

УДК 533.951;550.388.2

ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ РАДИОВОЛНАМИ КВ-ДИАПАЗОНА НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F_2

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

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

*e-mail: nataly@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 02.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований явлений в высокоширотной верхней (F -область) ионосфере, вызванных воздействием мощных радиоволн КВ-диапазона обыкновенной (O -мода) поляризации на частотах нагрева f_H , существенно превышающих критическую частоту слоя F_2 ($f_H - foF_2 = 0.9 - 1.1$ МГц). Результаты базируются на данных экспериментов, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в г. Тромсё, северная Норвегия (69.6° N, 19.2° E). В период экспериментов мощная радиоволна КВ-диапазона O -поляризации излучалась в направлении магнитного зенита с максимальной эффективной мощностью излучения 350–550 МВт. Впервые обнаружено, что в условиях, когда мощная радиоволна КВ-диапазона O -поляризации не отражалась от ионосферы, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы, регистрируемого на расстоянии ~ 1200 км от нагревного стенда. Выполнено сравнение характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и спектральной структуры искусственного радиоизлучения ионосферы при альтернативном O -/ X -нагреве в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя F_2 . Установлено, что в целом их поведение имеет одинаковый характер, однако эволюция развития рассмотренных явлений при O - и X -нагреве отличается.

DOI: 10.31857/S001679402360059X, EDN: ZYHJFH

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение искусственной ионосферной турбулентности и плазменных волн при воздействии мощных КВ радиоволн на ионосферу относится к числу активно развиваемых направлений исследований физики ионосферы. При проведении экспериментальных исследований для модификации верхней (F -область) ионосферы, как правило, на всех КВ нагревных стендах мира используются мощные КВ радиоволны (волны накачки) обыкновенной (O -мода) поляризации. Волна накачки O -поляризации на частоте излучения ниже критической частоты слоя F_2 ($f_H \leq foF_2$) эффективно взаимодействует с ионосферной плазмой на высоте верхнего гибридного резонанса ($f_{UH}^2 = f_H^2 - fce^2$, где f_H и fce частота нагрева и гирочастота электронов соответственно) и высоте отражения мощной КВ радиоволны ($f_O^2 = f_H^2$, где f_O

локальная частота плазмы). Такое взаимодействие приводит к возбуждению тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [Васьков и Гуревич, 1975; Грач и Трахтенгерц, 1975] и параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости [Perkins et al., 1974; Hagfors et al., 1983; Stubbe et al., 1992, 1996; Куо, 2014], которые вызывают генерацию разнообразных явлений в верхней ионосфере. К наиболее важным из них следует отнести: повышение температуры электронов, генерация искусственных ионосферных неоднородностей и искусственного радиоизлучения ионосферы (в полосе ± 100 кГц относительно частоты нагревного сигнала), искусственное оптическое излучение и возбуждение плазменных волн. Экспериментальные исследования характеристик, поведения и особенностей генерации указанных явлений интенсивно проводились и проводятся на всех КВ нагревных стендах, расположенных на средних и в высоких широтах, вклю-

чая “Сура”, Аресибо, EISCAT/Heating, SPEAR и HAARP (см., например, [Robinson, 1989; Гуревич, 2007; Yeoman et al., 2007; Stubbe et al., 1996; Фролов, 2017; Blagoveshchenskaya, 2020]).

Результаты экспериментов, выполненных в последние годы на высокоширотных КВ нагревных стендах HAARP и EISCAT/Heating, показали, что при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эф} > 200$ МВт) наблюдается генерация явлений, невозможных при $P_{эф} \leq 150\text{--}200$ МВт. К их числу относятся: генерация дополнительных слоев в ионосфере [Pedersen et al., 2010, 2011; Mishin et al., 2016], возобновление возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, сосуществующих с генерацией мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) [Ashrafi et al., 2007; Dhillon and Robinson, 2005; Blagoveshchenskaya et al., 2020].

В последние годы по результатам многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating, было обнаружено, что воздействие на высокоширотную F -область ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной (X -мода) поляризации в направлении магнитного зенита вызывает генерацию разнообразных явлений, таких как МИИН, оптическое излучение в красной и зеленой линиях атомарного кислорода, узкополосное (в полосе ± 1 кГц относительно частоты f_H) искусственное радиоизлучение ионосферы, возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн [Blagoveshchenskaya et al., 2011, 2014, 2015, 2020, 2022; Kalishin et al., 2021; Калишин и др., 2021, 2022; Blagoveshchenskaya, 2020]. Возбуждение разнообразных интенсивных явлений при X -нагреве явилось неожиданным и полагалось принципиально невозможным, так как X -волна не достигает резонансных высот в ионосфере. Это происходит вследствие ее отражения на высоте с локальной частотой плазмы $f_p^2 = f_H (f_H - fce)$, которая ниже как высоты отражения O -волны, так и высоты верхнего гибридного резонанса. Более того, необходимо подчеркнуть, что при X -нагреве разнообразные явления в $F2$ -слое ионосферы возбуждаются не только на частотах ниже критической частоты слоя $F2$ ($f_H \leq foF2$), как наблюдается при O -нагреве, но и на частотах нагрева выше критической частоты ($f_H > foF2$) [Благовещенская и др., 2022, 2018; Blagoveshchenskaya et al., 2011, 2015; Калишин и др., 2022].

Целью данной работы является исследование явлений в высокоширотной верхней (F -область) ионосфере при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эф} \sim 350\text{--}550$ МВт), вызванных воздействием мощных КВ радиоволн O -поляризации на частотах, существенно превышающих

критическую частоту слоя $F2$ ($f_H - foF2 = 0.9\text{--}1.1$ МГц), то есть в условиях нагрева, когда O -волна не отражалась от ионосферы. Для этих условий детально рассмотрены характеристики и эволюция во времени крупномасштабных ориентированных вдоль магнитного поля образований с повышенной плотностью электронов (дактов Ne), мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и спектральной структуры узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Выполнено сравнение характеристик дактов Ne , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном O -/ X -нагреве в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя $F2$.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Эксперименты по воздействию мощных КВ радиоволн выполнялись на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating, расположенном вблизи Tromsø (Тромсё), северная Норвегия (69.6° N, 19.2° E; $I = 78^\circ$), не имеющим аналогов в России как по своим техническим характеристикам, так и по географическому расположению. Описание и технические характеристики стенда приведены в работе [Rietveld et al., 2016]. В данной работе рассмотрены результаты эксперимента 28 октября 2015 г. при излучении мощной КВ радиоволны в магнитный зенит (12° к югу от вертикали) на фазированную антенную решетку 1 (ФАР 1) с шириной диаграммы направленности $5^\circ\text{--}6^\circ$ (на уровне -3 дБ). Альтернативный O / X -нагрев с 13:30 до 14 UT осуществлялся на частоте $f_H = 7.953$ МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза при эффективной мощности излучения $P_{эф} = 550$ МВт. С 15:00 до 15:30 UT O / X -нагрев проводился на частоте $f_H = 6.77$ МГц при $P_{эф} = 350$ МВт.

Нагревный стенд EISCAT/Heating пространственно совмещен с радаром некогерентного рассеяния (НР) радиоволн EISCAT, работающим на частоте 930 МГц (EISCAT UHF radar) [Rishbeth and van Eyken, 1993]. В период эксперимента радар НР проводил измерения в направлении магнитного поля в Тромсё, то есть в направлении излучения мощной КВ-радиоволны. Для анализа и интерпретации результатов эксперимента использовались данные высотно-временного распределения параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации и температуры Ne и Te), а также мощности усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HF-enhanced plasma and ion lines, HFPL и HFIL) в спектрах радара НР, появление которых является прямым указанием на возбуждение продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических). Обработка данных радара НР осуществлялась с исполь-

зованием пакета GUISDAP version 8.7 (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package) [Lehtinen and Huuskonen, 1996].

Характеристики МИИН, возбуждаемых мощной КВ радиоволной O- или X- поляризации, определялись по данным измерений когерентного КВ-радар CUTLASS (SuperDARN) в Hankasalmi (Ханкасалми), Финляндия (62.3° N, 26.6° E), расположенного к югу от нагревного стенда [Lester et al., 2004]. Измерения проводились практически одновременно на пяти частотах $f \sim 11.5; 13.2; 16.2; 18$ и 20 МГц, что обеспечивало диагностику МИИН с размерами поперек магнитного поля $l_{\perp} = 7.5\text{--}13$ м ($l_{\perp} = c/2f$, где f – частота радара). Излучение проводилось в направлении на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё, соответствующим “лучу” 5 (beam 5). Разрешение по времени составляло 3 с. Разрешение по дальности (range gate) составляло 15 км, при этом “первые ворота” начинались с дальности 480 км. Следовательно, номера “ворот” с 20 до 50 соответствуют диапазону дальностей от 780 до 1230 км, в котором осуществлялась регистрация рассеянных на МИИН сигналов.

Регистрация УИРИ проводилась на научно-исследовательской ст. ААНИИ “Горьковская” (60.27° N, 29.38° E), удаленной на расстояние ~ 1200 км от нагревного стенда. Регистрация нагревного сигнала проводилась с помощью анализатора спектра декаметрового диапазона, разработанного на базе радиоприемного устройства IC-R75. Краткое описание приемного комплекса для регистрации УИРИ приведено в публикации [Калишин и др., 2021]. Прием радиосигналов осуществлялся на антенну типа двойной горизонтальный ромб, ориентированный на стенд EISCAT/Heating.

Контроль за состоянием ионосферы осуществлялся ионозондом в Тромсё, который обеспечивал получение ионограмм вертикального зондирования ионосферы каждые 2 мин. Карта-схема геометрии проведения эксперимента показана на рис. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Эксперимент на частоте нагрева $f_H = 6.77$ МГц

На рис. 2 приведено высотно-временное распределение электронной концентрации (electron density, N_e) и температуры электронов (electron temperature, T_e), поведение N_e и T_e на фиксированных высотах по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн, спектрограмма УИРИ и вариации критических частот слоя F_2 28 октября 2015 г. с 15:00 до 15:30 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 6.77$ МГц. Рисунок 3 демонстрирует мощности рассеянных от МИИН сигналов в дБ (power, dB)

на частотах $f \sim 11.5; 13.2; 16.2; 18$ МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS для того же интервала времени. Данные приведены в координатах дальность (Range gate) – мировое время, UT.

Излучение мощной КВ-радиоволны O-поляризации началось в 15:01 UT, когда критическая частота слоя F_2 составляла $foF_2 = 5.9$ МГц, которая постепенно уменьшалась до значений $foF_2 = 5.6$ МГц к окончанию цикла X-нагрева в 15:26 UT. Таким образом в течение эксперимента частота нагрева $f_H = 6.77$ МГц, превышала foF_2 на $\sim 0.9\text{--}1.2$ МГц, что свидетельствует о том, что как мощная волна O-поляризации в цикле 15:01–15:11 UT, так и X-волна в цикле 15:16–15:26 UT не отражались от ионосферы. Как следует из рис. 2, в цикле O-нагрева после включения нагревного стенда наблюдалось возрастание T_e от 1500 К до 2000 К, вследствие омического нагрева электронов, сопровождаемое незначительным повышением N_e . Поведение N_e на больших высотах (390–467 км) характеризуется двумя максимумами. Первый максимум N_e наблюдался через ~ 2 мин после начала O-нагрева и сопровождался появлением дискретной компоненты в спектре УИРИ, сдвинутой вниз по частоте примерно на гирочастоту ионов атомарного кислорода (ионов O^+). В это же время начинаются появляться МИИН (см. рис. 3), которые были наиболее интенсивными на частоте 18 МГц ($l_{\perp} = 8.3$ м). Далее происходило возрастание электронной концентрации в широком диапазоне высот, которое достигло максимума на 7–8 мин после начала цикла нагрева. МИИН с поперечными масштабами к магнитному полю $l_{\perp} = 8.3\text{--}13$ м и дискретная компонента в спектре УИРИ после появления регистрировались в течение всего цикла O-нагрева.

Характерными особенностями в поведении МИИН в цикле O-нагрева с 15:01–15:11 UT являются большие времена нарастания (2–4 мин в зависимости от масштаба неоднородностей) и релаксации, достигавшие длительности всей 5 мин паузы между циклами нагрева. Такие большие времена нарастания и релаксации типичны для X-нагрева, когда МИИН в высокоширотной F -области ионосферы могут возбуждаться при нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F_2 ($f_H \leq foF_2$ и $f_H > foF_2$) [Blagoveshchenskaya et al., 2011, 2015; Благовещенская и др., 2019]. Таким образом O-волна в цикле 15:01–15:11 UT начинает вести себя как X-волна. Следует отметить, что времена нарастания МИИН при X-нагреве существенно зависят от предистории нагрева (“холодный” старт в первом цикле X-нагрева или последующие циклы X-нагрева). В циклах X-нагрева с предисторией сказывается влияние эффектов последействия от предшествующих циклов, вызывая уменьшение времени нараста-

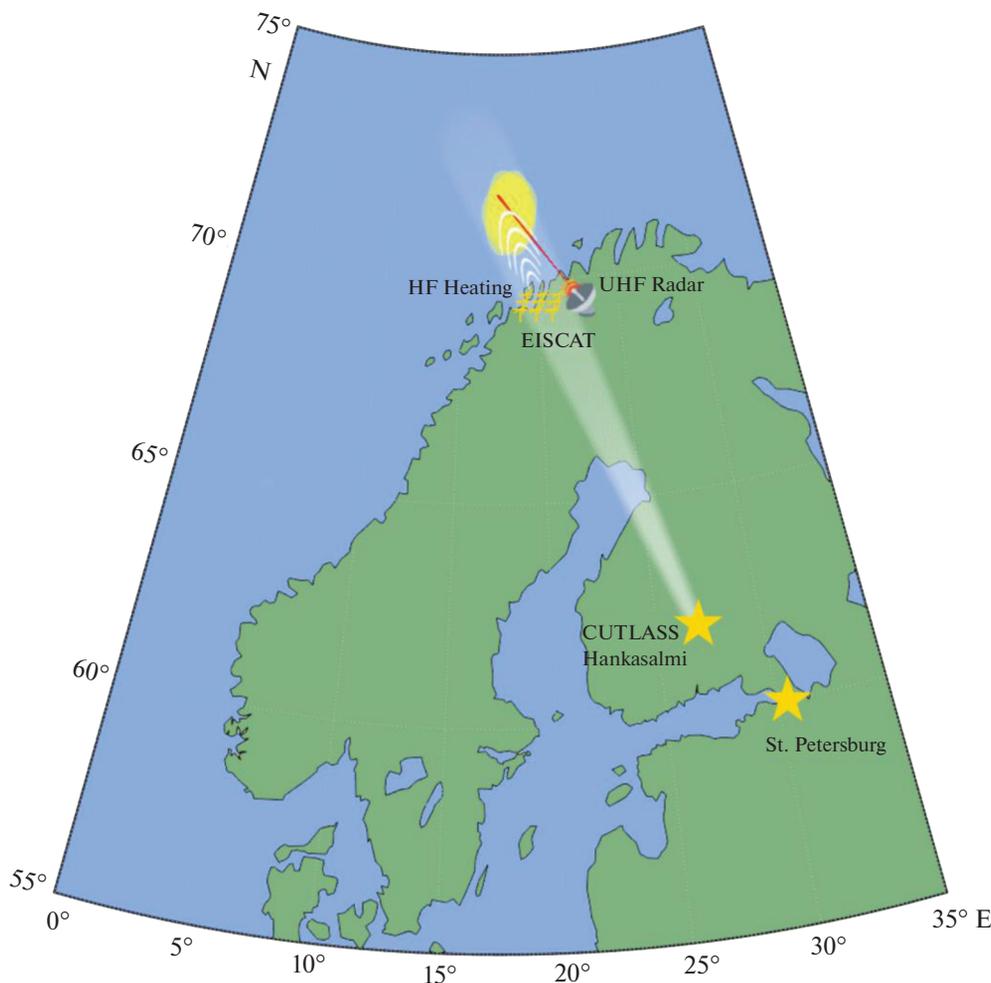


Рис. 1. Карта-схема геометрии проведения эксперимента, показывающая расположение КВ нагревного стенда EISCAT/Heating и радара некогерентного рассеяния радиоволн (EISCAT UHF radar), радара CUTLASS в Ханкасалми (Hankasalmi) и аппаратуры для регистрации УИРИ вблизи С.-Петербурга (St. Petersburg).

ния. Именно такое поведение МИИН наблюдалось в следующем цикле нагрева (15:16–15:26 UT), когда МИИН регистрировались сразу после включения нагревного стенда, но достигли максимальной интенсивности через 3–4 мин после начала нагрева. Из рис. 3 видно, что размер области, в которой возбуждались наиболее интенсивные МИИН, составлял 15 км как в цикле О-, так и Х-нагрева. Таким образом поведение и характеристики МИИН при О-нагреве в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы, являются типичными для неоднородностей, вызванных Х-нагревом высокоширотной F -области ионосферы.

Как следует из рис. 2 и 3, в цикле Х-нагрева с 15:16–15:26 UT регистрировалось возрастание N_e в широком диапазоне высот до 50% относительно фоновых значений, сопровождаемое повышением T_e до 30%, генерацией спектральной компоненты УИРИ, сдвинутой вниз по частоте на ~ 60 Гц, что примерно соответствует гирочастоте ионов

O^+ , и интенсивных МИИН. Такое поведение N_e , T_e , спектральной структуры УИРИ и МИИН является типичным для Х-нагрева на частотах выше критической частоты слоя $F2$ [Благовещенская и др., 2019; Blagoveshchenskaya et al., 2015, 2022; Калишин и др., 2022].

Таким образом, в результате сравнения характеристик дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/Х-нагреве в магнитный зенит в условиях, когда мощная волна не отражается от ионосферы, установлено, что в целом их поведение имеет одинаковый характер, однако эволюция развития рассмотренных явлений при этом отличается.

3.2. Эксперимент на частоте нагрева $f_H = 7.953$ МГц

На рис. 4 приведено высотное-временное распределение электронной концентрации N_e и температуры T_e , поведение N_e и T_e на фиксирован-

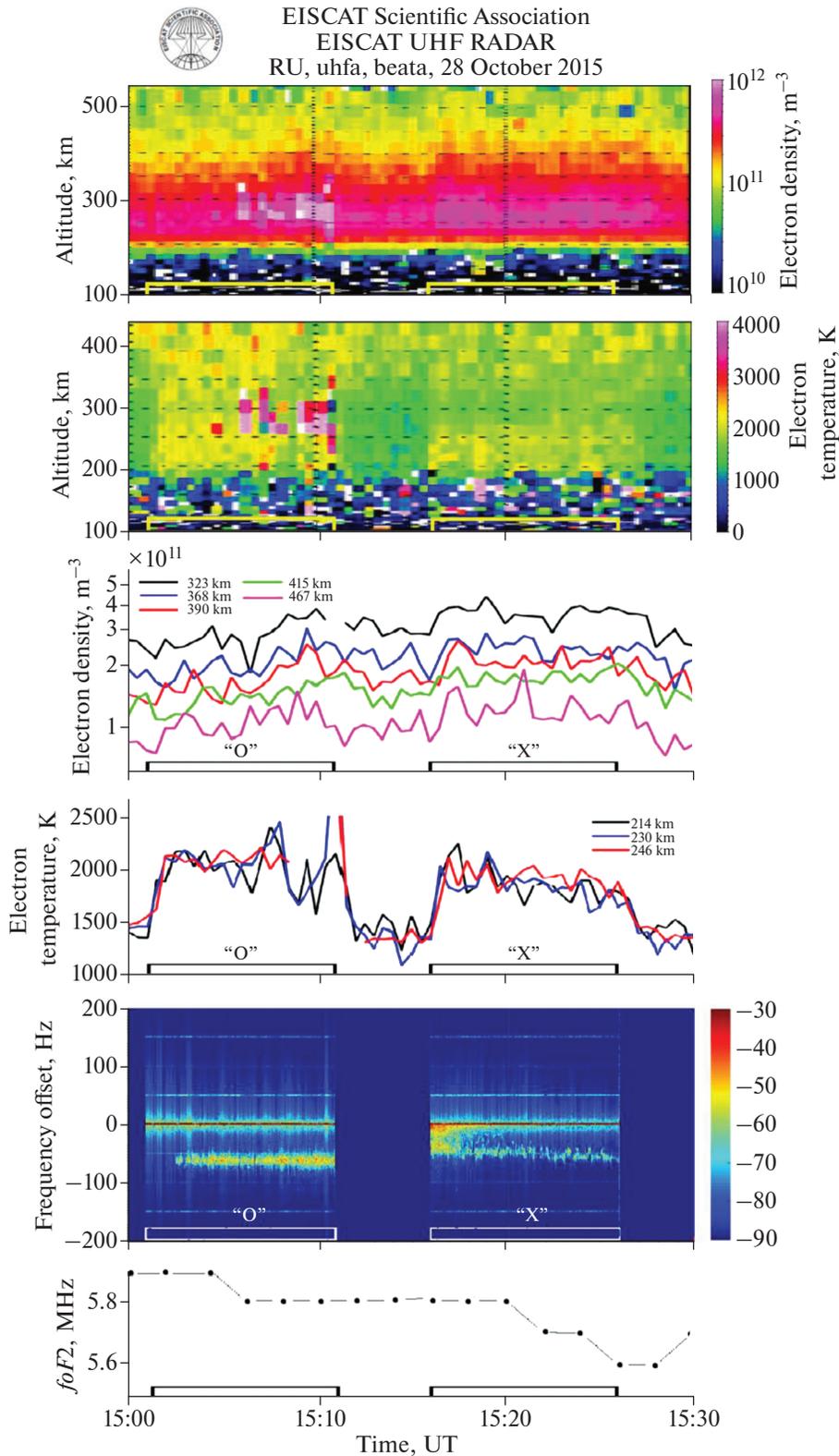


Рис. 2. Высотно-временное распределение электронной концентрации N_e , m^{-3} (electron density N_e , m^{-3}) и температуры электронов T_e , K (electron temperature T_e , K), поведение N_e и T_e на фиксированных высотах в км (km) по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT, а также спектрограмма УИРИ и вариации критических частот $foF2$ в МГц (MHz) 28 октября 2015 г. с 15:00 до 15:30 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 6.77$ МГц. На спектрограмме УИРИ на оси ординат приведены отстройки частоты относительно частоты нагревного сигнала в Гц (frequency offset, Hz). Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ радиоволны отмечены на оси времени (time, UT).

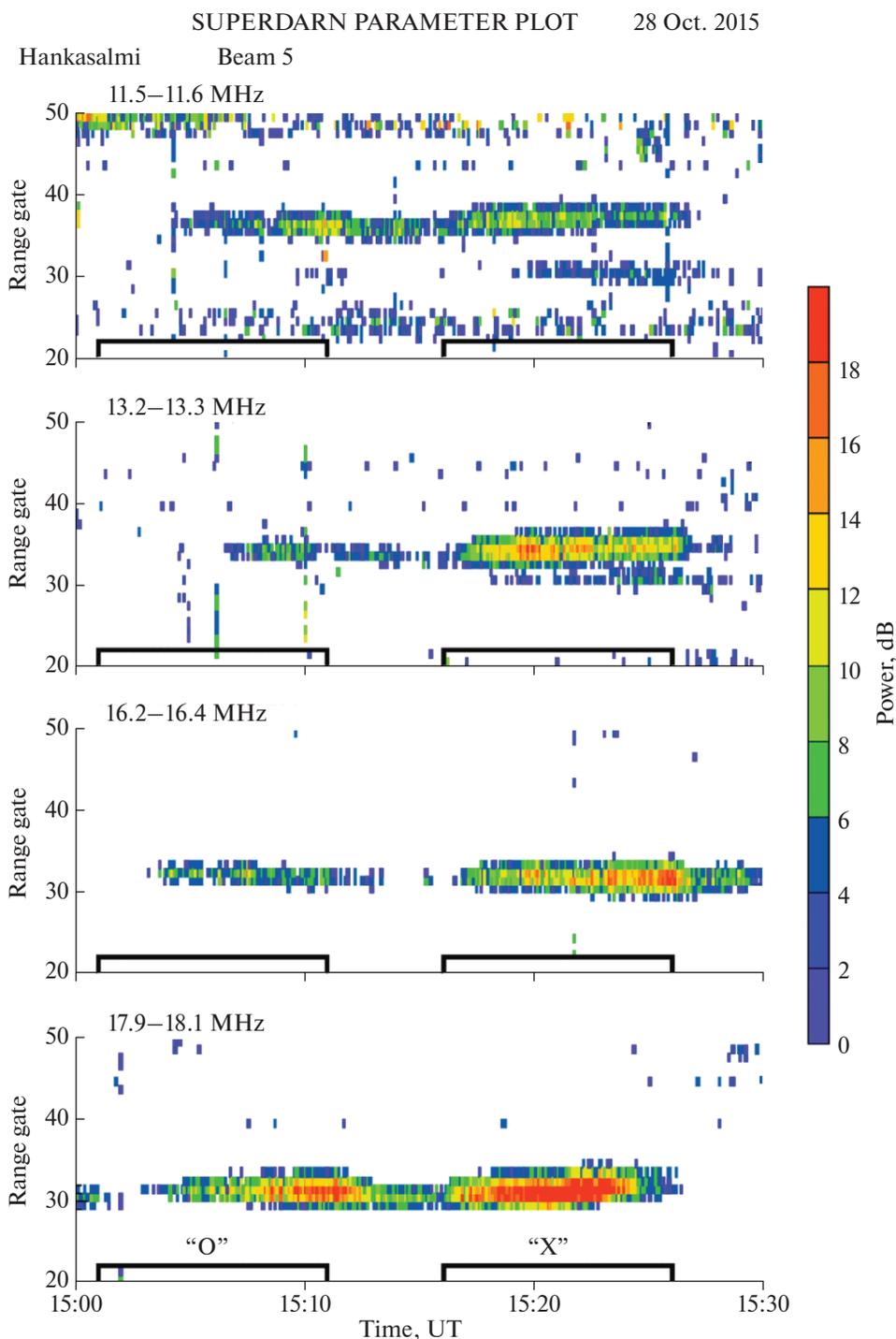


Рис. 3. Мощности рассеянных от МИИН сигналов в дБ (power, dB) на частотах $f \sim 11.5; 13.2; 16.2; 18$ МГц (MHz) по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми (Hankasalmi) на “луч” 5 (beam 5) 28 октября 2015 г.с 15:00 до 15:30 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 6.77$ МГц. Данные приведены в координатах дальность (Range gate) – мировое время (time, UT). Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ радиоволны отмечены на оси времени.

ных высотах по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн, спектрограмма УИРИ и вариации критических частот слоя F_2 28 октября 2015 г.с 13:30 до 14:00 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 7.953$ МГц. Из

рис. 4 следует, что, аналогично эксперименту на частоте $f_H = 6.77$ МГц, в циклах как O-, так и X-нагрева, наблюдалось сильное возрастание электронной концентрации до 90% (относительно фоновых значений до начала нагрева) в широ-

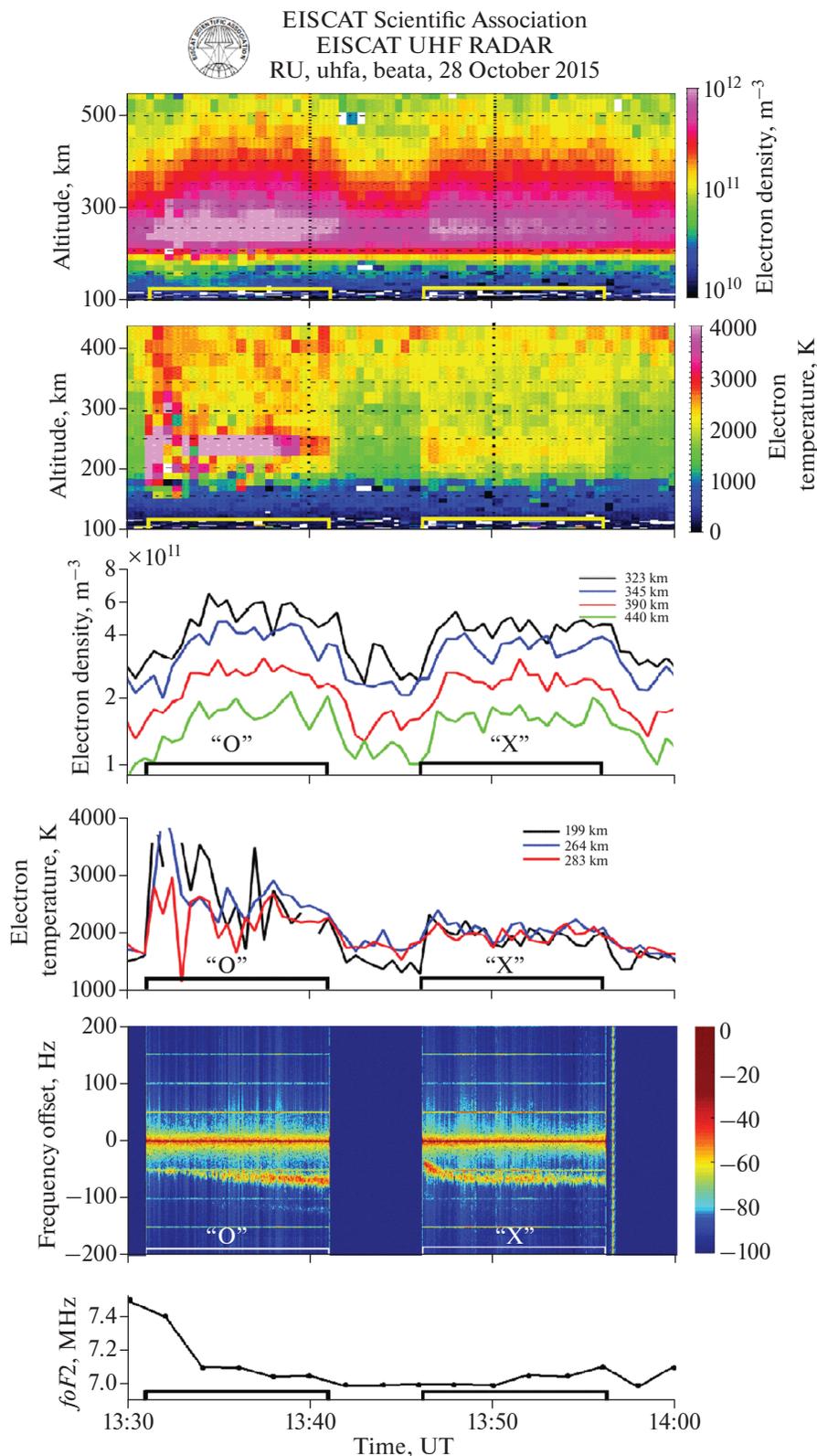


Рис. 4. Высотно-временное распределение электронной концентрации N_e , m^{-3} (electron density N_e , m^{-3}) и температуры электронов T_e , K (electron temperature T_e , K), поведение N_e и T_e на фиксированных высотах в км (km) по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT, а также спектрограмма УИРИ и вариации критических частот f_oF2 в МГц (MHz) 28 октября 2015 г. с 13:30 до 14:00 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 7.953$ МГц. На спектрограмме УИРИ на оси ординат приведены отстройки частоты относительно частоты нагревного сигнала в Гц (frequency offset, Hz). Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ радиоволны отмечены на оси времени (time, UT).

ком диапазоне высот и генерация дискретной спектральной компоненты в спектре УИРИ, сдвинутой вниз по частоте на гирочастоту ионов O^+ . Следует отметить более плавный характер нарастания Ne в цикле O -нагрева по сравнению с циклом X -нагрева. Так, при O -нагреве время нарастания Ne составляло ~ 3.5 мин, в то время как при X -нагреве оно уменьшилось до ~ 1.5 мин.

Излучение мощной КВ радиоволны O -поляризации началось в 13:31 UT, когда критическая частота слоя $F2$ составляла $foF2 = 7.4$ МГц, которая в течение первых 3 мин нагрева уменьшилась до значений $foF2 = 7.1$ МГц, а затем незначительно изменялась в пределах $foF2 = 7.0\text{--}7.1$ МГц вплоть до окончания цикла X -нагрева в 13:56 UT. Принципиальное отличие эксперимента на частоте нагрева $f_H = 7.953$ МГц от рассмотренного в разделе 3.1 на частоте $f_H = 6.77$ МГц состоит в том, что в течение первых двух минут цикла O -нагрева с 13:31 до 13:33 UT наблюдалось отражение волны накачки от ионосферы. На рис. 5 приведено поведение интенсивностей усиленных нагревом плазменных линий, а также ионных линий, смещенных вниз и вверх по частоте относительно частоты радара НР (HF-enhanced plasma lines, HFPL, и HF-enhanced downshifted and upshifted ion lines, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}). Как видно из рис. 5, резкое возрастание высоты появления HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} в 13:33 UT свидетельствует о прекращении отражения мощной КВ радиоволны от ионосферы (волна “высвечивается”) (см. рис. 5). В указанных условиях эксперимента O -волна не могла отразиться от ионосферы, а следовательно вызвать возбуждение HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}. Однако волна необыкновенной (X -мода) поляризации на частоте $f_H = 7.953$ МГц способна отражаться от ионосферы выше $foF2$ в диапазоне частот $foF2 < f_H \leq fxF2$, где $fxF2$ критическая частота необыкновенной компоненты слоя $F2$. Напомним, что $fxF2 = foF2 + fce/2$, где fce – гирочастота электронов. Таким образом, X -волна на частоте $f_H = 7.953$ МГц отражается от ионосферы до тех пор, пока значения $foF2$ остаются выше 7.25–7.3 МГц. Указанное обстоятельство подтверждается отсутствием усиленных нагревом плазменных и ионных линий, являющихся прямым подтверждением возбуждения продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) при X -нагреве в цикле 13:46–13:56 UT, когда значения $foF2$ изменялись в пределах $foF2 = 7.0\text{--}7.1$ МГц (см. рис. 5).

Сравнивая поведение электронной концентрации Ne в широком диапазоне высот и спектральной структуры УИРИ (см. рис. 4), следует отметить, что в целом их поведение при O - и X -нагреве в условиях, когда мощная КВ радиоволна не отражается от ионосферы, имеет одинаковый характер.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным разнообразных средств диагностики ионосферной плазмы в период экспериментов на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating впервые обнаружено, что излучение мощной КВ радиоволны обыкновенной (O -мода) поляризации в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя $F2$ ($f_H - foF2 = 0.9\text{--}1.1$ МГц), приводит к генерации разнообразных интенсивных возмущений в ионосферной плазме. Эксперименты выполнялись 28 октября 2015 г. на частотах нагрева 6.77 и 7.953 МГц при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эф} = 350\text{--}550$ МВт). К основным обнаруженным явлениям при воздействии мощной КВ радиоволны O -поляризации в условиях, когда она не отражается от ионосферы, следует отнести следующие: создание дактов Ne , генерация мелкошабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Факт возбуждения возмущений в верхней (F -область) ионосфере в условиях, когда мощная O -волна не отражается от ионосферы, является неожиданным. Согласно теоретическим исследованиям мощная КВ радиоволна обыкновенной поляризации эффективно взаимодействует с ионосферной плазмой только при ее отражении от ионосферы ($f_H \leq foF2$) [Gurevich, 1978; Гуревич 2007; Robinson, 1989; Kuo, 2014]. В этих условиях происходит возбуждение параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости [Perkins et al., 1974; Stubbe et al., 1992; Kuo, 2014] и тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [Васьков и Гуревич, 1975; Грач и Трахтенгерц, 1975], которые приводят к генерации разнообразных явлений в верхней ионосфере.

Для сравнения кратко остановимся на эффектах воздействия мощных КВ радиоволн O - и X -поляризации на высокоширотную F -область ионосферы на частотах нагрева ниже критической частоты слоя $F2$ ($f_H \leq foF2$). По результатам исследований [Blagoveshchenskaya et al., 2015, 2020, 2022; Kalishin et al., 2021; Благовещенская и др., 2018; Калишин и др., 2022] установлено, что при “классическом” O -нагреве на частотах ниже критической частоты $F2$ слоя ($f_H \leq foF2$) дакты Ne и УИРИ не регистрировались совсем, но наблюдалось сильное возрастание температуры электронов Te (до 200–250%) и генерация интенсивных МИИН. Типичными проявлениями X -нагрева являлось повышение электронной концентрации Ne (на 50–80% относительно фона) вдоль магнитного поля в широком диапазоне высот вплоть до верхней границы измерений радара НР (600–650 км), возбуждение продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) в течение всего цикла нагрева, генерация МИИН и

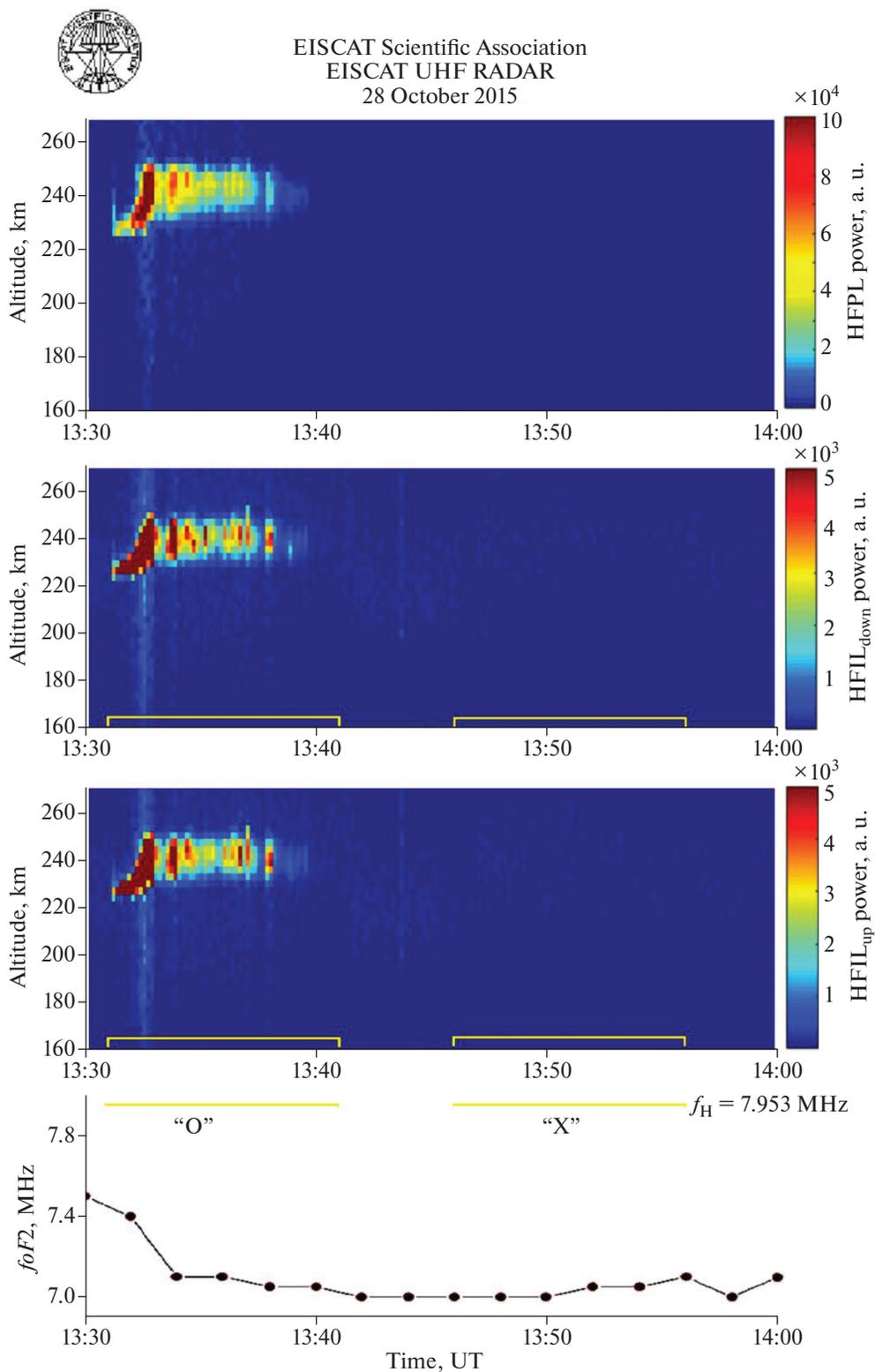


Рис. 5. Поведение интенсивностей усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}) в относительных единицах (power, a.u.) в координатах высота, км (altitude, km) – время, UT (time, UT), а также вариации критических частот f_oF_2 в МГц (MHz) 28 октября 2015 г.с 13:30 до 14:00 UT при альтернативном O/X-нагреве на частоте $f_H = 7.953$ МГц. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной радиоволны отмечены на оси времени.

узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ), регистрируемого на значительном (~1200 км) удалении от КВ нагревного стенда EISCAT/Heating. В спектрах УИРИ были обнаружены интенсивные дискретные спектральные структуры и их многократные гармоники, сдвинутые вниз и вверх по частоте относительно частоты нагревного сигнала, связанные с электростатическими ионно-циклотронными волнами и их гармониками [Kalishin et al., 2021]. Частоты отстройки этих максимумов (52–56 Гц) примерно соответствовали гирочастоте ионов O^+ и их гармоникам (n (52–56) Гц, где n – номер гармоники).

Поскольку при О-нагреве МИИН возбуждались на частотах как ниже, так и существенно выше критической частоты слоя $F2$ ($f_H \leq foF2$ и $f_H - foF2 = 0.9-1.1$ МГц), представляет интерес детально рассмотреть и сравнить их характеристики. На рис. 6 приведены мощности рассеянных от МИИН сигналов на частотах $f \sim 11.5; 13.2; 16.2; 18$ и 20 МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS в периоды О-нагрева на частоте $f_H = 6.77$ МГц. В цикле 14:31–14:41 UT волна накачки излучалась на частоте $f_H \leq foF2$, а в 15:01–15:11 UT нагрев производился в условиях, когда мощная О-волна не отражалась от ионосферы. Данные приведены в координатах дальность (Range gate) – мировое время, UT. Из рис. 6 следует, что МИИН в 14:31–14:41 UT, возбуждаемые при О-нагреве на частотах $f_H \leq foF2$, появлялись/исчезали через несколько секунд после включения/выключения нагревного стенда. Размер области, в которой были сосредоточены МИИН, составлял 75 км на частотах радара ~ 18 и 20 МГц ($l_{\perp} = 7.5-8.3$ м) и 45 км на частотах 11.5, 13.2 и 16.2 МГц ($l_{\perp} = 9.2-13$ м). Механизм возбуждения этих неоднородностей при О-нагреве объясняется в рамках теории тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [Грач и Трахтенгерц, 1975; Васьков и Гуревич, 1975; Gurevich, 1978].

Характеристики МИИН, возбуждаемые при О-нагреве в 15:01–15:11 UT, в условиях, когда мощная КВ радиоволна не отражалась от ионосферы, принципиально отличаются от случая $f_H \leq foF2$, но хорошо согласуются с характеристиками МИИН при Х-нагреве (см. рис. 3). Это дает основание предполагать, что при высоких эффективных мощностях излучения на частотах, существенно превышающих $foF2$, происходит трансформация О-волны накачки в Х-волну. Характерными особенностями в поведении МИИН в цикле О-нагрева с 15:01–15:11 UT являлись большие времена нарастания (2–4 мин в зависимости от масштаба неоднородностей) и релаксации, которые достигали длительности всей 5 мин паузы, что типично для Х-нагрева. Времена нарастания МИИН существенно зависят от предыстории на-

грева. В циклах Х-нагрева с предысторией сказывается влияние эффектов последствия от предшествующих циклов, вызывая уменьшение времени нарастания МИИН, что наблюдалось в следующем цикле Х-нагрева с 15:16–15:26 UT (см. рис. 3). Размер области, в которой возбуждались наиболее интенсивные МИИН, в условиях, когда мощная волна не отражалась от ионосферы, составлял 15 км как в цикле О-, так и Х-нагрева. Механизм возбуждения неоднородностей при О-нагреве на частотах, существенно превышающих $foF2$, а также при Х-нагреве на частотах как выше, так и ниже $foF2$, может быть объяснен в рамках неустойчивости Рэля–Тэйлора [Kelley, 1989], развивающейся на горизонтальных градиентах дактов Ne в присутствии электрического поля мощной КВ радиоволны, ортогонального к магнитному полю. Как показано в работе [Blagoveshchenskaya et al., 2022], ширина дактов Ne по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе, пространственно совмещенного с нагревным стендом EISCAT/Heating, составляла $3^{\circ}-4^{\circ}$. Эти оценки хорошо совпадают с горизонтальным размером области, занятой МИИН, по данным радара CUTLASS, который составлял порядка 15 км, в условиях, когда мощная волна не отражалась от ионосферы.

Рассмотрим более детально спектральные характеристики УИРИ при О- и Х-нагреве на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя $F2$ ($f_H - foF2 = 0.9-1.1$ МГц). Как следует из рис. 2 и рис. 3, в спектре УИРИ как при О-, так и Х-нагреве, на частотах 6.77 и 7.953 МГц регистрировалась одна спектральная компонента в области отрицательных отстроек от частоты нагрева на ~ 60 Гц, что близко гирочастоте ионов O^+ . Возможным механизмом генерации этой дискретной компоненты в спектре УИРИ при воздействии мощной КВ радиоволны как обыкновенной (О-мода), так и необыкновенной (Х-мода) поляризации, на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя $F2$, может быть стимулированное рассеяние Бриллюэна (MSBS). В этих условиях мощная электромагнитная волна EM_0 может непосредственно распадаться на рассеянную электромагнитную волну EM_1 и электростатическую ионную циклотронную волну EIC_1 , $EM_0 \rightarrow EM_1 + EIC_1$ [Bernhardt et al., 2009, 2010]. Тогда условия частотного и волнового синхронизма представляются в виде

$$\omega_H = \omega_S \pm \omega_{EIC}, \quad k_H = k_S \pm k_{EIC},$$

где ω_H , ω_S , ω_{EIC} – частоты волны накачки, рассеянной и электростатической ионно-циклотронной волны соответственно; k_H , k_S , k_{EIC} – волновые вектора волны накачки, рассеянной и электростатической ионно-циклотронной волны соответственно.

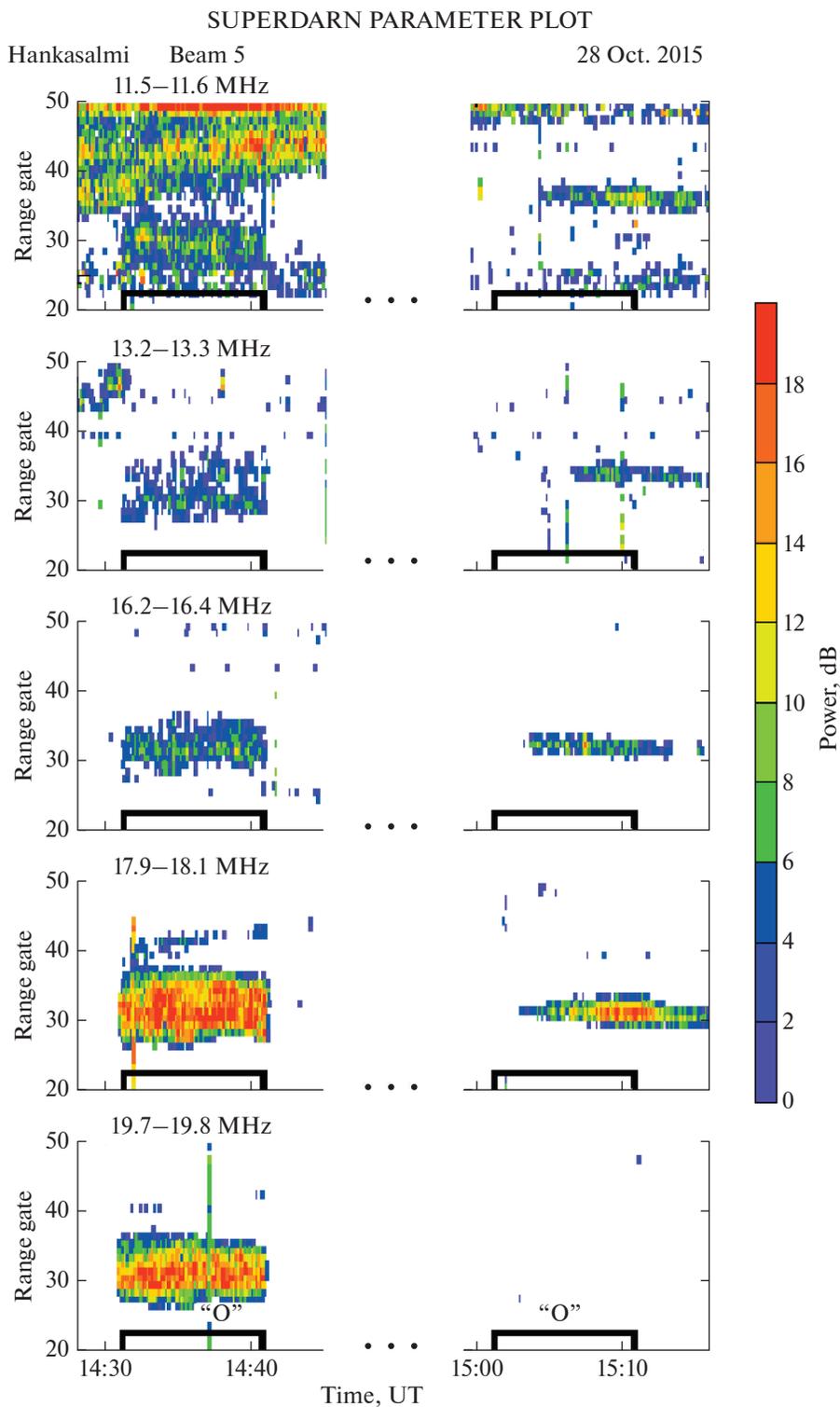


Рис. 6. Мощности рассеянных от МИИН сигналов в дБ (power, dB) на частотах $f \sim 11.5; 13.2; 16.2; 18$ и 20 МГц (MHz) по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми (Hankasalmi) на “луч” 5 (beam 5) в периоды O-нагрева на частоте $f_H = 6.77$ МГц. В цикле 14:31–14:41 UT волна накачки излучалась на частоте $f_H \leq foF2$, а в 15:01–15:11 UT нагрев производился в условиях, когда мощная O-волна не отражалась от ионосферы. Данные приведены в координатах дальность (Range gate) – мировое время (time, UT).

В результате сравнения характеристик дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/Х-нагреве в магнитный зенит в условиях, когда мощная волна не отражается от ионосферы (см. рис. 2, 3 и 4), установлено, что в целом их поведение имеет одинаковый характер и хорошо согласуется с результатами других наших экспериментов при Х-нагреве. Это дает основания полагать, что в рассматриваемых условиях происходила трансформация обыкновенной волны в необыкновенную.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые обнаружено, что при О-нагреве высокоширотной верхней ионосферы в магнитный зенит при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эф} = 350\text{--}550$ МВт) на частотах, превышающих f_oF2 на 0.9–1.1 МГц, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Поведение и характеристики МИИН и спектральной структуры УИРИ при О-нагреве в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы, являются типичными для Х-нагрева высокоширотной F-области ионосферы. Это дает основания полагать, что в рассматриваемых условиях происходила трансформация обыкновенной волны в необыкновенную.

Выполнено сравнение характеристик дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/Х-нагреве в магнитный зенит при высоких $P_{эф}$ на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя F2. Установлено, что в целом их поведение имеет одинаковый характер, однако эволюция развития и интенсивности рассмотренных явлений отличается.

БЛАГОДАРНОСТИ

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). Мы признательны проф. Т. Yeoman за многолетнее плодотворное сотрудничество и данные радара CUTLASS.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17-00020, (<https://rscf.ru/project/22-17-00020/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Конфликт интересов отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Йоман Т.К., Шмелев Ю.А., Леоненко Е.Е. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 6. С. 759–773. 2019.
- 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 // Космич. исслед. Т. 56. № 1. С. 14–29. 2018.
- Васильков В.В., Гуревич А.В. Нелинейная резонансная неустойчивость плазмы в поле обыкновенной электромагнитной волны // ЖЭТФ. Т. 69. № 1. С. 176–178. 1975.
- Грач С.М., Трахтенгерц В.Ю. О параметрическом возбуждении ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 18. С. 1288–1296. 1975.
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
- Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Rogov Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов // Метеорология и гидрология. № 4. 2021. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-4-22-36>
- Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М. Сравнение спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при Х-нагреве высокоширотной F-области ионосферы на частотах ниже и выше критической частоты Х-компонента слоя F2 // Метеорология и гидрология. № 4. С. 21–34. 2022.
- Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: изд-во Нижегородского ун-та, 468 с. 2017.
- Ashrafi M., Kosch M., Kaila K., Isham B. Spatiotemporal evolution of radio wave pump-induced ionospheric phenomena near the fourth electron gyroharmonic // J. Geophys. Res. V. 112. A05314. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006JA011938>
- Bernhardt P.A., Selcher C.A., Lehmborg R.H., Rodriguez S.P., Thomson J.F., McCarrick M.J., Frazer G.J. Determination of the electron temperature in the modified ionosphere over HAARP using the HF pumped Stimulated Brillouin Scatter (SBS) emission lines // Ann. Geophysicae. V. 27. P. 4409–4427. 2009. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-4409-2009>
- Bernhardt P.A., Selcher C.A., Lehmborg R.H., Rodriguez S.P., Thomson J.F., Groves K.M. et al. Stimulated Brillouin Scatter in a magnetized ionospheric plasma // Physics Review Letters. V. 104, 165004. 2010. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.165004>
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T., Rietveld M.T., Ivanova I.M., Baddeley L.J. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave // Geo-

- phys. Res. Lett. V. 38. L08802. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011GL046724>
- *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kosch M., Sergienko T., Brändström U., Yeoman T.K., Häggström I.* Optical and ionospheric phenomena at EISCAT under continuous X-mode HF pumping // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 119. P. 10483–10498. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020658>
- *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Häggström I., Kalishin A.S.* Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 135. P. 50–63. 2015.
- *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Yeoman T.K., Häggström I.* Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 125. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028203>
- *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M., Zagorskiy G.A.* Disturbances of electron density in the high latitude upper (F-region) ionosphere induced by X-mode HF pump waves from EISCAT UHF radar observations // *Проблемы Арктики и Антарктики*. Т. 68. № 3. С. 248–257. 2022.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257>
- *Blagoveshchenskaya N.F.* Perturbing the high-latitude upper ionosphere (F region) with powerful HF radio waves: A 25-year collaboration with EISCAT // *URSI Radio Science Bulletin*, 373. P. 40–55. 2020.
<https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436>
- *Dhillon R.S., Robinson T.R.* Observations of time dependence and aspect sensitivity of regions of enhanced UHF backscatter associated with RF heating // *Ann. Geophysicae*. V. 23. P. 75–85. 2005.
- *Gurevich A.V.* Nonlinear phenomena in the ionosphere. N.Y.: Springer-Verlag, 372 p. 1978.
- *Hagfors T., Kofman W., Kopka H., Stubbe P., Ijnen T.* Observations of enhanced plasma lines by EISCAT during heating experiments // *Radio Sci.* V. 18. P. 861–866. 1983.
- *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. – Space*. V. 126. e2020JA028989. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
- *Kelley M.C.* The Earth's ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. San Diego, CA: Academic Press, 1989.
- *Kuo S.P.* Overview of ionospheric modification by High Frequency (HF) heaters –Theory // *Progr. Electromagn. Res. B*. V. 60. P. 141–155. 2014.
- *Lehtinen M.S., Huuskonen A.* General incoherent scatter analysis and GUIDAP // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 58. P. 435–452. 1996.
- *Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H et al.* Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars // *Ann. Geophysicae*. V. 22. № 2. P. 459–473. 2004.
- *Mishin E., Watkins B., Lehtinen N., Eliasson B., Pedersen T., Grach S.* Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radiowaves: An assessment // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 121. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021823>
- *Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., Kendall E., Mills T., Carlson H.C., Snyder A.L.* Creation of artificial ionospheric layers using high-power HF waves // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. L02106. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009GL041895>
- *Pedersen T., McCarrick M., Reinisch B., Watkins B., Hamel R., Paznukhov V.* Production of artificial ionospheric layers by frequency sweeping near the 2nd gyroharmonic // *Ann.-Geophysicae*. V. 29. P. 29–47. 2011.
<https://doi.org/10.5194/angeo-29-47-2011>
- *Perkins F.W., Oberman C., Valco E.J.* Parametric instabilities and ionospheric modification // *J. Geophys. Res.* V. 79. P. 1478–1496. 1974.
- *Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A.* New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Sci.* V. 51. № 9. P. 1533–1546. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016RS006093>
- *Rishbeth H., van Eyken T.* EISCAT: Early history and the first ten years of operation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 55. P. 525–542. 1993.
- *Robinson T.R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Phys. Rep.* V. 179. P. 79–209. 1989.
- *Stubbe P.* Review of ionospheric modification experiments at Tromsø // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 58. P. 349–368. 1996.
- *Stubbe P., Kohl H., Rietveld M.T.* Langmuir turbulence and ionospheric modification // *J. Geophys. Res.* V. 97. P. 6285–6297. 1992.
- *Yeoman T.K., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Robinson T.R., Dhillon R.S., Wright D.M., Baddeley L.J.* SPEAR: Early results from a very high latitude ionospheric heating facility // *Adv. Space Res.* V. 40. P. 384–389. 2007.