

Результаты исследований по модификации высокоширотной F-области ионосферы мощным КВ радиоизлучением комплекса EISCAT/Heating в северной Норвегии

Н.Ф. Благовещенская

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38, E-mail: nataly@aari.nw.ru

По данным комплексных экспериментов по модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating выполнено сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы. В период экспериментов мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частотах в диапазоне 4.0 – 8.0 МГц. Эффективная мощность излучения составляла 150 – 850 МВт. Детально рассмотрено поведение и характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), ленгмюровской и ионно-акустической турбулентностей и спектров узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ), регистрировавшегося на расстоянии порядка 1200 км от нагревного комплекса, при O- и X-нагреве.

Using the results of coordinated experiments on the modification of the high-latitude ionosphere by powerful HF radio emission of the EISCAT/Heating facility, effects of the impact of powerful HF radio waves of the ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) polarization on the high-latitude ionospheric F region have been compared. During the experiments, a powerful HF radio wave was radiated towards the magnetic zenith direction at frequencies within the 4.0–8.0 MHz. The effective radiated power was 150–850 MW. The behavior and features of small-scale artificial field-aligned irregularities, Langmuir and ion-acoustic turbulences and spectra of narrow-band stimulated emission, registered at distances on the order of 1200 km from the heating facility, during O- and X-heating are considered in detail.

Изучение явлений, вызванных контролируемым воздействием мощных электромагнитных волн на ионосферную плазму, относится к числу активно развиваемых направлений исследований физики ионосферы. Мощная КВ радиоволна обыкновенной поляризации (O-мода) эффективно взаимодействует с окружающей ионосферной плазмой в F2 слое в диапазоне высот между высотой отражения мощной КВ радиоволны ($f_o^2 = f_H^2$) и высотой верхнего гибридного резонанса ($f_{UH}^2 = f_H^2 - fce^2$, где f_H и fce частота нагрева и гирочастота электронов соответственно), приводя к возбуждению параметрической распадной (стрикционной) и тепловой параметрической (резонансной) неустойчивостей, которые вызывают генерацию разнообразных явлений в ионосферной плазме [1, 2]. Для модификации F-области ионосферы, как правило, используется обыкновенная поляризация (O-мода) мощной КВ радиоволны. Мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) отражается на высоте, где локальная частота плазмы $f_x^2 = f_H (f_H - fce)$, что ниже как высоты отражения КВ радиоволны O-поляризации ($f_o^2 = f_H^2$), так и высоты верхнего гибридного резонанса ($f_{UH}^2 = f_H^2 - fce^2$). Вследствие этого возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) за счет тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости не возможно. Кроме того для возбуждения параметрической распадной неустойчивости (parametric decay instability, PDI) необходимо, чтобы волновой вектор и электрическое поле волны накачки в области отражения были ориентировано параллельно локальному магнитному полю. Это реализуется только для O-волны, в то время как волновой вектор и электрическое поле

в области отражения X-волны ориентированы перпендикулярно магнитному полю [3]. Тем не менее, результаты многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating в 2009 – 2016 г.г., убедительно продемонстрировали, что мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода), инжектируемая в высокоширотную F-область ионосферы параллельно магнитному полю (в магнитный зенит) вызывает генерацию разнообразных искусственных ионосферных возмущений, которые могут превосходить по интенсивности возмущения при O-нагреве [4 - 6]. В данной работе выполнено обобщение, сравнение и анализ эффектов, возникающих в высокоширотной F-области ионосферы, при воздействии на нее мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризаций.

Характеристика экспериментов и используемых средств и методов

Для модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами использовался КВ нагревной комплекс EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$, $I=78^\circ$), расположенный в г. Тромсе, северная Норвегия [7]. Эксперименты проводились в 2009 – 2016 г.г. в дневные и вечерние часы с использованием фазированных антенных решеток «1» и «2» (ФАР 1 и 2) КВ нагревного комплекса. ФАР 1, самая эффективная антенная система данного комплекса, используется в режиме работы “super heating”. ФАР 1 работает в диапазоне частот нагрева $f_H = 5.5 - 8.0$ МГц, имеет ширину диаграммы направленности на уровне половинной мощности порядка 5-6° и обеспечивает максимальную эффективную мощность излучения $ERP = 600 - 1200$ МВт в зависимости от частоты нагрева. ФАР2, с шириной диаграммы направленности 12 -14°, используется для излучения на частотах в диапазоне $f_H = 3.9 - 5.5$ МГц и обеспечивает $ERP = 150 - 250$ МВт. Просачивание O-волны при X-нагреве и X-волны при O-нагреве не превышает 1%. В период экспериментов мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит (диаграмма направленности антенны комплекса EISCAT/Heating была наклонена на 12° от вертикали к югу).

В качестве основных диагностических средств эффектов воздействия использовался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [8], расположенный в непосредственной близости от нагревного комплекса, и когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [9] в Финляндии (63° N, 27° E), находящийся примерно на 1000 км южнее КВ нагревного комплекса в Тромсе. Измерения с помощью радара НР выполнялись в диапазоне высот от 90 до 700 км с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 1.5 или 3 км. Измерения выполнялись в направлении магнитного поля в Тромсе (магнитный зенит). CUTLASS излучал на узконаправленную антенну с шириной луча примерно 3.3°, ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе («луч» 5). Измерения проводились на трех частотах с разрешением по дальности 15 км. Для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) использовался приемный комплекс с полосой до 3 кГц, установленный на обсерватории ААНИИ вблизи г. С.-Петербург на расстоянии 1200 км от КВ нагревного комплекса. Выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в Тромсе. Карта-схема, иллюстрирующая геометрию экспериментов, приведена на рис. 1.

Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН)

В многочисленных экспериментах, выполненных специалистами ААНИИ, впервые была убедительно показана возможность генерации, исследованы характеристики и условия возникновения интенсивных МИИН при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы. При X-нагреве МИИН возбуждались не только на частотах нагрева

ниже критической частоты слоя $F2$ ($f_H / foF2 \leq 1$), что имеет место при O-нагреве, но и на частотах нагрева, существенно превышающих $foF2$ ($f_H / foF2 > 1$) на величину до ~ 2 МГц, когда X-волна уже не может отражаться от ионосферы) [4 - 6].

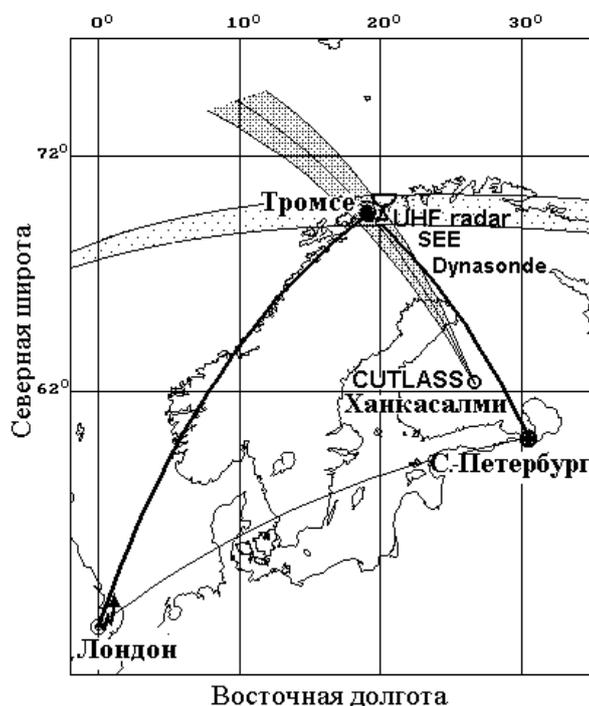


Рис.1. Карта, иллюстрирующая расположение КВ нагревного комплекса в Тромсе и диагностических средств, используемых в экспериментах ААНИИ.

В качестве примера на рис.2 приведены результаты наблюдений МИИН с помощью радара обратного рассеяния CUTLASS в Ханкасалми 6 ноября 2010 г. Рис. 2 характеризует поведение мощности рассеянных сигналов в зависимости от дальности (Range gate) и мирового времени UT на трех частотах (10, 11.5 и 13 МГц), соответствующих обратному рассеянию от МИИН с поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 15, 13$ и 11.5 м соответственно. В период эксперимента мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на частоте 4.543 МГц в направлении магнитного зенита, когда $f_H / foF2 > 1$.

Механизм возбуждения МИИН при отражении мощной КВ радиоволны O-поляризации от слоя $F2$ ионосферы объясняется в рамках теории тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [1, 2]. Необыкновенная волна (X-мода) отражается на высотах ниже верхнего гибридного резонанса и ниже высоты отражения O-волны, поэтому возбуждение МИИН за счет тепловой (резонансной) неустойчивости невозможно. Механизм возбуждения интенсивных МИИН при нагреве F -области высокоширотной ионосферы мощной КВ радиоволной X-поляризации на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя $F2$ остается не ясным и требует дальнейшего серьезного изучения. Представляется возможным предположить, что процесс генерация МИИН при X-нагреве двухступенчатый. Сначала происходит генерация крупномасштабных неоднородностей, что возможно при нагреве на частотах как ниже, так и выше $foF2$, вследствие самофокусирующей неустойчивости мощного КВ пучка [1]. Затем крупномасштабные неоднородности «разбиваются» в мелкомасштабные структуры.

Параметры ионосферной плазмы

Представляет интерес сравнить поведение электронной концентрации и температуры при излучении мощной КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации. На рис. 3 приведены результаты наблюдений с помощью EISCAT радара некогерентного рассеяния в Тромсе в период альтернативного О/Х нагрева 3 ноября 2013 г. с 15.30 до 18 UT.

SUPERDARN PARAMETER PLOT 6 Nov 2010
Hankasalmi: Beam 5

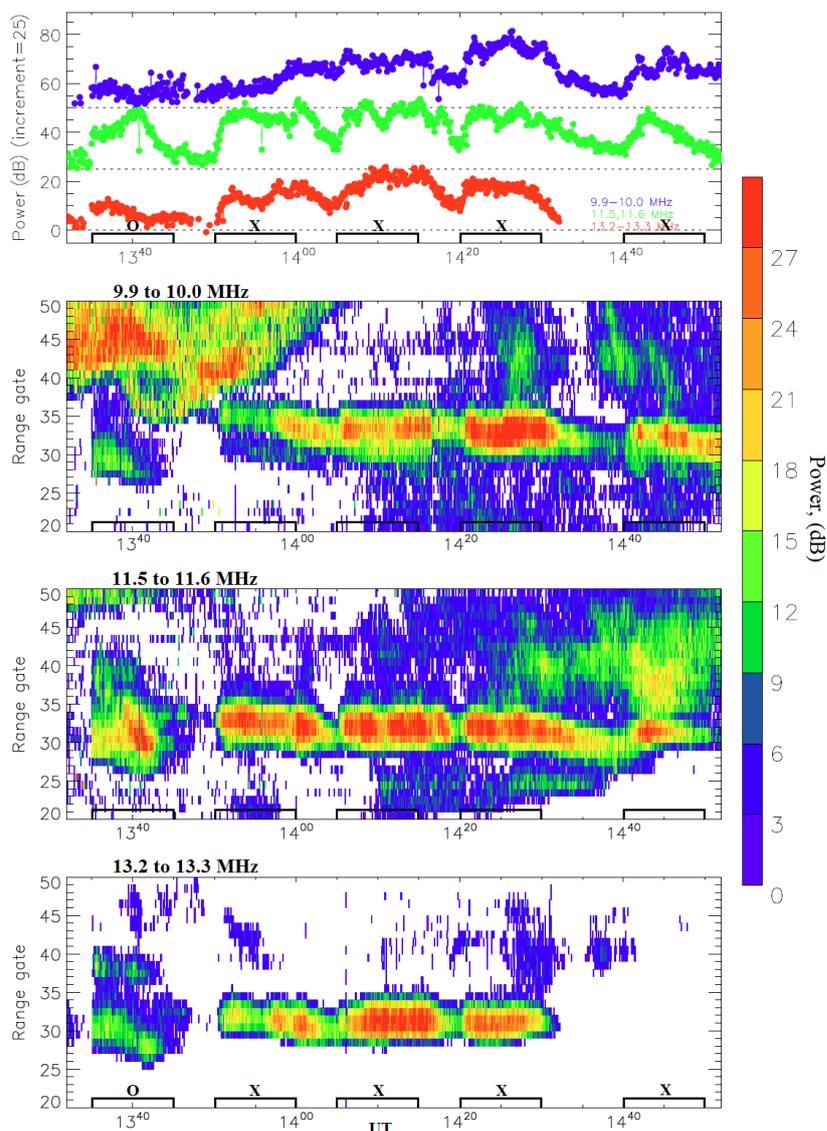


Рис. 2. Результаты наблюдений радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5) на частотах порядка 10, 11.5 и 13 МГц 6 ноября 2010 г. с 13.25 до 14.55 UT. На верхней панели показано поведение мощности рассеянных сигналов в искусственно возмущенной области ионосферы. На нижних панелях приведено поведение мощности рассеянных сигналов в зависимости от дальности (Range gate) и мирового времени UT. Дальность до центра искусственно возмущенной области ионосферы над Тромсе соответствует 33 «воротам» (Range gate). Циклы нагрева и поляризация мощной КВ радиоволны отмечены на оси времени. Эффективная мощность излучения составляла ERP=180 МВт.

В период эксперимента 3 ноября 2013 г. мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 6.2 МГц в направлении магнитного зенита на О- или Х-поляризации. С 15.30 до 17 UT частоты нагрева лежали ниже или вблизи критической частоты f_oF2 ($f_H / f_oF2 =$

0.92 – 1.05). В этих условиях возможно возбуждение эффектов как при O-, так и X-нагреве. После 17 UT, когда критические частоты упали до 5.8 МГц, проводился только X-нагрев. Анализ данных, приведенных на рис. 3, показал, что возрастания N_e в широком диапазоне высот, достигающие 100%, наблюдались только при нагреве на X-поляризации и отсутствовали при O-нагреве. Отметим, что возрастания N_e , регистрировались как при $f_H \geq foF2$, так и $f_H < foF2$.

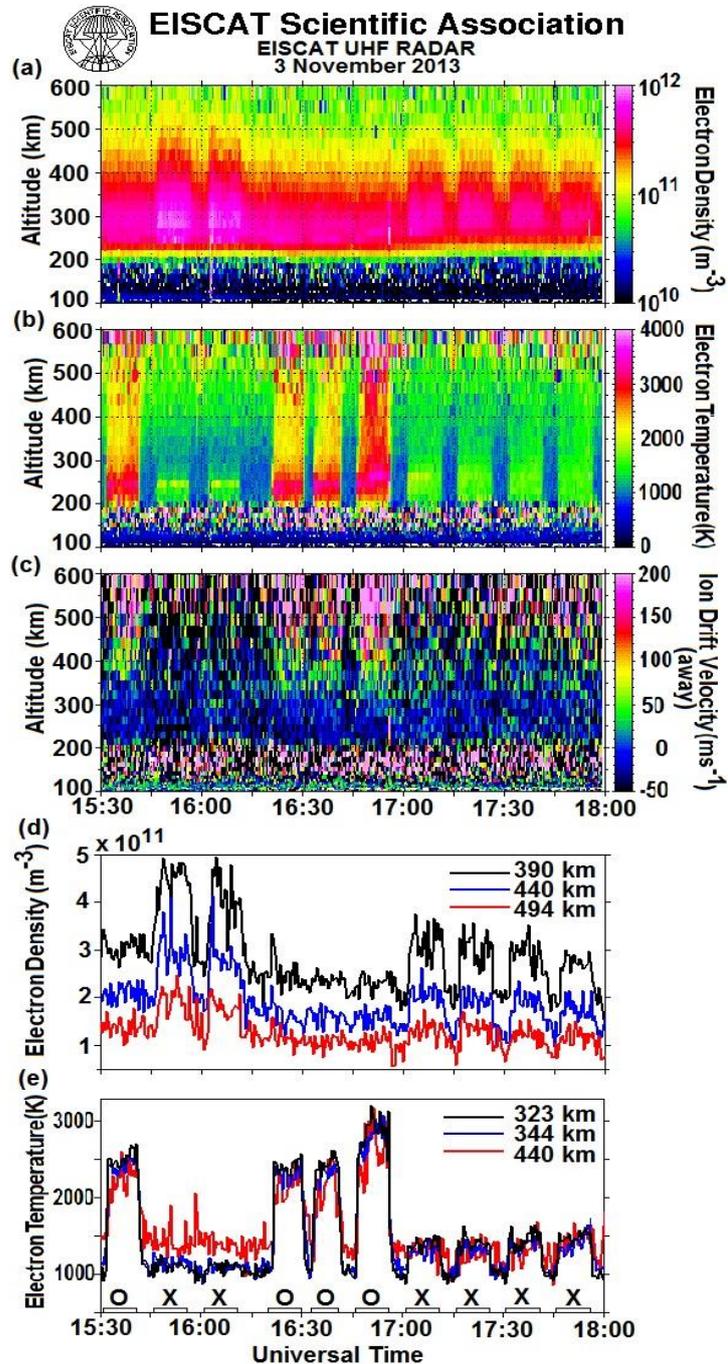


Рис.3. Высотно-временное поведение электронной плотности (N_e), температуры электронов (T_e) и скоростей ионов (V_i), а также вариации N_e и T_e на фиксированных высотах по данным радара НР в Тромсе 3 ноября 2013 г. с 15.30 до 18 UT. Мощная КВ радиоволна O- или X-поляризации излучалась на частоте 6.2 МГц в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла $ERP=450$ МВт. Циклы нагрева и поляризации мощной КВ радиоволны показаны на оси времени.

Повышения N_e сопровождались незначительным возрастанием температуры электронов T_e , которые достигали максимальных значений 40 - 60% при X-нагреве на частотах выше критической частоты ($f_H \geq foF2$). O-нагрев высокоширотной F-области ионосферы при $f_H \leq foF2$ сопровождался сильным возрастанием T_e (до 200 - 300%) и генерацией выноса потоков ионов из ионосферы.

Параметрическая распадная (стрикционная) неустойчивость

При включении КВ нагревного комплекса мощная электромагнитная (EM) волна обыкновенной поляризации (O-мода) вблизи высоты отражения трансформируется в высокочастотную ленгмюровскую (L) и низкочастотную ионно-акустическую (IA) плазменные волны, $EM \rightarrow L + IA$. Этот процесс происходит в первые ~100 мс нагрева и называется параметрической распадной неустойчивостью (parametric decay instability, PDI) [2, 3]. Радары некогерентного рассеяния радиоволн (НР) позволяют непосредственно идентифицировать возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн по появлению плазменных линий на частоте нагрева (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленных нагревом ионных линий (HF-enhanced ion lines, HEIL) в спектрах рассеянных сигналов на первом 5 с шаге измерений [2]. В наших экспериментах использовался радар НР, работающий на частоте 930 МГц, что обеспечивало обнаружение турбулентностей с масштабами $L = 0.16$ м ($L = c/2f_{rad}$, где c – скорость света, f_{rad} – частота радара).

Как показали результаты многочисленных экспериментов ААНИИ, возбуждение PDI происходит не только при O-нагреве, но и при воздействии на высокоширотную ионосферу мощной КВ радиоволны X-поляризации [5, 6]. Представляет интерес сравнить развитие PDI при O- и X-нагреве после включения КВ нагревного комплекса. Нагрев проводился на частотах ниже критической частоты слоя F2 ($f_H < foF2$).

На рис. 4 показано поведение мощности усиленных нагревом плазменных линий (HFPL) с 5 с разрешением по времени при O- и X-нагреве на частотах 4.543; 5.423; 6.2; 6.96; и 7.953 МГц за 30 с до включения комплекса EISCAT/Heating и в течение первых двух мин циклов нагрева. Мощности HFPL приведены на двух фиксированных высотах, на которых они имели максимальные значения. Из рис. 4 ясно видно, что включение O-нагрева сопровождается резким возрастанием мощности HFPL, которое достигает максимума уже на первом 5 с интервале, а затем затухает в течение нескольких последующих 5 с интервалах. Такое поведение HFPL является типичным для классической резонансной параметрической распадной неустойчивости (parametric decay instability, PDI) [2, 3], когда происходит распад мощной электромагнитной волны O-поляризации в ленгмюровскую и ионно-акустическую плазменные волны вблизи высоты отражения O-волны. PDI развивается при включении нагрева и существует в течение первых ~ 100 миллисекунд. По данным радара НР она обнаруживается в появлении усиленных нагревом плазменных и ионных линий в спектрах сигналов на первых нескольких 5 с интервалах. Затем происходит «блокировка» ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн развившимися мелкомасштабными искусственными неоднородностями, что препятствует дальнейшему развитию PDI. Такая ситуация наблюдалась в поведении HFPL на частотах нагрева $f_H = 4.543$; 5.423; 6.2 МГц (см. рис. 4). Однако при высоких эффективных мощностях излучения ($ERP > 280$ МВт) и на высоких частотах нагрева возможно возобновление возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн, которое продолжается непрерывно до конца цикла O-нагрева. Такое поведение ленгмюровских волн (усиленных нагревом плазменных линий, HFPL) наблюдалось при O-нагреве на частотах $f_H = 6.96$ МГц и 7.953 МГц (см. рис. 4).

При X-нагреве развитие HFPL принципиально отличалось от O-нагрева. Из рис. 4 видно, что эффекты включений в поведении усиленных нагревом плазменных линий не регистрировались. HFPL появлялись только через 15 – 20 с после включения, затем их интенсивность постепенно возрастала, достигая максимальных значений через 50 – 70 с после включения нагревного комплекса. Мощности HFPL в циклах X-нагрева были существенно выше по сравнению с O-нагревом.

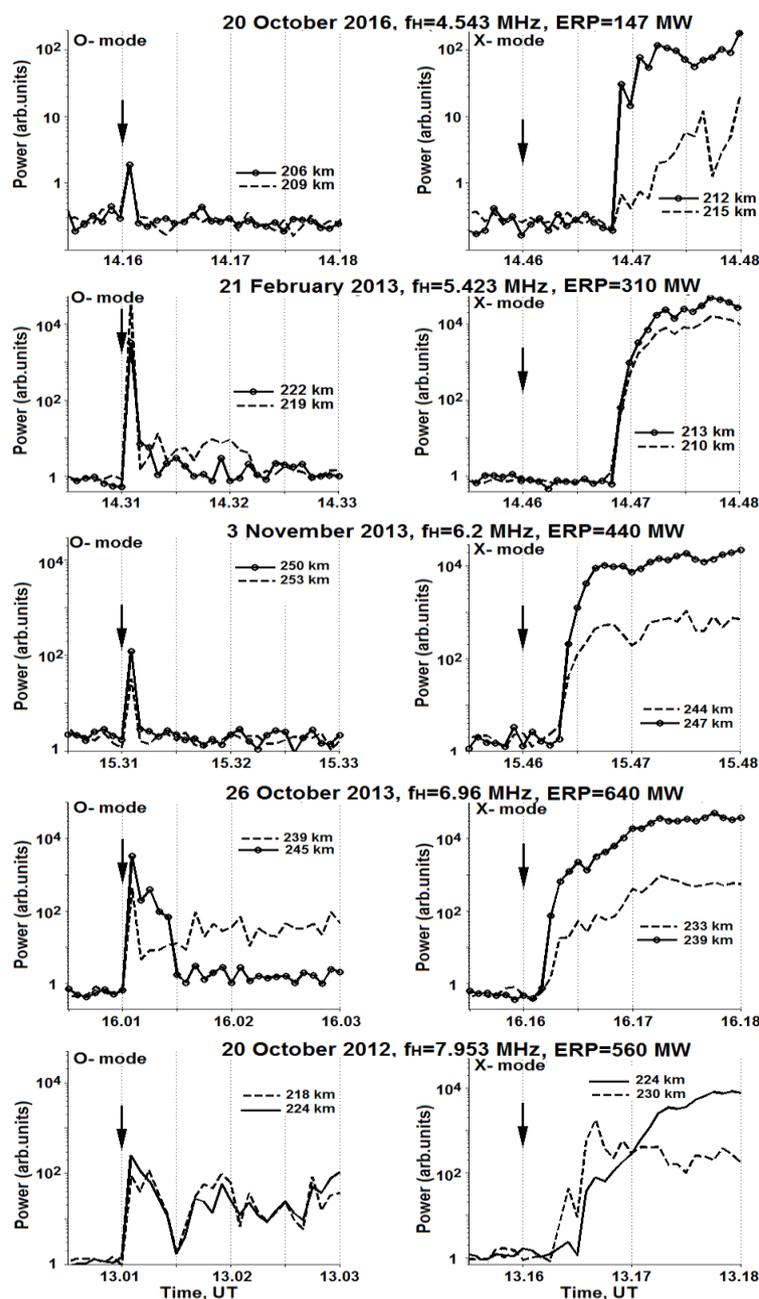


Рис.4. Поведение мощности усиленных нагревом плазменных линий (HFPL) с 5 с разрешением по времени при O- и X-нагреве на частотах 4.543; 5.423; 6.2; 6.96; и 7.953 МГц за 30 с до включения комплекса EISCAT/Heating и в течение первых двух мин нагрева. Мощности HFPL приведены на двух фиксированных высотах, на которых они имели максимальные значения.

Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ)

В экспериментах, выполненных ААНИИ на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating, впервые было обнаружено и зарегистрировано на обсерватории «Горьковская» вблизи С. Петербурга, расположенной на расстоянии порядка 1200 км от нагревного комплекса, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) при нагреве высокоширотной F -области ионосферы мощной КВ радиоволной Х-поляризации [6]. Результаты этих экспериментов показали возможность возбуждения различных спектральных компонент в спектре узкополосного (ИРИ) при Х-нагреве, таких как ионно-акустические, электростатические ионно-циклотронные и ионные Бернштейнские волны.

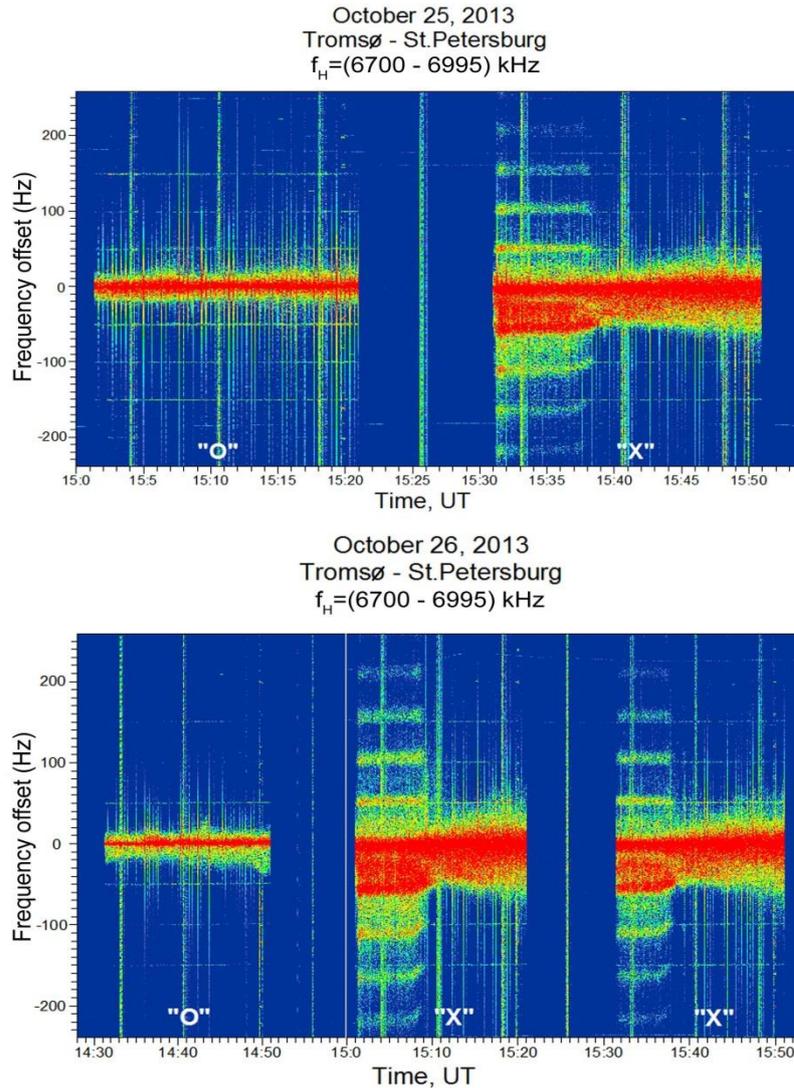


Рис.5. Спектрограмма узкополосного ИРИ в полосе ± 250 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированная на расстоянии 1200 км от комплекса EISCAT/Heating при альтернативном О/Х-нагреве 25 и 26 октября 2013 г. вблизи 5-ой гирогармоники электронов. В течение каждого 20 мин нагревного цикла производилось ступенчатое изменение частоты нагрева на 5 кГц каждые 20 с от 6700 кГц до 6995 кГц. Мощная спектральная линия на нулевой частоте соответствует частоте волны накачки. Используемая поляризация мощной КВ радиоволны показана на оси времени.

На рис. 5 показано поведение динамических спектров УИРИ на расстоянии 1200 км от нагревного комплекса при альтернативном О/Х-нагреве 25 и 26 октября 2013 г.

вблизи 5-ой гирогармоники электронов. Как видно из рис. 5, при X-нагреве на частотах ниже частоты 5-ой гирогармоники электронов (с 15.31 – 15.38 UT 25 октября и 15.01 – 15.08 UT и 15.31 – 15.37 UT 26 октября 2013 г.) регистрировалось многообразие интенсивных дискретных спектральных линий, как при отрицательных, так и положительных отстройках от нулевой частоты разнесенных друг от друга примерно на гирочастоту ионов (атомарного кислорода O^+). Интенсивность ионных гирогармоник постепенно затухала при переходе к более высоким номерам гармоник. В поведении гармоник электростатических ионно-циклотронных волн наблюдалась асимметрия в зависимости от знака частотной отстройки. Механизм генерации ионных гирогармонических структур может быть связан с развитием параметрической неустойчивости, при которой мощная электромагнитная волна X-поляризации в области отражения трансформируется в высокочастотную электронную Бернштейновскую (ЕВ) и низкочастотную ионную Бернштейновскую (ИВ) плазменные волны. При O-нагреве кроме сигнала на нулевой частоте, соответствующей частоте волны накачки, не наблюдалось дополнительных спектральных линий.

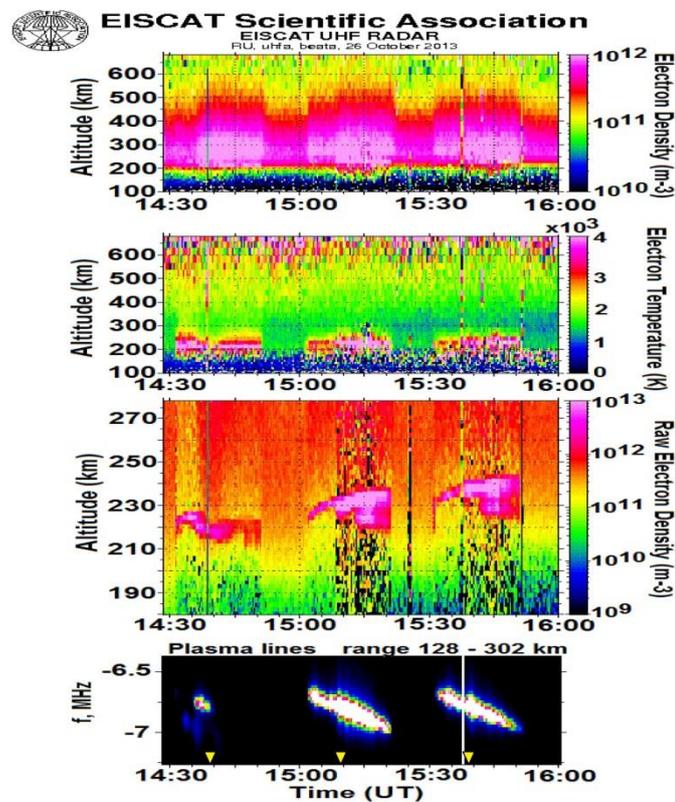


Рис. 6. Поведение электронной концентрации и температуры (верхние две панели), интенсивностей усиленных нагревом ионных линий (третья панель сверху) и интенсивностей плазменных линий (нижняя панель) по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе 26 октября 2013 г. при нагреве вблизи 5-ого гирорезонанса. В циклах нагрева 14.31 – 14.41 UT мощная волна излучалась на O-поляризации, а в циклах 15.01 – 15.11 и 15.31 – 15.41 UT - на X-поляризации. Стрелками на нижней оси времени отмечены моменты времени, когда частота нагрева проходила через 5-ую гирогармонику электронов ($f_H = 5f_{ce}$).

Явления, связанные с эффектами гирорезонанса наблюдались не только в поведении спектральных компонент УИРИ. Регистрация УИРИ сопровождалась измерениями с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн (на частоте 930

МГц) в Тромсе и КВ радара CUTLASS. На рис.6 показано поведение параметров ионосферной плазмы по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе 26 октября 2013 г. Из рис. 6 следует, что эффекты гирорезонанса проявляются по-разному при О- и Х-нагреве. Так при О-нагреве на частотах $f_H \geq 5f_{ce}$ интенсивность усиленных нагревом плазменных линий падает, в то время как при Х-нагреве – резко возрастает. По данным измерений радара CUTLASS установлено, что при О-нагреве вблизи гирорезонанса ($f_H \approx 5f_{ce}$) происходит подавление МИИН, а при Х-нагреве – их усиление [10].

Результаты выполненных исследований ААНИИ на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating убедительно продемонстрировали возможность создания интенсивных искусственных ионосферных возмущений и повторяемость наблюдаемых эффектов. Важно подчеркнуть, что при нагреве F -области ионосферы мощной КВ радиоволной необыкновенной поляризации (Х-мода) возмущения в ионосфере создаются как на частотах ниже, так и выше критической частоты слоя $F2$. Принципиально важным для Х-нагрева является излучение мощной КВ радиоволны в магнитный зенит. Только в этом случае, в отличие от О-нагрева, создаются интенсивные возмущения в высокоширотной F -области ионосферы.

Практическое значение исследований искусственных ионосферных возмущений заключается в изучении их влияния на работу телекоммуникационных систем наземного и космического базирования, в поиске возможностей контроля и модификации процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия, в необходимости определения предельных электромагнитных нагрузок на ионосферу.

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007. Т.177. №11. С.1145 – 1177.
2. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // Physics Reports. 1989. V. 179. P. 79 – 209.
3. Kuo S., Snyder A., and Lee M. C. Experiments and theory on parametric instabilities excited in HF heating experiments at HAARP // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. 062902, doi: 10.1063/1.4885642.
4. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. et al. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. doi: 10.1029/2011GL046724.
5. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kosch M., et al. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 10483–10498. doi:10.1002/2014JA020658.
6. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. et al. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 135. P. 50–63.
7. Rietveld M. T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // Radio Sci. 2016. V. 51. № 9. P. 1533–1546. doi:10.1002/2016RS006093.
8. Rishbeth H, and van Eyken T. EISCAT: Early history and the first ten years of operation // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 525 – 542.
9. Lester M., Chapman P. J., Cowley S. W. H et al. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 459 -473.
10. 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. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2017. V. 155. P. 36–49.