

## **Сравнение характеристик искусственной ионосферной турбулентности в F-области ионосферы при O- и X-нагреве при различных углах излучения волны накачки**

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

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38  
E-mail: [nataly@ari.ru](mailto:nataly@ari.ru)*

*По данным многоинструментальных наблюдений в период экспериментов на КВ нагревом стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) выполнено сравнение характеристик и пространственной структуры искусственных ионосферных возмущений, вызванных воздействием волн накачки O- и X-поляризации на высокоширотную F-область ионосферы при вертикальном излучении (90°), вдоль магнитного поля (78°) и промежуточное между ними направлении (84°) при высоких эффективных мощностях излучения ( $P_{эфф} > 300 \text{ MBt}$ ).  
Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, искусственная ионосферная турбулентность, обыкновенная и необыкновенная поляризация, магнитный зенит, вертикальное излучение*

## **Comparison of features of artificial ionospheric turbulence in the F-region induced by O- and X-mode HF pumping at different elevation angles**

N.F. Blagoveshchenckaya, A.S. Kalishin, T.D. Borisova, G.A. Zagorskyi

*Arctic and Antarctic Research Institute*

*We present results of the comparison for features and spatial structure of artificial ionospheric disturbances in the F-region induced by the O- and X-mode HF pump waves radiated at different elevation angles including towards the vertical (90°), magnetic zenith (78°) and intermediate direction (84°). Results are based on data from multi-instrument diagnostics in the course of experiments at HF Heating facility installed at Tromsø, Norway.*

*Keywords: high latitude ionosphere, powerful HF radio wave, artificial ionospheric turbulence, ordinary and extraordinary polarization, magnetic zenith, vertical radiation*

### **Введение**

Изучение особенностей взаимодействия мощных радиоволн КВ диапазона (волн накачки) с ионосферной плазмой относится к числу интенсивно развиваемых направлений исследований физики ионосферы и солнечно-земных связей. Экспериментальные и теоретические исследования по модификации F-области ионосферы мощными радиоволнами КВ диапазона, излучаемыми с поверхности Земли, позволяют изучать широкий спектр нелинейных явлений, механизмы возбуждения турбулентностей и плазменных волн, плазменные и гиромагнитные резонансы, механизмы ускорения электронов.

Для модификации F-области ионосферы, как правило, используются мощные КВ радиоволны обыкновенной (O-мода) поляризации. Это обусловлено тем, что только волны накачки O-поляризации достигают высот, где происходит резонансное взаимодействие мощных радиоволн с ионосферной плазмой и приводят к возбуждению разнообразных нелинейных явлений [1]. Мощные КВ радиоволны необыкновенной поляризации (X-мода) отражаются ниже резонансных высот и поэтому, как

полагалось, возбуждение искусственных ионосферных возмущений является невозможным. Тем не менее, результаты многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на высокоширотном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating, убедительно продемонстрировали, что мощная КВ радиоволна Х-поляризации, излучаемая в магнитный зенит приводит к генерации разнообразных интенсивных возмущений в  $F$ -области высокоширотной ионосферы при нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя  $F_2$  ( $f_H \leq f_{oF2}$  и  $f_H > f_{oF2}$ ) [2 – 5].

В данной работе по данным комплексных многоинструментальных наблюдений в период экспериментов на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) рассмотрены результаты исследований эффектов воздействия мощных КВ радиоволн на высокоширотную  $F$ -область ионосферы при различных углах излучения при высоких эффективных мощностях излучения ( $P_{эфф} > 300$  МВт). Целью данной работы является сравнение характеристик и пространственной структуры искусственных ионосферных возмущений, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн О- и Х-поляризации на высокоширотную  $F$ -область ионосферы при вертикальном излучении ( $90^\circ$ ), вдоль магнитного поля ( $78^\circ$ ) и промежуточное между ними направление ( $84^\circ$ ).

### **Описание экспериментов и средств диагностики**

Эксперименты при различных углах излучения мощной КВ радиоволны (волны накачки) в  $F$ -область ионосферы выполнялись в октябре 2012 и 2013 гг. в ранние вечерние часы при спокойных магнитных условиях. Модификация высокоширотной ионосферы осуществлялась КВ нагревным стендом EISCAT/Heating, в г. Тромсе, Норвегия ( $69.6^\circ$  N,  $19.2^\circ$  E) [6]. В период экспериментов волна накачки обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась на частоте 7.953 МГц в вертикальном направлении ( $90^\circ$ ), вдоль магнитного поля ( $78^\circ$ ) и промежуточном между ними направлении ( $84^\circ$ ) циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза или 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Во всех экспериментах частота волны накачки была ниже критической частоты слоя  $F_2$  ( $f_H < f_{oF2}$ ). Эффективная мощность излучения составляла  $P_{эфф} = 780 - 840$  МВт.

Диагностика эффектов воздействия мощных КВ радиоволн проводилась с использованием разнообразных средств и методов. С помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [7], пространственно совмещенного с КВ нагревным стендом EISCAT/Heating определялись параметры ионосферной плазмы в диапазоне высот от 80 до 700 км, (электронная концентрация и температура,  $N_e$  и  $T_e$ ), а также характеристики продольных плазменных волн (ленгмюровских, LW и ионно-акустических, IAW) 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  $74^\circ$  до  $90^\circ$  (с шагом 1 или  $2^\circ$ ) в северо-южном направлении. Для диагностики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) использовался когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [8] в Ханкасалми, Финляндии ( $63^\circ$  N,  $27^\circ$  E), расположенный к югу от нагревного стенда на  $\sim 1000$  км. Регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) осуществлялась приемным комплексом, установленным на обсерватории ААНИИ вблизи г. С.-Петербург на расстоянии 1200 км от КВ нагревного комплекса [9]. Выбор и контроль частот волны накачки осуществлялся по данным ионозонда в Тромсе.

### **Результаты и обсуждение**

Результаты экспериментов при альтернативном О/Х нагреве в вертикальном направлении ( $90^\circ$ ) убедительно продемонстрировали, что искусственные возмущения в

высокоширотной F-области ионосферы при X-нагреве не создаются. Противоположно этому вертикальный O-нагрев приводит к генерации различных возмущений. Результаты эксперимента 21 октября 2012 г. свидетельствуют о генерации МИИН, повышении температуры электронов на  $\sim 40\%$  относительно фоновых значений, возбуждении ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, являющихся сигнатурами усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HFPL и HFIL) в спектрах сигнала EISCAT радар HP. Поскольку при вертикальном излучении волны накачки X-поляризации в высокоширотную F-область искусственные возмущения не создаются, далее рассмотрим и сравним эффекты воздействия при альтернативном O/X-нагреве в направлениях 78

На рис.1 приведены данные измерений радар некогерентного рассеяния в Тромсе в период эксперимента 28 октября 2013 г. с 12 до 14 UT при альтернативном O/X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы в магнитный зенит ( $78^\circ$ ) и под углом возвышения  $84^\circ$ . Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 7.953 МГц циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла  $P_{эфф} = 840$  МВт. Частота волны накачки была ниже критической частоты слоя F2 ( $f_H / f_oF2 = 0.9 - 0.96$ ). В циклах нагрева EISCAT радар HP работал в режиме сканирования искусственно возмущенной области ионосферы, при котором осуществлялось ступенчатое изменение углов возвышения в последовательности: 74, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 84, 86,  $90^\circ$  (2 мин на каждой ступени). Режим сканирования искусственно возмущенной области ионосферы по углам возвышения позволяет детально исследовать как пространственное расположение области возмущения Ne, Te, HFPL и HFIL при различных углах излучения волн накачки O- и X-поляризации, так и ее горизонтальный размер в северо-южном направлении.

Из рис. 1 следует, что как при O-нагреве, так и X-нагреве наблюдались искусственные ионосферные возмущения при излучении волны накачки в магнитный зенит ( $78^\circ$ ) и под углом ( $84^\circ$ ). Наиболее сильные возмущения параметров ионосферной плазмы происходили при излучении волны накачки в магнитный зенит ( $78^\circ$ ). Для O-нагрева в направлении  $84^\circ$  характерны возрастания температуры электронов Te на 60% относительно фоновых значений, а при излучении волны накачки в магнитный зенит возрастания Te достигали 120% за счет теплового нагрева электронов. При этом возмущения электронной концентрации Ne практически отсутствовали. В противоположность этому при X-нагреве в магнитный зенит происходили сильные возрастания Ne до 60% в широком диапазоне высот (вплоть до 600 км) относительно фоновых значений Ne, сопровождавшихся незначительным повышением температуры электронов вблизи высоты отражения до 20% за счет омического нагрева. При X-нагреве под углом  $84^\circ$  наблюдались слабые возрастания Ne, не превышающие 25%. Следует отметить, что как при O-, так и X-нагреве, при излучении волны накачки под углом  $84^\circ$  искусственные ионосферные возмущения создаются не в направлении излучения, а смещены к магнитному зениту.

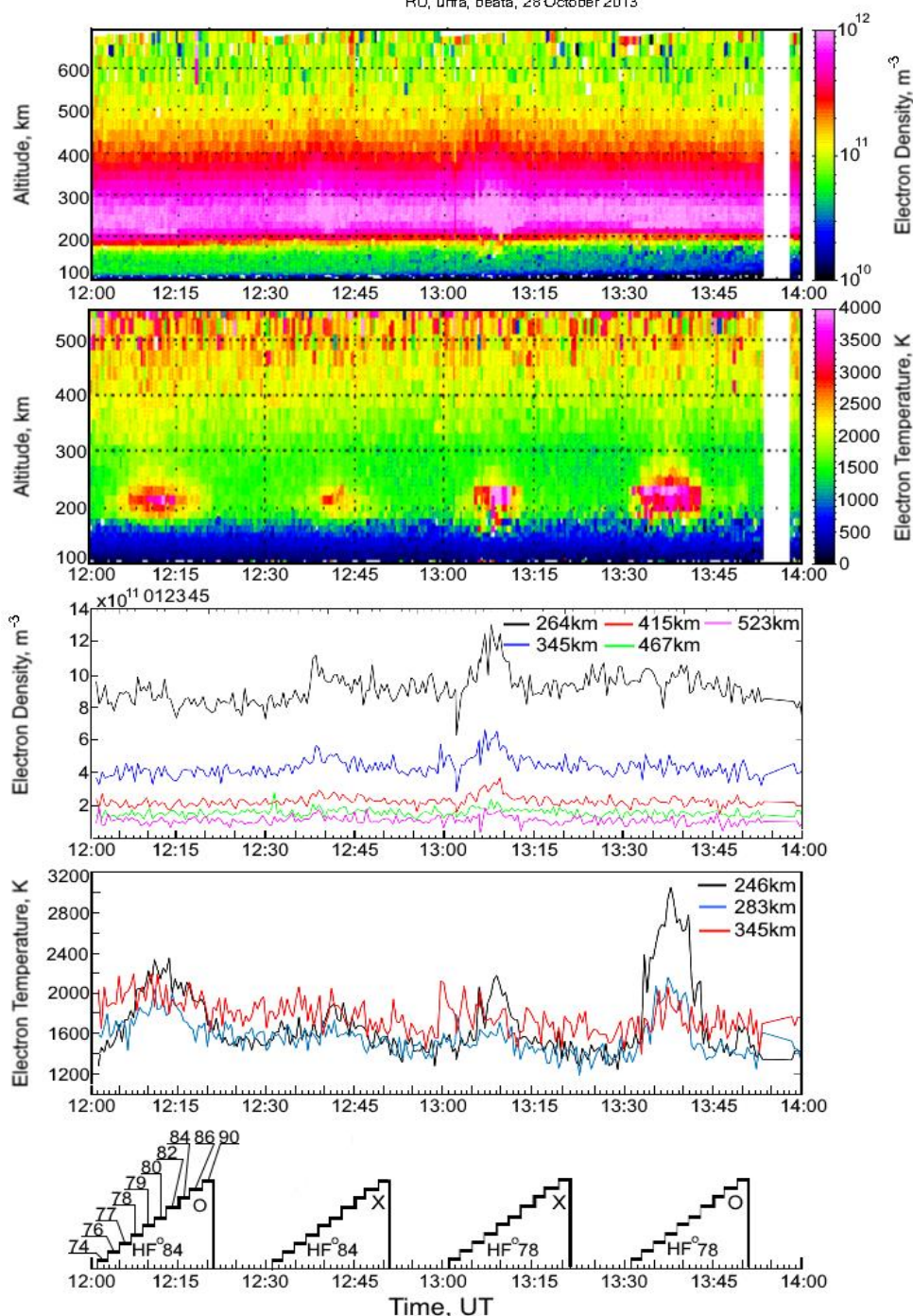
Анализ данных по диагностике МИИН с помощью КВ радар CUTLASS (SuperDARN) показал, что интенсивность МИИН как при O-, так и X-нагреве, была существенно выше при излучении волны накачки в магнитный зенит. Узкополосное (в полосе  $\pm 1$  кГц относительно частоты волны накачки) искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) регистрировалось только при X-нагреве. При этом интенсивность УИРИ и количество дискретных гармоник в спектре УИРИ было существенно выше при излучении волны накачки в магнитный зенит.



# EISCAT Scientific Association

## EISCAT UHF RADAR

RU, uhfa, beata, 28 October 2013



**Рис. 1.** Данные наблюдений радара некогерентного рассеяния EISCAT при сканировании искусственно возмущенной области ионосферы по углам возвышения от 74 до 90° в период эксперимента 28 октября 2013 г. Мощная КВ радиоволна О/Х-поляризации излучалась на частоте 7.953 МГц в направлениях 84 и 78°. Поляризация и направление излучения мощной КВ радиоволны, а также схема изменения углов возвышения радара НР показаны на нижней панели.

Для объяснения эффектов воздействия волны накачки О-поляризации в работе в [10] была предложена теория тепловой самофокусировочной неустойчивости, показывающая, что наиболее интенсивные нелинейные явления создаются вдоль

магнитных силовых линий (эффект магнитного зенита). При X-нагреве эффект магнитного зенита выражен в большей степени по сравнению с O-нагревом. Взаимодействие волны накачки X-поляризации с ионосферной плазмой, излучаемой в магнитный зенит, приводит к созданию интенсивных искусственных возмущений в узкой области, центрированной относительно магнитной силовой линии, опирающейся на нагревный стенд. По данным EISCAT радара HP горизонтальный угловой размер области возмущений в северо-южном направлении при излучении X-волны накачки в магнитный зенит ( $78^\circ$ ) составляет  $3 - 4^\circ$ , а при вертикальном излучении X-волны возмущения не создаются. Следует отметить, что воздействие O-волны на ионосферную плазму в F-области вызывает сильный тепловой нагрев электронов, способствующий возбуждению тепловой самофокусировочной неустойчивости в то время как при X-нагреве возмущения температуры электронов вследствие омического нагрева существенно ниже. Вследствие этого сильная нелинейная фокусировка X-волны вызывается не тепловой самофокусировочной неустойчивостью, а другим типом неустойчивости. Механизм столь сильной фокусировки мощной X-волны остается не ясным. Можно полагать, что она вызывается стрикционной самофокусировочной неустойчивостью.

### Заключение

По данным экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) выполнено сравнение характеристик и пространственной структуры искусственных ионосферных возмущений, вызванных воздействием волн накачки O- и X-поляризации на высокоширотную F-область ионосферы при вертикальном излучении ( $90^\circ$ ), вдоль магнитного поля ( $78^\circ$ ) и промежуточное между ними направлении ( $84^\circ$ ) при высоких эффективных мощностях излучения ( $P_{эфф} > 300$  МВт). Установлено, что при X-нагреве эффект магнитного зенита выражен в большей степени по сравнению с O-нагревом. Взаимодействие волны накачки X-поляризации с ионосферной плазмой, излучаемой в магнитный зенит, приводит к созданию интенсивных искусственных возмущений в узкой области (с горизонтальным угловым размером в северо-южном направлении  $3 - 4^\circ$ ), центрированной относительно магнитной силовой линии, опирающейся на нагревный стенд. При вертикальном излучении X-волны, в отличие от O-волны накачки, искусственные ионосферные возмущения в F-области ионосферы не создаются.

### Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007 Т.177. №11. С. 1145 – 1177.
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. 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
4. 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./doi:10.1029/2020JA028989
5. Благовещенская Н Ф, Калишин А С, Борисова Т Д, Васильев Р В, Жеребцов Г А Нелинейные явления в F-области ионосферы при воздействии мощными радиоволнами КВ-диапазона необыкновенной поляризации // Успехи физических наук. 2026, принята к публикации, DOI: [10.3367/UFNr.2026.03.040115](https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.03.040115)

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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>
10. Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen, T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications // *Phys. Lett. A.* – 2002. – Vol. 305. – P. 264–274.