



НЕЛИНЕЙНЫЕ НЕРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F- ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН

**Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова,
А.О. Мингалева**

- **Государственный научный центр Российской Федерации**
 - **Арктический и антарктический научно-исследовательский институт**

- **nataly@aari.ru**

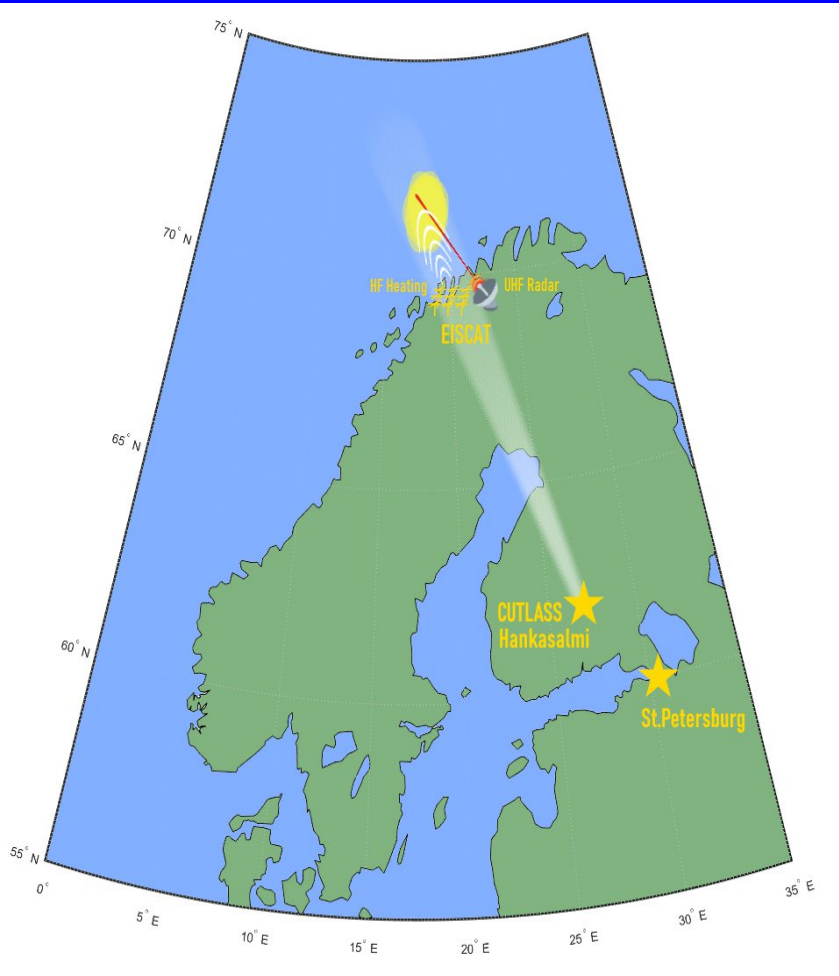
- **Международная научно-деловая конференция Polar 2026 “Современные комплексные исследования высоких широт Арктики”, С.-Петербург, 19-20 мая, 2026**

Цель работы – исследовать характеристики нелинейных явлений в высокоширотной F-области ионосферы при высоких эффективных мощностях излучения ($ERP > 350$ МВт). Экспериментальные результаты были получены на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в Тромсе, Норвегия (69.6° N, 19.2° E) с использованием разнообразных средств диагностики.

Основное внимание будет уделено:

- результатам исследования явлений, возбуждаемых в высокоширотной F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами O-поляризации при высоких мощностях излучения ($ERP = 350 - 840$ МВт), на частотах нагрева, как ниже критической частоты слоя F2 ($f_H \leq foF2$), так и существенно превышающих $foF2$ ($f_H - foF2 = 0.9-1.5$ МГц);**
- сравнению эффектов O- и X-нагрева.**

Геометрия экспериментов

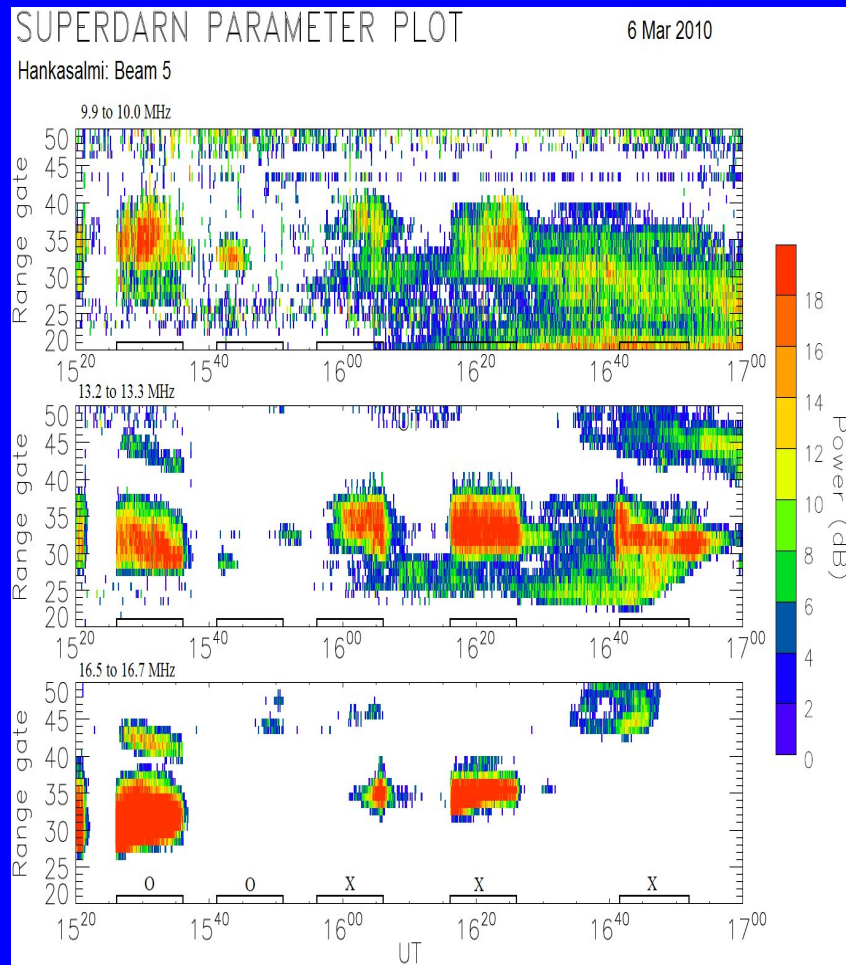
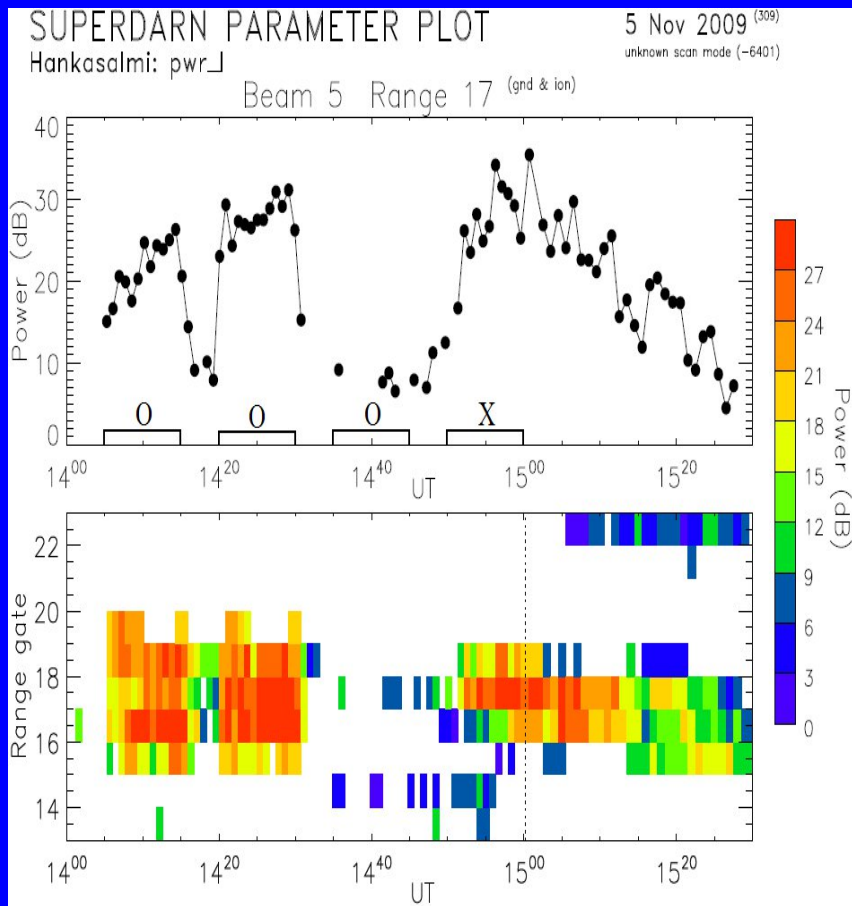


КВ нагревный стенд EISCAT/Heating в Тромсе излучал в направлении магнитного зенита волны накачки O- или X-поляризации на частотах в диапазоне $f_H = 5.5 - 8$ MHz при высоких эффективных мощностях излучения $ERP = 360 - 840$ МВт.

Диагностические средства:

- Радар некогерентного рассеяния EISCAT на частоте 930 МГц в Тромсе в диапазоне высот от 80 до 700 км;
- КВ радар CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии на нескольких частотах;
- Аппаратура для регистрации УИРИ в полосе ± 1 кГц относительно f_H вблизи С.-Петербурга (на расстоянии ~ 1200 км от нагревного стенда) ;
- Ионозонд в Тромсе.

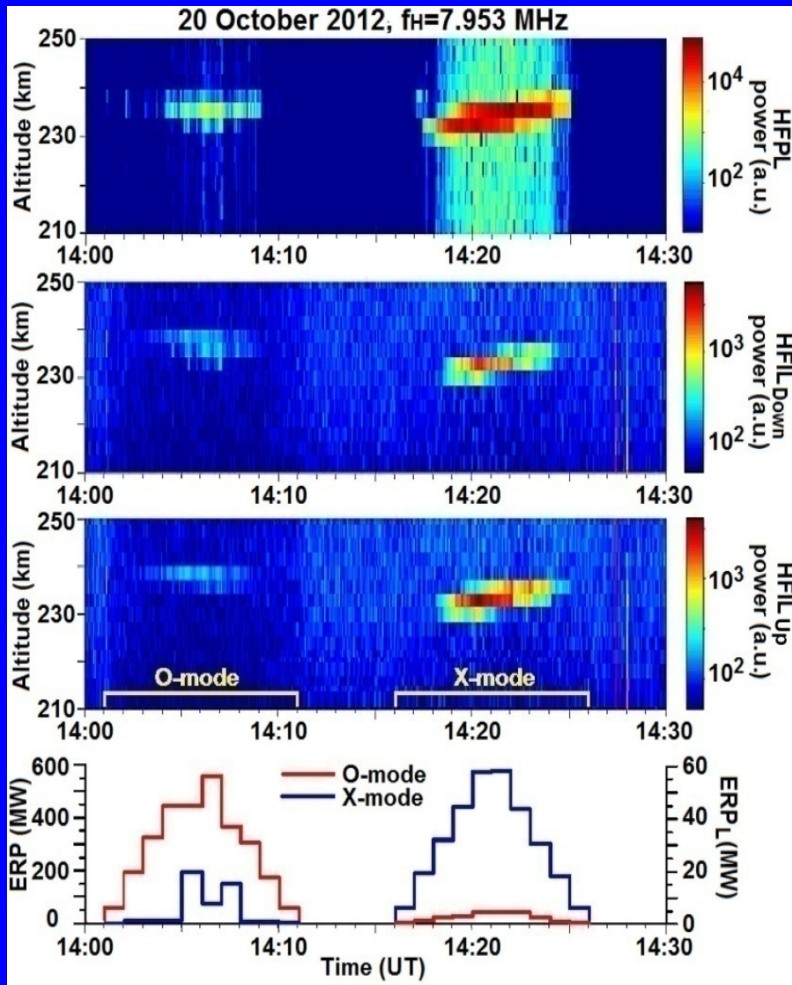
Эффекты О-нагрева на частотах ниже foF2 ($f_H \leq foF2$) при ERP < 250 МВт



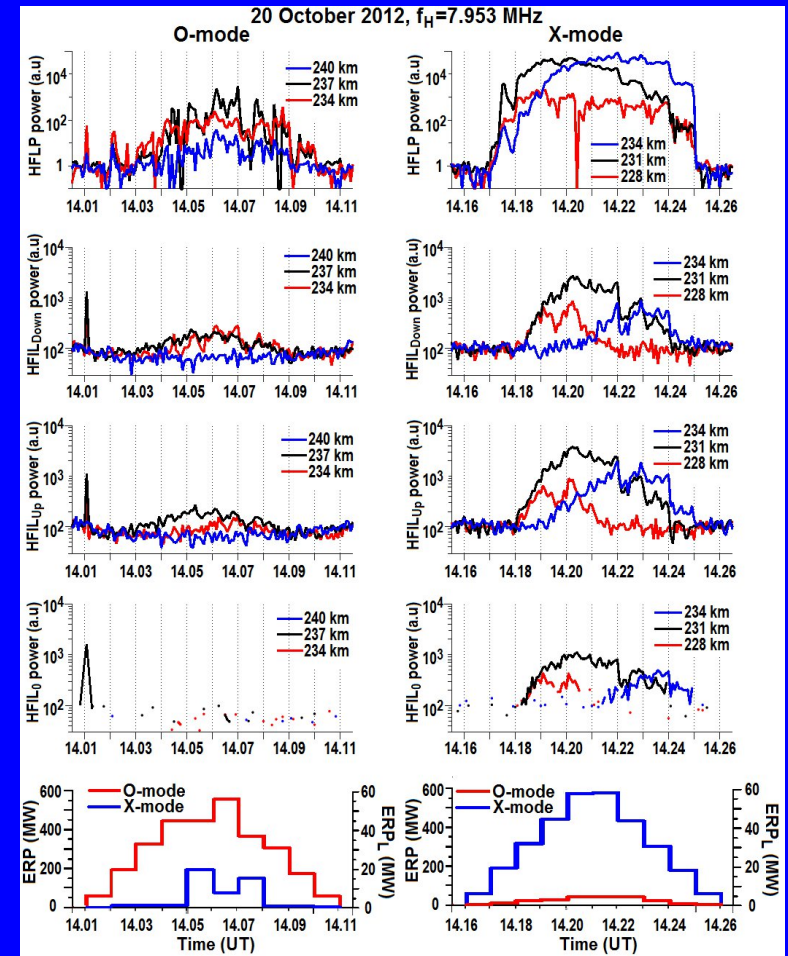
Поведение МИИН по данным радара CUTLASS на частоте 9.9 МГц 5 ноября 2009 при О-нагреве на частоте 3.95 МГц при ERP = 126 МВт.

Поведение МИИН по данным радара CUTLASS на частотах 9.9, 13 и 16.5 МГц 6 марта 2010 при О-нагреве на частоте 4.9128 МГц при ERP = 156 МВт.

Пороги возбуждения продольных плазменных волн (LW и IAW) при O- и X-нагреве ($f_H < f_oF2$)

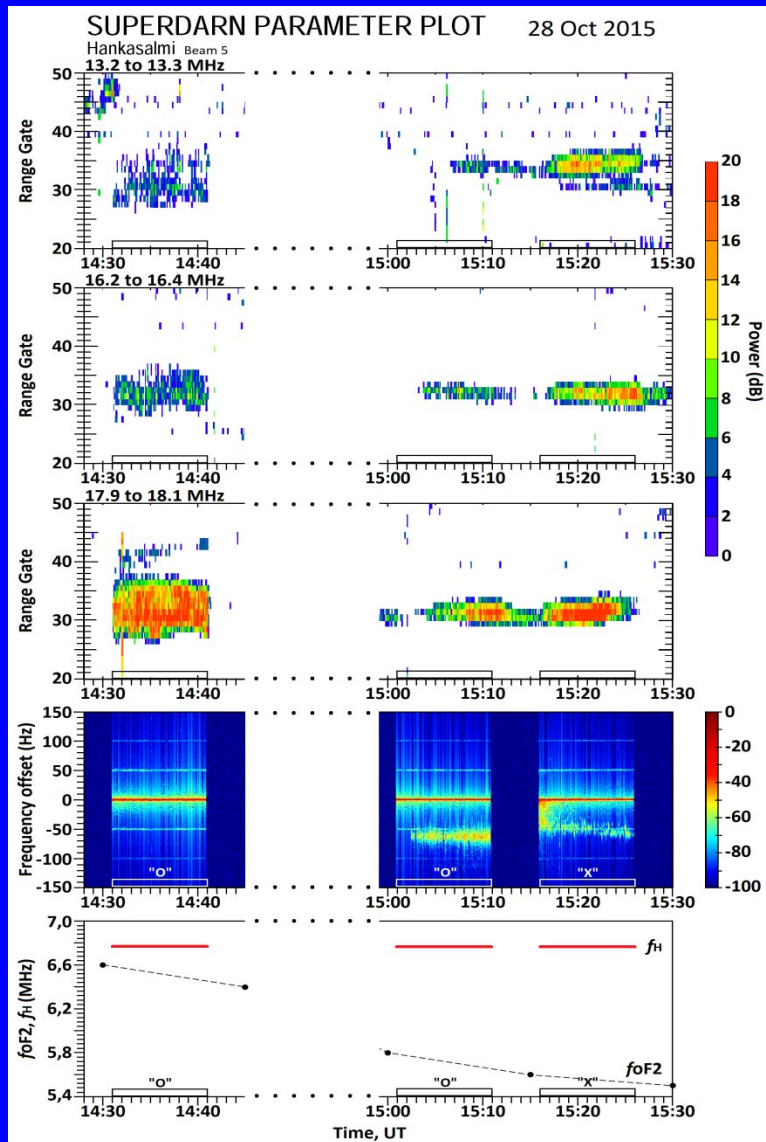


Поведение плазменных и ионных линий при O- и X-нагреве при возрастании ERP от 56 до 560 МВт и затем уменьшении до 56 МВт. O-мода: $ERP_{th} = 325$ и 445 МВт ($E_{th} = 0.65$ и 0.73 В/м) для LW и IAW соответственно.



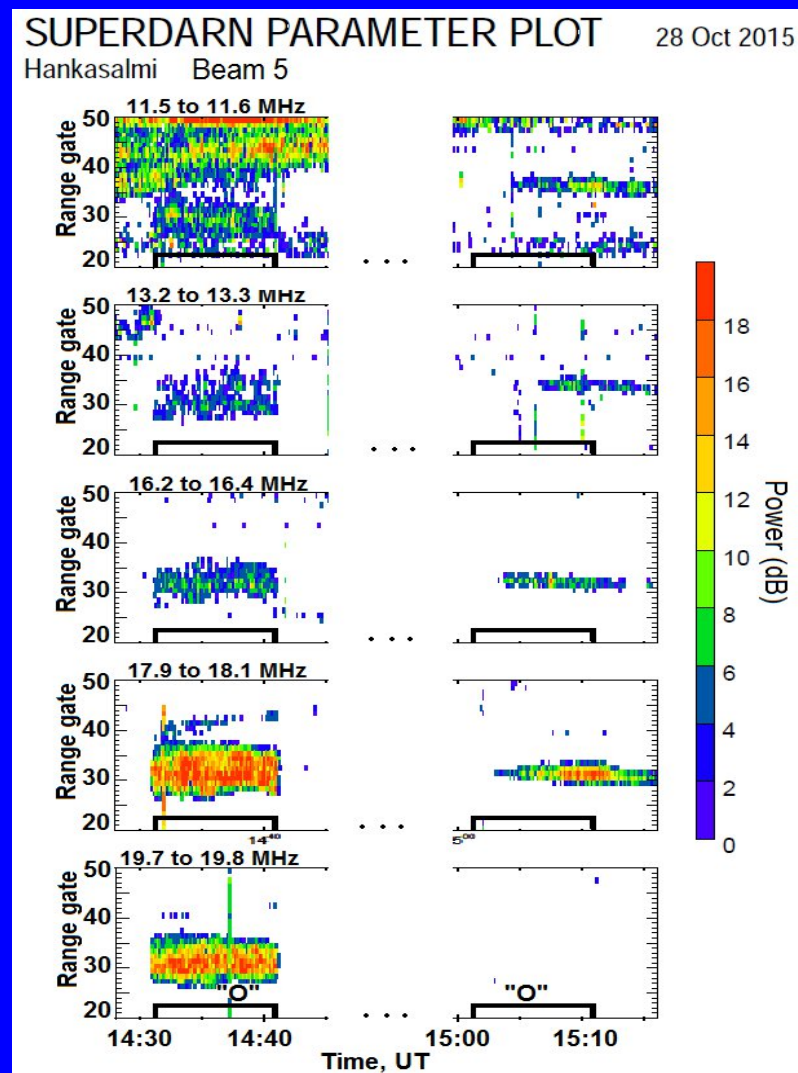
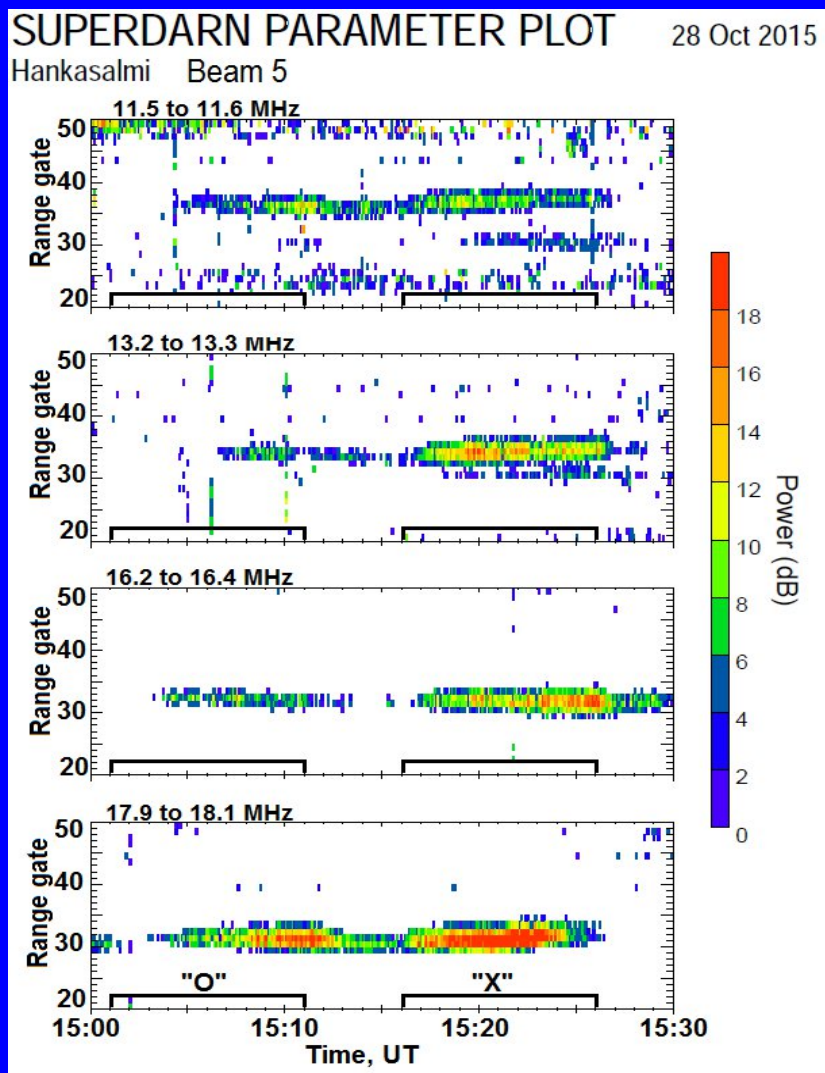
Поведение плазменных и ионных линий при O- и X-нагреве при возрастании ERP от 56 до 560 МВт и затем уменьшении до 56 МВт. X-mode: $ERP_{th} = 180$ и 315 МВт ($E_{th} = 0.46$ и 0.61 В/м) для LW и IAW соответственно.

Эффекты О-нагрева на частотах $f_H \approx f_oF2$ и $f_H > f_oF2$ при ERP > 300 МВт



- $f_H = 6.77$ МГц, ERP = 380 МВт.
- Мощность рассеянных на МИИН сигналов по данным радара CUTLASS на частотах $f \approx 13, 16$ and 18 МГц, спектрограмма УИРИ, f_oF2 и f_H 28 октября 2015 с 14:30 - 15:30 UT. Волна накачки О-поляризации излучалась в цикле 14:31 – 14:41 UT при $f_H \approx f_oF2$ и в цикле 15:01 – 15:11 UT при $f_H > f_oF2$ на 1.0-1.2 МГц .
- Возбуждение дискретных компонент в спектре УИРИ для волн накачки О- и Х-поляризации при $f_H > f_xF2$ происходит вследствие стимулированного рассеяния Бриллюэна (Magnetized Stimulated Brillouin Scatter, MSBS), когда мощная электромагнитная волна распадается в рассеянную электромагнитную волну и низкочастотную электростатическую волну (IA or EIC) [Bernhrdt et al., 2009; 2010]
- $EM_H \rightarrow EM_S + EIC$ (O⁺ ионы)
- $k_H = k_S + k_{EIC}$
- $\omega_H = \omega_S + \omega_{EIC}$

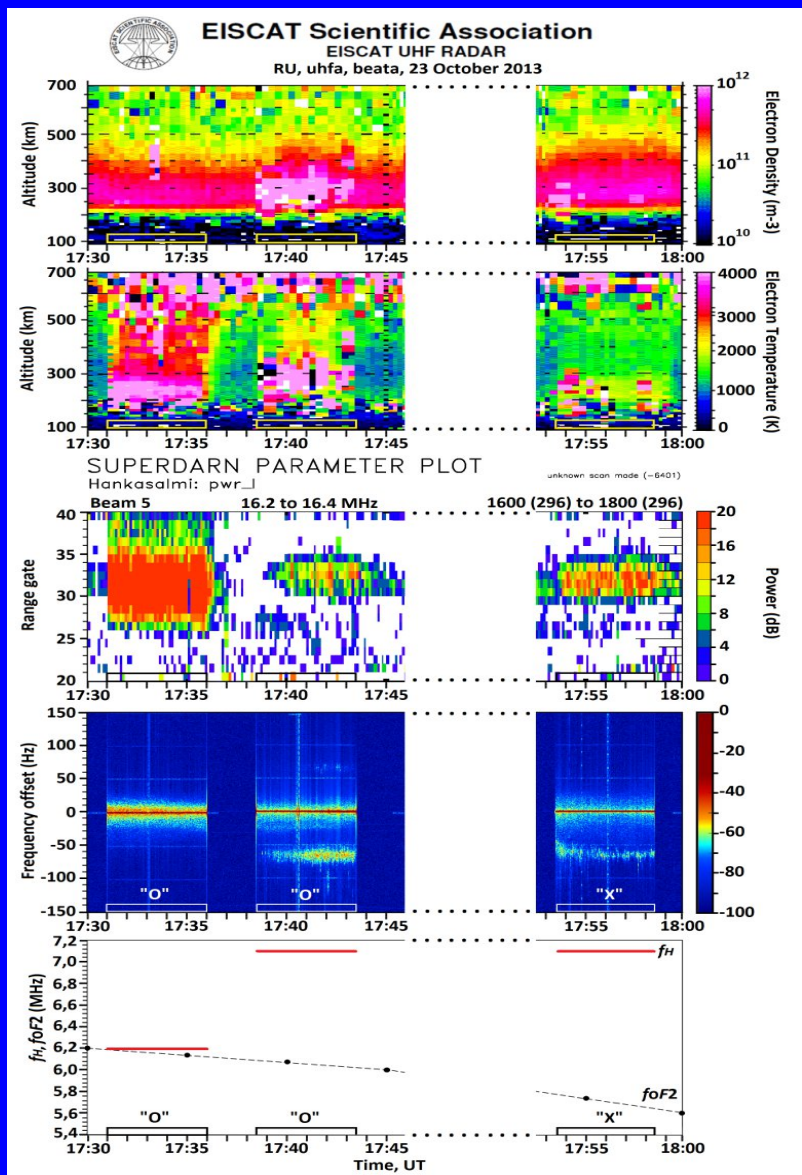
МИИН при O-/X-нагреве на частотах $f_H > f_{xF2}$ при ERP > 300 МВт



Поведение МИИН по данным радара CUTLASS на частотах $f \approx 11, 13, 16$ и 18 МГц при O- и X-нагреве на частоте 6.77 МГц ($f_H > f_{xF2}$) при ERP = 380 МВт.

Поведение МИИН по данным радара CUTLASS на частотах $f \approx 11, 13, 16, 18$ и 20 МГц при O-нагреве на частоте 6.77 МГц в условиях $f_H < f_{oF2}$ и $f_H > f_{xF2}$ при ERP = 380 МВт.

Эффекты O-нагрева на частотах $f_H \approx foF2$ и $f_H > foF2$ при ERP > 300 МВт



- $f_H = 7.1$ МГц, ERP = 550 МВт.
- Параметры ионосферной плазмы (Ne, Te) по данным измерений EISCAT радара HP (931 МГц), мощность рассеянных на МИИН сигналов по данным радара CUTLASS на частоте 16.2 МГц, спектрограмма УИРИ, $foF2$ и f_H 23 октября 2013 с 17:30 - 18:00 UT.
- Волна накачки O-поляризации излучалась в цикле 17:31 – 17:36 UT при $f_H \approx foF2$ и в цикле 17:53:30 – 17:58:30 UT при $f_H > foF2$ на примерно 1.0 МГц.

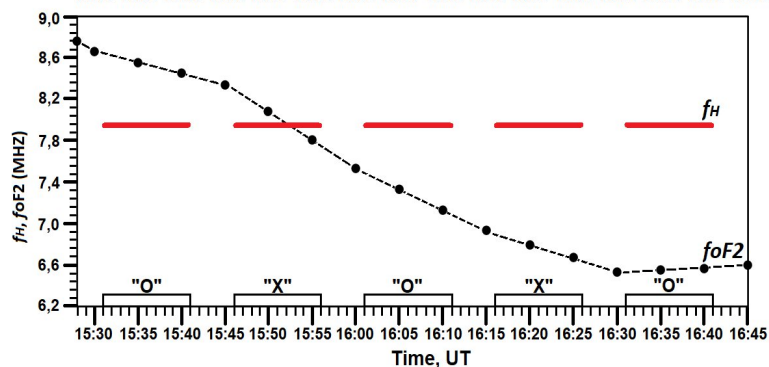
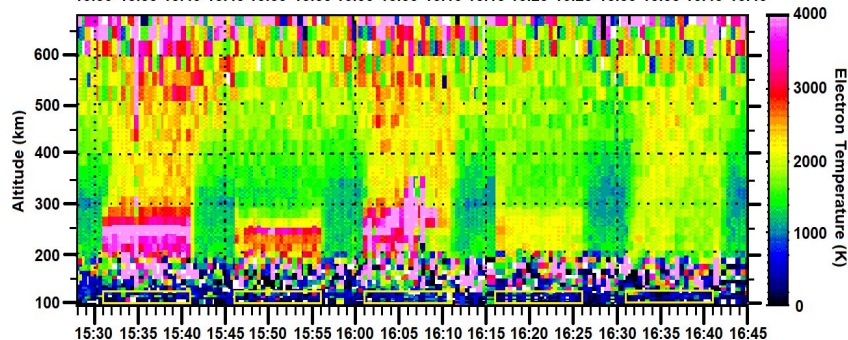
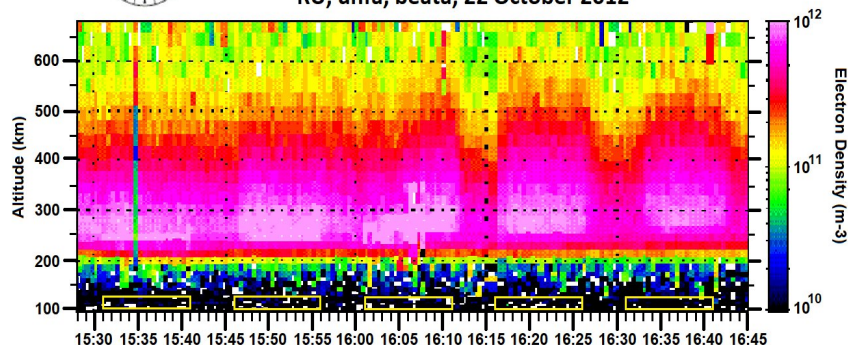
Параметры плазмы (N_e и T_e) при O/X-нагреве на частотах $f_H < foF2$ и $f_H > foF2$ при ERP > 300 МВт



EISCAT Scientific Association

EISCAT UHF RADAR

RU, uhfa, beata, 22 October 2012



$f_H = 7.953$ МГц, ERP = 840 МВт.

Поведение N_e и T_e по данным измерений EISCAT радара HP (931 МГц) и критической частоты слоя F2 foF2 22 октября 2012 с 15:30 до 16:45 UT.

Волна накачки O-поляризации излучалась при $f_H < foF2$ в цикле 15:31 – 15:41 UT и при $f_H > foF2$ (на 1.5 МГц) в цикле 16:31 – 16:41 UT.

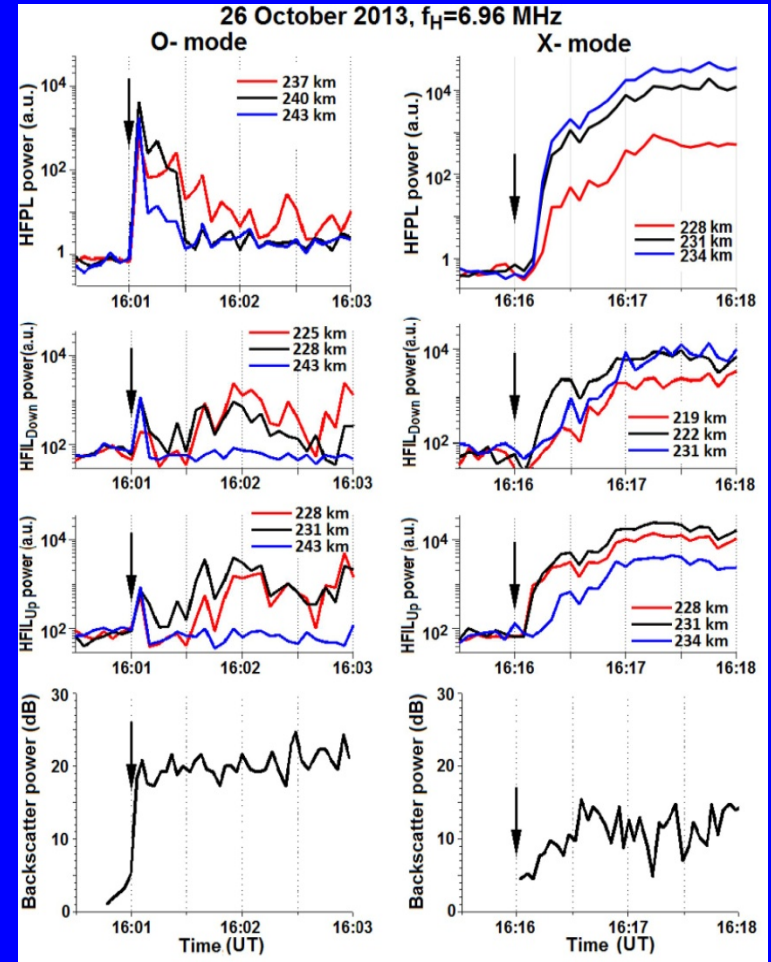
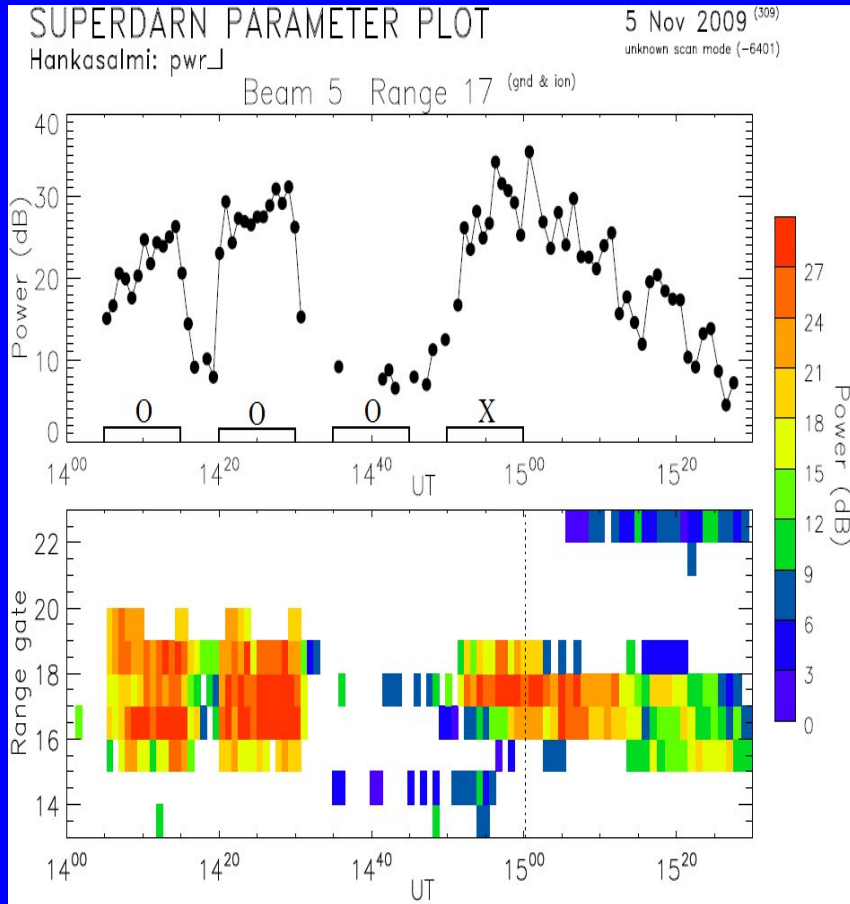
Заключение

- Впервые было обнаружено, что воздействие волны накачки О-поляризации на F-область ионосферы в направлении магнитного зенита при высоких эффективных мощностях излучения ($ERP > 300$ МВт) на частотах, превышающих $foF2$ на 1-2 МГц, приводит к созданию дактов повышенной электронной плотности, генерации МИИН и УИРИ в полосе частот ± 1 кГц относительно частоты волны накачки, регистрируемого на большом удалении (1200 km) от нагревного стенда EISCAT/Heating.
- Выполнено сравнение характеристик МИИН и спектральной структуры УИРИ при воздействии на F-область волн накачки О- и Х-поляризации на частотах, существенно превышающих $foF2$ при высоких эффективных мощностях излучения.

Благодарности

Авторы благодарны Европейской научной ассоциации EISCAT за помощь в проведении нагревных экспериментов, совмещенных с измерениями радара некогерентного рассеяния радиоволн, в ходе проведения российских кампаний с 2008 по 2021 г.г.

Эффекты О-нагрева на частотах ниже foF2 ($f_H \leq foF2$)



Поведение МИИН по данным радара CUTLASS на частоте 9.9 МГц 5 ноября 2009 при О-нагреве на частоте 3.95 МГц при ERP = 126 МВт.

Behaviors of the O- and X-mode HFPLs, HFILs, and FAIs after the heater is turned on at $f_H = f_H = 6.96$ MHz (26 Oct. 2013) with ERP = 560 MW.