

Пороги возбуждения узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при X-нагреве стенда EISCAT/Heating

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

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

Выполнена оценка порогов возбуждения и анализ зависимости спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) от напряженности электрического поля волны накачки необыкновенной поляризации (X-мода) стенда EISCAT/Heating. Регистрация УИРИ выполнялась в двух пунктах: Ленинградской и Мурманской областях на расстоянии 1140 и 660 км, соответственно. Выполнены расчеты напряженности электрического поля мощной КВ-радиоволны вблизи высоты отражения с учетом неотклоняющего поглощения. Определены пороговые (минимальные) значения электрического поля, необходимые для возбуждения УИРИ.

Ключевые слова: нагревной комплекс, мощная КВ радиоволна, высокоширотная ионосфера, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы.

The excitation thresholds of the narrowband Stimulated Electromagnetic Emission created by the extraordinary polarized (X-mode) high power HF wave of the EISCAT/heating facility.

A.S. Kalishin¹, N.F. Blagoveshchenskaya¹, T.D. Borisova¹, Egorov I.M.¹, Zagorskiy G.A.¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute
38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397.

Assessment of the excitation threshold and the dependence of the narrowband SEE spectrum upon electric field strength of the extraordinary polarized (X-mode) high power HF wave are made. The narrowband SEE was registered in two places: Leningradskaya oblast and Murmanskaya oblast. The distance between the narrowband SEE source and receiver in Leningradskaya oblast was 1140 km. The distance between the narrowband SEE source and receiver in Murmanskaya oblast was 660 km. There were also calculations made of electric field strength of high power HF wave nearby reflection point height, taking into account non-deviation absorption. The threshold (min.) values of the electric field strength required for the narrowband SEE excitation have been determined.

Keywords: heating facility, powerful HF radio wave, high-latitude ionosphere, narrowband stimulated electromagnetic emission.

Введение

Воздействие мощного КВ-радиоизлучения (волны накачки) нагревных стендов на высокоширотную ионосферу приводит к генерации целого ряда явлений в плазме. К их числу относится узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ). УИРИ представляет собой одну или несколько дискретных спектральных линий, в диапазоне частот ± 1 кГц относительно частоты волны накачки. Авторами работ [1, 2, 3] показано, что в искусственно возмущённой области ионосферы волна накачки может претерпевать параметрический распад на электростатическую волну и рассеянную электромагнитную волну, в результате чего наблюдается УИРИ. Спектральный состав УИРИ зависит от угла между волновым вектором волны накачки и вектором магнитного поля Земли B . Если в результате параметрического распада мощной

радиоволны возбуждаются ионно-акустические (IA – ion acoustic) волны, то в спектре УИРИ появляются спектральные линии с отрицательным смещением частоты на 10-30 Гц относительно частоты волны накачки. Если возбуждаются ионно-циклотронные (EIC – electrostatic ion cyclotron) волны, то частота смещений линий составляет ~ 50 Гц (для ионов атомарного кислорода).

Эксперименты по генерации УИРИ проводились как на нагревном стенде HAARP, так и на EISCAT/Heating. На комплексе HAARP регистрация УИРИ осуществлялась на расстоянии 20 км от нагревного стенда и только при O-нагреве [1, 2, 3]. При излучении волны накачки необыкновенной (X-мода) поляризации спектральные компоненты IA и EIC волн вблизи стенда HAARP не регистрировались. В экспериментах на стенде EISCAT/Heating приемная аппаратура, также размещалась в непосредственной близости от нагревного стенда на расстоянии 13 км [4].

Специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) была проведена серия экспериментов на стенде EISCAT/Heating, в которых впервые было обнаружено, что мощная КВ волна X- поляризации также может возбуждать УИРИ [5, 6, 7, 8, 9]. При этом УИРИ регистрировалось на научно-исследовательской станции (НИС) под Санкт-Петербургом, на расстоянии ~ 1200 км от КВ нагревного стенда. В спектрах УИРИ были обнаружены интенсивные дискретные спектральные структуры, упорядоченные по частоте ионно-циклотронных волн атомарного кислорода [5, 7]. Были рассмотрены возможные механизмы генерации УИРИ, показана зависимость спектральных характеристик от отношения частоты волны накачки X-поляризации к критической частоте слоя F2 ионосферы [6] и частоте гирогармоник электронов [7].

Целью данной работы является экспериментальное исследование порогов возбуждения и зависимости спектральных характеристик УИРИ от напряженности электрического поля волны накачки стенда EISCAT/Heating.

Описание эксперимента

Для определения порогов возбуждения УИРИ был выполнен анализ экспериментальных данных по дистанционному диагностированию радиоизлучения нагревного стенда EISCAT/Heating. Основное внимание уделено результатам, полученным при нагреве в режиме ступенчатого изменения мощности излучения.

Нагревной стенд EISCAT/Heating расположен в г. Тромсе, Норвегия (69.6°с. ш., 19.2°в.д., $L=6.2$, $I=78^\circ$) [10]. Волна накачки X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита (12° к югу от вертикали) в режиме непрерывного излучения (Continuous wave, CW) циклами несколько минут нагрев, несколько минут пауза.

Излучение стенда и УИРИ регистрировались на НИС «Горьковская», расположенной в Ленинградской области и гидрометеорологической станции (ГМС) «Ловозеро» «Мурманское УГМС» в Мурманской области. Расстояние вдоль дуги большого круга от нагревного стенда до НИС «Горьковская» составляет 1140 км, до ГМС «Ловозеро» 660 км. Непосредственно для регистрации, записи и анализа в реальном времени принимаемых радиосигналов использовались анализаторы спектра декаметрового диапазона, разработанные на основе радиоприемных устройствах ICOM ICR-75 и SDR Perseus. На НИС «Горьковская» полоса анализа диагностической аппаратуры составляла 2,5 кГц. На ГМС «Ловозеро» - 250 Гц.

Диагностирование параметров ионосферной плазмы (температура электронов T_e и ионов T_i , а также концентрация электронов N_e) проводилось при помощи радара некогерентного рассеяния (НР), расположенном рядом с нагревным стендом [11]. Радар работал на частоте 930 МГц в направлении магнитного поля в Тромсе. Диагностирование параметров среды осуществлялось в диапазоне высот от 90 до 600

км с разрешением по высоте 1,5 км и по времени – 5 с. Данные измерений были обработаны с помощью унифицированного комплекса программ GUISDAP [12] для вычислений параметров ионосферной плазмы.

Результаты наблюдений

Для определения порогов возбуждения были проанализированы результаты серий экспериментов, проведенных в октябре 2014 года и октябре 2021 года. Во всех экспериментах нагревной стенд излучал волну накачки необыкновенной поляризации (Х-мода) в направлении магнитного зенита.

В 2014 году эксперименты выполнялись 24 и 25 октября в возмущенных геофизических условиях. Нагрев осуществлялся циклами 2 минуты излучение, 1 минута пауза. Эффективная мощность излучения (ЭМИ) изменялась ориентировочно по схеме: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 10%, 25%, 50%, 100%. Реально измеренные значения ЭМИ в каждом нагревном цикле показаны на рис. 1. Фоновые условия эксперимента и полученные результаты в эти дни были идентичные, в качестве примера на рис. 1 приведена спектрограмма УИРИ, зарегистрированного на ГМС «Ловозеро» с 11:30 до 12:00 UT 24 октября 2014 года. Нулевая частота на спектрограмме соответствует частоте излучения стенда EISCAT/Heating 7,953 МГц. УИРИ начало формироваться в цикле с 11:52 до 11:54 UT при 25% мощности излучения, что соответствовало ЭМИ = 252 МВт. В спектре УИРИ наблюдался диффузный дискретный максимум со смещением -58Гц относительно частоты излучения. Дальнейшее увеличение мощности излучения приводило к увеличению интенсивности спектральной компоненты УИРИ.

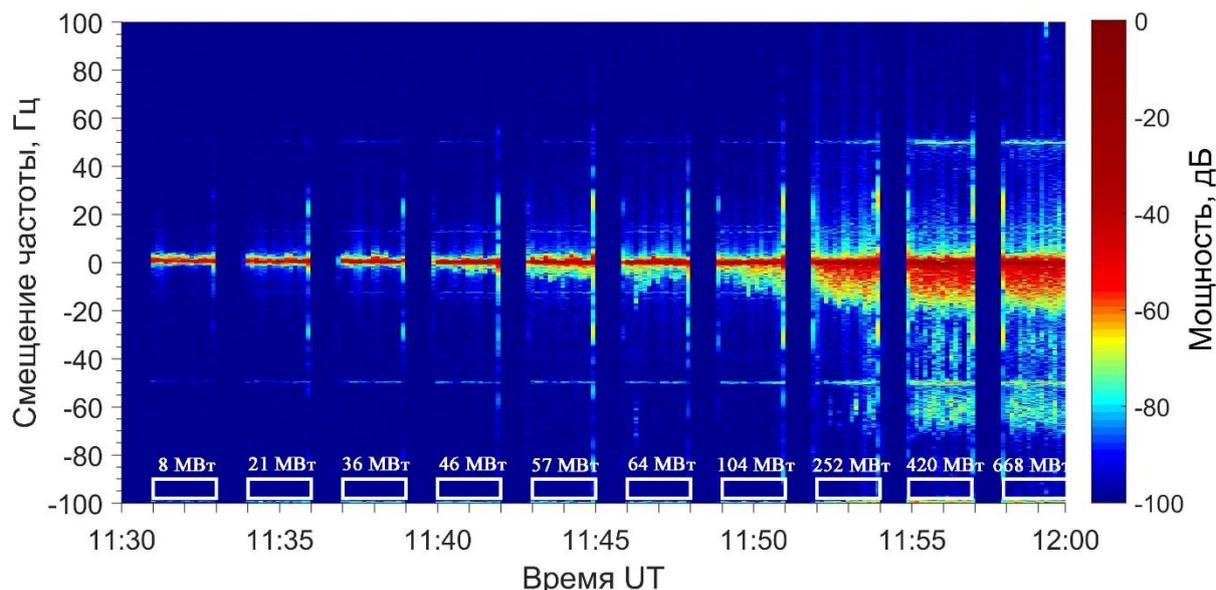


Рис. 1. Спектрограмма УИРИ, зарегистрированная на ГМС «Ловозеро» 24 октября 2014 года. Циклы и эффективная мощность излучения отмечены на оси времени.

В 2021 году экспериментальные работы выполнялись двумя сериями 25 и 26 октября в спокойных геофизических условиях. За эти дни были получены также идентичные результаты, поэтому, в качестве примера на рис. 2 приведена спектрограмма УИРИ, зарегистрированного с 14:20 до 15:00 UT 26 октября 2021 года. Нагревной стенд излучал циклами 2 минуты нагрев, 2 минуты пауза. ЭМИ стенда EISCAT/Heating ориентировочно изменялась по схеме: 15%, 25%, 50%, 75%, 100%, 100%, 75%, 50%, 25%, 15%. Реально измеренные значения ЭМИ в каждом нагревном цикле показаны на рис. 2. Белыми прямоугольниками отмечены циклы излучения.

Нулевая частота на спектрограмме соответствует частоте излучения стэнда EISCAT/Heating 5,423 МГц. В первом цикле излучения при ЭМИ = 55,1 МВт, спектральные компоненты УИРИ не регистрировались. УИРИ начинало формироваться во втором цикле при ЭМИ = 89 МВт, в спектре принимаемого сигнала наблюдалось до пяти спектральных линий, сдвинутых вниз и вверх по частоте относительно частоты волны накачки $\pm n \cdot 54$ Гц, где $n = 1, 2, 3, 4, 5$, а также спектральная компонента на частоте - 28 Гц.

По мере увеличения ЭМИ в последующих циклах интенсивности спектральных линий возрастали, а также возбуждались новые линии, соответствующие более высоким гармоникам $n = 6, 7$. Помимо дискретных линий на частотах $\pm n \cdot 54$ Гц, увеличение ЭМИ приводило к возбуждению новых максимумов на частотах $\pm 29, \pm 82, \pm 134, \pm 188, \pm 240$ Гц. Наибольшая интенсивность УИРИ наблюдалась при ЭМИ = 355 МВт, что составляло 100 % мощности излучения в данном эксперименте. При снижении ЭМИ интенсивность УИРИ уменьшалась, исчезали дискретные линии в спектре на более высоких частотах отстройки. Следует отметить существование спектральных линий УИРИ в последнем цикле нагрева при ЭМИ = 52,4 МВт, что свидетельствует об эффекте гистерезиса, типичном для нелинейных явлений в ионосферной плазме [14].

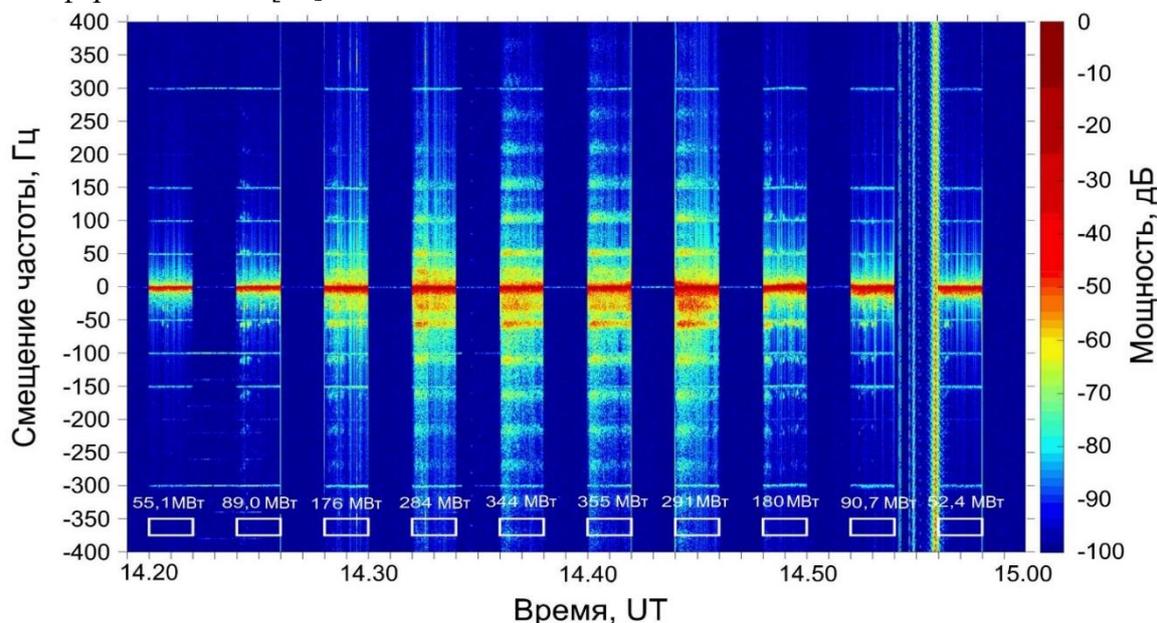


Рис. 2. Спектрограмма УИРИ, зарегистрированная на НИС «Горьковская» 26 октября 2021 года. Циклы и Циклы и эффективная мощность излучения отмечены на оси времени.

В экспериментах, проведенных в 2021 году, УИРИ возбуждалось при ЭМИ = 89 МВт, в спектре сначала формировались линии в полосе отстроек частот ± 300 Гц от частоты волны накачки. Линии в спектре УИРИ были упорядочены приблизительно по гирочастоте ионов атомарного кислорода O^+ и наблюдались одновременно, как при отрицательных, так и положительных отстройках от частоты волны накачки [5].

Авторами работ [1, 2] было показано, что при О-нагреве возбуждении УИРИ происходит на высоте верхнего гибридного резонанса или высоте отражения волны накачки. Мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) отражается на высоте с локальной частотой плазмы $f_X^2 = f_H \cdot (f_H - f_{CE})$, где f_{CE} - гирочастота электронов, что ниже как высоты верхнего гибридного резонанса $f_{UH}^2 = f_H^2 - f_{CE}^2$, так и высоты отражения радиоволны О-поляризации $f_O^2 = f_H^2$. Результаты

экспериментальных исследований, представленных в [6], показывают, что область генерация УИРИ при X-нагреве на частотах $f_H < f_x F2$, находится на несколько километров (3 - 5 км) ниже высоты отражения мощной X-волны.

В рассматриваемых экспериментах высоты отражения X-волны определялись по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн, которые соответствовали высотам возбуждения усиленных нагревом плазменных и ионных линий. Таким образом, высоты отражения находились в районе 225 км в экспериментах, проведенных в 2014 году и 226 км соответственно для экспериментов в октябре 2021 году.

Для оценки напряженности электрического поля волны накачки в свободном пространстве на высотах ионосферы можно воспользоваться выражением [15]:

$$E \left[\frac{V}{m} \right] = \frac{0.25 \sqrt{ERP [kW]}}{h [km]} \quad (1)$$

где ERP - эффективная мощность излучения;

h - высота искусственно-возмущенной области, на которой рассчитывается электрическое поле волны.

Согласно (1) пороговая ЭМИ для экспериментов в октябре 2014 году составляла $E_{\text{пор}} = 0,55$ В/м, а для октября 2021 года $E_{\text{пор}} = 0,34$ В/м. Однако, распространение радиоволны в ионосфере сопровождается потерей части ее энергии, которая преимущественно переходит в тепловую, следствием этих потерь является затухание. Для оценки затухания воспользуемся методикой, предложенной в [16]. По данным радара НР для каждого цикла нагрева контролировались высотные профили концентрации и температуры электронов, необходимые для расчета поглощения волны накачки. Согласно методике, предложенной в [16], среднее за период проведения экспериментов значение поглощения волны накачки в октябре 2021 года составило 3,6 дБ. В октябре 2014 года эксперименты выполнялись в возмущенных геофизических условиях, и величина поглощения составляла 7 дБ. Тогда с учетом ионосферного поглощения порог возбуждения УИРИ в октябре 2021 года составил $E_{\text{пор}} = 0,23$ В/м, а в октябре 2014 года $E_{\text{пор}} = 0,24$ В/м.

Заключение

По результатам экспериментов на стенде EISCAT/Heating, выполнена оценка порогов возбуждения и анализ зависимости спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы от напряженности электрического поля волны накачки необыкновенной поляризации (X-мода).

Результаты экспериментов показали, что пороги возбуждения УИРИ, регистрируемого при X-нагреве на значительном расстоянии от искусственно-возмущенной области ионосферы, с учетом поглощения в нижележащих слоях ионосферы, составляли $E_{\text{пор}} = 0,23 - 0,24$ В/м. Спектральные линии формировались в полосе частот ± 300 Гц от частоты волны накачки. Дальнейшее увеличение напряженности электрического поля приводило к возрастанию интенсивностей существующих дискретных линий в спектре и возбуждению новых, имеющих большие отстройки частот, что вызывало уширение спектра до ± 400 Гц. Наибольшее количество спектральных линий, максимальная интенсивность и ширина спектра УИРИ наблюдались при напряженности электрического поля $E = 0,44$ В/м.

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. et al. 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. Mahmoudian A., Scales W. A., Bernhardt P. A. et al. Investigation of ionospheric stimulated Brillouin scatter generated at pump frequencies near electron gyroharmonics // *Radio Science.* 2013. V. 48. P. 685–697; DOI: 10.1002/2013RS005189.
3. Yellu A. D., Scales W. A., Mahmoudian A., et al. First Observations of Narrowband Stimulated Electromagnetic Emissions at the Pump Frequency Second Harmonic During Ionosphere Interaction Experiments // *Geophysical Research Letters.* 2018. V. 45. P. 8690 – 8697, doi: 10.1029/2018GL078924
4. Fu, H. Y., Jiang, M. L., Wang, K. N. et al. Electron temperature inversion by stimulated brillouin scattering during electron gyro-harmonic heating at EISCAT // *Geophysical Research Letters.* 2020. V. 47. 17, 0094-8276. <https://doi.org/10.1029/2020GL089747>
5. Kalishin A. S., Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D. et al. 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. e2020JA028989. <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
6. Kalishin A. S., Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D. et al. 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. - No. 12. - P. 921–930. DOI: 10.3103/S1068373922120032
7. Blagoveshchenskaya, N. F., Borisova, T. D., Kalishin, A. S., et al. First observations of electron gyro-harmonic effects under X-mode HF pumping the high latitude ionospheric F-region // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* - 2017. - V. 155. - P. 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.02.003>
8. Blagoveshchenskaya, N. F., Borisova, T. D., Yeoman T.K. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* - 2015. - V. 135. - P. 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.10.009>
9. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Каяткин В.Н., Йоман Т.К., Хаггстрем И. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы // *Космические исследования.* 2018. Т. 56. № 1. С. 17-32.
10. 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. doi:10.1002/2016RS006093
11. Rishbeth H., van Eyken A. P. EISCAT — early history and the first ten years of operation // *J. Atmos. Terr. Phys.* - 1993. - V. 55. - № 4-5. - P. 525–542.
12. Lehtinen M. S., Huuskonen A. General incoherent scatter analysis and GUIDAP // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* - 1996. - V. 58. - P. 435 - 452.
13. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов // *Метеорология и гидрология.* 2021. № 4. С. 22-36.
14. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // *УФН,* 2007, 177, с. 1145–1177. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711a.1145
15. Robinson T. R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Phys. Rep.* - 1989. - V. 179. - P. 79–209.
16. 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. № 1. - С. 3–18. DOI: 10.12737/szf-81202201.