

УДК 551.510.535, 551.509.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ КВ-РАДИОВОЛН НАГРЕВНОГО СТЕНДА EISCAT, ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

И.М. Егоров, А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
egorovneva@gmail.com

INVESTIGATIONS OF HF-INDUCED IONOSPHERIC DISTURBANCES AT EISCAT BY USING REMOTE SENSING DIAGNOSTIC METHODS

I.M. Egorov, A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
egorovneva@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты исследований генерации ионосферных возмущений, вызванных воздействием мощных коротковолновых радиоволн нагревного стенда EISCAT (далее нагревный стенд). Приводятся также характеристики технических средств регистрации, методов дистанционной диагностики, условий проведения экспериментов и режимов работы нагревного стенда. Представлены результаты спектральной обработки диагностических сигналов и сигналов нагревного стенда, полученных дистанционными методами на расстоянии более 1000 км. Показана взаимосвязь режимов излучения нагревного комплекса с характеристиками мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы.

Ключевые слова: КВ нагревный комплекс, ракурсно-рассеянные сигналы, искусственные ионосферные неоднородности, доплеровский метод, искусственное радиоизлучение ионосферы.

Abstract. The results of studies of HF-induced ionospheric disturbances by the EISCAT Heating facility (hereinafter referred to as the Heating facility) are presented. The characteristics of technical means of registration, methods of remote diagnostics, conditions for conducting experiments and modes of operation of the Heating facility are also given. The results of spectral processing of diagnostic signals and signals of the Heating facility obtained by remote methods at a distance of more than 1000 kilometers are shown. The relationship between the modes of the Heating complex and the characteristics of ionospheric disturbances and narrowband SEE is shown.

Keywords: ionospheric modification, artificial ionospheric irregularities, high-power HF waves, narrowband SEE, Doppler spectral method.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование физических процессов в магнитосферно-ионосферной системе имеет научное и практическое значение. Обеспечение работоспособности радиотехнических систем различного назначения невозможно без фундаментальных исследований в данной области.

Один из способов изучения свойств ионосферной плазмы — преднамеренное воздействие на ионосферу мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением от специальных нагревных стендов [Ерухимов, 1998].

Воздействие мощных КВ-радиоволн (волн накачки) вызывает комплекс явлений в ионосферной плазме — например, таких, как узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ), изменение температуры и концентрации электронов, плазменные волны, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) [Фролов и др., 2007], которые возбуждаются как в F-области ионосферы, так и в авроральной E-области. Некоторые из этих явлений могут быть обнаружены с помощью дистанционных методов диагностики.

Дистанционные методы диагностики, использующиеся в ААНИИ, позволяют регистрировать возникновение данных явлений и измерять их характеристики удаленно на расстояниях 1000 и более километров от нагревных стендов.

Важной особенностью проведения нагревных экспериментов в Арктике в отличие от проведения

таковых в средних и низких широтах является то, что ориентация магнитного поля в этих местах близка к вертикальной. Это дает преимущества для изучения широкого спектра физических явлений в плазме [Гуревич и др., 2005].

СХЕМА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Нагревный стенд EISCAT/Heating расположен в Тромсё (Северная Норвегия, 69.6° N, 19.2° E) и представляет собой универсальный научно-исследовательский инструмент для искусственной модификации и диагностирования состояния высокоширотной ионосферы [Rietveld et al., 2016] (рис. 1). Стенд состоит из антенных фазированных решеток, фидерных линий, 12-ти передатчиков мощностью 100 кВт каждый на базе радиоламп тетродов rs2054sk, цифрового синтезатора частот и пункта управления. На территории находится также цифровой ионозонд и другое вспомогательное оборудование.

Массивы ортогональных диполей HF Array 1, HF Array 2 и HF Array 3 представляют собой фазированные антенные решетки. Меняя сдвиг фаз сигналов, подводимых к антеннам от передатчиков, можно менять угол наклона диаграммы направленности антенных решеток и поляризацию. Параметры антенных решеток даны в табл. 1.

Для дистанционной диагностики и контроля работы нагревного стенда в ААНИИ разработаны и

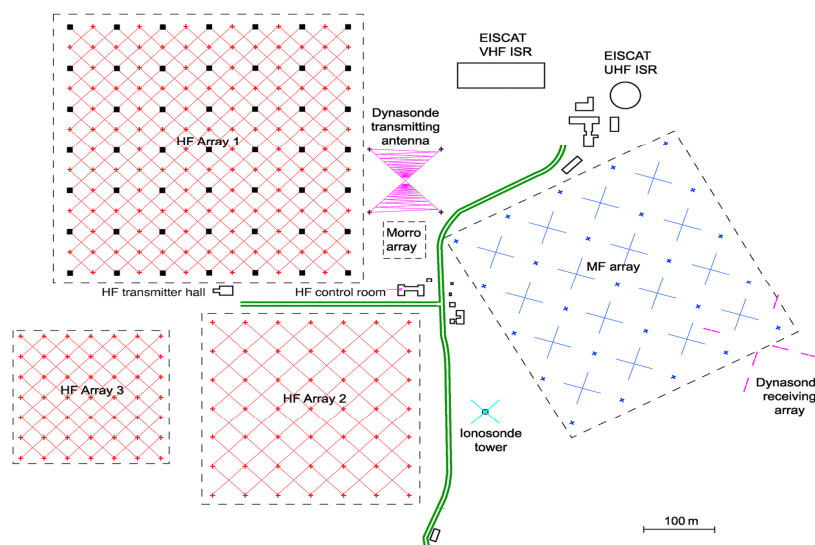


Рис. 1. Схема нагревного стенда EISCAT Heating [Rietveld, Stubbe, 2022]

Таблица 1

Параметры антенных решеток нагревного стенда EISCAT

Параметр	HF Array 1	HF Array 2	HF Array 3
Частота, МГц	5.5–8.0	4.0–5.5	5.5–8.0
Эффективная излучаемая мощность, МВт	1200	300	300
Коэффициент усиления антенны	30	24	24
Ширина диаграммы по уровню 3, дБ	7.5	14.5	14.5
Напряженность электрического поля на высоте 250 км, В/м	1	0.5	0.5
Мощность на высоте 250 км, МВт/м ²	1.6	0.4	0.4

применяются Многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс [Калишин и др., 2021] для регистрации диагностических КВ-сигналов методом ракурсного рассеяния от ионосферных неоднородностей, а также аппаратура прямой регистрации (АПР) радиоизлучения от нагревного комплекса. Оба устройства установлены на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская», принадлежащей ААНИИ.

Многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс состоит из восьми измерительных каналов на базе радиоприемников ICOM IC-R75. В приемном тракте после узкополосного фильтра 3-й промежуточной частоты 455 кГц аналоговый сигнал преобразуется в цифровой с разрядностью 18 бит. Далее в реальном времени осуществляется цифровая обработка регистрируемых сигналов в полосе 250 Гц. Результаты отображаются в виде осциллограмм, мгновенных спектров и трехмерных графиков в координатах частота—время—амплитуда. Перестройка частот комплекса автоматизирована и происходит согласно сетке вещания КВ-радиостанций, где указано время вещания, характеристики излучения, координаты радицентра и другая информация.

АПР разработана также на основе радиоприемного устройства IC-R75 и представляет собой анализатор спектра декаметрового диапазона. ПО АПР осуществляет спектральный анализ принимаемых сигналов в реальном времени, отображает их мгновенные спектры и спектры в координатах частота—время—амплитуда в выбранной полосе частот. АПР может проводить спектральный анализ в узкой (2.4 кГц) или широкой (7 кГц) полосах регистрируемого сигнала.

Для мониторинга, контроля и записи в реальном времени сигналов нагревного стенда применялся также цифровой радиоприемник SDR Perseus.

Все радиоприемные устройства работали на антенну типа двойного горизонтального ромба. Ширина ДН антенны на частоте 15 МГц составляет примерно 20°, коэффициент усиления — 19 дБи. Технические характеристики радиоприемников приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Во всех сериях нагревных экспериментов осуществлялась дистанционная диагностика МИИН мето-

Таблица 2

Технические характеристики приемников

Технические характеристики	SDR Perseus	IC-R75
Диапазон принимаемых частот, МГц	0.01–30	0.03–60
Напряжение питания, В	5	13.8
Потребляемый ток, А	0.7	0.9
Вид модуляции	SSB, CW, AM, FM	SSB, CW, AM, FM
Чувствительность в режиме CW/SSB при полосе пропускания 2.4 кГц и 10 дБ (S+N)/N, мкВ	0.39	0.18
Динамический диапазон	115	102
Максимальная глубина режекторного фильтра	>70	–
Подавление зеркального канала, дБ	90	>70
Подавление соседнего канала в режиме CW, дБ	При разноте 20 кГц, 79	При разноте 2.0 кГц 60

дом регистрации ракурсно-рассеянных сигналов (RPC). В качестве примера рассмотрим эксперимент, проведенный 20 октября 2016 г. Нагревный комплекс EISCAT/Heating излучал на частотах $f_H=4544$ и 5423 кГц (X-мода поляризации) в магнитный зенит. С помощью Многоканального приемного КВ доплеровского комплекса на радиотрассе Hialeah Gardens (FL, США) — НИС «Горьковская» были зафиксированы RPC от МИИН с доплеровскими сдвигами 1–5 Гц. Частоты принимаемых диагностических сигналов составляли 17790 и 21675 МГц. Схема эксперимента показана на рис. 2, динамические доплеровские спектры диагностических коротковолновых сигналов — на рис. 3 (вверху).

В этот период работал когерентный коротковолновый доплеровский радар CUTLASS, расположенный в Hankasalmi (Финляндия), что дало возможность сравнить результаты дистанционной диагностики МИИН. Радар излучал на трех частотах 10.0, 12.4 и 13.2 МГц в направлении комплекса EISCAT/Heating

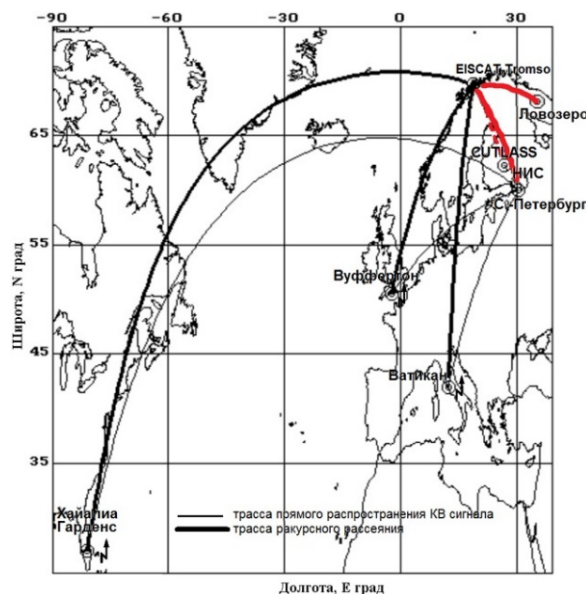


Рис. 2. Месторасположение КВ нагревного комплекса EISCAT, когерентного радара CUTLASS, (Hialeah Gardens, FL, США), НИС «Горьковская» вблизи Санкт-Петербурга и диагностических трасс

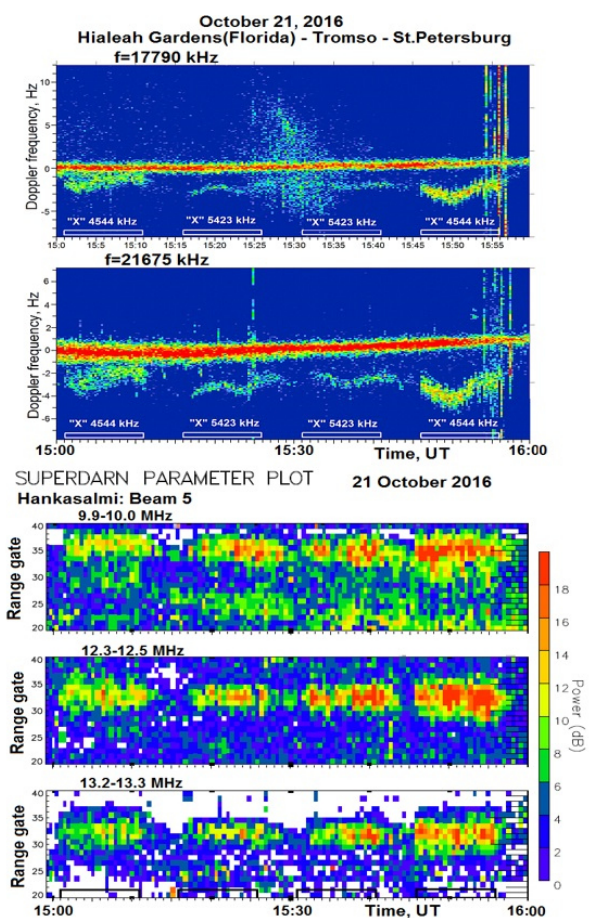


Рис. 3. Динамические доплеровские спектры диагностических КВ-сигналов во время нагревного эксперимента 21 октября 2016 г. (вверху). На осях времени указаны интервалы работы нагревного комплекса. Ось частот размечена относительно диагностических КВ-сигналов по дуге большого круга на трассе Hialeah Gardens — Санкт-Петербург. Внизу — данные наблюдений когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Hankasalmi (Финляндия) (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё)

(луч 5). На рис. 3 (внизу) дальность от радара CUTLASS в направлении Тромсё обозначена в номерах горизонтальных слоев (Range gate). Искусственно возмущенная область над Тромсё соответствует воротам 29–34, цве-

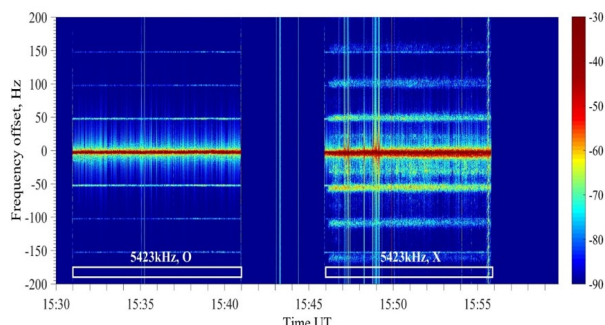


Рис. 4. Сравнение циклов нагрева на О- и Х-модах поляризации 28 октября 2015 г. (время—частота—амплитуда)

товая шкала мощности рассеянных на МИИН сигналов показана справа.

В каждом цикле нагрева наблюдались сигналы, рассеянные на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} \sim 9.2\text{--}11$ м. Особенностью образовавшихся неоднородностей было длительное время релаксации (до 3 мин).

Серии экспериментов, проведенные на нагревном стенде EISCAT, показали, что при нагреве ионосферной плазмы мощными КВ-радиоволнами необыкновенной (Х-мода) поляризации на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 ($f_h < f_oF2$ и $f_h > f_oF2$), возможно возбуждение различных спектральных компонент УИРИ и их регистрация на значительном (более 1000 км) удалении от КВ нагревного комплекса. Генерация УИРИ наблюдалась при излучении мощной радиоволны Х-поляризации; при этом в спектре излучения отчетливо выделялись дискретные спектральные составляющие вблизи частоты волны накачки.

В качестве примера на рис. 4 показаны спектры УИРИ, зарегистрированные 28 октября 2015 г. АПР, размещенной на НИС «Горьковская». В этом эксперименте нагревный стенд EISCAT под управлением специалистов из ААНИИ излучал на частоте $f_h = 5423$ кГц в цикле 15:31–15:41 UT на О-поляризации, а в цикле 15:46–15:56 UT — на Х-поляризации. Частота нагрева была меньше критической частоты F2 слоя ионосферы $f_h < f_oF2$.

На рис. 4, 5 показаны результаты спектральной обработки сигналов, принятых во время данного эксперимента на АПР. Видно, что при работе нагревного стенда на Х-моду поляризации происходит генерация УИРИ с выраженными спектральными максимумами на частотах $\sim -170, -100, -57, -30, +57, +110, +170$ Гц.

Волна накачки 28 октября 2013 г. излучалась на $f_h = 6960$ кГц на Х-моду поляризации циклами нагрев 10 мин — пауза 5 мин в магнитный зенит. Частота нагрева была выше критической частоты F2-слоя ионосферы $f_h > f_oF2$. На рис. 6, 7 приведены результаты обработки сигналов, принятых за это время на НИС «Горьковская». В данном эксперименте также генерировалось УИРИ, но только в отрицательной области частот относительно частоты нагрева. Сдвиг частоты спектральной компоненты УИРИ при этом от цикла к циклу нагрева медленно увеличивался от -50 до -60 Гц. По показаниям ионо-

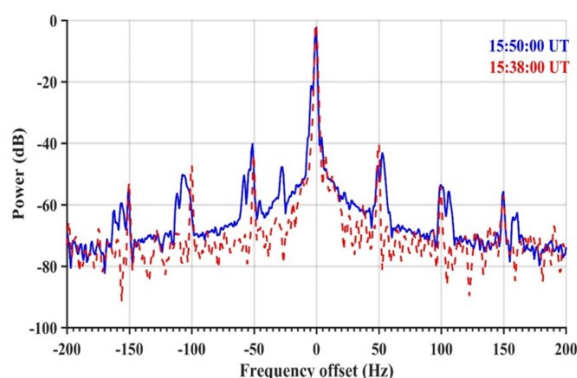


Рис. 5. Сравнение циклов нагрева на О- и Х- модах поляризации 28 октября 2015 г. (мгновенные спектры)

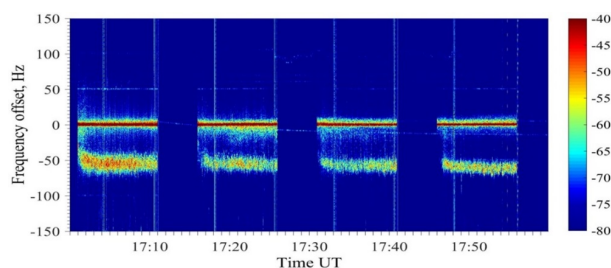


Рис. 6. Циклы нагрева на Х-моду поляризации 28 октября 2013 г. (время—частота—амплитуда)

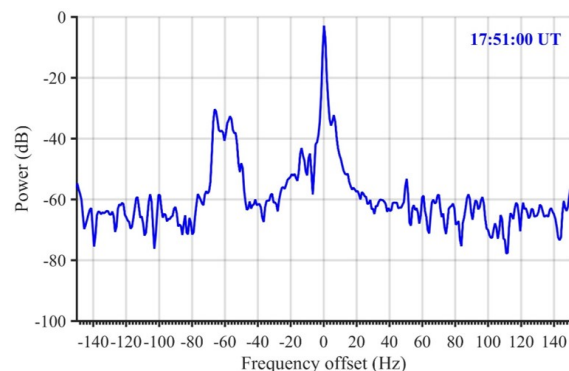


Рис. 7. Мгновенный спектр принятого нагревного сигнала в цикле нагрева в 17:51:00 UT 28 октября 2013 г.

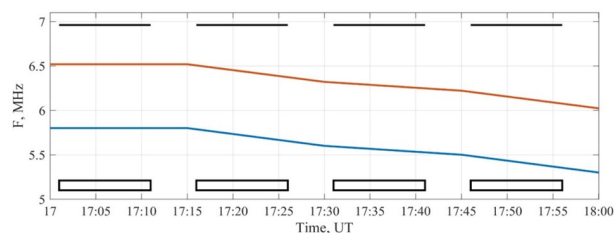


Рис. 8. Ход критических частот F2-области ионосферы в период излучения нагревного стенда 28 октября 2013 г.

зонда в месте работы нагревного стенда критические частоты F2-области ионосферы в период излучения плавно уменьшались (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что воздействие волны накачки необыкновенной поляризации в магнитный зенит вызывает МИИН с длительным временем релаксации и генерацию узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы.

Представлены результаты комплексных экспериментов по модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ-радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating в Тромсё (Норвегия), выполненных в различных режимах нагрева. Результаты выполненных экспериментов на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating свидетельствуют о регулярности и повторяемости эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу.

Показано, что в поле мощной КВ-радиоволны необыкновенной поляризации (Х-мода) происходит сильная модификация F-области высокоширотной ионосферы. Впервые обнаружены и исследованы характеристики и условия генерации спектральных компонент в спектре УИРИ, наблюдавшиеся на расстоянии около 1200 км от нагревного комплекса. Узкополосные спектральные линии могут быть связаны с генерацией электростатических ионных циклотронных волн (для ионов кислорода O^+) и их гармоник.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. Эффект магнитного зенита. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005. Т. 48, № 9. С. 772–787.

Ерухимов Л.М. Ионосфера земли как космическая плазменная лаборатория. *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 4.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов. *Метеорология и гидрология*. 2021. № 4. С. 22–36.

Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением. Конференции и симпозиумы. УФН 2007.

Rietveld M.T., Stubbe P. History of the Tromsø ionosphere-heating facility. *History of Geo- and Space Sciences*. 2022. Vol. 13. P. 71–82. DOI: [10.5194/hgss-13-71-2022](https://doi.org/10.5194/hgss-13-71-2022).

Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Science*. 2016. Vol. 51(9). P. 1533–1546.

URL: <https://rscf.ru/project/22-17-00020> (дата обращения 31 мая 2022 г.).