

- **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН
С ПЛАЗМОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ
(ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ)**

С. М. Грач

Нижегородский государственный университет им. Н.И.
Лобачевского



International heating/radar team:

E. N. Sergeev, A V. Shindin, P. A. Bernhardt, C. Sieftring, E. V. Mishin, G. M. Milikh, M. J. Mc-Carrick, B. Watkins, E. Nossa, M. Sulzer, I. Haggstrom, E. Varberg, J. Vierinen, A.B. Beletsky, I.A. Nasyrov, D.A. Kogogin, I. D. Tkachev, V. R. Khashev, Yu. K. Legostaeva, K. K. Grekhneva, V. A. Pavlova, N.A. Pogorelko

**Памяти Евгения Николаевича Сергеева
(27.01.1963 – 17.02.2022)**



$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j} + \mathbf{j}_0),$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi(\rho + \rho_0),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_0,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi \rho_0,$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

$$j_i(\omega, \mathbf{k}) = \sigma_{ij}(\omega, \mathbf{k}) E_j(\omega, \mathbf{k}),$$

$$D_i(\omega, \mathbf{k}) = \varepsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}) E_j(\omega, \mathbf{k}),$$

Нелинейные эффекты: при достаточно сильном воздействии проводимость и диэлектрическая проницаемость зависят от электрического (например) поля, и в уравнениях Максвелла появляются нелинейности.

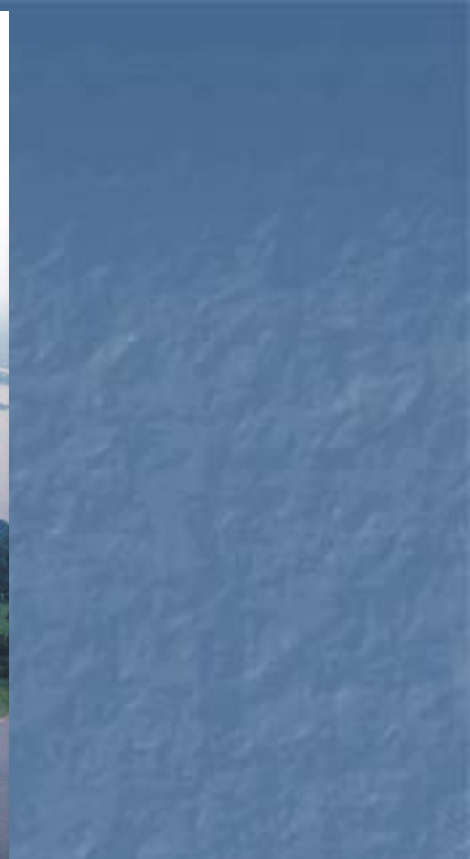
$$j_i(\omega, \mathbf{k}) = \sigma_{ij}(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{E}) E_j(\omega, \mathbf{k})$$

$$D_i(\omega, \mathbf{k}) = \varepsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{E}) E_j(\omega, \mathbf{k})$$

В результате нелинейных эффектов возбуждается искусственная ионосферная турбулентность (ИИТ).

Специализированные установки (нагревные стенды) предназначенные для исследования нелинейных явлений в ионосферной плазме

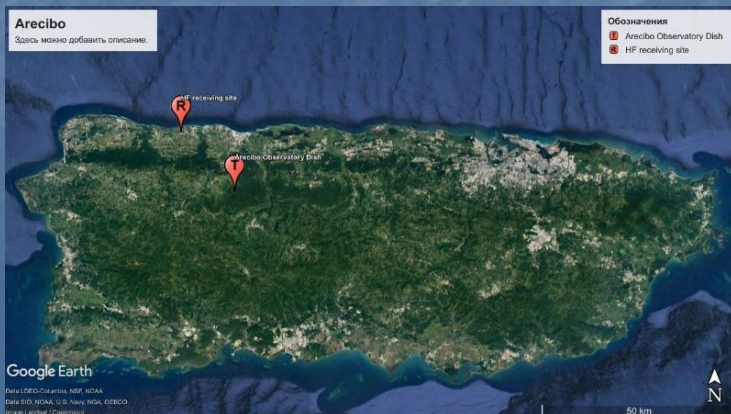
Heating facility	Frequency range (MHz)	ERP(MW)	GM field inclination
«Сура»	4.3 – 9.5	150 – 270	71.5°
EISCAT	4.0 – 8.0	300 (4.0 – 5.4 MHz) 1200 (5.4 – 8.0 MHz)	78°
HAARP	2.8 – 10.0	400-3600	74°
Arecibo	5.1, 8.0	<150	45 °



Стенд СУРА



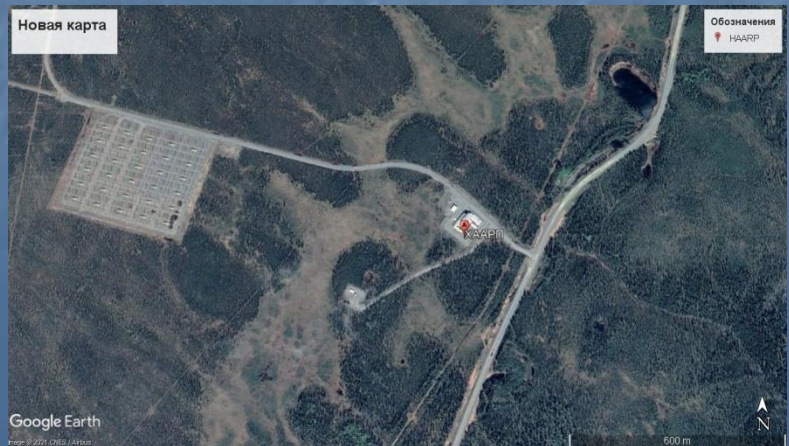
Аресибо



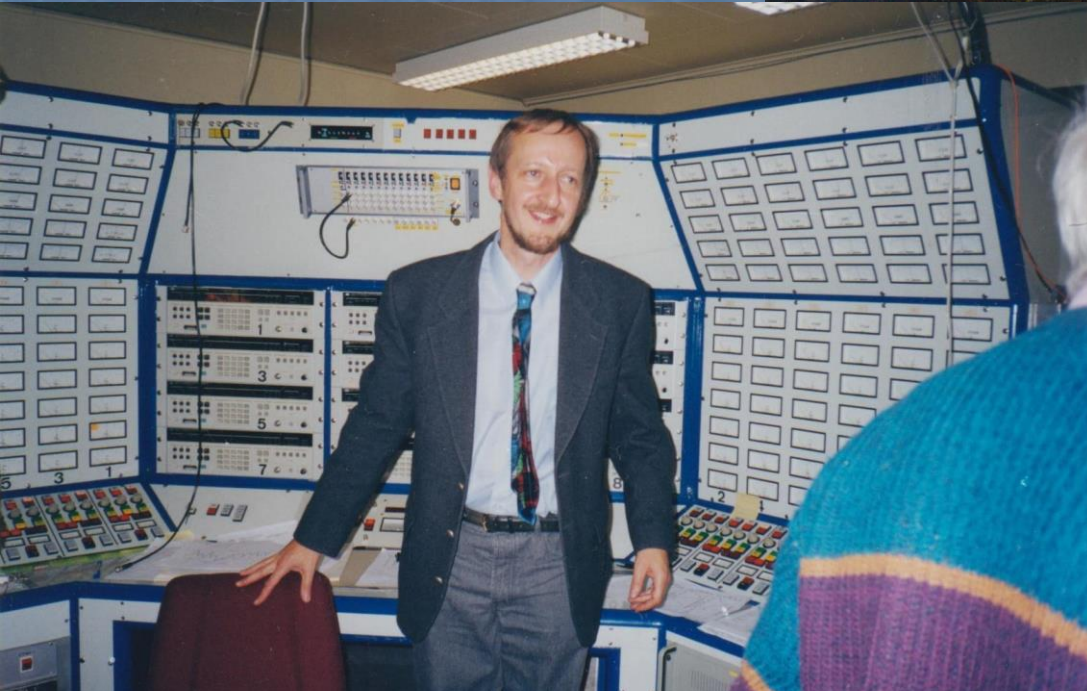
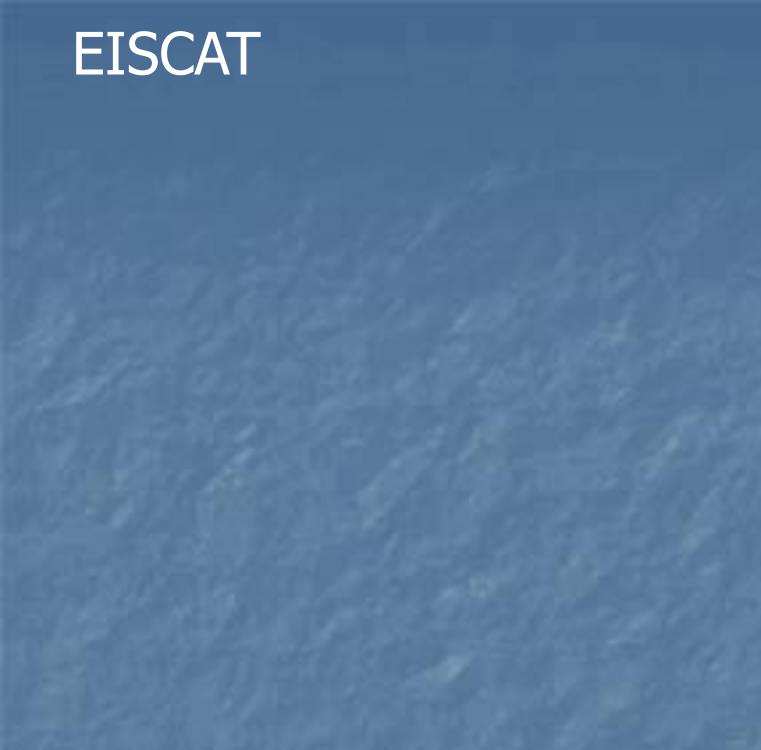


Лабораторный корпус
НААРП (из окна
автомобиля)

Фрагмент антенной системы
стенда НААРП

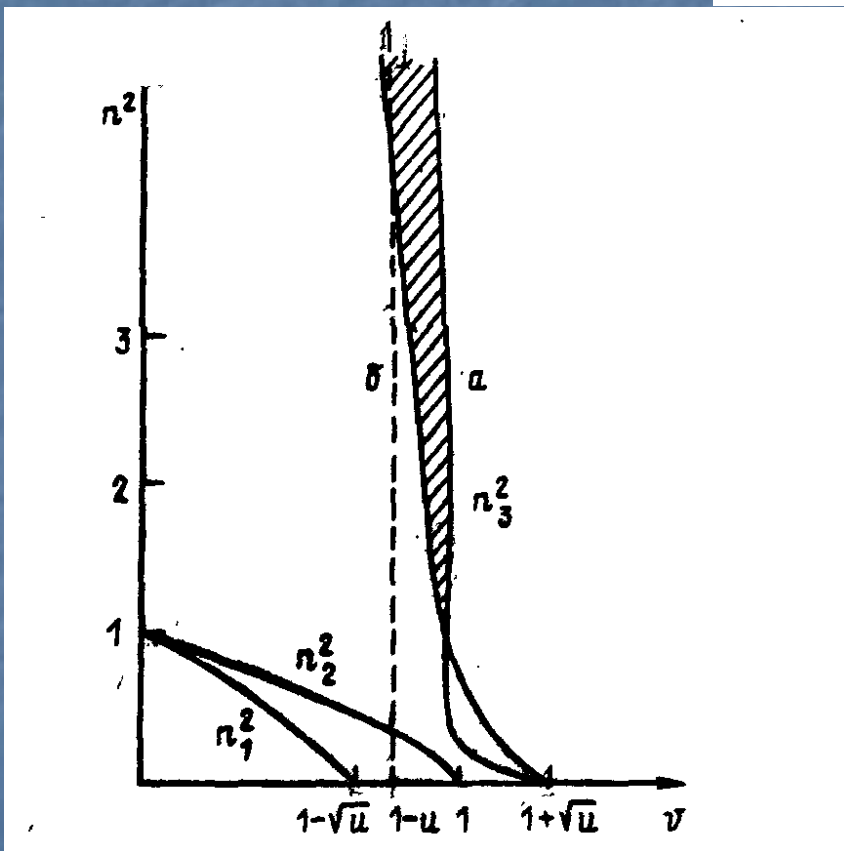


EISCAT



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

Вблизи точки отражения $v = 1$

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

Вблизи верхнего гибридного резонанса

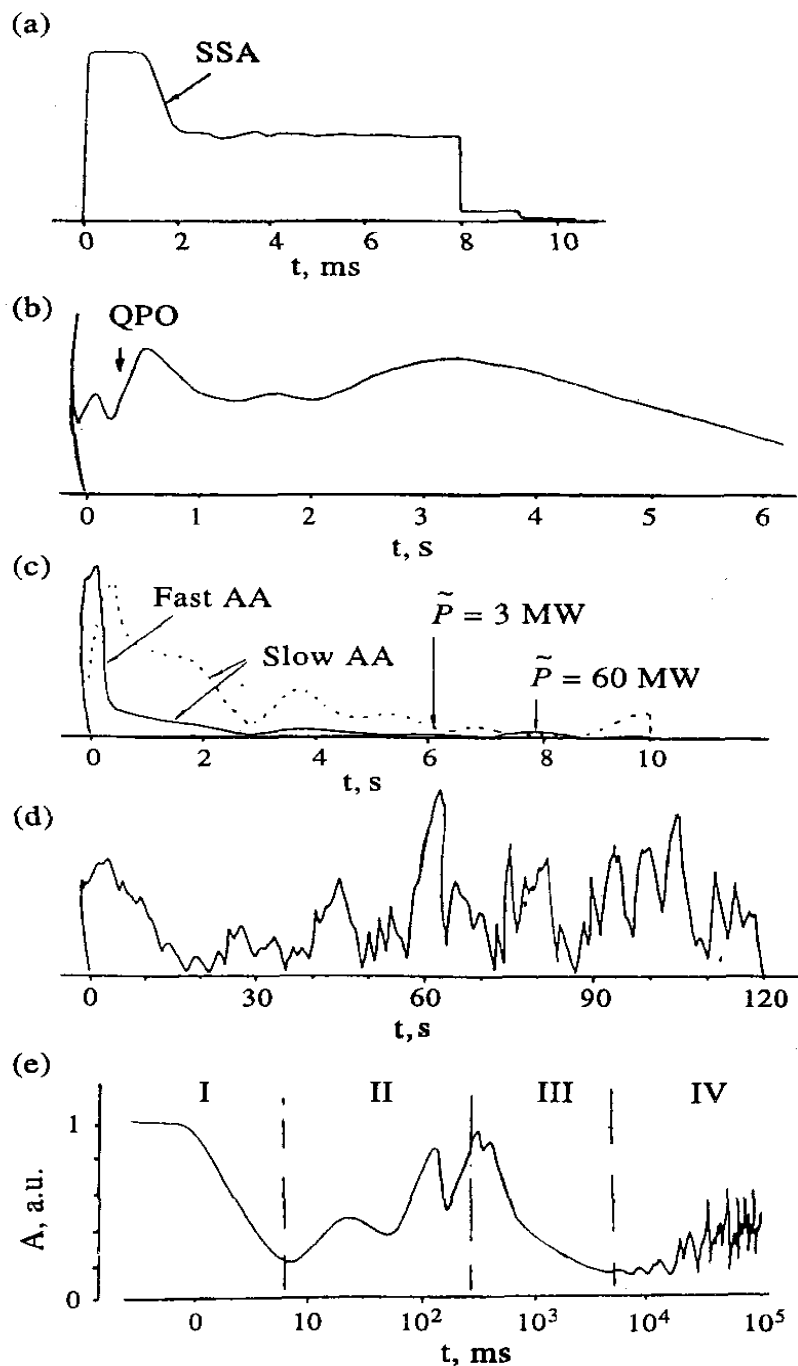
$$\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{B}_0$$

$$v = 1 - u$$

Частота плазменных волн:

$$\omega_{\text{гол}}^2 \approx \omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2 \sin^2 \theta$$

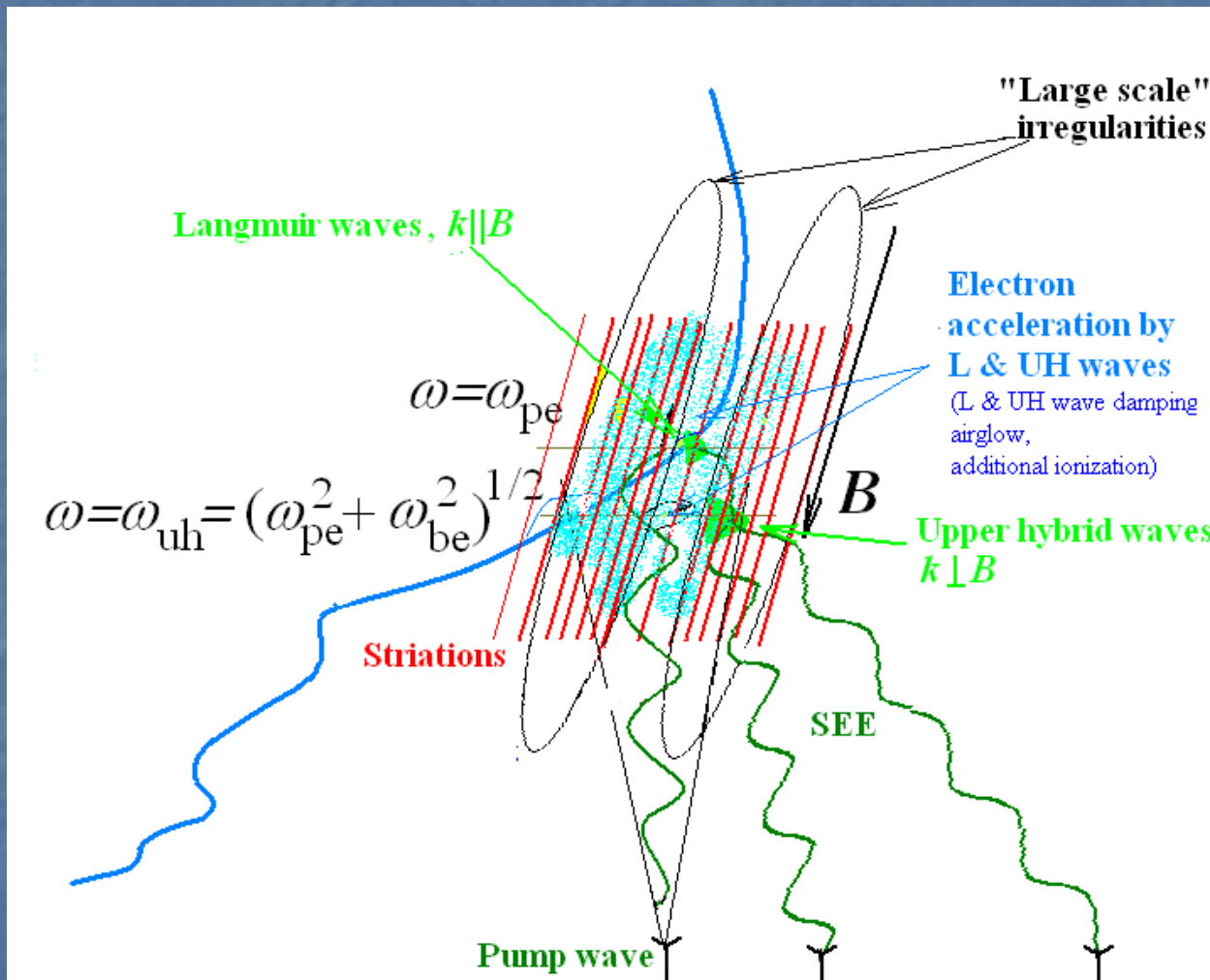
1. Явления в F-области ионосферы вблизи точки отражения обыкновенной волны. Этапы большого пути в развитии искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ)
2. Стрикционная параметрическая неустойчивость
3. Тепловая параметрическая неустойчивость
4. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ)
5. Зависимость вида спектров ИРИ от соотношения f_0 and nf_{ce} .
6. Диагностика пространственного спектра МНН с помощью ИРИ.
7. Ускорение электронов.
8. Искусственное оптического свечение.
9. Дополнительная ионизация ионосферной плазмы.
10. Модификация профиля электронной концентрации под действием мощной КВ радиоволны.



1. Поведение отраженного от ионосферы сигнала волны накачки:

4 стадии: (а) начальная (СПН), (b) промежуточная, (c) «верхнегибридная (ВГ)» (ТПН), и (d) – «стадия самофокусировки». Стадии(а) и (b) связаны с возбуждением ленгюровских волн вблизи точки отражения ВН, стадия (c) – ВГ волн и магнитоориентированных мелкомасштабных неоднородностей. Стадия (d) – развитие крупномасштабных неоднородностей в результате тепловой самофокусировки ВН. (Рисунок из статьи Frolov et al., JASTP, 1997, v. 59, pp. 2317-2333)

1. Схема процессов, происходящих в верхней ионосфере (F-области) под воздействием мощной радиоволны



2. Стрикционная параметрическая неустойчивость (возбуждение ленгмюровских волн) $\tau \sim 0.5 - 5 \text{ ns} < \nu_e^{-1}$.

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

$$E = E_0 + E_{pl} \quad \text{и} \quad |E|^2 \quad \text{содержит член} \quad E_0 E_1 + c.c.$$

$$E_0 \propto \exp\{-i\omega_0 t + ik_0 r\} + c.c.$$

$$E_{pl} \propto \exp\{-i\omega_1 t + ik_1 r\} + c.c.$$

$$\Phi \propto \exp\{-i(\omega_0 - \omega_1)t + i(k_0 - k_1)r\} + c.c.$$

$$-\nabla \Phi \quad - \text{Сила Миллера}$$

$$\partial E_1 / \partial t + \nu_e E_1 \propto E_0 V^* \quad (2)$$

Порог неустойчивости:

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

(1) и (2) обеспечивают положительную обратную связь, и следовательно, неустойчивость $(e^{\gamma t})$

EISCAT mainland

Heating

UHF
930 MHz

VHF
224 MHz

TROMSØ

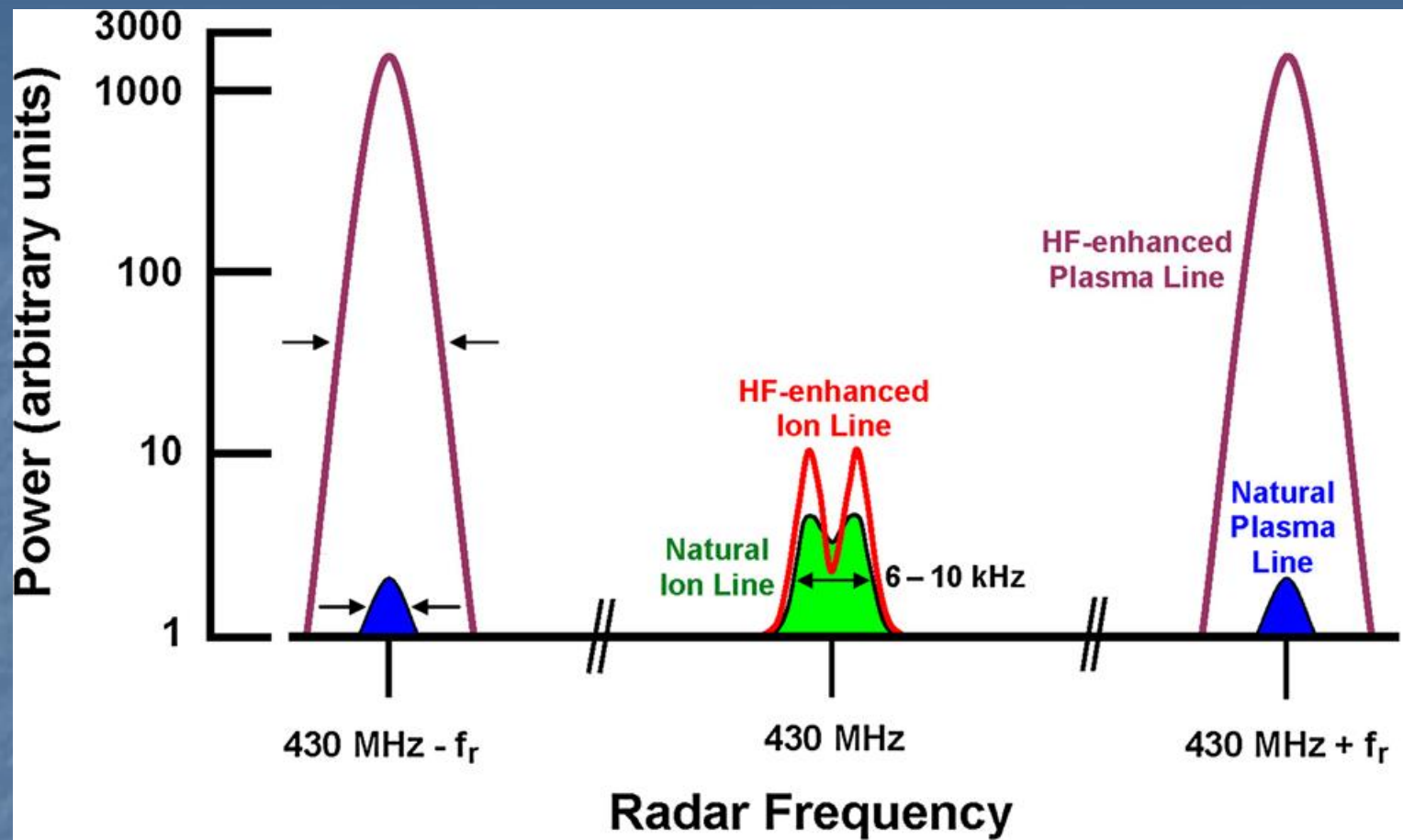
KIRUNA

SODANKYLÄ

polar circle

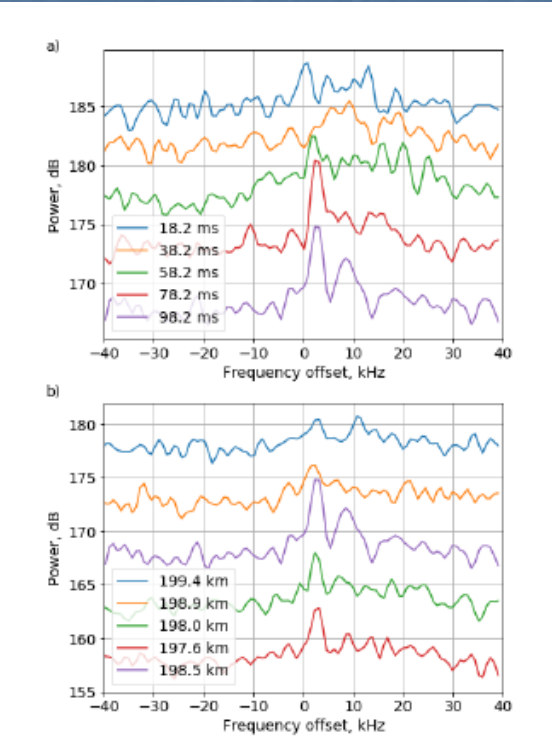
Как СПН
исследуется на
эксперименте?

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

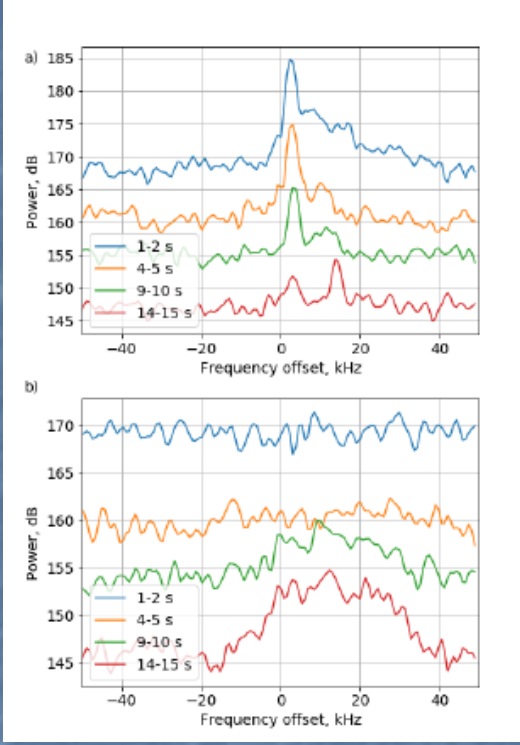


Схематическое изображение спектра (не)когерентного рассеяния: естественного и индуцированного мощной радиоволной (для радара в Аресибо) [Djuth&DuBois, 2015].

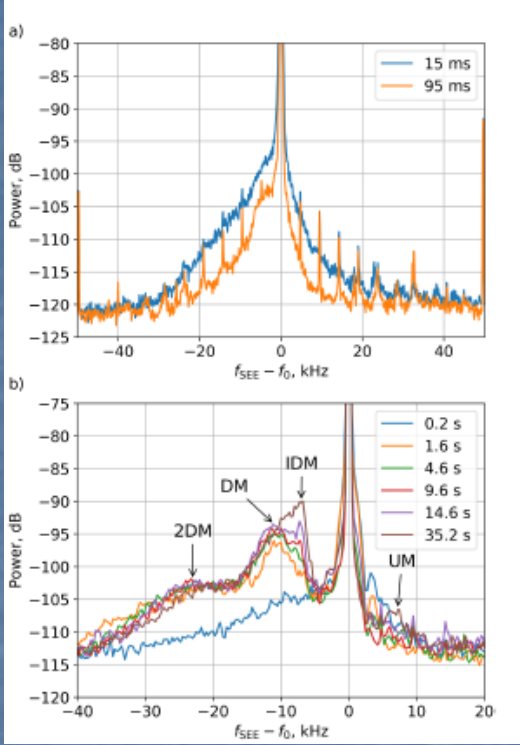
Results of Artificial Ionospheric Turbulence Studies Using the ISR and SEE Techniques at the Arecibo Low-Latitude Heating Facility (Khashev et al., <https://www.ursi.org/proceedings/procGA20/papers/HashevVladimirURSICorrected.pdf>)



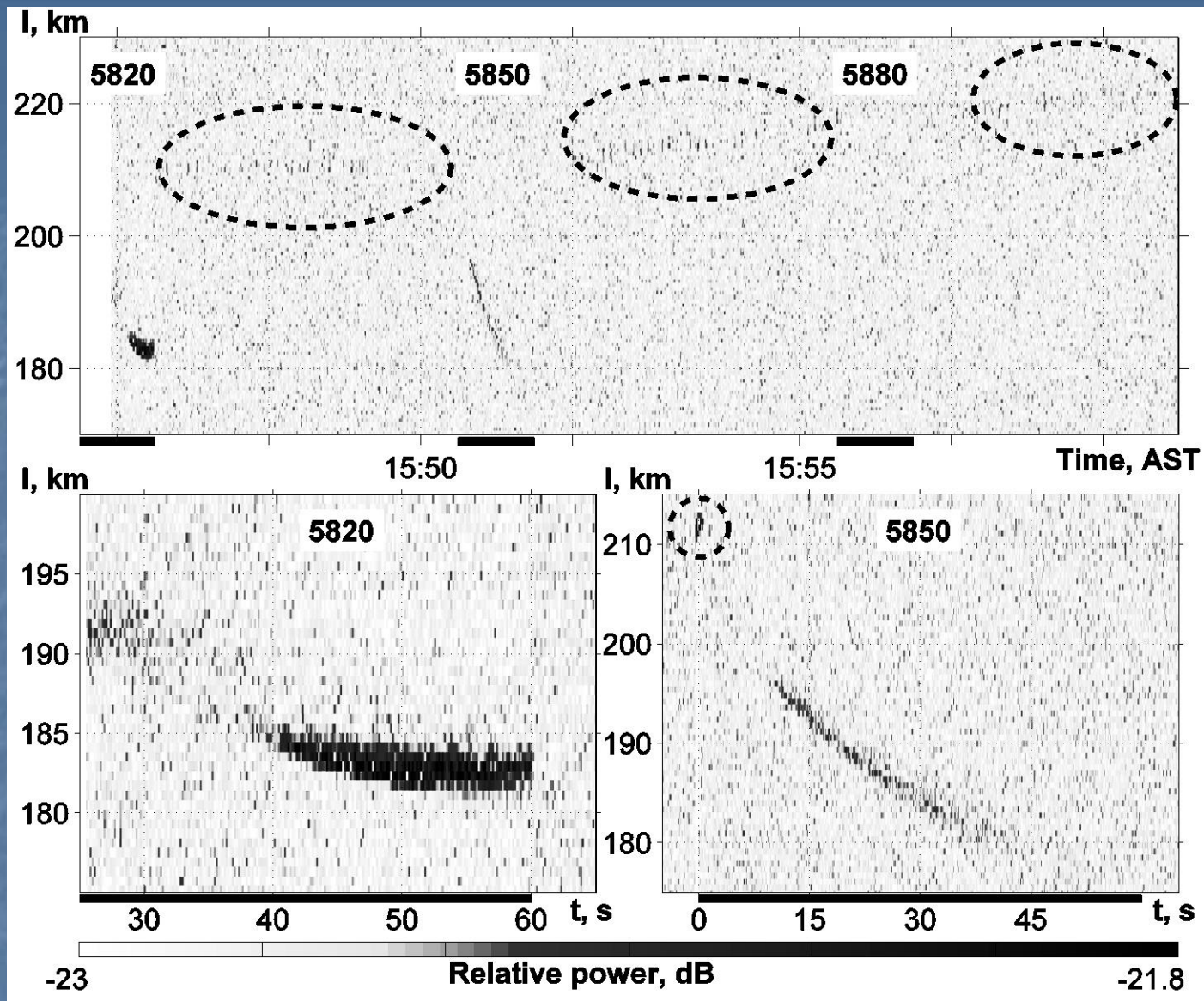
The dynamics of the downshifted plasma line spectra for different pumping times with a step of 20 ms at the height $h = 198.5$ km (panel a) and the altitude distribution with a step 450 m of spectral intensity near the end of the PW pulse, $t = 98.2$ ms (panel b)). Averaging over 50- 55 PW pulses was carried out. An additional shift of each of the spectra by 5 dB was used. 11/08/2018, 15:51:30-16:11:30 LT.



The dynamics of the downshifted plasma line spectra during quasicontinuous pumping for different exposure times (time shift 5 s) at two fixed heights $h_1 = 214$ km (panel a) and $h_2 = 210.8$ km (panel b)). Averaging over 50-55 PW pulses. An additional shift of each spectrum by 5 dB was used for clarity. 11/08/2018, 17:46:00-17:46:15 LT.



Panel (a): an example of the NCp SEE feature for the 15th and 95th ms of pumping, 55 pulses averaging. Panel (b): SEE spectra dynamics for a quasicontinuous pumping. The sequential development of the Downshifted Maximum (DM), the second DM (2DM), and, after 30 s, intermediate DM (IDM) SEE features is clearly visible. 17 The data of 11/08/2018.



Интенсивность плазменной линии радара MUIR в зависимости от расстояния $l = h/\cos(14.2^\circ)$ во время эксперимента 28.03.11 (HAARP) [Sergeev&al., 2013].

3. Тепловая параметрическая неустойчивость в ионосфере служит причиной возбуждения of UH waves with $\mathbf{k}_u \perp \mathbf{B}$ ВГ волн и мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностей (ММН, striations) (process: EM \rightarrow UH+ N, matching conditions $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_u \pm \mathbf{\kappa}$, $\omega_0 = \omega$). $\tau < \delta \nu_e \sim 0.5-5$ s.

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

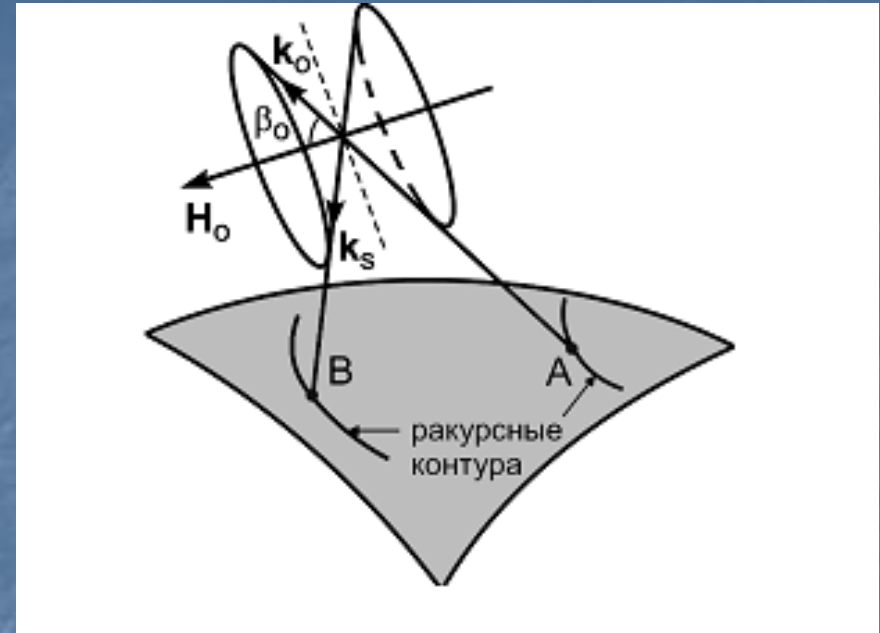
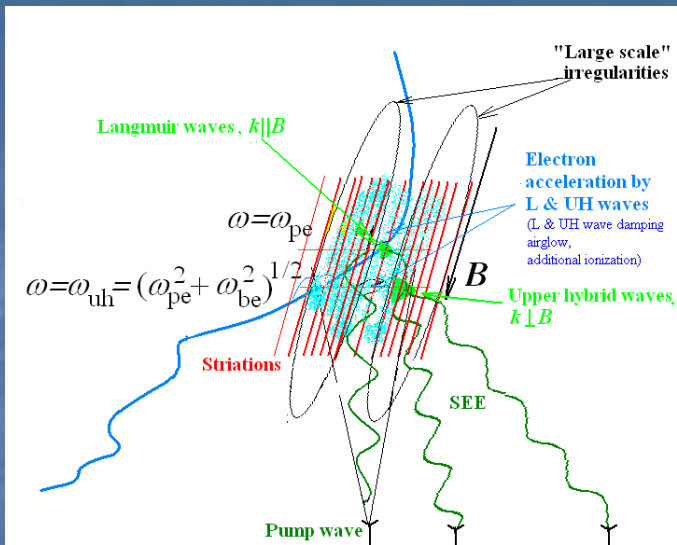
$$Q = (2/3N_e) (\mathbf{E} \hat{\sigma}_{\omega}^H \mathbf{E}^*)$$

- 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:

$$\frac{|E_0|_{T,th}^2}{4\pi N T_e} = \frac{3\nu_e}{k_T \omega_0} (\delta + \kappa_z^2 l_e^2 + \kappa_{\perp}^2 \rho_e^2) \quad (1)$$

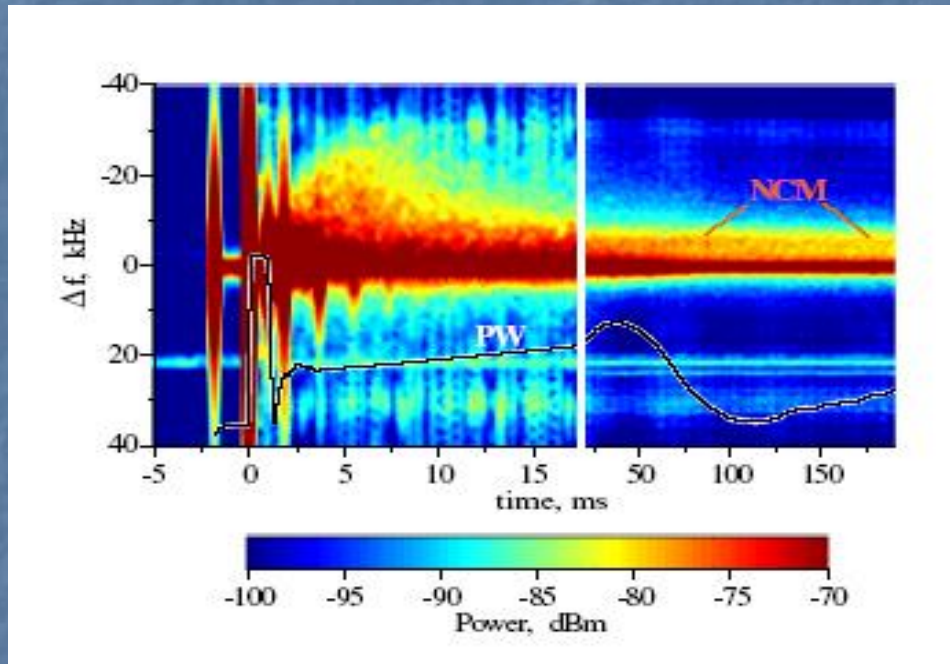


Ракурсное рассеяние радиоволн КВ и УКВ диапазона на магнитоориентированных мелкомасштабных ($l \sim 0.5-50$ м) неоднородностях (ММН) обеспечивает их распространение на большие (до нескольких тысяч км) расстояния

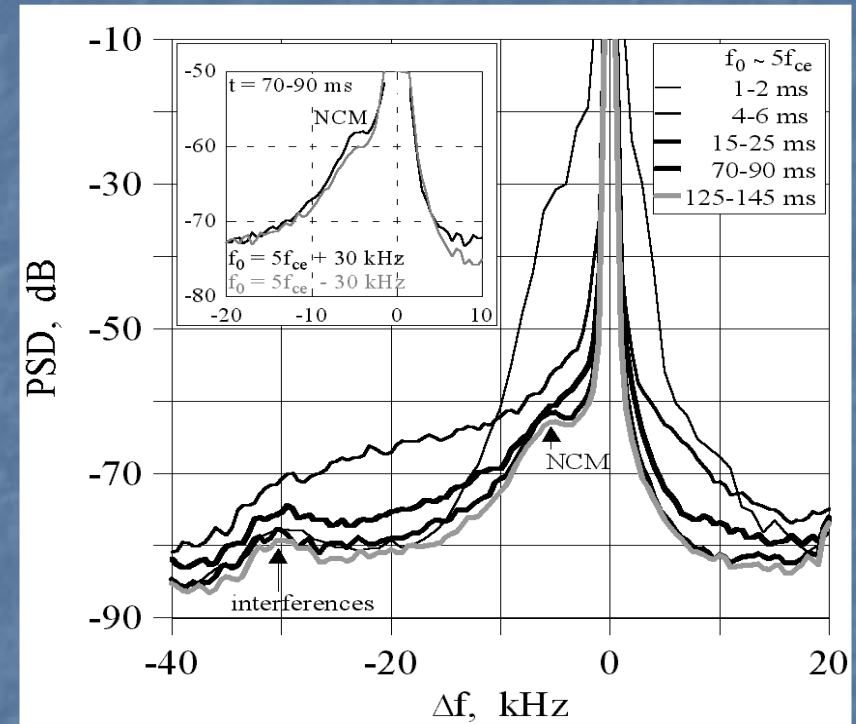
Геометрия ракурсного (зеркального) рассеяния радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях.

4. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) - Stimulated Electromagnetic Emission (SEE) представляет собой структурированное широкополосное вторичное излучение из области взаимодействия ВЧ с ионосферной плазмой.

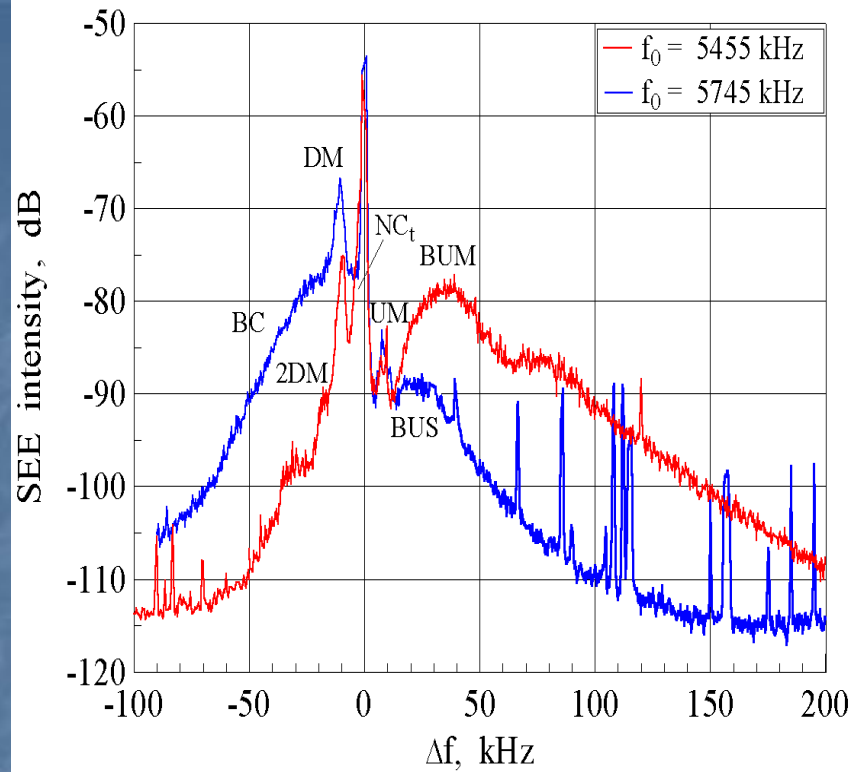
ИРИ, связанное с СПН:



ИРИ в первые 200 мс воздействия. Чёрная линия – динамика поведения отраженного сигнала ВЧ. $f_0 = 6778 \text{ kHz} \approx 5f_{ce}$. Мощность ВЧ $\sim 180 \text{ MW}$.

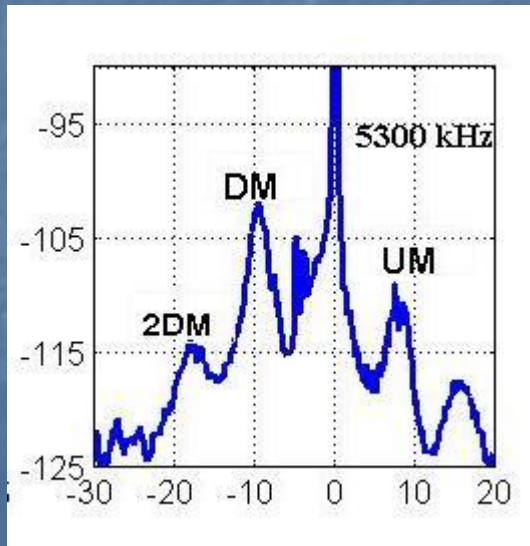


Последовательность спектров ИРИ в зависимости от времени после включения ВЧ

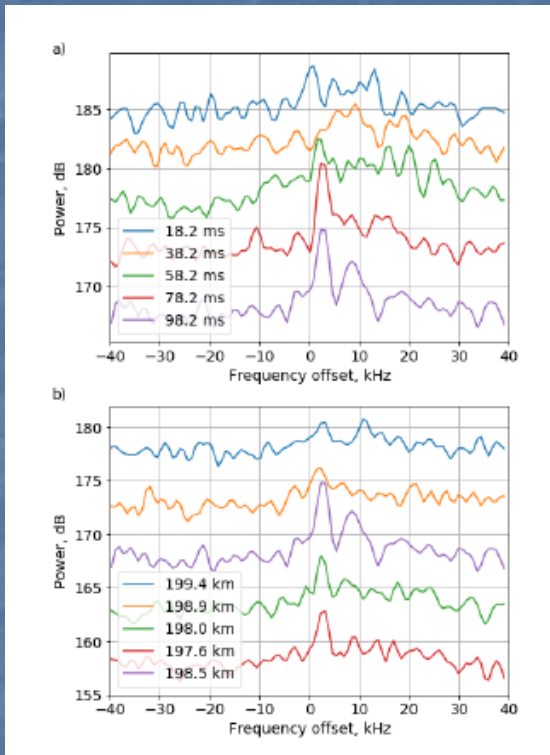


Компоненты ИРИ связанные с ТПН и ВГ волнами:

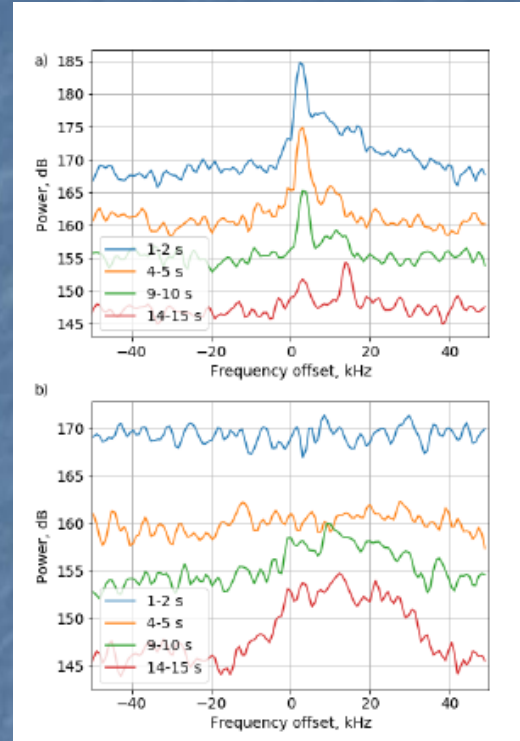
- Downshifted Maximum (DM), отстройка частоты ИРИ $\Delta f_{DM} = f_{SEE} - f_0 \sim [(-8) - (-20)]$ kHz.
- DM семейство: Второй DM (2DM), at $\Delta f_{2DM} \sim 2\Delta f_{DM}$; Третий DM (3DM), at $\Delta f_{3DM} \sim 3\Delta f_{DM}$; Upshifted Maximum (UM), расположенный почти зеркально к DM, $\Delta f_{UM} > 0$, $\Delta f_{UM} \sim |\Delta f_{DM}| - 2$ kHz $\sim [(+6) - (+18)]$ kHz.
- Broad Upshifted Maximum (BUM), на отстройках $\Delta f_{BUM} \sim [(+14) - (+200)]$ kHz, существует при $f_0 \geq n f_{ce}$
- Broad continuum (BC), $\Delta f_{BC} = [(-15) - (-100)]$ kHz.
- Broad upshifted structure (BUS), $\Delta f_{BUS} \sim [(+12) - (+70)]$ kHz
- Narrow continuum (NC), $\Delta f_{NC} = [0 - (-7)]$ kHz.
 n - номер гармоники ($n=3-7$) электронной гирочастоты f_{ce} .



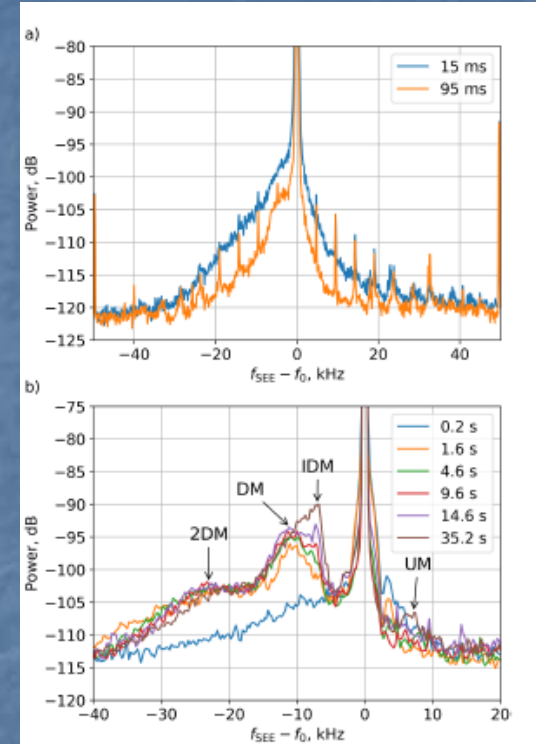
Results of Artificial Ionospheric Turbulence Studies Using the ISR and SEE Techniques at the Arecibo Low-Latitude Heating Facility (Khashev et al., <https://www.ursi.org/proceedings/procGA20/papers/HashevVladimirURSICorrected.pdf>)



The dynamics of the downshifted plasma line spectra for different pumping times with a step of 20 ms at the height $h = 198.5$ km (panel a)) and the altitude distribution with a step 450 m of spectral intensity near the end of the PW pulse, $t = 98.2$ ms (panel b)). Averaging over 50- 55 PW pulses was carried out. An additional shift of each of the spectra by 5 dB was used. 11/08/2018, 15:51:30-16:11:30 LT.

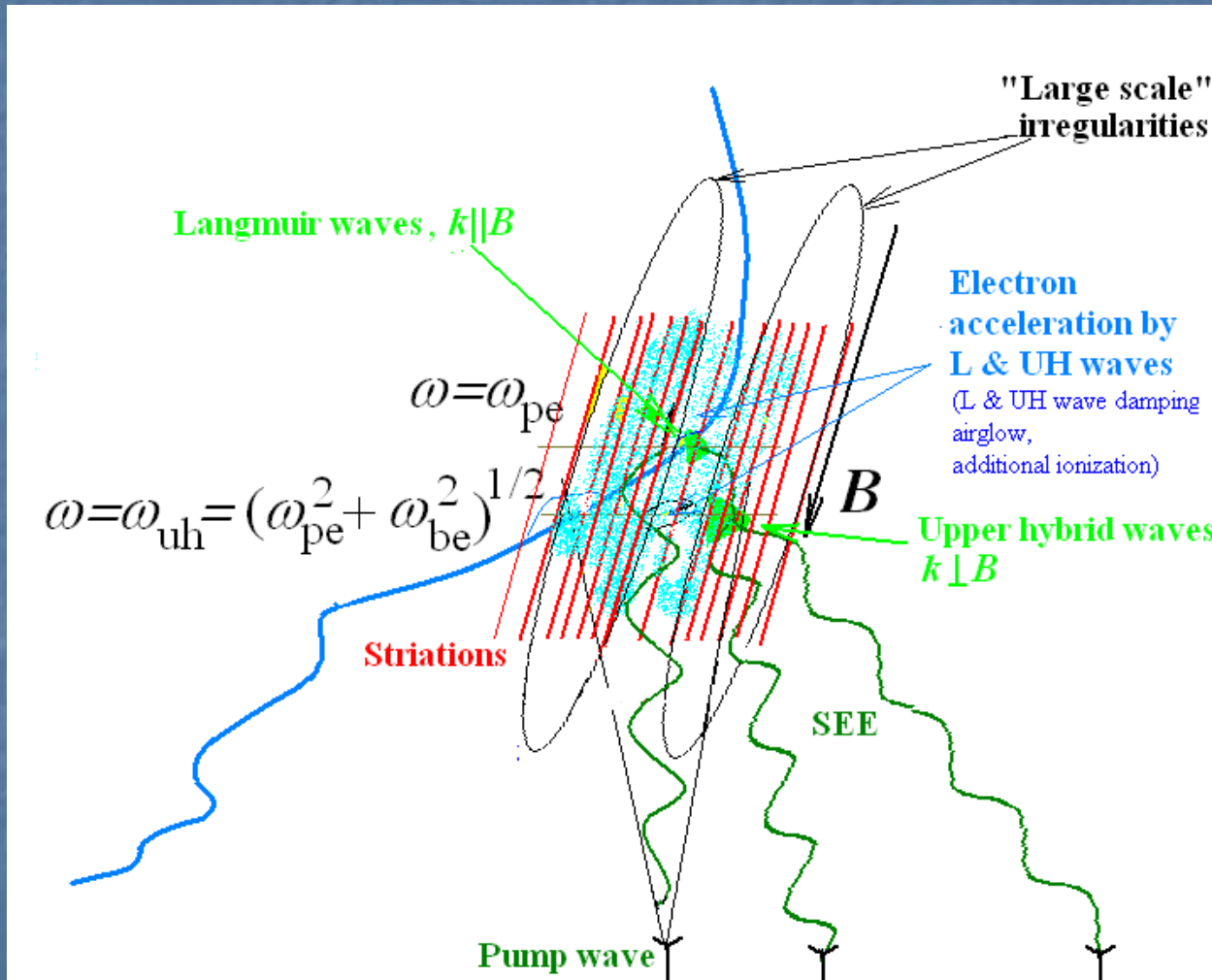


The dynamics of the downshifted plasma line spectra during quasicontinuous pumping for different exposure times (time shift 5 s) at two fixed heights $h_1 = 214$ km (panel a)) and $h_2 = 210.8$ km (panel b)). Averaging over 50-55 PW pulses. An additional shift of each spectrum by 5 dB was used for clarity. 11/08/2018, 17:46:00-17:46:15 LT.



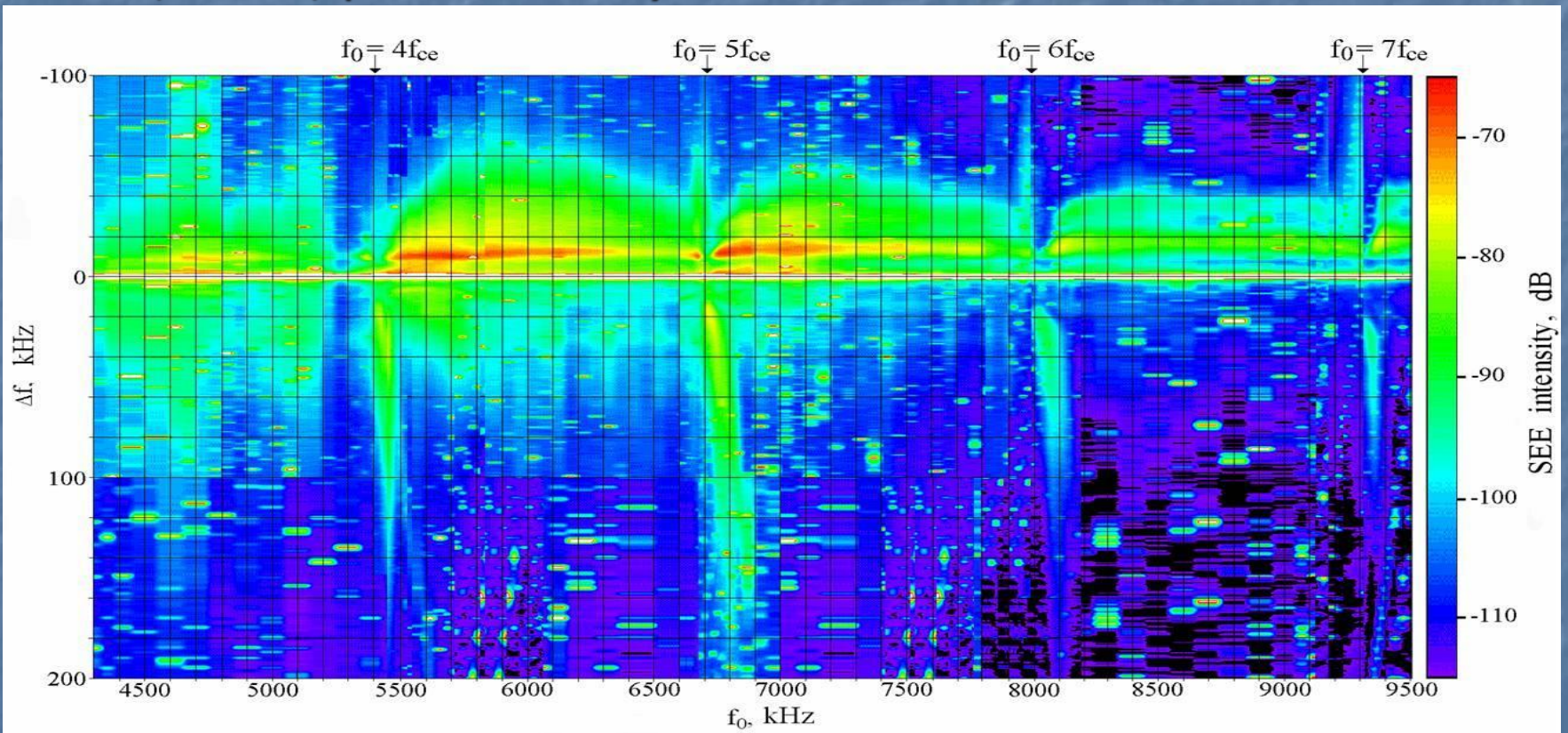
Panel (a): an example of the NCp SEE feature for the 15th and 95th ms of pumping, 55 pulses averaging. Panel (b): SEE spectra dynamics for a quasi-continuous pumping. The sequential development of the Downshifted Maximum (DM), the second DM (2DM), and, after 30 s, intermediate DM (IDM) SEE features is clearly visible. 23 The data of 11/08/2018.

Схематическое изображение явлений, происходящих в области ИИТ



5. Зависимость спектров ИРИ от соотношения f_0 и nf_{ce} .

Данные 1996 – 2000 гг. Стенд СУРА. Электронные гирогармоники (nf_{ce} , $n=4-7$) показаны вверху рисунка. $\Delta f = f_{SEE} - f_0$. (figure of Frolov et al., Geophys. Res. Lett., 2001, V. 28, N. 16, p. 3101-3104)



$$\Delta f_{\text{BUM}_p} \approx f_0 - nf_{ce}(h) + \delta f,$$

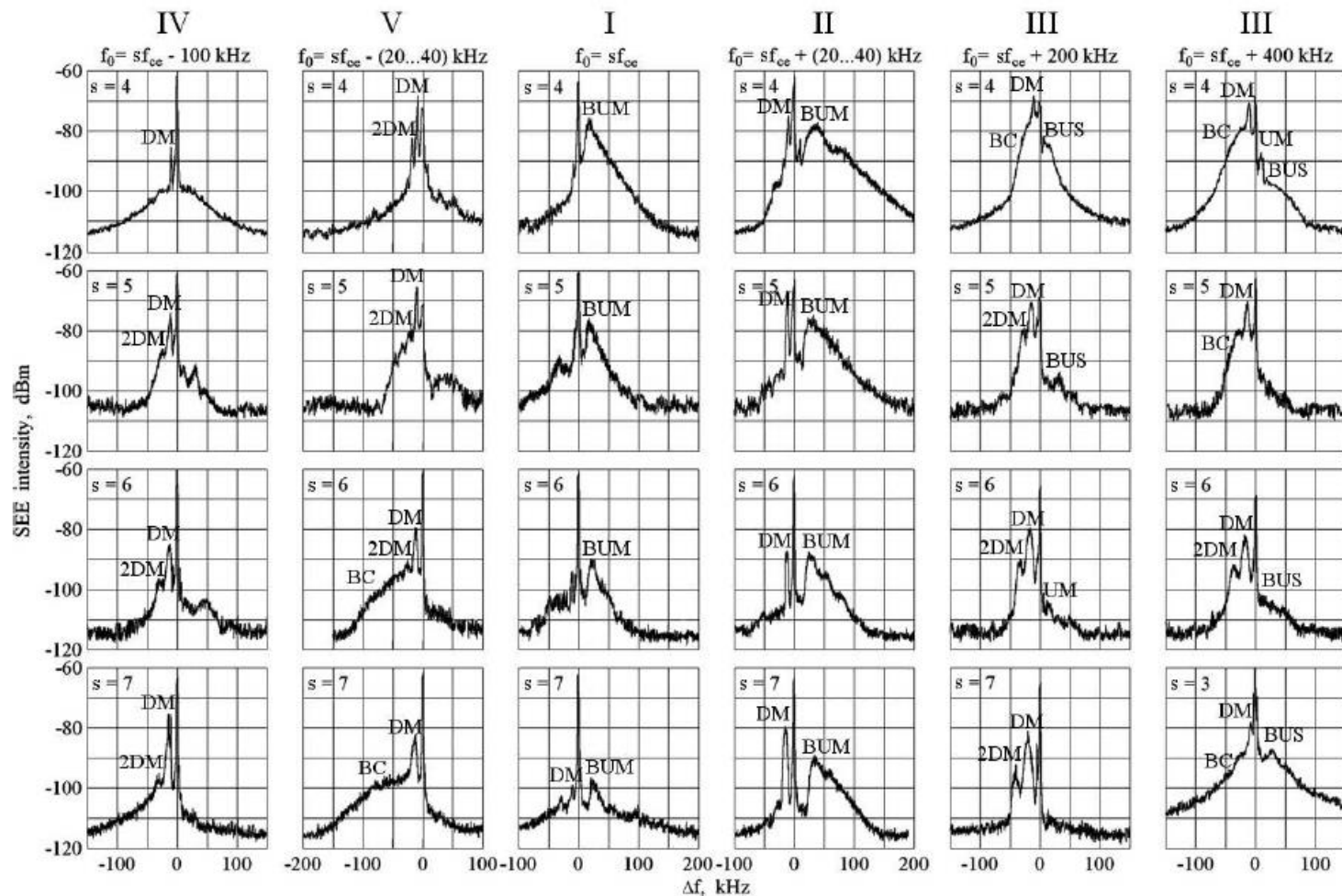


Рис. 3.8: Спектры ИРИ для характерных отстроек частоты ВН от электронных гирогармоник $\delta f_c = f_0 - sf_{ce}$ (столбцы): $\delta f_c \sim -100$ кГц (IV, слабое излучение), $\delta f_c \sim -(20 - 40)$ кГц (V, под гармоникой), $\delta f_c \simeq 0$, $f_0 \approx sf_{ce}$ (I, резонансная область), $\delta f_c \sim (20 - 40)$ кГц (II, над гармоникой), $\delta f_c \sim 200$ кГц, $\delta f_c \sim 400$ кГц (III, сильное излучение) для $s = 4 - 7$ (строки). На нижней правой панели приведен спектр для $f_0 = 4400$ кГц ($s = 3$, область III.)

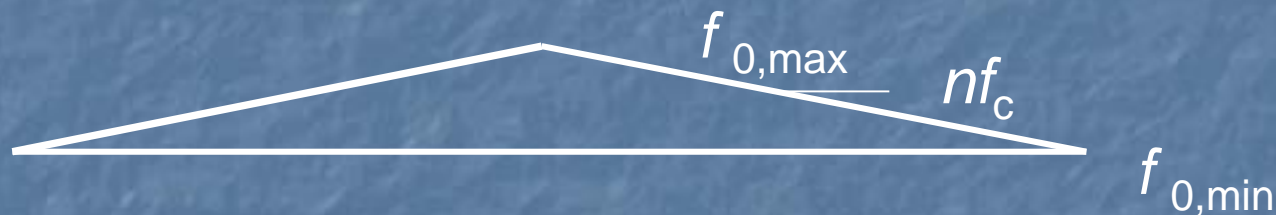
«Диагностические» режимы излучения волны накачки (ВН):

(I) A low duty cycle pulse radiation (pulse duration from 5 till 50 ms with 2–3 s period)

(II) An alternation of quasi-continuous wave (QCW) radiation (70-180 ms "on", 20 -30 ms "off") during 0.5-2 minutes and the low duty cycles



(III) Fast sweep of the pump frequency f_0 around gyroharmonics nf_c .



(IV) Two-frequency pumping for studying pumped volume spatial structure



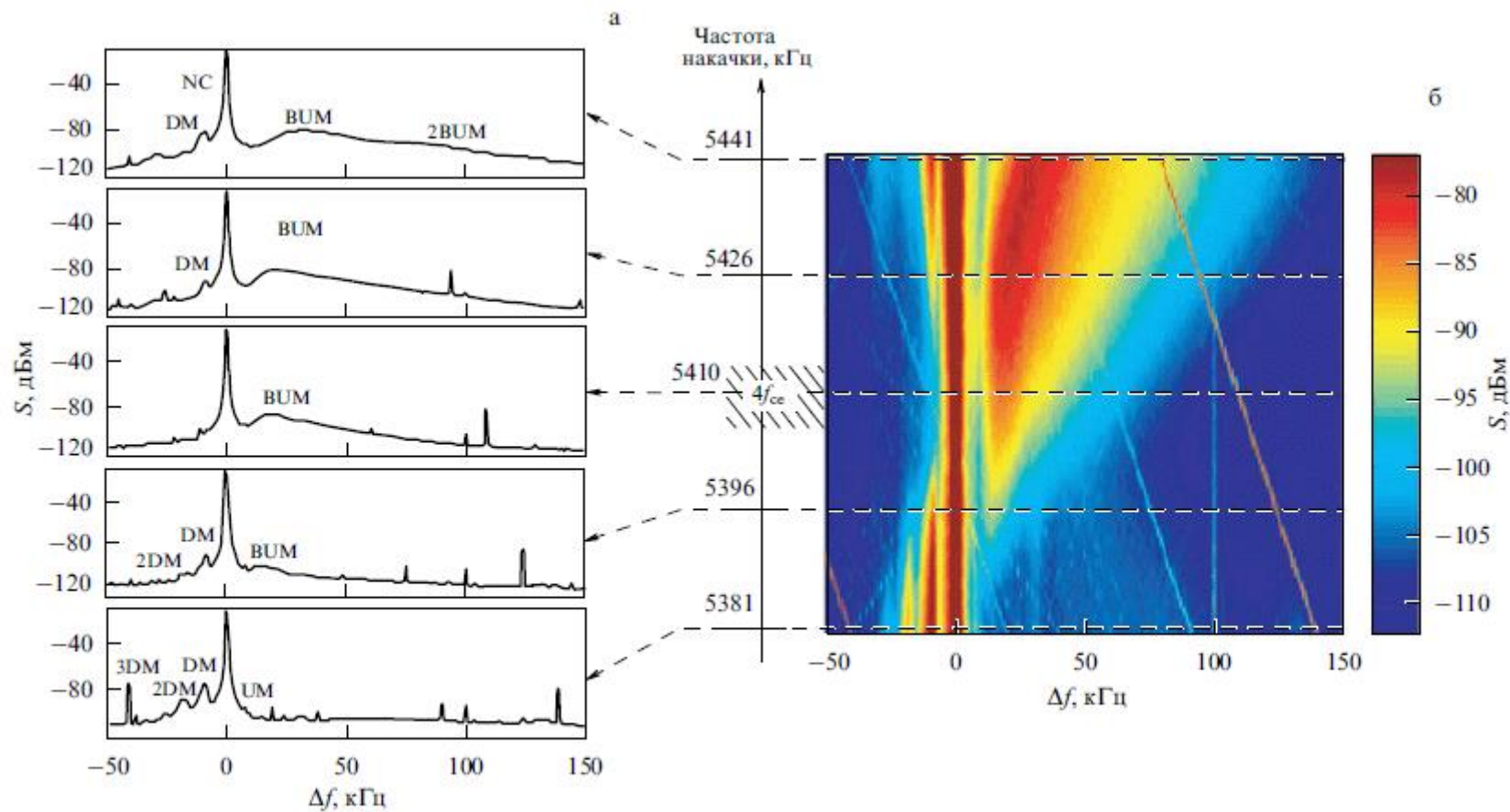
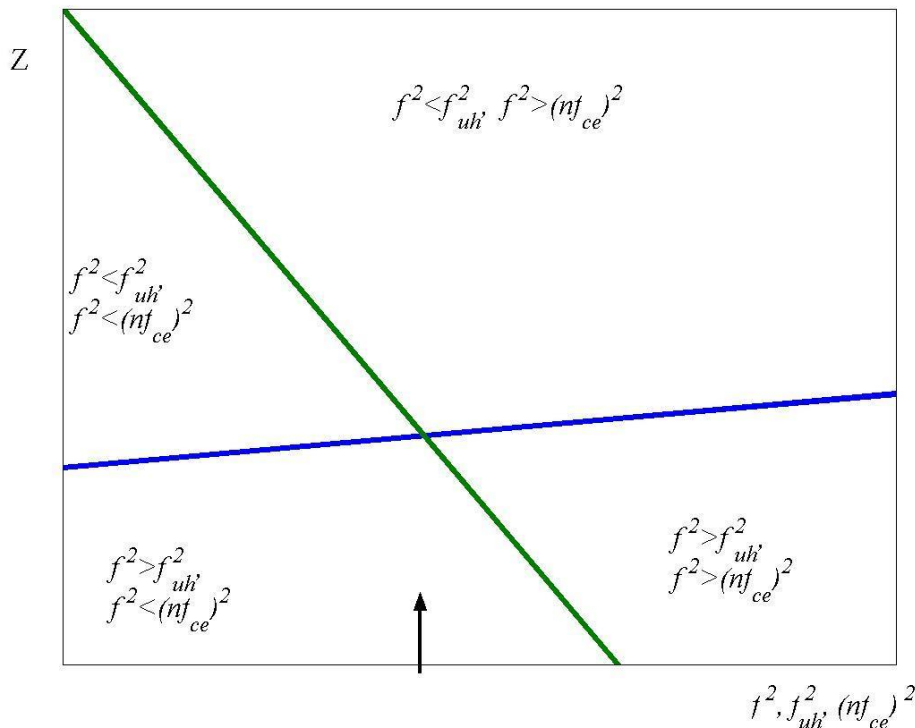


Рис. 13. (В цвете онлайн.) (а) Индивидуальные спектры ИРИ для пяти различных значений f_0 , показанных на рис. б штриховыми линиями. (б) Спектрограмма ИРИ при свипировании частоты ВЧ f_0 вблизи четвертой гирогармоники. Стенд "Сура", сентябрь 1998 [50].

Approximate dispersion relation for plasma waves near the double resonance,

where $f_{uh}^2 \approx n^2 f_{ce}^2$:

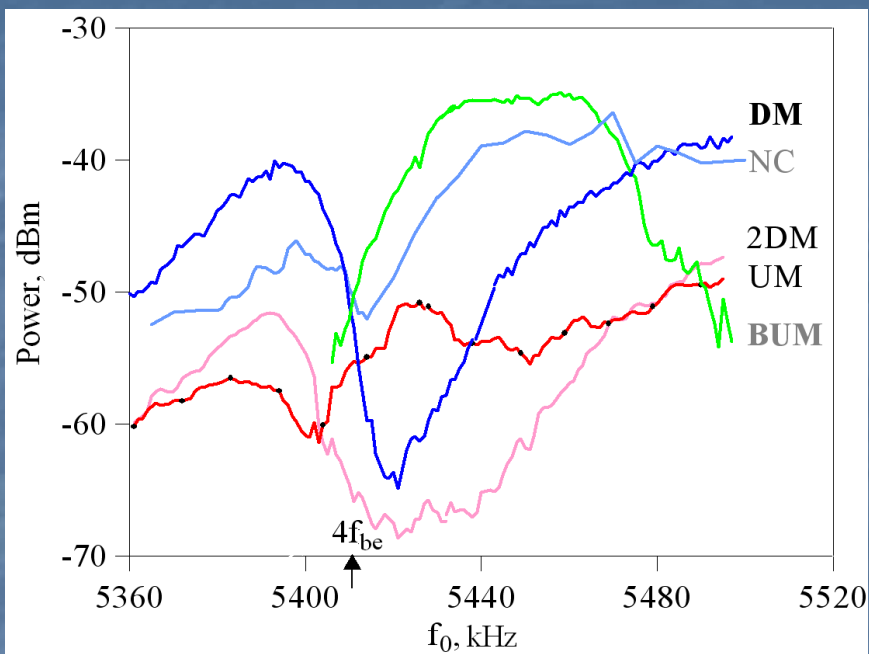
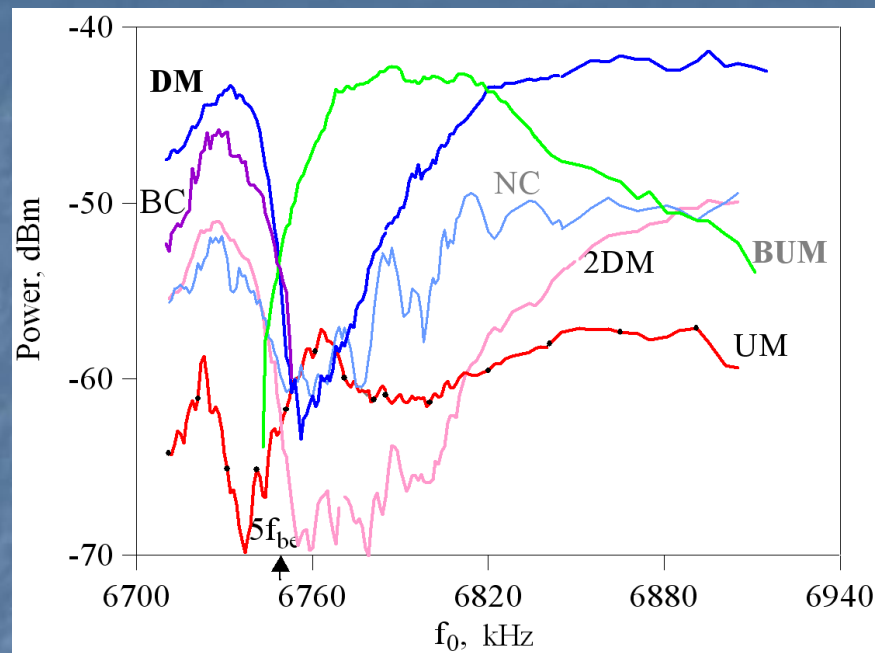
$$(\omega^2 - \omega_{\text{BR}}^2(k))(\omega^2 - n^2 \omega_{ce}^2) = \frac{n^2(n^2 - 1)}{2^{n-1}n!} \omega_{ce}^2 \omega_{pe}^2 (k\rho_e)^{2(n-1)},$$



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

Blue line: $f_{uh}^2(z)$, green line: $nf_{ce}^2(z)$, z is an altitude.

Plasma waves can exist if $f > f_{uh}$ and $f > nf_{ce}$ or $f < f_{uh}$ and $f < nf_{ce}$. If $f = f_d = f_{uh}(z_d) = nf_{ce}(z_d)$, such conditions cannot be fulfilled.

$n=4$  $n=5$ 

При свипировании f_0 через nf_{be} ($n = 4, 5$) спектральные компоненты ИРИ UM, NC_t и DM достигают минимальной интенсивности последовательно для частот ВЧ $f_{0UM} \approx f_{0min} - \Delta f_{UM} < f_{0NC} \approx f_{0min} - (2 - 3) \text{ kHz} < f_{0DM} \approx f_{0min} - \Delta f_{DM}$, но при том же самом значении частоты самих этих компонент, совпадающих с частотой ВЧ f_{0min} , при которой интегральная интенсивность ИРИ минимальна $f_{0min} \approx f_{UM} \approx f_{NC} \approx f_{DM}$. $f_{0min} \approx nf_{be}$ ($z=z_d$), т.е. на двойном резонансе, где $f_d = nf_{be} = f_{UH} = (f_{pe}^2 + f_{be}^2)^{1/2}$

Conclusion:

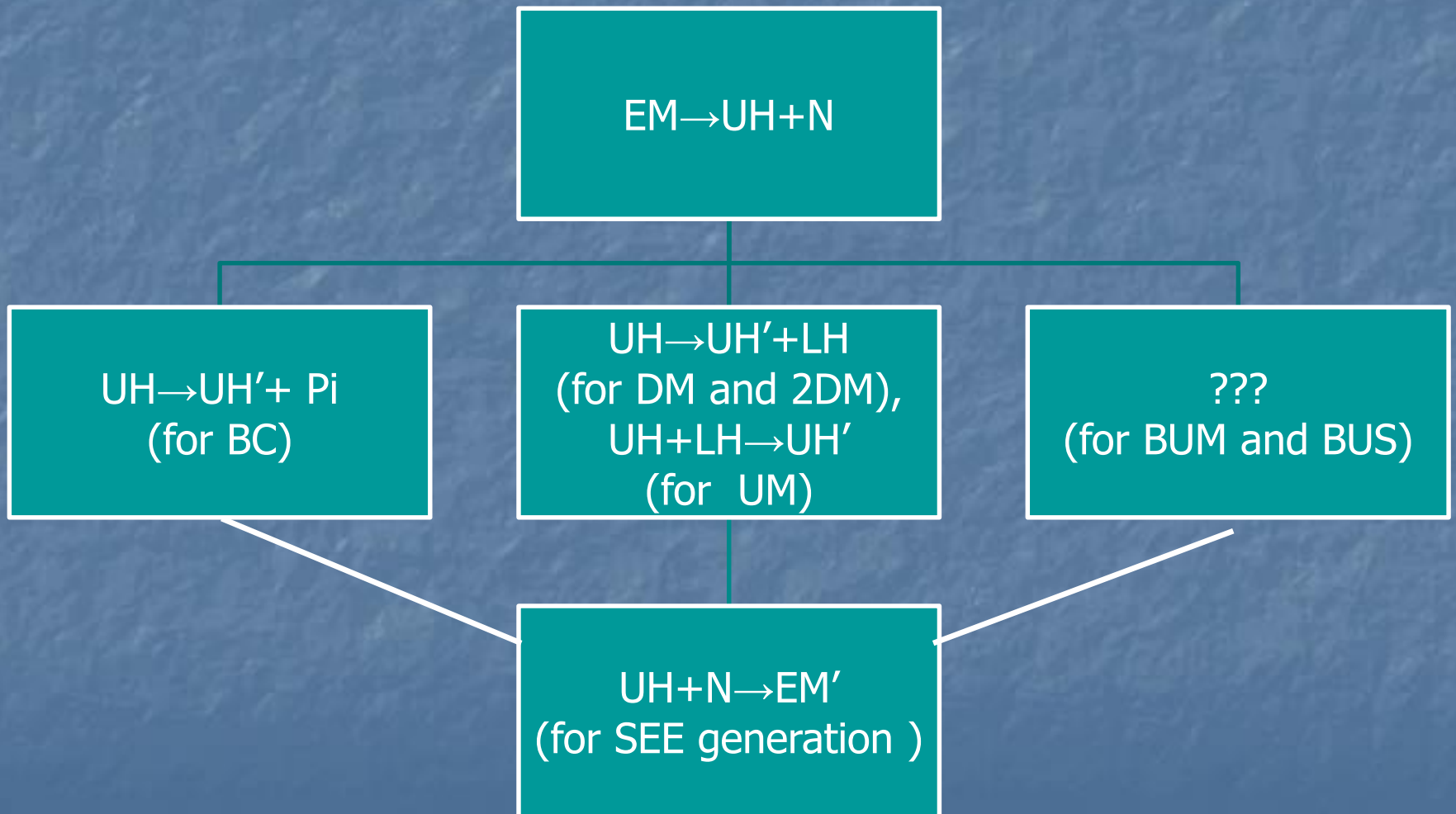
1. At f_0 sweeping different SEE features and corresponding plasma waves pass the double resonance and are suppressed successively, when their own frequency = the double resonance frequency $f_d = f_{uh}(z_d) = nf_{ce}(z_d)$.

$$f_{0min} \approx f_{0DM} - \Delta f_{DM} \approx nf_{ce}(z_d) \approx f_{uh}(z_d)$$

2. BUM peak frequency shift increases linearly vs. $f_0 - nf_{ce}$

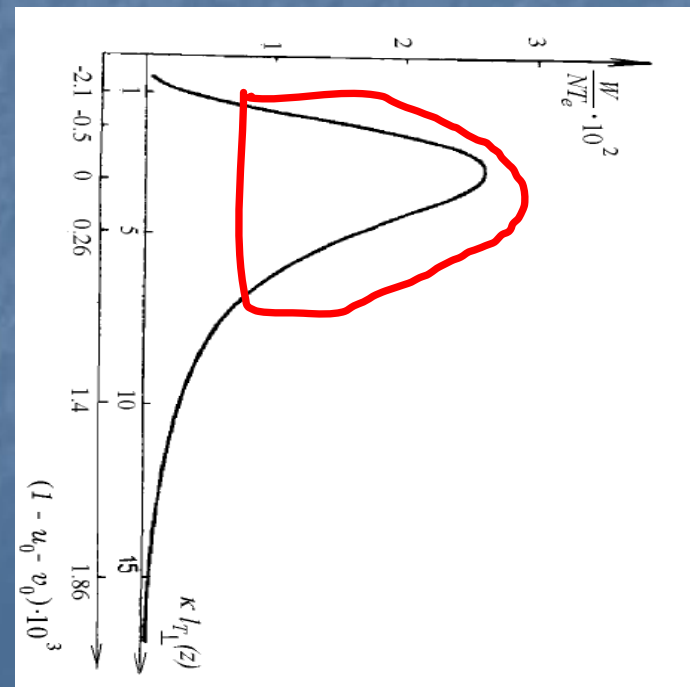
$$\Delta f_{BUM_p} \approx f_0 - nf_{ce}(h) + \delta f, \delta f \sim 15-20 \text{ kHz}$$

6. Механизм генерации ИРИ в области верхнего гибридного резонанса:



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

Из приведённого выражения для зависимости плотности энергии плазменных (ВГ) волн от высоты следует, что вблизи максимума $W_{k_{\perp}}$ превышен порог СПН, и, например, индуцированное рассеяние на ионах или распадные (трехволновые) процессы негар обеспечивают широкий спектр плазменных волн (!!)



Выражение для плотности потока энергии ВС компоненты ИРИ на
 прямой антенне

$$S_S(\omega_S = \omega) = \frac{c\Theta}{\delta\omega_s} \frac{k_S^2}{k_{\max}^2} \frac{V_{gz}}{V_0} W_{th} J = k_0^2 c\Theta \frac{V_{gz}}{V_0} \int_{\kappa_{1\min}(\omega)}^{\kappa_{1\max}(\omega)} \frac{a}{V_0} n_{\kappa_1}^2(z, \omega) \times$$

$$\times \frac{W_{th}}{k_{\max}^2(z) \delta\omega_s} e^{-\Gamma(\kappa_1(z, \omega))} \left(\sqrt{\frac{2\pi a n_{\kappa}^2(z, \omega_0) W_{t0}}{\nu_e |\partial z / \partial \kappa^2|(z, \omega_0) W_{th}}} e^{-\Gamma(\kappa(z, \omega_0))} - \frac{\Delta\omega}{\delta\omega_s} \right) d\kappa$$

n_{κ}^2 - спектральная интенсивность ММН (двумерный пространственный спектр),

κ – волновой вектор ММН, $\kappa \perp \mathbf{B}$,

$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{SEE} = -2\pi\Delta f$,

$\delta\omega_s$ шаг перекачки по частоте плотности энергии плазменных (ВГ) волн

z - высота,

Γ - аномальное ослабление ВН и выходящего из ионосферы ИРИ,

$\Gamma(\kappa(z, \omega)) = \int_{\kappa(z, \omega)}^{\infty} a n_{\kappa}^2 d\kappa$

Это позволяет реконструировать пространственный спектр ММН (n_{κ}^2) при сравнении с данными динамики спектральной компоненты ИРИ Broad Continuum (BC).

Pump schedule used:

(I) A low duty cycle pulse radiation (pulse duration from 5 till 50 ms with 2–3 s period)

(II) An alternation of quasi-continuous wave (QCW) radiation (70-180 ms "on", 20 -30 ms "off") during 0.5-2 minutes and the low duty cycles



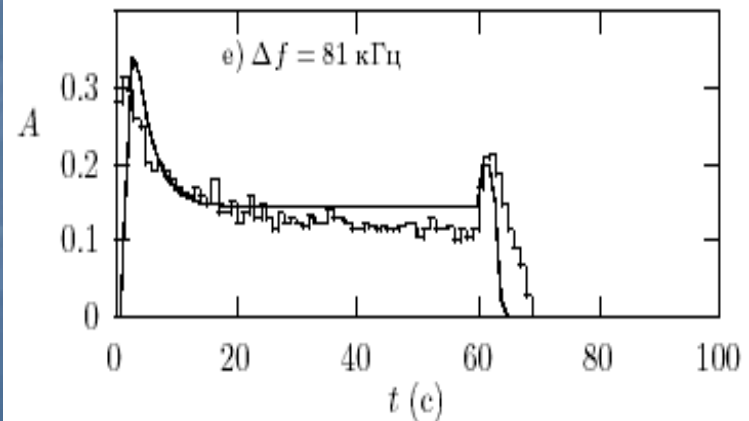
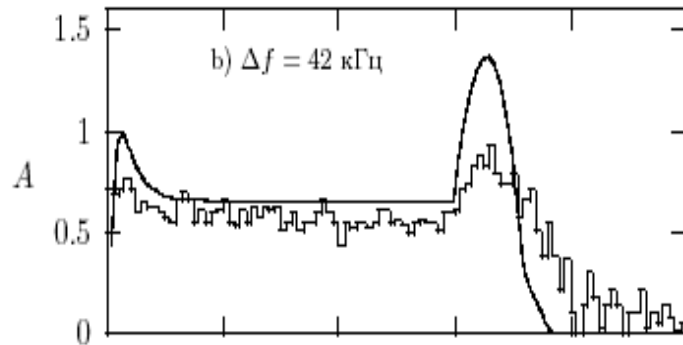
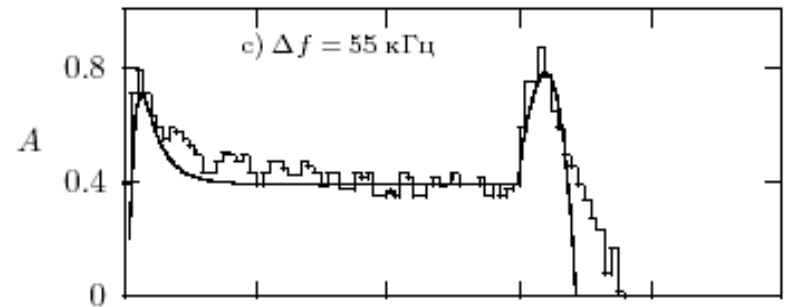
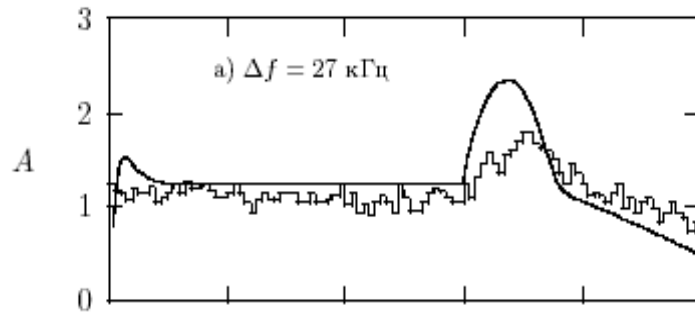
(III) Fast sweep of the pump frequency f_0 around gyroharmonics nf_c .



(IV) Two-frequency pumping for studying pumped volume spatial structure



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



Alternative schemes for the DM generation:

“double transformation”

$$EM^{(PW)} + N \rightarrow (UH/EB)$$

$$(UH/EB) \rightarrow (UH/EB)' + LH$$

$$(UH/EB)' \rightarrow (UH/EB)'' + LH'$$

$$(UH/EB)' + N \rightarrow EM^{(DM)}$$

$$(UH/EB)'' + N \rightarrow EM^{(2DM)}$$

⋮

“direct decay”

$$EM^{(PW)} \rightarrow (UH/EB)' + LH$$

7. Ускорение электронов до энергий $E \sim 30-50 \text{ eV}$ происходит при взаимодействии электронов с плазменными волнами (ленгмюровскими и/или верхнегибридными) на черенковском ($\omega = k\mathbf{v}$) или циклотронном ($\omega = n\omega_b + k_z v_z$) 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:

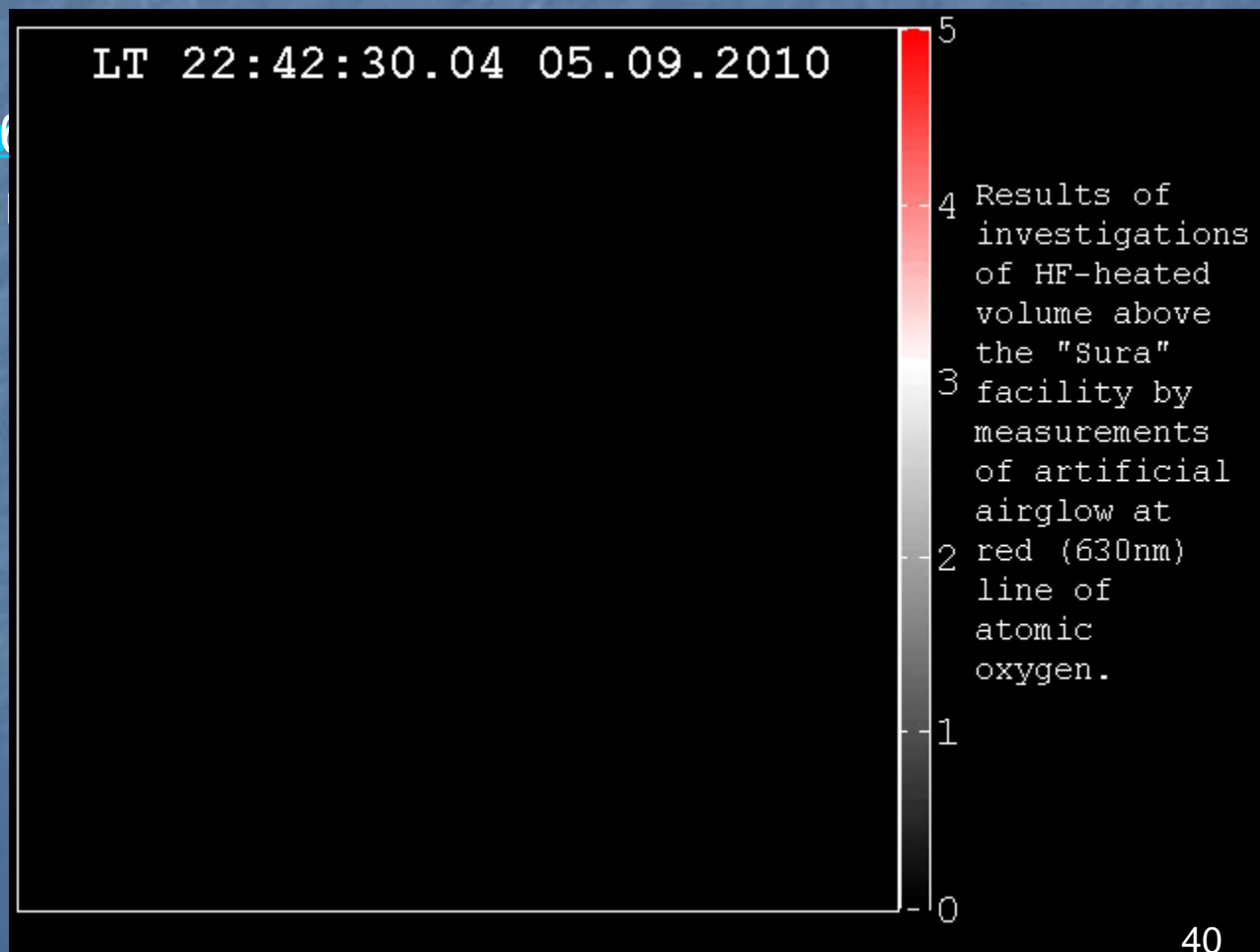
8. Генерация искусственного оптического свечения, точнее влияние излучения волны накачки на яркость оптического свечения ночного неба.

Диагностика крупномасштабных возмущений (неоднородностей) с помощью измерений оптического свечения и сигналов навигационных ИСЗ.

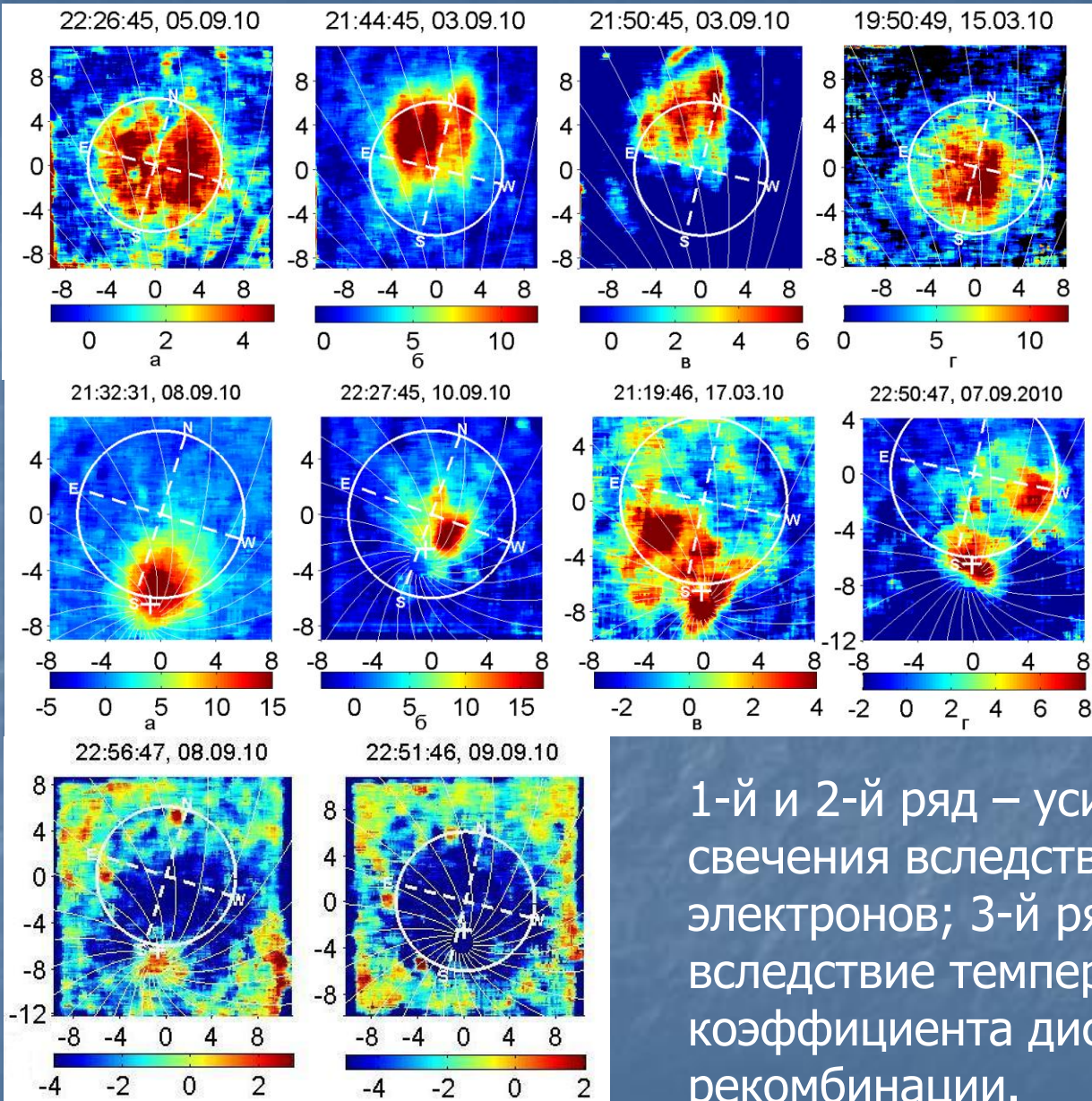
7. Генерация искусственного оптического свечения

Некоторые эффекты, наблюдающиеся в красной линии атомарного кислорода

Крупномасштабное
геомагнитное

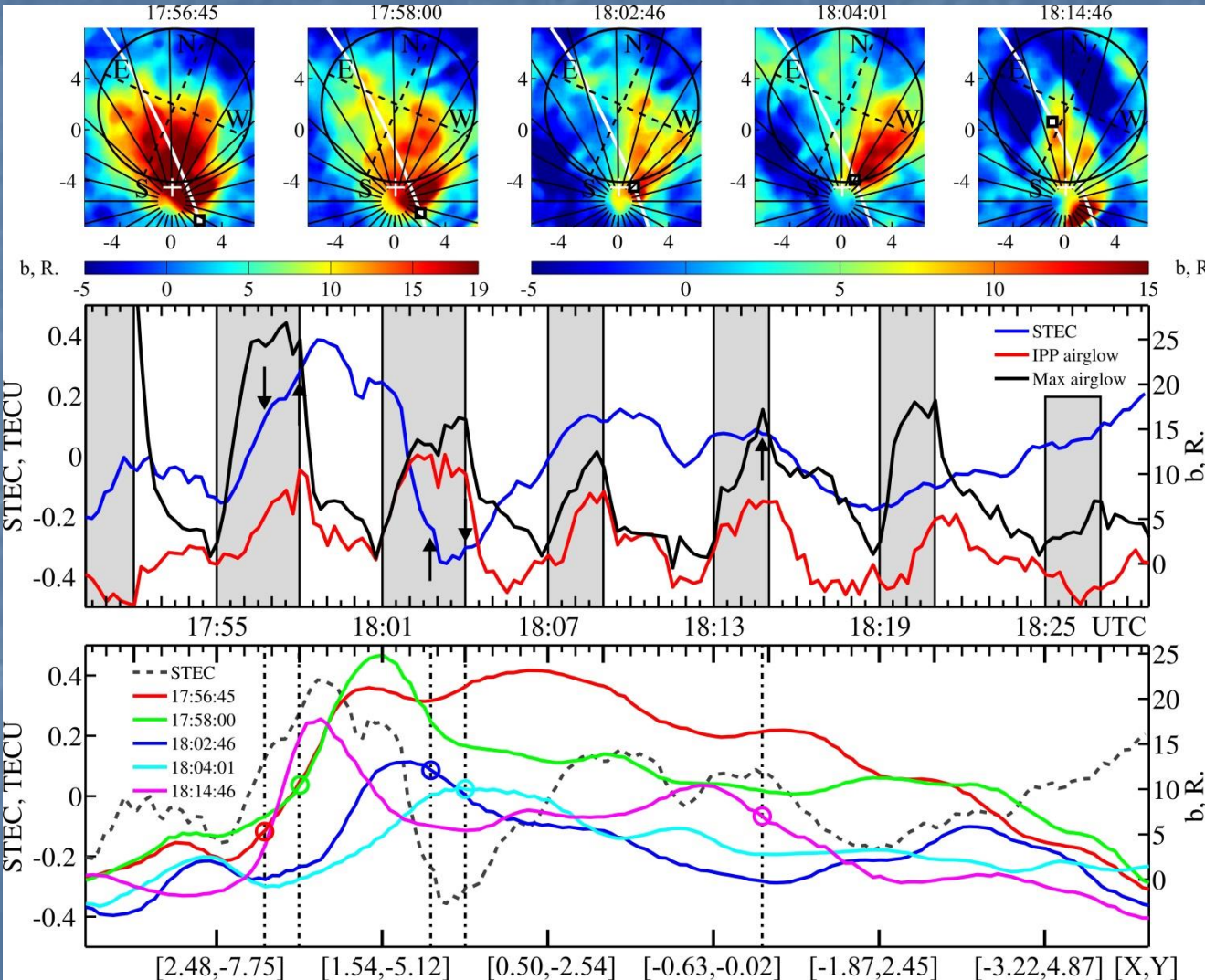


Влияние воздействия волны накачки на оптическое свечение в красной линии атомарного кислорода (уровень $O(^1D)$, потенциал возбуждения 1,96 эВ).
 1 ряд – вертикальное воздействие, 2- и 3-й – наклонное, на 12° и 16° к югу (к направлению магнитного поля).



1-й и 2-й ряд – усиление (генерация) свечения вследствие ускорения электронов; 3-й ряд – подавление фона вследствие температурной зависимости коэффициента диссоциативной рекомбинации.

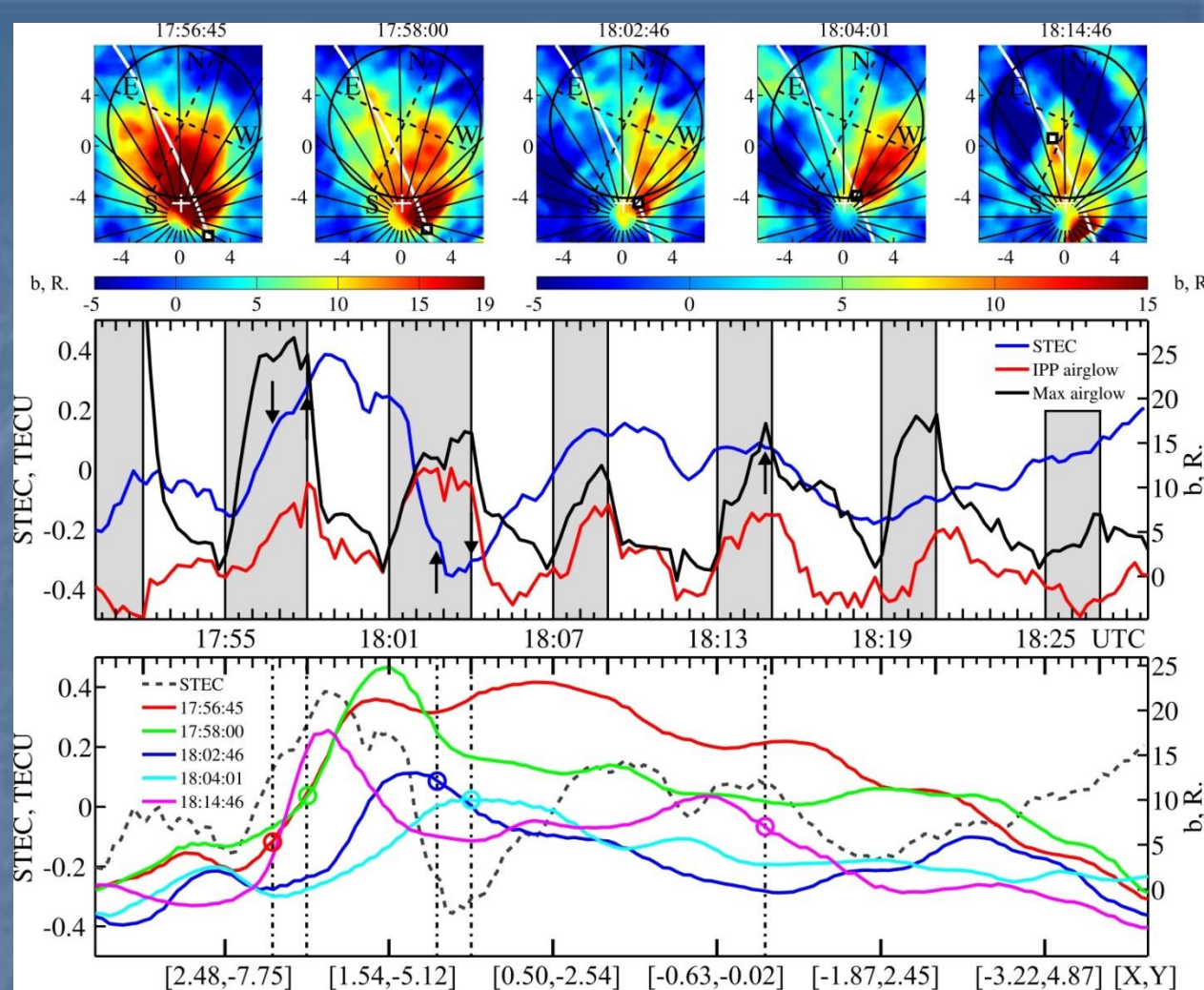
17 March 2010. Upper panel: Images from CCD camera. Coordinates are given in the degrees of the camera field of view. The black circle and black lines are the straight-line projection of the 12° wide main lobe of the SURA antenna pattern and geomagnetic field projections onto the field of view, **the white line and the small black square on it are the track of the GPS satellite and its location at the time of the image taking.**



the white line and the small black square on it are the track of the GPS satellite and its location at the time of the image taking.

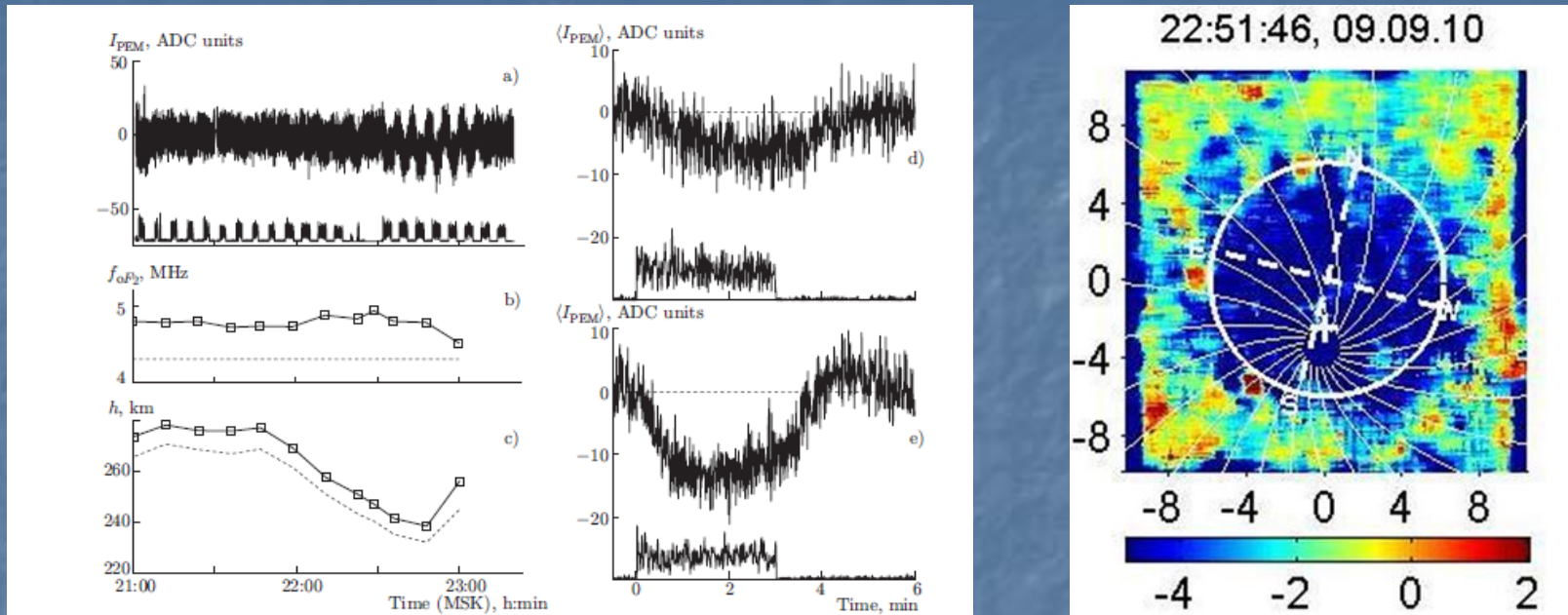
Middle panel: **STEC** (blue line), maximum airglow brightness (b, Rayleigh) over the image (black) and airglow brightness at the satellite location (red) vs. time. The arrows indicate moments of taking images shown in the upper panel. Gray bars indicate pump-on periods.

Lower panel. Colored lines: brightness distribution over the whole satellite track at the images shown in the upper panel; dashed line: STEC distribution over the satellite track. Dash-dotted vertical lines and colored circles correspond to satellite position at the images at the moments of their taking. Coordinates X and Y are given in degrees of a line of sight on the satellite at the moments corresponding to the time axis on the middle panel.

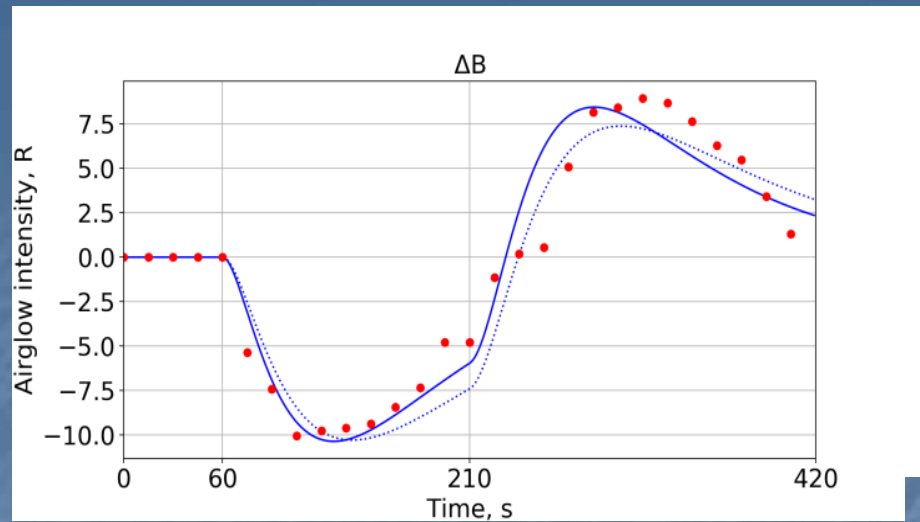
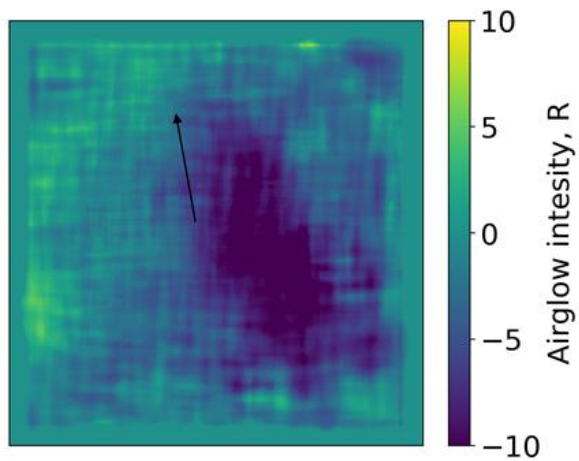


The experiments indicate that in the HF-pumped ionosphere for moderate pump beam power the generation of the red line artificial airglow occurs most effectively inside the large-scale plasma cavities.

A suppression of the background airglow due to temperature dependence of the dissociative recombination coefficient (Klimenko et al., RQE, 2018)



Left: Temporal behavior of the 630 nm airglow brightness, photometer data of 09.09.2010 (a), the ionospheric critical frequency f_{oF_2} (b), the reflection height of the pump wave (solid line, c), and the height of the upper-hybrid resonance (dashed line c). The pump-wave frequency $f_0 = 4.375$ MHz (dashed line, b). The pump beam is inclined by 16° . Panel d: airglow behavior averaged over 5 pumping cycles in the interval 21:55–22:25 MSK. Panel e: the averaged airglow behavior over 6 cycles in the interval 22:31–23:07 MSK. The intervals of pumping are shown on the panels a, d, and e. Right: The image registered by CCD camera



Night sky image in the line 630 nm with HF pump induced emission suppression. SURA facility, 14.09.2012, 18:09 UTC (22:09 local summer time). The arrow shows the direction to geographical North.

The 630 nm brightness dynamics during 18:12 – 18:19 UTS 14.09.2012

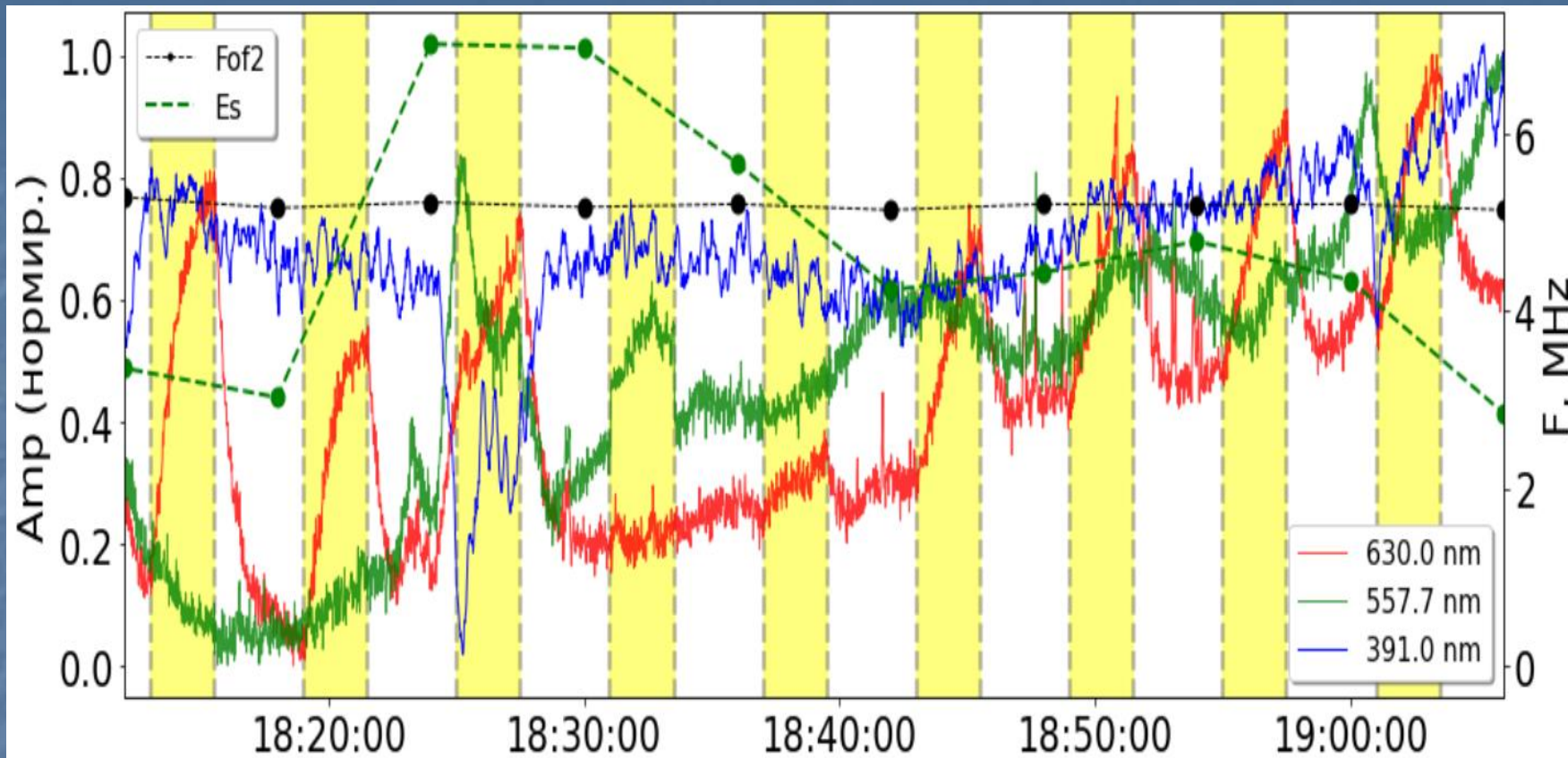
The system of differential equations describing the dynamics of $[O_2^+]$ and $[O^1D]$ under these reactions with account of the electron heating, takes the form:

$$\frac{d[O_2^+]}{dt} = k_1[O^+][O_2] - \alpha[O_2^+]N_e \quad (1)$$

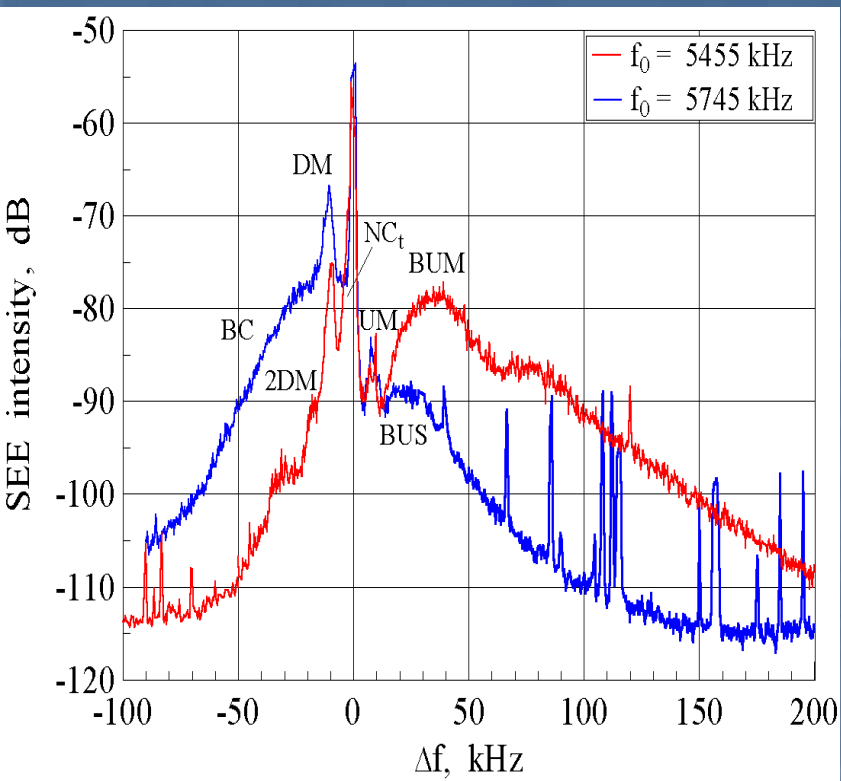
$$\frac{d[O^1D]}{dt} = \eta\alpha[O_2^+]N_e - \frac{1}{\tau_{\text{eff}}}[O^1D], \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - D_T \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} + \delta\nu_e(T_e - T_0) = Q_T. \quad (3)$$

[Legostaeva et al., <https://www.ursi.org/proceedings/procGA20/papers/PID6392623.pdf>]



Вариации интенсивности атмосферных эмиссий 391.4 нм (синяя кривая), 557.7 нм (зеленая кривая) и 630.0 нм (красная кривая) а также временной ход критической частоты f_oF_2 и E_s во время эксперимента 05.09.2021. Желтым обозначены периоды включения стенда Сура.



For further statement let me remind most prominent SEE spectral features for long pumping (spectra obtained at Sura):

- 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

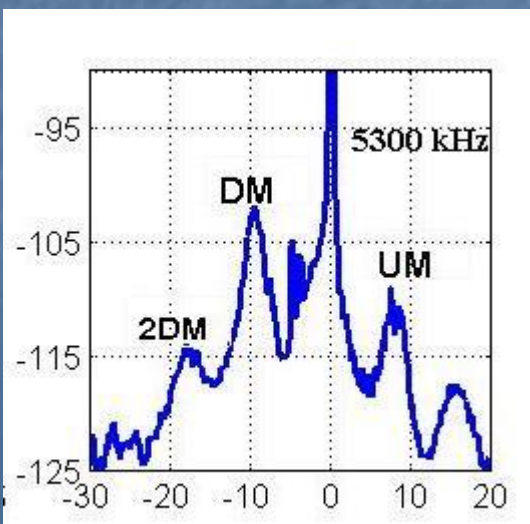
$$\Delta f_{BUM} \sim f_0 - n f_c + \delta f \quad (1)$$

exists for $f_0 \geq n f_c$, $\delta f = 15-20$ kHz

- DM family (UM, 2DM, 2UM)
- Broad continuum (BC): Broad Upshifted Structure (BUS)

Top: $f_0 > n f_c$

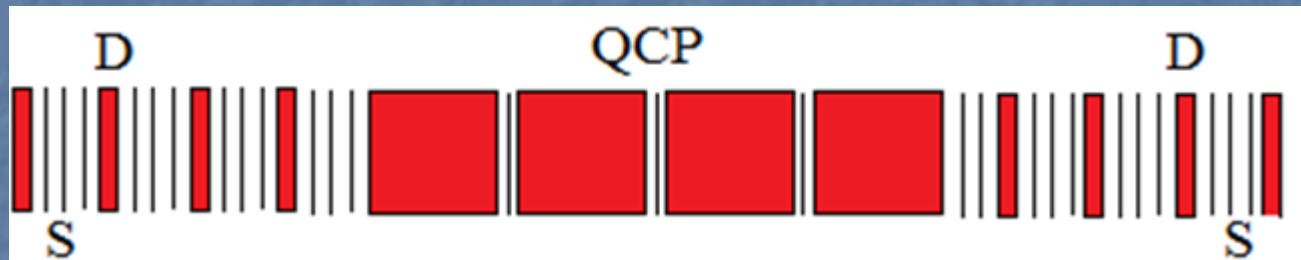
Bottom: $f_0 < n f_c$



10. Additional ionization (artificial layers) at the HAARP facility

Descending layers of artificial ionization during high-duty cycle injections at MZ (Sergeev et al., PRL, 2013).

Radiation scheme: an alternation of quasi-continuous pump wave (QCP) radiation (70-180 ms "on", 20 -30 ms "off") during 1 minute and the low duty cycle pulse pumping (τ_1 , IPP₂). For sounding heated volume we used also short pulses of the pump wave (τ_2 , IPP₂), the radiation scheme is shown in the figure



Low duty cycle: $\tau_1 = 5 \dots 50$ ms, IPP₁ = 1...10 s

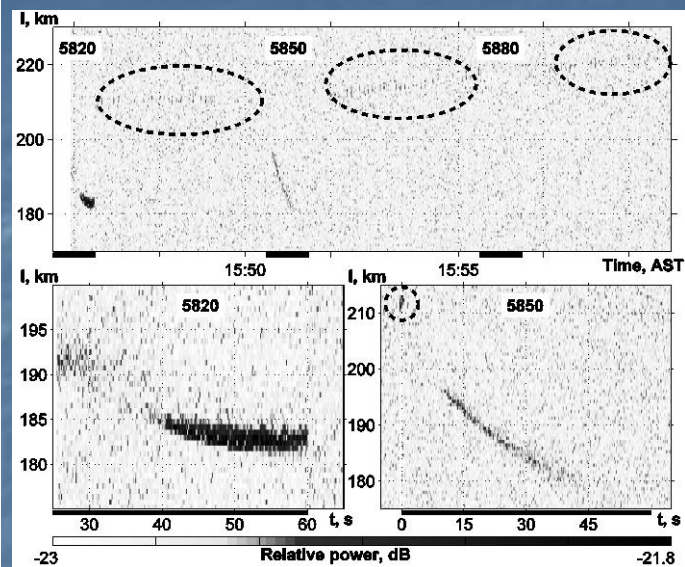
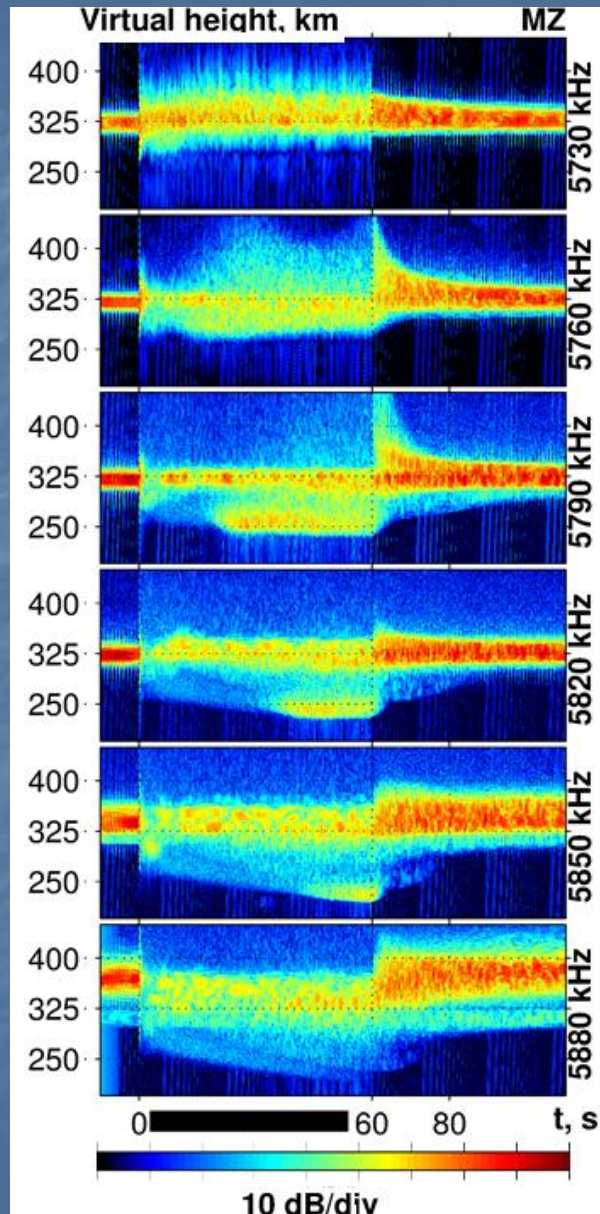
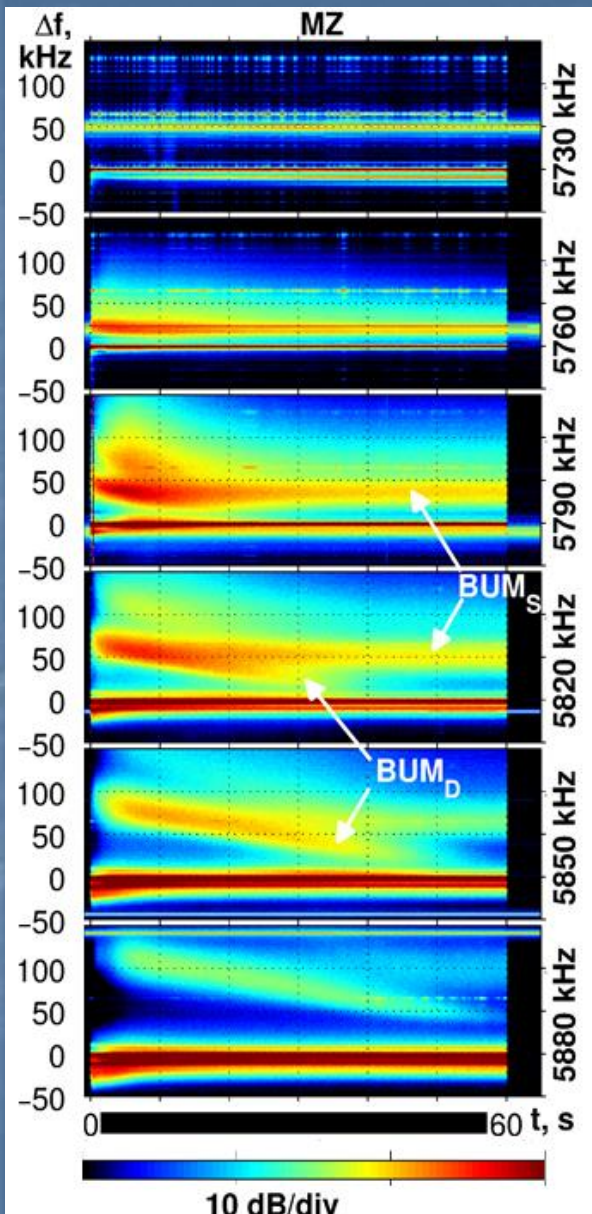
Low (diagnostic) duty cycle $\tau_2 = 100$ μ s, IPP₂ = 100...200 ms

High duty cycle: $\tau = 160$ ms, IPP = 200 ms

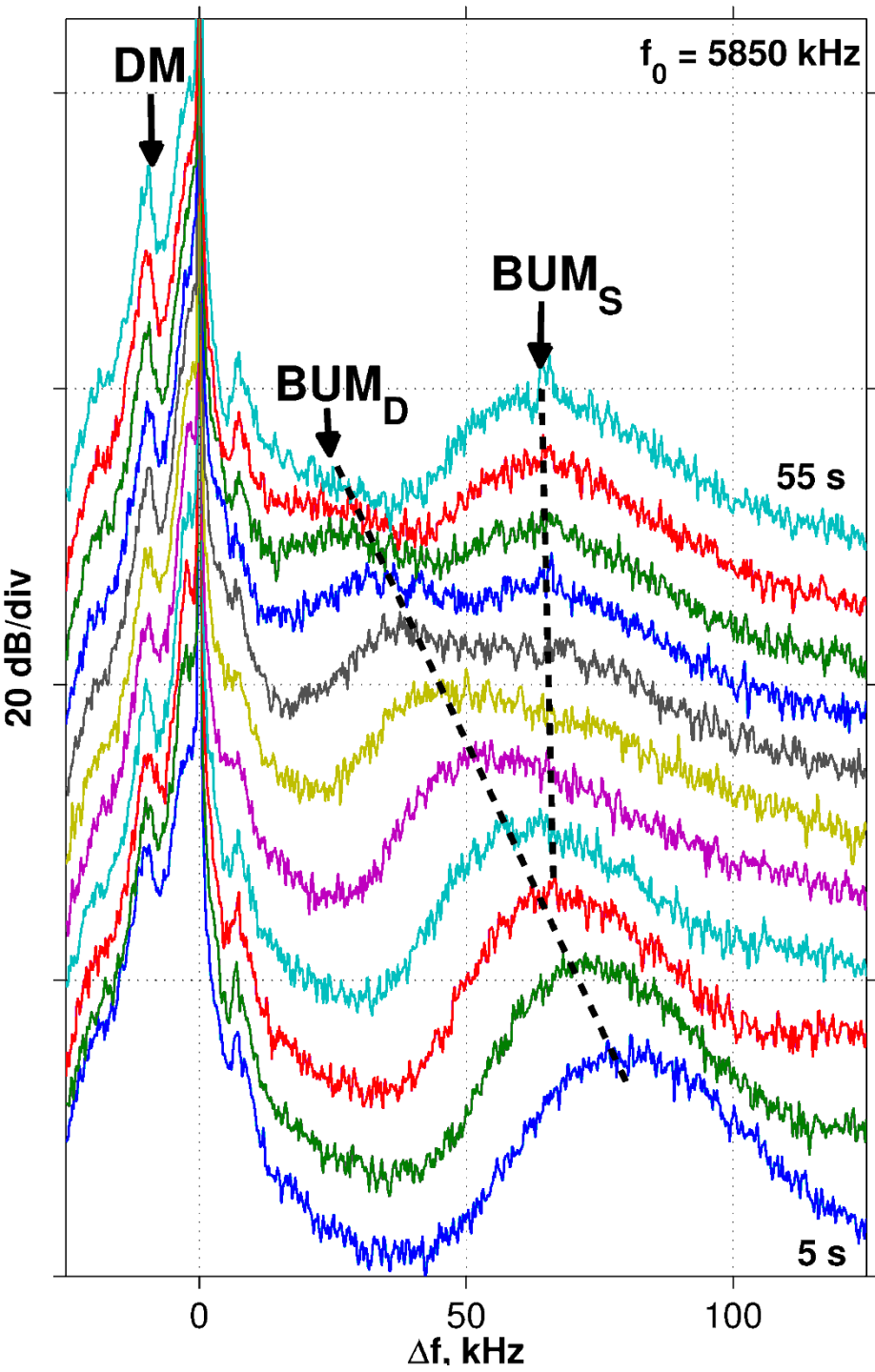
Low (diagnostic) duty cycle $\tau_2 = 100$ μ s, IPP₂ = 200 ms, $\tau_{\text{delay}} = 180$ ms

28.03.2011, HAARP, $P_{ef} = 1,7$ GW, MZ pumping

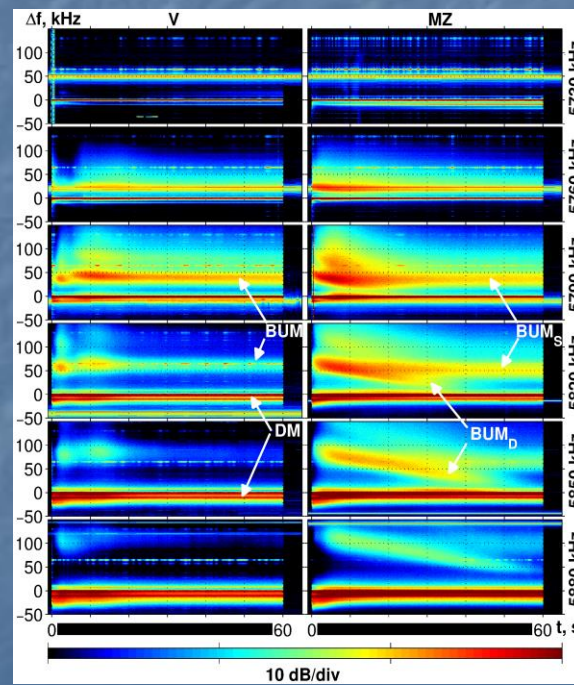
Спектрограммы ИРИ Действующие высоты отражения диагностических импульсов



(top) Сигналы плазменной линии (ПЛ) радара **MUIR**.
 (bottom) Увеличенные изображения для $f_0 = 5820$ (left) и 5850 (right) kHz. Dashed lines encircle the enhanced PL echoes during low duty cycle periods near the reflection height h_r and at the onset of the high duty cycles



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

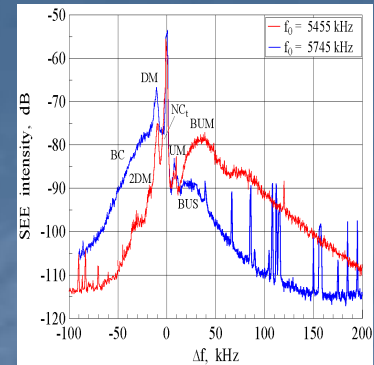
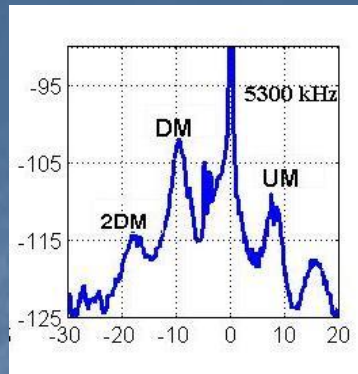
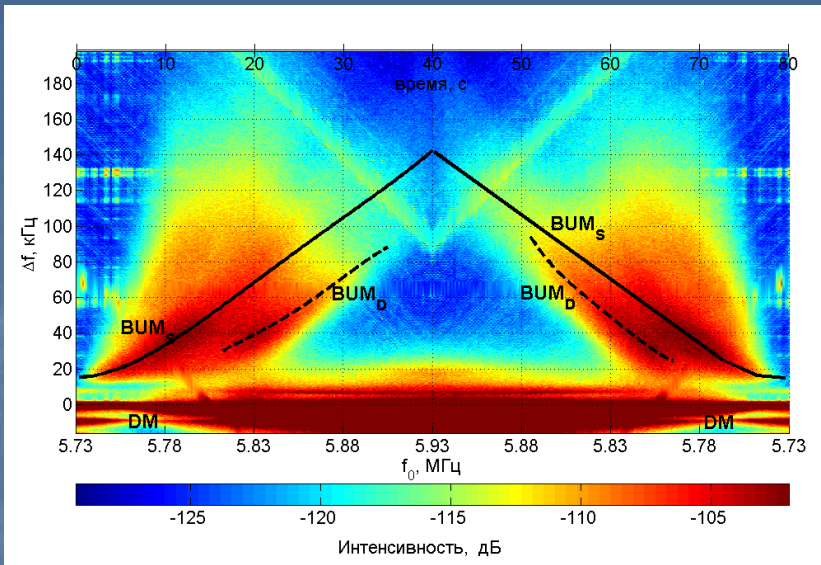


5730 kHz
5760 kHz
5790 kHz
5820 kHz
5850 kHz
5880 kHz

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

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

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



Typical SEE spectra for $f_0 < 4f_c$ (left) and for $f_0 > 4f_c$ (right)

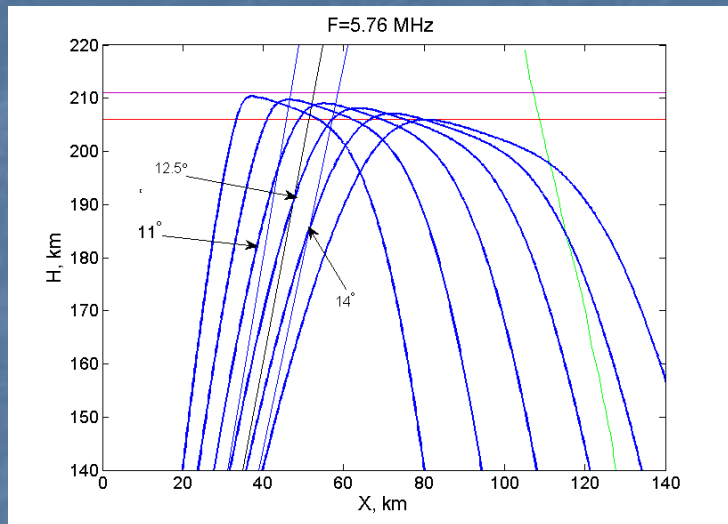
SEE spectrogram from 200th по 280th seconds.

BUM_D was present at smaller Δf for $f_0 > f^* \sim 5800$ кГц (somewhat larger f^* and smaller BUM_D intensity occur during up-sweep). Assuming (1)

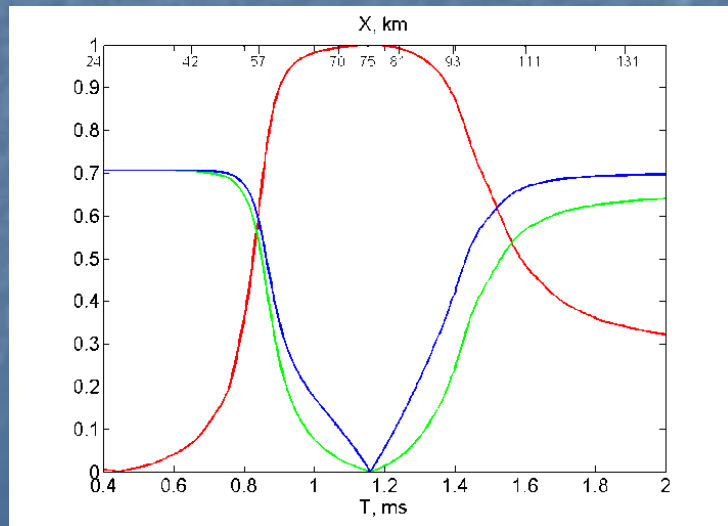
$$\Delta f_{BUM} \sim f_0 - n f_c(h) + \delta f \quad (1)$$

to be valid, we can estimate that BUM_D is generated in the artificial ionization layer, 8-10 km below the background F -layer.

The minimum DM during the sweeps, which indicates the double resonance condition that $f_0 \approx f_d \approx 4f_c(h_d) \approx 4f_{uh}(h_d)$ (f_{uh} is the upper hybrid frequency, h_d – is the double resonance altitude) in the background ionospheric plasma, occurred at 5759 -5764 kHz.



Upper panel: Ray tracing for the experiment with fast sweep of the pump wave frequency (March 28, 2011), $f_0=5.76$ kHz. Gray lines correspond to MUIR antenna pattern (central line directed to magnetic zenith).



Lower panel: Polarization of the pump wave along the ray trace with the ray exit angle 12.5° to the vertical. Blue line is the projection of the polarization vector $\mathbf{E}_0/|\mathbf{E}_0|$ to the axis x_0 ($x_0 \perp \mathbf{B}$ in the magnetic meridian plane), the green line is the projection on y_0 ($y_0 \perp x_0, \mathbf{B}$), and the red line is the projection on $z_0 \parallel \mathbf{B}$ (\mathbf{E}_0 is the electric field of the pump wave).

Inside the radar beam, near the top of the ray trace (reflection point) the PW is polarized mainly along the magnetic field \mathbf{B} . So, PL just after the pump switch on and during short pulses after the pump switch off is generated mostly by reflected pump wave

During long-term pumping (>5 s), the energy is pumped into plasma waves propagating across geomagnetic field \mathbf{B} near local upper hybrid resonance. This follows from:

- 1) the presence of the UH-related DM and BUM in the SEE spectra;
- 2) the PL generation height (range) gluing to the 4th CR height;
- 3) weakening of the PL at $f_0 \sim f_d$;
- 4) PL generation heights (range) are considerably less than PW plasma resonance and PW reflection heights. Here pump wave is polarized mainly across the magnetic field \mathbf{B} .

Excitation of the Langmuir waves propagating along \mathbf{B} occurs, most likely, due to plasma wave energy transfer from “transversal” UH to “longitudinal” Langmuir waves over angles. For $f_0 > 4f_c$ ($f > f^*$), the energy transfer is less effective due to presence of the other energy “consumers”, such as electron acceleration and additional ionization. Therefore, the plasma UH waves excited by PW do not have enough energy to achieve longitudinal direction under the transfer.

QUESTIONS:

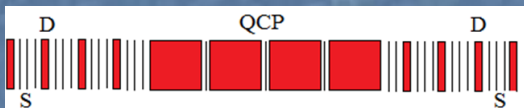
- 1) Why the PL generation is glued to the 4th cyclotron resonance?
- 2) Why during the up-sweep the PL is generated for both $f_0 > 4f_c$ and $f_0 < 4f_c$, but at the different frequency offsets $|\Delta f_g|$?
- 3) Is the result general or belongs only to the particular experiment described?
- 4) Why the PL behavior is different for 3rd cyclotron resonance?

9. Modification of the electron density profile near the altitudes of HF-pump wave energy contribution to the ionospheric plasma, a dependence of the modification on the frequency mismatch between f_0 and $4f_c$ [Shindin et al, RS, 2012, Sergeev et al, RS, 2016, Shindin et al, Remote sensing, 2021].

The Doppler frequency shifts vs. time t and diagnostic wave spectral component frequency shift $f_i - f_0$. The arrows correspond to the plasma frequency at the UH height.

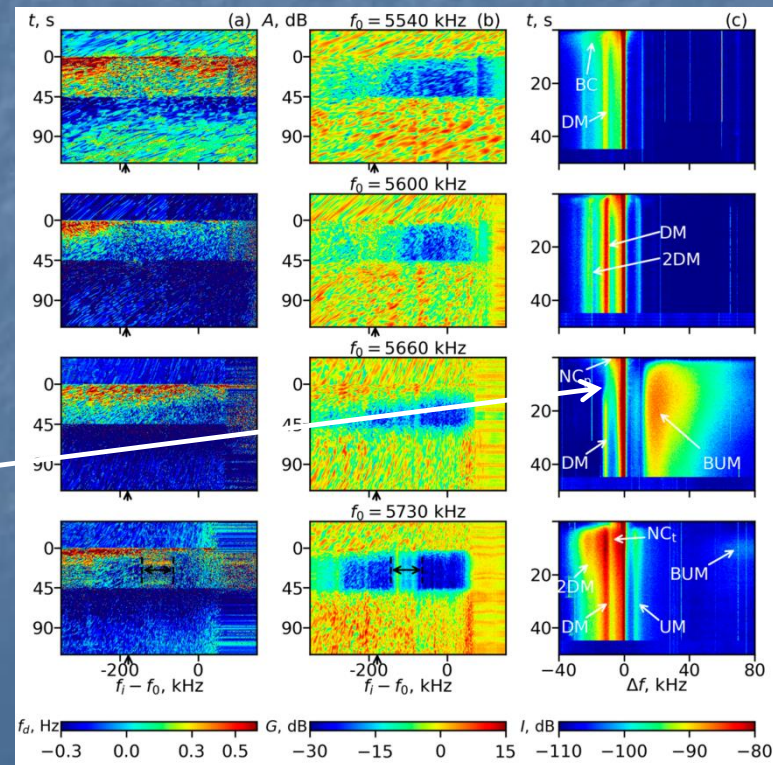
Normalized amplitude of the diagnostic waves G (color) vs. t and frequency shift $f_i - f_0$.

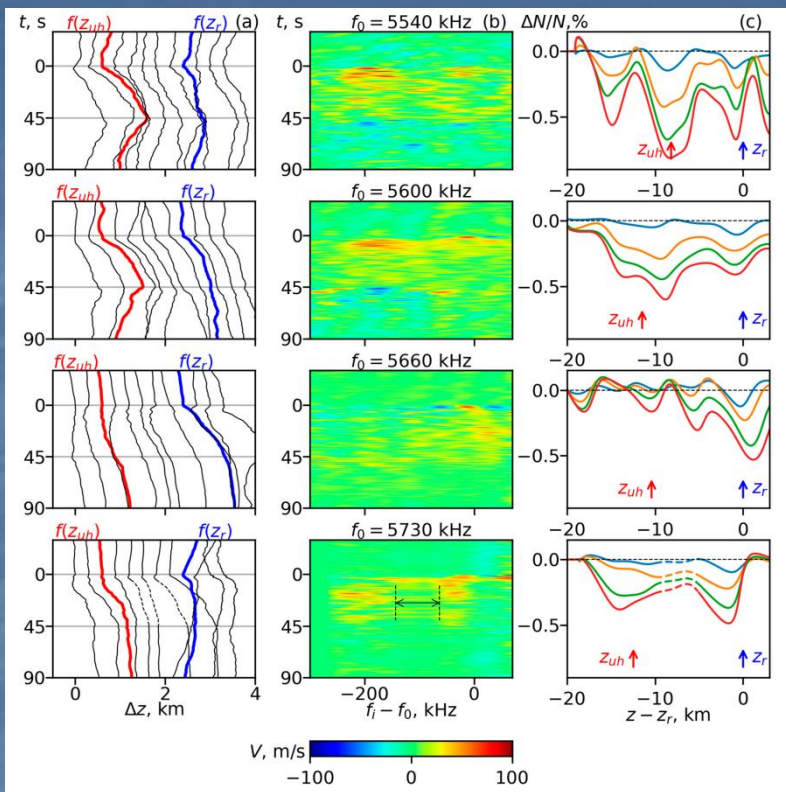
The SEE spectrograms. The SEE features (NC_{pr}, NC_{tr}, DM, 2DM, UM, BC and BUM) are marked.



HAARP, June 04, 2014. Vertical pumping, $P_{ef} = 400$ MW.
 $(-150) \text{ kHz} \leq f_0 - 4f_c \leq (+75) \text{ kHz}$

The third panels is close to the double resonance conditions $f_0 \approx f_{UH} \approx 4f_c$: the DM is almost absent.





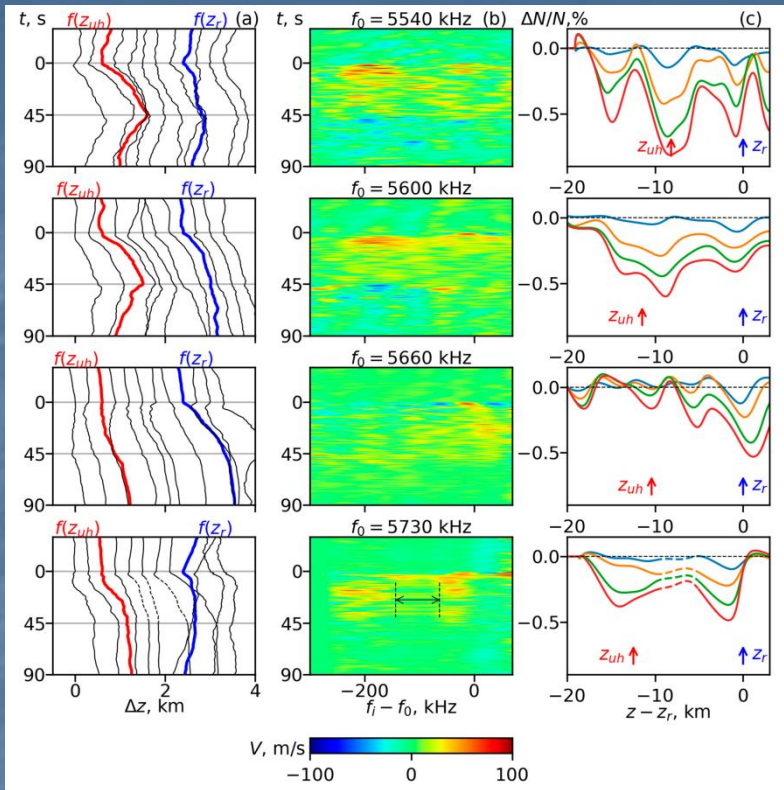
Results of the phase data processing.

Column (a): Temporal variations of the reflection height shifts of different spectral components of the sounding pulses $\Delta z(f_i, t)$ for different f_0 . The frequency step between shown spectral components $\Delta f_i = 60$ kHz, starting from f_0 . An additional height shift of 300 m between the reflection heights of the successive shown frequencies f_i at $t = 0$ is added for clarity. Red and blue lines correspond to the spectral components that were reflected from z_{UH} and z_r .

(b): Velocity of the sounding waves reflection height displacement vs. time and frequency.

(c): Relative variations of the electron density $[\Delta N(t) - N(0)]/N(0)$ vs. height at $t = 5$ s (blue), 15 s (orange), 30 s (green) and 45 s (red) in the same cycles. Double arrows show the contaminated frequency range for the data processing.

It was obtained that for all f_0 , the pump-plasma interaction developed most quickly (in a few milliseconds) after the PW switched on in the vicinity of the pump wave reflection height z_{r0} . This was accompanied by the plasma expulsion from the interaction region (reflection depletion, RD), uplifting of the PW reflection point and the NC_p SEE feature generation.



Later, during the 1–5 s after the PW was switched on, for $f_0 < 4f_c$, the plasma expulsion from the vicinity of the upper hybrid height z_{UH0} (the UH depletion (UHD) development) began, along with the development of the PW and diagnostic wave anomalous absorption, UH-related SEE features, such as DM, 2DM, UM and BC, the suppression (overshoot) of the NC_p feature and slowing down of expulsion from the vicinity of z_{r0} . During 3–10 s, the UHs became deeper than the RDs. The expulsion from the upper hybrid height continued until the end of the 45 s long QCW pumping.

Similar behavior, but with some quantitative differences, are observed for $f_0 > 4f_c$.

For $f_0 \approx 4f_c$ (3rd row) the temporal behavior of $M(z, t)$ demonstrated a deepening quasi-periodic structure with a period ~ 3 –4 km and an amplitude that grew in time and went downward from z_{r0} and occupied a height interval that exceeded the spacing between z_{r0} and z_{UH0} . The source of the PW energy input into ionospheric plasma and excitation of the UH waves and striations are strongly suppressed.

Спасибо за внимание!