

УДК 533.951;537.868

ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКОПОЛОСНОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭФФЕКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕВНОГО СТЕНДА EISCAT/HEATING

© 2023 г. А. С. Калишин¹, *, Н. Ф. Благовещенская¹, Т. Д. Борисова¹,
И. М. Егоров¹, Г. А. Загорский¹, А. С. Ковалев¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*askalishin@aari.ru

Поступила в редакцию 01.04.2023 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

По данным экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения выполнена оценка порогов возбуждения и анализ зависимости спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) от напряженности электрического поля мощной радиоволны КВ-диапазона (волны накачки) необыкновенной поляризации (Х-мода). Волны накачки излучались в направлении магнитного зенита на частоте 5.423 МГц. Эффективная мощность излучаемой волны изменялась от 55 до 360 МВт. УИРИ регистрировалось на научно-исследовательской станции под Санкт-Петербургом на расстоянии ~1200 км от нагревного стенда. Выполнены расчеты напряженности электрического поля мощного КВ-излучения вблизи высоты отражения с учетом неотклоняющего поглощения на пути распространения. Определены пороговые (минимальные) значения электрического поля, необходимые для возбуждения УИРИ.

DOI: 10.31857/S0023420623600204, EDN: CFXKDA

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на высокоширотных нагревных стендах HAARP (*англ.* High Frequency Active Auroral Research Program) и EISCAT/Heating (*англ.* European Incoherent Scatter Scientific Association – EISCAT) активно изучается явление узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Это относительно новый тип искусственного радиоизлучения был обнаружен на стенде HAARP. В отличие от широкополосного ИРИ [1–4], которое регистрируется в полосе частот ± 100 кГц относительно частоты волны накачки, спектр УИРИ сосредоточен в полосе ± 1 кГц. Авторами работ [5–7] было показано, что при воздействии на F-область ионосферы мощным КВ-радиоизлучением обыкновенной (О-мода) поляризации вблизи нагревного стенда может регистрироваться УИРИ, которое возникает вследствие параметрического распада мощной электромагнитной волны на электростатическую волну и рассеянную электромагнитную волну. Тип возбуждаемой электростатической волны зависит от угла между волновым вектором мощной радиоволны и вектором магнитного поля Земли. Ионно-акустические (*англ.* Ion Acous-

tic – IA) волны возбуждаются вдоль магнитного поля **B**, а ионно-циклотронные (*англ.* Electrostatic Ion Cyclotron – EIC) почти перпендикулярно **B** [8]. Линии IA-волн в спектре УИРИ появляются с отрицательным смещением частоты на 10–30 Гц, а линии излучения EIC с отстройкой по частоте, примерно, 50 Гц от частоты волны накачки. Частотный сдвиг спектральных линий зависит от вида ионов и температуры электронов в искусственно возмущенной области. Возможными механизмами генерации УИРИ являются стимулированное ионное рассеивание Бернштейна (*англ.* Stimulated Ion Bernstein Scatter – SIBS) и намагниченное стимулированное рассеяние Бриллюэна (*англ.* Magnetized Stimulated Brillouin Scatter – MSBS) [6, 9].

В экспериментах на стенде HAARP регистрация УИРИ проводилась на расстоянии 20 км от нагревного комплекса, т.е. в непосредственной близости от нагревного стенда, и только при О-нагреве [5–7]. При излучении волны накачки необыкновенной (Х-мода) поляризации спектральные компоненты IA-и EIC-волн не регистрировались. На стенде EISCAT/Heating, также проводились подобные работы, в которых, регистрация УИРИ

проводилась в 13 км от нагревного стенда и обыкновенной поляризации волны накачки [10].

На стенде EISCAT/Heating специалистами ААНИИ была проведена серия экспериментов, в которых впервые было обнаружено, что мощное КВ-радиоизлучение X -поляризации также может возбуждать УИРИ [11–15]. При этом УИРИ регистрировалось на значительном расстоянии (~1200 км) от КВ-нагревного стенда EISCAT/Heating. В спектрах УИРИ были обнаружены интенсивные дискретные спектральные структуры, связанные с электростатическими ионно-циклотронными волнами и их гармониками [11, 13]. Были рассмотрены возможные механизмы, ответственные за наблюдаемые спектральные составляющие [11, 12]. Показана зависимость спектральных характеристик УИРИ от отношения частоты волны накачки необыкновенной поляризации к критической частоте слоя F_2 ионосферы [12] и частоте гирогармоник электронов [13].

Целью данной работы является исследование по экспериментальным данным минимального значения электрического поля, необходимого для возбуждения УИРИ при X -нагреве, а также зависимости спектральных характеристик от эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/Heating.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нагревной стенд EISCAT/Heating расположен в г. Тромсе, Норвегия (69.6° с.ш., 19.2° в.д.; $L = 6.2$, магнитное склонение $I = 78^\circ$, магнитная широта 67.2°) [16]. В периоды проведения эксперимента нагревной стенд излучал мощную радиоволну X -поляризации при помощи фазированной антенной решетки № 1 (ФАР 1) в направлении магнитного зенита (12° к югу от вертикали). ФАР 1 является самой эффективной антенной решеткой комплекса EISCAT/Heating, имеет ширину диаграммы направленности порядка 5°–6°, рабочий частотный диапазон составляет 5.4–8.0 МГц, коэффициент усиления 28–31 дБ. Эксперименты выполнялись 25 и 26 октября 2021 г. в спокойных геофизических условиях. Значение K_p -индекса не превышало 1, по данным ионозонда отчетливо просматривался суточный ход критических частот E - и F_2 -слоев, минимально наблюдаемые частоты были в районе 1 МГц. 25 октября регистрировалось незначительное спорадическое прохождение (E_s). Волна накачки излучалась в режиме непрерывного излучения (англ. Continuous wave, CW) циклами — несколько минут нагрев, несколько минут пауза. Мощность излучения стенда ступенчато изменялась от цикла к циклу. Частота волны накачки выбиралась в районе критической частоты F_2 -слоя ионосферы и составляла 5.423 МГц.

В период экспериментов непрерывно контролировалась как интенсивность излучения на основной моде поляризации (X -мода) волны накачки, так и просачивание O -моды, возникающее вследствие рассогласования фаз элементов антенной решетки. На рис. 1 приведен пример диаграммы направленности ФАР 1 комплекса в горизонтальной и ветровальной плоскостях при излучении мощной КВ-радиоволны в одном из циклов нагрева. 25 октября 2021 г. в 14.44 UT комплекс EISCAT/Heating излучал на частоте 5.423 МГц в направлении магнитного зенита. Эффективная мощность излучения (ЭМИ или англ. Effective Radiated Power — ERP) волны накачки X -поляризации составляла $ERP = 290.9$ МВт, при этом просачивание O -моды имело величину $ERP = 0.4$ МВт, таким образом, просачивание составляло всего 0.13%. Диаграмма направленности ФАР-комплекса рассчитывается автоматически при помощи специализированного программного обеспечения [16], входными параметрами которого являются измеренные значения мощности и фазы передатчиков.

Контроль геофизической обстановки во время экспериментов осуществлялся при помощи магнитовариационной станции и ионозонда вертикального радиозондирования, расположенных непосредственно в районе стенда [17]. Для диагностики параметров ионосферной плазмы (температура электронов и ионов T_e и T_i , а также концентрация электронов N_e) использовался радар некогерентного рассеяния радиоволн, пространственно совмещенный с нагревным стендом [18]. Радар работал на частоте 930 МГц в направлении магнитного поля в Тромсе. В период проведения нагревных экспериментов радар работал в режиме “beata” в диапазоне высот 90–600 км с разрешением по высоте 1.5 км и по времени — 5 с. Данные измерений мощности рассеянного сигнала радара были обработаны с помощью унифицированного комплекса программ GUISDAP [19] для вычислений параметров ионосферной плазмы (электронной плотности N_e , температуры электронов и ионов T_e и T_i и др.).

Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы регистрировалось на научно-исследовательской станции (НИС) “Горьковская”, расположенной в Ленинградской области (60.28° с.ш., 29.37° в.д.) на удалении порядка 1200 км от КВ-нагревного комплекса EISCAT/Heating. Геометрия экспериментов приведена на рис. 2. Измерения осуществлялись в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева. Регистрация проводилась при помощи радиоприемного комплекса реализованного на основе приемного устройства IC R75 [20]. Данный комплекс обеспечивает прием сигналов в диапазоне частот 0.001–60 МГц, имеет динамический диапазон от 102 дБ и чувствительность не менее 0.3 мкВ. Прием сигналов проводился на

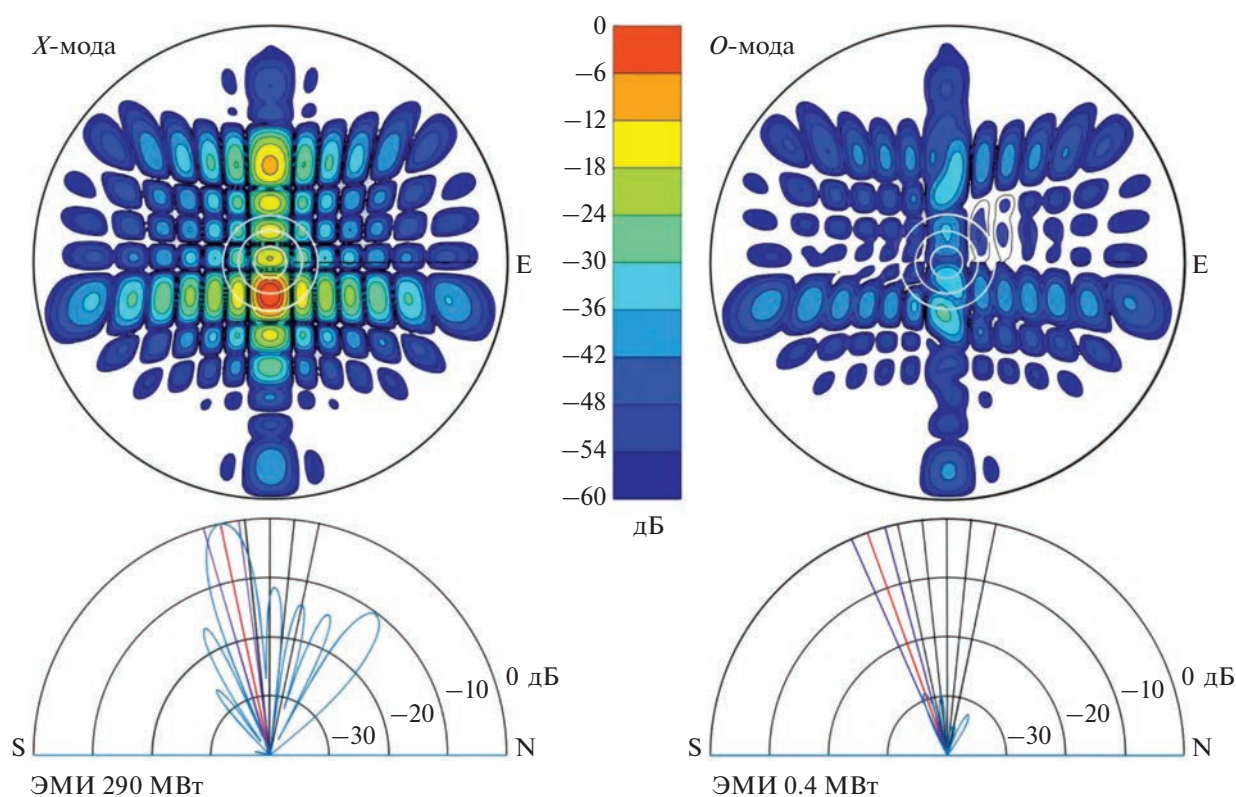


Рис. 1. Диаграмма направленности антенной решетки “1” комплекса EISCAT/Heating в горизонтальной и ветровальной плоскости при излучении мощной КВ радиоволны в период проведения эксперимента 25 октября 2021 г. в 14.44 UT. Комплекс излучал на частоте 5.423 МГц в направлении магнитного зенита.

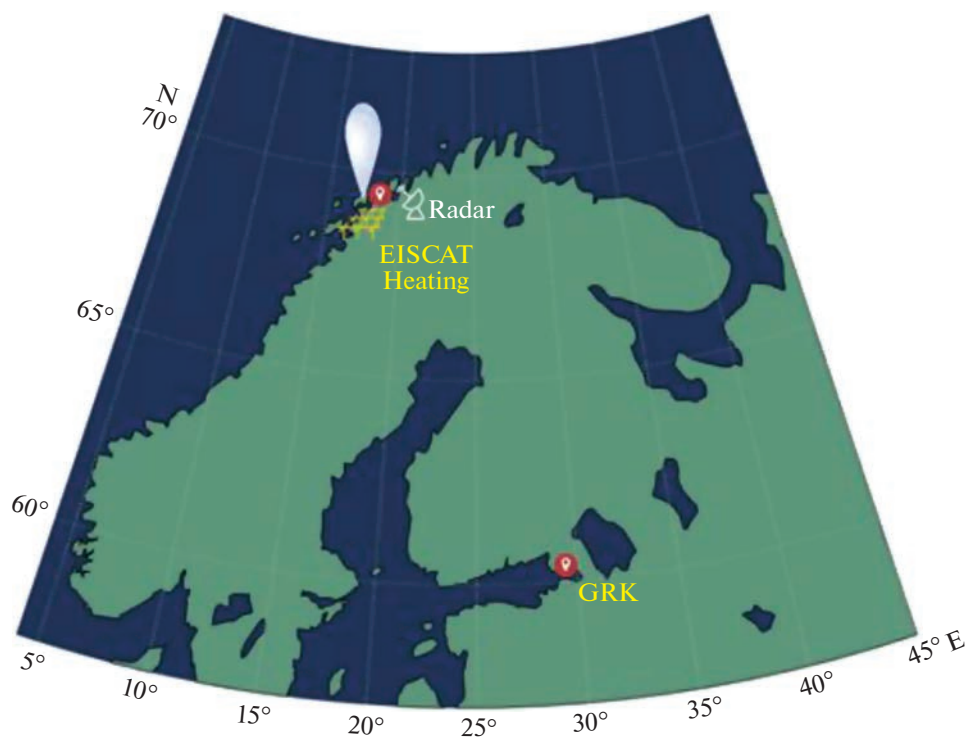


Рис. 2. Схема, показывающая геометрию эксперимента по дистанционной регистрации УИРИ.

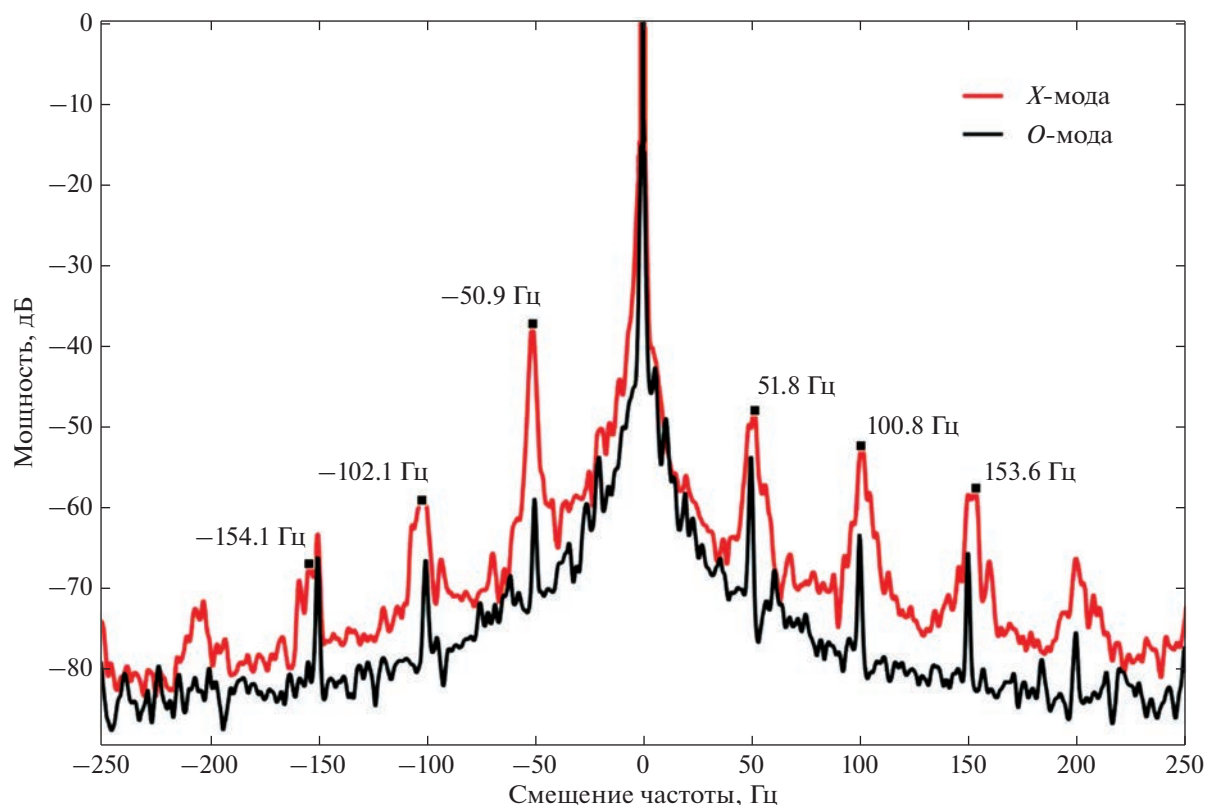


Рис. 3. Спектры мощного КВ-радиоизлучения стенда EISCAT/Heating в полосе ± 300 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированные на расстоянии 1200 км. Стенд излучал на частоте 4.2 МГц *O*-моды поляризации в 15.31.50 (черная линия) и *X*-моды в 15.41.45 (красная линия) 21 октября 2019 г. Спектральная компонента на нулевой частоте соответствует частоте нагревного сигнала.

двойную горизонтальную ромбическую антенну. Главный лепесток диаграммы направленности антенны ориентирован на нагревный стенд, ширина в горизонтальной плоскости в диапазоне частот регистрируемых сигналов нагревного комплекса (3.9–8.0 МГц) имела величину 22° – 50° , а усиление 7–13 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментов модификации верхней (*F*-область) ионосферы на нагревном стенде EISCAT/Heating накоплен большой массив данных наблюдений УИРИ. Спектр УИРИ, как правило, представляет совокупность дискретных линий в полосе ± 1 кГц, сдвинутых вверх и вниз по частоте относительно частоты волны накачки. В качестве примера на рис. 3 приведены спектры нагревного сигнала и УИРИ в 15.31.50 при *O*-нагреве и в 15.41.45 при *X*-нагреве (21 октября 2019 г.). Нагревный стенд EISCAT/Heating излучал циклами: 3 мин — нагрев/2 мин — пауза на частоте 4.2 МГц в направлении магнитного зенита. В циклах излучения на *O*-моды (рис. 3, черная линия) в спектре нагревного сигнала наблю-

далась единственная спектральная составляющая на частоте излучения f_H (соответствует нулевой частоте). Узкие гармоники спектра, кратные частоте 50 Гц, являются помехами питающей сети. При излучении на *X*-моды в последующих циклах в спектре принимаемого сигнала помимо f_H , регистрировались дополнительные ярко выраженные спектральные структуры, соответствующие ионным гирогармоническим структурам (ионы O^+) и их кратным гармоникам на частотах $f_H \approx \pm n \cdot 51$ Гц, где n — номер гирогармоники, $n = 1, 2, 3, 4, 5$.

Первая серия экспериментов выполнялась 25 октября 2021 г. с 14.30 до 15.00 UT. Стенд излучал в магнитный зенит на частоте 5.423 МГц циклами: 2 мин — нагрев/1 мин — пауза, с использованием *X*-моды поляризации. В период эксперимента 25 октября 2021 г. мощность излучения нагревного стенда изменялась ступенчато, приблизительно, по следующей схеме: 5, 10, 25, 50, 75, 100, 75, 50, 25, 100%. Реально измеренные эффективные мощности излучения в каждом нагревном цикле и сами нагревные циклы показаны на рис. 4. Из этого рисунка видно, что, в шестом цикле излучения 100% мощности достичь не удалось, и она осталась на уровне 75%.

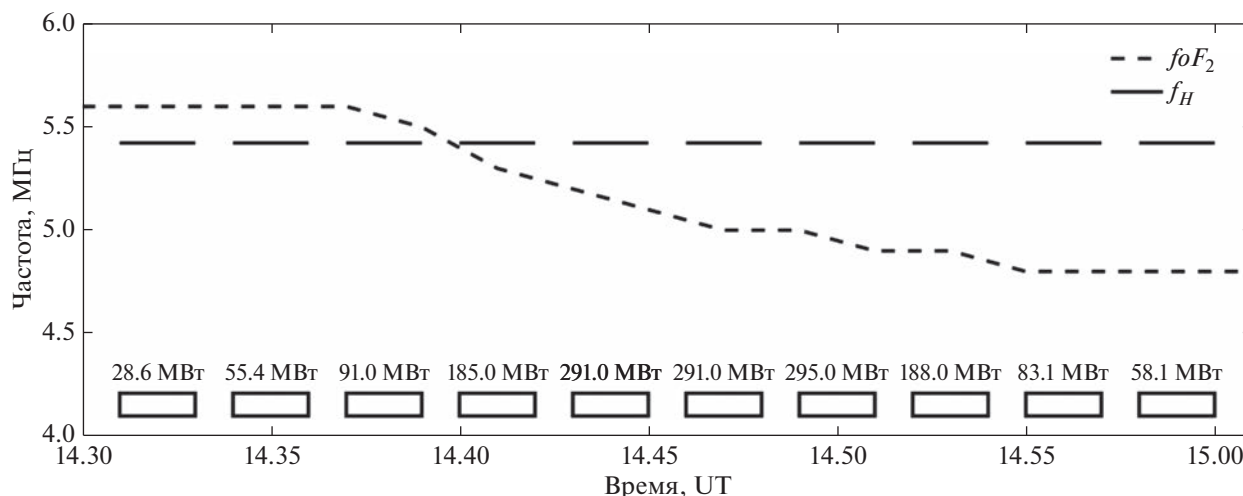


Рис. 4. Ход критической частоты слоя F_2 ионосферы, частота волны накачки, периоды и мощность излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating в экспериментах 25 октября 2021 г.

На рис. 5а представлены результаты регистрации спектров нагревного сигнала на НИС “Горьковская” в период эксперимента 25 октября 2021 г. В координатах время — частота — мощность приведены спектры зарегистрированного УИРИ с 14.30 до 15.00 UT, белыми прямоугольниками отмечены циклы излучения. Нулевая частота на спектрограмме соответствует частоте излучения стенда EISCAT/Heating, 5.423 МГц. В первых двух циклах излучения при $ERP = 29$ и 55 МВт, спектральные компоненты УИРИ не регистрировались. Спектральные линии УИРИ начинали формироваться в третьем цикле при $ERP = 91$ МВт. При этом наблюдалось до четырех спектральных линий, сдвинутых вниз и вверх со смещением $\pm n \cdot 54$ Гц, где $n = 1, 2, 3, 4$.

По мере увеличения ERP в последующих циклах интенсивности спектральных линий возрастали, а также возбуждались новые линии, соответствующие гармоникам $n = 5, 6, 7$. Помимо спектральных линий на частотах $\pm n \cdot 54$ Гц, увеличение ERP приводило к возбуждению дискретных максимумов на частотах $\pm 29, \pm 82, \pm 134, \pm 188, \pm 240$ Гц. Максимальная интенсивность УИРИ наблюдалась в пятом цикле при $ERP = 291$ МВт, что соответствовало 100% мощности излучения в данном эксперименте. При снижении ERP интенсивность УИРИ уменьшалась, и исчезали дискретные линии в спектре на более высоких частотах отстройки. Следует отметить существование спектральных линий УИРИ в области отрицательных отстроек в последнем цикле нагрева при $ERP = 58$ МВт, что свидетельствует об эффекте гистерезиса, типичном для нелинейных явлений в ионосферной плазме [21]. На рис. 4б приведены мгновенные, нормированные на максимум спектры УИРИ при различных ERP . Таким

образом, в ходе выполнения эксперимента с 14.30 до 14.48 UT ERP увеличивалась от 28.6 до 291.0 МВт и, с 14.46 до 15.00 UT, уменьшалась от 291.0 до 58.1 МВт. Возбуждение УИРИ происходило при $ERP = 91$ МВт. Максимальная интенсивность спектра наблюдалась при $ERP = 291$ МВт.

В эксперименте 26 октября 2021 г. нагревной стенд излучал мощную волну Х-поляризации в направлении магнитного зенита с 14.20 до 15.00 UT циклами: 2 мин — нагрев/2 мин — пауза. Эффективная мощность излучения стенда EISCAT/Heating ориентировочно изменялась по схеме: 15, 25, 50, 75, 100, 100, 75, 50, 25, 15%. Реально измеренные эффективные мощности излучения в каждом нагревном цикле, сами нагревные циклы, а также частота волны накачки и критическая частота слоя F_2 в период проведения эксперимента показаны на рис. 6. ERP в данном эксперименте изменялась ступенчато от 55 до 355 МВт в первых пяти циклах, а затем уменьшалось в обратном порядке.

На рис. 7а представлены результаты регистрации спектра нагревного сигнала на НИС “Горьковская” 26 октября 2021 г. Как следует из рис. 7а, во втором цикле излучения при $ERP = 89$ МВт наблюдалось формирование дискретных линий УИРИ на частотах отстройки $\pm n \cdot 54$ Гц, где $n = 1, 2, 3, 4, 5$, а также спектральной компоненты на частоте -28 Гц. Как и в предыдущем эксперименте, увеличение мощности излучения приводило к появлению новых дискретных линий и увеличению их интенсивности. Максимальная интенсивность УИРИ наблюдалась при $ERP = 344$ МВт, что составляло 100% мощности излучения в данном эксперименте.

При уменьшении ERP волны накачки наблюдалась аналогичная модификация спектра УИРИ, как и 25 октября. Сначала уменьшалась интенсив-

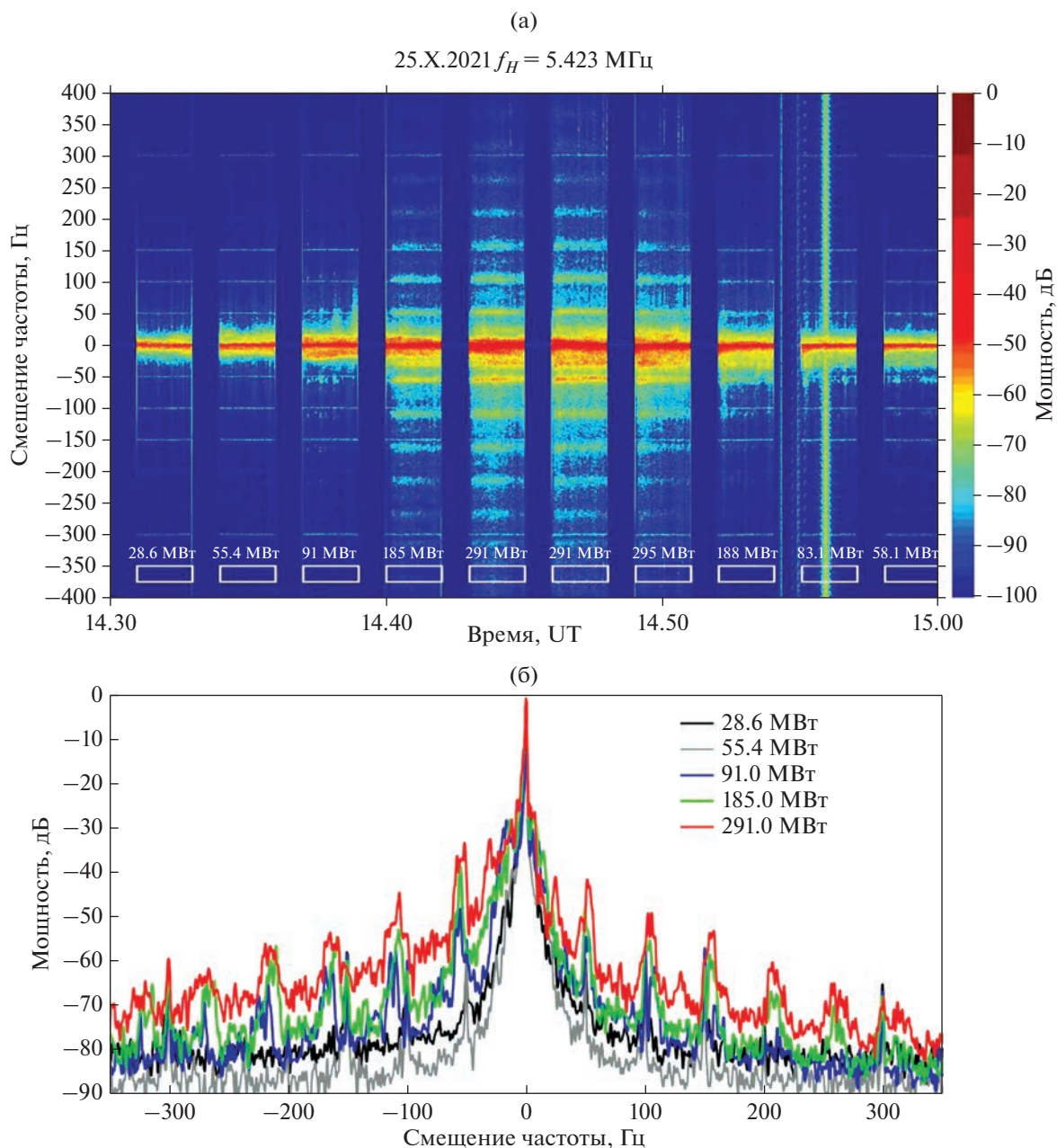


Рис. 5. Спектрограмма (а) и мгновенные спектры УИРИ (б) в полосе частот ± 350 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированные на НИС “Горьковская” 25 октября 2021 г. Мощная спектральная линия на нулевой частоте соответствует частоте нагревного сигнала. Циклы нагрева и *ERP* отмечены на рисунке.

ность дискретных линий на более высоких частотах отстройки. При излучении волны накачки с минимальной мощностью в последнем цикле излучения, УИРИ продолжало наблюдаться, хотя при этой же мощности в первом цикле, оно не возбуждалось, т.е. наблюдался эффект гистерезиса аналогично наблюдаемому в эксперименте 25 октября 2021 г. (рис. 5а). На рис. 7б показаны мгновенные нормированные на максимум спектры УИРИ в циклах нагрева при различных *ERP* волны накачки.

Обобщая результаты экспериментов от 25 и 26 октября 2021 г., можно сделать следующее заключение. УИРИ возбуждалось при *ERP* = 89–91 МВт, при этом сначала формировались спектральные линии в полосе отстроек частот ± 300 Гц от частоты волны накачки. Линия на частоте смещения – 54 Гц являлась наиболее интенсивной и была на 50–60 дБ меньше гармоник на нулевой частоте смещения (частоты волны накачки).

По мере возрастания *ERP* в последующих циклах, наблюдалось расширение полосы спектра

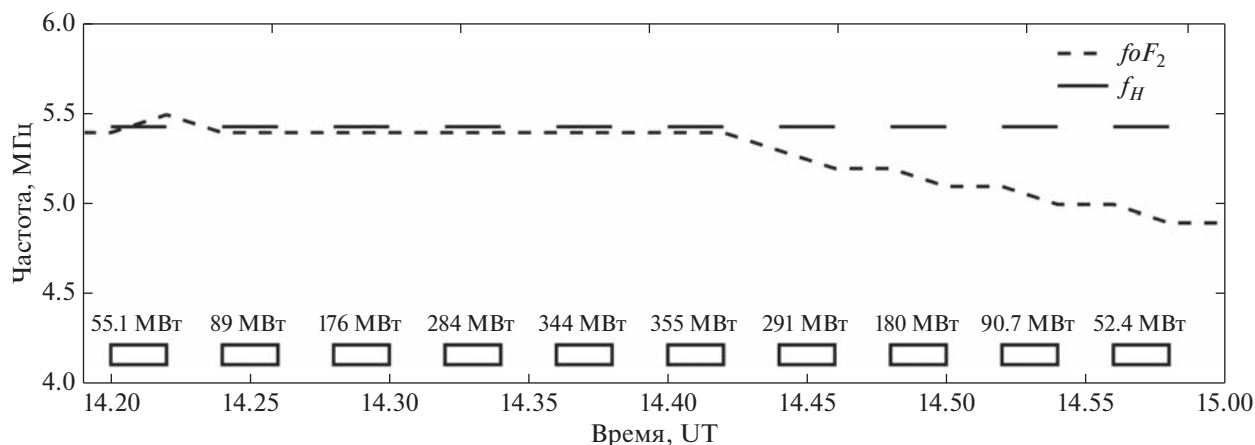


Рис. 6. Ход критической частоты слоя F_2 ионосферы, частота волны накачки, периоды и мощность излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating в экспериментах 26 октября 2021 г.

УИРИ и рост амплитуды дискретных спектральных линий. В спектрах УИРИ представляется возможным выделить многократные дискретные ионные гирогармонические структуры на частотах отстройки $\pm n \cdot 54$ Гц, где n — номер гармоники. Дискретные спектральные линии УИРИ были упорядочены, приблизительно по гирочастоте ионов атомарного кислорода O^+ и наблюдались одновременно как при отрицательных, так и положительных отстройках от частоты волны накачки [11]. В рассмотренных выше экспериментах интенсивность смещенной вниз по частоте на 54 Гц линии была максимальна. При пороговых значениях ERP ее интенсивность была на 50–55 дБ меньше по сравнению с интенсивностью волны накачки. При максимальных ERP ее интенсивность увеличивалась на 15–20 дБ. С увеличением номера гармоники интенсивность сдвинутых вниз и вверх по частоте относительно f_H спектральных линий постепенно ослабевала.

Помимо спектральных линий, упорядоченных по частоте на $\pm n \cdot 54$ Гц, в спектре УИРИ наблюдались спектральные компоненты, смещенные на $\pm 29, \pm 82, \pm 134, \pm 188, \pm 240$ Гц, которые могут быть ассоциированы с гирочастотами ионов NO^+ .

Выполним оценки порогов возбуждения УИРИ (минимальных электрических полей в ионосфере, необходимых для возбуждения УИРИ), а также рассмотрим эволюцию его спектральных характеристик в зависимости от напряженности электрического поля волны накачки. В первом приближении электрическое поле волны накачки в свободном пространстве на высотах ионосферы может быть определено с использованием хорошо известного выражения [22]:

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

где h — высота возмущенной области, на которой рассчитывается электрическое поле волны; ERP — эффективная мощность излучения.

В работах [5, 6] было показано, что УИРИ при O -нагреве возбуждается на высоте верхнего гибридного резонанса или высоте отражения волны накачки. Волна накачки необыкновенной поляризации (X -мода) отражается на высоте с локальной частотой плазмы $f_X^2 = f_H(f_H - f_{CE})$, где f_{CE} — гирочастота электронов, что ниже как высоты отражения радиоволны O -поляризации $f_O^2 = f_H^2$, так и высоты верхнего гибридного резонанса $f_{UH}^2 = f_H^2 - f_{CE}^2$. Результаты экспериментальных исследований, представленных в [12], показывают, что область генерации УИРИ при X -нагреве на частотах $f_H < f_X F_2$, т.е. в условиях отражения мощной X -волны, находится на несколько километров (3–5 км) ниже высоты отражения волны накачки. В рассматриваемых экспериментах 25 и 26 октября 2021 г. высоты отражения X -волны могут быть определены по данным радарного некогерентного рассеяния радиоволн, где однозначно можно выделить высоты возбуждения усиленных нагревом плазменных и ионных линий, которые составляли 225 и 227 км соответственно.

Тогда, согласно выражению (1) при $ERP = 89$ и 91 МВт порог возбуждения УИРИ составлял $E_{пор} = 0.33$ – 0.34 В/м. Максимальная интенсивность и ширина спектра УИРИ наблюдалась 26 октября 2021 г. при напряженности электрического поля в ионосфере $E = 0.67$ В/м.

Тем не менее, следует иметь в виду, что распространение радиоволн в ионосфере сопровождается потерей части ее энергии, которая преимущественно переходит в тепловую. Следствием этих потерь является затухание, т.е. уменьшение амплитуды поля волны. Для оценки затухания вол-

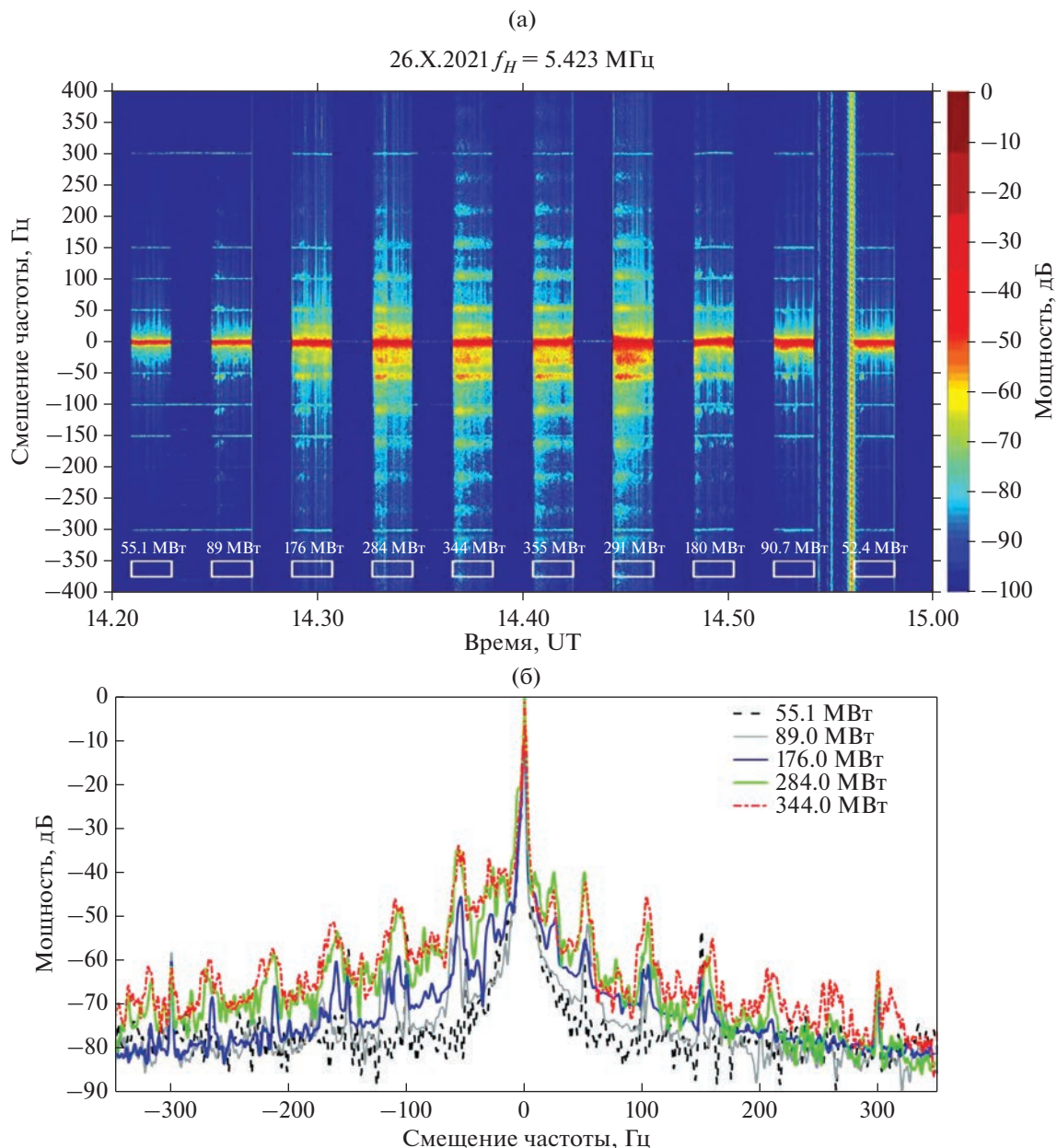


Рис. 7. Спектрограмма (а) и мгновенные спектры УИРИ (б) в полосе частот ± 350 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированные на НИС “Горьковская” 26 октября 2021 г. Мощная спектральная линия на нулевой частоте соответствует частоте нагревного сигнала. Циклы нагрева и *ERP* отмечены на рисунке.

ны воспользуемся методикой, предложенной в работе [23]. 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 статье [23], среднее за период проведения экспериментов значение поглощения волны накачки составило 3.6 дБ. Тогда с учетом ионосферного поглощения порог возбуждения УИРИ составляет $E_{\text{пор}} = 0.22\text{--}0.23$ В/м, а максимальная интенсивность УИРИ наблюдалась при $E = 0.44$ В/м.

ВЫВОДЫ

По данным экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения выполнена оценка порогов возбуждения и анализ зависимости спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) от напряженности электрического поля мощной КВ-радиоволны (волны накачки) необыкновенной поляризации (*X*-мода).

Результаты экспериментов показали, что пороги возбуждения УИРИ (минимальные значения

электрического поля волны накачки), регистрируемого при X -нагреве на значительном расстоянии (~ 1200 км) от искусственно-возмущенной области ионосферы, с учетом поглощения в нижележащих слоях ионосферы составляли $E_{\text{пор}} = 0.22\text{--}0.23$ В/м. Спектральные линии формировались в полосе частот ± 300 Гц от частоты волны накачки. Дальнейшее увеличение напряженности электрического поля привело 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 волны накачки $E = 0.44$ В/м.

Представляет немалый интерес проведение подобных исследований на нагревном стенде Сура, расположенном в пос. Васильсурск, Нижегородской области. Можно ожидать возбуждения УИРИ при излучении волны накачки X -поляризации в направлении магнитного зенита, при этом, эффективная мощность излучения должна составлять не менее 100 МВт. Для того, чтобы избежать влияния на ионосферу O -моды, возникающей в результате рассогласования фаз элементов антенной решетки, целесообразно проводить нагрев на частотах вблизи и выше критической частоты f_oF2 . Частоты отстройки дискретных спектральных линий будут отличаться на десятки доли герц, поскольку напряженность вектора магнитного поля над стендом Сура и стендом EISCAT/Heating различаются, примерно, на 250 нТ.

Авторы благодарят международную научную ассоциацию EISCAT, которая поддерживается научными организациями Китая (CRIRP), Финляндии (SA), Японии (NIPR и STEL), Норвегии (NFR), Швеции (VR) и Великобритании (NERC). Авторы признательны Эрику Варбергу (Erik Varberg) за расчеты реальных эффективных мощностей излучения в период экспериментов при ступенчатом изменении мощности излучения стенда EISCAT/Heating.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thidé B., Kopka H., Stubbe P. Observations of stimulated scattering of a strong high frequency radio wave in the ionosphere // *Physics Review Lett.* 1982. V. 49. P. 1561–1564. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.1561>
2. Frolov V.L., Sergeev E.N., Ermakova G.P. et al. Spectral features of stimulated electromagnetic emissions, measured in the 4.3–9.5 MHz pump wave frequency range // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3103–3106.
3. 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>
4. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2017. ISBN 978-5-91326-355-1.
5. Bernhardt P.A., Selcher C.A., Lehmberg 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.
6. 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. <https://doi.org/10.1002/2013RS005189>
7. 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. <https://doi.org/10.1029/2018GL078924>
8. Shukla P.K., Stenflo L. Stimulated Brillouin scattering of electromagnetic waves in magnetized plasmas // *J. Plasma Physics.* 2010. V. 76. P. 853–855.
9. Samimi A., Scales W.A., Bernhardt P.A. et al. Ion gyroharmonic structures in stimulated radiation during second electron gyroharmonic heating: 2. Simulations // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2014. V. 119. P. 462–478. <https://doi.org/10.1002/2013JA019341>
10. 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 Lett.* 2020. V. 47. Iss. 17. <https://doi.org/10.1029/2020GL089747>
11. 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 // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2021. V. 126. Art. ID. e2020JA028989. <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
12. 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. Iss. 12. P. 921–930. <https://doi.org/10.3103/S1068373922120032>
13. 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 // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2017. V. 155. P. 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.02.003>

14. *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 // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. V. 135. P. 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.10.009>
15. *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. V. 56. P. 11–25. <https://doi.org/10.1134/S0010952518010045>
16. *Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A.* New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Sci.* 2016. V. 51. Iss. 9. P. 1533–1546. <https://doi.org/10.1002/2016RS006093>
17. *Rietveld M.T., Wright J.W., Zobotin N. et al.* The Tromsø dynasonde // *Polar Science*. 2008. V. 2. P. 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2008.02.001>
18. *Rishbeth H., van Eyken A.P.* EISCAT – early history and the first ten years of operation // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55. Iss. 4–5. P. 525–542.
19. *Lehtinen M.S., Huuskonen A.* General incoherent scatter analysis and GUIDAP // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1996. V. 58. P. 435–452.
20. *Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D. et al.* Remote Diagnostics of Effects Induced by High-latitude Heating Facilities // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. V. 46. P. 231–240. <https://doi.org/10.3103/S1068373921040038>
21. *Gurevich A.V.* Nonlinear effects in the ionosphere // *Physics-Uspekhi*. 2007. V. 50. P. 1091–1121.
22. *Robinson T.R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Phys. Rep.* 1989. V. 179. P. 79–209.
23. *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. <https://doi.org/10.12737/szf-81202201>