

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

Н.Ф. Благовещенская¹, Т.Д. Борисова¹, А.С. Калишин¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38
E-mail: nataly@aari.nw.ru, borisova@aari.ru, 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. Blagoveshchenskaya¹, T.D. Borisova¹, A.S. Kalishin¹

¹ 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.

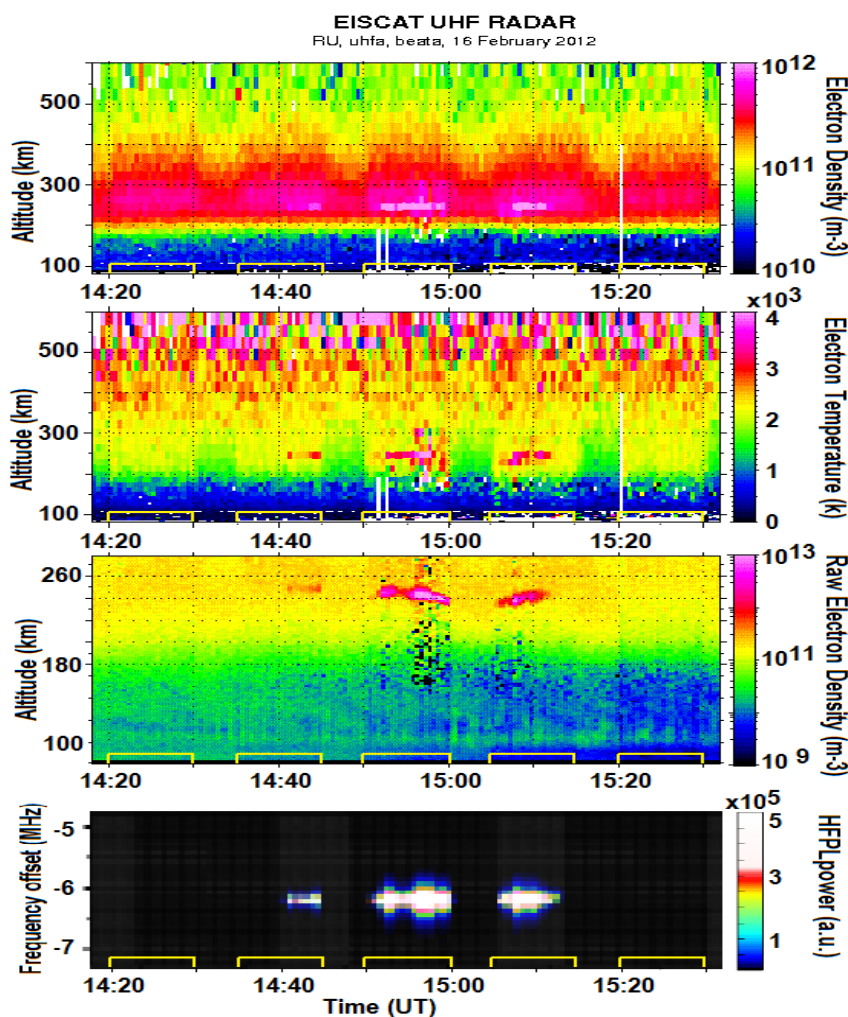


Рис. 1. Высотно-временное распределение N_e , T_e , мощности рассеянного сигнала (raw electron density) и интенсивностей вызванных нагревом плазменных линий (HF-induced plasma lines, HFPL) 16 февраля 2012 с 14:18 до 15:32 UT по данным EISCAT радара HP. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась в 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).

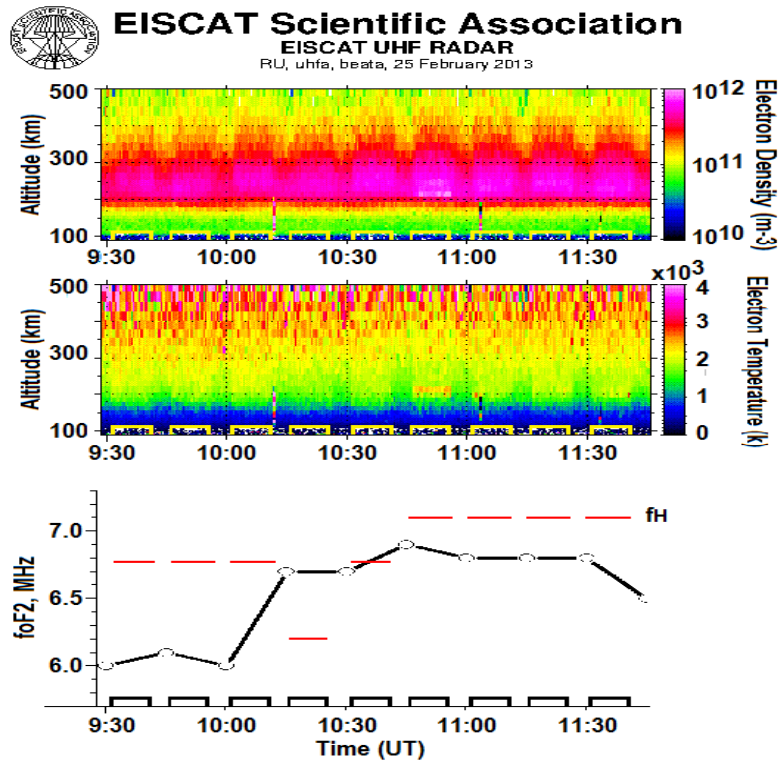


Рис. 2. Поведение N_e , T_e , а также критических частот слоя F2 и частот нагрева в период эксперимента 25 февраля 2013 г. с 9:28 до 11:43 UT. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась последовательно на частотах 6.77, 6.2, 6.77 и 7.1 МГц. Циклы нагрева показаны на оси времени.

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 ~ 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.

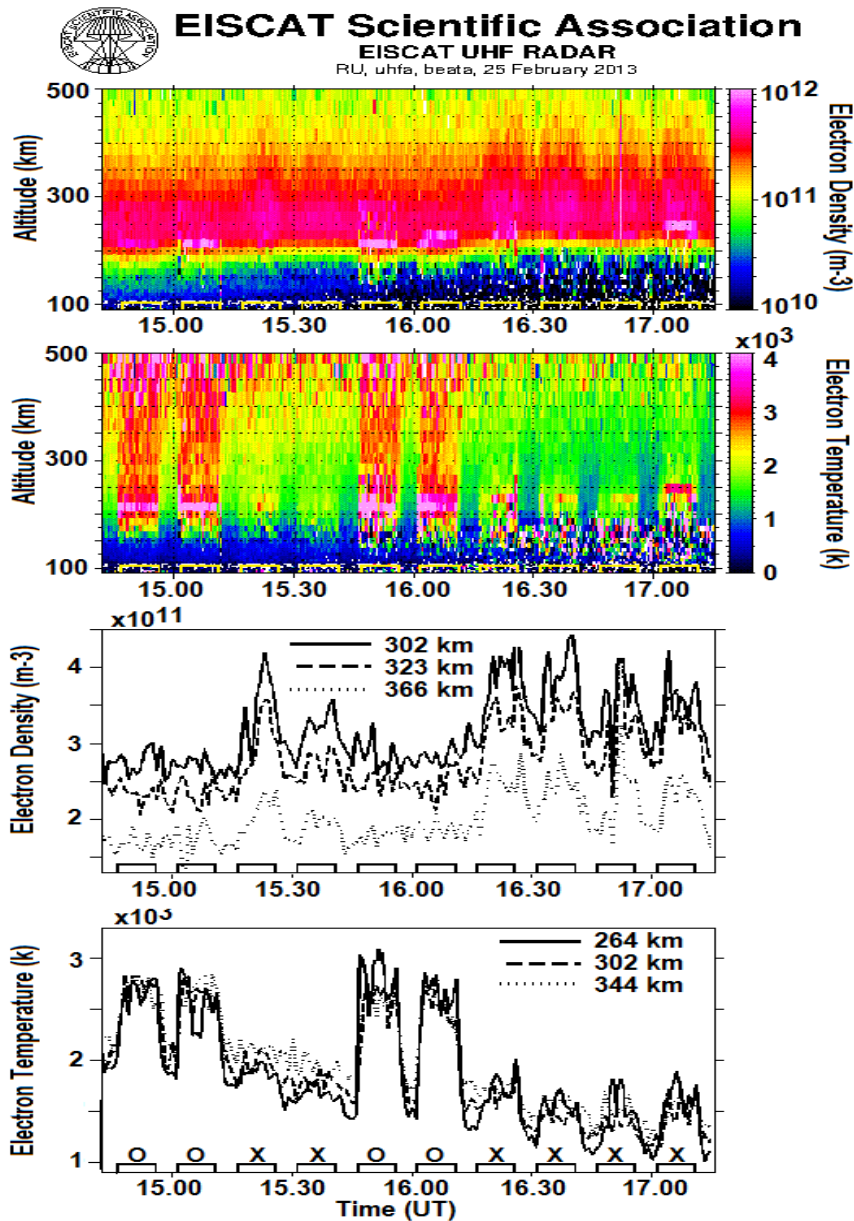


Рис. 3. Высотно-временное распределение N_e , T_e , а также вариации N_e , T_e на фиксированных высотах 25 февраля 2013 г. с 14: 45 до 17:15 UT. Альтернативный O-/X-нагрев производился на частоте 5.423 МГц в направлении магнитного зенита при $P_{эфф} = 360$ МВт.. Циклы нагрева и поляризации мощной КВ 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 ~ 40 с. После выключения стенда возвращение N_e к фоновым значениям в различных экспериментах происходило через 2 - 5 мин.

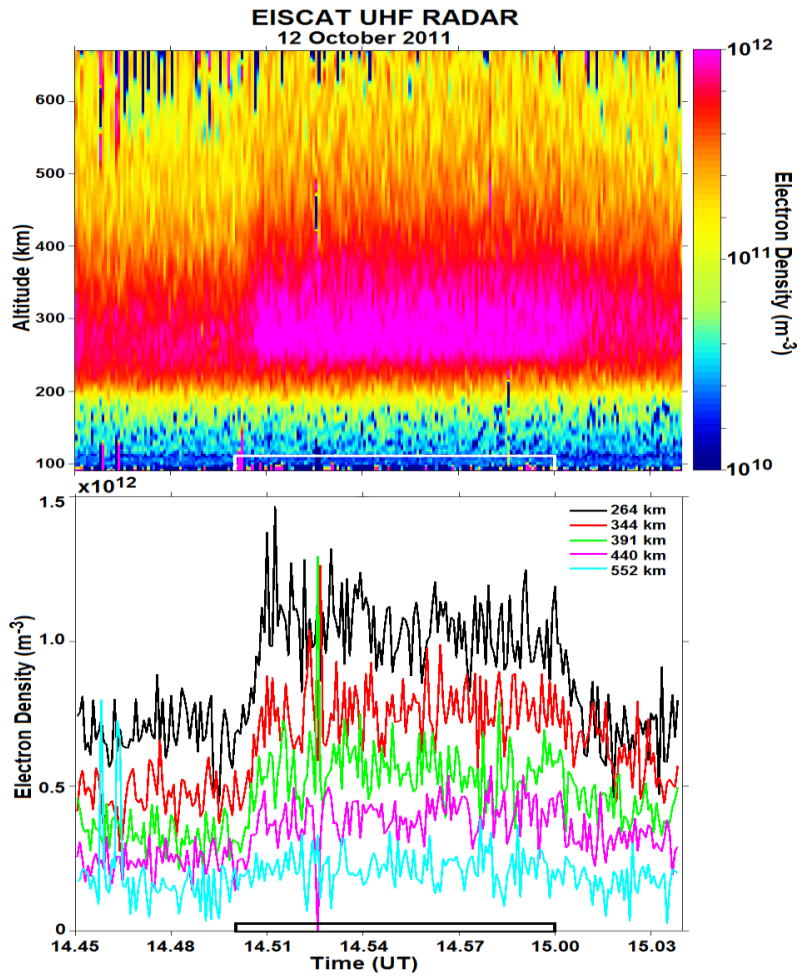


Рис. 4. Высотно-временное распределение N_e и вариации N_e на фиксированных высотах с 5 с разрешением по времени 12 октября 2011 г. с 14:45 до 15:04 UT. Мощная КВ радиоволна Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 7.953$ МГц ($f_H \approx f_oF2$) при $P_{эфф} = 820$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

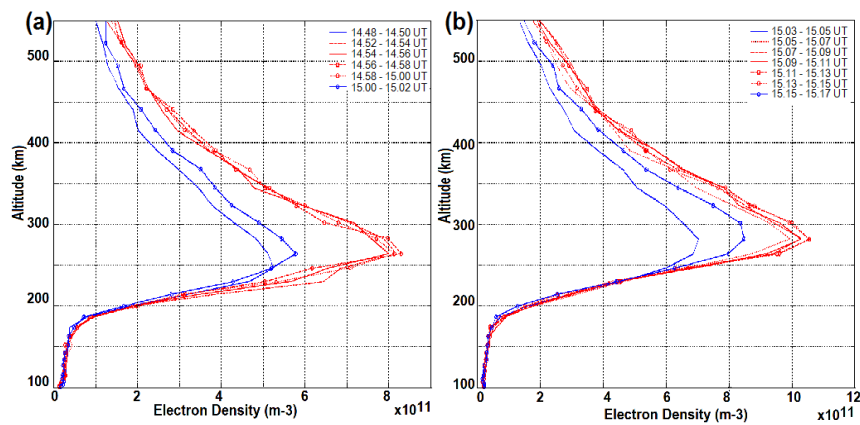


Рис. 5. $N_e(h)$ -профили, усредненные на 2-х мин интервалах, до начала нагрева, в течение цикла Х-нагрева и после выключения нагревного стенда: (а) 10 октября 2011 г., $P_{эфф} = 680$ МВт, частота нагрева $f_H = 7.1$ МГц; (б) 12 октября 2011 г., $P_{эфф} = 820$ МВт, $f_H = 7.953$ МГц.

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.

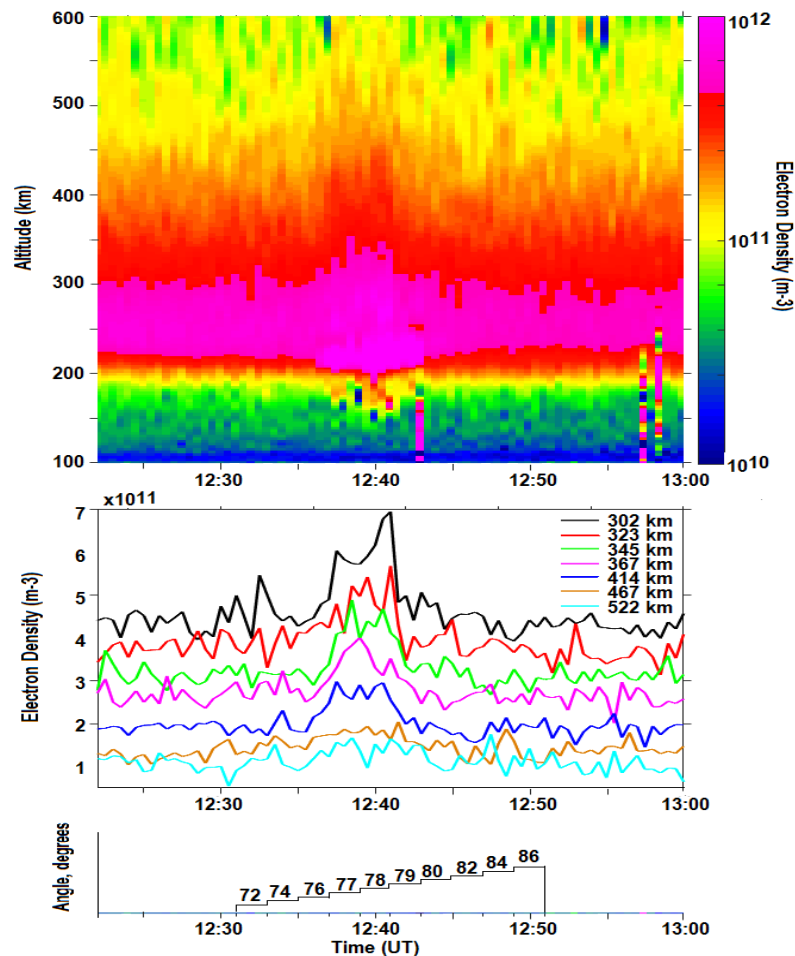


Рис. 6. Высотно-временное поведение N_e , а также вариации N_e на фиксированных высотах в цикле X-нагрева 2 ноября 2013 г. с 12:31 до 12:51 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте $f_H = 6.96$ МГц ($f_H \leq f_oF2$) при $P_{эфф} = 550$ МВт. Радар НР измерял при ступенчатом изменении 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 HP 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)