

УДК 533.951;550.388.2

ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ КВ-РАДИОВОЛН НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

© 2019 г. Н. Ф. Благовещенская^{1, *}, Т. Д. Борисова¹, А. С. Калишин¹,
Т. К. Йоман², Ю. А. Шмелев^{1, 3}, Е. Е. Леоненко^{1, 3}

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета (АНИИ),
г. Санкт-Петербург, Россия

²Лейсестерский университет, г. Лейсестер, Великобритания

³Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП),
г. Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 01.04.2019 г.

После доработки 30.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в F -области высокоширотной ионосферы, вызванных контролируемой инъекцией мощных КВ-радиоволн необыкновенной (X -мода) поляризации. Эксперименты выполнялись на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6° N, 19.2° E) в широком диапазоне частот нагрева от 4 до 8 МГц при эффективной мощности излучения от 100 до 700 МВт. Показано, что генерация неоднородностей при X -нагреве происходит в регулярной F -области ионосферы при спокойных магнитных условиях на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя $F2$. Определены времена нарастания и релаксации неоднородностей, а также пороговые мощности их возбуждения. Установлено, что характеристики неоднородностей при X -нагреве существенно зависят от частоты нагрева, соотношения между частотой нагрева и критической частотой слоя $F2$, а также условий, предшествующих началу нагревного цикла (“холодный” старт в первом цикле X -нагрева или последующие циклы X -нагрева). Выполнено сравнение характеристик неоднородностей при воздействии на F -область высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами необыкновенной (X -мода) и обыкновенной (O -мода) поляризаций.

DOI: 10.1134/S001679401906004X

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных явлений, обнаруженных в экспериментах по воздействию мощных КВ-радиоволн на ионосферную плазму, является возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (далее для краткости будем называть их “неоднородности”). Интенсивное мелкомасштабное расслоение ионосферной плазмы на сильно вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности электронной концентрации при воздействии на F -область ионосферы мощных КВ-радиоволн обыкновенной (O -мода) поляризации было обнаружено уже в первых экспериментах на КВ нагревном комплексе в Боулдере [Thome and Blood, 1974]. Пространственный масштаб неоднородностей со-

ставляет единицы—десятки метров поперек магнитного поля и несколько километров вдоль магнитного поля. Максимальный пространственный размер неоднородностей, в поперечном к магнитному полю направлении, определяется выражением $l_{\perp} = c/f_H$, где c — скорость света и f_H — частота нагрева. В течение четырех последних десятилетий проводились интенсивные экспериментальные исследования мелкомасштабных неоднородностей на всех КВ нагревных комплексах в мире, включая стенды “Сура”, Аресибо, EISCAT/Heating, HAARP, SPEAR, расположенных на средних и в высоких широтах (см., например, [Robinson, 1989; Гуревич, 2007; Yeoman et al., 2007; Фролов, 2017] и цитируемую в них литературу). Механизм возбуждения неодно-

родностей при О-нагреве объясняется в рамках теории тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [Грач и Трахтенгерц, 1975; Васильков и Гуревич, 1975].

Мощная КВ-радиоволна необыкновенной (Х-мода) поляризации 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 КВ-радиоволны О-поляризации ($f_O^2 = f_H^2$), так и высоты верхнего гибридного резонанса ($f_{UH}^2 = f_H^2 = f_P^2 + f_{ce}^2$, где f_P – плазменная частота). Вследствие этого возбуждение мелко-масштабных искусственных ионосферных неоднородностей за счет тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости в этом случае невозможно. Тем не менее, результаты многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating, убедительно продемонстрировали, что мощная КВ-радиоволна необыкновенной поляризации (Х-мода), инжектируемая в высокоширотную F-область ионосферы параллельно магнитному полю (в магнитный зенит), вызывает генерацию мелко-масштабных искусственных ионосферных неоднородностей, искусственное оптическое излучение в красной (630 нм) и зеленой (557.7 нм) линиях атомарного кислорода, возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн и разнообразных спектральных компонент в узкополосном искусственном радиоизлучении [Blagoveshchenskaya et al., 2011, 2014, 2015, 2017; Благовещенская и др., 2018]. Необходимо отметить, что перечисленные явления в высокоширотной F-области ионосферы при Х-нагреве возбуждаются на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты обыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H/foF2 \leq 1$ и $f_H/foF2 > 1$) [Благовещенская и др., 2010, 2018; Blagoveshchenskaya et al., 2014, 2015]. Как было показано в работе [Blagoveshchenskaya et al., 2015], возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн на частотах выше $foF2$ происходит в диапазоне между $foF2$ and $fxF2$ ($foF2 \leq f_H \leq fxF2$), где $fxF2$ – критическая частота необыкновенной компоненты слоя F2, т.е. мощная КВ-радиоволна необыкновенной поляризации еще отражается от ионосферы. Напомним, что $fxF2 = foF2 + f_{ce}/2 \approx (foF2 + 0.7)$ МГц, где f_{ce} – гирочастота электронов. Однако мелко-масштабные искусственные ионосферные неоднородности при Х-нагреве продолжают возбуждаться даже в условиях, когда частота нагрева f_H превышает $fxF2$ на величину до ~ 2 МГц и волна накачки Х-поляризации уже не может отражаться от ионосферы [Blagoveshchenskaya et al., 2013, 2015].

Для исследования явлений, инициированных воздействием мощных КВ-радиоволн на высоко-

широтную ионосферу, было заключено Соглашение между Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) и Европейской научной ассоциацией EISCAT. В рамках этого Соглашения специалисты ААНИИ получили право на проведение экспериментов с использованием современных технических средств EISCAT, не имеющих аналогов в России как по своим техническим характеристикам, так и по географическому расположению.

Целью данной работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик мелко-масштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возникающих в высокоширотной F-области ионосферы, при воздействии на нее мощными КВ-радиоволнами необыкновенной (Х-мода) поляризации в широком диапазоне частот нагрева от 4.0 до 8.0 МГц (комплекс EISCAT/Heating). Основное внимание уделяется результатам экспериментов, направленных на изучение характеристик времен нарастания и релаксации неоднородностей, а также пороговых мощностей их возбуждения. Уделяется определенное внимание рассмотрению условий генерации неоднородностей при Х-нагреве. Проведено сравнение поведения и характеристик неоднородностей при О- и Х-поляризации мощной КВ-радиоволны.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ

Модификация ионосферы осуществлялась с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating, расположенного в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6° N, 19.2° E; $L = 6.2$, $I = 78^\circ$), технические характеристики которого приведены в работе [Rietveld et al., 2016]. Необходимо отметить, что в 2012 г. была выполнена модернизация системы управления работой КВ нагревного комплекса. Это обеспечило автоматическое задание режимов излучения, практически мгновенное изменение частоты и поляризации мощной КВ-радиоволны, быстрое ступенчатое изменение частоты в заданном диапазоне частот, угла излучения мощной КВ-радиоволны, переключение типа антенной системы, а также автоматический контроль за излучением и т.д. [Rietveld et al., 2016]. Просачивание О-волны при Х-нагреве и Х-волны при О-нагреве не превышает 1%.

Большой объем экспериментов по воздействию мощных КВ-радиоволн на F-область высокоширотной ионосферы был выполнен специалистами ААНИИ в октябре–ноябре и феврале–марте с 2009 по 2016 гг. в послеполуденные и вечерние часы. Эксперименты проводились как на низких ($f_H = 4.0$ – 5.4 МГц), так и высоких ($f_H = 5.4$ – 8.0 МГц) частотах нагрева. На ча-

стотах $f_H = 4.0\text{--}5.4$ МГц излучение производилось на фазированную антенную решетку ФАР 2 с шириной диаграммы направленности $12^\circ\text{--}14^\circ$ (на уровне половинной мощности), обеспечивающей максимальную эффективность мощность излучения $P_{\text{эф}} = 190\text{--}250$ МВт. В диапазоне частот нагрева от 5.4 до 8.0 МГц нагрев осуществлялся на ФАР 1 с шириной диаграммы направленности антенны порядка $5^\circ\text{--}6^\circ$ (на уровне половинной мощности), обеспечивающей максимальную эффективную мощность излучения $P_{\text{эф}} = 630\text{--}1200$ МВт в зависимости от частоты нагрева. В анализируемых экспериментах мощные КВ-радиоволны необыкновенной (Х-мода) или обыкновенной (О-мода) поляризации излучались в направлении магнитного поля (диаграмма направленности антенны КВ нагревного комплекса наклонена на 12 град. от вертикали на юг) циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза.

Для диагностики и изучения характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощной КВ-радиоволной Х- или О-поляризации, использовался когерентный КВ-радар CUTLASS (SUPERDARN), расположенный в Hankasalmi (Ханкасалми), Финляндия (62.3° N, 26.6° E) [Lester et al., 2004]. Измерения проводились в нестандартном режиме одновременно на трех частотах в диапазоне от 10 до 20 МГц, что обеспечивало диагностику неоднородностей с пространственными масштабами поперек магнитного поля $l_\perp = 7.5\text{--}15$ м ($l_\perp = c/2f$, где f – частота радара). Радар CUTLASS излучал на узконаправленную антенну с шириной луча $\sim 3.3^\circ$, ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе (“луч” 5). Временное разрешение составляло 3 с, а разрешение по дальности – 15 км.

Для анализа и интерпретации результатов экспериментов использовались данные радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [Rishbeth and van Eyken, 1993], пространственно совмещенного с КВ нагревным комплексом EISCAT/Heating. Измерения проводились в направлении магнитного поля в Тромсе (магнитный зенит, 12° на юг от вертикали). Высотные временные вариации параметров ионосферной плазмы (N_e , T_e , T_i и V_i), а также параметры усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HFPL и HFIL) рассчитывались с использованием пакета GUISDAP version 8.7 (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package) [Lehtinen and Huuskonen, 1996].

Для контроля за состоянием ионосферы и выбора частоты нагрева в период экспериментов использовался ионозонд в Тромсе, обеспечивающий получение ионограмм вертикального зондирования ионосферы 1 раз в 4 мин.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Поведение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей

Рассмотрение всего объема экспериментальных данных показало, что характеристики неоднородностей существенно различаются при Х-нагреве на низких ($f_H = 4.0\text{--}5.4$ МГц) и высоких ($f_H = 6.0\text{--}8.0$ МГц) частотах. При низких частотах нагрева радар CUTLASS работал на частотах от 10 до 16 МГц, что обеспечивало диагностику неоднородностей с размерами $l_\perp \approx 9.3\text{--}15$ м ($l_\perp = c/2f$, где c – скорость света и f – частота, на которой работал радар CUTLASS). Когда нагрев производился на высоких частотах, CUTLASS работал на частотах от 13 до 20 МГц, что позволяло диагностировать неоднородности с размерами $l_\perp \approx 7.5\text{--}11.5$ м.

В качестве типичного примера поведения неоднородностей при Х-нагреве на низких частотах, превышающих критическую частоту слоя $F2$ ($f_H/foF2 > 1$), на рис. 1 приведены данные наблюдений с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми (Финляндия) 7 ноября 2010 г. с 13:30 до 15:20 UT. Мощная КВ-радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 4.544$ МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла $P_{\text{эф}} = 85$ МВт. На верхней панели рис. 1 приведены усредненные в искусственно возмущенной области ионосферы мощности рассеянных на неоднородностях сигналов одновременно на трех частотах 10, 11.5 и 13 МГц, соответствующих обратному рассеянию от неоднородностей с поперечными к магнитному полю масштабами $l_\perp = 15, 13$ и 11.5 м. Три нижние панели рис. 1 характеризуют поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность – мировое время (UT) для тех же частот. Разрешение по дальности (range gate) составляло 15 км, при этом “первые ворота” начинались с дальности 480 км. Рассеянные на неоднородностях сигналы регистрировались в диапазоне дальностей от 780 до 1080 км, соответствующих номерам “ворот” с 20 до 40. К концу цикла О-нагрева (13:35–13:45 UT) генерация неоднородностей прекратилась. Это обусловлено тем, что значения $foF2$ понизились, и частота нагрева f_H превысила $foF2$ ($f_H > foF2$). Далее значения $foF2$ продолжали постепенно уменьшаться от 4.1 МГц в 13:45 UT до 3.1 МГц в 15:15 UT. В этот период времени нагрев производился на Х-поляризации волны накачки в условиях, когда частота нагрева 4.544 МГц существенно превышала значения $foF2$.

Из рисунка 1 ясно видно, что в первом цикле Х-нагрева (13:50–14:00 UT), т.е. при нагреве с холодного старта, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности появились примерно через 1 мин после начала цикла. Абсо-

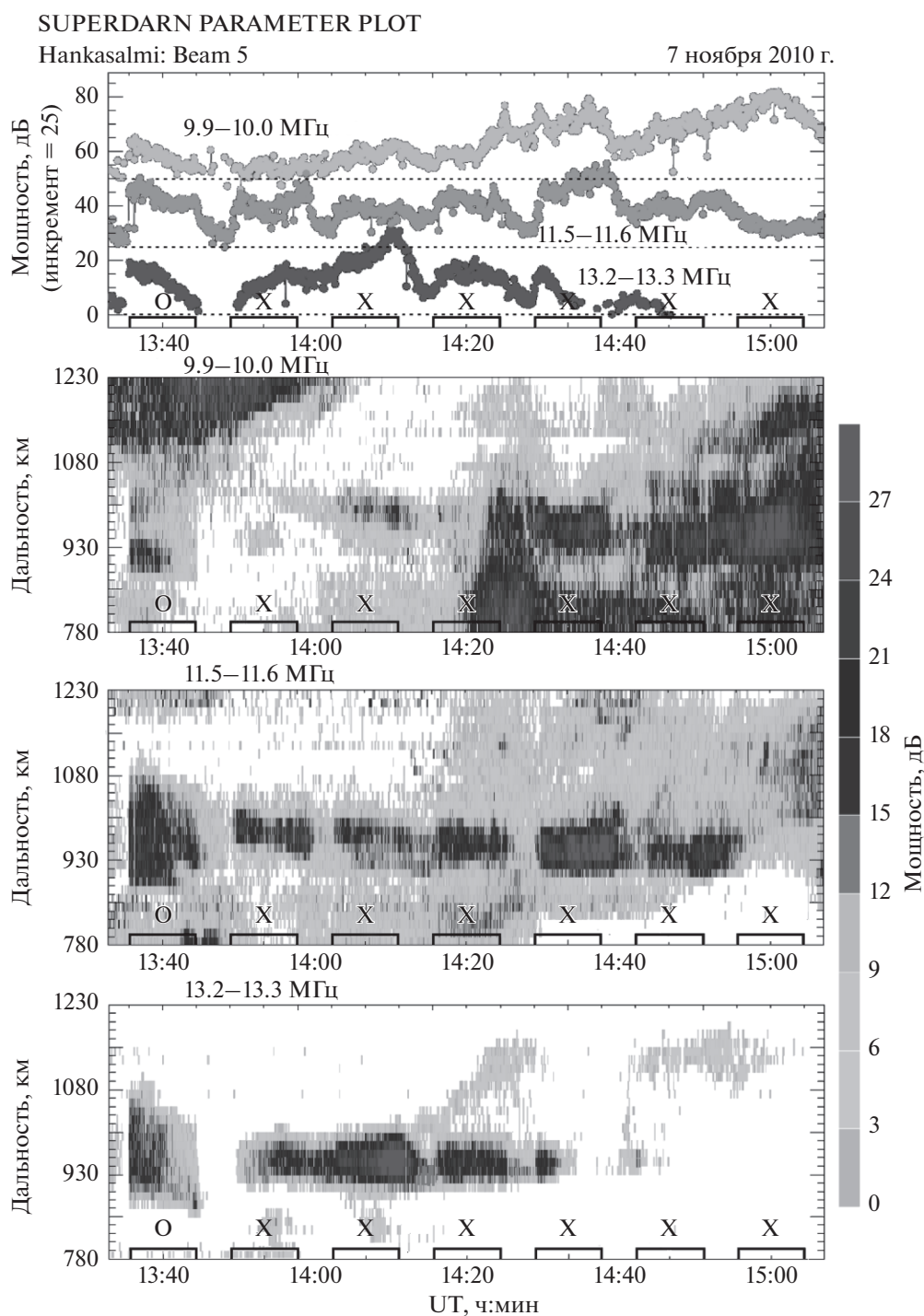


Рис. 1. Мощность рассеянных на неоднородностях сигналов на частотах 10, 11.5 и 13 МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) 7 ноября 2010 г. с 13:30 до 15:20 UT. На верхней панели приведены усредненные в искусственно возмущенной области ионосферы мощности рассеянных сигналов. Три нижние панели показывают поведение мощностей в координатах дальность – мировое время (UT). Мощная КВ-радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте $f_H = 4.544$ МГц, $P_{эф} = 85$ МВт. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на оси времени.

лютно неожиданным явился факт длительного времени релаксации неоднородностей $\tau_{рел}$ после выключения комплекса EISCAT/Heating в 14 UT. На частотах 11.5 и 13 МГц обратное рассеяние от

неоднородностей происходило в течение всей 5-минутной паузы между циклами нагрева. Это привело к тому, что к началу следующего цикла нагрева, так же как и в последующих циклах X-на-

грева, неоднородности уже существовали, а в самом цикле происходило только возрастание их интенсивности. Таким образом, при X-нагреве времена нарастания неоднородностей $\tau_{\text{нар}}$ существенно зависят от предыстории нагрева. По мере падения $foF2$ сначала исчезали сигналы на более высокой частоте 13 МГц ($l_{\perp} = 11.5$ м) в цикле нагрева 14:35–14:45 UT, что сопровождалось усилением рассеянных сигналов на более низкой частоте 11.5 МГц ($l_{\perp} = 13$ м). Затем при дальнейшем понижении $foF2$ в цикле X-нагрева 15:05–15:15 UT исчезали сигналы на частоте 11.5 МГц ($l_{\perp} = 13$ м), а рассеянные от неоднородностей сигналы на частоте 10 МГц ($l_{\perp} = 15$ м) усиливались. Такое поведение рассеянных на неоднородностях сигналов позволяет предположить, что по мере падения $foF2$ происходит перекачка энергии по спектру неоднородностей от мелких масштабов к более крупным.

На рисунке 2 приведены результаты наблюдений с помощью радара CUTLASS усредненных в искусственно возмущенной области ионосферы мощностей рассеянных на неоднородностях сигналов на трех частотах 3 ноября 2013 г. с 15:30 до 18:00 UT. В нижней части рис. 2 показано поведение критической частоты слоя F2 и частоты нагрева в период эксперимента. Мощная КВ-радиоволна на частоте $f_H = 6.2$ МГц излучалась в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла $P_{\text{эф}} = 450$ МВт. CUTLASS работал на трех частотах (13, 16 и 18 МГц), что обеспечивало диагностику неоднородностей с поперечными к магнитному полю с размерами $l_{\perp} = 11.5, 9.3$ и 8.3 м. В ходе эксперимента критические частоты $foF2$ падали от 6.7 МГц в 15:30 UT до 5.2 МГц в 18 UT, что позволило проанализировать поведение неоднородностей при X-нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 ($f_H \leq foF2$ и $f_H > foF2$). С 15:30 до 17 UT, когда $f_H \leq foF2$, возможно возбуждение неоднородностей как при O-, так и X-нагреве. В этот период осуществлялся альтернативный O/X-нагрев. Здесь неоднородности с $l_{\perp} \approx 8.3$ – 11.5 м возбуждались как при O-, так и X-нагреве, но их интенсивность при X-нагреве была на 4–6 дБ ниже по сравнению с O-нагревом. С 17 до 18 UT, когда частота нагрева превысила $foF2$, было возможно возбуждение неоднородностей только при X-нагреве. При этом интенсивность неоднородностей при X-нагреве на частотах $f_H > foF2$ была выше, чем при $f_H \leq foF2$. Отметим, что после 17 UT по мере падения $foF2$ сначала исчезали самые мелкомасштабные неоднородности с $l_{\perp} \approx 8.3$ м, затем неоднородности с поперечным к магнитному полю размером $l_{\perp} \approx 9.3$ м, но при этом усиливались более крупномасштабные неоднородности с

$l_{\perp} \approx 11.5$ м. Таким образом можно предположить, что при нагреве на высокой частоте 6.2 МГц, аналогично случаю X-нагрева на низкой частоте 4.544 МГц, происходила перекачка энергии по спектру неоднородностей от мелких масштабов к более крупным.

3.2. Характеристика времен нарастания и релаксации неоднородностей

Рассмотрим более детально характеристики времен нарастания $\tau_{\text{нар}}$ и релаксации $\tau_{\text{рел}}$ мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по данным радара CUTLASS при альтернативном O/X-нагреве на низких ($f_H = 4.0$ – 5.4 МГц) и высоких ($f_H = 6.0$ – 8.0 МГц) частотах в условиях, когда частота нагрева была ниже или вблизи критической частоты ($f_H \leq foF2$). В этих условиях, как отмечалось, возможна генерация неоднородностей как при O-, так и X-нагреве F-области ионосферы. В качестве примера ниже рассмотрены результаты экспериментов, выполненных 20 октября 2016 г. при O/X нагреве на частоте $f_H = 4.544$ МГц ($P_{\text{эф}} = 130$ МВт) и 26 октября 2013 г. при нагреве на частоте $f_H = 6.96$ МГц ($P_{\text{эф}} = 550$ МВт). Мощная КВ-радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза, начиная с первой минуты часа.

На рисунке 3 показано поведение интенсивностей рассеянных на неоднородностях сигналов $P_{\text{миин}}$ по данным наблюдений радара CUTLASS 20 октября 2016 г. и 26 октября 2013 г., начиная за 1 мин до и в течение первых двух минут после включения комплекса EISCAT/Heating. Рисунок 3а, 3б, 3в иллюстрирует поведение $P_{\text{миин}}$ 20 октября 2016 г. на частотах ~ 16 МГц (нагрев на O-моду), ~ 16 МГц (второй цикл X-нагрева) и ~ 13 МГц (X-мода, после 1 ч X-нагрева) соответственно. Напомним, что обратное рассеяние сигналов на частотах порядка 16 и 13 МГц происходит от неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 9.3$ и 11.5 м. Рисунок 3г, 3д, 3е характеризует $P_{\text{миин}}$ 26 октября 2013 г. на частотах ~ 18 МГц (O-мода), ~ 20 МГц (первый цикл X-нагрева) и ~ 20 МГц (X-мода, после 45 мин X-нагрева) соответственно. Обратное рассеяние сигналов на частотах порядка 18 и 20 МГц происходит от неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 8.3$ и 7.5 м. На рисунке 4 приведено поведение $P_{\text{миин}}$ 20 октября 2016 г. и 26 октября 2013 г. в течение последней минуты нагрева и первых двух минут после выключения комплекса EISCAT/Heating для тех же самых нагревных циклов и частот радара CUTLASS, что и на рис. 3.

Как следует из рисунков 3а, 3г и 4а, 4г, при O-нагреве на частотах $f_H = 4.544$ МГц и $f_H = 6.96$ МГц как времена нарастания $\tau_{\text{нар}}$, так и

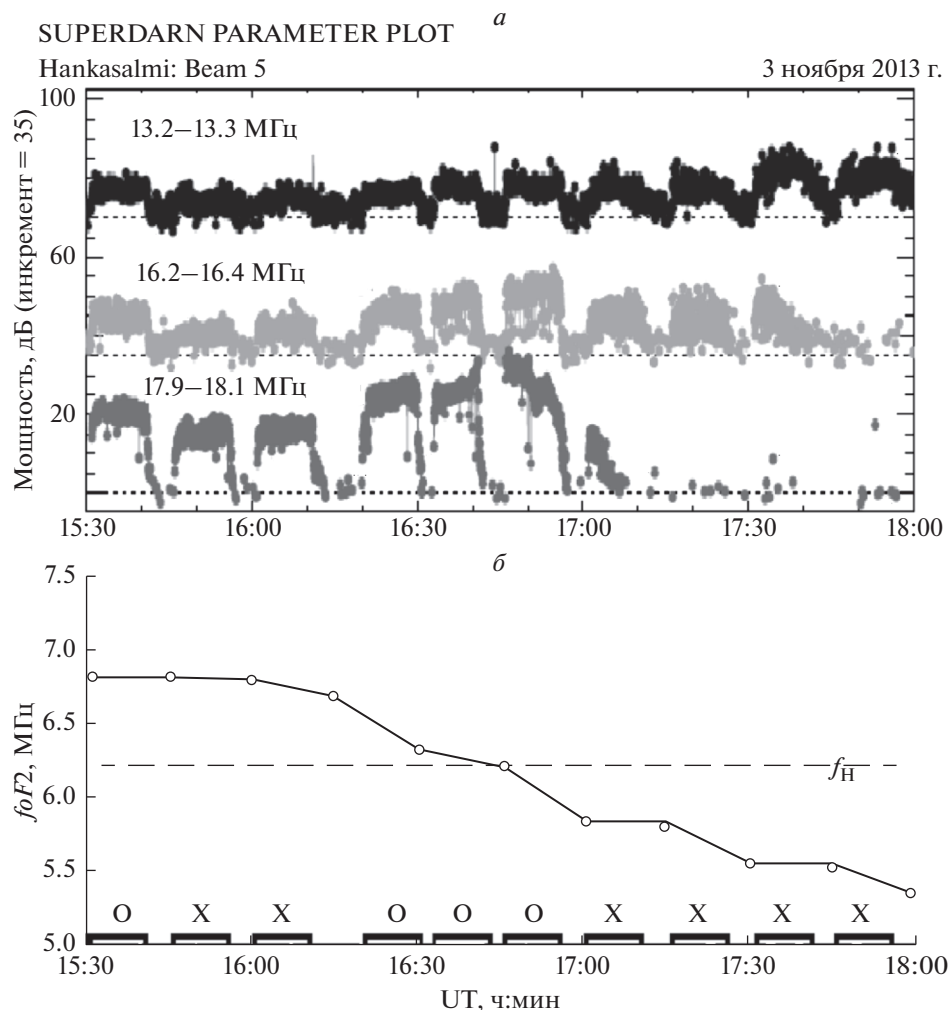


Рис. 2. Усредненные в искусственно возмущенной области ионосферы мощности рассеянных на неоднородностях сигналов на частотах 13, 16 и 18 МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) (а) и поведение критической частоты слоя F_2 и частоты нагрева (б) 3 ноября 2013 г. с 15:30 до 18:00 UT. Мощная КВ- радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте $f_H = 6.2$ МГц, $P_{эф} = 450$ МВт. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на оси времени.

времена релаксации $\tau_{рел}$ неоднородностей, были практически одинаковыми. Времена нарастания неоднородностей составляли $\tau_{нар} \approx 6-9$ с, а времена релаксации имели длительность порядка $\tau_{рел} \approx 40-60$ с. При этом релаксация МИИН имела двухступенчатый характер. Быстрая стадия релаксации продолжалась $\tau_{рел 1} \approx 9-12$ с, а медленная стадия имела длительность $\tau_{рел 2} \approx 30-50$ с. Аналогичный характер релаксации неоднородностей при О-нагреве F -области ионосферы наблюдался и во многих других нагревных экспериментах в высоких и на средних широтах (см., например, [Robinson, 1989; Фролов, 2017] и цитируемую в них литературу).

При Х-нагреве высокоширотной F -области ионосферы поведение времен нарастания и релаксации неоднородностей существенно отлича-

ется от О-нагрева. Прежде всего при Х-нагреве как на низкой ($f_H = 4.544$ МГц), так и высокой ($f_H = 6.96$ МГц) частоте, времена нарастания $\tau_{нар}$ и релаксации $\tau_{рел}$ неоднородностей значительно больше, чем при О-нагреве. Важным является также существенное различие времен релаксации неоднородностей на низких и высоких частотах нагрева (см. рис. 4 панели б, в и д, е). Из рисунка 4б ясно видно, что 20 октября 2016 г. при нагреве на частоте $f_H = 4.544$ МГц время релаксации неоднородностей превышало 120 с, в то время как при $f_H = 6.96$ МГц значения $\tau_{рел}$ были в два раза меньше (порядка 60 с). Через несколько циклов Х-нагрева на частоте $f_H = 4.544$ МГц времена релаксации уже превышали 300 с (длительность паузы), что следует из рис. 3в, где ясно видно, что к началу цикла в 15:46 UT неоднородности уже суще-

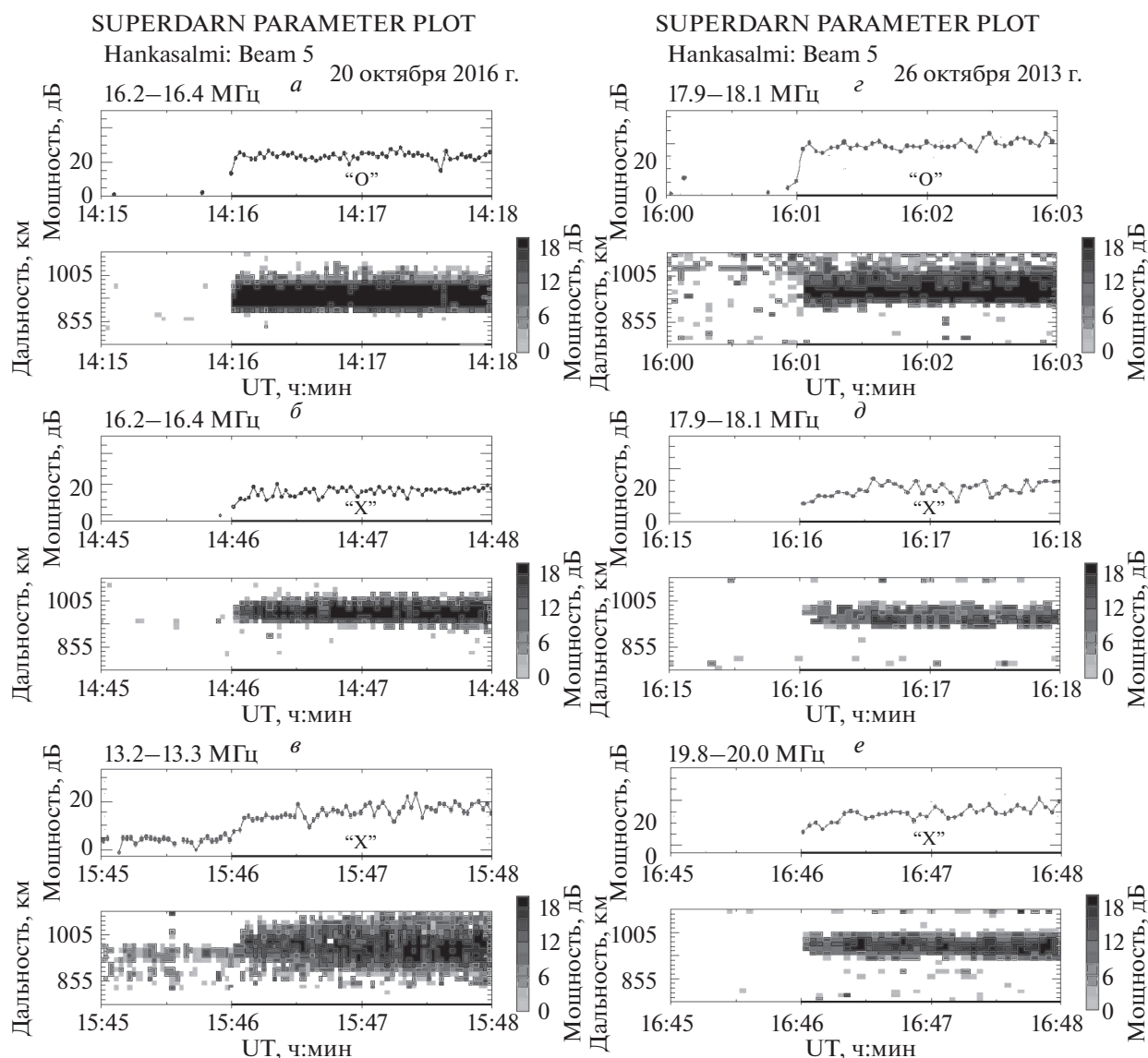


Рис. 3. Мощности рассеянных на неоднородностях сигналов, усредненных в искусственно возмущенной области ионосферы, а также поведение мощностей в координатах дальность – мировое времени (UT) по данным наблюдений радара CUTLASS в Ханкасалми с 3 с разрешением по времени, начиная за 1 мин до и в течение первых двух минут после включения комплекса EISCAT/Heating 20 октября 2016 г. на частоте излучения $f_H = 4.544$ МГц, $P_{эф} = 130$ МВт (левая панель) и 26 октября 2013 г. на $f_H = 6.96$ МГц, $P_{эф} = 550$ МВт (правая панель): частота CUTLASS ~16 МГц, нагрев на О-поляризации мощной КВ-радиоволны (а); частота CUTLASS ~16 МГц, второй цикл нагрева на Х-поляризации (б); частота CUTLASS ~13 МГц, шестой цикл нагрева на Х-поляризации (в); частота CUTLASS ~18 МГц, нагрев на О-поляризации мощной КВ-радиоволны (г); частота CUTLASS ~20 МГц, первый цикл нагрева на Х-поляризации (д); частота CUTLASS ~20 МГц, третий цикл нагрева на Х-поляризации (е).

ствовали. После окончания цикла Х-нагрева в 15:56 UT в течение ~60 с интенсивность неоднородностей сохранялась на прежнем уровне и только после этого начинала постепенно уменьшаться (см. рис. 4в). На высокой частоте нагрева $f_H = 6.96$ МГц в аналогичных фоновых геофизических условиях значения $\tau_{рел}$ были существенно ниже и не превышали ~80 с (см. рис. 4е). Мощность рассеянных на неоднородностях сигналов при Х-нагреве на частоте $f_H = 4.544$ МГц превы-

шала $P_{мин}$ на частоте нагрева $f_H = 6.96$ МГц примерно на 5 дБ.

2.3. Пороговые мощности возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей

Для определения пороговых мощностей возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при Х-нагреве

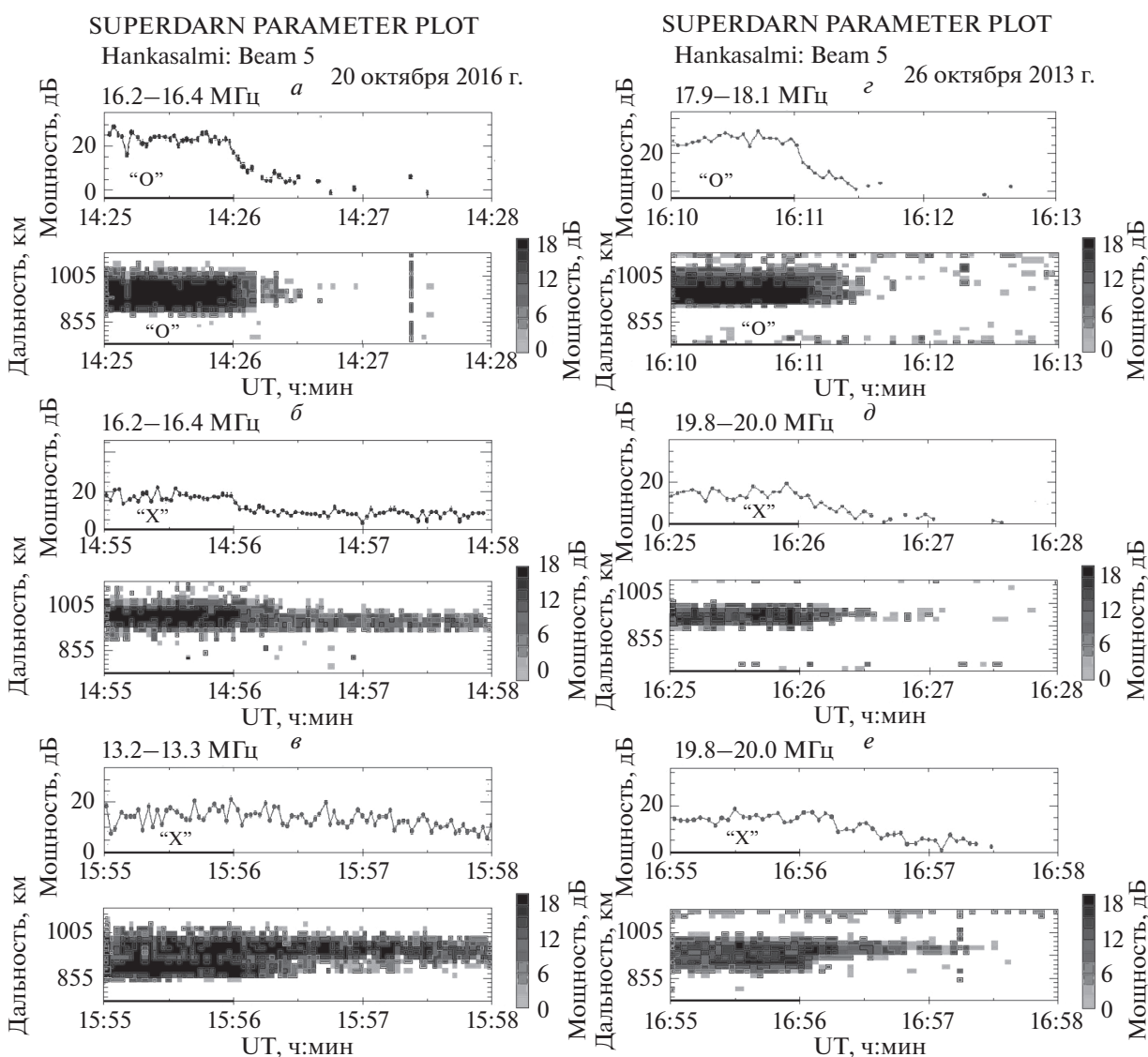


Рис. 4. Мощности рассеянных на неоднородностях сигналов, усредненных в искусственно возмущенной области ионосферы, а также поведение мощностей в координатах дальность – мировое время (UT) по данным наблюдений радара CUTLASS в Ханкасалми с 3-секундным разрешением по времени в течение последней минуты нагревного цикла и двух минут после выключения комплекса EISCAT/Heating 20 октября 2016 г. на $f_H = 4.544$ МГц (левая панель) и 26 октября 2013 г. на $f_H = 6.96$ МГц (правая панель) для тех же самых нагревных циклов и частот радара CUTLASS, что и на рис. 3а–3е.

высокоширотной F -области ионосферы были выполнены два эксперимента при ступенчатом возрастании эффективной мощности излучения комплекса EISCAT/Heating в течение цикла нагрева. Первый эксперимент был выполнен в условиях, наиболее благоприятных для генерации неоднородностей. X-нагрев в магнитный зенит выполнялся на самой низкой частоте $f_H = 4.040$ МГц в ранние вечерние часы (цикл 14:31–14:41 UT) при спокойных магнитных условиях, когда частота нагрева f_H превышала критическую частоту $foF2(f_H/foF2 > 1)$. Второй эксперимент проводился в условиях, самых неблагоприятных

для генерации неоднородностей при X-нагреве. Излучение осуществлялось на самой высокой частоте комплекса EISCAT/Heating $f_H = 7.953$ МГц, которая была ниже $foF2(f_H/foF2 < 1)$.

На рисунках 5 и 6 показано поведение мощностей рассеянных на неоднородностях сигналов, усредненных в искусственно возмущенной области ионосферы, по данным измерений радара CUTLASS при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения комплекса EISCAT/Heating. Рисунок 5 характеризует эксперимент 6 ноября 2009 г., когда мощная КВ-радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте $f_H = 4.040$ МГц

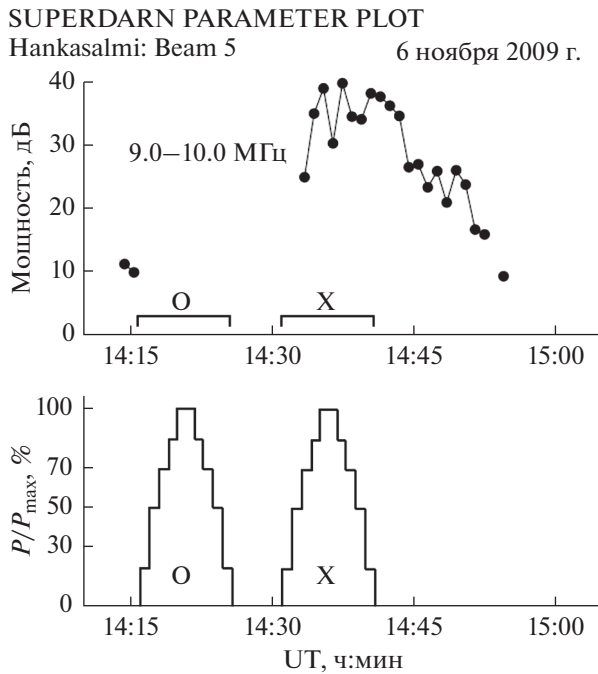


Рис. 5. Мощности рассеянных на неоднородностях сигналов, усредненных в искусственно возмущенной области ионосферы, по данным измерений радара CUTLASS на частоте ~10 МГц 6 ноября 2009 г. при О- и Х-нагреве на частоте $f_H = 4.040$ МГц ($f_H/foF2 > 1$) (верхняя панель). В циклах нагрева использовалось ступенчатое изменение мощности по схеме: 20%, 50%, 70%, 85%, 100%, 100%, 85%, 70%, 50%, 20% (1 мин при каждом уровне мощности) (нижняя панель). Максимальная эффективная мощность излучения составляла 130 МВт.

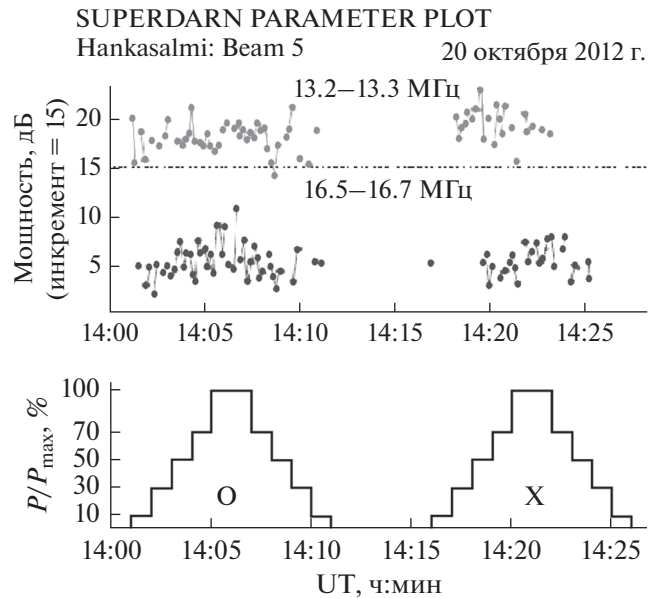


Рис. 6. Мощности рассеянных на неоднородностях сигналов, усредненных в искусственно возмущенной области ионосферы, по данным измерений радара CUTLASS на частотах ~13 и 16.5 МГц 20 октября 2012 г. при О- и Х-нагреве на частоте $f_H = 7.953$ МГц ($f_H/foF2 < 1$) (верхняя панель). В циклах нагрева использовалось ступенчатое изменение мощности по схеме: 10%, 30%, 50%, 70%, 100%, 100%, 70%, 50%, 30%, 10% (1 мин при каждом уровне мощности) (нижняя панель). Максимальная эффективная мощность излучения составляла 550 МВт.

($f_H/foF2 > 1$). В циклах нагрева использовалось ступенчатое изменение мощности по схеме: 20%, 50%, 70%, 85%, 100%, 100%, 85%, 70%, 50%, 20% (1 мин при каждом уровне мощности). Максимальная эффективная мощность излучения составляла 130 МВт. Рисунок 6 показывает поведение $P_{мин}$ 20 октября 2012 г., когда нагрев осуществлялся на частоте $f_H = 7.953$ МГц ($f_H/foF2 < 1$). В циклах нагрева использовалось ступенчатое изменение мощности в последовательности 10%, 30%, 50%, 70%, 100%, 100%, 70%, 50%, 30%, 10% (1 мин при каждом уровне мощности). Максимальная эффективная мощность излучения в этом эксперименте составляла 550 МВт.

Из рисунка 5 следует, что при О-нагреве на частоте $f_H = 4.040$ МГц в условиях, когда f_H превышала $foF2$, рассеянные на неоднородностях сигналы не регистрировались. Диагностика неоднородностей осуществлялась на частоте радара CUTLASS ~10 МГц, что соответствует размерам неоднородностей $l_{\perp} = 15$ м. Изменение поляризации на Х-моду (цикл 14:31–14:41 UT) привело к появлению интенсивных сигналов, рассеянных на неоднородностях. Рассеянные сигналы появи-

лись не сразу после включения нагревного комплекса, а спустя 1.5–2 мин, т.е. при 50%-м уровне мощности, что соответствует пороговой эффективной мощности излучения, при которой начинают возбуждаться неоднородности при Х-нагреве $P_{эф. пор} = 65$ МВт. Ступенчатое уменьшение $P_{эф}$ во второй половине цикла нагрева не сказалось на интенсивности рассеянных сигналов. После окончания цикла нагрева в 14:41 UT интенсивность неоднородностей постепенно уменьшалась. Время их релаксации составило $\tau_{рел} = 15$ мин.

Из рисунка 6 видно, что на частоте $f_H = 7.953$ МГц, которая была ниже критической частоты $foF2$, неоднородности наблюдались как при О-, так и Х-нагреве. Измерения с помощью радара CUTLASS проводились на частотах примерно 13 и 16.5 МГц, что соответствует размерам неоднородностей $l_{\perp} = 11.5$ и 9.2 м. При О-нагреве неоднородности появились сразу же после включения нагревного комплекса при самом низком (10%) уровне $P_{эф}$ (55 МВт), который превышает порог их возбуждения $P_{эф. пор} = 26$ МВт на комплексе EISCAT/Heating на частоте $f_H = 7.953$ МГц, [Bryers et al., 2013]. При Х-нагреве неоднородности начинали регистрироваться при значительно более высоких эффективных мощностях излучения $P_{эф. пор} = 165$ МВт

(30%-й уровень мощности). При ступенчатом уменьшении $P_{эф}$ во второй половине цикла нагрева исчезновение неоднородностей произошло при 10%-м уровне эффективной мощности излучения (55 МВт).

Сравнение пороговых мощностей возбуждения неоднородностей при воздействии мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации на низких и высоких частотах нагрева (см. рис. 5 и 6), продемонстрировало существенное различие между ними:

- интенсивность рассеянных на неоднородностях сигналов на низких частотах нагрева при $f_H > foF2$ достигала 40 дБ, в то время как на высоких частотах нагрева при $f_H < foF2$ величина $P_{мин}$ была существенно ниже и не превышала 10 дБ;

- времена релаксации неоднородностей при X-нагреве на низких частотах нагрева, превышающих критическую частоту слоя $F2$ ($f_H > foF2$), составляли порядка 15 мин после выключения нагревного комплекса, излучавшего на 20%-м уровне мощности (26 МВт);

- на высоких частотах нагрева ниже критической частоты слоя $F2$ ($f_H < foF2$) генерация неоднородностей прекращалась при 10%-м уровне эффективной мощности излучения (55 МВт);

- пороговые мощности возбуждения неоднородностей при X-нагреве на низких частотах при $f_H > foF2$ меньше по сравнению с $P_{эф. пор}$ на высоких частотах нагрева ниже $foF2$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, возбуждаемые в высокоширотной F -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами необыкновенной (X-мода) поляризации, впервые были обнаружены на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) [Blagoveshchenskaya et al., 2011]. Анализ большого объема экспериментальных данных, полученных в АНИИ в 2009–2016 гг., убедительно продемонстрировал, что неоднородности с поперечными к магнитному полю размерами $l_{\perp} \approx 7.5–15$ м при X-нагреве возбуждаются при спокойных фоновых геофизических условиях. При этом возбуждение неоднородностей происходит на частотах нагрева как ниже, так и существенно выше (до 2 МГц) критической частоты обыкновенной компоненты слоя $F2$ ($f_H/foF2 \leq 1$ и $f_H/foF2 > 1$). Это принципиально отличается от условий возбуждения неоднородностей при O-нагреве, генерация которых возможна только на частотах нагрева ниже $foF2$ ($f_H \leq foF2$).

Как показали результаты многочисленных экспериментов, характеристики неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 7.5–15$ м при X-нагреве с эф-

фективными мощностями излучения $P_{эф} = 100–650$ МВт зависят от частоты нагрева f_H (низкие $f_H = 4.0–5.4$ МГц или высокие $f_H = 6.0–8.0$ МГц), соотношения между частотой нагрева и критической частотой слоя $F2$ ($f_H \leq foF2$ или $f_H > foF2$), предыстории нагрева (“холодный” старт в первом цикле X-нагрева или последующие циклы X-нагрева).

По данным радара CUTLASS в Ханкасалми времена нарастания $\tau_{нар}$ и релаксации $\tau_{рел}$ неоднородностей при X-нагреве всегда больше, чем при O-нагреве. Следует отметить также существенное различие времен релаксации неоднородностей при X-нагреве на низких и высоких частотах нагрева. На высоких частотах нагрева ($f_H = 6.0–8.0$ МГц) времена нарастания неоднородностей составляют $\tau_{нар} = 12–30$ с, а времена релаксации – $\tau_{рел} = 60–90$ с. На низких частотах нагрева ($f_H = 4.0–5.4$ МГц) времена нарастания неоднородностей при X-нагреве с “холодного старта” (в первом цикле X-нагрева) имеют величину порядка 60–70 с (и даже могут достигать 150 с, когда $f_H > foF2$). Времена релаксации неоднородностей в этих условиях составляют $\tau_{рел} = 100–130$ с, возрастая до $\tau_{рел} = 200–250$ с в условиях X-нагрева на частотах выше критической частоты слоя $F2$ ($f_H > foF2$).

В циклах X-нагрева с предысторией, когда сказывалось влияние эффектов последействия от предшествующих циклов нагрева, значения $\tau_{нар}$ уменьшались, а $\tau_{рел}$ увеличивались. Времена релаксации неоднородностей на низких частотах нагрева превышали 5 мин (длительность паузы между циклами нагрева), что приводило практически к непрерывному существованию неоднородностей в период эксперимента. При X-нагреве на низких частотах, превышающих $foF2$, в последнем цикле X-нагрева наблюдались времена релаксации $\tau_{рел} = 15$ мин (см. рис. 5).

Такие неожиданно большие времена релаксации неоднородностей, с размерами в поперечном к магнитному полю направлении $l_{\perp} \approx 7.5–15$ м при X-нагреве высокоширотной F -области ионосферы, дают основание предположить наличие механизма их поддержания. Анализ фоновой геофизической обстановки по данным EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (на частоте 930 МГц), вертикального зондирования ионосферы в Тромсе, IMAGE сети магнитометров в Скандинавии показал, что генерация неоднородностей при X-нагреве наблюдалась при спокойных магнитных условиях в регулярном $F2$ -слое при отсутствии высыпаний частиц, продольных токов и электроджета. Учитывая изложенное, можно полагать, что в рассматриваемых спокойных геофизических условиях возбуждение и поддержание мелкомасштабных неоднородно-

стей связано с генерацией крупномасштабных неоднородностей, что возможно при нагреве мощными КВ-радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации на частотах как ниже, так и выше $foF2$, вследствие самофокусировочной неустойчивости мощного КВ-пучка [Литвак, 1968; Gurevich and Karashtin, 1994; Guzdar et al., 1998].

Как отмечалось, на высоких частотах нагрева ($f_H = 6.0\text{--}8.0$ МГц) времена релаксации неоднородностей при X-нагреве составляли $\tau_{\text{рел}} = 60\text{--}90$ с. Используя зависимость характерных времен развития релаксации от масштабов неоднородностей в виде $\tau_{\text{рел}} \propto Cl_{\perp}^{\alpha}$ [Ерухимов и др., 1987; Мясников и др., 2001], можно ориентировочно оценить размер крупномасштабных неоднородностей L_{\perp} , ответственных за поддержание неоднородностей с масштабами 7.5–15 м. Для значений коэффициента $\alpha = 0.5$, характерного для медленной стадии времен релаксации мелкомасштабных неоднородностей (который также может быть использован для оценки времен релаксации средне- и крупномасштабных неоднородностей), с учетом возрастания $\tau_{\text{рел}}$ при переходе от дневных к вечерним часам наблюдений приблизительно в 1.5–2 раза ($C = 1.5\text{--}2.0$) [Ерухимов и др., 1987; Frolov et al., 1997], ориентировочный размер крупномасштабных неоднородностей составляет $L_{\perp} \approx 1000\text{--}3000$ м. Подчеркнем еще раз, что релаксация мелкомасштабных неоднородностей при X-нагреве протекает в один этап, в отличие от неоднородностей при O-нагреве, когда релаксация развивается в две стадии (быстрая и медленная). Было также показано (см., например, [Фролов, 2017] и цитируемая литература), что при O-нагреве на частотах, выше критической частоты ($f_H > foF2$), возбуждаются крупномасштабные неоднородности с большими масштабами по сравнению со случаем, когда $f_H < foF2$. По-видимому, аналогичная ситуация наблюдалась и при X-нагреве, что следует из возрастания времен релаксации неоднородностей в условиях нагрева при $f_H > foF2$.

Каков же механизм генерации мелкомасштабных неоднородностей при X-нагреве F-области ионосферы? Недавно в работе [Borisov et al., 2018] был предложен механизм двухступенчатой генерации неоднородностей при X-нагреве. На первом этапе образуются крупномасштабные неоднородности вследствие самофокусировочной неустойчивости. На втором этапе вследствие температурной градиентно-дрейфовой неустойчивости возбуждаются мелкомасштабные неоднородности. В принципе этот механизм может быть реализован и при O-нагреве. Более того при O-нагреве вследствие тепловой самофокусировочной неустойчивости образуются более интенсивные крупномасштабные неоднородности по

сравнению с X-нагревом (см., например, [Фролов, 2017] и цитируемая литература). В этой связи остается не ясным, почему неоднородности на частотах $f_H > foF2$ не образуются при O-нагреве, в то время как волна накачки X-поляризации приводит к возбуждению очень интенсивных неоднородностей (см. рис. 5).

Рассмотрим изменения электронной концентрации при O- и X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн (930 МГц) в Тромсе. Для этого были использованы данные первичных (raw data) измерений электронной концентрации $N_{e_{\text{raw}}}$ в диапазоне высот 180–278 км с разрешением по высоте 1.5 км. На рисунках 7 и 8 приведено высотно-временное распределение $N_{e_{\text{raw}}}$ (рис. 7а и 8а), а также изменения во времени значений $N_{e_{\text{raw}}}$ на фиксированных высотах выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны (рис. 7б и 8б) при O- и X-нагреве 7 ноября 2010 г. и 3 ноября 2013 г. соответственно. Приведенные данные относятся к измерениям радара HP в направлении магнитного поля. Возрастания $N_{e_{\text{raw}}}$ в циклах нагрева на высотах отражения мощной КВ-радиоволны (см. рис. 7а и 8а) вызваны возбуждением усиленных нагревом ионных линий (HF-enhanced ion lines, HFILs) в спектре радара HP. На этих высотах корректные оценки электронной концентрации не могут быть выполнены. Из рисунков 7 и 8 ясно видно, что в циклах O-нагрева наблюдается обеднение электронной концентрации по сравнению с фоновыми значениями в паузах, обусловленное тепловым нагревом плазмы, что является типичным проявлением модификации ионосферы в поле мощной КВ-радиоволны обыкновенной поляризации [Gurevich, 1978; Гуревич, 2007]. В тех же самых фоновых геофизических условиях при X-нагреве наблюдалась другая ситуация. 7 ноября 2010 г. переход к X-нагреву в 13:50 UT сопровождался возбуждением очень интенсивных усиленных нагревом ионных линий (HFILs) в широком диапазоне высот, что исключало возможность оценки реальных изменений N_e в циклах X-нагрева (см. рис. 7а). В эксперименте 3 ноября 2013 г. в циклах X-нагрева слабые HFILs регистрировались только на высотах отражения ~ 240 км (см. рис. 8а). В этих условиях оценки $N_{e_{\text{raw}}}$ были сделаны на высотах 264, 267 и 270 км, превышающих высоту отражения мощной X-волны (см. рис. 8б). Из рис. 8б следует, что в отличие от O-нагрева, где регистрировалось уменьшение $N_{e_{\text{raw}}}$, в циклах X-нагрева наблюдалось возрастание $N_{e_{\text{raw}}}$ выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны. Результаты экспериментов сканирования искусственно возмущенной F-области ионосферы по углам возвышения (с шагом 1°) с помощью радара HP убедительно продемонстрировали, что при X-нагреве возрастания электронной concentra-

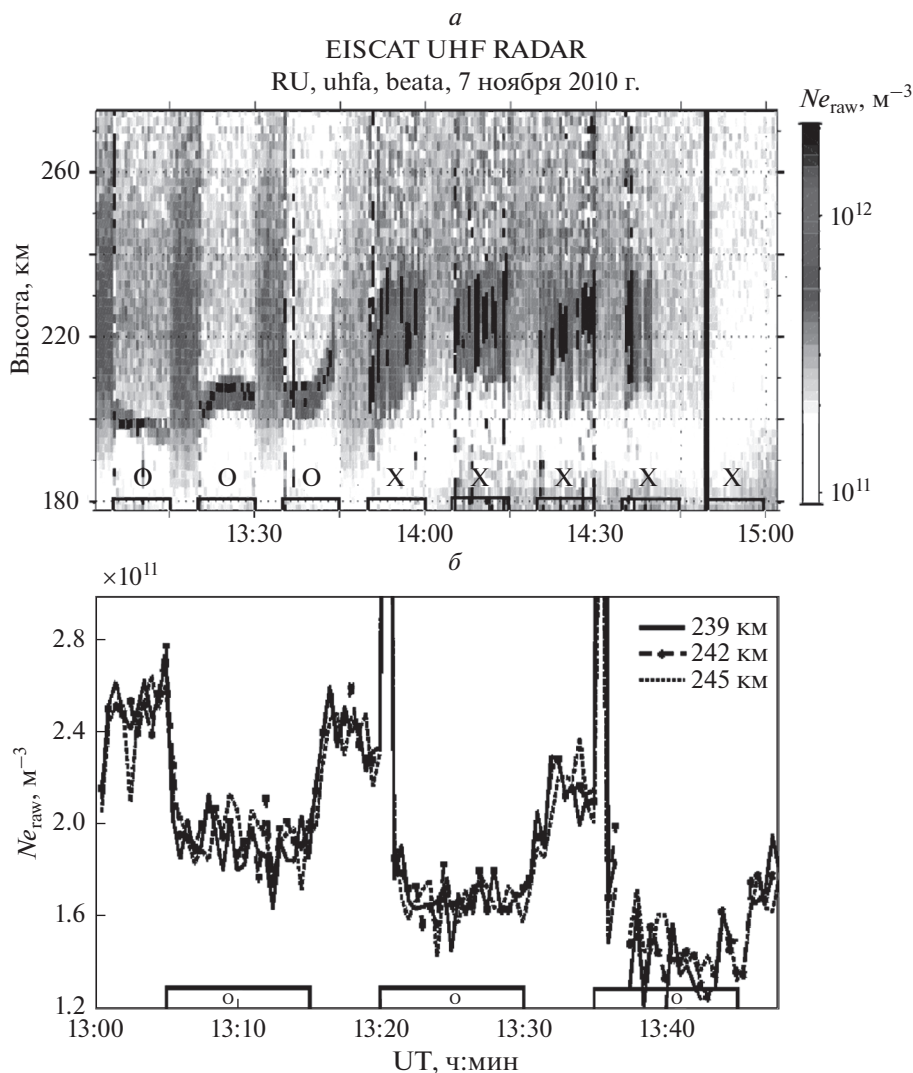


Рис. 7. Высотно-временное распределение первичных (raw data) измерений электронной концентрации $N_{e_{\text{raw}}}$ в диапазоне высот 180–278 км с разрешением по высоте 1.5 км по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе (930 МГц) при O- и X-нагреве на $f_H = 4.544$ МГц, $P_{\text{эф}} = 85$ МВт 7 ноября 2010 г. с 13 до 15 UT (*a*) и изменения во времени значений $N_{e_{\text{raw}}}$ на фиксированных высотах выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны для того же эксперимента с 13 до 13:45 UT (*b*).

ции происходят в направлении магнитного поля в узком диапазоне углов возвышения шириной $\sim 3^\circ$ в диапазоне высот вплоть до верхней высотной границы измерений радара НР [Blagoveshchenskaya et al., 2015]. Есть основания полагать, что такие узкие каналы повышенной электронной плотности вдоль направления магнитного поля вызваны потоком ускоренных электронов [Carlson et al., 1982] при X-нагреве, которые могут оказать влияние на генерацию крупномасштабных ионосферных неоднородностей. Ускорение электронов при X-нагреве экспериментально подтверждается возбуждением исключительно интенсивных оптических эмиссий в красной и зеленой линиях

атомарного кислорода [Blagoveshchenskaya et al., 2014]. В качестве механизма мелкомасштабного расслоения крупномасштабных неоднородностей может быть рассмотрен механизм (filamentation instability), предложенный Kuo [2014].

Несмотря на многочисленные экспериментальные данные, описывающие поведение, характеристики и условия возбуждения интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 7.5\text{--}15$ м, возникающих при воздействии мощной КВ-радиоволны X-поляризации (комплекс EISCAT/Heating), механизм генерации неоднородностей остается не достаточно ясным и требует дальнейшего

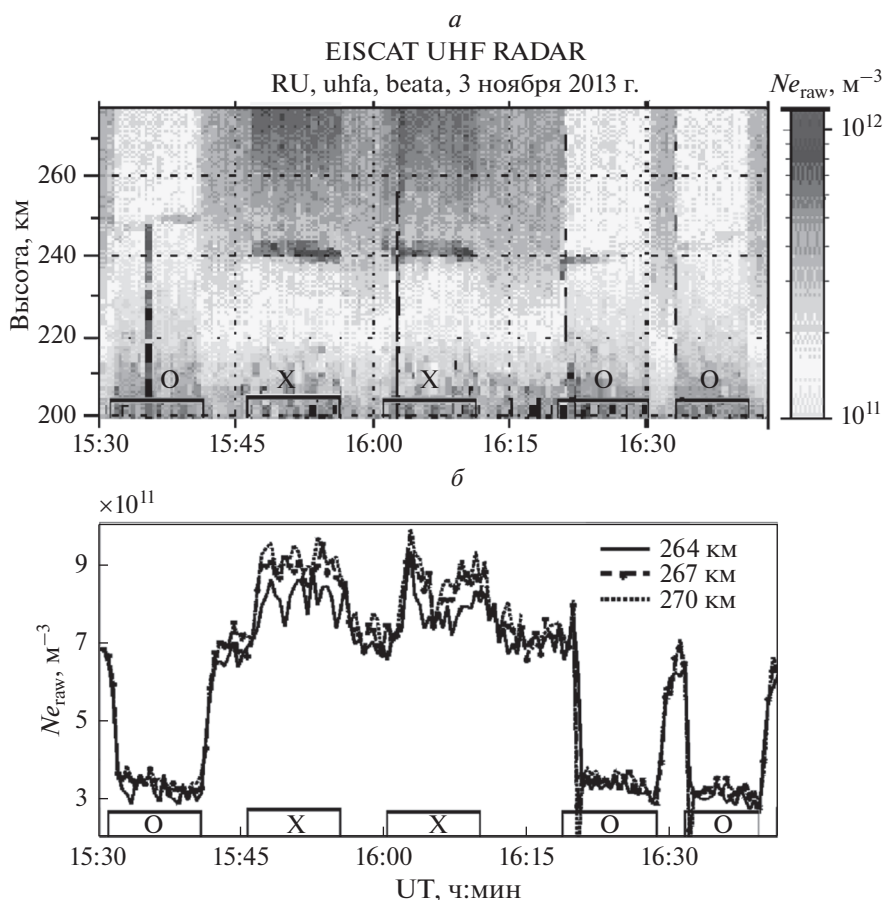


Рис. 8. Высотно-временное распределение первичных (raw data) измерений электронной концентрации Ne_{raw} в диапазоне высот 200–278 км с разрешением по высоте 1.5 км по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе (930 МГц) при O- и X-нагреве на $f_H = 6.2$ МГц, $P_{эф} = 450$ МВт (a) и изменения во времени значений Ne_{raw} на фиксированных высотах выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны для того же самого эксперимента (б) 3 ноября 2013 г. с 15:30 до 16:46 UT.

серьезного изучения в теоретическом плане, что выходит за рамки настоящей статьи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности с поперечными к магнитному полю масштабами $l_{\perp} \approx 7.5-15$ м при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы возбуждаются в регулярном F2-слое ионосферы при спокойных условиях (отсутствие высыпаний частиц, продольных токов, электроджета). Установлено, что неоднородности генерируются при излучении мощной КВ-радиоволны необыкновенной поляризации (X-мода) в направлении магнитного зенита на частотах как ниже, так и существенно выше (до 2 МГц) критической частоты слоя F2 ($f_H \leq foF2$ и $f_H > foF2$).

Определены времена нарастания и релаксации неоднородностей, а также пороговые мощности

их возбуждения при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы. Установлено, что времена нарастания и релаксации неоднородностей, а также пороговые мощности их возбуждения существенно различны при X-нагреве на низких ($f_H = 4.0-5.4$ МГц) и высоких ($f_H = 6.0-8.0$ МГц) частотах. Показано, что характеристики неоднородностей при X-нагреве существенно зависят от условий, предшествующих нагреву (“холодный” старт в первом цикле X-нагрева или последующие циклы X-нагрева).

Выполнено сравнение условий генерации и характеристик неоднородностей при воздействии на F-область высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами необыкновенной (X-мода) и обыкновенной (O-мода) поляризации. Мелкомасштабные неоднородности, возбуждаемые при O- и X-нагреве, имеют существенно различные времена нарастания и релаксации и порого-

вые мощности возбуждения, что свидетельствует о различных механизмах их генерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Европейской научной Ассоциации EISCAT.

Система радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии поддерживается Финским метеорологическим институтом и Шведским институтом космической физики.

Мы признательны М.Т. Rietveld за помощь в проведении экспериментов в г. Тромсе, Норвегия.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Т.К. Yeoman поддержан грантом NERC NE/K011766/1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К., Ритвельд М.Т. Эффекты модификации высокоширотной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением. I. Результаты комплексных наземных наблюдений // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 53. № 9–10. С. 571–604. 2010.
- 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.
- Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 30. С. 208–225. 1987.
- Литвак А.Г. О возможности самофокусировки электромагнитных волн в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 11. № 9. С. 1433–1445. 1968.
- Мясников Е.Н., Муравьева Н.В., Сергеев Е.Н., Фролов В.Л., Насыров А.М., Насыров И.А., Белей В.С., Колосков А.В., Ямпольский Ю.М., Гровс К.М. О форме пространственного спектра искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощными КВ радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 44. № 11. С. 903–917. 2001.
- Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: изд-во Нижегородского ун-та, 468 с. 2017.
- 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 // Geophys. Res. Lett. V. 38. L08802. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL046724>
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Rietveld M.T., Häggström I., Ivanova I. M. Plasma modifications induced by an X-mode HF heater wave in the high latitude F region of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 105–106. P. 231–244. 2013.
- 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., Yeoman T.K. Comment on “Parametric Instability Induced by X-Mode Wave Heating at EISCAT” by Wang et al. (2016) // J. Geophys. Res. – Space. V. 122. P. 12570–12585. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA023880>
- Borisov N., Honary F., Li H. Excitation of plasma irregularities in the F-region of the ionosphere by powerful HF radio waves of X-polarization // J. Geophys. Res. – Space. V. 123. P. 5246–5260. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025530>
- Bryers C.J., Kosch M.J., Senior A., Rietveld M.T., Yeoman T.K. The thresholds of ionospheric plasma instabilities pumped by high-frequency radio waves at EISCAT // J. Geophys. Res. – Space. V. 118. P. 7472–7481. 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JA019429>
- Carlson H.C., Wickwar V.B., Mantas G.P. Observations of fluxes of suprathermal electrons accelerated by HF excited instabilities // J. Atmos. Terr. Phys. V. 44. P. 1089–1100. 1982.
- Frolov V.L., Erukhimov L.M., Meteleev S.A., Sergeev E.N. Temporal behaviour of artificial small-scale ionospheric irregularities: Review of experimental results // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 59. P. 2317–2333. 1997.
- Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. N.Y.: Springer-Verlag. 372 p. 1978.
- Gurevich A.V., Karashtin A.N. Self-focusing instability of plasma waves excited by powerful HF radiation // Phys. Lett. A. V. 195. P. 362–368. 1994.
- Guzdar P., Chaturvedi P., Papadopoulos K., Ossakow S. The thermal self-focusing instability near the critical surface in the high-latitude ionosphere // J. Geophys. Res. V. 103. P. 2231–2237. 1998.

- *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.
- *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.
- *Thome G.D., Blood D.W.* First observations of RF backscatter from field-aligned irregularities produced by ionospheric heating // *Radio Sci.* V. 9. № 11. P. 917–921. 1974.
- *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.