

Искусственные возмущения в высокоширотной F-области ионосферы при X-нагреве на частотах ниже и выше критической частоты

Н.Ф. Благовещенская¹, А.С. Калишин¹, Т.Д. Борисова¹, И.М. Егоров¹, А.О. Мингалева¹, Г.А. Загорский¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38
E-mail: nataly@aari.nw.ru

Представлены результаты сравнения характеристик каналов повышенной электронной плотности, мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) и продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) при воздействии мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации стенда EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) на высокоширотную F-область ионосферы на частотах нагрева ниже и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$).

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, поляризация, электронная концентрация, канал, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, продольные плазменные волны

Artificial disturbances in the high-latitude ionospheric F-region induced by extraordinary polarized powerful HF radio waves at frequencies below and above the critical frequency

N.F. Blagoveshchenskaya¹, A.S. Kalishin¹, T.D. Borisova¹, I.M. Egorov¹, O.A. Mingaleva¹, G.A. Zagorskyi¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute

We present the results of comparison of features of the ducts with the enhanced electron density, artificial field-aligned ionospheric irregularities (FAFI), narrowband stimulated electromagnetic emission (NSEE), and elongated plasma waves (Langmuir and ion-acoustic) in the high-latitude ionospheric F-region, induced by the X-mode HF pumping at frequencies below and above the critical frequency ($f_H \leq f_{xF2}$ and $f_H > f_{xF2}$).

Keywords: high latitude ionosphere, powerful HF radio wave, polarization, electron density, duct, artificial field-aligned irregularities, elongated plasma waves

Введение

Результаты многочисленных экспериментов, выполненных на высокоширотном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия) в 2009 – 2021 г.г., позволили впервые обнаружить, что интенсивные искусственные возмущения в F-области ионосферы создаются не только при воздействии на ионосферу мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации, но и волн накачки необыкновенной (X-мода) поляризации [1]. Было установлено, что нелинейное взаимодействие мощной X-волны с ионосферной плазмой F-области вызывает создание дактов повышенной плотности электронов, омический нагрев электронов, генерацию магнито-ориентированных неоднородностей и узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы, возбуждение продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) и оптического излучения в красной и

зеленой линиях атомарного кислорода [1-6]. При этом искусственные возмущения в F-области ионосферы создаются при X-нагреве вдоль магнитного поля Земли (магнитный зенит) на частотах как ниже, так и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 [2].

Целью данной работы является сравнение характеристик разнообразных нелинейных явлений в F-области ионосферы при воздействии мощными КВ радиоволнами необыкновенной (X-мода) поляризации на частотах нагрева ниже и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$).

Методы исследований

Для модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами использовался КВ нагревный стенд EISCAT/Heating в г. Тромсе, Норвегия (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$, $I=78^\circ$). Описание и технические характеристики стенда приведены в работе [7]. Эксперименты выполнялись при спокойных магнитных условиях в дневные и вечерние часы. Мощная КВ радиоволна необыкновенной (X-мода) поляризации излучалась фазированной антенной решеткой «1» (ФАР 1) с шириной диаграммы направленности 5-6° (на уровне – 3 дБ) в направлении магнитного зенита на частотах в диапазоне $f_H = 5.5 - 8.0$ МГц. Эффективная мощность излучения в период экспериментов составляла $P_{\text{эфф}} = 320 - 840$ МВт.

Для диагностики эффектов воздействия использовались различные инструменты и методы. В качестве основных диагностических средств использовался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [8], пространственно совмещенный с нагревным стендом, и когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [9] в Ханкасалми, Финляндии (63° N, 27° E), расположенный к югу от нагревного стенда на ~ 1000 км. Измерения с помощью радара НР выполнялись в направлении магнитного поля в Тромсе в диапазоне высот от 90 до 700 км с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 1.5 или 3 км. CUTLASS излучал на узконаправленную антенну с шириной луча примерно 3.3°, ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе («луч» 5). Измерения проводились на трех частотах с разрешением по дальности 15 км. Для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) использовался приемный комплекс, установленный на обсерватории ААНИИ вблизи г. С.-Петербург на расстоянии 1200 км от КВ нагревного комплекса [10]. Выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в Тромсе.

Результаты и обсуждение

Результаты многочисленных экспериментов, выполненных на стенде EISCAT/Heating, показали что разнообразные нелинейные явления в высокоширотной F-области ионосферы создаются при X-нагреве в магнитный зенит на частотах как ниже, так и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$) [2]. Сравним характеристики искусственных ионосферных возмущений при X-нагреве на частотах ниже критической частоты $f_H \leq f_{xF2}$ и в условиях, когда мощная X-волна не отражается от ионосферы ($f_H > f_{xF2}$).

Создание дактов повышенной электронной плотности и генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) являются типичными явлениями X-нагрева как при $f_H \leq f_{xF2}$, так и при $f_H > f_{xF2}$. Дакты представляют собой ориентированные вдоль магнитной силовой трубки области повышенной электронной концентрации, достигающие $N_e - N_{eo}/N_{eo} = 50-80\%$ относительно фоновых значений N_{eo} . Они регистрировались в диапазоне высот от ~

280 – 300 км вплоть до верхней высотной границы измерений EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (550 – 600 км) [11, 12]. Создание дактов сопровождалось возрастанием температуры электронов T_e вследствие омического нагрева. При этом возрастания T_e составляли 20 – 30% при $f_H \leq f_oF2$ и достигали 50% при $f_H > f_oF2$.

На рис. 1 приведено высотно-временное распределение электронной концентрации и температуры (N_e и T_e) по данным измерений EISCAT радара HP, интенсивности рассеянных на МИИН сигналов на частотах ~ 10 и 13 МГц по данным радара CUTLASS и критических частот слоя F2 в Тромсе 15 октября 2012 г. с 15:30 до 17:30 UT.

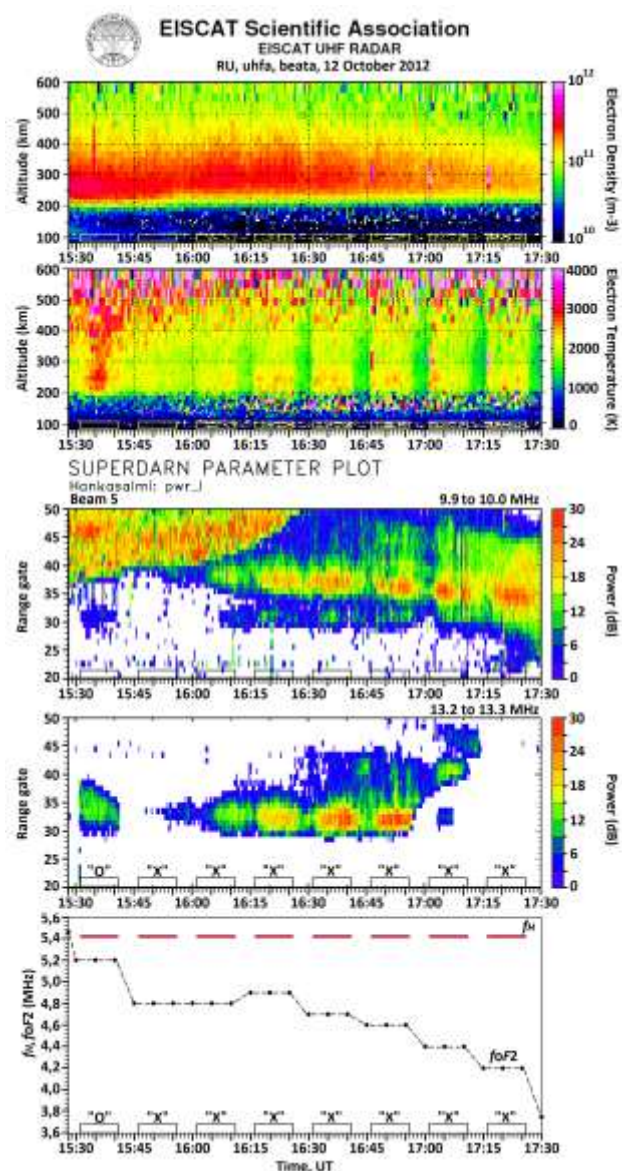


Рис. 1. Высотно-временное распределение электронной концентрации и температуры (N_e и T_e) по данным измерений EISCAT радара, интенсивности рассеянных на МИИН сигналов на частотах ~ 10 и 13 МГц по данным радара CUTLASS и поведение критических частот слоя F2 15 октября 2012 г. с 15:30 до 17:30 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 5.423 МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения $P_{эфф} = 320$ МВт. Циклы нагрева и поляризация мощной волны указаны на оси времени.

Эксперимент 15 октября 2012 г. выполнялся в условиях, когда мощная Х-волна не отражалась от ионосферы. Как следует из рис. 1, возрастания электронной концентрации сопровождалась генерацией МИИН. При этом времена нарастания и релаксации МИИН зависят от предыстории нагрева. При Х-нагреве с "холодного" старта (первый цикл Х-нагрева с 15:46 - 15:56 UT) по данным радара CUTLASS на частоте 10 МГц МИИН не возбуждались, а на частоте 13 МГц слабые МИИН появились только ~ через 4 мин нагрева. В последующих циклах, когда сказывалось влияние эффектов последействия от предшествующих циклов нагрева, времена нарастания $\tau_{нар}$ уменьшались, а времена релаксации $\tau_{рел}$ увеличивались, достигая 5 мин (длительность паузы между циклами нагрева), что приводило практически к непрерывному существованию неоднородностей в период эксперимента. Аналогичное поведение МИИН наблюдалось и при Х-нагреве на частотах ниже критической частоты.

Возбуждение узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ), регистрируемого на обсерватории ААНИИ "Горьковская" на удалении ~ 1200 км от нагревного стенда EISCAT/Heating, происходило при Х-нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$), но спектральная структура и механизмы генерации УИРИ были принципиально различными. При Х-нагреве на частотах $f_H \leq f_{xF2}$ в спектрах регистрировались многократные ионные гирогармонические структуры на частотах $\pm n \cdot (51 - 54)$ Гц, где n - номер гармоники. Дискретные спектральные линии УИРИ упорядочены, приблизительно по гирочастоте ионов атомарного кислорода O^+ . В этих условиях механизмом генерации УИРИ является параметрический распад мощной Х-волны EM_0 на высокочастотную электронную волну Бернштейна (ЕВ) и низкочастотную ионную волну Бернштейна (ИБ) с последующим распадом «материнской» волны Бернштейна в «дочерние» волны. Таким образом развивается нелинейный каскадный процесс, приводящий к генерации дискретных спектральных компонент, разнесенных на гирочастоту ионов O^+ вследствие стимулированного рассеяния Бернштейна на ионах (Stimulated Ion Bernstein Scatter, SIBS) [13]. При Х-нагреве на частотах $f_H > f_{xF2}$ в спектрах регистрировалась одна спектральная компонента, сдвинутая вниз по частоте относительно нагревного сигнала на (56 – 59) Гц. В этих условиях мощная электромагнитная волна EM_0 непосредственно распадается на рассеянную высокочастотную электромагнитную волну EM_s и низкочастотную электростатическую ионную циклотронную волну EIC вследствие стимулированного рассеяния Бриллюэна (Magnetized Stimulated Brillouin Scatter, MSBS), [13].

В отличие от дактов повышенной электронной плотности, МИИН и УИРИ, возбуждение продольных плазменных волн, свидетельствующих о развитии параметрической распадной неустойчивости, происходит только в условиях отражения мощной Х-волны от ионосферы ($f_H \leq f_{xF2}$). По данным EISCAT UHF (930 МГц) радара НР ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны (LW и IAW) проявляются в спектрах рассеянных сигналов в высокочастотном и низкочастотном каналах измерений как усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HFPL и HFIL).

На рис. 2 показано поведение HFPL и мощности рассеянного сигнала радара НР, указывающего на возбуждение HFIL, в период эксперимента 28 октября 2013 г. Мощная КВ радиоволна Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 7.1 МГц. Эффективная мощность излучения составляла $P_{эфф} = 560$ МВт. Рис. 2 ясно демонстрирует исчезновение вызванных нагревом плазменных линий в цикле 16:46 - 16:56 UT, когда частота нагрева превысила критическую частоту.

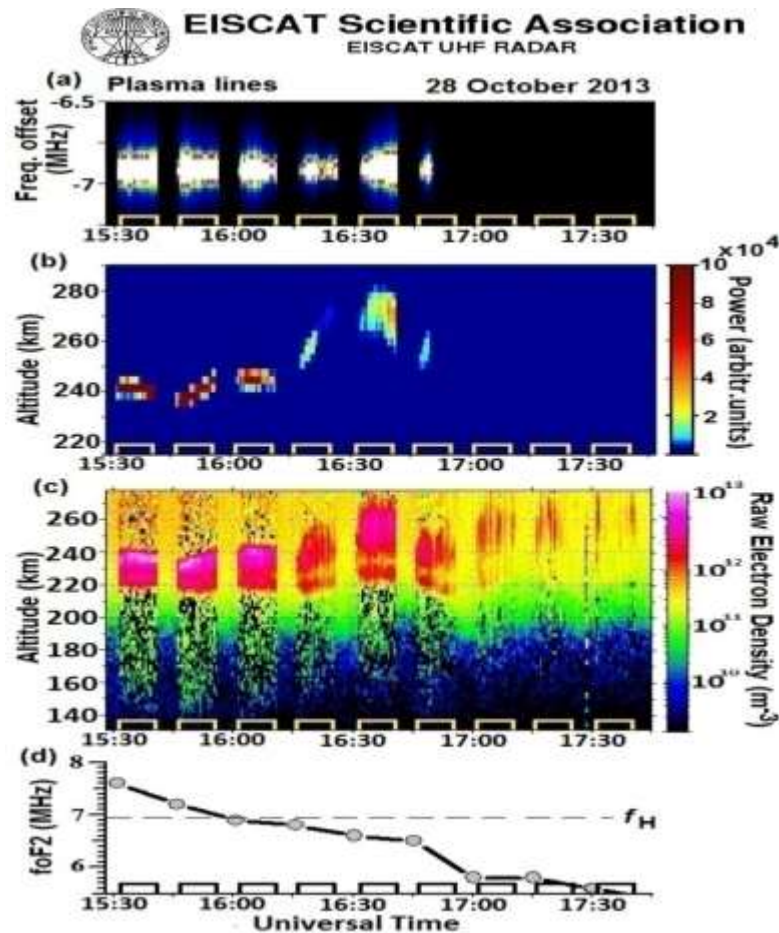


Рис. 2. Интенсивности вызванных нагревом плазменных линий на частоте нагрева, высотное-временное распределение HFPL, мощность рассеянного сигнала радара HP (отмеченная на оси как "raw electron density"), и поведение критических частот слоя F2 в период эксперимента 28 октября 2013 г. с 15:30 до 18:00 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 7.1 МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения $P_{эфф} = 560$ МВт. Циклы X-нагрева указаны на оси времени.

Рис. 2 ясно демонстрирует исчезновение вызванных нагревом плазменных линий в цикле 16:46 - 16:56 UT, когда частота нагрева превысила критическую частоту.

Выводы

По данным многочисленных экспериментов, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/HEATING при спокойных магнитных условиях с использованием разнообразных диагностических средств, выполнено сравнение характеристик разнообразных нелинейных явлений в F-области ионосферы при воздействии мощными КВ радиоволнами необыкновенной (X-мода) поляризации на частотах нагрева ниже и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$). Показано, что создание дактов повышенной электронной плотности, генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы происходит при $f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$, в то время как возбуждение продольных плазменных волн наблюдалось только при $f_H \leq f_{xF2}$ и $f_H > f_{xF2}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17- 00020П

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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>.
5. 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 Phys.* 2021. V. 126. № 7. <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
6. Egorov I.M., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S., Borisova T.D., Zagorskiy G.A. Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations // *Arctic and Antarctic Research.* 2025. V. 71. №1. P. 6–16. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-6-16>
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Rogov D.D. Remote Diagnostics of Effects Induced by High-latitude Heating Facilities // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2021. V46. P. 231–240. <https://doi.org/10.3103/S1068373921040038>
11. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M. Artificial Ducts Created via High-Power HF Radio Waves at EISCAT // *Remote Sens.* 2023. V. 15. №9. 2300. <https://doi.org/10.3390/rs15092300>
12. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M., Zagorskiy G.A. Disturbances of electron density in the high latitude upper (F-region) ionosphere induced by X-mode HF pump waves from EISCAT UHF radar observations. // *Arctic and Antarctic Research.* 2022. V. 68. № 3. P. 248–257. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257>.
13. Kalishin A. S., Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Egorov I. M.. Comparison of Spectral Features of Narrowband Stimulated Electromagnetic Emission Excited by an Extraordinary Pump Wave in the High-latitude Ionospheric F Region at Frequencies below and above the F2 Layer X-component Critical Frequency // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2022. V. 47. № 12. P. 921–930. <https://doi.org/10.3103/S1068373922120032>