

## **Характеристики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при воздействии КВ радиоволн обыкновенной и необыкновенной поляризации**

А.С. Калишин<sup>1</sup>, Н.Ф. Благовещенская<sup>1</sup>, Т.Д. Борисова<sup>1</sup>, И.М.<sup>1</sup> Егоров.

<sup>1</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38  
E-mail: [askalishin@aari.ru](mailto:askalishin@aari.ru), [nataly@aari.nw.ru](mailto:nataly@aari.nw.ru), [borisova@aari.ru](mailto:borisova@aari.ru),

*Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик спектров узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации. Исследования выполнялись по данным дистанционных наблюдений излучения КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия). Рассмотрены характеристики спектров искусственного радиоизлучения при частоте нагрева выше критической частоты слоя F2. Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, высокоширотная ионосфера, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы, поляризация, мелкомасштабные искусственные неоднородности ионосферы, концентрация электронов*

## **Features of the narrowband stimulated electromagnetic emission induced by HF radio waves with ordinary and extraordinary polarization**

A.S. Kalishin<sup>1</sup>, N.F. Blagoveshchenskaya<sup>1</sup>, T.D. Borisova<sup>1</sup>, I.M.<sup>1</sup> Egorov.

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute  
38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397

*We present experimental results related to the investigation of the spectral structure of the narrowband stimulated electromagnetic emission in the high latitude ionosphere F-region induced by ordinary (O-mode) and extraordinary polarized (X-mode) powerful HF radio waves depending on a ratio of a pump wave frequency to F2-layer critical frequency. Keywords: powerful HF radio wave, high-latitude ionosphere, narrowband stimulated electromagnetic emission, field-aligned artificial irregularities, electron density, polarization.*

### **Введение**

Воздействие мощного КВ радиоизлучения от нагревных стендов на ионосферную плазму вызывает комплекс нелинейных явлений в ионосфере. Результаты экспериментов на стенде HAARP показали, что воздействие мощной КВ радиоволны может возбуждать различные дискретные компоненты в спектре узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в полосе  $\pm 1$  кГц относительно нагревной частоты [1]. Такие компоненты в спектре УИРИ регистрировались вблизи стенда HAARP при воздействии на ионосферу мощной КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) поляризации на частотах нагрева ниже критической частоты слоя F2. Специалистами ФГБУ «АНИИ» были выполнены серии экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating, которые позволили впервые зарегистрировать УИРИ на расстоянии более 1100 км от нагревного стенда [2].

Целью данной работы является исследование особенностей поведения и спектральных характеристик УИРИ, регистрируемого на большом (более 1000 км) удалении от нагревного стенда при воздействии мощных КВ радиоволн как

обыкновенной (О-мода), так и необыкновенной (Х-мода) поляризации, на частотах нагрева выше критической частоты слоя  $F2$ .

### Описание экспериментов

С целью выявления особенностей поведения спектра УИРИ был выполнен анализ экспериментальных данных по дистанционному диагностированию радиоизлучения нагревного стенда EISCAT/Heating. Основное внимание уделено результатам, полученным при нагреве на частотах выше критической частоты слоя  $F2$ . Под данные условия подходил ряд событий из серий экспериментов с 2012 по 2021 г. Все анализируемые события регистрировались в дневные и вечерние часы при спокойных геомагнитных условиях.

Нагревной стенд EISCAT/Heating ( $69.6^\circ$  N,  $19.2^\circ$  E,  $L=6.2$ ,  $I=78^\circ$ ) расположен на севере Норвегии в г. Тромсе [3]. В рассмотренных событиях излучение осуществлялось в магнитный зенит на фазированную антенную решетку с шириной диаграммы направленности  $5\text{--}6^\circ$ , обеспечивающую максимальную эффективную мощность излучения порядка 550–1100 МВт в зависимости от частоты нагрева. Частоты изучения находились в диапазоне от 5,423 до 7,953 МГц.

Нагревной сигнал стенда EISCAT/Heating регистрировался на научно-исследовательской станции «Горьковская» Арктического и антарктического научно-исследовательского института, расположенной в Ленинградской области. Расстояние вдоль дуги большого круга от нагревного стенда до НИС «Горьковская» составляет 1140 км. Для приема радиоизлучения использовалась антенна типа двойной горизонтальный ромб с большой диагональю 110 м, ориентированная на комплекс EISCAT/Heating. Непосредственно для регистрации, записи и анализа в реальном времени принимаемых радиосигналов использовались анализаторы спектра декаметрового диапазона, разработанные на радиоприемных устройствах ICOM ICR-75 и SDR Perseus.

Для последующего анализа и интерпретации полученных результатов привлекались данные радара некогерентного рассеяния на частоте 930 МГц, пространственно совмещенного с нагревным стендом, и КВ радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми, Финляндия [4]. Критические частоты ионосферы контролировались с помощью диназонда в Тромсе.

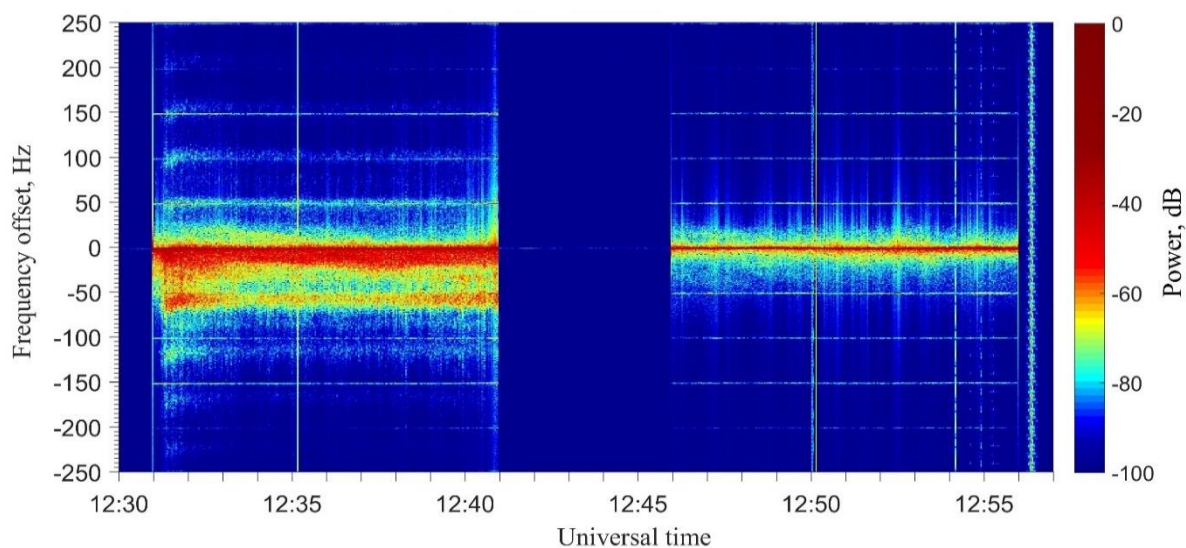
### Результаты и обсуждение

Выполненные серии экспериментов на стенде EISCAT/Heating позволили впервые обнаружить, что при нагреве ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами необыкновенной (Х-мода) поляризации на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя  $F2$  ( $f_H < f_oF2$  и  $f_H > f_oF2$ ), возможно возбуждение различных спектральных компонент УИРИ и их регистрация на значительном (более 1000 км) удалении от КВ нагревного комплекса [2, 5]. Генерация УИРИ наблюдалась при излучении мощной радиоволны Х поляризации, при этом в спектре излучения отчетливо выделялись дискретные спектральные составляющие в полосе частот  $\pm 1$  кГц относительно частоты волны накачки.

На рис. 1 приведены динамические спектры сигнала стенда EISCAT/Heating, зарегистрированные под Санкт-Петербургом 30 октября 2015 г. Мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте  $f_H = 7953$  кГц циклами 10 минут нагрев / 5 минут пауза. В первом цикле излучалась Х-волна накачки, а во втором цикле - О-волна. Критическая частота  $F2$ -слоя ионосферы не опускалась ниже 8,4 МГц.

В первом цикле нагрева, помимо основной гармоники на частоте излучения (соответствует нулевой частоте), наблюдались дополнительные спектральные

составляющие с максимумами на частотах примерно  $\pm n \cdot 57$  Гц, где  $n$  – целое число, а также максимум на частоте - 30 Гц. При переходе на О-моду с 12:46 до 12:56 UT спектральные составляющие УИРИ не регистрировались. Во всех циклах нагрева на частотах  $\pm n \cdot 50$  Гц наблюдались слабые гармоники питающей сети.

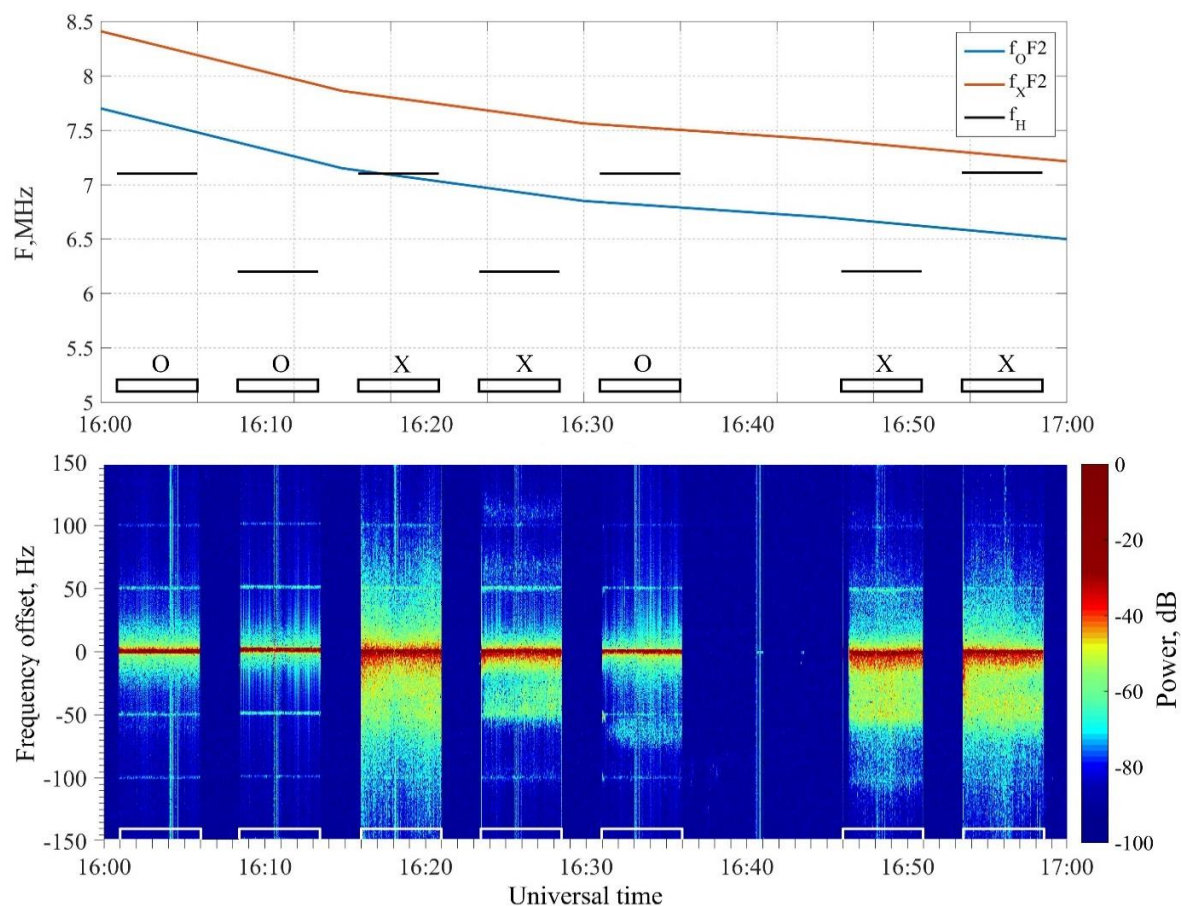


**Рис.1. Динамические спектры радиоизлучения нагревного стенда EISCAT/Heating 30 октября 2015 г. Мощная КВ радиоволна излучалась на  $f_H = 7953$  кГц в цикле 12.31–12.41 UT на X-поляризации, а в цикле 12.46 – 12.56 UT на O-поляризации.**

Для оценки характеристик спектра УИРИ при излучении мощной КВ радиоволны на частотах выше критической частоты  $F2$ -слоя ( $f_H > foF2$ ) был проанализирован массив данных с 2012 по 2021 гг. Было выявлено 45 событий регистрации УИРИ при условии  $f_H > foF2$ , из них 14 событий во время О-нагрева и 31 событие при X-нагреве.

В качестве примера, на рис. 2. приведена модификация спектра УИРИ при вечернем понижении критической частоты слоя  $F2$ . УИРИ регистрировалось на НИС «Горьковская» 25 октября 2013г. Комплекс EISCAT/Heating излучал циклами 5 минут нагрев / 2,5 минуты пауза, частота излучения чередовалась в циклах нагрева и составляла 7100 и 6200 кГц. Мода поляризации, частота и циклы излучения указаны на оси времени верхней панели рис. 2. В первых двух циклах излучения при  $f_H < foF2$ , когда использовалась О-мода поляризации, генерация УИРИ не наблюдалась. В следующих двух циклах на X-моду УИРИ регистрировалось на частоте излучения 6200 кГц, при этом частота нагрева была ниже  $foF2$ . В спектре УИРИ фиксировались отдельные спектральные составляющие как ниже, так и выше частоты волны накачки со спектральным максимумом на частоте - 48 Гц. Аналогичное поведение спектра наблюдалось и в предпоследнем цикле с 16:46 до 16:50 UT, который также осуществлялся на частоте 6200 кГц и X-моду поляризации при  $f_H < foF2$ .

Отдельно стоит обратить внимание на циклы, в которых частота волны накачки превышала  $foF2$ . Нагрев проводился на частоте 7100 кГц, при О-поляризации с 16:31 до 16:36 UT и X-поляризации с 16:53 до 16:58 UT.



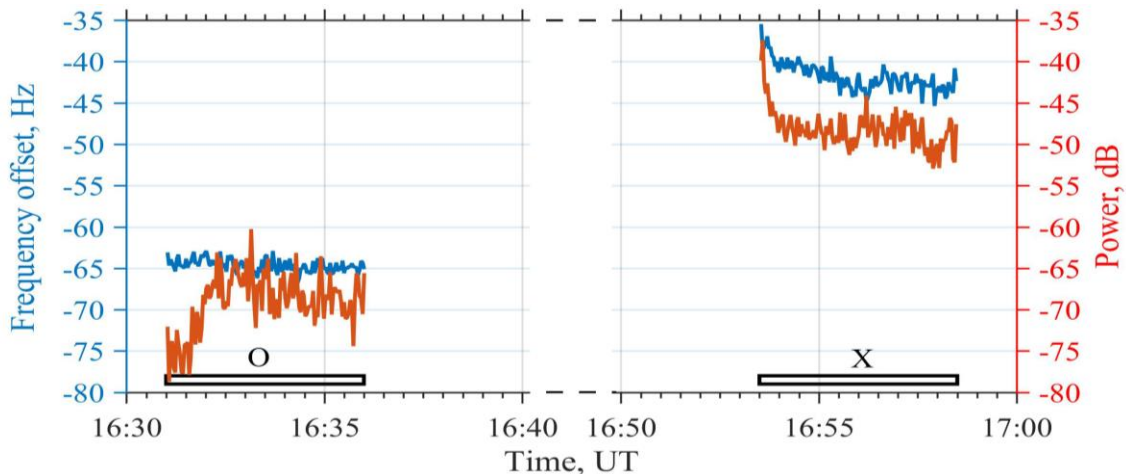
**Рис. 2. Критические частоты слоя F2, частоты нагрева и динамические спектры сигнала комплекса EISCAT/Heating в период эксперимента 25 октября 2013г.**

В этих циклах излучения спектр УИРИ существенно отличался от предыдущих, поскольку содержал только один спектральный максимум в области отрицательных отстроек частоты. Частоты и амплитуды дискретной компоненты спектра приведены на рис. 3.

При излучении на O-моду поляризации отстройка спектрального максимума составляла около - 65 Гц в течение всего цикла, а при излучении на X-моду частота максимума резко изменилась от - 35 до - 41 Гц в первую минуту цикла и далее оставалась около - 43 Гц. Поведение амплитуд спектральных максимумов также существенно отличалось друг от друга. При O-поляризации, амплитуда в первые минуты цикла плавно нарастала от - 78 до - 67 дБ и далее оставалась на этом уровне. При X-моду волны накачки наблюдалась противоположная ситуация, в первую минуту амплитуда уменьшилась на 15 дБ от - 35 до - 50 дБ. Также из рис. 3. видно, что амплитуда спектрального максимума при X-нагреве была на 20 дБ выше, чем при O-нагреве.

Анализ выбранных событий показал, что при излучении на O-моду поляризации УИРИ регистрировалось в тех случаях, когда частота волны накачки находилась в диапазоне  $foF2 < f_H < f_xF2$ . При излучении на X-моду УИРИ регистрировалось на частотах как ниже, так и выше критической частоты  $foF2$ . Следует отметить, что во все периоды регистрации УИРИ наблюдались мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН). На рис. 4. приведены результаты наблюдений МИИН за рассмотренный выше период с 16 до 17 UT 25 октября 2013. МИИН регистрировались КВ радаром CUTLASS, расположенным в г. Ханкасалми, Финляндия. Радар излучал в трех диапазонах частот со средними частотами 16,3; 18 и

19,9 МГц в направлении комплекса EISCAT/Heating (луч 5). Таким образом, CUTLASS фиксировал наличие неоднородностей в ионосфере над Тромсе с поперечными к магнитному полю масштабами  $l \approx 9,2$ ; 8,3 и 7,5 м. На рис. 4 дальность от радара CUTLASS в направлении Тромсе обозначена в номерах ворот (Range gate). Искусственно возмущенная область над Тромсе соответствует воротам 29–34, цветовая шкала мощности рассеянных на МИИН сигналов приведена справа.



**Рис. 3. Частота отстройки и амплитуда спектрального максимума УИРИ при излучении волны накачки на частотах выше  $f_oF2$  в циклах с 16:31 до 16:36 UT и с 16:53 до 16:58 UT. Циклы нагрева и мода поляризации указаны на оси времени.**

Во всех циклах излучения нагревного стенда как на O-, так и X-моды поляризации, наблюдались МИИН, включая цикл O-нагрева с 16:31 до 16:36 UT (пятый цикл), когда регистрировалось УИРИ. Результаты предыдущих исследований, показали, что возбуждение неоднородностей при X-нагреве возможно на частотах нагрева как ниже, так и существенно выше (до 2 МГц) критической частоты обыкновенной компоненты слоя  $F2$  ( $f_H/f_oF2 \leq 1$  и  $f_H/f_oF2 > 1$ ) [6]. Это принципиально отличается от условий возбуждения неоднородностей при O-нагреве, генерация которых возможна только на частотах нагрева ниже  $f_oF2$  ( $f_H \leq f_oF2$ ). Поэтому регистрация неоднородностей в цикле нагрева с 16:31 до 16:36 UT на O-моды поляризации волны накачки при  $f_H > f_oF2$  является нехарактерным явлением.

Представляет интерес рассмотреть поведение электронной концентрации ( $N_e$ ) в данном цикле излучения. На рис. 5 представлены плотности электронов на разных высотах в период проведения эксперимента с 16:08 до 17 UT 25 октября 2013 по данным измерений радара некогерентного рассеяния в Тромсе. Характерной особенностью при нагреве ионосферной плазмы волной X-поляризации является сильное возрастание  $N_e$  в широком диапазоне высот [2]. При O-нагреве возрастания  $N_e$  регистрировались только при специфических условиях, когда частота нагрева была вблизи и выше гармоник гирочастоты электронов [7]. Из рис. 5 видно, что в цикле излучения на O-моды с 16:31 до 16:36 UT регистрируется резкое возрастание  $N_e$ , типичное для X-нагрева. Таким образом, из результатов наблюдений следует, что в данном цикле излучения воздействие O-волны накачки на ионосферную плазму аналогично волне X-поляризации (возбуждение МИИН при  $f_H > f_oF2$  и возрастание  $N_e$ ).

Как было показано в работах [1, 5] возможным механизмом генерации УИРИ может быть рассеяние Бриллюэна при распаде мощной волны X-поляризации на рассеянную электромагнитную и электростатическую ионно-циклотронную волны.

# SUPERDARN PARAMETER PLOT

25 Oct 2013 <sup>(298)</sup>

Hankasalmi: pwr\_l

unknown scan mode (-6401)

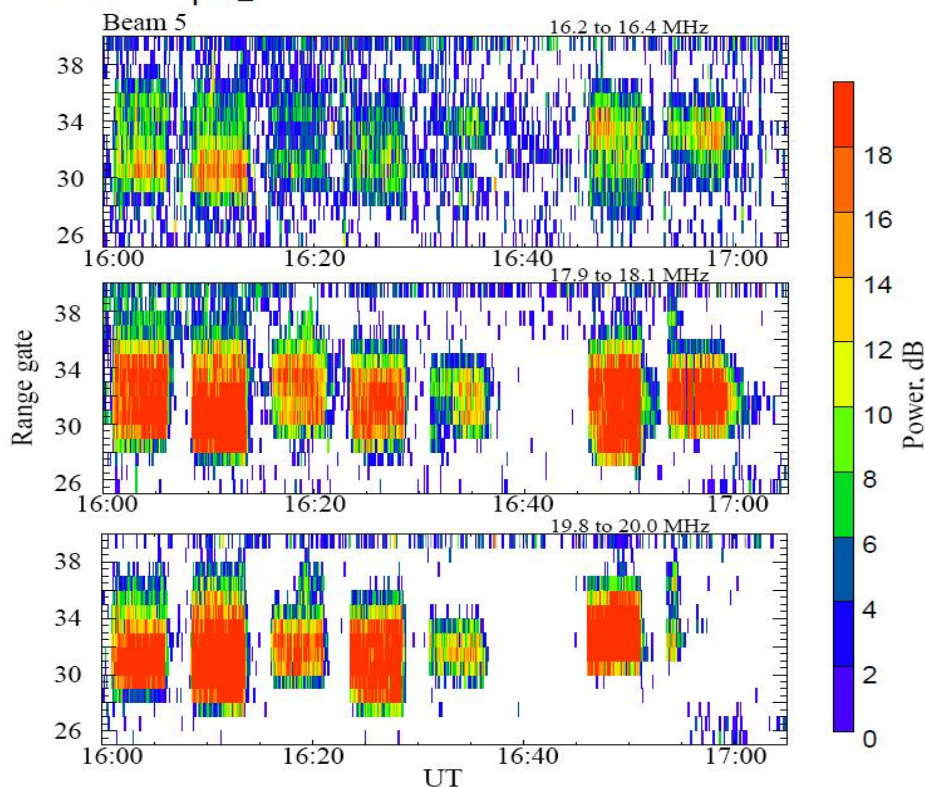


Рис. 4. Поведение МИИН по данным радара CUTLASS в Ханкасалми на частотах ~ 16, 18 и 20 МГц ( $l \approx 9,3; 8,3; 7,5$  м) 25 октября 2013 при О-/ X-нагреве на частотах 7,1 / 6,2 МГц.

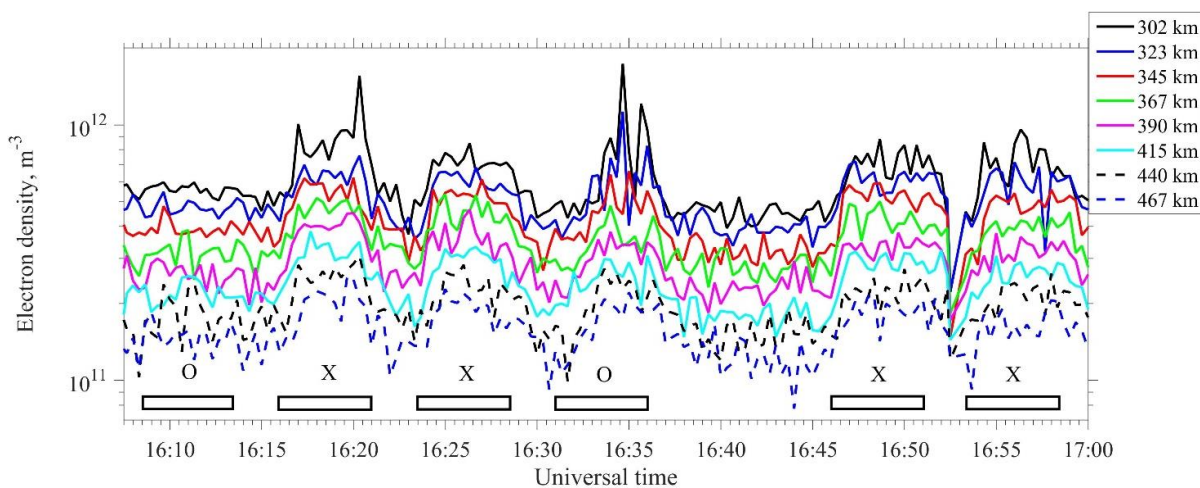


Рис. 5. Поведение электронной плотности на фиксированных высотах 25 октября 2013г с 16:08 до 17:00 UT по данным EISCAT радара НР. Циклы нагрева показаны на оси времени.

При О-нагреве на частотах, выше критической частоты слоя F2, одним из наиболее вероятных механизмов генерации УИРИ, является трансформация О-волны в X- с последующим распадом на рассеянную электромагнитную и электростатическую ионно-циклотронную волны.

## Заключение

По данным многочисленных экспериментов были исследованы условия генерации и характеристики УИРИ, регистрируемого на значительном (более 1000 км) удалении от нагревного стенда. Обнаружены принципиальные отличия в условиях генерации и в поведении спектров УИРИ при нагреве на частотах выше и ниже критической частоты F2-слоя. Установлено, что при излучении мощной КВ радиоволны X-поляризации генерация УИРИ происходит, как при  $f_H < f_oF2$ , так и  $f_H > f_oF2$ . При O-нагреве регистрация УИРИ на большом удалении от нагревного стенда возможна только в узком диапазоне частот нагрева,  $f_oF2 < f_H < f_xF2$ .

Предполагается, что регистрация УИРИ на большом удалении от нагревного стенда происходит вследствие распада мощной волны X-поляризации на рассеянную электромагнитную и электростатическую ионно-циклотронную волны в области генерации с последующим рассеянием на МИИН и распространением в удаленный пункт приема. При O-нагреве на частотах выше  $f_oF2$  происходит трансформация O-волны в X-волну с последующим развитием процессов, типичных для X-нагрева.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>*

## Литература

1. Bernhardt, P.A., Selcher, C.A., Lehmborg, R.H., Rodriguez, S., Thomason, J., McCarrick, M., and Frazer, G. Determination of the electron temperature in the modified ionosphere over HAARP using the HF pumped Stimulated Brillouin Scatter (SBS) emission lines // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 4409 – 4427
2. Благовещенская Н.Ф. Борисова Т.Д., Калишин А.С., Каяткин В.Н., Йоман Т.К., Хаггстрем И. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы // *Космические исследования.* 2018. 56 (1), С. 14 – 29.
3. Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Science.* 2016. V. 51(9), P. 1533 – 1546.
4. Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., Crooks S.J., Davies J.A., Hamadyk P., McWilliams K.A., Milan S.E., Parsons M.J., Payne D.B., Thomas E.C., Thornhill J.D., Wade N.M., Yeoman T.K., Barnes R.J. // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 459. DOI: 10.5194/angeo-22-459-2004.
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 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2021. V. 126 (8), <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
6. Благовещенская Н.Ф. Борисова Т.Д., Калишин А.С. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2019. Т. 59, № 6, С. 759 – 773
7. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. и др. Явления в высокоширотной F-области ионосферы, возникающие при её нагреве излучением с частотой вблизи четвертой гармоники гирочастоты электронов // *Известия вузов, Радиофизика.* 2014. Т. 57. № 1. С. 1 – 22