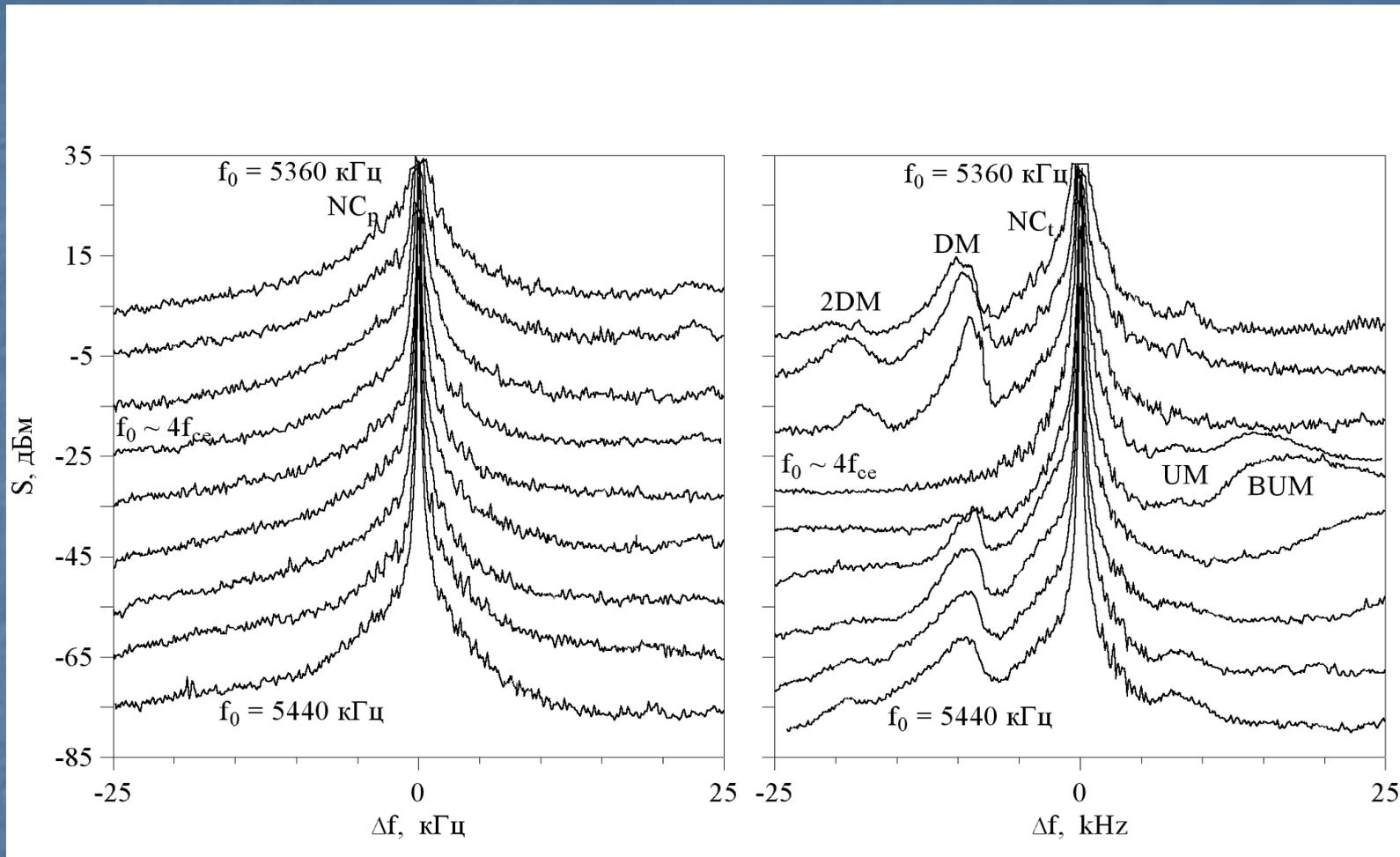


- Broad upshifted maximum (BUM), at

$$\Delta f_{BUM} \sim f_0 - n f_{ce} + \delta f \quad (1)$$

exists for $f_0 \geq n f_{ce}$

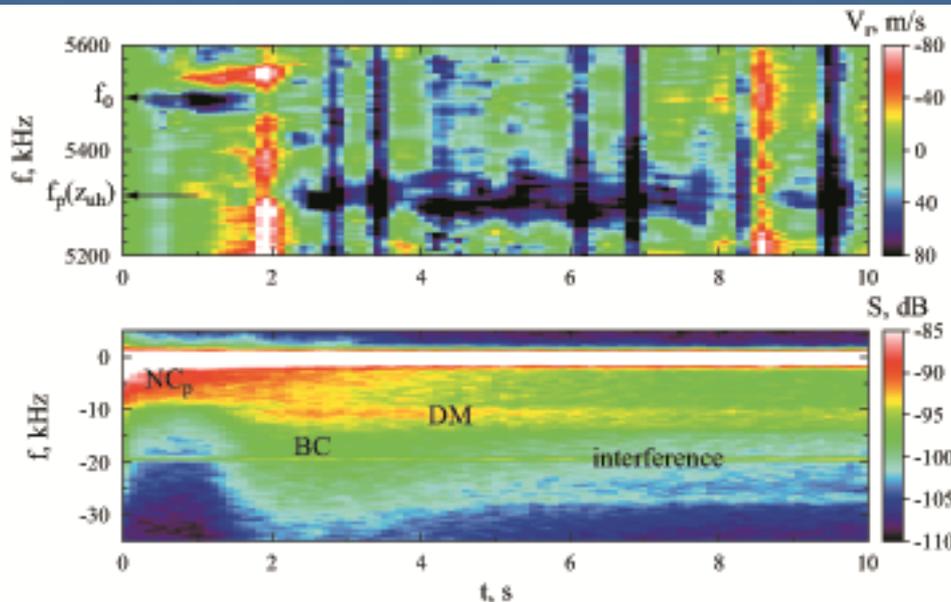
$\delta f = 15-20$ kHz



SEE spectra at the initial (“Langmuir”, left) and steady state (“Upper Hybrid”) stages) at $f_0 \sim 4f_c$ ($5360 \leq f_0 \leq 5440$ kHz). There is no dependence on f_0 on the left panel.

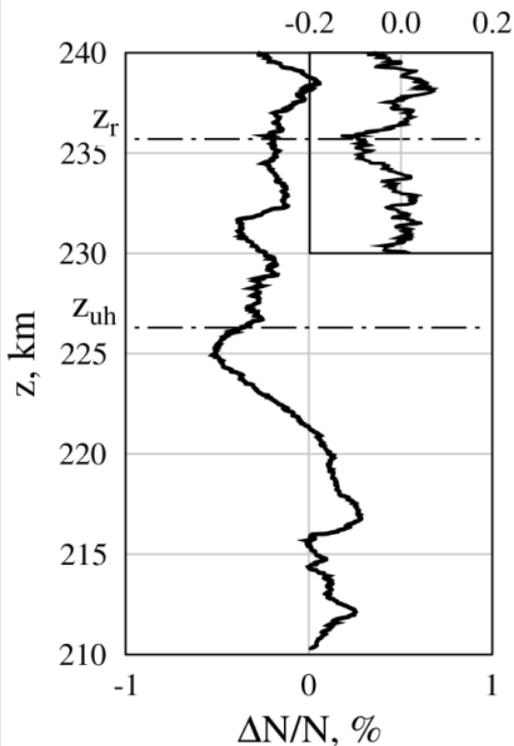
Следующий слайд: вытеснение плазмы из областей генерации плазменных волн (исследование с помощью многочастотного доплеровского зондирования) и параллельная динамика искусственного радиоизлучения

ионосферы Adopted from Sergeev, E. N., A. V. Shindin, S. M. Grach, G. M. Milikh, E. V. Mishin, P. A. Bernhardt, C. L. Siefring, S. J. Briczinski, and M. J. McCarrick (2016), Exploring HF-induced ionospheric turbulence by Doppler sounding and stimulated electromagnetic emissions at the High Frequency Active Auroral Research Program heating facility, *Radio Sci.*, 51, 1118–1130, doi:10.1002/2015RS005936.



Вверху: зависимость скорости движения точки отражения пробных волн V_r от времени после начала нагрева и частоты, $V_r > 0$ соответствует движению вниз.

Внизу: спектрограмма ИРИ для того же сеанса нагрева. Отмечены спектральные компоненты: NC, DM и BC.



Зависимость относительных вариаций электронной концентрации $[N_e(t) - N_e(0)] / N_e(0)$ от высоты в момент времени 2.4 с (правые верхние панели) и 30 с (основные панели) после начала нагрева. z_r и z_{uh} - высоты отражения и ВГР резонанса ВН.

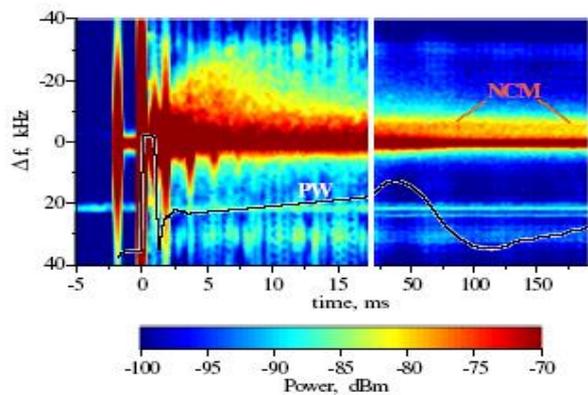
Видно, что NC_p развивается одновременно с вытеснением плазмы из области отражения ВН; DM и BC – одновременно с вытеснением плазмы из области ВГР волны накачки.

Следующие слайды: динамика спектров ИРИ, связанных

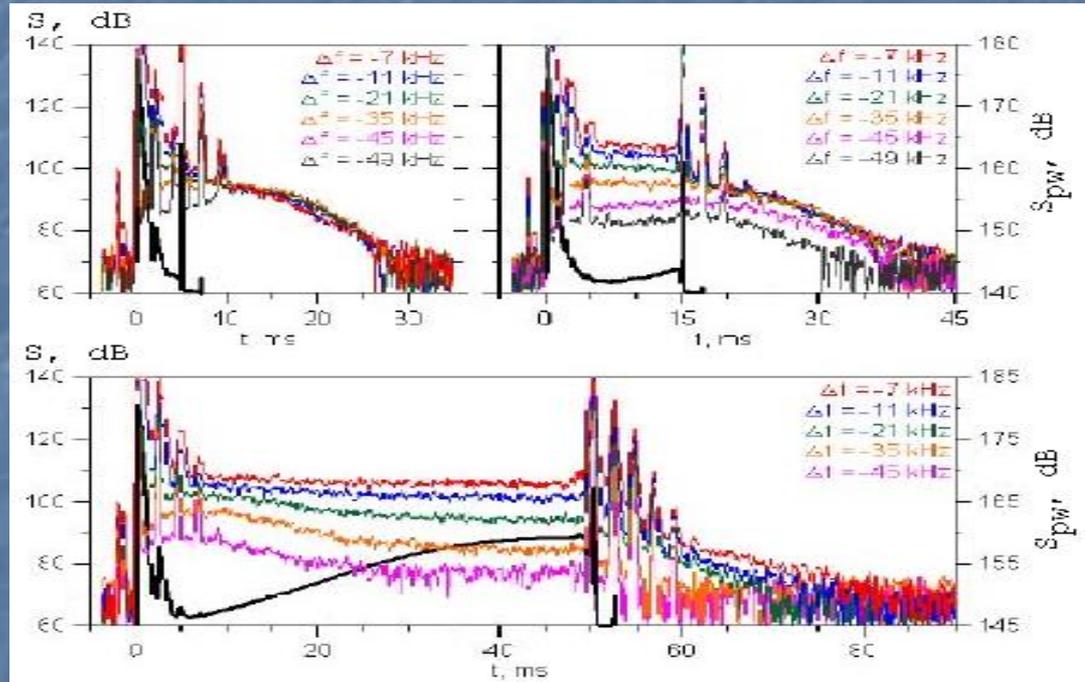
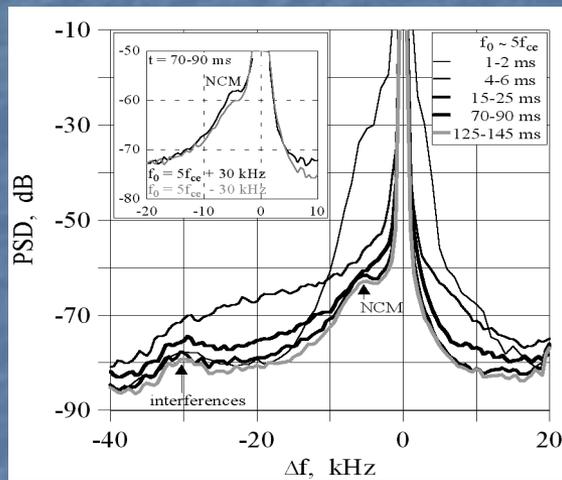
- со стрикционной параметрической неустойчивостью
- с тепловой параметрической неустойчивостью (мелкомасштабными магнитоориентированными неоднородностями, ММН)

Наблюдаемая динамика (расширение и перемещение спектра в область более низких частот) связана с перекачкой энергии плазменных волн по спектру.

SEE related to ponderomotive parametric instability:



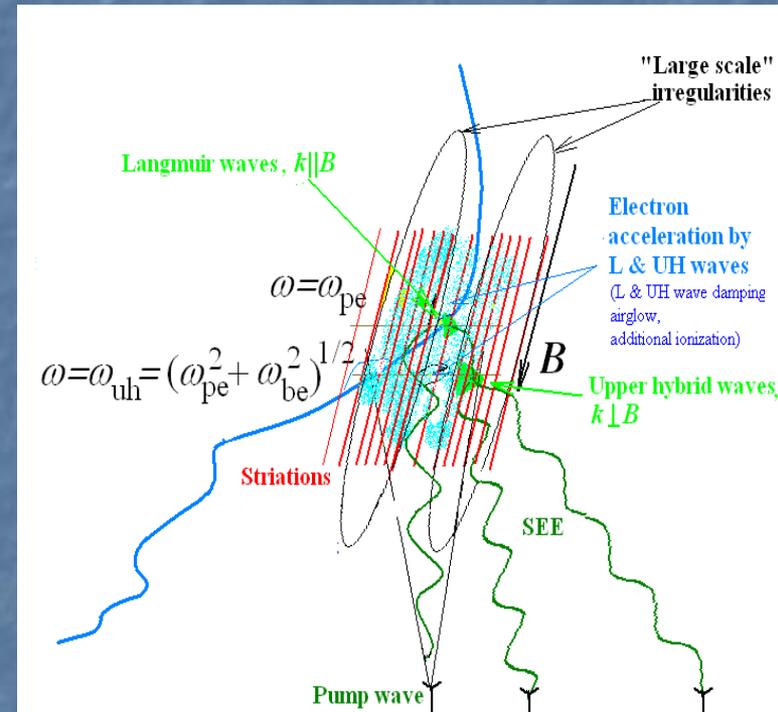
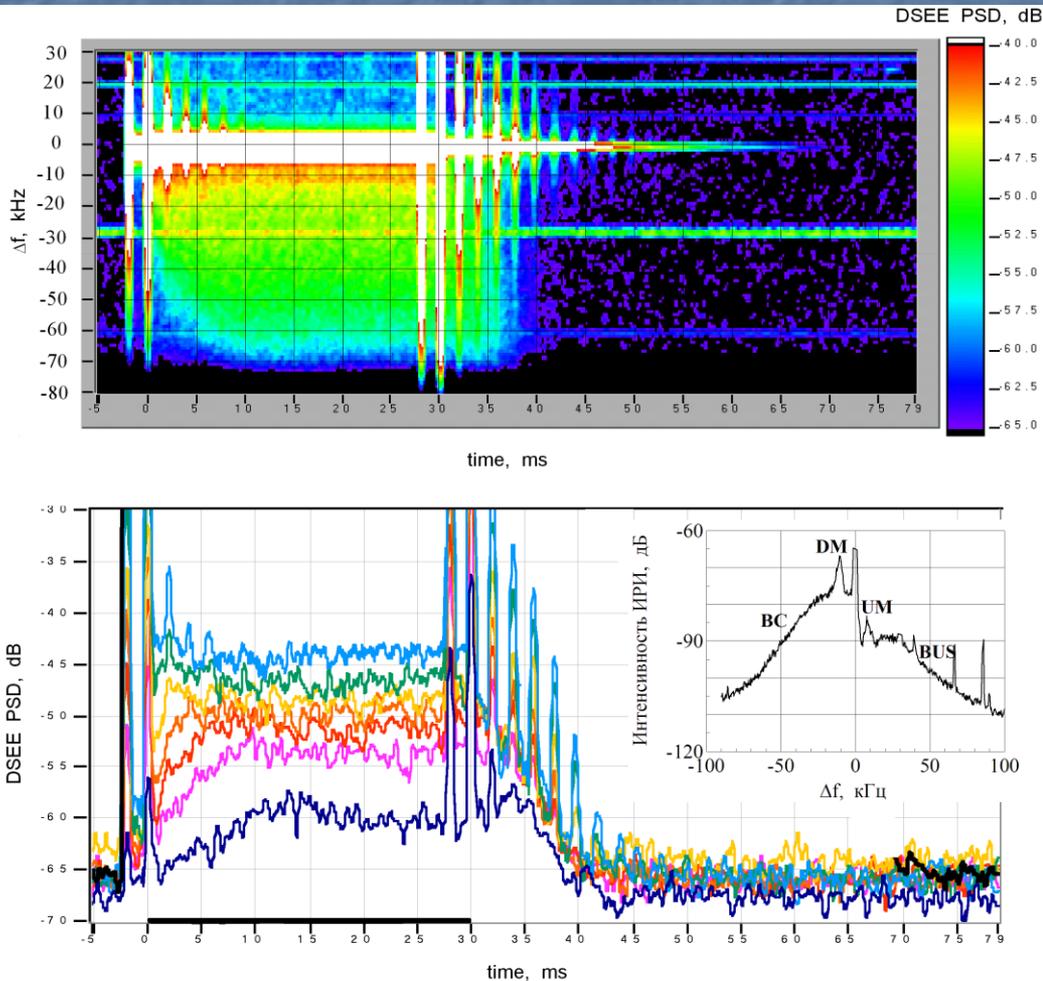
Спектрограмма ИРИ для первых 200 мс воздействия. Черная линия – осциллограмма отраженного сигнала волны накачки. $f_0 = 6778 \text{ kHz} \approx 5f_{ce}$. $P \sim 180 \text{ MW}$.



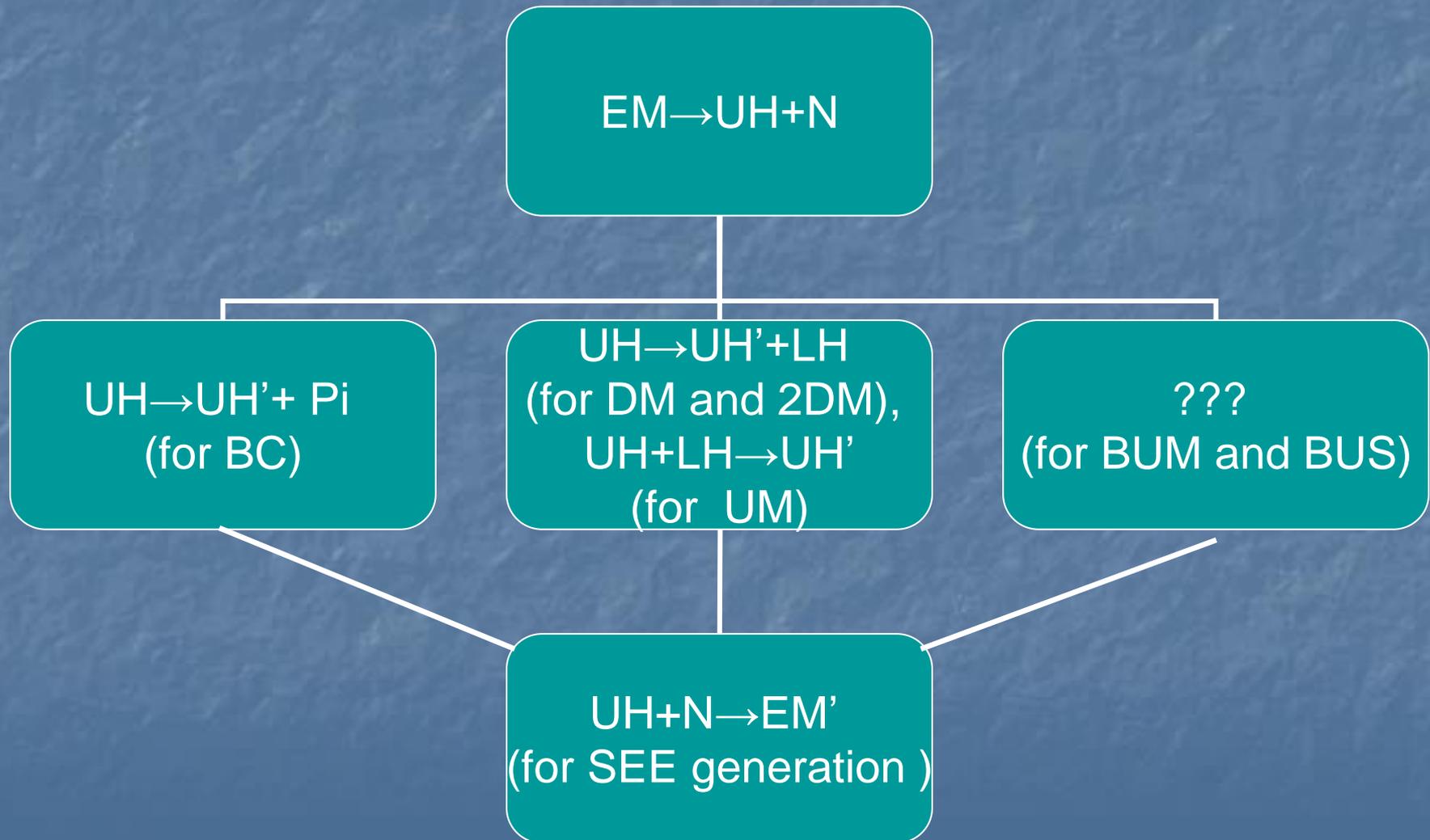
Последовательность спектров ИРИ после включения ВН.

Осциллограммы волны накачки (черные линии) и ИРИ на различных отстройках для длительностей импульса ВН 5, 15 и 50 мс. Стенд НААРР. $f_0 = 5420 \text{ кГц}$. $P \sim 1,8 \text{ ГВт}$.

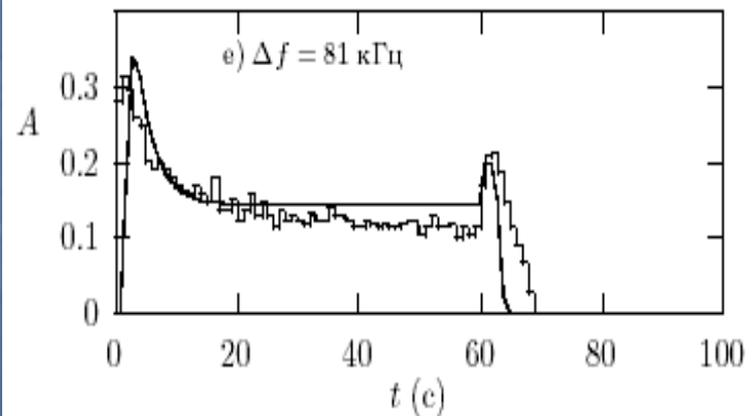
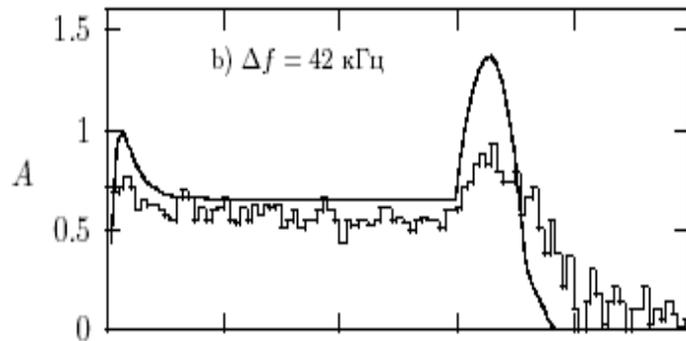
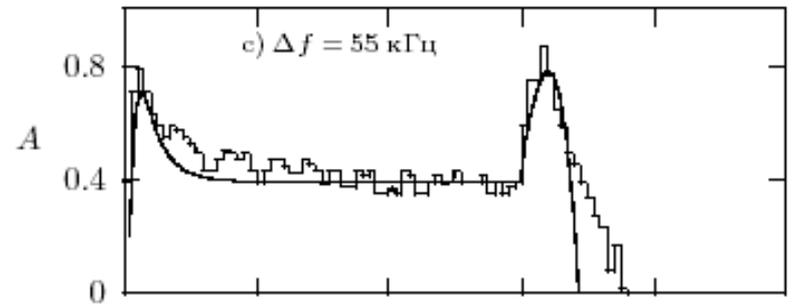
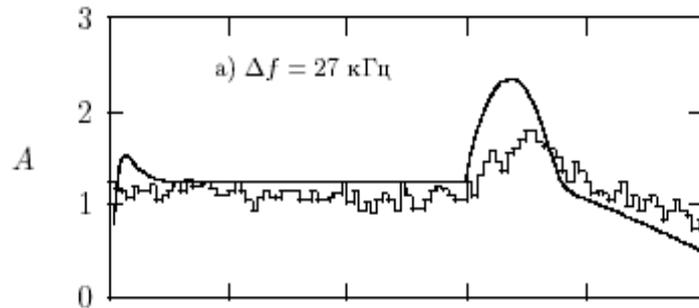
Генерация ИРИ импульсом диагностической волны с $f_{\text{ДВ}}=4740$ кГц длительностью 30 мс. ММН созданы волной накачки с $f_0=5650$ кГц
 Динамика ИРИ в импульсе определяется перекачкой энергии плазменных волн по спектру.



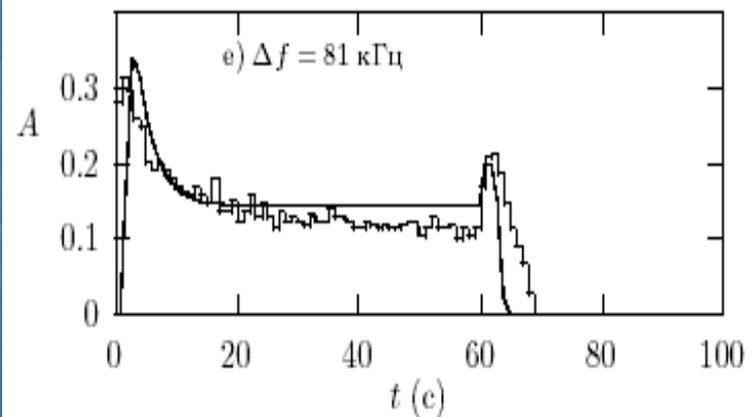
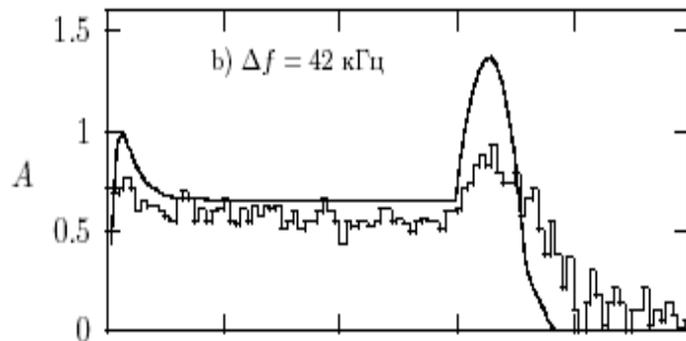
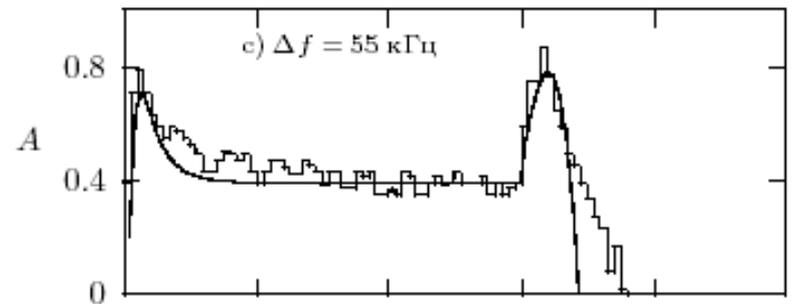
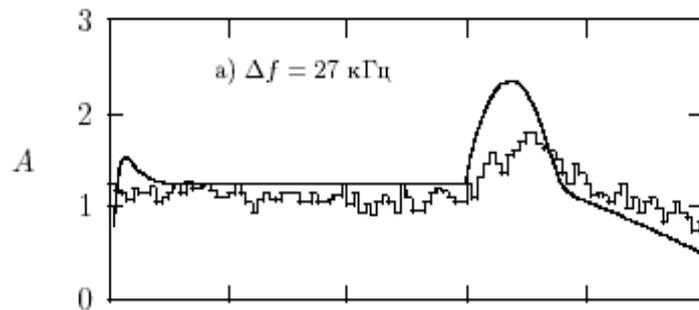
Механизм генерации ИРИ в области верхнего гибридного резонанса:



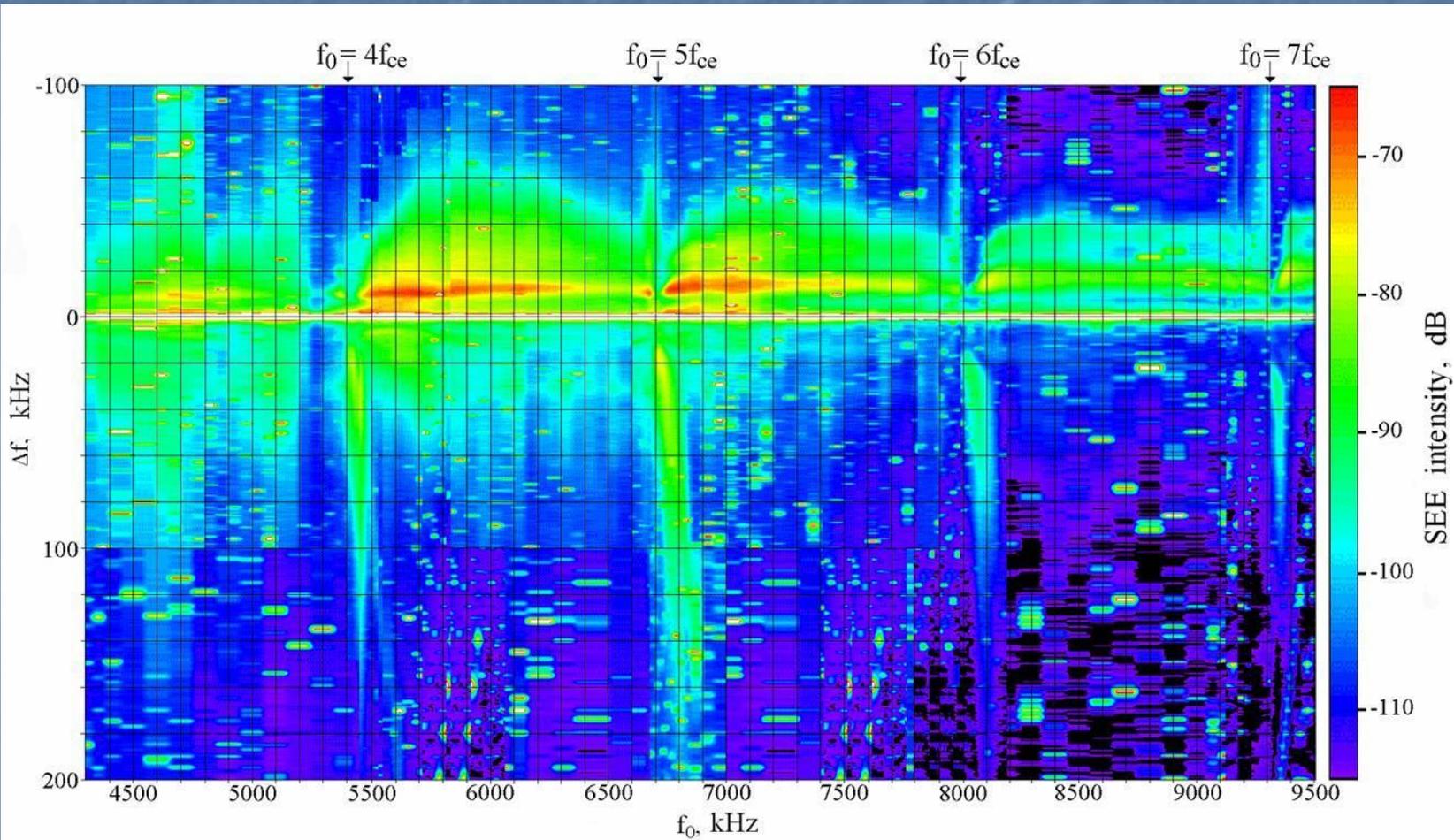
Результаты сопоставления временного хода амплитуды ИРИ (ВС-компоненты) на отстройках $|\Delta f| = 27, 42, 55, 81$ кГц. в эксперименте и в результате численного моделирования .



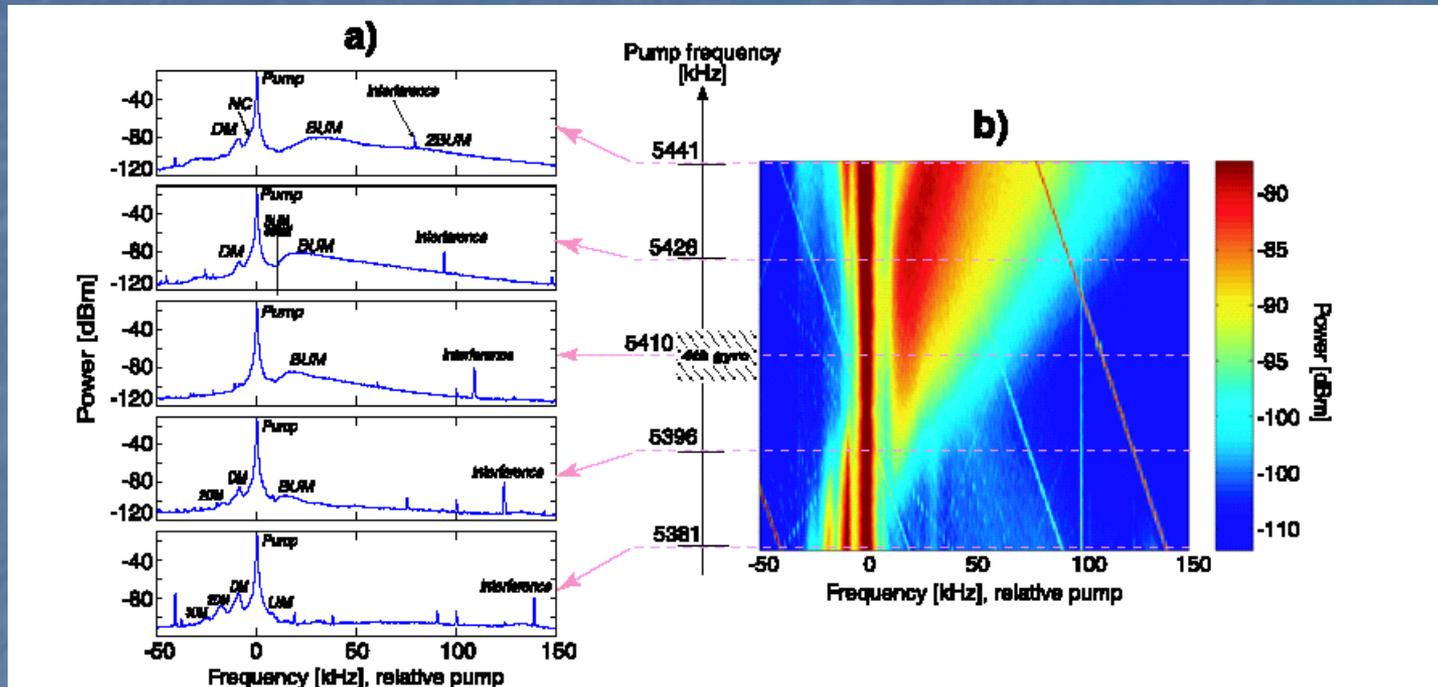
Результаты сопоставления временного хода амплитуд ИРИ (ВС-компоненты) на отстройках $|\Delta f| = 27, 42, 55, 81$ кГц. в эксперименте и в результате численного моделирования .



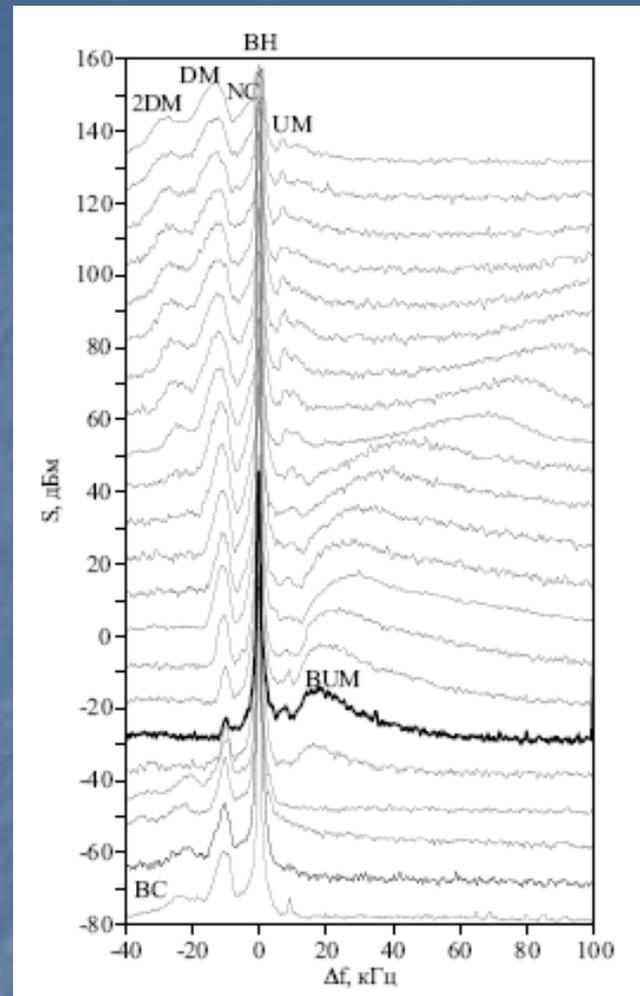
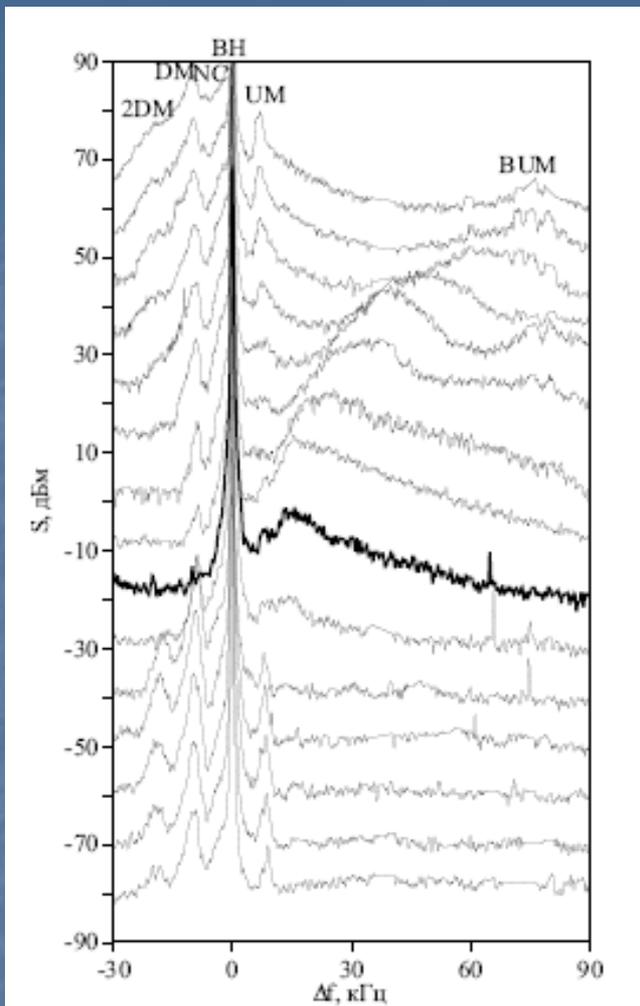
Dependence of the SEE spectra on the relation between f_0 and nf_{ce} . data collected during 1996 – 2000 at the SURA facility. Electron cyclotron harmonics (nf_{ce} , $n=4-7$) are shown on the top of the figure. $\Delta f = f_{SEE} - f$. (figure of Frolov et al., Geophys. Res. Lett., 2001, V. 28, N. 16, p. 3101-3104)



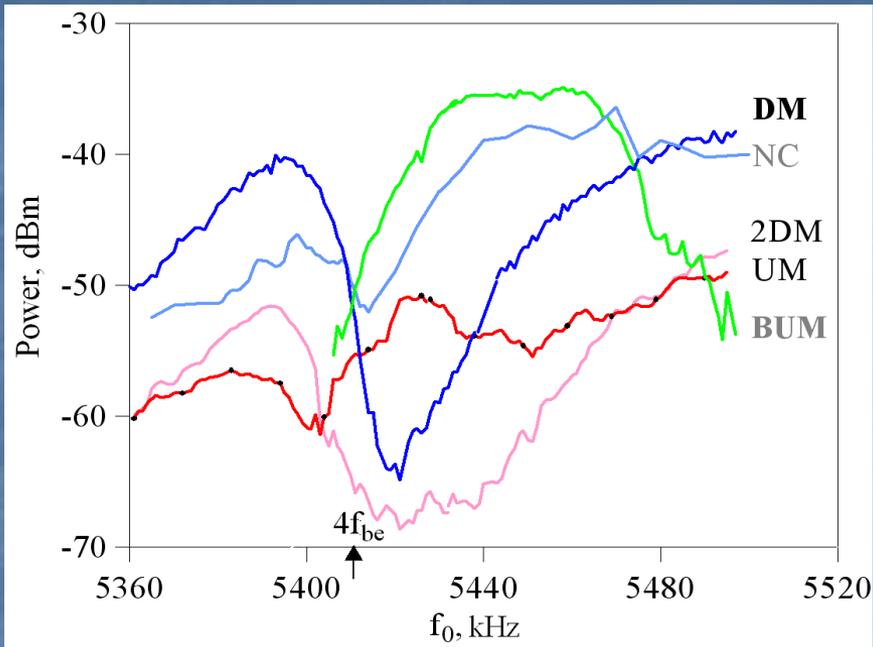
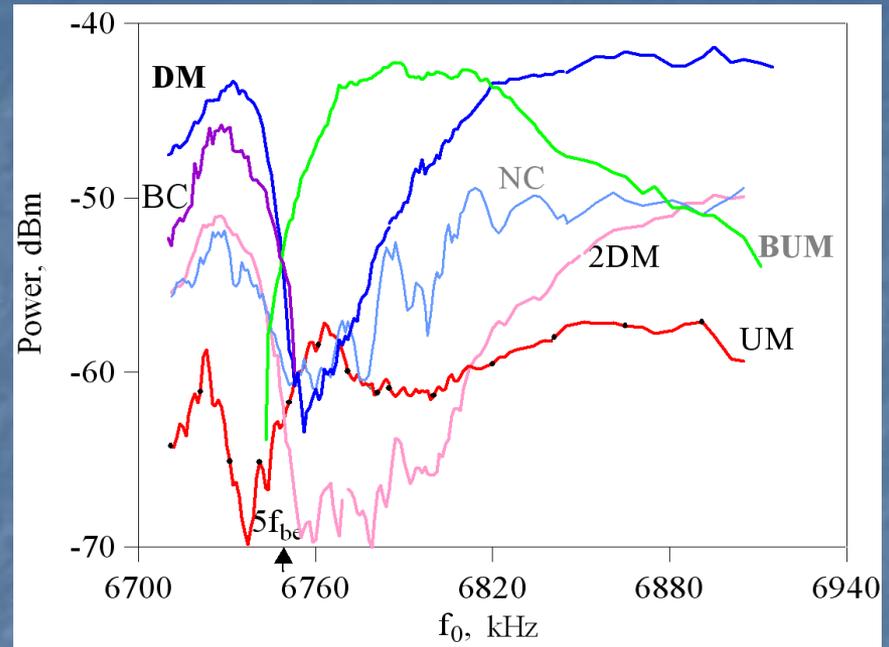
First experiments: SURA, September 1998, Carozzi et al., JGR, V. 107, NO. A9, 1253, doi:10.1029/2001JA005082, 2002 SURA, September 1998



Pump frequency sweep around 4th gyroharmonic. The stack of five plots showing SEE spectra for the five different pump frequencies marked on the vertical axis in the middle of the figure. The standard SEE spectral features and the pump are labeled. These spectra are cross sections of the pump relative spectra versus pump frequency two-dimensional plot in the panel b). The position of the cross sections are marked with dashed, magenta lines. The estimated range of the local fourth gyroharmonic is shown as a hatched region on on the pump frequency axis.



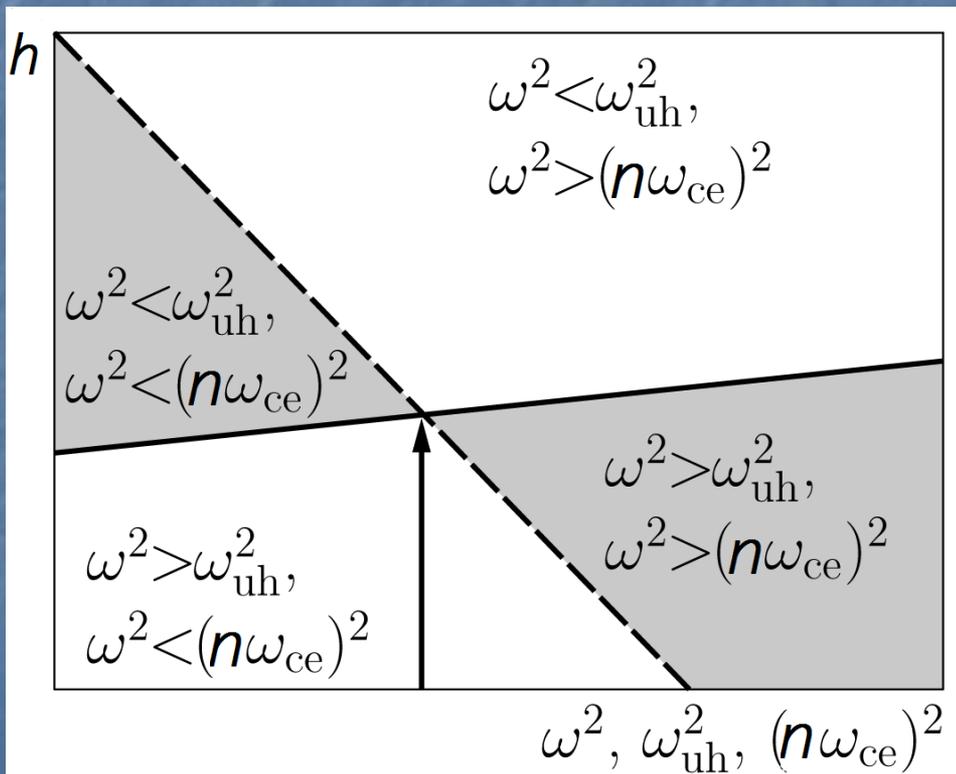
SEE spectra with pump wave frequency stepping by 10 kHz at f_0 sweeping near $4f_{ce}$, $5360 \leq f_0 \leq 5500$ kHz (19.05.2004, left), and near $5f_{ce}$, $6710 \leq f_0 \leq 6900$ kHz (15.09.2004, right). The spectra with f_0 near $4f_{ce}$ are shown by bold line. Each next spectrum is shifted by 10 dB along the ordinate axes for clarity.

$n=4$  $n=5$ 

At f_0 sweeping through nf_{be} ($n = 4, 5$) the SEE spectral features UM, NC_t , and DM achieve their minima successively for pump frequencies $f_{0UM} \approx f_{0min} - \Delta f_{UM} < f_{0NC} \approx f_{0min} - (2 - 3) \text{ kHz} < f_{0DM} \approx f_{0min} - \Delta f_{DM}$, but at the same their own frequencies coinciding with a pump frequency, at which total SEE intensity achieves a minimum value f_{0min} : $f_{0min} \approx f_{UM} \approx f_{NC} \approx f_{DM}$. $f_{0min} \approx nf_{be}$ ($z=z_d$), at the double resonance, where $f_d = nf_{be} = f_{UH} = (f_{pe}^2 + f_{be}^2)^{1/2}$

Приближенное дисперсионное уравнение поперечных плазменных волн в области двойного резонанса, где , $\omega_{uh}=n\omega_{ce}$

$$(\omega^2 - \omega_{\text{вг}}^2(k))(\omega^2 - n^2\omega_{\text{ce}}^2) = \frac{n^2(n^2 - 1)}{2^{n-1}n!} \omega_{\text{ce}}^2 \omega_{\text{pe}}^2 (k\rho_{\text{e}})^{2(n-1)},$$



Schematic plot clarifying the disappearance of HF plasma waves near the double resonance in the ionosphere.

Solid line: $\omega_{uh}^2(z)$, dashed line: $n\omega_{ce}^2(z)$, z is an altitude. Plasma waves can exist if $\omega > \omega_{uh}$ and $\omega > n\omega_{ce}$ or $\omega < \omega_{uh}$ and $\omega < n\omega_{ce}$. If $\omega = \omega_d = \omega_{uh}(z_d) = n\omega_{ce}(z_d)$, such conditions cannot be fulfilled.

9. Ускорение электронов до энергий $E \sim 30-50 \text{ eV}$ происходит при взаимодействии электронов с плазменными волнами (ленгмюровскими и/или верхнегибридными) на черенковском $\omega = kv$ или циклотронном ($\omega = n\omega_{ce} + k_{||}v_{||}$) резонансе.

Эффективное ускорение происходит, когда:

- плазменные волны достаточно интенсивны;
- они занимают достаточно большую область высот (иначе электроны покидают область ускорения, не успев набрать энергию)
- они должны быть распределены в k -пространстве квазиизотропно (тогда электроны «запутываются» в плазменных волнах и время их жизни в ускоряющем слое увеличивается).

Следствия ускорения электронов:

9. Генерация искусственного оптического свечения, точнее влияние излучения волны накачки на яркость оптического свечения ночного неба.

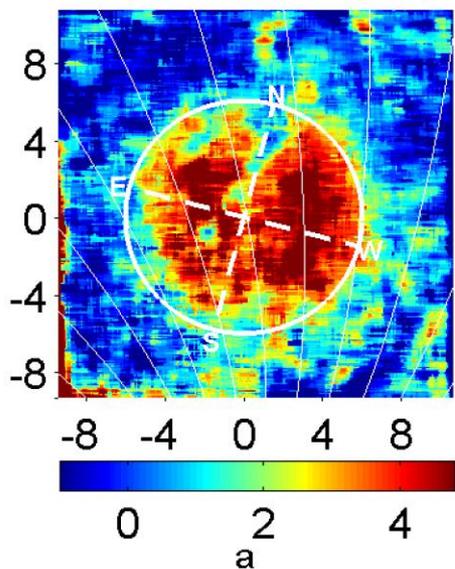
10. Дополнительная ионизация ионосферной плазмы.

Оптическое свечение ионосферы в красной линии с длиной волны $\lambda=630$ нм связано с излучением возбужденных атомов кислорода $O(^1D)$. Возбужденные атомы возникают в результате двух причин: а) диссоциативной рекомбинации с участием электронов и ионов молекулярного кислорода и б) возбуждения атомов кислорода, находящихся в основном состоянии, при столкновениях с (ускоренными) электронами с энергией большей, чем энергия возбуждения уровня $O(^1D)$ ($\varepsilon > I = 1,96$ эВ). Поэтому нагрев электронов при воздействии мощных радиоволн на F-слой ионосферы оказывает двойное влияние на яркость свечения. Уменьшение коэффициента рекомбинации с ростом температуры приводит к уменьшению концентрации возбужденных атомов $[O(^1D)]$ и, соответственно, уменьшению яркости, тогда как увеличение числа электронов с $\varepsilon > I$ при нагреве (ускорении) – к увеличению $[O(^1D)]$ и яркости свечения. Оптическое свечение при возбуждении ионосферных атомов и ионов ускоренными электронами наблюдалось также в линиях $O(^1D)$ ($\lambda=557,7$ нм, $I=4,17$ эВ, зеленая линия атомарного кислорода), $N_2^+(B_2\Sigma_u^+)$ ($\lambda=427,8$ нм, $I \approx 19$ эВ, синяя линия иона молекулярного азота). Последнее свидетельствует об ионизации молекулярного азота при воздействии.

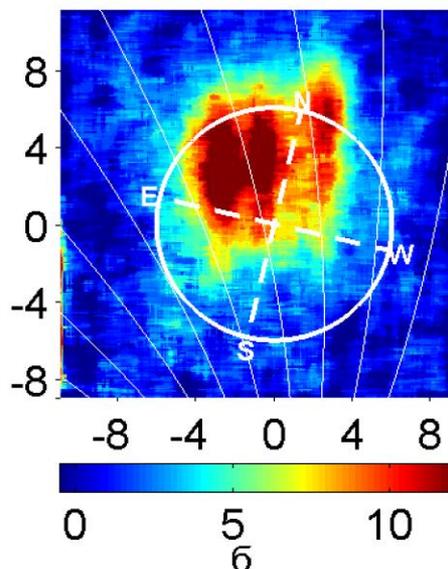
Некоторые эффекты, наблюдающиеся в красной линии атомарного кислорода

Крупномасштабные структуры, вытянутые вдоль геомагнитного поля (вертикальное воздействие)

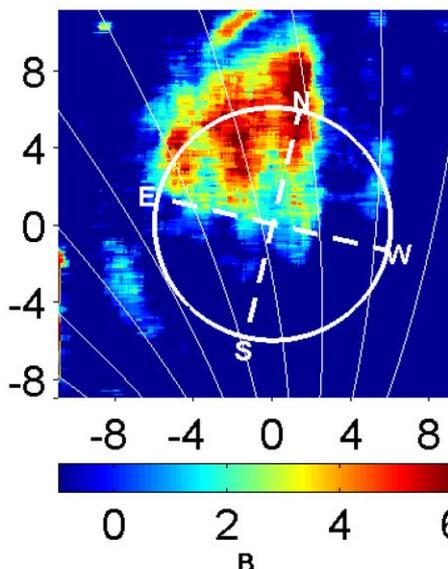
22:26:45, 05.09.10



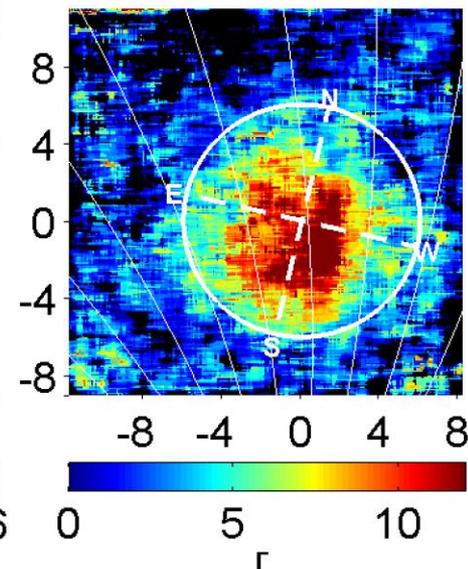
21:44:45, 03.09.10



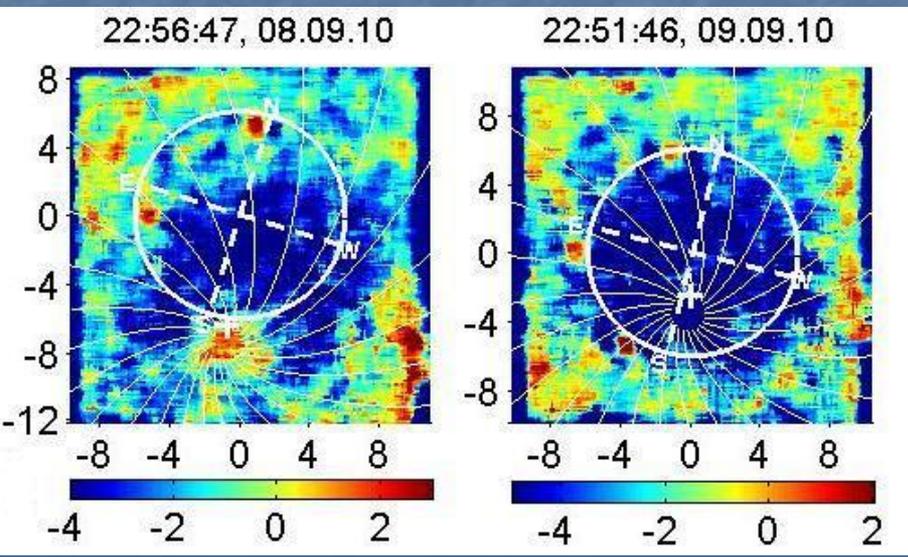
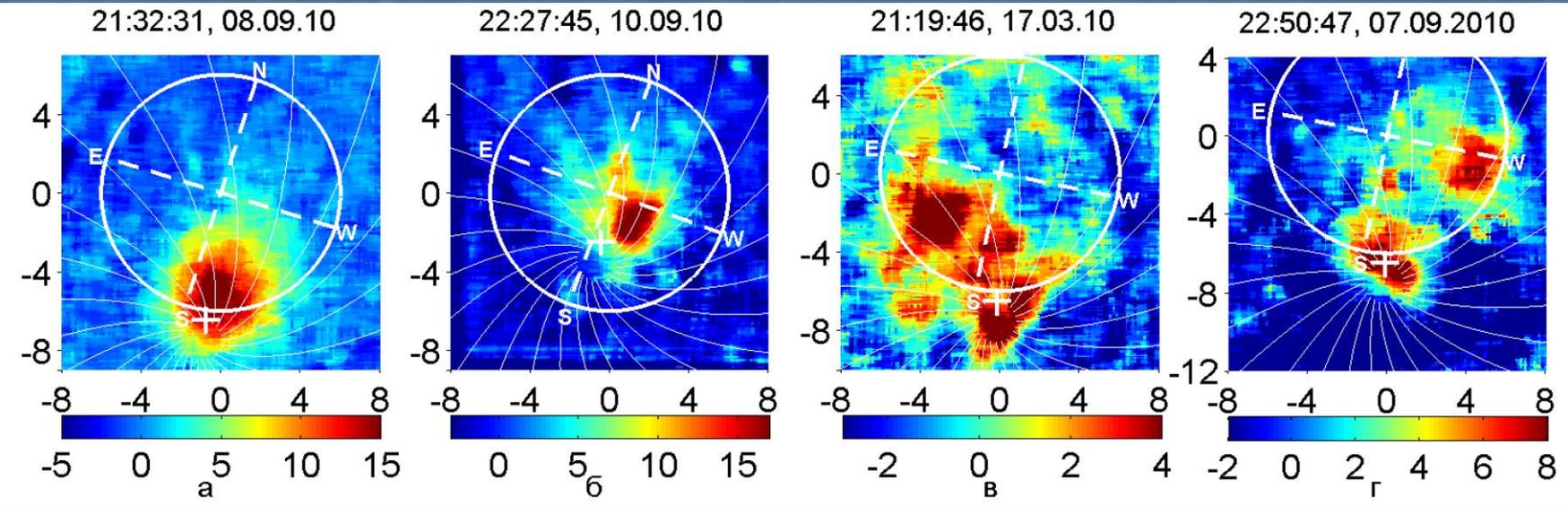
21:50:45, 03.09.10



19:50:49, 15.03.10

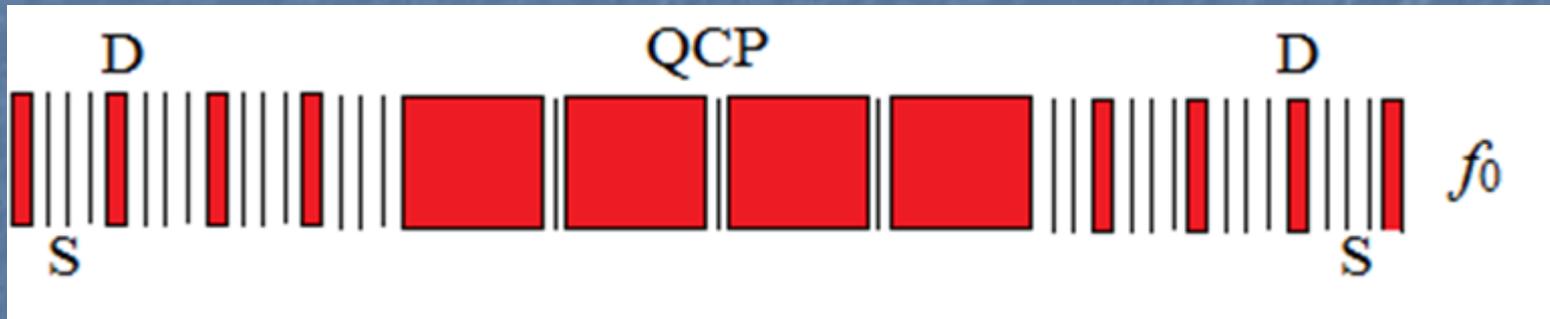


Эффект магнитного зенита. Наклонное воздействие, на 12° и 16° к югу (к направлению магнитного поля).

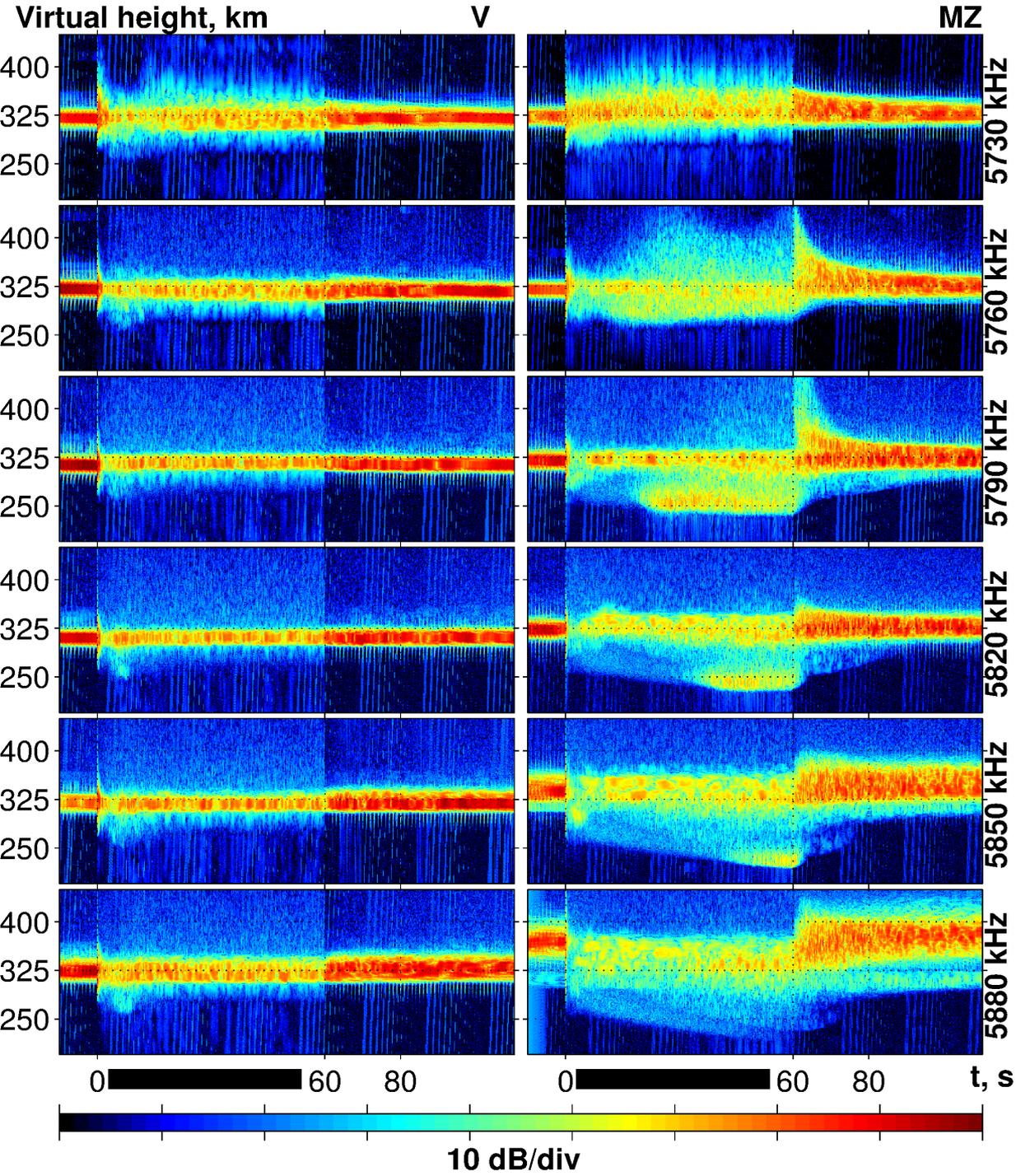


Подавление яркости фонового вследствие температурной зависимости коэффициента диссоциативной рекомбинации.

Additional ionization (artificial ionospheric layers) at the HAARP facility

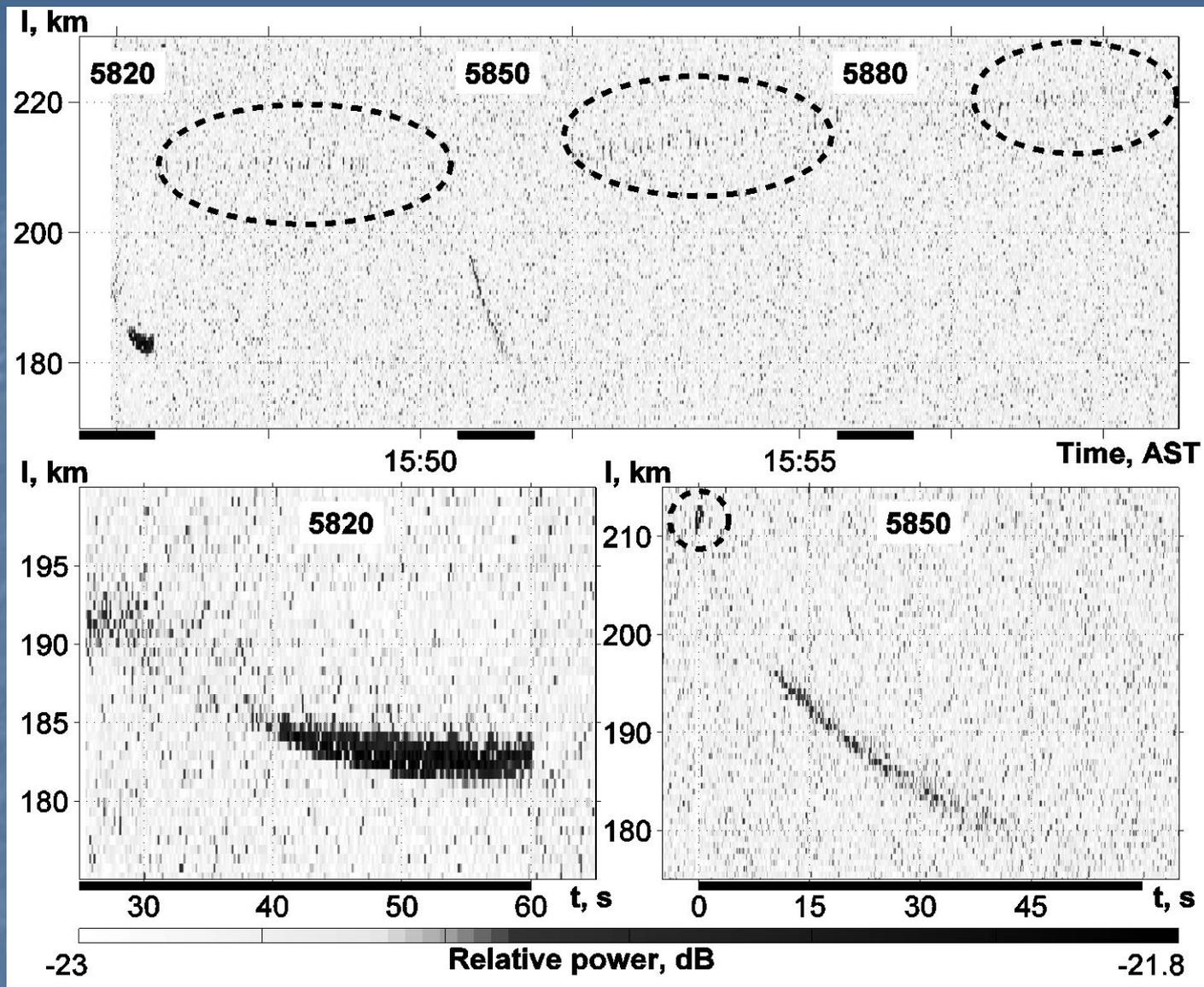


Low duty cycle (D): $\tau_1 = 20$ ms, $IPP_1 = 1$ s
High duty cycle (QCP): $\tau_1 = 160$ ms, $IPP_1 = 200$ ms
Sounding wave (S) $\tau_2 = 100$ μ s, $IPP_2 = 200$ ms, $\tau_{\text{delay}} = 180$ ms

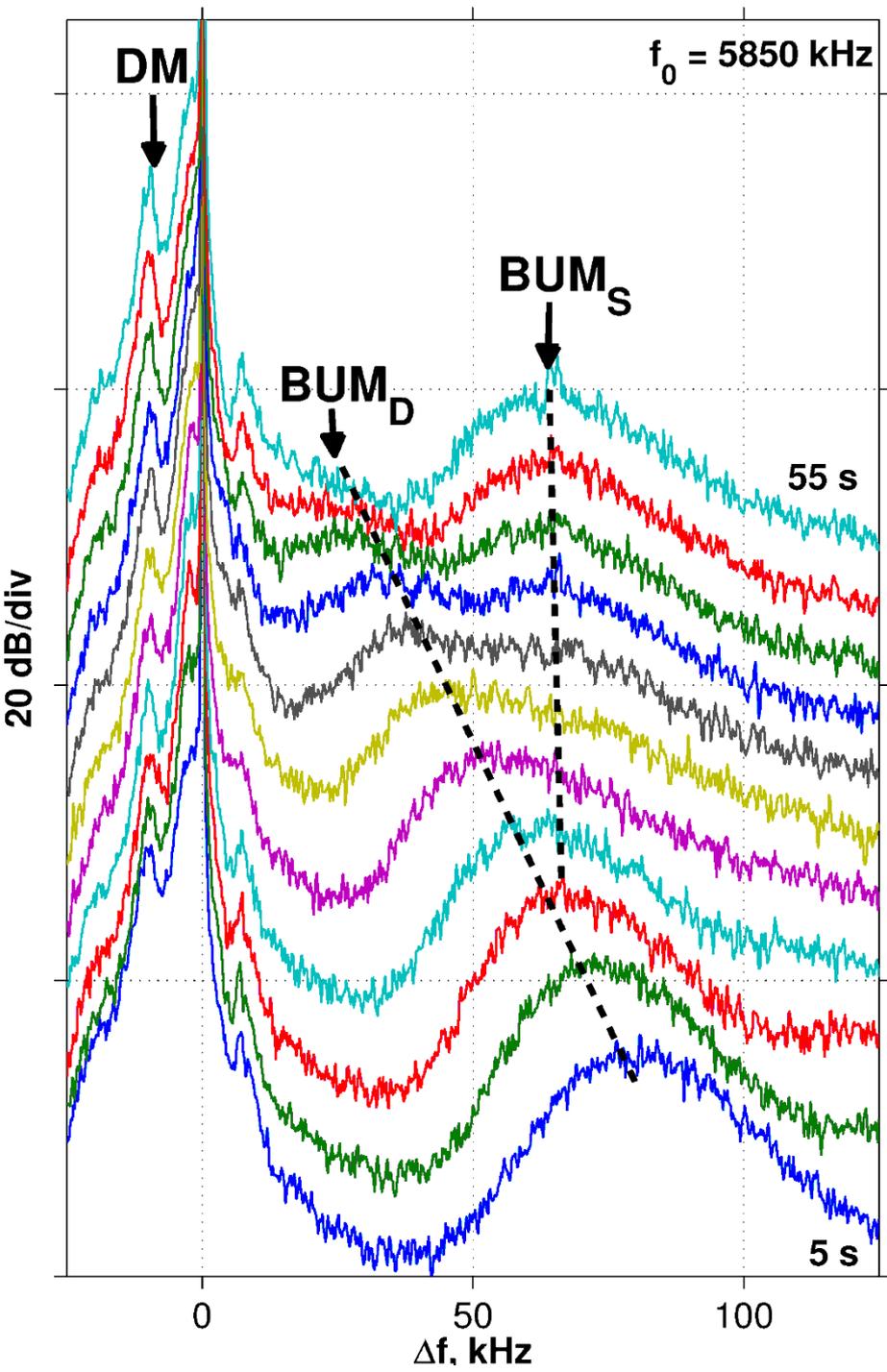


28.03.2011,
 $P_{ef} = 1,8$ ГВ

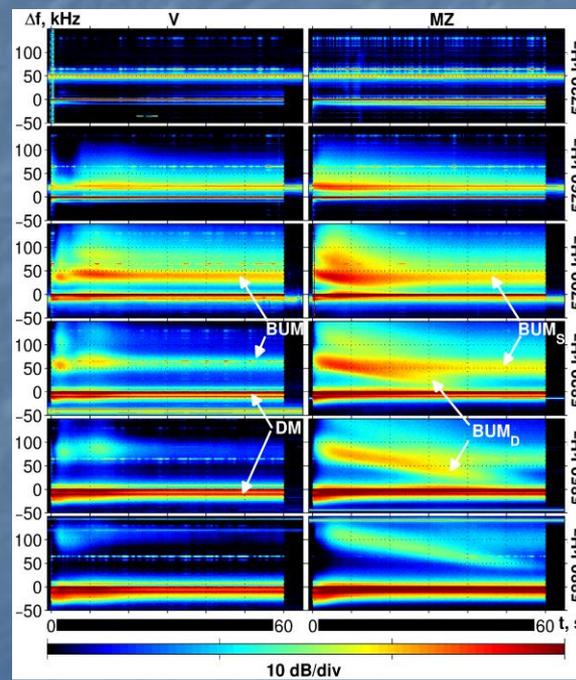
Действующие
 высоты отражения
 диагностических
 (S) 100 мкс
 импульсов при
 вертикальном и
 наклонном (в
 магнитный зенит)
 воздействии.



Интенсивность плазменной линии радара MUIR в зависимости от расстояния $l = h/\cos(14.2^\circ)$ во время эксперимента 28.03.11



Последовательность спектров ИРИ в течение 1 минуты квазинепрерывного воздействия в магнитный зенит при $f_0=5850$ кГц.



5730 kHz

5760 kHz

5790 kHz

5820 kHz

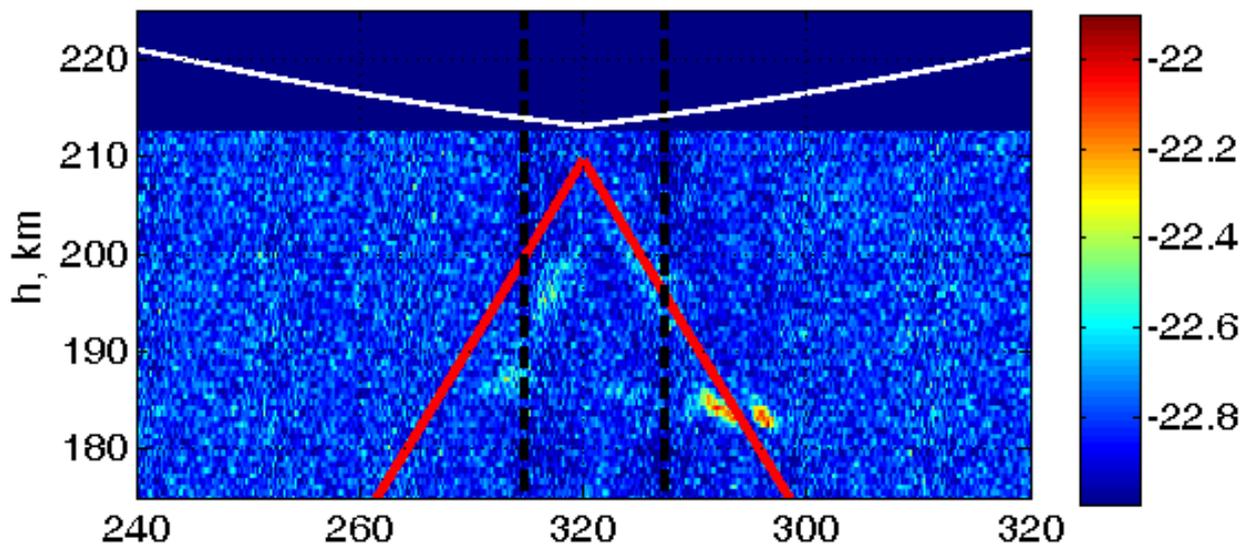
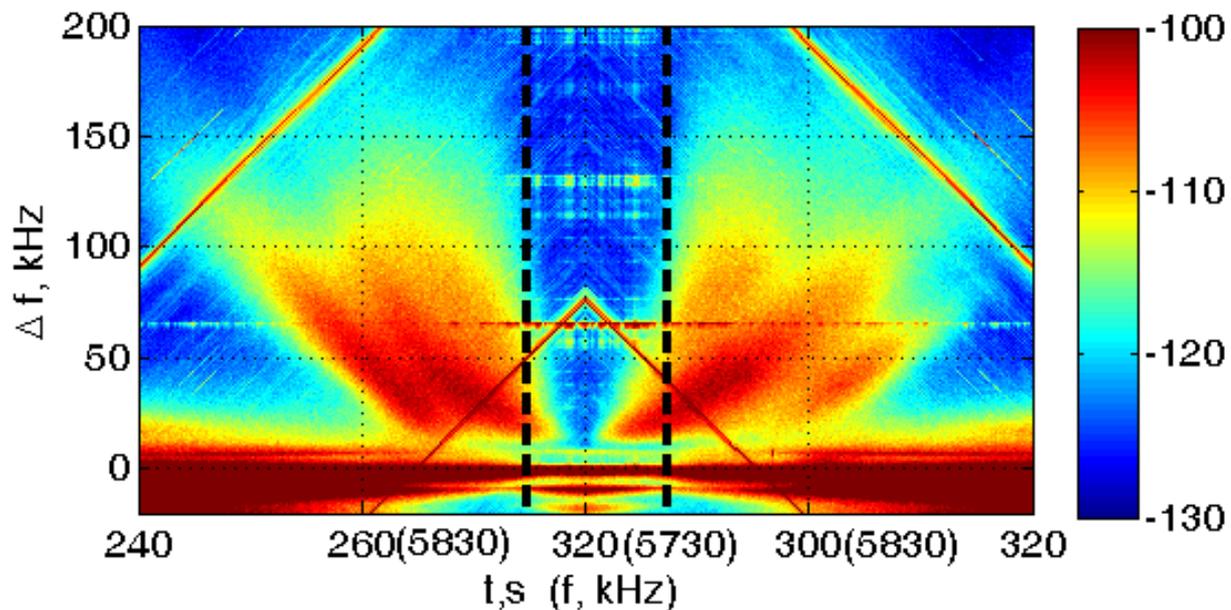
5850 kHz

5880 kHz

$$\Delta f_{\text{BUM}_p} \approx f_0 - n f_{\text{ce}}(h) + \delta f_i$$

1. Все три эффекта: приближение BUM к волне накачки, снижение действующей высоты отражения и «высоты плазменной линии» происходят одновременно!
2. Спускающийся слой искусственной ионизации возникает только при $f_0 > nf_c$ при воздействии в магнитный зенит!
3. «Остановка» слоя искусственной ионизации происходит при $f_0 \approx 4f_c$, или, согласно теоретическим представлениям, при

$$f_0 \approx 4f_c(h_d) \approx f_{uh}(h_d) = (f_p^2 + f_c^2)^{1/2}$$



Быстрое (5 кГц/с)
пошаговое
изменение
(сви́пирование)
частоты ВН в
диапазоне
5930→5730→5930
кГц.

Верхняя панель:
спектрограмма
ИРИ, нижняя
панель: высотно-
временной ход
сигнала ПЛ. Белая
линия: $f_0 = f_p(h)$,
красная линия:
 $f_0 = 4f_c(h)$, черный
пунктир: частота
ВН, при которой
минимальна
интенсивность DM.



А.В. Шиндин,
Е. Н. Сергеев,
С. М. Грач,
И. А. Насыров,
А.Б. Белецкий



В.В. Клименко



Е. Н. Сергеев,
С.М. Грач,
Е.В.Мишин

Более подробно с материалом лекции можно ознакомиться в обзоре С.М. Грач, Е.Н. Сергеев, Е.В. Мишин, А.В. Шиндин «Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения» , УФН, **186**, 1189–1228 (2016)»

Спасибо за внимание!