



# Искусственные возмущения в высокоширотной F-области ионосферы, вызванные воздействием мощных КВ радиоволн комплекса EISCAT/Heating

*Н.Ф. Благовецкая, Т.Д. Борисова, А.С. Калишин*

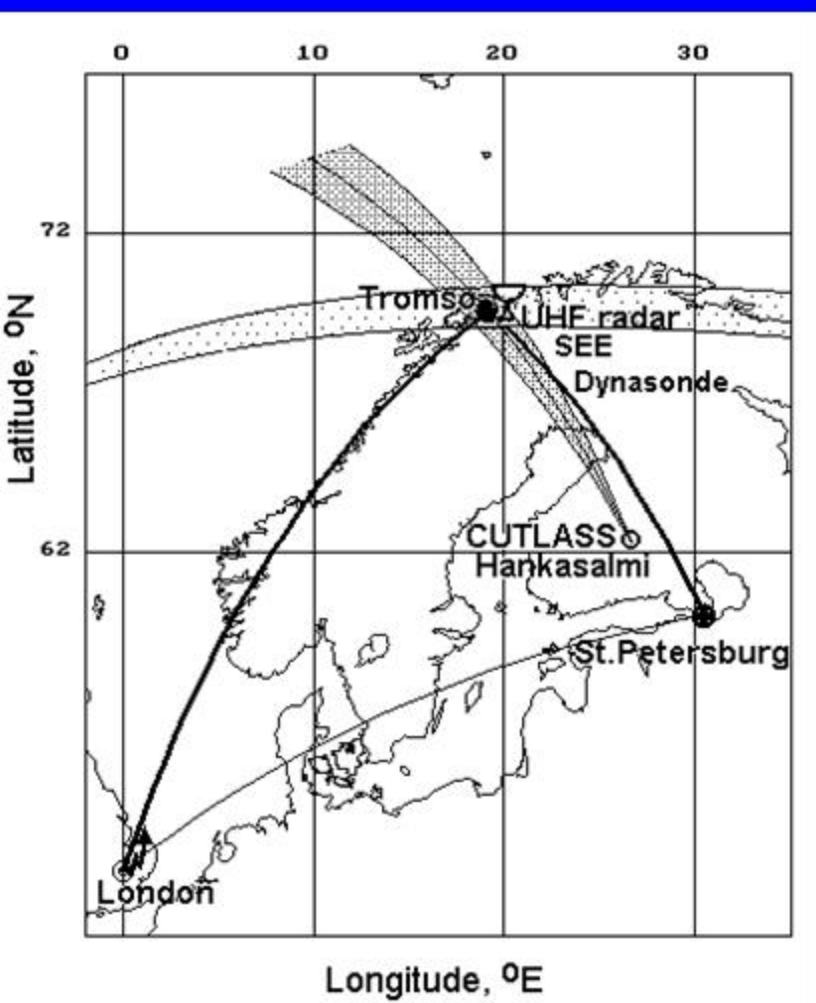
*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, [nataly@aari.nw.ru](mailto:nataly@aari.nw.ru)*

- Вторая всероссийская научная конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 24 – 28 сентября 2018, г. Мурманск

Основное внимание будет уделено результатам исследований ААНИИ искусственных ионосферных возмущений, возбуждаемых в F области высокоширотной ионосферной плазме мощными КВ радиоволнами комплекса EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) X-поляризации (и их сравнению с эффектами при O-поляризации) на частотах нагрева в диапазоне 4.0 – 8.0 МГц как выше, так и ниже критической частоты слоя F2 ( $f_{\text{H}} / foF2 > 1$  и  $f_{\text{H}} / foF2 \leq 1$ ). Эксперименты в Тромсе выполнялись в 2009 – 2016 г.г. в рамках Соглашения между Европейской научной ассоциацией EISCAT и ААНИИ (две серии экспериментов ежегодно).

- Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН);
- Параметры ионосферной плазмы (Ne, Te, Vi);
- Параметрическая распадная (стрикционная) неустойчивость (EMo L + IA);
- Искусственное оптическое излучение;
- Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ).

# Геометрия экспериментов, методы и средства диагностики



**КВ** нагревной комплекс **EISCAT** в Тромсе излучал на частотах нагрева ( $f_H = 4 - 8$  МГц) на ФАР 1 или 2, обеспечивающую максимальную эффективную мощность излучения 1200 МВт и 250 МВт соответственно.

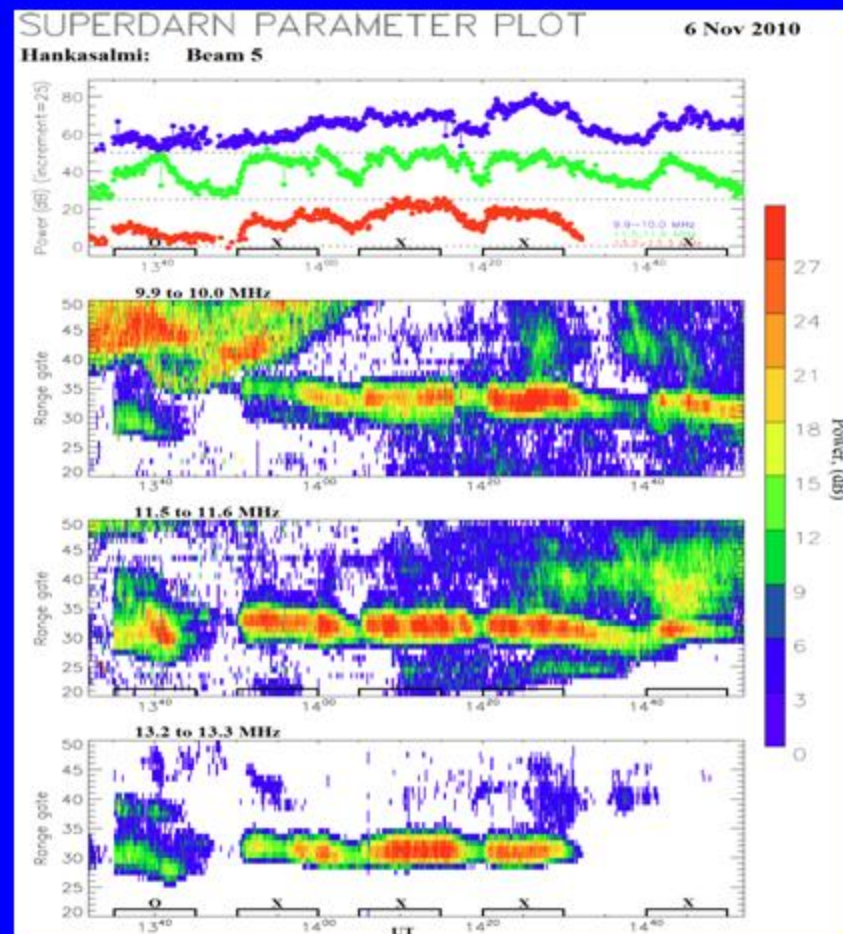
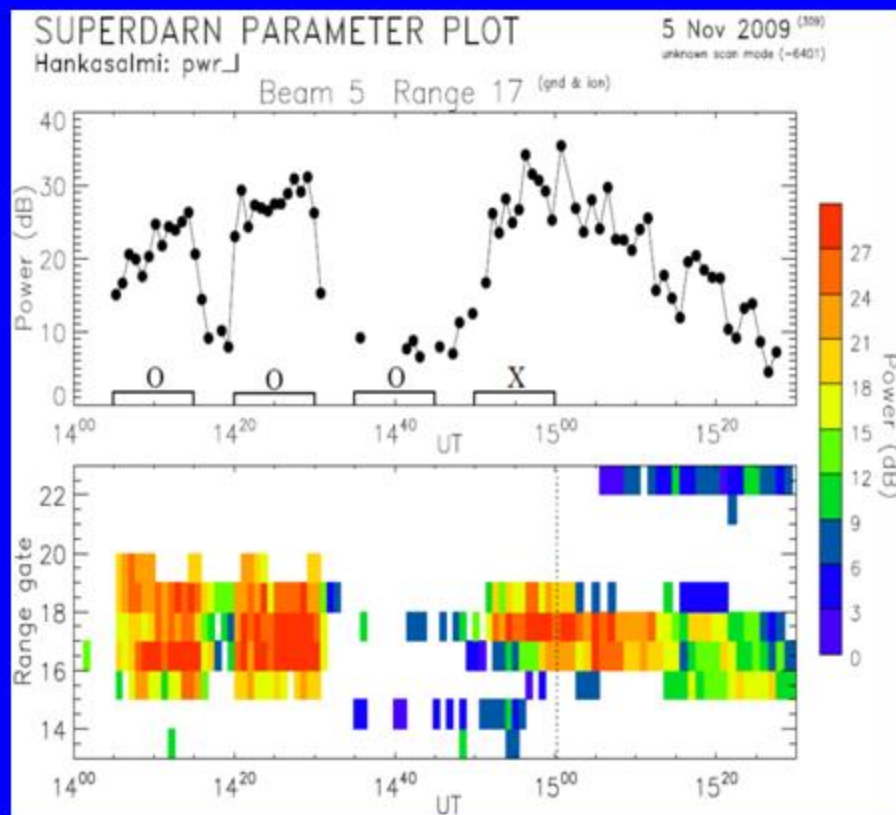
**Диагностические средства:**

- Радар некогерентного рассеяния **EISCAT** на частоте 930 МГц в Тромсе в диапазоне высот от 70 до 800 км с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 3 (1.5) км;

- Система КВ радаров **CUTLASS (SUPERDARN)** в Финляндии : измерения на одном луче (луч 5) стерео-мода (на нескольких частотах).

- Аппаратура для регистрации узкополосного ИРИ, многоканальный КВ доплеровский комплекс и ЛЧМ комплекс НЗИ, установленные на НИС Горьковская вблизи С. Петербурга.

# Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

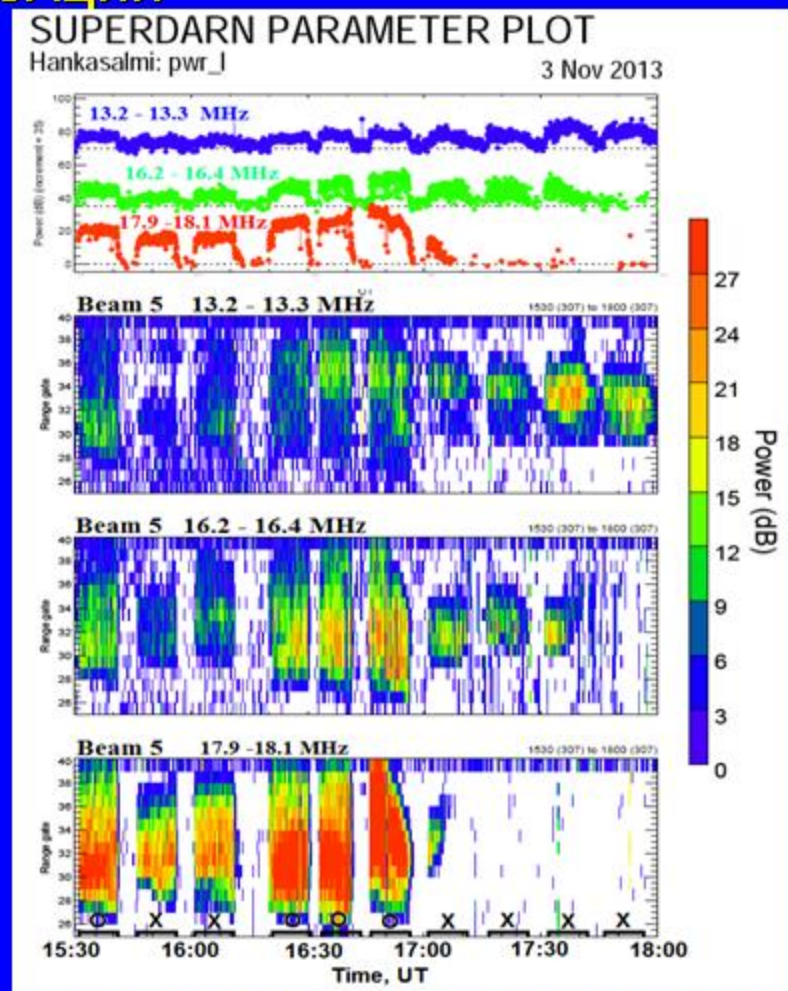
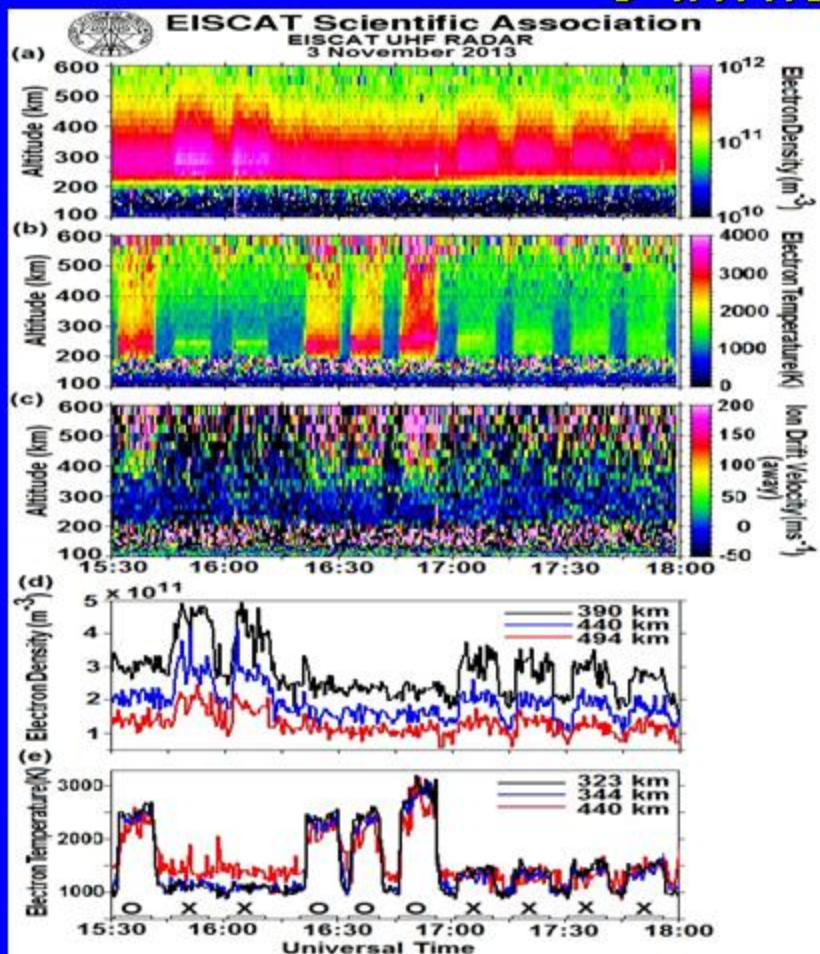


Backscattered power from the Hankasalmi (Finland) SuperDARN radar (beam 5) at  $f \approx 10$  MHz on 5 November 2009 at  $f_H = 4.040$  MHz (ERP = 130 MW) and 6 November 2010 at  $f \approx 10, 11.5,$  and  $13$  MHz for contrasting O/X-mode heating at  $f_H = 4.5$  MHz.

at  $f_H = 4.5$  MHz (ERP = 150 MW). The HF pump wave was radiated towards MZ by 10 min on, 5 min off transmission pulses by using phased array 2.

X-mode wave:  $f_X^2 = f_H(f_H - f_{ce})$ ; O-mode wave:  $f_O^2 = f_H^2$   $f_{UH}^2 = f_H^2 - f_{ce}^2$

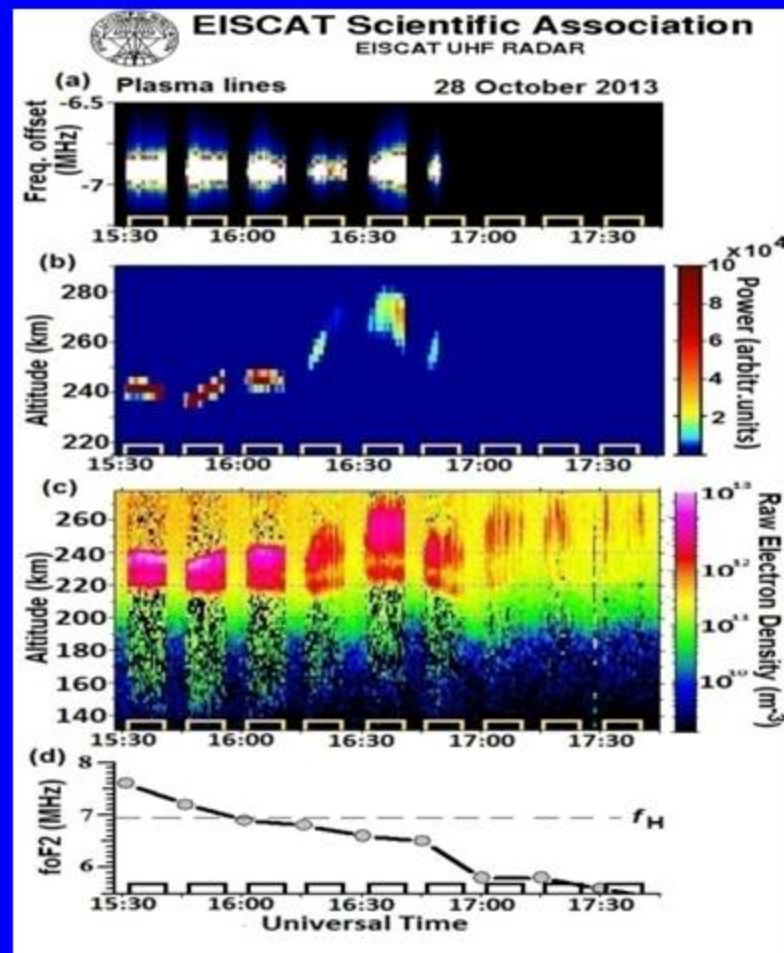
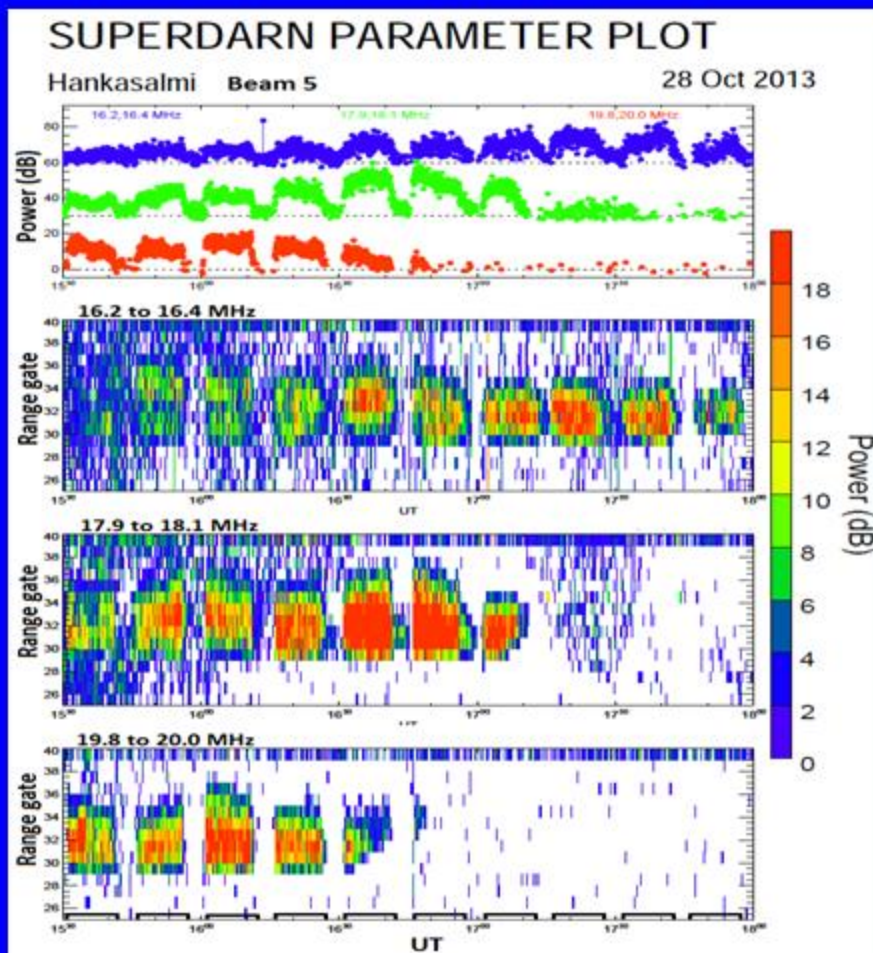
# СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИ НАГРЕВЕ КВ РАДИОВОЛНАМИ О- и Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ



Поведение  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $V_i$  по данным EISCAT UHF радара НР в Тромсе 3 ноября 2013 г. с 15.30 до 18.00 UT. Мощная КВ радиоволна О/Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза на частоте 6.2 МГц на ФАР 1 (Рэфф = 550 МВт). Критическая частота foF2 уменьшалась от 6.7 МГц в 15.30 UT to 5.3 МГц в 15.30 UT ( $f_H / foF2 = 0.92 - 1.2$ ).

Поведение МИИН по данным радара CUTLASS в Ханкасалми на частотах 13, 16 и 18 МГц ( $I_{\perp} \approx 11.5, 9.3$  и  $8.3$  м) в период эксперимента 3 ноября 2013 г. с 15.30 до 18.00 UT ( $f_H / foF2 = 0.92 - 1.2$ ).

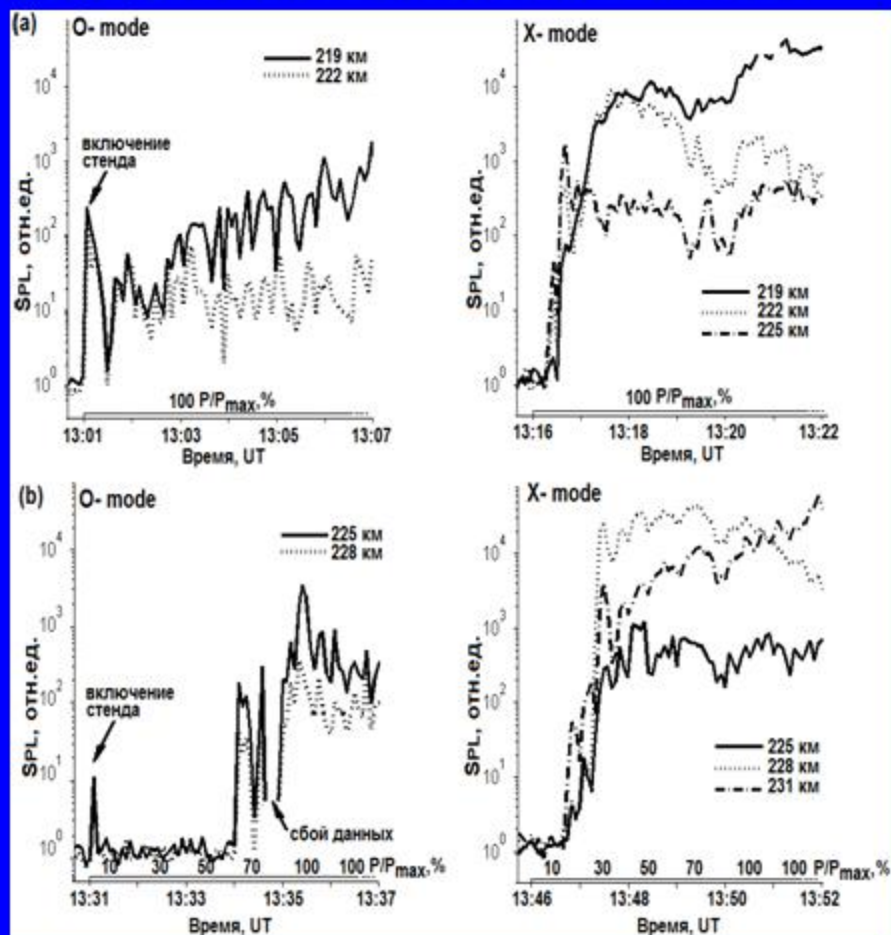
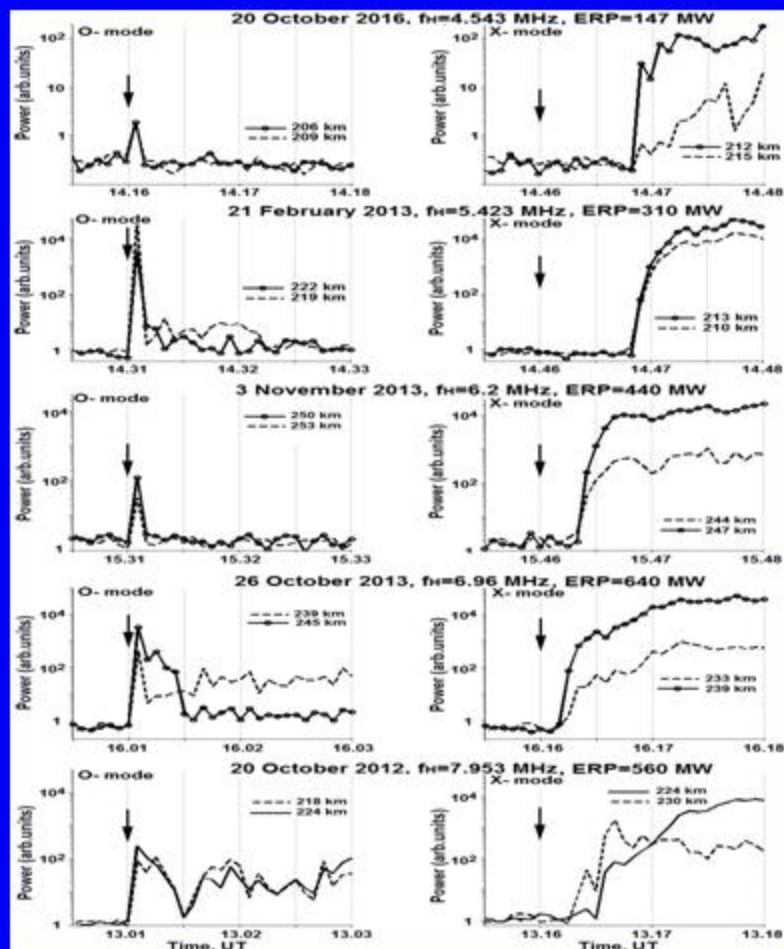
# МИИН и ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ РАСПАДНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ



Мощность рассеянных на МИИН сигналов по данным КВ радара CUTLASS (SuperDARN) (луч 5) на частотах 16, 18 и 20 МГц ( $f_1 \approx 9.3, 8.3$  и  $7.5$  м) 28 октября 2013 в 15.30 – 18 UT для X-нагрева на  $f_H = 6.96$  МГц ( $P_{eff} = 550$  МВт). Значения foF2 падали от 7.6 до 5.3 МГц ( $f_H / foF2 = 0.91 - 1.35$ ).

Плазменные и усиленные нагревом ионные линии в спектрах сигналов радара HP 28 октября 2013 г. с 15.30 до 18 UT. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на частоте 6.96 МГц в направлении магнитного зенита ( $P_{эфф} = 550$  МВт). Значения foF2 падали от 7.6 до 5.3 МГц ( $f_H / foF2 = 0.91 - 1.35$ ).

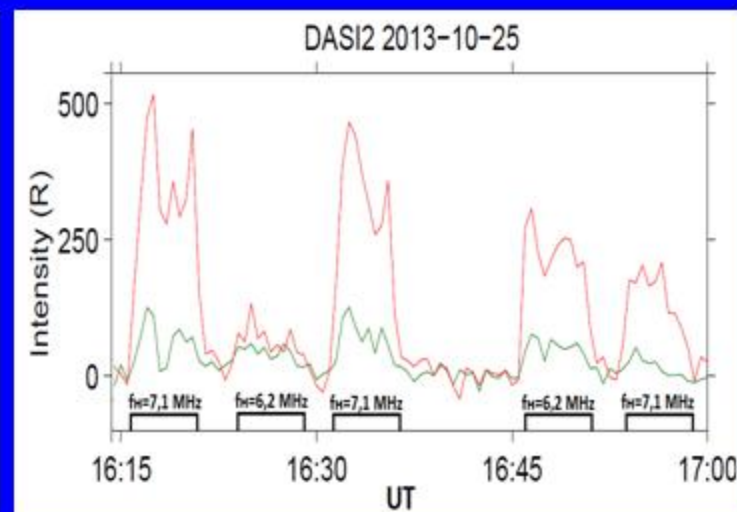
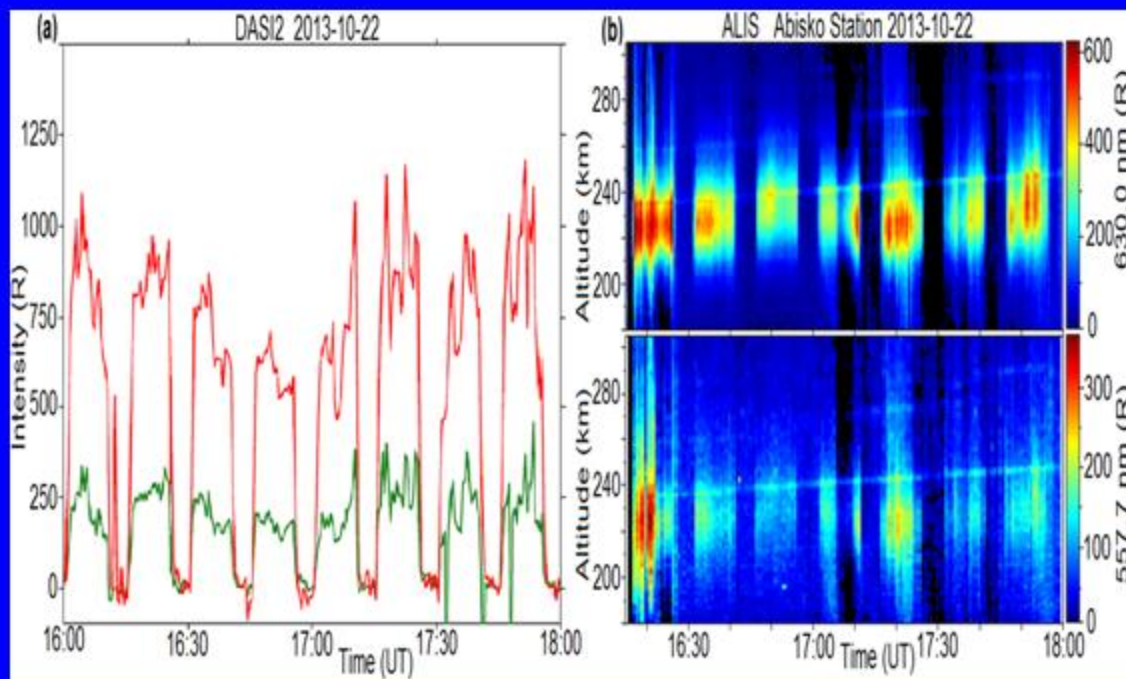
# ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ РАСПАДНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ



The maximum power of HFPL at the pump frequencies of 4.543, 5.423, 6.2, 6.96, and 7.953 MHz during 30 s before and the first two min of the pump pulse for O- and X-mode pulses from EISCAT UHF radar measurements. The power of the HFPLs was found as the maximum in spectra derived every 5 s with 3 km altitude steps.

Вариации интенсивностей HFPL от времени в первые шесть минут нагревных циклов 20 октября 2012 г. в период с 13.01 – 13.56 UT при O- (слева) и X- (справа) нагреве, Эффективная мощность излучения на частоте 7.953 МГц была постоянной  $P_{\text{eff}} = P_{\text{max}}$  (а) или изменялась каждую минуту по схеме:  $P_{\text{eff}} = 10\text{-}30\text{-}50\text{-}75\text{-}100\text{-}100\%$  от  $P_{\text{max}}$  (б).

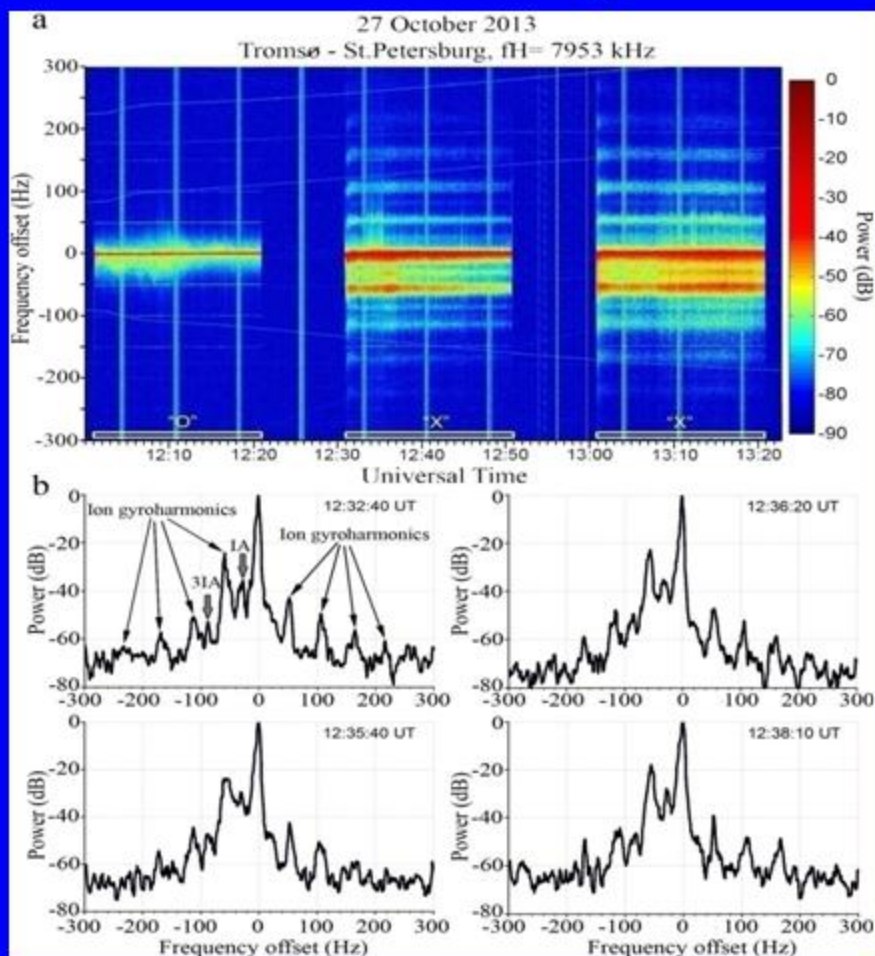
# Искусственное оптическое излучение при X-нагреве



Искусственное оптическое излучение 22 октября 2013. Мощная волна X-поляризации излучалась на частоте 7.1 MHz в МЗ с 16 – 18 UT циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза (а) Интенсивность оптических излучений в красной (630.0 нм) и зеленой (557.7 нм) линиях по данным DASI-2 в Тромсе (EISCAT). (b) Кеограммы красной и зеленой линий, полученные на станции Абиско (система ALIS). Значения foF2 падали с 8.2 до 7.2 МГц.

Интенсивность оптических излучений в красной и зеленой линиях по данным DASI-2 25 октября 2013 с 16.15 – 17 UT. Мощная X-волна излучалась на частотах 7.1 / 6.2 MHz в МЗ циклами 5 мин нагрев, 2.5 мин пауза. Критическая частота foF2 падала с 6.9 МГц в 16.15 UT до 6.5 MHz в 17 UT.

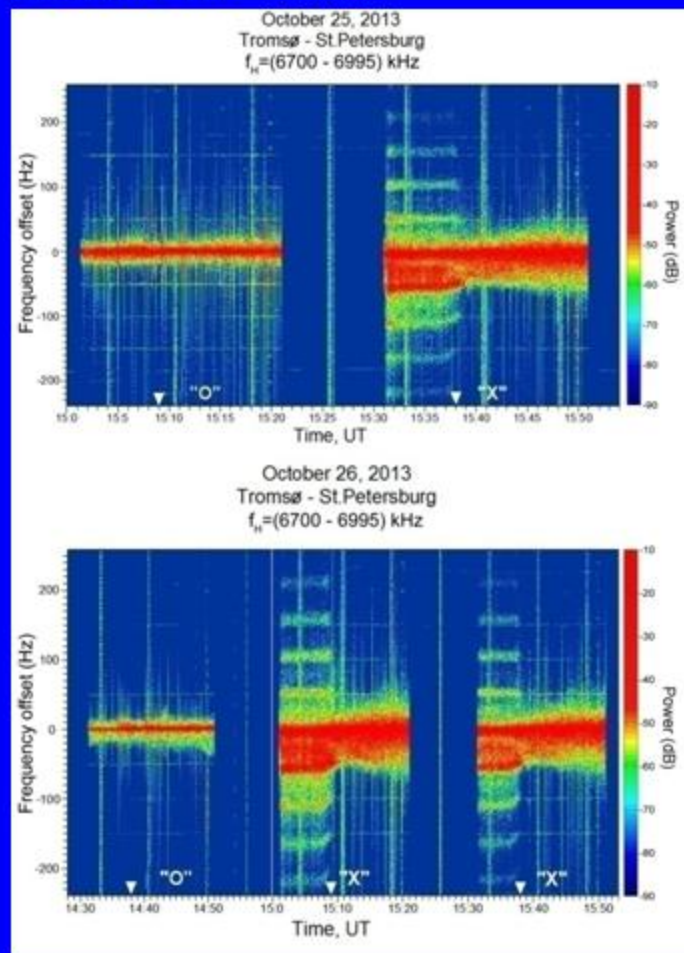
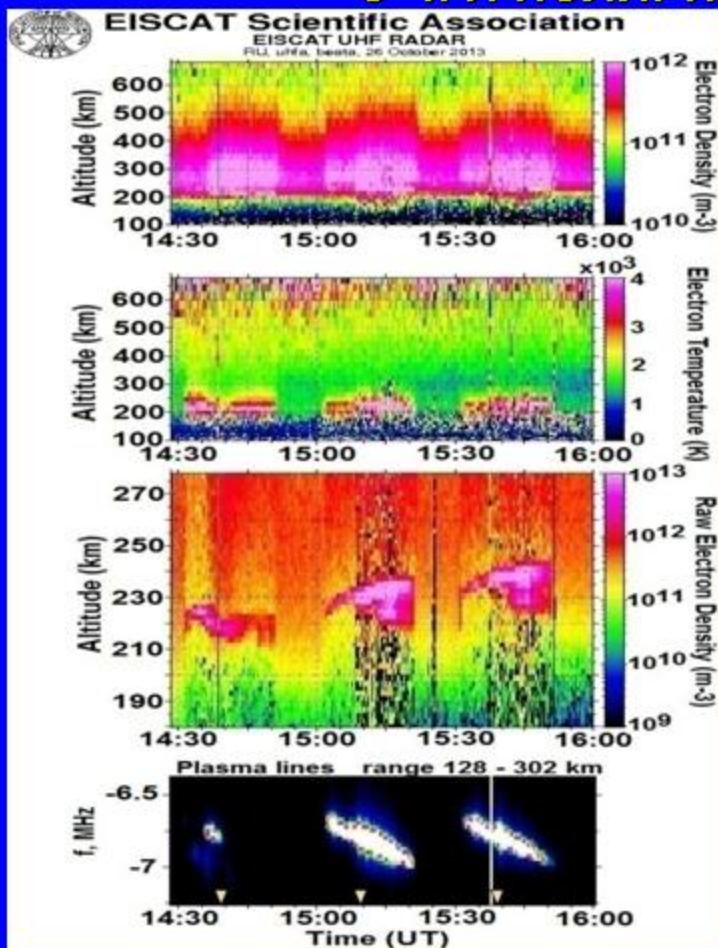
# Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы



- SBS  $EM_o \rightarrow IA / EIC + EMs$
- Matching condition
- $\omega_o = \omega_s + \omega_{IA}$
- $k_o = k_s + k_{IA}$ , where  $k_o$ ,  $k_s$ ,  $k_{IA}$  are the wave number for the upward EM pump, scattered electromagnetic wave and ion acoustic wave.
- Ion Bernstein waves.
- This is the parametric decay of the pump wave into EB and neutralized IB waves (otherwise known as electrostatic ion cyclotron harmonic waves);

Спектрограмма нагревного сигнала в полосе 600 Гц, зарегистрированная при альтернативном O/X-нагреве вблизи С.-Петербурга 27 октября 2013 г. с 12 до 13.30 UT (a) и спектры, полученные в 12.32.40, 12.35.40, 12.36.20, and 12.38.10 UT в течение цикла X-нагрева с 12.31 до 12.51 UT (b). Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 7.953 МГц в направлении магнитного зенита циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла 650 МВт.

# СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИ НАГРЕВЕ КВ РАДИОВОЛНАМИ О- и Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ вблизи $f_H = 5f_{ce}$



Поведение  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $N_r$  и мощности плазменных линий по данным EISCAT UHF радара HP в Тромсе 26 октября 2013 г. с 14.30 до 16.00 UT. Мощная КВ радиоволна О/Х-поляризации излучалась на ФАР 1 (Рэфф = 650 МВт) в направлении магнитного зенита циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза при ступенчатом изменении  $f_H$  от 6700 до 6995 кГц.

Спектрограмма нагревного сигнала в полосе 600 Гц, зарегистрированная при альтернативном О/Х-нагреве вблизи С.-Петербурга 25 и 26 октября 2013 при ступенчатом изменении  $f_H$  от 6700 до 6995 кГц. Рэфф = 650 МВт.

# Заключение

- Показана возможность создания интенсивных возмущений в высокоширотной  $F$ -области ионосферы при  $X$ -нагреве на частотах ( $f_H = 4.0 - 8.0$  МГц) как при  $f_H / foF2 > 1$ , так и при  $f_H / foF2 \leq 1$ , включая генерацию МИИН, возбуждение PDI (генерация ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн), возрастание  $N_e$  до 100% в широком диапазоне высот вдоль направления магнитного поля и др.
- Установлено, что интенсивные МИИН и PDI (HFPLs и HFILs) одновременно сосуществуют в течение всего цикла  $X$ -нагрева.
- Обнаружен эффект магнитного зенита для явлений, возбуждаемых при  $X$ -нагреве.
- Обнаружено, что при  $X$ -нагреве в направлении МЗ происходит возбуждение разнообразных узкополосных спектральных компонент в спектре ИРИ, таких как IA, EIC, IB волны, регистрировавшиеся на расстоянии 1200 км от KB нагревного комплекса.