

УДК: 533.951 + 537.868

DOI: 10.26907/rwp29.2025.620-623

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН НА ВЫСОКОШИРОТНУЮ F-ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВЫСОКИХ ЭФФЕКТИВНЫХ МОЩНОСТЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров, А.О. Мингалева

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 18

E-mail: nataly@aari.nw.ru, borisova@aari.ru, askalishin@aari.ru, imegorov@aari.ru, aomingaleva@aari.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований явлений в высокоширотной верхней ионосфере, возникающих при нагреве на частотах выше критической частоты слоя $F2$ при высоких эффективных мощностях излучения. Обнаружено, что при O-нагреве высокоширотной верхней ионосферы в магнитный зенит при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} = 350\text{--}840$ МВт) на частотах, превышающих f_oF2 на $0.9\text{--}1.5$ МГц, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ).

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна; высокоширотная ионосфера; дакт; электронная концентрация; искусственные ионосферные неоднородности; узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы

PHENOMENA IN THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERIC F-REGION INDUCED BY POWERFUL HF RADIO WAVES AT HIGH EFFECTIVE RADIATED POWERS

N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, T.D. Borisova, I.M. Egorov, A.O. Mingaleva

Abstract. We present results of investigations of the phenomena in the high-latitude upper ionosphere, occurring under HF pumping at frequencies above the critical frequency of the $F2$ layer at high effective radiated power. It was found the creation of ducts with the enhanced electron density N_e , the excitation of artificial field-aligned irregularities (FAI), and narrowband stimulated electromagnetic emission (NSEE) induced by the ordinary (O-mode) polarized HF pump waves at frequencies above the critical frequency of the $F2$ layer by $0.9\text{--}1.5$ MHz under the high effective radiated power (ERP = $350\text{--}840$ MW).

Keywords: powerful HF radio wave; high-latitude ionosphere; duct; electron density; artificial field-aligned irregularities; narrowband stimulated electromagnetic emission

Введение

Результаты экспериментов по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами, выполненных в последние годы на высокоширотных КВ нагревных стендах НААРП и EISCAT/Heating, показали, что при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} > 250$ МВт) наблюдается генерация явлений, невозможных при обычно используемых на КВ нагревных стендах мощностях $P_{\text{эфф}} \leq 150\text{--}200$ МВт. К их числу относятся: генерация дополнительных слоев в ионосфере [1], возобновление возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, сосуществующих с генерацией мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) [2, 3].

Целью данной работы является исследование характеристик явлений в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере, возникающих при высоких эффективных мощностях излучения КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации в условиях, когда О-волна не отражалась от ионосферы. Для этих условий будут детально рассмотрены характеристики и эволюция во времени крупномасштабных ориентированных вдоль магнитного поля образований с повышенной плотностью электронов (дактов N_e), мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и спектральной структуры узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Будет также уделено внимание сравнению характеристик дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/Х-нагреве в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя $F2$.

Характеристика экспериментов и методов диагностики

Эксперименты выполнялись специалистами ААНИИ 22 октября 2012 г., 23 октября 2013 г., и 28 октября 2015 г. на нагревном стенде EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E, $L = 6.2$, $I = 78^\circ$) в г. Тромсе, Норвегия, описание которого приведено в [4]. В период экспериментов производился альтернативный О-/Х-нагрев в направлении магнитного зенита (12° к югу от вертикали) на частотах $f_H = 6.2$; 6.77; 7.1 и 7.953 МГц. Излучение осуществлялось на фазированную антенную решетку 1 (ФАР 1) с шириной диаграммы направленности 5–6°, обеспечивая для условий экспериментов эффективную мощность излучения 350 – 840 МВт. Эксперименты выполнялись в ранние вечерние часы при спокойных магнитных условиях, когда частота нагрева f_H существенно превышала критическую частоту слоя $F2$ ($f_H - foF2 = 0.9$ –1.5 МГц).

Для диагностики эффектов воздействия мощных КВ радиоволн использовались разнообразные средства и методы: (1) радар некогерентного рассеяния радиоволн, пространственно совмещенный с нагревным стендом EISCAT/Heating [5]; (2) когерентный КВ радар CUTLASS (63° N, 27° E) [6], установленный в Ханкасалми, Финляндия, к югу от нагревного стенда на ~ 1000 км; (3) комплекс для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения (УИРИ) в полосе ± 1 кГц (относительно частоты нагрева) [7], расположенный на научно-исследовательской станции ААНИИ «Горьковская» (60.27° N, 29.38° E), удаленной на расстояние примерно 1200 км от нагревного стенда.

Результаты и анализ

Результаты выполненных экспериментов позволили впервые обнаружить, что при О-нагреве высокоширотной верхней ионосферы в магнитный зенит при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} = 350$ –840 МВт) на частотах, превышающих $foF2$ на 0.9–1.5 МГц, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Факт возбуждения возмущений в верхней (F -область) ионосфере в условиях, когда мощная О-волна не отражается от ионосферы, является неожиданным.

На рисунке 1, в качестве примера, приведено высотно-временное распределение электронной концентрации N_e и температуры T_e , поведение N_e и T_e на фиксированных высотах, спектрограмма УИРИ и вариации критических частот слоя $F2$ 28 октября 2015 г. с 15:00 до 15:30 UT при альтернативном О-/Х-нагреве на частоте $f_H = 6.77$ МГц. Излучение мощной КВ радиоволны О-поляризации началось в 15:01 UT, когда критическая частота слоя $F2$ составляла $foF2 = 5.9$ МГц, которая постепенно уменьшалась до значений $foF2 = 5.6$ МГц к окончанию цикла Х-нагрева в 15:26 UT. Таким образом, в течение эксперимента частота нагрева $f_H = 6.77$ МГц, превышала $foF2$ на ~ 0.9 –1.2 МГц, что свидетельствует о том, что как мощная волна О-поляризации в цикле 15:01 – 15:11 UT, так и Х-волна в цикле 15:16 – 15:26 UT не отражались от ионосферы. Анализ поведения мощности рассеянных от МИИН сигналов на частотах $f \sim 11.5$; 13.2; 16.2 и 18 МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS для того же интервала времени продемонстрировал идентичность характеристик МИИН при О-нагреве (времена нарастания и релаксации, а также размер области существования МИИН) характеристикам МИИН, возбуждаемым при Х-нагреве.

Обобщая результаты экспериментов, отметим, что излучение мощной КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) поляризации в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя $F2$ ($f_H - foF2 = 0.9$ –1.1 МГц), приводит к генерации разнообразных интенсивных возмущений в ионосферной плазме. К основным из них следует отнести следующие: создание дактов N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). В результате сравнения характеристик дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/Х-нагреве в магнитный зенит в условиях, когда мощная волна не отражается от ионосферы установлено, что в целом их поведение имеет одинаковый характер и хорошо согласуется с результатами других наших экспериментов при Х-нагреве. Это дает основания полагать, что в рассматриваемых условиях происходила трансформация обыкновенной волны в необыкновенную.

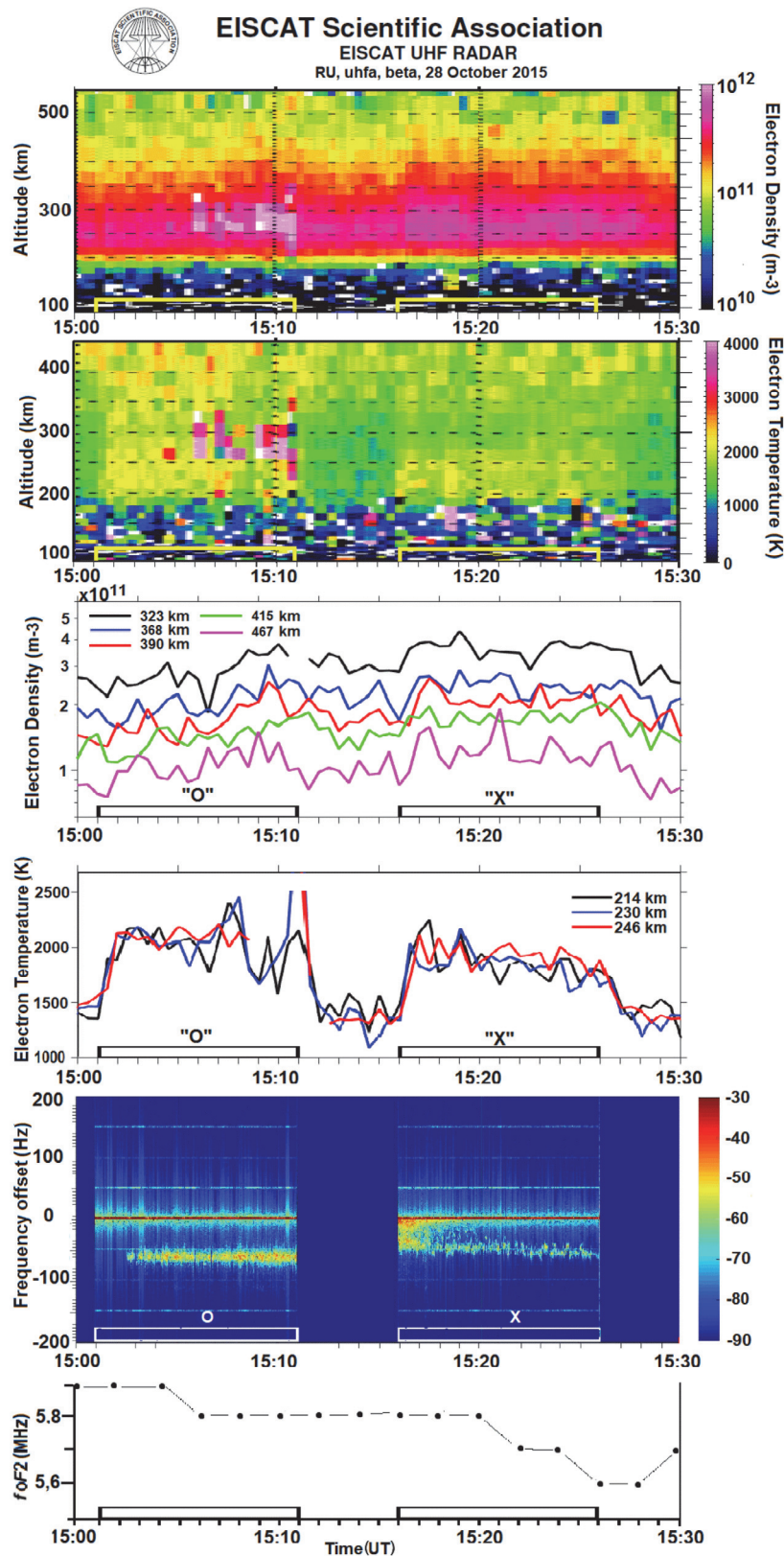


Рис. 1. Высотно-временное распределение электронной концентрации N_e и температуры T_e , поведение N_e и T_e на фиксированных высотах по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн, спектрограмма УИРИ и вариации критических частот слоя F2 28 октября 2015 г. с 15:00 до 15:30 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 6.77$ МГц. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на оси времени.

Заключение

Впервые обнаружено, что при О-нагреве высокоширотной верхней ионосферы в магнитный зенит при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} = 350\text{--}550$ МВт) на частотах, превышающих f_oF2 на $0.9 - 1.1$ МГц, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Поведение и характеристики МИИН и спектральной структуры УИРИ при О-нагреве в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы, являются типичными для Х-нагрева высокоширотной F -области ионосферы. Это дает основания полагать, что в рассматриваемых условиях происходила трансформация обыкновенной волны в необыкновенную.

Благодарности

Авторы благодарят международную научную ассоциацию EISCAT за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17- 00020П.

Список литературы

1. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., Kendall E., Mills T., Carlson H., Snyder A. L. Creation of artificial ionospheric layers using high-power HF waves // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37. – L02106. <https://doi.org/10.1029/2009GL041895>
2. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S. et al. Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* – 2020. – V. 125. – № 7. <https://doi.org/10.1029/2020JA028203>.
3. 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. <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436>.
4. Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Sci.* – 2016. – № 9. – P. 1533–1546.
5. 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.
6. Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H. et al. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars // *Ann. Geophys.* – 2004. – V. 22. – P. 459–473.
7. Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Ion Gyro Harmonic Structures in Stimulated Emission Excited by X-Mode High Power HF Radio Waves at EISCAT // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* – 2021. – Vol. 126. – № 8. <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>