

Том II, с. 43–46

УДК: 533.951 + 537.868

УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКОПОЛОСНОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМ КВ РАДИОВОЛНАМИ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

А. С. Калишин¹, Н. Ф. Благовещенская¹, Т. Д. Борисова¹, Т. Йоман²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

E-mail: askalishin@aari.ru, nataly@aari.nw.ru, borisova@aari.ru

²Лейсестерский университет, г. Лейсестер, LE1 7RH, Великобритания
E-mail: yxo@leicester.ac.uk

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) при воздействии на высокоширотную верхнюю ионосферу мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации нагревного комплекса EISCAT/Heating в г. Тромсе, Норвегия. Выполнен анализ условий возбуждения и спектральных характеристик УИРИ в зависимости от частоты нагрева и угла излучения волны накачки.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна; высокоширотная ионосфера; узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы; поляризация; спектральная характеристика; EISCAT/Heating

EXCITATION CONDITIONS AND FEATURES OF NARROWBAND STIMULATED ELECTROMAGNETIC EMISSION IN THE HIGH LATITUDE IONOSPHERE INDUCED BY THE EXTRAORDINARY POLARIZED POWERFUL HF RADIO WAVES

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

Abstract. We present experimental results concerning the investigations of the features of the narrowband stimulated electromagnetic emission (NSEE) in the high latitude upper ionosphere induced by the extraordinary polarized powerful HF radio waves from the EISCAT/Heating facility at Tromsø, Norway. The analysis of the generation conditions and spectral features of the NSEE depending on the heater frequency and the HF pump wave radiation angle is made.

Keywords: powerful HF radio wave; high latitude ionosphere; narrowband stimulated electromagnetic emission; polarization; spectral feature; EISCAT/Heating

Введение

Одним из основных явлений, обнаруженных в экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами является искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ). ИРИ генерируется при воздействии мощными КВ радиоволнами обыкновенной (*O*-мода) поляризации на *F*-область ионосферы, наблюдается в полосе частот до $\pm(100 - 200)$ кГц относительно частоты нагрева и регистрируется в непосредственной близости от нагревного стенда. Более трех десятилетий на всех КВ нагревных комплексах мира успешно проводятся исследования спектральных и динамических характеристик ИРИ [1].

Недавно на нагревном комплексе HAARP было обнаружено узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) [2]. Интенсивные спектральные компоненты в спектре УИРИ регистрировались при *O*-нагреве в полосе частот ± 1 кГц относительно частоты нагрева в непосредственной близости от комплекса HAARP. Обнаруженные спектральные компоненты в спектре УИРИ ассоциировались с ионно-акустическими волнами (IA), электростатическими ионными циклотронными волнами (EIC) и ионными бернштейновскими волнами (IB) [3].

Многочисленные эксперименты, выполненные специалистами ААНИИ на нагревном комплексе EISCAT/Heating, позволили впервые обнаружить УИРИ при воздействии мощной КВ

радиоволны необыкновенной (X -мода) поляризации на высокоширотную F -область ионосферы, которое регистрировалось на удалении более 1000 км от нагревного комплекса [4]. При этом в спектре УИРИ регистрировались компоненты, обусловленные возбуждением электростатических ионных циклотронных волн (EIC) и их гармоник (IB) [5]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований условий генерации и спектральных характеристик УИРИ при X -нагреве высокоширотной F -области ионосферы при различных углах излучения мощной КВ радиоволны, а также выполнено сравнение поведения УИРИ и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН).

Характеристика экспериментов

Эксперименты по воздействию на ионосферу мощного КВ радиоизлучения проводились на нагревном комплексе EISCAT/Heating, расположенном в г.Тромсе, Норвегия (69.6° N , 19.2° E , $L = 6.2^\circ$, $I = 78^\circ$) с 2011 по 2016 гг. Волна накачки излучалась на частотах $f_H = 5.5 - 8.0$ МГц, эффективная мощность излучения составляла $P_{\text{эфф}} = 460 - 750$ МВт. В ряде экспериментов мощная КВ радиоволна излучалась под различными углами: в магнитный зенит (диаграмма направленности антенны комплекса EISCAT/Heating была наклонена на 12° от вертикали к югу), в вертикальном направлении (0°) и промежуточных между ними направлениях (наклон диаграммы направленности на 4 или 6° от вертикали к югу).

Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) регистрировалось на обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» под г.С.-Петербург (60.28° N , 29.3° E) на удалении 1200 км от комплекса EISCAT/Heating. Регистрация нагревных сигналов проводилась с использованием анализатора спектра декаметрового диапазона на базе приемника ICOMIC-R75. Прием осуществлялся на двойную горизонтальную ромбическую антенну. Для анализа результатов использовались результаты наблюдений с помощью КВ радара CUTLASS (SuperDARN).

Результаты наблюдений и их анализ

В экспериментах, выполненных сотрудниками ААНИИ на комплексе EISCAT/Heating, впервые было обнаружено узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) при нагреве F -области высокоширотной ионосферы мощной КВ волной X -поляризации. Дискретные спектральные компоненты в спектре УИРИ регистрировались при -нагреве в полосе частот ± 1 кГц относительно частоты нагрева на расстоянии порядка 1200 км от нагревного комплекса. Возбуждение различных компонент в спектре УИРИ связано с генерацией ионных гирогармонических структур [2]. Механизм их генерации может быть связан с развитием параметрической неустойчивости, при которой мощная электромагнитная волна в области отражения трансформируется в высокочастотную электронную Бернштейновскую (ЕВ) и низкочастотную ионную Бернштейновскую (ИВ) плазменные волны.

Анализ условий возбуждения и особенностей поведения спектральных компонент в спектре УИРИ показал их зависимость от соотношения между частотой волны накачки f_H и гармониками гирочастоты электронов nf . Наибольшее количество спектральных компонент в спектре УИРИ возбуждалось при X -нагреве на частотах ниже гармоник электронных гирорезонансов. Рассмотрим результаты исследования зависимости спектральных характеристик УИРИ при -нагреве высокоширотной F -области ионосферы от угла излучения мощной КВ радиоволны эксперимента на примере эксперимента 28 октября 2013 г. Комплекс EISCAT/Heating излучал мощную КВ радиоволну обыкновенной (O -мода) или необыкновенной (X -мода) поляризации на частоте $f_H = 7.953$ кГц циклами 20 минут нагрев / 10 минут пауза при различных углах излучения — в магнитный зенит (диаграмма направленности наклонена на 12° к югу от вертикали) и под углом 6° (промежуточное положение между излучением в магнитный зенит и вертикальным). В период эксперимента значения критической частоты слоя $F2$ в Тромсе изменялись в незначительных пределах $f_oF2 = 9.2 - 8.8$ МГц. Частота нагрева $f_H = 7.953$ МГц была ниже шестой гирогармоники электронов на ~ 150 кГц.

На рис. 1 показаны динамические спектры нагревного сигнала в полосе частот ± 250 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированные на НИС

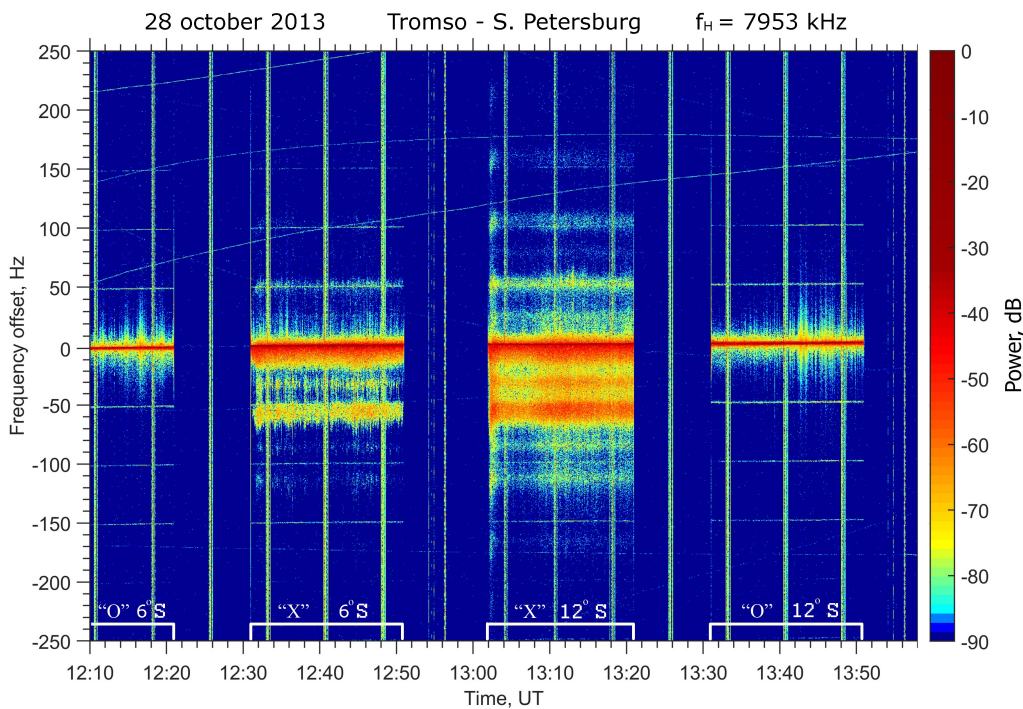


Рис. 1. Спектрограмма нагревного сигнала зарегистрированная 28 октября 2013 г. на расстоянии 1200 км от комплекса EISCAT/Heating на частоте 7.953 МГц.

«Горьковская» под С.-Петербургом при альтернативном O/X -нагреве 28 октября 2013 г. на частоте 7.953 кГц при различных углах излучения волны накачки. Мощная спектральная компонента на нулевой частоте соответствует частоте волны накачки. Во всех циклах нагрева кроме компонент УИРИ и спектральной компоненты волны накачки наблюдались слабые сетевые гармоники с частотами, кратными 50 Гц. Как видно из рис. 1, спектральные компоненты в УИРИ возбуждалось только при излучении волны накачки на X -поляризации. При излучении в магнитный зенит ($12^\circ S$) с 13:02 до 13:21 UT интенсивные дискретные спектральные компоненты УИРИ наблюдались как при отрицательных, так и положительных отстройках от нулевой частоты и были разнесены друг относительно друга примерно на gyro-частоту ионов атомарного кислорода O^+ (f_{ci}). Следует отметить, что спектральные компоненты регистрировались как на целочисленных ионных ги-

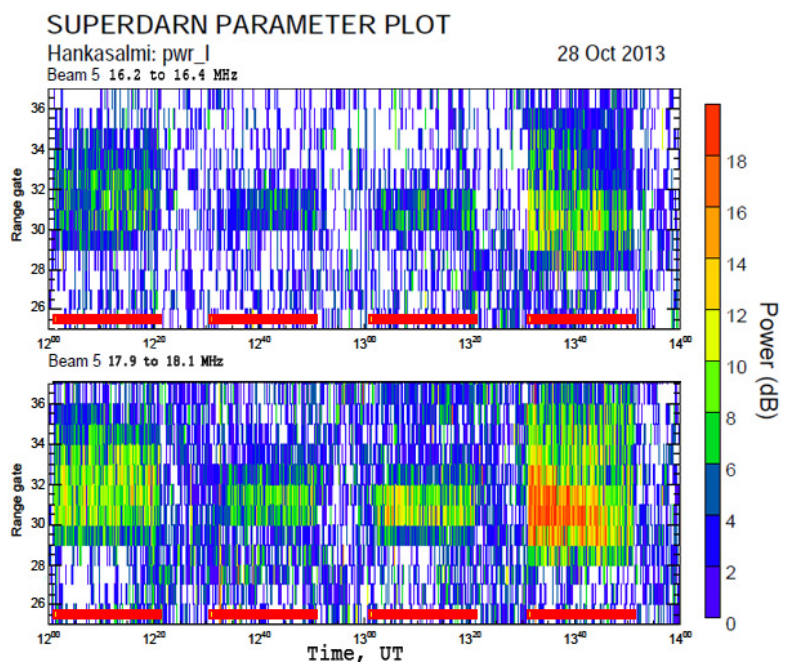


Рис. 2. Данные наблюдений КВ доплеровского радара CUTLASS 28 октября 2013 г. Циклы нагрева отмечены красными прямоугольниками.

рогармониках nf_{ci} , где $n = 1, 2, 3$ и т. д., так и при $n = 0.5, 1.5$. Интенсивность спектральных компонент постепенно затухала с увеличением номера гармоники. Частота основного спектрального максимума ($n = 1$) в области отрицательных отстроек составляла $-(54 \div 57)$ Гц, а его интенсивность была на 31 – 46 дБ ниже уровня волны накачки. Интенсивность основной спектральной компоненты при положительных отстройках частоты была на 52 – 64 дБ ниже уровня волны накачки, а ее частоты изменялись в пределах $+(51 \div 54)$ Гц. В цикле X -нагрева с 12:31 до 12:51 UT при излучении волны накачки под углом 6° S регистрировалось существенно меньше дискретных спектральных компонент. Интенсивность главных спектральных максимумов была ниже в среднем на 13 – 14 дБ, чем при излучении волны накачки в магнитный зенит. Наиболее выраженными были спектральные компоненты на f_{ci} и $0.5f_{ci}$.

Было выполнено сопоставление поведения УИРИ с данными регистрации рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналов с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми (Финляндия). CUTLASS работал одновременно на трех частотах 16 и 18 МГц, что обеспечивало рассеяние сигналов от МИИН с поперечными к магнитному полю масштабами $l_{\perp} \approx 9.3$ и 8.3 м соответственно (см. рис. 2). Результаты наблюдений радара CUTLASS свидетельствуют, что МИИН возбуждались как при O -, так и при X -нагреве высокоширотной F -области ионосферы. При этом интенсивность МИИН была существенно выше при излучении мощной КВ радиоволны O - или X -поляризации в направлении магнитного зенита (12° S).

Заключение

Установлено, что на большом удалении от КВ нагревного комплекса (~ 1200 км) УИРИ возбуждается при X -нагреве высокоширотной F -области ионосферы. Наибольшее количество спектральных компонент в спектре УИРИ возбуждалось при -нагреве на частотах ниже гармоник электронных гирорезонансов. Обнаружен эффект магнитного зенита в поведении УИРИ. Интенсивность и количество дискретных компонент в спектре УИРИ были максимальными при излучении мощной КВ радиоволны X -поляризации в направлении магнитного поля.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Европейской научной Ассоциации EISCAT. Система радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии поддерживается Финским метеорологическим институтом и Шведским институтом космической физики. Т. К. Yeoman поддержан грантом NERC NE/K011766/1.

Список литературы

1. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. — 468 с.
2. Bernhardt P. A., Selcher C. A., and Kowtha S. Electron and ion Bernstein waves excited in the ionosphere by high power EM waves at the second harmonic of the electron cyclotron frequency // J. Geophys. Res. Lett. — 2011. — Vol. 38.
3. Samimi A., Scales W. A., Fu H., et al., Ion gyroharmonic structures in stimulated radiation during second electron gyroharmonic heating: 1. Theory // J. Geophys. Res.: Space Phys. — 2013. — Vol. 118. — P. 502–514.
4. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. K., et al. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. — 2015. — Vol. 135. — P. 50–63.
5. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kalishin A. S., et al. Comparison of the Effects Induced by the Ordinary (O-Mode) and Extraordinary (X-Mode) Polarized Powerful HF Radio Waves in the High-Latitude Ionospheric F Region // Cosmic Research. — 2018. — Vol. 56, No 1. — P. 11 – 25.