

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Дистанционная диагностика искусственных ионосферных возмущений в высоких широтах

А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова

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

Приведены результаты дистанционной диагностики эффектов модификации высокоширотной ионосферы волной накачки КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating. Дана краткая характеристика средств и методов дистанционной диагностики, рассмотрены условия генерации и поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИИИ) методом ракурсного рассеяния сигналов при X- и O-нагреве. Представлены результаты спектрального анализа сигналов нагревного комплекса при различных режимах излучения.

Ключевые слова: дистанционное диагностирование, искусственные ионосферные неоднородности, метод ракурсного рассеяния

Remote diagnostic of artificial ionospheric disturbances at high-latitudes

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

Arctic and Antarctic Research Institute

Results of HF-induced effects produced by EISCAT/Heating facility, observed from long-distance diagnostics, are presented. The features of the tools and methods for long-distance diagnostics are briefly described. The generation conditions and behaviors of the small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAls) induced by O- and X-mode HF pump waves are considered. Results of the spectral analysis of the HF heater signals are presented.

Keywords: remote diagnostics, artificial ionospheric inhomogeneities, angle scattering method

В настоящее время активно проводятся исследования в области искусственного воздействия на высокоширотную ионосферу при помощи мощного КВ радиоизлучения [1]. В высоких широтах исследования выполняются на двух КВ нагревных комплексах: HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program) и стенде EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия), принадлежащим Европейской научной Ассоциации EISCAT.

С 2019 г. резко активизировались исследования на комплексе HAARP. Выделено приоритетное финансирование на проведение исследований по проекту HAARP в рамках программы Arctic Research in the National Interest (США). Европейская научная Ассоциация EISCAT на территории Норвегии строит радар некогерентного рассеяния радиоволн нового поколения EISCAT_3D, предназначенный для эффективного диагностирования ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения. EISCAT_3D обладает уникальными техническими возможностями и не имеет аналогов в мире. Рассматриваются технические предложения по строительству нового КВ нагревного комплекса, совмещенного с радаром EISCAT_3D, который позволит в полной мере реализовать возможности радара. Мотивация строительства нового КВ нагревного комплекса объясняется научной результативностью исследований по нагревной тематике.

В работе представлен краткий обзор результатов дистанционного диагностирования (ДД) эффектов воздействия мощного КВ радиоизлучения нагревного комплекса EISCAT/Heating. ДД являлось составной частью комплексных исследований искусственных ионосферных эффектов, в рамках которых привлекались разнообразные

средства диагностики. Комплексный подход позволил дать однозначную точную оценку наблюдаемых явлений и получить их количественные характеристики.

Исследования выполнялись в рамках различных грантов и ФЦП «Геофизика». В 2008 г. было заключено Соглашение между ФГБУ «ААНИИ» (Росгидромет) и Европейской научной ассоциацией EISCAT, которое позволило регулярно проводить работы на всех технических средствах EISCAT по собственным программам в объеме оплаченной квоты часов.

Средства и методы наблюдений. Нагревной комплекс EISCAT/Heating представляет собой универсальный научно-исследовательский инструмент для искусственной модификации высокоширотной ионосферы [2]. Нагревной комплекс состоит из двенадцати радиопередатчиков с мощностью в режиме непрерывного излучения до 100 кВт. Излучение мощной волны накачки производится при помощи одной из трех антенных систем. Каждая антенная система представляет собой фазированную антенную решетку (ФАР), состоящую из ортогональных широкополосных диполей. Наиболее эффективная из антенных систем, ФАР 1, работающая в частотном диапазоне от 5.4 до 8 МГц, состоит из 144 излучателей расположенных квадратом 12×12 и имеет коэффициент усиления до 31 дБи, Ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) составляет порядка $5 - 6^\circ$, что обеспечивает максимальную эффективную мощность излучения $P_{эфф}$ до 1.2 ГВт. В плоскости запад - восток ДН неподвижна, а в плоскости север - юг может отклоняться на $\pm 20^\circ$ от вертикали. Антенная система ФАР 2, с шириной ДН порядка $12 - 14^\circ$, работает в диапазоне 3.8 – 5.4 МГц и обеспечивает $P_{эфф}$ до 250 МВт. ФАР 3 имеет рабочий диапазон частот такой же, как и ФАР 1, но ширина главного лепестка ДН составляет порядка $12 - 14^\circ$ и $P_{эфф}$ до 280 МВт.

Ортогональность диполей антенных решеток формируют круговую поляризацию излучаемой волны накачки. Если вращение годографа вектора электрического поля E волны накачки совпадает с направлением вращения электрона, то такая волна имеет необыкновенную (Х-мода) поляризацию, если вращение происходит в противоположную сторону, то волна обладает обыкновенной (О - мода) поляризацией.

Важным обстоятельством является техническое оснащение нагревного комплекса средствами диагностирования фоновых геофизических условий и эффектов активных воздействий. Непосредственно рядом со стендом установлен целый ряд измерительного оборудования: радары некогерентного рассеяния радиоволн, камера всего неба, ионозонд вертикального зондирования ионосферы, приемник для регистрации широкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы.

Дистанционное диагностирование проводилось собственными техническими средствами, размещенными на научно-исследовательской станции ФГБУ «ААНИИ» и станциях Росгидромета. Осуществлялись исследования генерации и поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) методом ракурсного рассеяния диагностических КВ сигналов [3], а также непосредственно контроль и анализ спектральных характеристик радиоизлучения нагревного комплекса.

Диагностика МИИН методом ракурсного рассеяния радиосигналов проводилась при помощи многоканальных КВ доплеровских комплексов и аппаратуры наклонного радиозондирования ионосферы (НЗИ) [4]. Прием ракурсно-рассеянных диагностических сигналов доплеровскими комплексами осуществлялся на НИС «Горьковская», расположенной в Ленинградской области (60.27° с. ш., 29.38° в.д.) и станции Ловозеро (68.00° с. ш., 35.02° в.д.) в Мурманской области.

Расстояние от нагревного комплекса EISCAT до НИС «Горьковская» составляет 1140 км. Для приема радиосигналов диагностических станций и комплекса EISCAT/Heating на НИС «Горьковская» установлена антенна типа двойной

горизонтальный ромб. Ширина ДН антенны на частоте 15 МГц составляет 20°, усиление – 19 дБи.

Измерения параметров ракурсно-рассеянных на МИИН сигналов при помощи многоканального доплеровского комплекса организованы по схеме многопозиционной радиолокации с разнесением передающих и приёмного устройств. В качестве передающих устройств используются радиопередатчики мировой сети радиовещательных станций КВ радиодиапазона работающих в режиме амплитудной модуляции. Расписание вещания, местоположение и другие характеристики излучения радиовещательных станций представлены на сайте HighFrequencyCoordinationConference, <http://www.hfcc.org>. Во время экспериментальных работ использовалось более трех десятков реперных станций, расположенных в Европе, Азии и Северной Америке, наблюдения проводились на диагностических радиотрассах протяженностью от 1930 до 7500 км в частотном диапазоне 9 – 22 МГц.

Многоканальный доплеровский комплекс «Спектр», установленный на НИС «Горьковская», построен на базе радиоприемных устройств ICOM IC-R75. В состав комплекса входит восемь измерительных и один обзорный канал. Программное обеспечение комплекса осуществляет синхронную спектральную обработку регистрируемых сигналов в полосе 250 Гц и трехмерное отображение результатов анализа в координатах частота – время – амплитуда, что предоставляет оператору возможность оценить результаты дистанционной диагностики. Построение сигналов в виде спектрограмм с произвольным временным разрешением позволяет детально исследовать динамику нестационарных процессов в реальном времени. Для оперативной настройки на диагностические репера в комплекс загружается файл сетки вещания КВ радиостанций с указанием местоположения и характеристик излучения. ПО оперативно отображает текущую сетку вещания реперных станций, а также расписание на несколько часов вперед, осуществляет сортировку станций по времени работы, мощности, направлению излучения и местоположению. Интерфейс программы позволяет быстро найти необходимые работающие диагностические станции и одним «кликом» перестроить радиоприемные устройства комплекса на его частоту. Отображение сетки вещания на некоторое время вперед делает возможным выбор перспективных реперов на последующее время экспериментов.

Мобильный доплеровский комплекс для диагностики МИИН был установлен на станции Ловозеро в Мурманской области. Расстояние от нагревного стенда до пункта приема составляло 660 км. Основным отличием мобильного КВ доплеровского комплекса от комплекса «Спектр» является только четыре измерительных канала. Комплекс работал на V-образную антенну, ориентированную на Тромсё с коэффициентом усиления 7 дБ.

Ракурсно-рассеянные на МИИН сигналы (PPC) регистрировались в периоды излучения КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating на спектрограммах в виде дополнительных треков, сдвинутых в отрицательную или положительную сторону от нулевой частоты, соответствующей распространению сигнала по дуге большого круга. Величина и знак доплеровского смещения PPC определялись вектором скорости МИИН в искусственно возмущенной области ионосферы.

Дистанционное диагностирование эффектов воздействия нагревного стенда EISCAT/Heating проводилась также при помощи комплексов НЗИ сигналами с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) [4]. Аппаратура предназначена для измерения методом наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) параметров ионосферного канала распространения КВ радиоволн. В периоды проведения экспериментов осуществлялся прием диагностических сигналов, как сетевых станций НЗИ Росгидромета [5], так и

радиопередатчиков, установленных в обсерватории Соданкюла, Финляндия и на территории Швеции (65.82° с.ш., 21.70° в.д.). Признаком проявления эффектов воздействия мощных КВ радиоволн на ионосферу является наличие дополнительных треков на ионограммах, вследствие рассеяния сигналов НЗИ на МИИН. Дополнительные треки наблюдаются на ионограммах в моменты работы нагревных комплексов, и отсутствуют в паузах; имеют частотный диапазон, зависящий от поперечных размеров МИИН l_{\perp} , пространственного расположения МИИН относительно дуги большого круга между передатчиком и приемником, моды распространения радиосигнала.

Для исследования сигналов нагревных комплексов на НИС «Горьковская» установлена разработанная в ААНИИ аппаратура регистрации радиоизлучения от нагревного комплекса (АПР). АПР также построена на основе радиоприемного устройства IC-R75 и представляет собой анализатор спектра декаметрового диапазона длин волн. Оцифровка принимаемых сигналов осуществляется на третьей ПЧ при помощи 18-ти разрядного АЦП, работающего в режиме субдискретизации. Программное обеспечение АПР позволяет в реальном масштабе времени проводить спектральный анализ КВ сигналов, отображать их мгновенные спектры и спектры в координатах частота – время – амплитуда в выбранной полосе частот, а также запись регистрируемых сигналов. ПО АПР позволяет осуществлять сканирование различных диапазонов радиочастот с выбранным шагом по частоте, времени и заданной периодичностью, что важно при анализе нагревных сигналов в режиме с быстрым изменением частоты нагревного сигнала в течение цикла излучения.

Результаты. Генерация МИИН является одним из основных эффектов, возбуждаемых мощной КВ радиоволной. Большой объемполученного экспериментального материала позволил провести комплексный анализ и сравнить результаты ДД эффектов нагрева высокоширотной ионосферы мощной КВ радиоволной обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации.

При нагреве на частотах ниже критической частоты слоя f_oF2 ($f_H / f_oF2 \approx 0.89 - 0.95$) возбуждение МИИН возможно при использовании как О-, так и Х- моды поляризации. Сравнивая интенсивности РРС, можно отметить, что мощности сигналов, рассеянных на МИИН при излучении на О-моду волны накачки в среднем на 4 - 10 дБ выше, чем на Х-поляризации. Пороговые величины электрических полей мощной КВ радиоволны в ионосфере, необходимые для генерации искусственных ионосферных неоднородностей, составляют $E_{МИИН} \approx 0.29 - 0.31$ В/м для О-нагрева и $E_{МИИН} \approx 0.52 - 0.54$ В/м – при Х-нагреве. Таким образом, для возбуждения МИИН при Х-нагреве необходимы более высокие значения порогового электрического поля. Пример зарегистрированных РРС на трассе Каши (Китай)– Тромсе – Санкт-Петербург приведен на рис. 1а. Мощная КВ радиоволна О-моды поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4544 кГц циклами две минуты нагрев, одна минута пауза. Мощность передатчиков нагревного стенда изменялась каждые три минуты: 4, 8, 20, 40, 60, 80, 60, 40, 20, 8кВт.

При нагреве на частотах выше критической частоты слоя f_oF2 (до 2 МГц) возбуждение МИИН возможно только при использовании Х- моды поляризации [6]. В этих условиях возбуждаются исключительно интенсивные МИИН с большим временем релаксации, особенно при низких частотах нагрева (4 – 5.5 МГц).

Особенностью МИИН, генерируемых Х-волной, является большое время релаксации, которое может достигать нескольких минут в отличие от МИИН возбуждаемых на О-моду, время жизни которых, составляет единицы секунд после выключения нагревного комплекса. Наблюдается значительная разница во временах релаксации МИИН при Х-поляризации, возбуждаемых на высоких ($f_H = 5,5-8$ МГц) и

низких ($f_H = 4-5,0$ МГц) частотах нагрева. Время релаксации МИИН, возбуждаемых в первом случае не превышают 3 минут, тогда как оно может достигать значений, превышающих 5-минут, во втором. Времена нарастания и релаксации рассеянных на МИИН сигналов при X- нагреве существенно зависят от «предыстории» воздействия волны накачки. При «холодном» старте (первый цикл нагрева) время образования МИИН, то есть нарастания интенсивности рассеянного на МИИН сигнала составляет 60–70 с, а при $f_H > f_oF2$ может достигать 150 с. В последующих циклах нагрева времена нарастания составляют единицы секунд, а время релаксации увеличивается. Спектры рассеянных на МИИН сигналов с большими временами релаксации приведены на рис. 1б. Нагревной комплекс излучал циклами 10 минут нагрев / 5 минут пауза на частоте 4544 кГц X-моды поляризации. PRC регистрировались и после прекращения воздействия волны накачки. Время релаксации МИИН составляло более 3 минут.

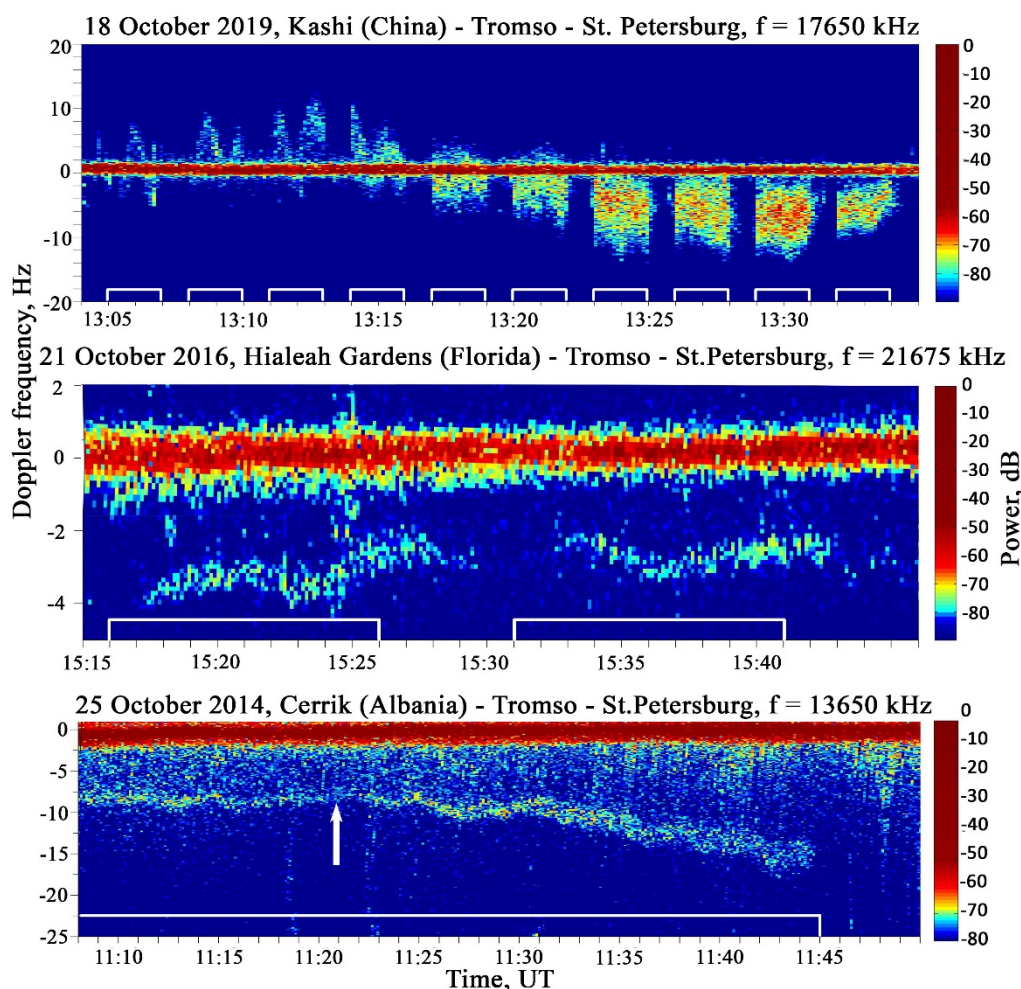


Рис. 1. Результаты наблюдения PRC на МИИН доплеровским комплексом на различных радиотрассах. Циклы излучения волны накачки комплекса EISCAT/Heating обозначены белыми прямоугольниками. а) 18 октября 2019г., трасса Каша – Тромсе – Санкт-Петербург, частота 17650 кГц; б) 21 октября 2016г., трасса Флорида (США) – Тромсе – Санкт-Петербург, частота 21675 кГц; в) 25 октября 2014г., трасса Церрик (Албания) – Тромсе – Санкт-Петербург, частота 13650 кГц.

Одним из направлений исследований по взаимодействию мощной волны накачки с ионосферной плазмой являются эксперименты, в которых частота излучающей волны находится в окрестности высот двойного резонанса. При двойном резонансе наблюдается равенство между частотой нагрева f_H , частотой, кратной гирочастоте

электронов nf_{ce} и верхней гибридной частотой f_{UH} , $f_H = nf_{ce} = f_{UH}$, где $f_{UH} \sim (f_p^2 + f_{ce}^2)^{1/2}$, f_p – плазменная частота ионосферы и f_{ce} – гирочастота электронов на высоте верхнего гибридного резонанса (UH). Характерной особенностью таких экспериментов являлось изменение частоты излучения в течение цикла нагрева. Время прохождения частоты излучения через гирорезонанс (частота нагрева равна гармоникам гирочастоты электронов) определялась по подавлению интенсивностей МИИН. Пример динамических доплеровских спектров, зарегистрированных при проведении подобных экспериментов, приведен на рис. 1в. Нагревной комплекс излучал циклами 45 минут нагрев / 15 мин пауза на О-моду поляризации волны накачки. Частота излучения изменялась от 5578 кГц до 5338.7 кГц с шагом 2688.76 Гц / 30 с. При излучении нагревного комплекса на частоте, близкой к частоте двойного резонанса $f_H = 4f_{ce} = f_{UH}$, с 11.20 до 11.22 UT (обозначен стрелкой) наблюдалось почти полное подавление генерируемых МИИН.

Сравнение результатов ДД показало, что вблизи частоты гирорезонанса МИИН более крупных масштабов с $l_f \approx 12 - 15$ м подавляются сильнее, чем более мелких масштабов ($l_f \approx 7.5 - 9$ м). Интенсивность подавления МИИН зависит от номера гирорезонанса и уменьшается с его увеличением. При этом, на шестом гирорезонансе подавление практически отсутствовало [7, 8].

Сопоставление результатов наблюдений РРС и зарегистрированного излучения нагревного комплекса делает ДД более эффективной. Контроль за излучением нагревного стенда EISCAT/Heating осуществляется на НИС «Горьковская» путем регистрации и спектрального анализа сигналов нагревного комплекса.

Прием нагревных сигналов проводился при любой солнечной активности в спокойных и возмущенных магнитных условиях. Пример зарегистрированного 18 октября 2019 г. сигнала нагревного комплекса EISCAT/Heating приведен на рисунке 2а. Стенд излучал на частоте 4544 кГц циклами две минуты нагрев, одна минута пауза на О-моду поляризации в магнитный зенит.

В экспериментах, направленных на изучение свойств генерации искусственного низкочастотного излучения в диапазоне КНЧ – ОНЧ, нагревной стенд работал в одном из двух режимов, либо с использованием амплитудной модуляции низкочастотным сигналом волны накачки, либо «бит-модуляции» – непрерывном немодулированном излучении на двух частотах f_{H1} и f_{H2} . Вторичное низкочастотное излучение на частоте модулирующего сигнала или сигнала на разностной частоте $|f_{H1} - f_{H2}|$, в случае «бит-модуляции», возникает в результате модуляции проводимости искусственно возмущенной области, и как следствие, ионосферных токов [9].

Результаты наблюдений свидетельствуют, что искусственный низкочастотный сигнал преимущественно регистрировался на частотах в диапазоне от 500 Гц до 5000 Гц. Наиболее благоприятными для генерации искусственного сигнала условиями является наличие спорадического E слоя ионосферы и интенсивного электроджета [10].

На рисунке 2б представлен пример зарегистрированного амплитудно-модулированного сигнала нагревного комплекса EISCAT/Heating 26 октября 2014 г. Комплекс излучал на частоте 4040 кГц циклами 15 мин нагрев / 5 мин пауза на X-моду поляризации. В каждом цикле нагрева частота модуляции изменялась через 5 мин и составляла 1017 Гц, 2017 Гц и 3017 Гц. Поскольку модуляция осуществлялась меандром, то при модуляции частотой 1017 Гц в спектре АМ сигнала наблюдаются гармоники на частотах 2034 Гц (2-ая гармоника) и 3051 Гц (3-я гармоника).

Серии экспериментов, выполненных на комплексе EISCAT/Heating, позволили впервые обнаружить, что при нагреве высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации (X-мода) на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 ($f_H < foF2$ и $f_H > foF2$), могут возбуждаться различные

спектральные компоненты узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в диапазоне частот порядка ± 1 кГц относительно частоты волны накачки [6]. В экспериментах УИРИ регистрировались на удалении более 1000 км от КВ нагревного комплекса [11]. Это принципиально важный результат, свидетельствующий о возможности распространения низкочастотных сигналов из искусственно возмущенной области ионосферы над нагревным комплексом на большие расстояния практически без затухания.

На рисунке 2с приведены динамические спектры нагревного сигнала комплекса EISCAT/Heating, зарегистрированные на обсерватории ААНИИ «Горьковская» под Санкт-Петербургом 28 октября 2013г. Комплекс излучал волну накачки необыкновенной поляризации на частоте 6960 кГц циклами 10 минут нагрев / 5 минут пауза. В циклах нагрева помимо основной частоты излучения нагревного комплекса (соответствует нулевой частоте) наблюдалась дополнительная гармоника в частотном диапазоне $-(40\div 60)$ Гц относительно нулевой частоты. Спектральный состав УИРИ зависит от отношения f_H / f_oF_2 и моды волны накачки. Одним из возможных механизмов генерации дискретных компонент в спектре УИРИ может быть рассеяние Бриллюэна волны накачки на возбуждаемых электростатических ионно-циклотронных волнах [12].

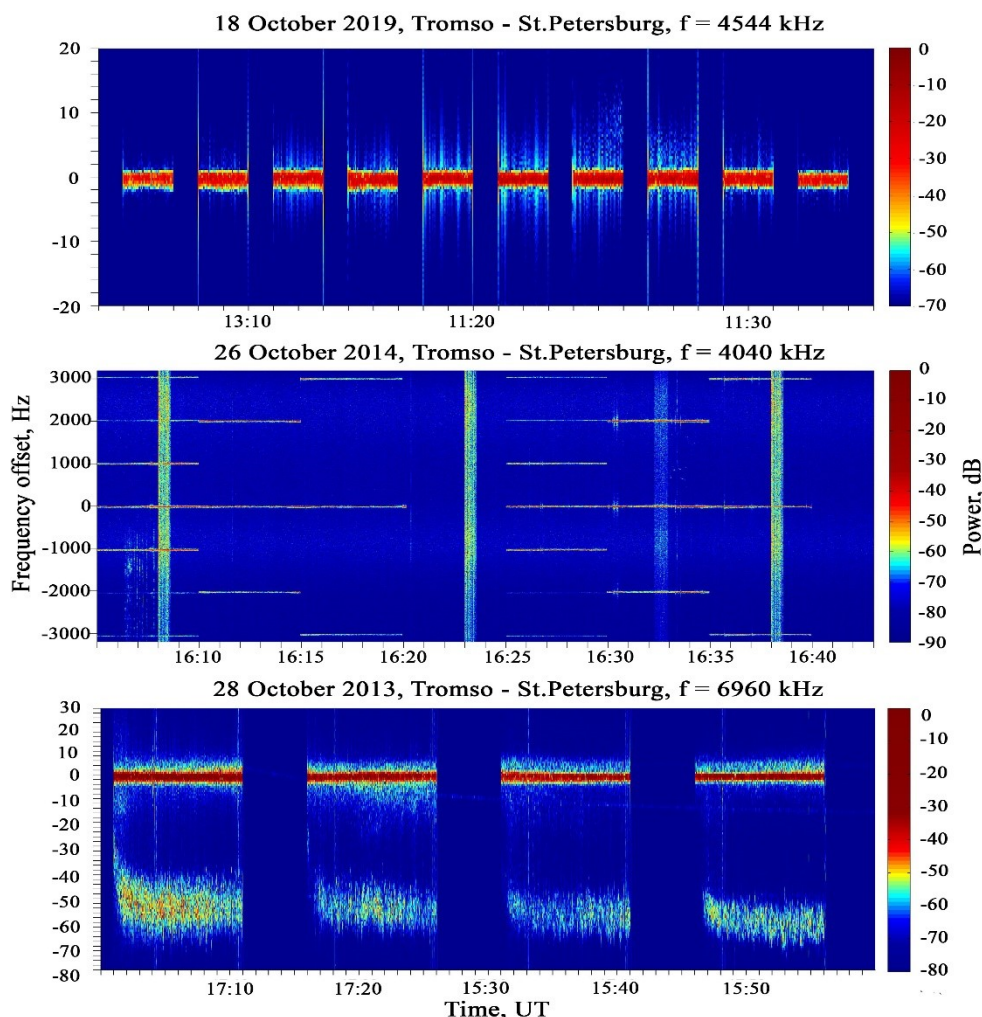


Рис. 2. Динамические спектры зарегистрированного радиоизлучения нагревного комплекса EISCAT/Heating: а) 18 октября 2019г, комплекс излучал в магнитный зенит на частоте 4544 кГц циклами 2 минуты нагрев / 1 минута пауза на О-моды поляризации; б) 26 октября 2014г., комплекс излучал на частоте 4040 кГц циклами 15 мин нагрев / 5 мин

пауза на X-моду поляризации; в) 28 октября 2013г, комплекс излучал на частоте 6960 кГц циклами 10 минут нагрев / 5 минут пауза.

Приведены результаты дистанционной диагностики эффектов модификации высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами. Эксперименты выполнялись при различных режимах нагрева: поляризации мощной КВ радиоволны, направлении излучения, длительности циклов нагрева и пауз, отношении частоты нагрева к критической частоте слоя $F2$ ($f_H / foF2$). Результаты экспериментов на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating свидетельствуют о регулярности и повторяемости эффектов воздействия мощных КВ радиоволн на высокоширотную ионосферу. Показано, что происходит сильная модификация F -области высокоширотной ионосферы в поле мощной КВ радиоволны как обыкновенной (О-мода), так и необыкновенной поляризации (Х-мода). На частотах нагрева $f_H \leq foF2$ интенсивность МИИН при О-нагреве больше, чем при Х-нагреве. На частотах нагрева, выше критической частоты слоя $F2$ ($f_H > foF2$) МИИН возбуждаются только в поле мощной КВ радиоволны Х-поляризации. Продемонстрировано, что волна накачки Х-поляризации может инициировать генерацию УИРИ при излучении в направлении магнитного поля Земли на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя $F2$ ($f_H < foF2$ и $f_H > foF2$).

Литература

1. *Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A. et al.* Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // *Space Sci Rev.* 2018. V. 118. P. 1 - 122. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
2. *Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A.* New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Science.* 2016. V. 51(9). P. 1533-1546.
3. *Благовещенская Н.Ф.* Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С. Петербург: Гидрометеиздат 2001. 288 с.
4. *Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В.* ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // *Известия вузов. Радиофизика.* 2003. Т. 46. № 11. С. 919 – 952.
5. *Рогов Д.Д., Выставной В.М.* Исследование параметров распространения декаметровых радиоволн на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в арктическом регионе РФ // *Мир измерений.* 2014. №7. С.20 – 26.
6. *Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Каяткин В.Н., Йоман Т.К., Хагстром И.* Сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации на высокоширотную F -область ионосферы // *Космические исследования.* 2018. Т. 56 (1). С. 14 – 29.
7. *Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Кош М., Сениор А., Риевельд М.Т., Йоман Т.К., Хагстром И.* Явления в высокоширотной F -области ионосферы, возникающие при нагреве на частотах вблизи четвертой гирогармоники электронов // *Известия вузов. Радиофизика.* 2014. Т.57. №1. С.1 – 22.
8. *Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Риевельд М.Т., Йоман Т.К., Хагстром И.* Эффекты модификации высокоширотной F -области ионосферы мощными КВ радиоволнами на частотах вблизи пятой и шестой гирогармоник электронов // *Известия вузов. Радиофизика.* 2015. Т. 58. № 8. С. 623 – 650.
9. *Barr R., Stubbe P.* ELF and VLF wave generation by HF heating: A comparison of AM and CW techniques // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1997. V. 59. P. 2265 – 2279. doi:10.1016/S1364-6826(96)00121-6.
10. *Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Корниенко В.А. и др.* Эффекты модификации высокоширотной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением. 2.

Результаты координированных спутниковых и наземных наблюдений // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 2. С. 97 – 112.

11. *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. Sol.-Terr. Phys.*. 2015. V. 135. P. 50 – 63.

12. *Bernhardt P. A., Selcher C. A., Lehmberg R. H., Rodriguez S., Thomason J., McCarrick, M., Frazer G.* Determination of the electron temperature in the modified ionosphere over HAARP using the HF pumped Stimulated Brillouin Scatter (SBS) emission lines // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 4409–4427.