

УДК 533.951

DOI: 10.26907/rwp29.2025.636-639

ГИРОГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПАРАМЕТРАХ УЗКОПОЛОСНОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ X НАГРЕВЕ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

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

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38

E-mail: askalishin@aari.ru

Аннотация. Экспериментально исследованы характеристики спектра узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) при воздействии волны накачки КВ нагревного стенда EISCAT/Heating, излучаемой в направлении магнитного зенита на частотах в окрестности четвертой и пятой гирогармоник электронов. Регистрация сигналов 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 гирогармоник электронов.

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

GYRO-HARMONIC EFFECTS IN THE NARROWBAND STIMULATED ELECTROMAGNETIC EMISSION FEATURES UNDER THE X-MODE HF PUMPING THE HIGH LATITUDE IONOSPHERIC F-REGION

A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova

Abstract. The characteristics of the narrowband stimulated electromagnetic emission spectrum have been experimentally studied under the influence of an EISCAT ionospheric heating facility pump wave emitted in the direction of the magnetic zenith, at frequencies near the fourth and fifth electron gyroharmonic. The signals were recorded in the Leningrad region, at a distance of 1140 km from the heating facility. It has been shown that powerful high-frequency radiation of unusual polarization (X-mode) from the facility excites a narrowband stimulated electromagnetic emission, whose spectrum significantly depends on the ratio between the frequency of the pumping wave and the frequency of electron gyroharmonics.

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

Введение

К настоящему времени выполнено достаточно много исследований по нелинейному взаимодействию мощных радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации КВ-нагревных стендов с ионосферной плазмой вблизи электронных гирорезонансов [1]. На стенде Сура исследованы особенности возбуждения мелкомасштабных искусственных неоднородностей при нагреве на частотах в окрестности четвертого гирорезонанса, исследованы спектральные структуры широкополосного искусственного излучения на частотах вблизи гармоник гирорезонансов [2]. На стенде EISCAT/Heating проведены комплексные исследования эффектов модификации ионосферы волной накачки О-моды на частотах около третьей, четвертой, пятой и шестой гирогармоник электронов [3, 4]. На стенде HAARP проведена серия экспериментов по воздействию волны накачки в районе второго и третьего гирорезонансов электронов [5]. По результатам исследований на стенде HAARP было обнаружено, что волна накачки обыкновенной поляризации может генерировать узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ), регистрируемое в непосредственной близости от нагревного стенда. УИРИ возбуждается в результате параметрического распада волны накачки на электростатическую волну и рассеянную электромагнитную волну [5].

В исследованиях на нагревном стенде EISCAT/Heating впервые была показана возможность генерации УИРИ при помощи мощной волны накачки необыкновенной (X-мода) поляризации, и его регистрации на больших расстояниях [6]. В спектрах УИРИ были обнаружены интенсивные дискретные спектральные структуры, упорядоченные по частоте ионно-циклотронных волн атомарного кислорода, сделана оценка порогов возбуждения УИРИ

[7,8]. Целью данной работы является рассмотрение и анализ особенностей поведения и характеристик спектров УИРИ в зависимости от соотношения частоты волны накачки f_H к частоте четвертой $4f_{ce}$ и пятой $5f_{ce}$ гармоникам гирочастоты электронов.

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования поведения УИРИ на частотах нагрева в окрестности $4f_{ce}$ и $5f_{ce}$ проводились на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия, 69.6°с. ш., 19.2°в.д., $L=6.2$, $I=78^\circ$) [9]. Эксперименты вблизи пятой гирогармоники электронов, $f_H \approx 5f_{ce}$, выполнялись 25 и 26 октября 2013 г. В период проведения работ наблюдалась высокая солнечная активность. Ежедневные числа Вольфа W составляли 148. Магнитная активность была низкой, значение индекса $K_p=0$ (сумма K_p за сутки $\Sigma K_p \sim 3$). Исследования в окрестности четвертой гирогармоники электронов, $f_H \approx 4f_{ce}$, проводились 31 октября 2015г, значения W составляли 88, магнитная активность также была низкой, значение $K_p \approx 2$ -, при $\Sigma K_p = 11$.

Излучение стенда и УИРИ регистрировались на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская», расположенной в Ленинградской области. Расстояние от нагревного стенда до НИС «Горьковская» составляет 1140 км. Непосредственно для регистрации и анализа принимаемых радиосигналов использовался анализатор спектра декаметрового диапазона, разработанный на основе радиоприемного устройства ICOMICR-75 с полосой анализа 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 г. Эксперименты выполнялись при идентичных спокойных геофизических условиях. Излучение волны накачки осуществлялось в направлении магнитного зенита, эффективная мощность излучения составляла $P_{эфф} \approx 500\text{--}700$ МВт. 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 частот 6700 – 6950 кГц. 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. Во все дни наблюдений были получены повторяющиеся результаты, в качестве примера на рис. 1 приведены условия проведения эксперимента и спектры зарегистрированного УИРИ 25 октября 2013 г.

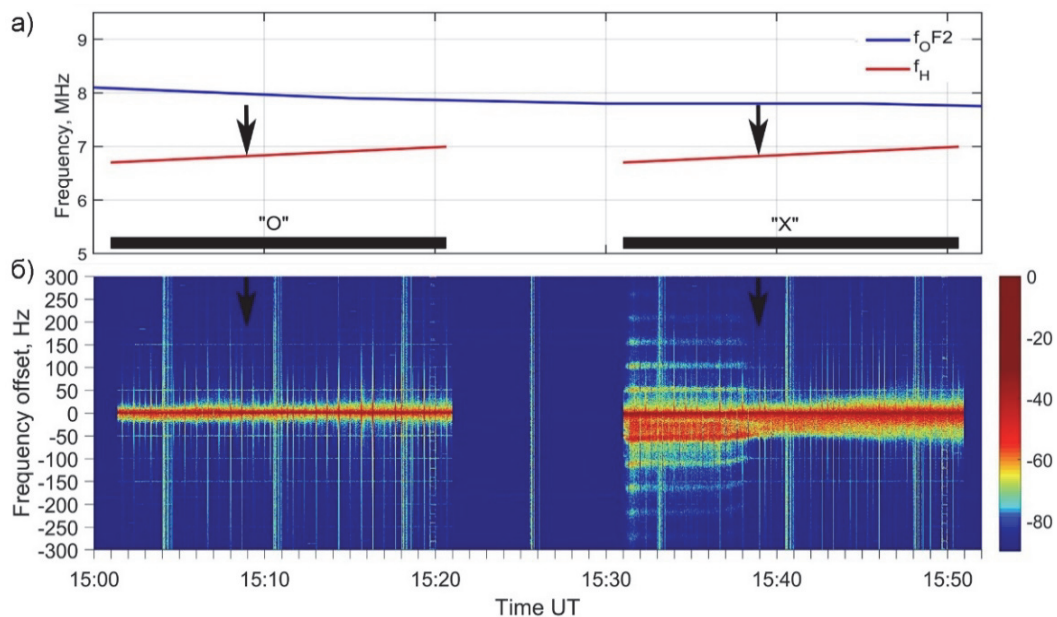


Рис. 1. Результаты наблюдений 25 октября 2013 г. при излучении волны накачки в окрестности пятой гирогармоники электронов: поведение критической частоты слоя F2, f_oF2 , и частоты нагрева f_H (а); динамические спектры УИРИ, полоса зарегистрированных сигналов представлена таким образом, чтобы нулевая частота в спектре всегда соответствовала частоте волны накачки стенда (б). Циклы нагрева и поляризация волны накачки отмечены на оси времени

Из рис. 1 следует, что в первом цикле нагрева с 15:01 до 15:21 UT при О-нагреве на спектрограммах не наблюдалось каких-либо спектральных структур. При переходе на Х-поляризацию, в цикле нагрева с 15:31 до 15:51 UT, регистрировалось большое разнообразие спектральных линий, поведение которых изменялось в процессе перестройки f_H частоты. Для высоты отражения мощной Х-волны 216–218 км согласно модели IGRF, частота пятой гирогармоники составляет $5f_{ce} = 6820$ кГц ($f_{ce} = 1,365$ кГц). Частота нагрева достигла $f_H = 6820$ кГц в 15:39 UT (указан стрелкой на рис. 1).

Как видно из рис. 1б на состав и интенсивность дискретных линий существенно влияло соотношение между частотой волны накачки f_H и частотой $5f_{ce}$. При $f_H < 5f_{ce}$ в спектрах УИРИ наблюдались смещенные вниз и вверх относительно частоты волны накачки дискретные спектральные структуры (линии Стокса и антистокса). Частота смещения находилась вблизи гирочастоты атомарного кислорода (O^+). Интенсивность основного смещенного вниз на -55 Гц спектрального максимума была ниже мощности волны накачки на 18 – 20 дБ. Помимо этого, в области отрицательных отстроек наблюдалась линия ниже частоты волны накачки на -26 Гц с интенсивностью на 20 – 25 дБ. Поведение спектральных компонент УИРИ в положительной области (относительно частоты волны накачки, соответствующей нулевому сдвигу) при $f_H < 5f_{ce}$ асимметрично поведению сдвинутых вниз по частоте спектральным линиям. Основная смещенная вверх спектральная линия с максимумом на частоте $+52$ Гц имела интенсивность на 35–40 дБ ниже волны накачки.

При приближении $f_H \approx 5f_{ce}$ интенсивность УИРИ уменьшалась и при $f_H = (5f_{ce} \pm 5)$ кГц спектральные линии полностью подавлялись (15:39 UT). Выше пятой электронной гирогармоники $f_H \approx (5f_{ce} + 10)$ 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.

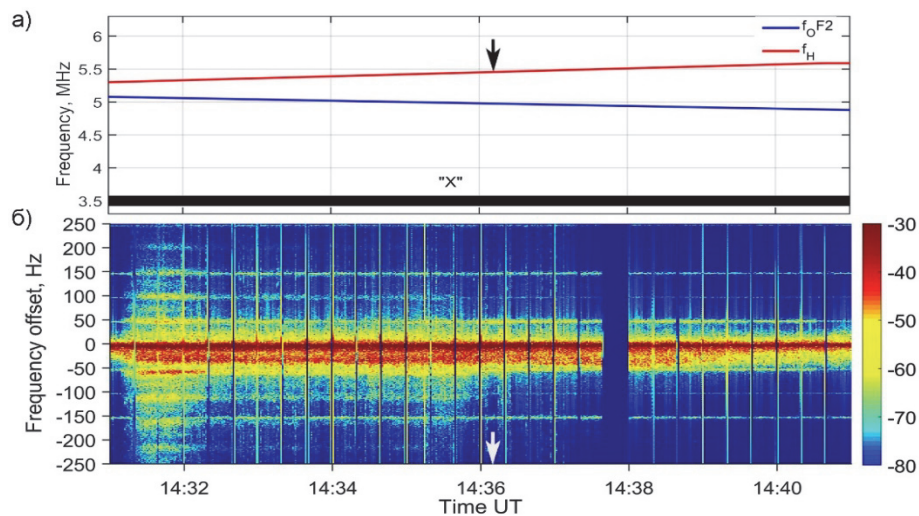


Рис. 2. Результаты наблюдений 31 октября 2015 г. при излучении волны накачки в окрестности четвертой гирогармоники электронов: поведение критической частоты слоя F2, f_oF2 , и частоты нагрева f_H (а); динамические спектры УИРИ, полоса зарегистрированных сигналов представлена таким образом, чтобы нулевая частота в спектре всегда соответствовала частоте волны накачки стэнда (б). Цикл нагрева и поляризация волны накачки отмечены на оси времени

Эксперимент в районе четвертого гирорезонанса выполнялся 31 октября 2015 г. Мощная Х-волна излучалась в магнитный зенит. Частота излучения в цикле нагрева изменялась в диапазоне от 5300 кГц до 5590 кГц с шагом 10 кГц / 20 с. В данном эксперименте частота волны накачки f_H была выше частоты f_oF2 , но ниже f_xF2 , т.е. мощная Х-волна отражалась от ионосферы. С начала цикла и до 14:36 UT в спектре УИРИ регистрируются ярко выраженные дискретные линии иона атомарного кислорода. При этом интенсивность линий уменьшалась с увеличением частоты волны накачки, что обусловлено возрастанием поглощения в нижней ионосфере. В 14:36 UT произошло полное подавление дискретных линий O^+ , частота излучения

в данный момент составляла $f_H = 5470$ кГц. Согласно модели IGRF, условие $f_H = 4f_{ce} = 5470$ кГц выполнялось для высоты 214 – 218 км ($f_{ce} = 1,365$ кГц). Таким образом, можно предположить по аналогии с результатами на $5f_{ce}$, что момент прохождения четвертой гирогармоники электронов наблюдался в 14:36 UT при $f_H = 5470$ кГц. При дальнейшем увеличении частоты волны накачки $f_H > 4f_{ce}$ в спектре УИРИ наблюдался диффузный максимум с частотой отстройки до –48 Гц.

Заключение

В результате проведения серии экспериментов показано, что волна накачки Х-поляризации, излучаемая в магнитный зенит, в отличие от О-волны, возбуждает УИРИ, которое может быть зарегистрировано на больших удалениях от искусственно-возмущенной области. Характеристики спектра УИРИ зависят от соотношения между частотой волны накачки и частотой гирогармоник электронов. При $f_H < nf_{ce}$, (где $n = 4, 5$) 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, аналогично максимальному подавлению DM компоненты широкополосного ИРИ при О-нагреве, что в свою очередь позволит выполнять оценку состояния ионосферной плазмы на значительных расстояниях от искусственно-возмущенной области.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020П.

Список литературы

1. Leyser T. B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // Space Science Reviews. – 2001. – V. 98. – P. 223–328. <https://doi.org/10.1023/a:1013875603938>
2. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // УФН. – 2007. – Т. 177. – С. 330–340. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200703j.0330>
3. 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. 571–593.
4. 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.
5. 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. <https://doi.org/10.1063/5.0031588>
6. Blagoveshchenskaya, N. F., Borisova, T. D., Yeoman T.K. Kalishin A.S. Modification of the high latitude ion–osphere 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>
7. 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 Physics. – 2021. – Vol. 126. – № 8. <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
8. 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. <https://doi.org/10.31857/S0023420623600204>
9. 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