

Влияние ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating на характеристики искусственных возмущений в высокоширотной верхней ионосфере (F-область)

Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, А.С. Калишин, И.М. Егоров, Г.А. Загорский

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

Представлены результаты исследований влияния ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating на характеристики явлений в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации. Выполнено сравнение характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, электронной концентрации и температуры, ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, а также узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы при излучении мощной КВ радиоволны на фазированные антенные решетки с шириной 5 - 6° и 10 - 12° (на уровне – 3 дБ).

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, высокоширотная ионосфера, искусственные неоднородности, продольные плазменные волны, радар некогерентного рассеяния радиоволн

Influence of the HF antenna beam width of EISCAT/Heating facility on characteristics of artificial disturbances in the high latitude upper (F-region) ionosphere

N.F. Blagoveshchenckaya, T.D. Borisova, A.S. Kalishin, I.M. Egorov, G.A. Zagorskiy

Arctic and Antarctic Research Institute

The results of investigations of the influence of the HF antenna beam width of EISCAT/Heating facility on characteristics of artificial disturbances in the high latitude upper (F-region) ionosphere induced by the powerful extraordinary (X-mode) polarized HF radio waves are presented. The comparison between features of artificial field-aligned irregularities, electron density and temperatures, Langmuir and ion-acoustic plasma waves, and narrowband (± 1 kHz from the heater frequency) stimulated electromagnetic emission induced by HF pumping on the phased Arrays with the beam width of 5 - 6° and 10 - 12° (at – 3 dB level is performed).

Keywords: powerful HF radio wave, high latitude ionosphere, artificial irregularity, elongated plasma waves, incoherent scatter radar

Введение

Результаты многочисленных экспериментов на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия), выполненных специалистами ААНИИ, убедительно продемонстрировали возможность создания разнообразных интенсивных искусственных ионосферных возмущений в высокоширотной F-области ионосферы при воздействии на нее мощными КВ радиоволнами необыкновенной (X-мода) поляризации [1]. К их числу относятся: генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ), возбуждение продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), создание каналов повышенной электронной плотности (см., например, [2 - 6] и ссылки там). Важно подчеркнуть, что при нагреве F-

области ионосферы мощной КВ радиоволной Х-поляризации возмущения в ионосфере создаются на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя F_2 [1]. Принципиально важным для Х-нагрева является излучение мощной КВ радиоволны в магнитный зенит. Только в этом случае, в отличие от О-нагрева, создаются интенсивные возмущения в высокоширотной F – области ионосферы.

Целью настоящей работы является исследование влияния ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating на характеристики явлений в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (Х-мода) поляризации. Для достижения поставленной цели было выполнено сравнение характеристик разнообразных искусственных возмущений при излучении мощной КВ радиоволны на фазированные антенные решетки с шириной 5 - 6° и 10 - 12° (на уровне – 3 дБ).

Описание эксперимента и диагностические средства и методы

Для модификации высокоширотной F -области ионосферы мощными КВ радиоволнами использовался КВ нагревной стенд EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$, $I=78^\circ$), расположенный в г. Тромсе, северная Норвегия [7]. Эксперимент выполнялся 27 октября 2013 г. с 12:00 до 14:00 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте $f_H = 7.953$ МГц в направлении магнитного поля в Тромсе (магнитный зенит), при котором диаграмма направленности антенны КВ нагревного стенда была наклонена от вертикали на юг на 12°. Альтернативный О-Х-Х-О нагрев осуществлялся циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза, начиная с 12:01 UT. В течение первого часа эксперимента альтернативный О/Х-нагрев осуществлялся на фазированную антенную решетку «3» (А 3) с шириной диаграммы направленности 10 - 12°, обеспечивая эффективную мощность излучения ERP = 230 МВт. С 13 до 14 UT излучение Х/О-волны производилось на ФАР «1» (А 1), которая имеет ширину диаграммы направленности на уровне половинной мощности порядка 5 - 6° и обеспечивала эффективную мощность излучения ERP = 820 МВт.

В качестве основных диагностических средств эффектов воздействия использовался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [8], пространственно совмещенный с нагревным стендом, когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [9] в Финляндии (63° N, 27° E), находящийся примерно на 1000 км южнее КВ нагревного стенда и аппаратура для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения [10], установленная на обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» на удалении ~ 1200 км от Тромсе.

Измерения с помощью радара НР выполнялись в диапазоне высот от 90 до 700 км с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 1.5 или 3 км. С помощью радара НР определялись параметры ионосферной плазмы (электронная концентрация и температура, N_e и T_e), а также характеристики продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), которые проявляется непосредственно в спектрах сигнала радара НР в виде усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HFPL и HFIL). Для определения пространственной структуры искусственно возмущенной области (ИВО) ионосферы радар НР работал в режиме сканирования по углам возвышения от 74 до 90°. В этом случае в течение длительности цикла нагрева осуществлялось ступенчатое изменение углов возвышения радара в последовательности 74 - 76 - 77 - 78 - 79 - 80 - 82 - 84 - 86 - 90°. Длительность каждой ступени составляла 2 минуты. 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 с полосой до 3 кГц, установленный на обсерватории ААНИИ вблизи г. С.-Петербург на расстоянии 1200 км от КВ нагревного комплекса. Выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в Тромсе.

Измерения с помощью радара CUTLASS выполнялись одновременно на трех частотах от 16 до 20 МГц, соответствующих обратному рассеянию от МИИН с поперечными масштабами l_{\perp} от 9.3 до 7.5 м, с разрешением по дальности 15 км. CUTLASS излучал на узконаправленную антенну с шириной луча примерно 3.3°, ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе («луч» 5).

Для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) использовался приемный комплекс с полосой до 3 кГц, установленный на обсерватории ААНИИ вблизи г. С.-Петербург на расстоянии 1200 км от КВ нагревного комплекса.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано поведение электронной концентрации и температуры (N_e и T_e) в период эксперимента 27 октября 2013 г. по данным измерений радара некогерентного рассеяния в Тромсе при нагреве высокоширотной F-области ионосферы. Мощная КВ радиоволна необыкновенной (X-мода) поляризации излучалась на частоте 7.953 МГц в направлении магнитного зенита на ФАР 3 и ФАР 1 циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Радар HP в течение 20 мин цикла нагрева работал в режиме сканирования искусственно возмущенной области ионосферы (ИВО) по углам возвышения. Частота нагрева была ниже критической частоты слоя F2 ($f_H / foF2 = 0.9$). Как следует из рис 1, сильные возрастания электронной плотности N_e до высот порядка 550 км наблюдались как при излучении мощной X-волны на ФАР «3» с 12:31 – 12:51 UT при ERP = 230 МВт, так и при X-нагреве на ФАР «1» с 13:01 – 13:21 UT ERP = 820 МВт. При этом возрастания N_e в широком диапазоне высот (дакты N_e) регистрировались в диапазоне углов возвышения радара HP 76 - 80° (поперечный размер дактов в северо-южном направлении 5°) при ширине диаграммы направленности антенны ФАР «3» EISCAT/Heating ~ 10 - 12°. При излучении на ФАР «1» с шириной диаграммы 5 – 7°, дакты N_e наблюдались в более узком диапазоне углов 77 - 79° (поперечный размер в северо-южном направлении составлял 3°). Таким образом как при излучении мощной X-волны на ФАР «3», так и на ФАР «1», пространственная протяженность дактов примерно в два раза меньше ширины диаграммы направленности антенн КВ нагревного стенда, что свидетельствует о сильной фокусировке мощной X-волны в направлении магнитного поля.

На рис. 2 приведено поведение интенсивностей усиленных нагревом ионных линий, смещенных вниз и вверх по частоте относительно частоты радара HP (HF-enhanced downshifted and upshifted ion lines, HFIL_{DOWN} and HFIL_{UP}) и инициированных нагревом плазменных линий (HF-induced plasma lines, HFPL) в период эксперимента 27 октября 2013 г. Для сравнения приведено также поведение N_e на фиксированных высотах. Напомним, что HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL непосредственно регистрируются в спектрах радара HP и являются прямым указанием на возбуждение ионно-акустических и ленгмюровских плазменных волн.

Поведение мощностей рассеянных на МИИН сигналов на частотах ~ 16, 18 и 20 МГц по данным измерений радара CUTLASS в период проведения эксперимента 27 октября 2013 г. проиллюстрировано на рис. 3

.....



EISCAT Scientific Association

EISCAT UHF RADAR

RU, uhfa, beata, 27 October 2013

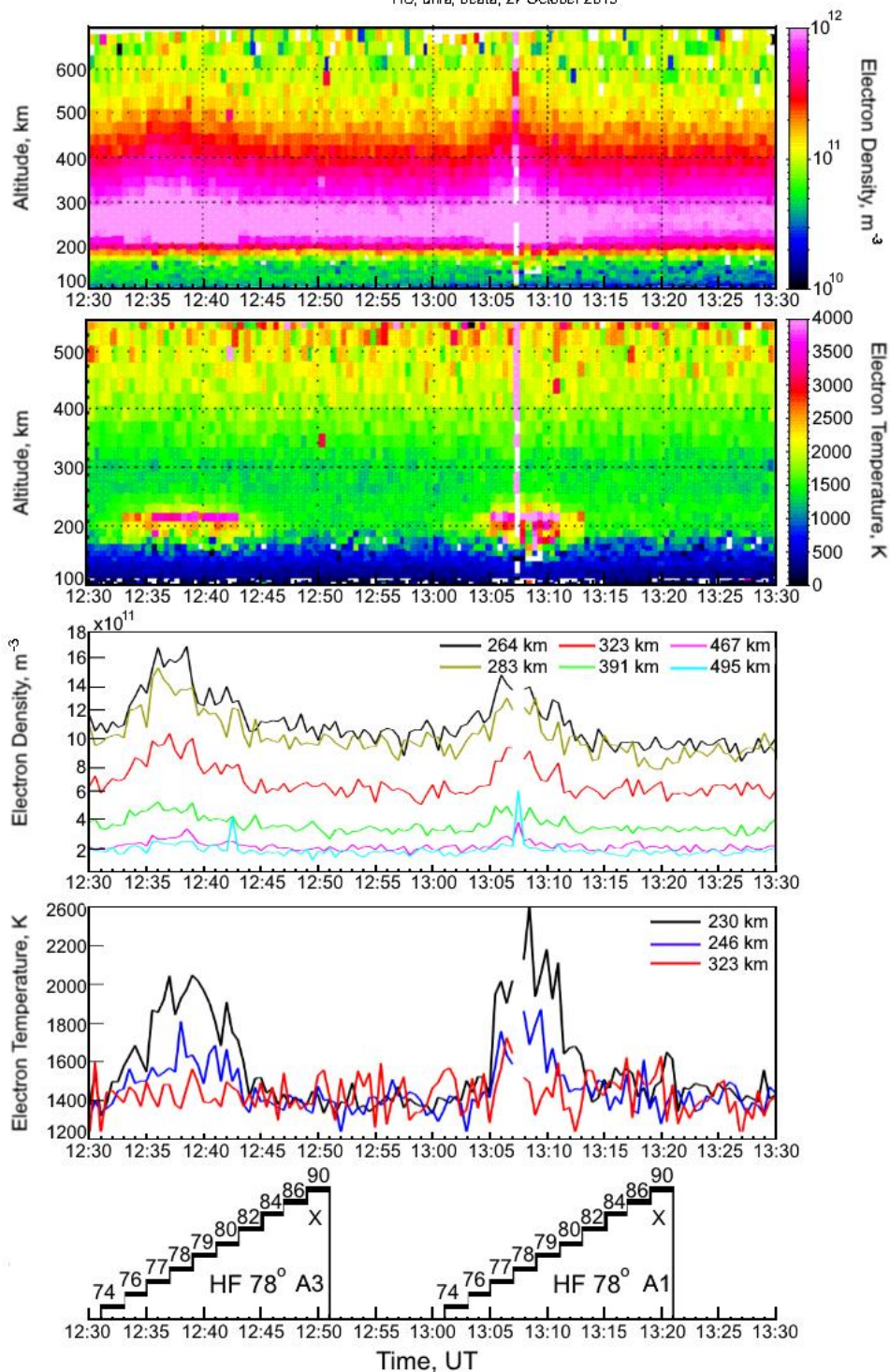


Рис. 1. Высотно-временное распределение N_e и T_e , а также их поведение на фиксированных высотах 27 октября 2013 г. с 12:30 до 13:30 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 7.953 МГц в магнитный зенит на ФАР 3 с 12:31 – 12:51 UT и ФАР 1 с 13:01 – 13:21 UT. Схема ступенчатого изменения углов возвышения радара НР в течение циклов нагрева приведена на нижней панели.



EISCAT Scientific Association

EISCAT UHF RADAR

RU, uhfa, beata, 27 October 2013

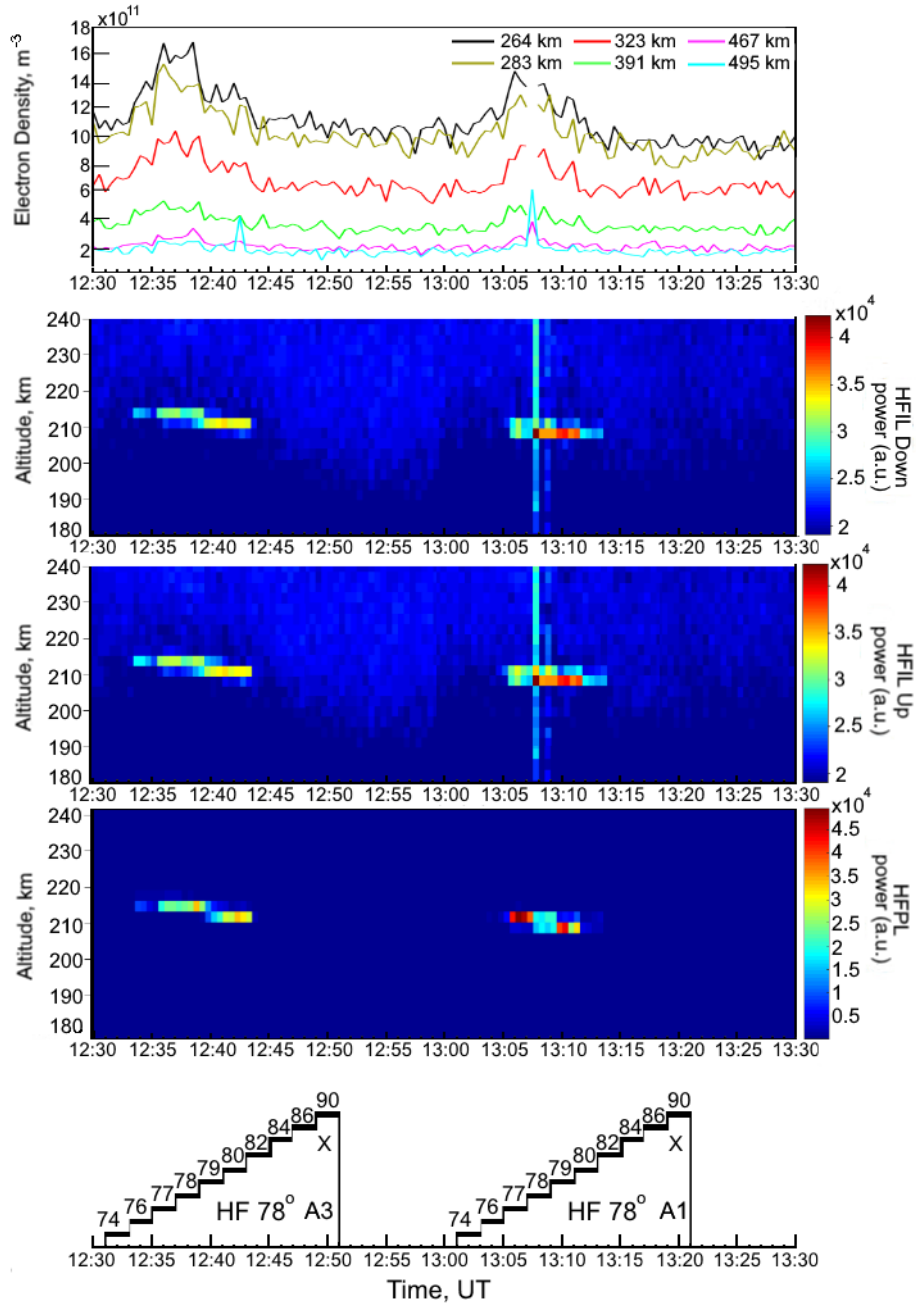


Рис. 2. Поведение N_e и T_e на фиксированных высотах, а также высотное-временное распределение интенсивностей $HFIL_{DOWN}$, $HFIL_{UP}$ и $HFPL$ 27 октября 2013 г. с 12:30 до 13:30 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 7.953 МГц в магнитный зенит на ФАР 3 с 12:31 – 12:51 UT и ФАР 1 с 13:01 – 13:21 UT. Схема ступенчатого изменения углов возвышения радара НР в течение циклов нагрева приведена на нижней панели.

.....

SUPERDARN PARAMETER PLOT

Hankasalmi: **Beam 5**

27 Oct 2013

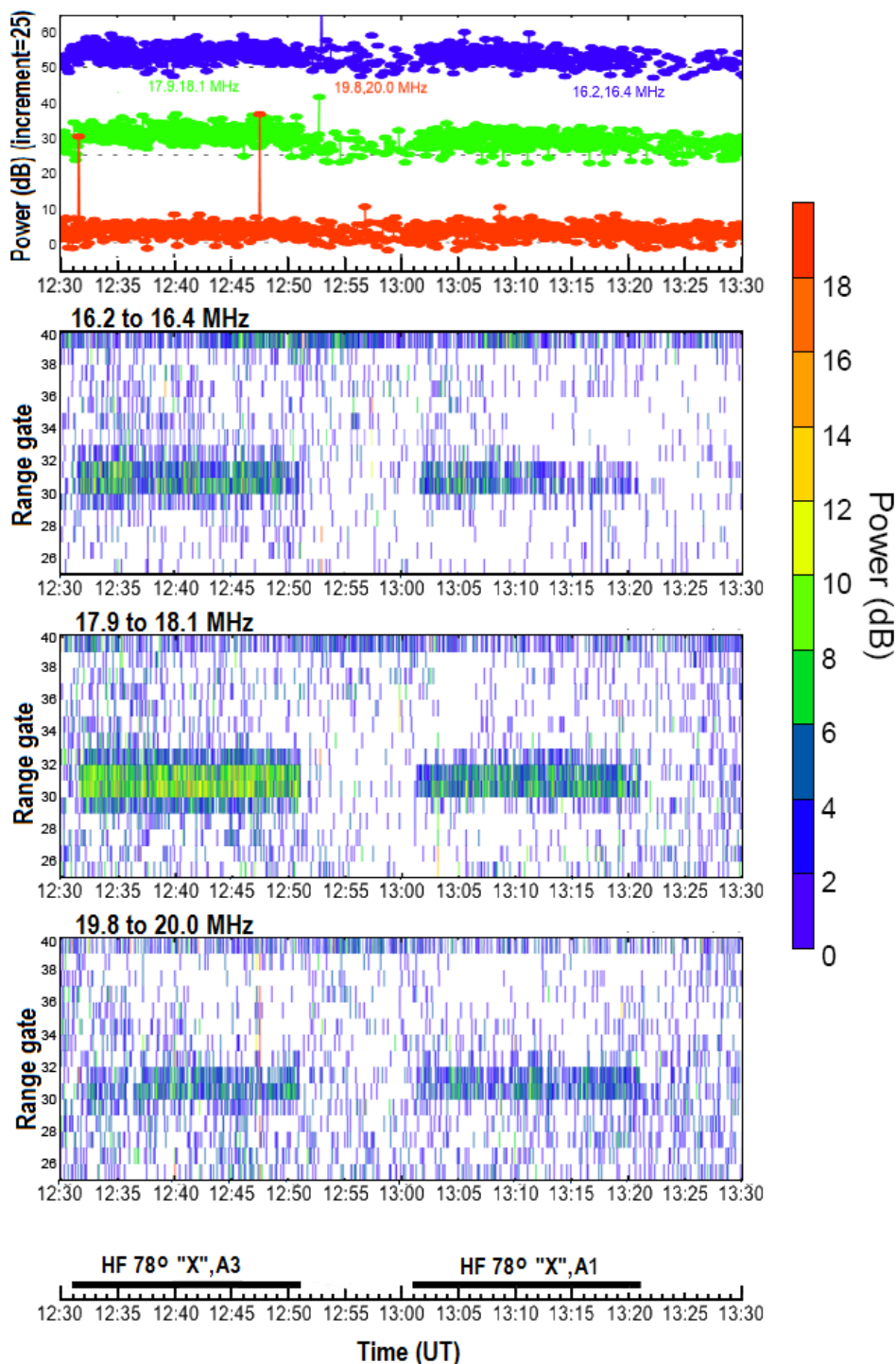


Рис. 3. Интенсивности рассеянных на МИИН сигналов по данным измерений радара CUTLASS на частотах ~ 16, 18 и 20 МГц 27 октября 2013 г. с 12: 30 – 13:30 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 7.953 МГц в магнитный зенит на ФАР 3 с 12:31 – 12:51 UT и ФАР 1 с 13:01 – 13:21 UT.

Из рис. 2 ясно видно, что, аналогично возмущениям Ne, горизонтальная протяженность области в северо-южном направлении, в которой возбуждаются HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL, при излучении мощной КВ радиоволны X-поляризации на ФАР «3» больше, чем при ее излучении на ФАР «1». Однако интенсивности HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL при излучении волны накачки на ФАР «1» существенно больше, чем при ее излучении на ФАР «3». Такое поведение обусловлено более высокими порогами возбуждения HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL. Согласно исследованиям результатов экспериментов при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения [11] установлено, что пороги возбуждения дактов Ne достаточно низкие и составляют 57 – 73 МВт ($E = 0.24 - 0.27$ В/м на высотах слоя F2). Однако для возбуждения HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL необходимы гораздо более высокие мощности излучения, поэтому при использовании ФАР «3», обеспечивающей ERP = 230 МВт, интенсивности HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL не достигают насыщения.

Выполнено сравнение влияния ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (ФАР «1» и ФАР «3») на характеристики возмущений при O- и X- нагреве. Показано, что дакты повышенной электронной плотности и узкополосное искусственное радиоизлучение при O-нагреве, на частотах ниже критической частоты слоя F2, не возбуждаются совсем при излучении волны накачки как на ФАР «1», так и на ФАР «3». При этом возмущения температуры электронов, интенсивности и размер области, занятой МИИН, при O-нагреве больше, чем при X-нагреве. Необходимо отметить, что возбуждение HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFPL возможно и при O-нагреве, но пороги их возбуждения существенно выше, чем при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы [12].

Выводы

Исследована пространственная структура возмущений Ne и Te, ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии мощных КВ радиоволн X-поляризации на высокоширотную F-область ионосферы при их излучении на фазированные антенные решетки с различной шириной диаграммы направленности (ФАР «3» с шириной диаграммы 10 - 12° и ФАР «1» с шириной диаграммы 5 - 6°). Установлено, что при излучении мощной X-волны как на ФАР «3», так и на ФАР «1», пространственная протяженность в северо-южном направлении дактов Ne, а также областей возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн примерно в два раза меньше ширины диаграммы направленности антенн КВ нагревного стенда, что свидетельствует о сильной фокусировке мощной X-волны в направлении магнитного поля. Наиболее интенсивные возмущения при X-нагреве возбуждаются в окрестности магнитного зенита. Выполнено сравнение влияния ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (ФАР «1» и ФАР «3») на характеристики возмущений при O- и X- нагреве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17- 00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

Литература

1. 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

2. 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.
3. 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.
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., 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>.
6. 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 (8). <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
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. *et al.* Remote Diagnostics of Effects Induced by High-latitude Heating Facilities // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021. V. 46, 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. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Особенности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности при О- и Х-нагреве вблизи критической частоты слоя F2 // *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9. No 1. С. 3–18. DOI: 10.12737/szf-91202303