

Параметры узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при нагреве вблизи частот гирорезонанса

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

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

Экспериментально исследованы характеристики спектра узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) при воздействии волны накачки нагревного стенда EISCAT/Heating, излучаемой в направлении магнитного зенита на частотах около пятой гирогармоники электронов. Регистрация нагревных сигналов и УИРИ выполнялась в Ленинградской области на расстоянии 1140 км от нагревного стенда. Показано, что мощное КВ-излучение необыкновенной поляризации (X-мода) стенда возбуждает УИРИ, спектр которого существенно зависит от соотношения частоты волны накачки к частоте пятого гирорезонанса электронов.

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

Dependence narrowband stimulated electromagnetic emission characteristics on pump frequency near the fifth electron gyroharmonic

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.

We present the experimental results related to the studies of narrowband stimulated electromagnetic emission characteristics. Narrowband SEE was induced by extraordinary (X-mode) polarized HF high power radio waves to pump frequency stepping across the fifth electron gyro-harmonic. The narrowband SEE was registered in Lenigradskaya oblast, the distance between the narrowband SEE source and receiver was 1140 km. We have analyzed the behavior and intensities the narrowband SEE spectra, depending on the frequency offset of the pump field relative to the 5fce.

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

Введение

К настоящему времени выполнено достаточно много исследований по нелинейному взаимодействию мощных радиоволн КВ-нагревных стендов с ионосферной плазмой вблизи электронных гирорезонансов, результаты которых опубликованы в различных работах [1, 2, 3]. Например, на стенде Сура исследованы особенности возбуждения мелкомасштабных искусственных неоднородностей при нагреве на частотах в окрестности четвертого гирорезонанса [4], исследованы спектральные структуры широкополосного искусственного излучения на частотах вблизи гармоник гирорезонансов [5]. На стенде EISCAT/Heating проведены комплексные исследования

эффектов модификации высокоширотной F-области ионосферы при воздействии мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации (O-мода), излучаемой в направлении магнитного зенита на частотах около третьей [6], четвертой [7], пятой и шестой гирогармоник электронов [8].

На стенде HAARP проведена серия экспериментов по воздействию волны накачки в районе 2 и 3го гирорезонансов электронов ионосферной плазмы [9, 10]. По результатам данных работ было обнаружено, что волна накачки обыкновенной поляризации может генерировать УИРИ, регистрируемое в непосредственной близости от нагревного стенда. УИРИ возбуждается в результате параметрического распада волны накачки на электростатическую волну и рассеянную электромагнитную волну. При этом, спектр искусственного радиоизлучения зависит от угла между волновым вектором волны накачки и вектором магнитного поля Земли. Если в результате параметрического распада мощной радиоволны возбуждаются ионно-акустические волны, то в спектре УИРИ наблюдаются линии с отрицательным смещением частоты на 10-30 Гц относительно частоты волны накачки. Если возбуждаются ионно-циклотронные волны, то частота смещений линий составляет ~ 50 Гц (для ионов атомарного кислорода).

В работах на нагревном стенде EISCAT/Heating коллективом специалистов ААНИИ впервые была показана возможность генерации УИРИ при помощи мощной волны накачки необыкновенной поляризации и его регистрации на расстоянии более 1000 км [11, 12]. В спектрах УИРИ были обнаружены интенсивные дискретные спектральные структуры, упорядоченные по частоте ионно-циклотронных волн атомарного кислорода, сделана оценка порогов возбуждения УИРИ [13]. В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований особенностей спектра УИРИ, регистрируемого на расстоянии 1140 км от нагревного стенда, от соотношения частоты волны накачки f_H к частоте пятой гармоники гирорезонанса $5f_{ce}$

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования поведения УИРИ на частотах нагрева в районе пятой гирогармоники электронов, $f_H \approx 5f_{ce}$, выполнялись 25 и 26 октября 2013 г. на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия, 69.6°с. ш., 19.2°в.д., $L=6.2$, $I=78^\circ$) [14]. Излучение мощной волны КВ-диапазона осуществлялось в направлении магнитного зенита. В экспериментах использовалась фазированная антенная решетка (ФАР1) с шириной диаграммы направленности 5 – 6°, что обеспечивало эффективную мощность излучения 25 октября Рэфф ≈ 500 МВт и 700 МВт 26 октября. Излучение выполнялось циклами 20 мин нагрев/10 мин пауза, в течение периода нагрева частота волны накачки ступенчато изменялась с шагом 5 кГц / 20 с, в диапазоне 6700 – 6950 кГц.

В период проведения экспериментов наблюдалась высокая солнечная активность. Ежедневные числа Вольфа W составляли 148. Магнитная активность была низкой, значения трехчасового планетарного индекса K_p находились около 0 (сумма K_p за сутки $\Sigma K_p \sim 3$). По данным измерений ионозонда вертикального зондирования в Тромсе критические частоты слоя F2 (f_oF2) были высокими и изменялись в пределах от 7.8 до 8.2 МГц.

Излучение стенда и УИРИ регистрировались на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская», расположенной в Ленинградской области. Расстояние вдоль дуги большого круга от нагревного стенда до НИС «Горьковская» составляет 1140 км. Геометрия эксперимента приведена на рис. 1. Непосредственно для регистрации, записи и анализа в реальном времени принимаемых радиосигналов использовался анализатор спектра декаметрового диапазона, разработанный на основе радиоприемного устройства ICOM ICR-75, полоса анализа составляла 2.5 кГц.

Результаты наблюдений

Для определения зависимости параметров УИРИ при нагреве вблизи частоты пятой гирогармоники электронов были проанализированы результаты серии экспериментов, проведенных 25 и 26 октября 2013 года. Эксперименты выполнялись при идентичных спокойных геофизических условиях. Во все дни были получены повторяющиеся результаты, в качестве примера на рис. 2 приведены условия эксперимента и спектры зарегистрированного УИРИ 25 октября 2013г.

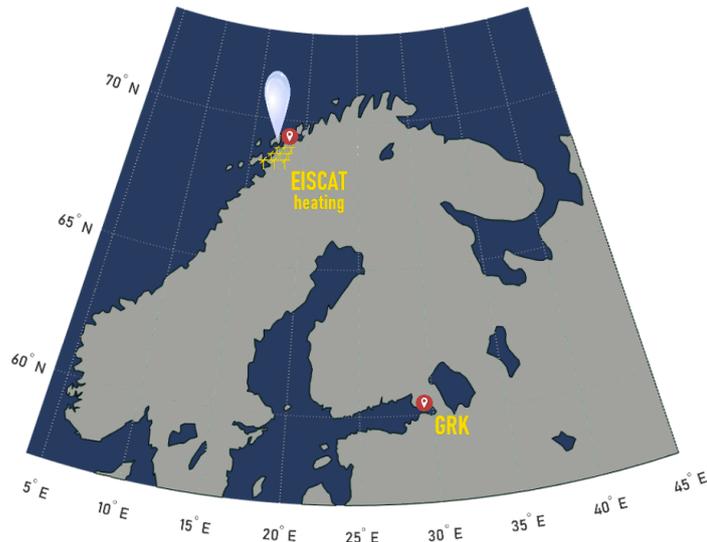


Рис.1.Схема, показывающая геометрию эксперимента по дистанционной регистрации УИРИ.

На рис. 2а приведен ход критических частот f_oF2 и частоты волны накачки f_H , изменяющейся в циклах нагрева. Циклы излучения обозначены прямоугольниками, в каждом цикле указана мода поляризации. В обоих циклах излучение осуществлялось на частоте ниже f_oF2 . На рис. 2б приведена спектрограмма зарегистрированных нагревных сигналов и УИРИ. Полоса зарегистрированных сигналов представлена таким образом, чтобы нулевая частота в спектре всегда соответствовала частоте волны накачки нагревного стенда. Из рисунка видно, что в первом цикле нагрева с 15:01 до 15:21 UT при ступенчатом изменении частоты накачки обыкновенной поляризации (О-мода) на спектрограммах не наблюдалось каких-либо спектральных структур. При переходе на необыкновенную поляризацию (Х-мода), в цикле нагрева с 15:31 до 15:51 UT, регистрировалось большое разнообразие спектральных линий, поведение которых изменялось в процессе перестройки частоты волны накачки от 6700 до 6995 кГц.

Момент прохождения гирорезонанса $f_H \approx 5f_{ce}$ в первом цикле нагрева на О-моду поляризации определялся по максимуму подавления интенсивности DM компоненты в спектре широкополосного ИРИ. Регистрация широкополосного ИРИ осуществлялась в килогерцовом диапазоне частот отстроек относительно частоты нагрева f_H от -50 кГц до $+150$ кГц на диагностической аппаратуре комплекса EISCAT/Heating. Данные измерений позволяли регистрировать такие спектральные компоненты ИРИ как DM (downshifted maximum) и BUM (broad upshifted maximum). Результаты регистрации широкополосного ИРИ в работе не приводятся. Максимальное подавление DM компоненты наблюдалось в 15:09 UT при частоте излучения 6820 кГц. Согласно модели IGRF условие $5f_{ce} = 6820$ кГц выполнялось для высоты 217-218 км.

Определить момент прохождения пятой гармоники гирочастоты по результатам измерения интенсивности DM компоненты при Х-нагреве не представляется

возможным, поскольку волна накачки X-поляризации не возбуждает DM компоненты ИРИ [11]. Геофизические условия в соседних циклах излучения на O- и X-модах поляризации не изменялись, таким образом мы можем с высокой долей вероятности предположить, о том, что момент прохождения пятого гирорезонанса наблюдался на той же частоте излучения $f_H = 6820$ кГц в 15:39 UT. Моменты прохождения гирорезонанса в циклах излучения указаны стрелками на рис. 2.

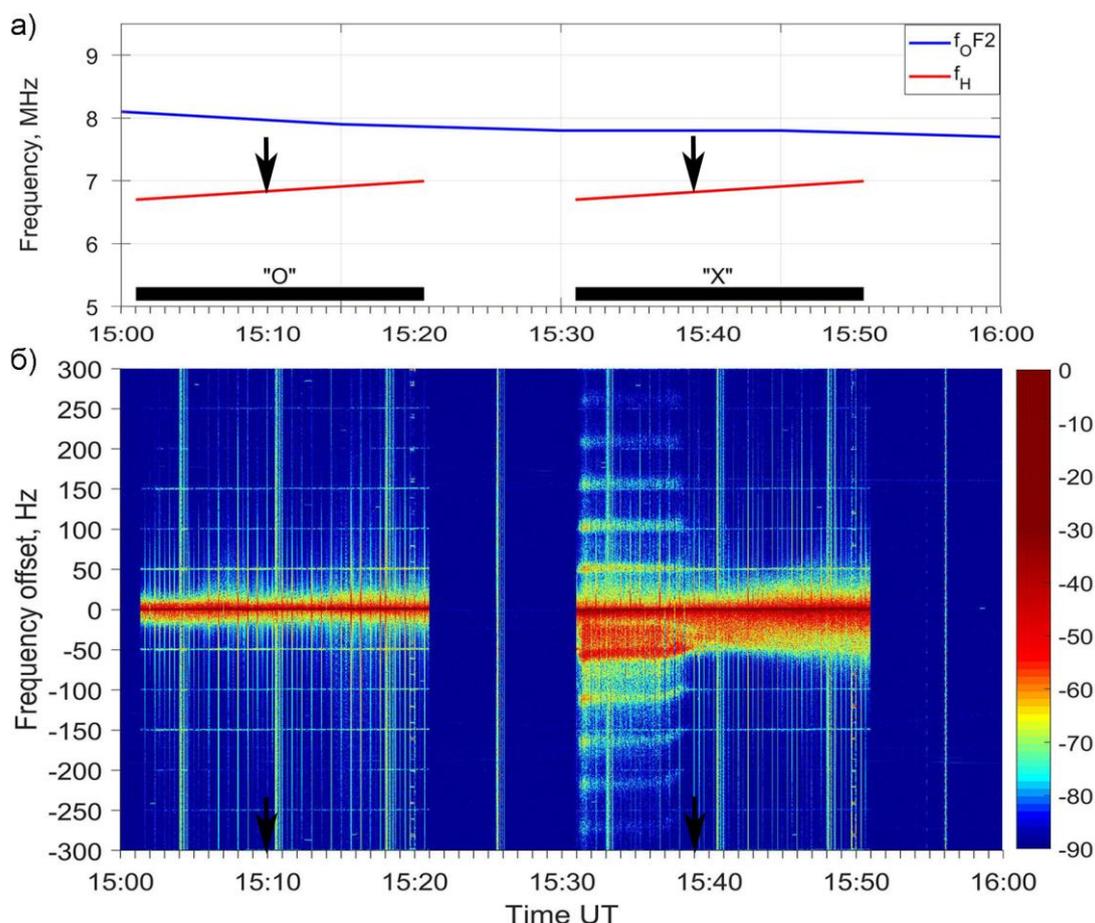


Рис. 2. а) Ход критических частот f_oF2 и частоты волны накачки f_H , изменяющейся в циклах нагрева; б) спектрограмма зарегистрированных нагревных сигналов и УИРИ.

Как видно из рис. 2б на состав и интенсивность дискретных линий сильно влияла близость частоты накачки f_H к частоте пятой электронной гирогармоники $5f_{ce}$. На частотах накачки ниже частоты электронной гирогармоники ($f_H < 5f_{ce}$) в спектрах наблюдались смещенные вниз и вверх относительно частоты волны накачки дискретные спектральные структуры (линии стокса и антистокса). Частота смещения находилась в районе ионной гирочастоты атомарного кислорода O^+ . Интенсивность основного смещенного вниз на -55 Гц спектрального максимума была ниже мощности волны накачки на 18–20 дБ. Спектр УИРИ при $f_H < 5f_{ce}$ ассиметричен относительно частоты волны накачки (частота сдвига = 0 Гц). Основная смещенная вверх спектральная линия с максимумом на частоте +52 Гц имела интенсивность на 35–40 дБ ниже волны накачки. Помимо этого, в области отрицательных отстроек наблюдалась линия на частоте -26 Гц с интенсивностью на 20–25 дБ ниже волны накачки.

При приближении частоты волны накачки к частоте гирорезонанса $f_H \approx 5f_{ce}$ интенсивность дискретных линий УИРИ уменьшалась и в районе $5f_{ce} \pm 5$ кГц спектральные линии полностью подавлялись (15:39 UT). При этом, частоты отстройки

линий стока постепенно уменьшались. Так, например, частота отстройки главного спектрального максимума изменялась от -55 до -48 Гц. Смещение частоты линий антистока незначительно увеличивалось (0.5 – 1 Гц).

Выше пятой электронной гирогармоники ($5f_{ce}+10$) кГц в спектре УИРИ сформировалась широкополосная структура, преимущественно сдвинутая вниз относительно частоты волны накачки. Данная структура регистрировалась выше пятой электронной гирогармоники в полосе частот волны накачки от $f_H = 5f_{ce} + 10$ кГц до $f_H = 5f_{ce} + 175$ кГц.

Заключение

В результате проведения серии экспериментов показано, что волна накачки необыкновенной (Х-мода) поляризации, излучаемая в магнитный зенит, в отличие от волны обыкновенной поляризации (О-мода), возбуждает УИРИ, которое может быть зарегистрировано на удалении более 1100 км от искусственно-возмущенной области. Характеристики спектра УИРИ зависят от соотношения частоты волны накачки к частоте гармоники гирорезонанса. При $f_H < 5f_{ce}$ в спектре наблюдаются ярко выраженные дискретные линии упорядоченные по частоте ионно-циклотронных волн ионов атомарного кислорода.

Подавление спектральных компонент УИРИ при Х-нагреве может быть использовано для определения частоты электронной гирогармоники, аналогичным образом, как и максимальное подавление DM компоненты широкополосного ИРИ при О-нагреве, что в свою очередь позволит выполнять оценку состояния ионосферной плазмы на значительных расстояниях от искусственно-возмущенной области.

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

Литература

1. Thidé, B., Kopka, H., & Stubbe, P. Observations of stimulated scattering of a strong high frequency radio wave in the ionosphere // *Physics Review Letters*. 1982. 49. 1561–1564. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.1561>
2. Leyser, T. B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // *Space Science Reviews*. 2001. 98. 223–328. <https://doi.org/10.1023/a:1013875603938>
3. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы – Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2017.
4. Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П., и др. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т.55. N.6. С.393
5. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // *УФН*. 2007. 177. С. 330–340 DOI: 10.3367/UFNr.0177.200703j.0330
6. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К., Ритвельд М. Т. Эффекты модификации высокоширотной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением. 1. Результаты комплексных наземных наблюдений // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т.53. № 9. С.571
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 // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014. Т.57. №1. С. 1-22

8. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Рьетвельд М.Т., Йоман Т.К., Хагстром И. Эффекты модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными короткими радиоволнами на частотах вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 8. С 623– 650.
9. Yellu A. D., Scales W. A., Bernhardt P. A. et. al. Geomagnetic field impacts on second harmonic generation during high power radio wave-ionosphere interaction, *Physics of Plasmas* 28(6):062901 DOI:10.1063/5.0031588
10. 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
11. 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>
12. 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>
13. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М. Загорский Г.А. Характеристики искусственного радиоизлучения ионосферы в зависимости от эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/HEATING // *Космические исследования*. 2023. Т.61. №6. С. 476-485 DOI: 10.31857/S0023420623600204
14. 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