

**Условия генерации и характеристики каналов повышенной электронной плотности в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации**

Н.Ф. Благовещенская<sup>1</sup>, Т.Д. Борисова<sup>1</sup>, А.С. Калишин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38  
E-mail: [nataly@aari.nw.ru](mailto:nataly@aari.nw.ru), [borisova@aari.ru](mailto:borisova@aari.ru), [askalishin@aari.ru](mailto:askalishin@aari.ru)

*Представлены результаты экспериментальных исследований условий генерации и характеристик каналов (дактов) повышенной электронной плотности в F-области высокоширотной ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации. Исследования выполнялись по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн, пространственно совмещенного с КВ нагревным стендом EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия). Рассмотрены характеристики каналов для различных частот нагрева (от 5.4 до 8 МГц) и отношений частоты нагрева к критической частоте слоя F2. Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, канал, электронная плотность, поляризации, радар некогерентного рассеяния радиоволн.*

**Features and generation conditions of enhanced electron density ducts in the high latitude ionosphere F-region induced by powerful HF radio waves with extraordinary polarization**

N.F. Blagoveshchenskaya<sup>1</sup>, T.D. Borisova<sup>1</sup>, A.S. Kalishin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute  
38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397

*We present results of investigations of features and generation conditions of ducts with enhanced electron density in the high latitude ionospheric F-region induced by extraordinary polarized HF pump wave. Experiments were carried out at the EISCAT/Heating facility at Tromsø, Norway, by using the incoherent scatter radar co-located with the heating facility. Features of ducts were analyzed for different pump frequencies (from 5.4 to 8 MHz) and ratios of the pump frequency to the critical frequency of the F2 layer. Keywords: high-latitude ionosphere, powerful HF radio wave, duct, electron density, polarization, incoherent scatter radar.*

**Введение**

Контролируемое воздействие мощных КВ радиоволн на ионосферную плазму позволяет исследовать разнообразные нелинейные явления и турбулентности в ионосфере. Для модификации F-области ионосферы на всех КВ нагревных стендах мира, как правило, используются волны обыкновенной (O-мода) поляризации. Это вызвано тем, что радиоволны необыкновенной (X-мода) поляризации в фоновой (невозмущенной) ионосфере отражаются ниже как высоты отражения мощной O-волны, так и высоты существования верхних гибридных плазменных волн. Вследствие этого они не могут возбудить искусственные ионосферные турбулентности и явления, их сопровождающие [1, 2]. Тем не менее результаты экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на высокоширотном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия), убедительно продемонстрировали, что воздействие мощной КВ радиоволны

X-поляризации на высокоширотную  $F$ -область ионосферы в направлении локального магнитного поля (в магнитный зенит) приводит к генерации разнообразных искусственных возмущений (ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы, оптическое излучение), которые по интенсивности могут превосходить возмущения при O-нагреве [3 - 8]. К настоящему времени явления, вызванные воздействием необыкновенно поляризованных мощных КВ радиоволн, плохо изучены и требуют дальнейших интенсивных исследований как в экспериментальном, так и теоретическом плане.

Целью данной работы является исследование условий генерации и характеристик каналов повышенной плотности электронов в высокоширотной верхней ионосфере ( $F$ -область), вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации.

### Описание экспериментов

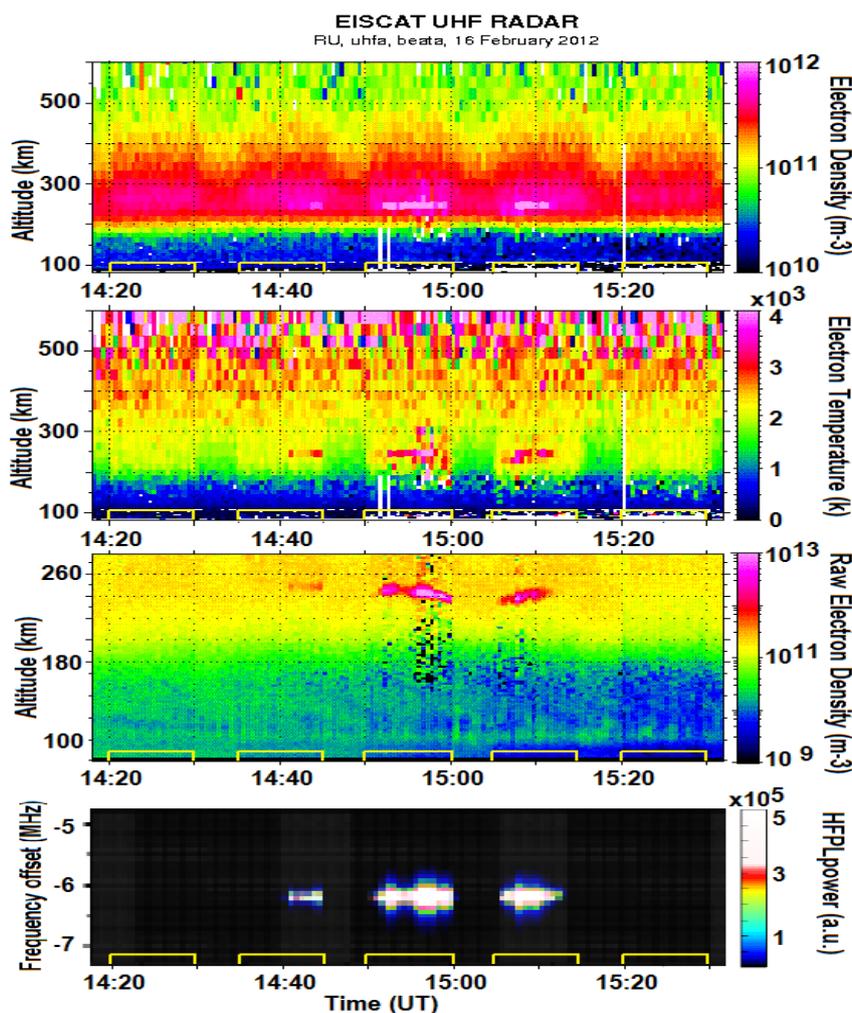
Эксперименты выполнялись на супермощном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E,  $L=6.2$ ,  $I=78^\circ$ ), г. Тромсе, Норвегия, детальное описание которого дано в [9]. Мощные КВ радиоволны X-поляризации излучались в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности антенны наклонена на 12° от вертикали к югу) на фиксированных частотах в диапазоне от 5.4 до 8 МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Излучение осуществлялось на фазированную антенную решетку с шириной диаграммы направленности 5 – 6° (на уровне -3 дБ), обеспечивающую в период экспериментов эффективную мощность излучения от 360 до 820 МВт. Эксперименты выполнялись в утренние, дневные и вечерние часы при спокойных магнитных условиях. Оперативный выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в Тромсе [10].

В качестве основного диагностического средства эффектов воздействия использовался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [11], пространственно совмещенный с нагревным стендом, обеспечивающий обнаружение турбулентностей с масштабами  $L = 0.16$  м ( $L = c/2f_{\text{rad}}$ , где  $c$  – скорость света,  $f_{\text{rad}} = 930$  МГц – частота радара). Обработка данных измерений проводилась с помощью пакета программ GUISDAP [12]. Радар НР определял параметры ионосферной плазмы в диапазоне высот от 70 до 700 км с разрешением по времени 5 с и 1.5 (3) км по высоте. Измерения выполнялись либо в направлении магнитного поля в Тромсе (магнитный зенит), либо в режиме сканирования искусственно возмущенной области ионосферы по углам возвышения от 72 до 90°. Магнитному зениту соответствует угол возвышения 78°.

### Результаты и обсуждение

Рассмотрим поведение параметров ионосферной плазмы при X-нагреве в направлении магнитного зенита на различных частотах нагрева  $f_H$  при различных соотношениях между  $f_H$  и критической частотой слоя  $F2$  ( $f_H \leq f_oF2$  и  $f_H > f_oF2$ ).

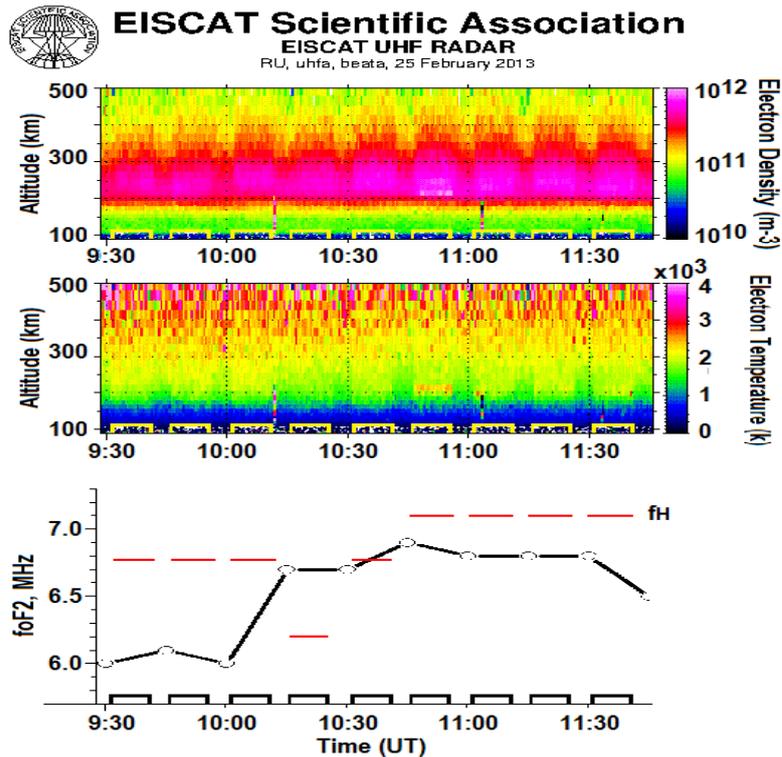
На рис.1 приведено высотное-временное распределение электронной концентрации и температуры ( $N_e$  и  $T_e$ ), мощности рассеянного сигнала радара НР (raw electron density) и интенсивностей вызванных нагревом плазменных линий (HF-induced plasma lines, HFPL) 16 февраля 2012 с 14:18 до 15:32 UT. В период эксперимента мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на частоте 6.2 МГц, которая превышала  $f_oF2$  на 0.3 – 1.2 МГц ( $f_H > f_oF2$ ). Эффективная мощность излучения составляла  $P_{\text{эфф}} = 460$  МВт.



**Рис. 1. Высотно-временное распределение  $N_e$ ,  $T_e$ , мощности рассеянного сигнала (raw electron density) и интенсивностей вызванных нагревом плазменных линий (HF-induced plasma lines, HFPL) 16 февраля 2012 с 14:18 до 15:32 UT по данным EISCAT радара HP. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 6.2 МГц при  $P_{\text{эфф}} = 460$  МВт. Циклы нагрева показаны на оси времени.**

Из рис.1 ясно видно, что сильные возрастания электронной плотности  $N_e$  до высот порядка 550 км наблюдались во всех циклах нагрева и сопровождалось незначительным повышением температуры электронов  $T_e$  вследствие омического нагрева электронов. Следует отметить, что возрастания  $N_e$  в широком диапазоне высот регистрировались как в отсутствие инициированных нагревом плазменных и ионных в спектрах сигналов радара (HFPL и HFIL), так и могли наблюдаться одновременно с возбуждением HFPL и HFIL (см. верхнюю и две нижние панели на рис. 1).

Аналогичные возрастания электронной плотности наблюдались 25 февраля 2013 г. при X-нагреве на частотах  $f_H = 6.77$ , 6.2 и 7.1 МГц, когда частоты нагрева были как выше, так и ниже  $f_oF2$  (см. рис.2).



**Рис. 2.** Поведение  $N_e$ ,  $T_e$ , а также критических частот слоя F2 и частот нагрева в период эксперимента 25 февраля 2013 г. с 9:28 до 11:43 UT. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась последовательно на частотах 6.77, 6.2, 6.77 и 7.1 МГц. Циклы нагрева показаны на оси времени.

Представляет интерес сравнить поведение  $N_e$  и  $T_e$  при альтернативном O- и X-нагреве F-области высокоширотной ионосферы. Такое сравнение было выполнено для эксперимента 25 февраля 2013 г. (см. рис.3). В период эксперимента мощная КВ радиоволна O- или X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 5.423 МГц при эффективной мощности излучения  $P_{эфф} = 360$  МВт. Критическая частота слоя F2 изменялась от 5.9 до 5.5 МГц ( $f_H \leq f_oF2$ ), что обеспечивало возбуждение нелинейных явлений как при O-, так и X-нагреве.

Из рис. 3 следует, что при O-нагреве наблюдались сильные возрастания температуры электронов до  $\sim 3000$  К, что является типичной характеристикой экспериментов, выполненных при O-нагреве как в средних, так и высоких широта (см., например, [1,2] и ссылки там). Изменения электронной концентрации при этом были незначительными. Поведение  $N_e$  и  $T_e$  при X-нагреве имели противоположный характер – сильные возрастания  $N_e$  до 50 - 70% в широком диапазоне высот, сопровождающиеся сравнительно небольшими повышениями  $T_e$  ( $\sim 20 - 30\%$  при нагреве на частотах  $f_H \leq f_oF2$ ). Возрастания  $N_e$  в широком диапазоне высот, вплоть до верхней высотной границы измерений радара HP ( $\sim 600 - 700$  км), вдоль направления магнитного поля образуют каналы (дакты) повышенной плотности электронов. Они являются типичным явлением при X-нагреве на всех частотах, лежащих как ниже, так и выше критической частоты слоя F2.

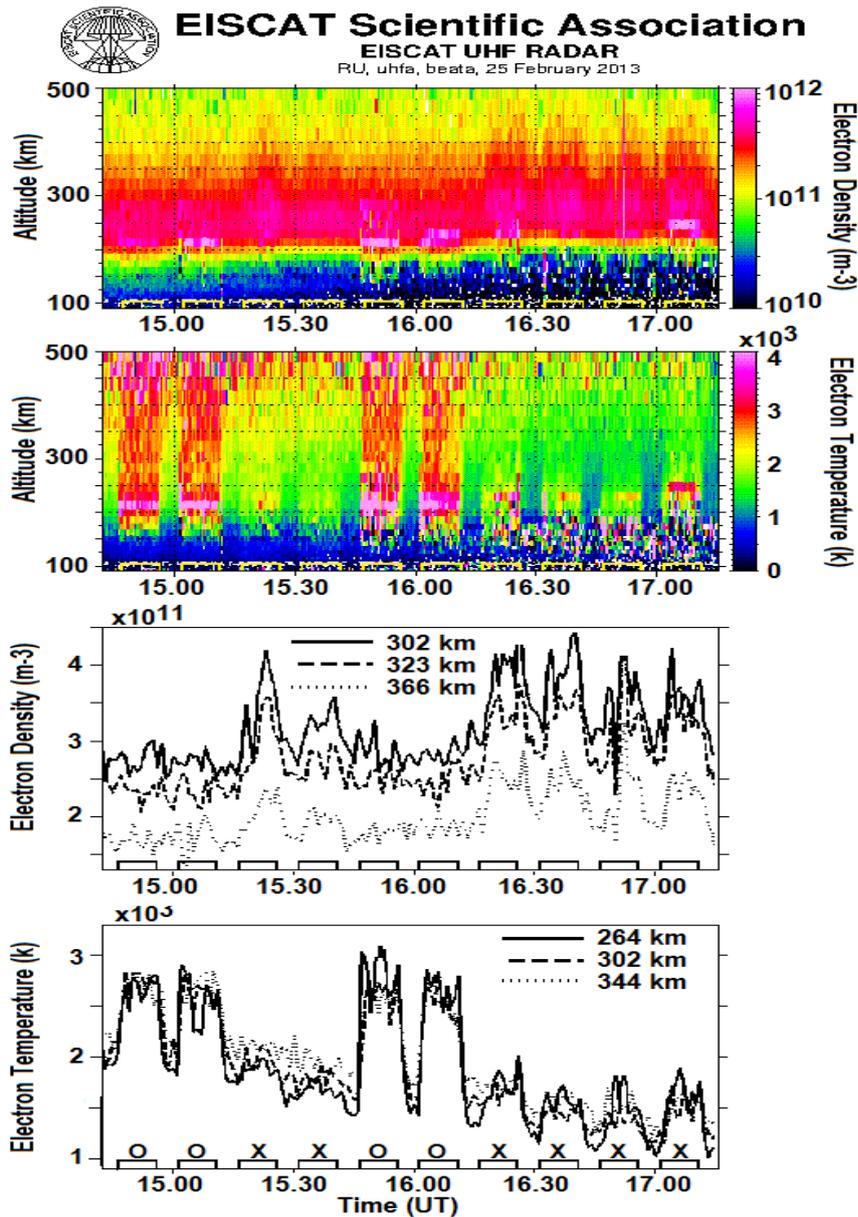


Рис. 3. Высотно-временное распределение  $N_e$ ,  $T_e$ , а также вариации  $N_e$ ,  $T_e$  на фиксированных высотах 25 февраля 2013 г. с 14: 45 до 17:15 UT. Альтернативный O-/X-нагрев производился на частоте 5.423 МГц в направлении магнитного зенита при  $P_{эфф} = 360$  МВт.. Циклы нагрева и поляризации мощной КВ радиоволны показаны на нижней панели оси времени.

Рассмотрим более детально характеристики каналов повышенной плотности электронов в высокоширотной верхней ионосфере ( $F$ -область). Эволюция развития во времени каналов повышенной электронной плотности  $N_e$  после включения нагревного стенда 12 октября 2011 г показана на рис.4. Из рис. 4 следует, что увеличения  $N_e$  начинаются после включения нагревного стенда и достигают максимальных значений через  $\sim 40$  с. После выключения стенда возвращение  $N_e$  к фоновым значениям в различных экспериментах происходило через 2 - 5 мин.

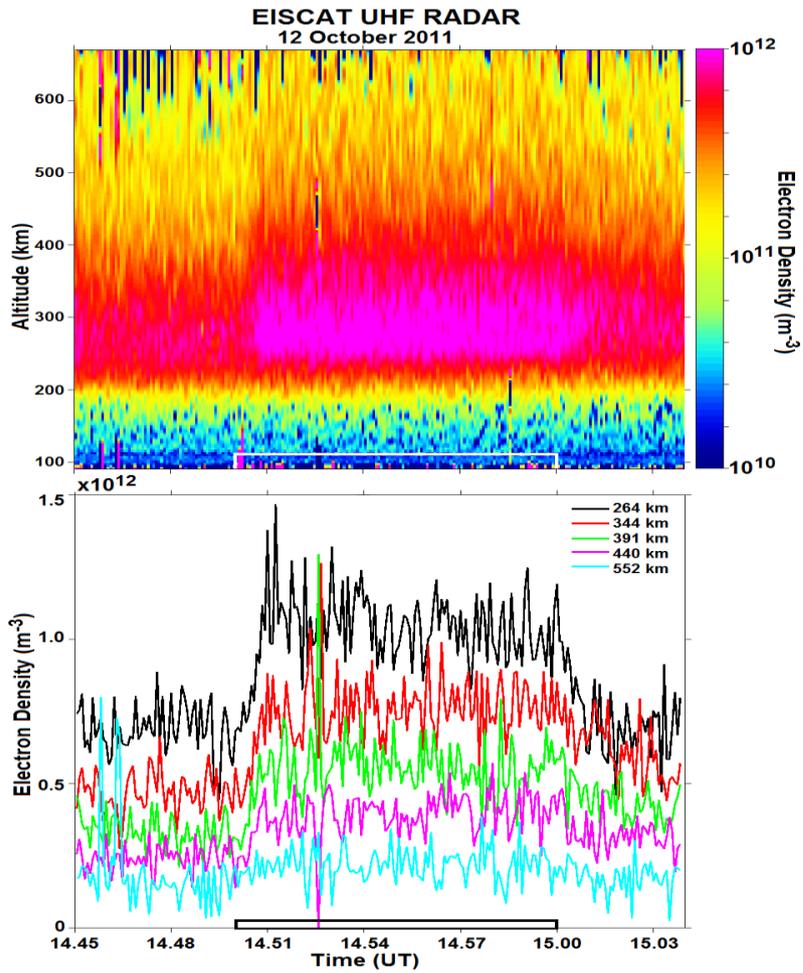


Рис. 4. Высотно-временное распределение  $N_e$  и вариации  $N_e$  на фиксированных высотах с 5 с разрешением по времени 12 октября 2011 г. с 14:45 до 15:04 UT. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте  $f_H = 7.953$  МГц ( $f_H \approx f_oF2$ ) при  $P_{эфф} = 820$  МВт. Цикл нагрева отмечен на оси времени.

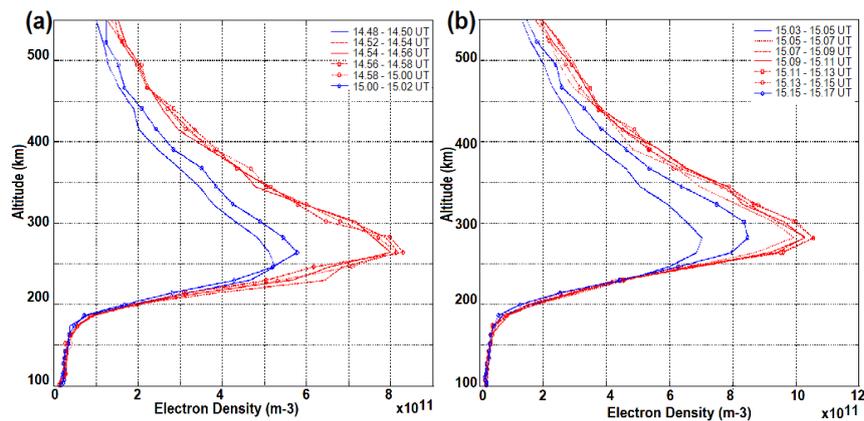
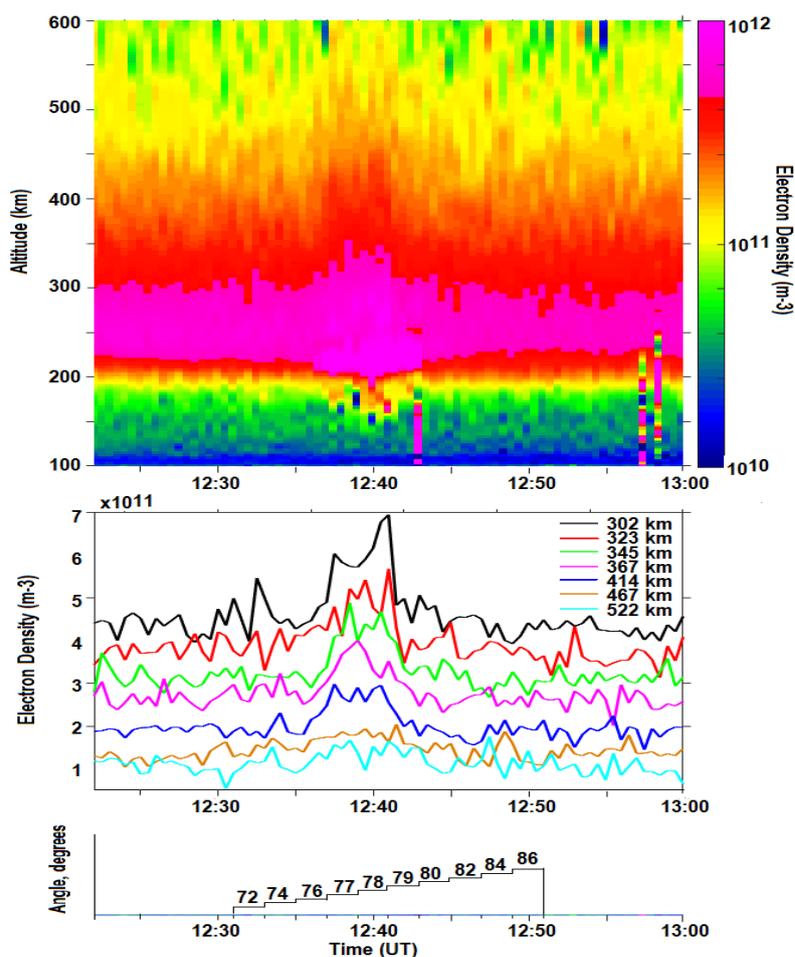


Рис. 5.  $N_e(h)$ -профили, усредненные на 2-х мин интервалах, до начала нагрева, в течение цикла X-нагрева и после выключения нагревного стенда: (а) 10 октября 2011 г.,  $P_{эфф} = 680$  МВт, частота нагрева  $f_H = 7.1$  МГц; (б) 12 октября 2011 г.,  $P_{эфф} = 820$  МВт,  $f_H = 7.953$  МГц.

На рис. 5 показана динамика изменения во времени высотных профилей электронной концентрации  $N_e$  (h), начиная за две минуты до включения нагревного стенда, в течение цикла нагрева и через две минуты после окончания нагрева 10 октября 2011 г. ( $P_{эфф} = 680$  МВт, частота нагрева  $f_H = 7.1$  МГц превышала  $f_oF2$  на 0.4 МГц) и 12 октября 2011 г. ( $P_{эфф} = 820$  МВт,  $f_H = 7.953$  МГц превышала  $f_oF2$  на 0.35 МГц). Как следует из рис. 5, возрастания  $N_e$  начинались с высот 220 – 250 км и наблюдались до 550 км (верхний высотный предел измерения радара НР в рассматриваемых экспериментах). После окончания цикла нагрева значения  $N_e$  не возвращались к невозмущенным фоновым значениям до начала нагрева, а оставались повышенными вплоть до высот 550 км в течение последующих двух минут.



**Рис. 6. Высотно-временное поведение  $N_e$ , а также вариации  $N_e$  на фиксированных высотах в цикле X-нагрева 2 ноября 2013 г. с 12:31 до 12:51 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте  $f_H = 6.96$  МГц ( $f_H \leq f_oF2$ ) при  $P_{эфф} = 550$  МВт. Радар НР измерял при ступенчатом изменении углов возвышения в последовательности: 72-74-76-77-78-79-80-82-84-86°**

Измерения радара НР в режиме сканирования искусственно возмущенной области ионосферы по углам возвышения дают возможность оценить горизонтальный размер каналов повышенной плотности электронов. На рис. 6 показано высотно-временное поведение  $N_e$ , а также вариации  $N_e$  на фиксированных высотах в цикле X-нагрева 2 ноября 2013 г. с 12:31 до 12:51 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте  $f_H = 6.96$  МГц, которая была ниже критической частоты

слоя  $F_2$ . Радар НР измерял при ступенчатом изменении углов возвышения в последовательности: 72-74-76-77-78-79-80-82-84-86° (две минуты при каждом угле возвышения). При этом угол 78° соответствует направлению вдоль магнитного поля в Тромсе (магнитный зенит). Из рис. 6 следует, что горизонтальный размер каналов повышенных значений  $N_e$  составлял  $\sim 3 - 4^\circ$  и регистрировался только вблизи направления локального магнитного поля.

Анализ условий генерации и характеристик каналов повышенных значений  $N_e$  позволяет заключить, что воздействие мощной КВ радиоволны X поляризации на  $F$ -область высокоширотной ионосферы в направлении магнитного зенита вызывает ускорение электронов. Это обусловлено совпадением вращения электрического поля мощной волны с левосторонней круговой поляризацией (X-мода) с гировращением электронов. Тогда, согласно результатам, полученным в [13, 14], поток ускоренных электронов вызывает возрастание электронной плотности.

### **Заключение**

По данным многочисленных экспериментов, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating, были исследованы условия генерации и характеристики каналов (дактов) повышенной электронной плотности в высокоширотной верхней ( $F$ -область) ионосфере. Установлено, что каналы повышенной электронной плотности создаются при спокойных фоновых геофизических условиях при излучении мощной КВ радиоволны необыкновенной (X-мода) поляризации в направлении магнитного зенита на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя  $F_2$  ( $f_H \leq f_oF_2$  и  $f_H > f_oF_2$ ). Возможной причиной их образования может быть поток ускоренных электронов вследствие совпадения направления вращения электрического поля мощной волны с левосторонней круговой поляризацией (X-мода) с гировращением электронов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>*

### **Литература**

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007 Т.177. №11. С. 1145 – 1177.
2. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // Physics Reports. 1989. V. 179. P. 79 – 209.
3. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. et al. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. doi: 10.1029/2011GL046724.
4. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kosch M., et al. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 10483–10498.
5. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. et al. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 135. P. 50–63.
6. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kalishin A.S. et al. First observations of electron gyro-harmonic effects under X-mode HF pumping the high latitude ionospheric F-region // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2017. V. 155. P. 36–49.
7. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kalishin A.S., Yeoman T. K., Häggström I. Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2020. V. 125. №7. <https://doi.org/10.1029/2020JA028203>.

8. Blagoveshchenskaya N. F. Perturbating the High-Latitude Upper Ionosphere (*F* Region) with Powerful HF Radio Waves: A 25-Year Collaboration with EISCAT // *Radio Science Bulletin*. 2020. № 373 (June 2020). P. 40 – 55. doi:10.23919/URSIRSB.2020.9318436
9. Rietveld M. T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Sci.* 2016. V. 51. №9. P. 1533–1546.
10. Rietveld M. T., Wright J.W., Zobotin N., Pitteway M.L.V. The Tromsø dynasonde // *Polar Science*. 2008. V. 2. №3. P. 55-71.
11. Rishbeth H, van Eyken T. EISCAT: Early history and the first ten years of operation // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1993. V. 55. P. 525 – 542.
12. Lehtinen, M.S., Huuskonen A. General incoherent scatter analysis and GUIDAP// *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1996. V. 58. P. 435 - 452.
13. Carlson H. C., Wickwar V.B., Mantas G.P. Observations of fluxes of suprathermal electrons accelerated by HF excited instabilities // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1982. V. 44. P. 1089–1100.
14. Carlson H. C., Djuth F.T., Zhang L.D. Creating space plasma from the ground // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 122. [doi: 10.1002/2016JA023880](https://doi.org/10.1002/2016JA023880)