

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-435-451>
УДК 533.951; 550.388.2



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL PAPER

Сравнение характеристик явлений в F-области высокоширотной ионосферы при излучении мощных КВ радиоволн антеннами с узкой и широкой диаграммой направленности*

Н.Ф. Благовещенская✉, Т.Д. Борисова, А.С. Калишин, И.М. Егоров,
Г.А. Загорский, А.С. Ковалев

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉nataly@aari.nw.ru

ИДНФБ, 0000-0003-1752-3273; ТДБ, 0000-0003-1727-5310; АСК, 0000-0001-7299-6546

Аннотация. Выполнено сравнение характеристик искусственных ионосферных возмущений в F-области высокоширотной ионосферы при излучении мощных коротких радиоволн нагревного стенда EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия) фазированными антенными решетками (ФАР) с узкой ($5-6^\circ$) и широкой ($10-12^\circ$) диаграммами направленности (антенны А1 и А3 соответственно). Рассмотрены характеристики, поведение и пространственная структура электронной концентрации и температуры, продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), мелкомасштабных искусственных магнито-ориентированных неоднородностей и искусственного узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) радиоизлучения ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (Х-мода) и обыкновенной (О-мода) поляризации при их излучении антеннами А1 и А3 в направлении магнитного зенита.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, искусственные неоднородности, искусственное радиоизлучение ионосферы, канал, мощная КВ радиоволна, продольные плазменные волны, радар некогерентного рассеяния радиоволн, электронная концентрация

Для цитирования: Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Егоров И.М., Загорский Г.А., Ковалев А.С. Сравнение характеристик явлений в F-области высокоширотной ионосферы при излучении мощных КВ радиоволн антеннами с узкой и широкой диаграммой направленности. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023; 69(4): 435–451. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-435-451>.

Поступила 12.10.2023

После переработки 07.11.2023

Принята 09.11.2023

* Статья подготовлена на основе доклада «Влияние ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating на характеристики искусственных возмущений в высокоширотной верхней ионосфере (F-область)», представленного на Всероссийских открытых Армандовских чтениях «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», Муром, 27–29 июня 2023 г. [1].

Comparison of features of phenomena in the high latitude ionospheric F -region induced by powerful HF radio waves radiated by antennas with narrow and wide beam patterns

Nataly F. Blagoveshchenskaya✉, Tatiana D. Borisova, Alexey S. Kalishin,
Ivan M. Egorov, Gleb A. Zagorskiy, Andrey S. Kovalev

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia*

✉nataly@aari.nw.ru

DOI: 10.1002/2017JA.02433; NFB, 0000-0003-1752-3273; TDB, 0000-0003-1727-5310; ASK, 0000-0001-7299-6546

Abstract. Physical experiments in natural free plasma (ionosphere) using controlled injection of powerful HF radio waves (HF pump waves) into the high latitude upper (F -region) ionosphere allow the investigation of various nonlinear phenomena. HF pump waves with ordinary (O-mode) polarization are commonly used for the modification of the upper ionosphere (F -region). This is due to the fact that extraordinary (X-mode) polarized HF pump waves are reflected from altitudes significantly below the reflection altitude of the O-polarized HF pump wave and the altitude of electrostatic plasma waves. Because of that they are not able to generate such waves or, as a consequence, cause artificial plasma turbulence and accompanying phenomena. However, the results of experiments carried out by AARI researchers at the EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway) have clearly demonstrated for the first time that X-polarized HF pump waves are able to produce artificial ionosphere disturbances which may be much stronger compared with O-mode disturbances. This opens up new possibilities for the investigation of nonlinear phenomena and ionospheric disturbances in the upper ionosphere, leading to the development of technologies allowing one to observe the processes in the Arctic zone ionosphere. In contrast to the traditional investigations of artificial ionospheric disturbances induced by O-mode HF pump waves, X-mode disturbances in the upper ionosphere are poorly investigated, the mechanisms of their generation are not understood. Therefore, such investigations require serious experimental and theoretical development. We present investigation results of the influence of the HF Phased Array beam width at the EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway) on the features of artificial disturbances in the high latitude upper (F -region) ionosphere induced by powerful HF radio waves. The paper analyzes the features, behavior, and spatial structure of electron density and temperature (N_e and T_e), Langmuir and ion-acoustic plasma waves, artificial field-aligned irregularities (AFAIs), and narrowband (± 1 kHz relative to heating frequency) stimulated electromagnetic emission (NSEE) induced by X-mode HF pumping by phased Arrays with a narrow beam width of $5\text{--}6^\circ$ (A1) and a wide beam width of $10\text{--}12^\circ$ (at -3 dB level) (A3). It is shown that the spatial size in the north-south direction of the N_e ducts and HF-enhanced plasma and ion lines (HFPL and HFIL) depends on the width of the HF Heating facility antenna beam. It corresponds to the angle width of 7° for the A3 antenna and 4° for A1, which is approximately two times less than the width of the pattern of A3 and A1. The relationship between the N_e duct transverse size and the size of the region occupied by the X-mode artificial irregularities is found. It has been established that the intensities of all the discrete components in the NSEE spectra are $10\text{--}20$ dB higher when a powerful X-wave is emitted to the antenna A1, providing ERP = 820 MW, compared to radiation to the antenna A3, providing ERP = 230 MW. A comparison is made of the influence of the radiation pattern width of the antennas A1 and A3 on the characteristics of disturbances during O- and X-mode HF pumping. It is shown that N_e ducts and narrow band stimulated electromagnetic emission during O-mode heating, at frequencies below the critical frequency of the F_2 layer, are not excited at all when the pump wave is emitted by both antennas A1 and A3. However, perturbations in the electron temperature, AFAI intensity, and the size of the region occupied by AFAIs are greater during O-mode heating than during X-mode heating.

Keywords: artificial irregularities, duct, electron density, elongated plasma waves, high latitude ionosphere, incoherent scatter radar, powerful HF radio wave, stimulated electromagnetic emission

For citation: Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M., Zagorskiy G.A., Kovalev A.S. Comparison of features of phenomena in the high latitude ionospheric *F*-region induced by powerful HF radio waves radiated by antennas with narrow and wide beam patterns. *Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69 (4): 435–451. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-435-451>

Received 12.10.2023

Revised 07.11.2023

Accepted 09.11.2023

Введение

Физические эксперименты в естественной свободной плазме (ионосфере) с использованием контролируемой инъекции мощных КВ радиоволн в высокоширотную верхнюю (*F*-область) ионосферу позволяют изучать широкий спектр ионосферных возмущений, нелинейных явлений, механизмы возбуждения турбулентностей и плазменных волн, плазменные и гиромагнитные резонансы, механизмы ускорения электронов (см., например, [2–9] и ссылки там). Особое внимание привлекают исследования на высокоширотных КВ нагревных стендах HAARP (Аляска, США) и EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия), где вследствие особенностей высокоширотной ионосферы возможна генерация искусственных возмущений, принципиально невозможных в ионосфере средних широт.

Для модификации верхней ионосферы (*F*-область) традиционно на всех нагревных стендах мира используются мощные КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) поляризации. Это вызвано тем, что радиоволны необыкновенной (Х-мода) поляризации в фоновой (невозмущенной) ионосфере отражаются существенно ниже высоты отражения мощной КВ радиоволны О-поляризации и, более того, ниже области существования квазиэлектростатических плазменных волн (ленгмюровских и верхнегибридных). Вследствие этого они не могут вызвать генерацию этих волн и, как следствие, возбуждение искусственной ионосферной турбулентности и явлений, ее сопровождающих [6, 10, 11].

Однако результаты экспериментальных исследований на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия), полученные специалистами ААНИИ в 2011–2021 гг., впервые показали возможность генерации искусственных возмущений, вызванных воздействием мощной КВ радиоволны (волны накачки) Х-поляризации на высокоширотную *F*-область ионосферы, которые могут превосходить по интенсивности возмущения при О-нагреве [12]. Среди них следует отметить следующие: мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН), искусственное свечение в красной и зеленой линиях атомарного кислорода, ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны, дакты повышенной электронной плотности в широком диапазоне высот, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) (см., например, [13–17] и ссылки там). Следует указать, что в отличие от эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации, традиционно используемых для модификации верхней ионосферы на всех КВ нагревных стендах, возмущения при Х-нагреве создаются не только на частотах нагрева ниже критической частоты слоя *F*2 ($f_H \leq f_oF2$), но и в условиях, когда f_H существенно превышает f_oF2 [2]. При этом эффекты Х-нагрева в *F*-области высокоширотной ионосферы наблюдаются только при излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного поля (магнитный зенит).

Разработанная методология контролируемого воздействия мощных КВ радиоволн Х-поляризации на высокоширотную F -область ионосферы открывает новые возможности изучения возмущений в высокоширотной верхней ионосфере и будет способствовать развитию технологий наблюдений за процессами в ионосфере в Арктическом регионе. Вместе с тем целый ряд вопросов, касающихся Х-нагрева, эффекты воздействия которого на F -область ионосферы для научного сообщества оказались абсолютно неожиданными, остается невыясненным и требует дальнейшего серьезного изучения как в экспериментальном, так и теоретическом плане.

В данной статье ставится цель исследовать влияние ширины диаграммы направленности фазированной антенной решеткой (ФАР) КВ нагревного стенда EISCAT/Heating на пространственную структуру и характеристики искусственных возмущений в F -области ионосферы высоких широт при воздействии волн накачки Х-поляризации. Уделяется внимание также сравнению эффектов воздействия мощных КВ радиоволн Х- и О-поляризации. Для достижения поставленной цели с использованием разнообразных независимых диагностических средств и методов (радар некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT, когерентный радар CUTLASS и аппарата для дистанционной диагностики УИПИ) было выполнено сравнение характеристик и пространственной структуры разнообразных искусственных ионосферных возмущений при излучении волн накачки О- и Х-поляризации антеннами с узкой ($5\text{--}6^\circ$) и широкой ($10\text{--}12^\circ$) диаграммой направленности (на уровне — 3 дБ).

Описание эксперимента и используемые диагностические средства и методы

Модификации F -области высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами осуществлялась КВ нагревным стендом EISCAT/Heating, установленным вблизи г. Тромсё, Норвегия ($69,6^\circ$ с. ш., $19,2^\circ$ в. д., $L = 6,2$, $I = 78^\circ$) [18]. Эксперимент проводился 27 октября 2013 г. при спокойных магнитных условиях с 12:00 до 14:00 UT при излучении волны накачки на частоте $f_H = 7,953$ МГц в магнитный зенит (наклон диаграммы направленности ФАР на 12° к югу от вертикали) циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза, начиная с 12:01 UT. В период эксперимента поляризация мощной КВ радиоволны в циклах нагрева изменялась в последовательности О–Х–Х–О.

Нагревной стенд EISCAT/Heating в диапазоне частот нагрева $f_H = 5,423\text{--}7,953$ МГц обеспечивает возможность излучения мощной КВ радиоволны как фазированной антенной решеткой «3» (A3) с широкой диаграммой направленности $10\text{--}12^\circ$ (на уровне — 3 дБ) при эффективных мощностях излучения (effective radiated power) ERP = 190–280 МВт, так и ФАР «1» (A1) с узкой диаграммой направленности $5\text{--}6^\circ$ (на уровне — 3 дБ), обеспечивающей ERP = 400–1200 МВт. В первый час эксперимента с 12 до 13 UT О/Х-нагрев на частоте $f_H = 7,953$ МГц проводился с использованием антенны A3, обеспечивающей ERP = 230 МВт, а во второй час с 13 до 14 UT излучение Х/О-волны осуществлялось антенной решеткой A1 при ERP = 820 МВт.

Диагностика эффектов воздействия мощных КВ радиоволн, излучаемых стендом EISCAT/Heating с использованием ФАР A1 и A3, проводилась с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) EISCAT, работающего на частоте 931 МГц [19], когерентного радара CUTLASS (SuperDARN) [20] и аппаратуры регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы [21].

Измерения с помощью радара HP, расположенного в непосредственной близости от нагревного стенда, проводились на высотах от 90 до 700 км с разрешением по времени и высоте 5 с и 1,5 (3) км соответственно. Азимут излучения радара составлял 180° (на юг). Обработка данных радара HP осуществлялась с использованием пакета GUISDAP version 8.7 (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package) [22]. Радар HP обеспечивал получение параметров ионосферной плазмы (электронная концентрация и температура, N_e и T_e), а также характеристик продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических). Следует отметить, что радары HP в настоящее время являются единственным диагностическим инструментом, обеспечивающим непосредственную диагностику продольных плазменных волн, которые в спектрах сигнала радара HP проявляются как усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HF-enhanced plasma and ion lines, HFPL и HFIL). В период эксперимента в циклах излучения мощной КВ радиоволны радар HP работал в режиме ступенчатого изменения углов возвышения в северо-южном направлении от 74 до 90°, что позволяло детально исследовать пространственную структуру искусственно возмущенной области ионосферы. При этом в течение 20 мин цикла нагрева каждые две минуты происходило ступенчатое изменение углов возвышения радара HP по схеме 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90° (угол возвышения 78° соответствует магнитному зениту в Тромсё).

Радар CUTLASS в Финляндии (63° с. ш., 27° в. д.), расположенный на ~1000 км к югу от стенда EISCAT/Heating, работал на «луч» 5 (в направлении на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё) с разрешением по времени и дальности 3 с и 15 км соответственно. Излучение проводилось антенной с шириной луча ~3,3° практически одновременно на трех частотах в диапазоне от 16 до 20 МГц, обеспечивающих обратное рассеяние от мелкомасштабных искусственных магнито-ориентированных неоднородностей с масштабами поперек магнитного поля l_{\perp} от 9,3 до 7,5 м.

Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) регистрировалось на научно-исследовательской станции ААНИИ «Горьковская» вблизи Санкт-Петербурга на расстоянии ~1200 км от нагревного стенда EISCAT/Heating. Прием сигналов осуществлялся на антенну типа двойной горизонтальный ромб, ориентированный на стенд EISCAT/Heating. Для регистрации УИРИ использовался анализатор спектра, разработанный на основе радиоприемного устройства IC-R75 [21].

Состояние ионосферы контролировалось по данным ионозонда в Тромсё.

Результаты и их обсуждение

Анализ данных радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT

На рис. 1 показано поведение электронной концентрации и температуры (N_e и T_e), мощности рассеянного сигнала (обозначенной как N_{raw}) в период эксперимента 27 октября 2013 г. по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн (HP) в Тромсё при нагреве высокоширотной F-области ионосферы. Мощная КВ радиоволна обыкновенной (O-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризации излучалась на частоте 7,953 МГц фазированными антенными решетками «3», с шириной диаграммы направленности 10–12° (на уровне — 3 дБ), или «1», имеющей ширину 5–7°, (решетки A3 или A1) в направлении магнитного зенита циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Радар HP в течение каждого 20-минутного цикла нагрева ра-

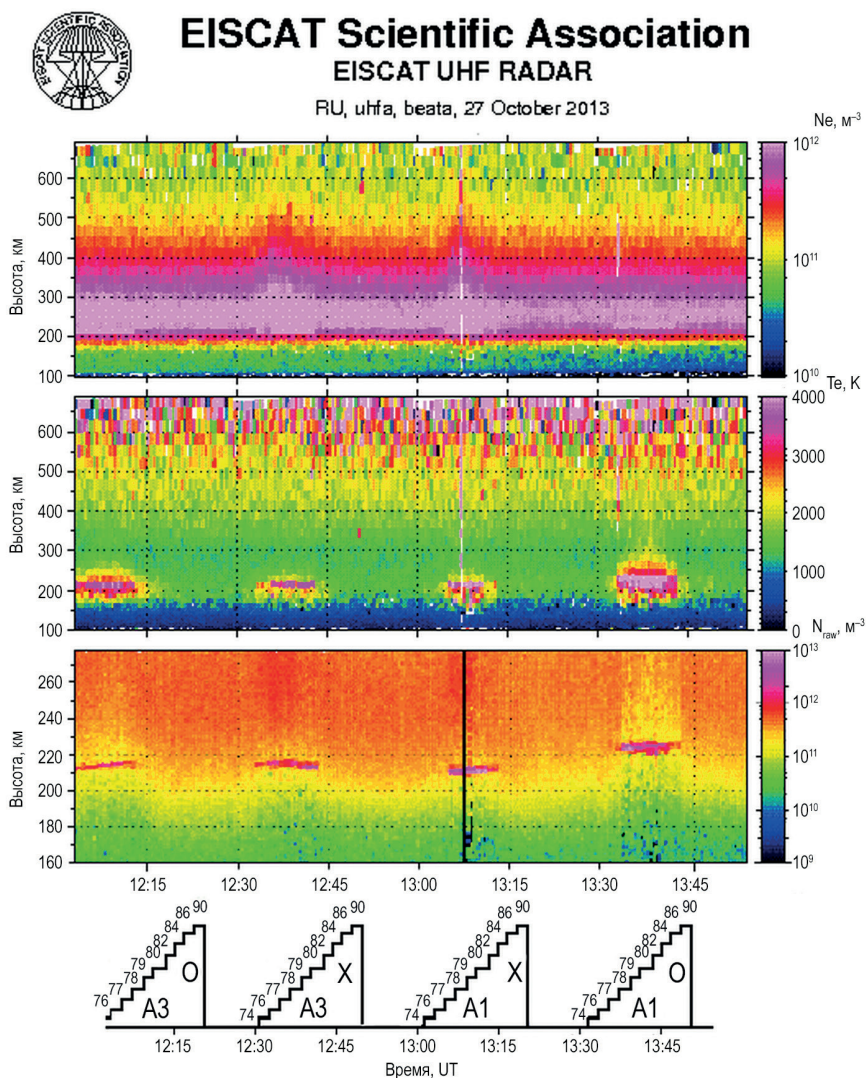


Рис. 1. Высотно-временное распределение N_e , T_e и N_{raw} по данным измерений радара НР в период нагревного эксперимента 27 октября 2013 г. с 12:03 до 14:00 UT. Мощная КВ радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в магнитный зенит на частоте 7,953 МГц антеннами А3 или А1 циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Схема изменения углов возвышения радара НР, которые в течение цикла нагрева изменялись каждые 2 мин в последовательности 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90°, а также поляризация мощной КВ радиоволны и тип используемой антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating приведены на нижней панели

Fig. 1. Altitude-temporal behavior of the electron density and temperature, N_e and T_e , backscattered power (labeled as N_{raw}) in the course of the HF pumping experiment on 27 October 2013 from 12:03 to 14:00 UT. The HF pump wave of the O-mode or X-mode polarization radiated towards the magnetic zenith at a frequency of 7.953 MHz by Array 3 or 1 (A3 or A1) by cycles of 20 min on, 10 min off. In the course of every 20 min heater-pulse the EISCAT ISR run in the elevation angle stepping mode, when the radar elevation angle was changed every 2 min in an orderly sequence of 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90°, shown on the bottom panel. Here the polarization of the HF pump wave and the type of Array used in the course of the heater on pulses are also given

ботал в режиме ступенчатого изменения углов возвышения от 74 до 90°, что позволило детально исследовать пространственную структуру искусственно возмущенной области ионосферы (ИВО). Частота нагрева была ниже критической частоты слоя F2 ($f_H/f_oF2 = 0,78-0,85$). В этих условиях возможна генерация возмущений в ионосферной плазме как при O-, так и X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы.

Как следует из рис. 1, сильные возрастания электронной плотности N_e в широком диапазоне высот от ~300 км до высот порядка 550 км (дакты N_e) наблюдались только при излучении мощной КВ радиоволны X-поляризации и не регистрировались при O-нагреве. Дакты N_e создавались как при излучении мощной X-волны фазированными антенными решетками с широкой диаграммой направленности A3 с 12:31–12:51 UT при ERP = 230 МВт, так и при X-нагреве антенной с узкой диаграммой A1 с 13:01 — 13:21 UT при ERP = 820 МВт. Пространственная протяженность дактов в северо-южном направлении (ширина дактов) существенно зависит от ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating. При излучении мощной X-волны антенной A3 дакты N_e регистрировались в диапазоне углов возвышения радара HP 76–82°, что соответствует угловой ширине дактов в северо-южном направлении 7°, в то время как при излучении X-волны антенной A1 дакты N_e наблюдались в диапазоне углов возвышения радара HP 77–80°, что соответствует ширине дактов 4°. Таким образом, при излучении мощной X-волны как антенной A3, так и A1 пространственная протяженность дактов N_e примерно в два раза меньше ширины диаграммы направленности антенн КВ нагревного стенда, что свидетельствует о сильной фокусировке мощной X-волны в направлении магнитного поля.

Создание дактов повышенных значений N_e , наблюдавшихся в широком диапазоне высот от ~270–300 км до ~550–600 км, при излучении мощной X-волны в направлении магнитного зенита является типичной характеристикой X-нагрева [23]. При O-нагреве, как правило, дакты N_e не создаются, однако при специфических условиях нагрева, а именно при O-нагреве на частотах вблизи критической частоты слоя F2 и/или вблизи гирогармоник электронов ($f_H \approx f_oF2$ и/или $f_H \approx n f_{ce}$ где n — номер гармоники и f_{ce} — гирочастота электронов) возможно создание дактов N_e [24]. Образование дактов повышенной электронной плотности может быть объяснено генерацией потока ускоренных электронов, приводящих к образованию повышенной электронной концентрации [23]. Альтернативный механизм генерации дактов N_e был предложен в [25], суть которого состоит в гидировании луча радара HP искусственными ионосферными неоднородностями. В этом механизме ширина дакта определяется шириной диаграммы направленности антенны радара HP, которая для EISCAT радара, работающего на частоте 931 МГц, составляет всего 0,6°. Это находится в явном противоречии с полученными в нашем эксперименте 27 октября 2013 г. данными, убедительно свидетельствующими о зависимости пространственной протяженности дакта N_e от ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда, а не от ширины диаграммы антенны радара HP. Таким образом, в рамках механизма гидирования луча радара HP искусственными ионосферными неоднородностями [25] объяснить генерацию дактов N_e при X-нагреве F-области ионосферы невозможно.

Типичным проявлением воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) поляризации на частотах нагрева ниже критической частоты слоя F2

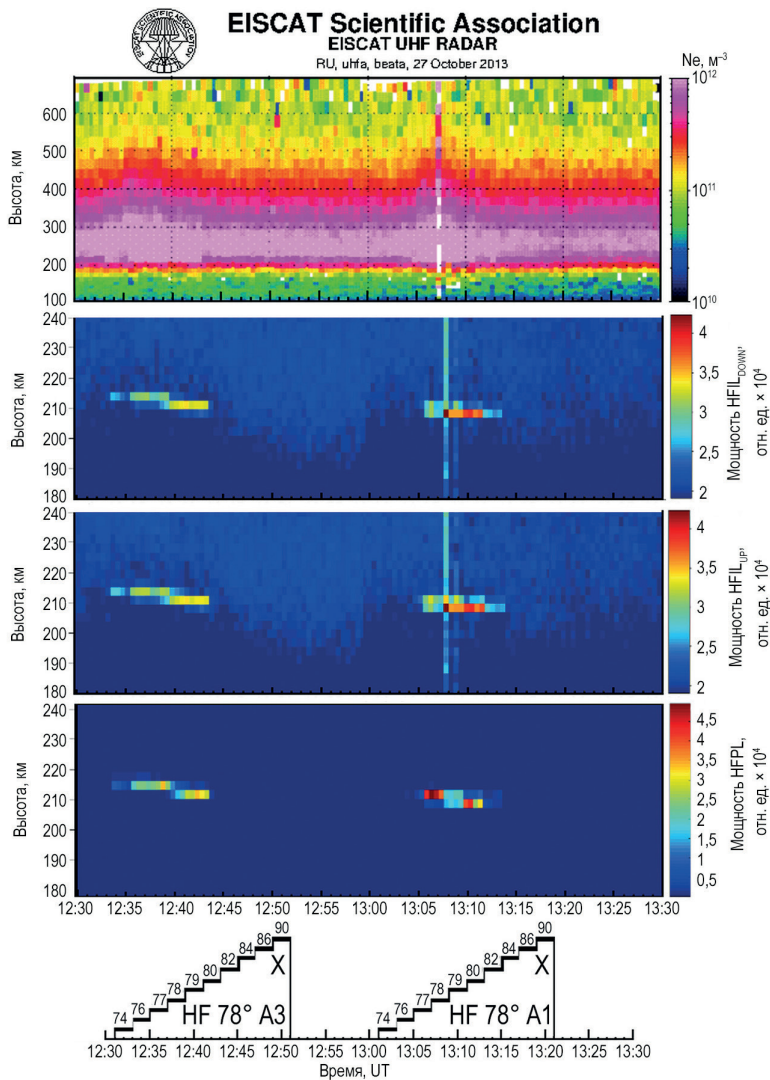


Рис. 2. Высотно-временное распределение N_e , $HFIL_{DOWN}$, $HFIL_{UP}$ и $HFPL$ при излучении мощной X-волны антеннами A3 или A1 по данным измерений радара HP 27 октября 2013 г. с 12:30–13:30 UT. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась в магнитный зенит на частоте 7,953 МГц антеннами A3 или A1 циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Схема изменения углов возвышения радара HP, которые в течение цикла нагрева изменялись каждые 2 мин, в последовательности 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90°, а также поляризация мощной КВ радиоволны и тип используемой антенны приведены на нижней панели

Fig. 2. Altitude-temporal behavior of the N_e , $HFIL_{DOWN}$, $HFIL_{UP}$ and $HFPL$ from EISCAT ISR measurements, when the X-mode HF pump wave was radiated by Array 3 or 1 on 27 October 2013 from 12:30 to 13:30 UT. The X-mode HF pump wave was radiated towards the magnetic zenith at a frequency of 7.953 MHz by Array 3 or 1 (A3 or A1) by cycles of 20 min on, 10 min off. In the course of every 20 min heater-on pulse the EISCAT ISR run in the elevation angle stepping mode, when the radar elevation angle was changed every 2 min in an orderly sequence of 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90°, shown on the bottom panel. Here the polarization of the HF pump wave and the type of Array used in the course of the heater on pulse are also given

($f_H \leq f_oF2$) является тепловой нагрев электронов вследствие развития тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости (ТПН) [2, 27, 28]. Наиболее сильные возрастания температуры электронов T_e , достигающие 200–250 % относительно фоновых значений, наблюдаются при излучении мощной O-волны в направлении магнитного зенита [26]. При X-нагреве ТПН не возбуждается, а возрастание температуры электронов происходит вследствие омического нагрева. При этом возрастания T_e составляли 20–30 % при $f_H \leq f_oF2$ и достигали 50 % при $f_H > f_oF2$ [12, 14].

Радар некогерентного рассеяния радиоволн является единственным инструментом, позволяющим проводить прямые измерения продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), которые проявляются в спектрах радара HP как усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HF-induced plasma и ion lines, HFPL и HFIL). Представляет интерес сравнить поведение и характеристики HFPL и HFIL при излучении мощной X-волны антеннами с широкой и узкой диаграммой направленности (A3 или A1).

На рис. 2 приведено высотно-временное распределение интенсивностей усиленных нагревом ионных линий, смещенных вниз и вверх по частоте относительно частоты радара HP (HF-enhanced downshifted and upshifted ion lines, HFIL_{DOWN} and HFIL_{LUP}) и инициированных нагревом плазменных линий (HF-induced plasma lines, HFPL) при излучении мощной X-волны антеннами A3 или A1 27 октября 2013 г. с 12:30–13:30 UT. Для сравнения на верхней панели приведено также поведение N_e . Из рис. 2 следует, что усиленные нагревом ионные и плазменные линии, сопровождаемые возрастанием N_e , возбуждались при излучении мощной KB радиоволны необыкновенной поляризации (X-мода) как антенной с широкой диаграммой (A3), так и антенной с узкой диаграммой направленности (A1). Усиленные нагревом плазменные и ионные линии регистрировались в диапазоне углов возвышения радара HP 76–82° при излучении X-волны антенной A3 и в диапазоне углов 77–80° при ее излучении антенной A1. Следовательно, горизонтальная протяженность области в северо-южном направлении, в которой возбуждались усиленные нагревом плазменные и ионные линии, составляла 7 и 4° соответственно при излучении мощной X-волны антеннами A3 и A1, что соответствует ширине дактов N_e . При этом интенсивность HFIL_{DOWN}, HFIL_{LUP} и HFPL была выше в цикле 13:01–13:21 UT при использовании антенны с узкой диаграммой A1, обеспечивающей высокую эффективную мощность излучения ERP = 820 МВт, по сравнению с циклом 12:31–12:51 UT, когда излучение проводилось антенной A3 при ERP = 230 МВт.

Согласно исследованиям результатов экспериментов при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения установлено [23], что пороги возбуждения дактов N_e достаточно низкие и составляют 57–73 МВт ($E = 0,24–0,27$ В/м на высотах слоя F2). Однако для возбуждения HFIL_{DOWN}, HFIL_{LUP} и HFPL необходимы гораздо более высокие мощности излучения, поэтому при использовании антенны A3, обеспечивающей ERP = 230 МВт, интенсивности HFIL_{DOWN}, HFIL_{LUP} и HFPL не достигают насыщения.

Анализ результатов наблюдений

с использованием когерентного KB доплеровского радара CUTLASS

На рис. 3 приведены мощности рассеянных на МИИН сигналов 27 октября 2013 г. с 12 до 14 UT по данным измерений радара CUTLASS на частотах ~16, 18 и 20 МГц, что обеспечивало диагностику МИИН с размерами поперек магнитного поля $l_{\perp} = 7,5–9,3$ м ($l_{\perp} = c / 2f$, где f — частота радара). Данные приведены в координатах дальность (range gate) — мировое время (UT). Разрешение по дальности (range gate) составляло 15 км, при этом «первые ворота» начинались с дальности

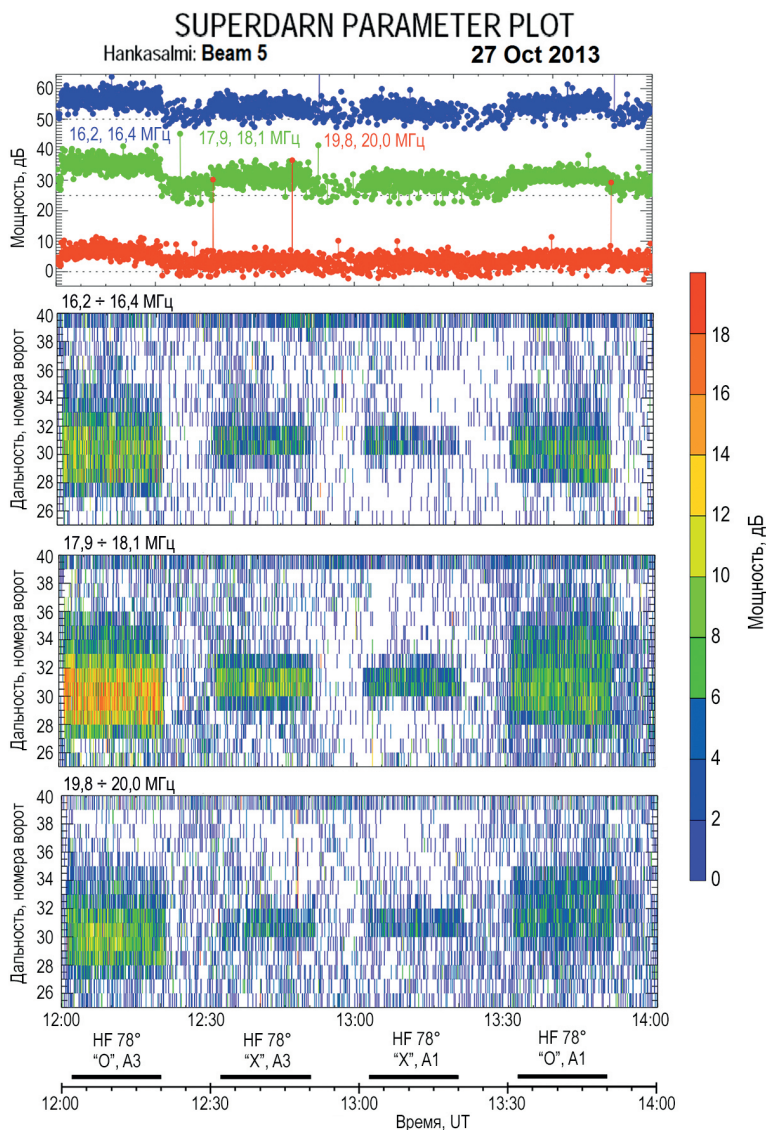


Рис. 3. Мощности рассеянных от МИИН сигналов, а также распределение интенсивностей рассеянных сигналов в координатах дальность (Range gate) — мировое время (UT) на частотах $f \sim 16,2; 18$ и 20 МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми на «луч» 5 27 октября 2013 г. с 12 до 14 UT. Альтернативный O/X-нагрев производился в магнитный зенит на частоте $f_H = 7,953$ МГц антенными решетками A3 или A1. Циклы нагрева, поляризация мощной КВ радиоволны и тип используемой фазированной антенной решетки (A3 или A1) показаны на нижней панели

Fig. 3. The power of artificial backscatter and range gate — time (UT) plots at frequencies $f \sim 16,2; 18$ and 20 MHz of the CUTLASS (SuperDARN) observations in Hankasalmi derived from beam 5 on 27 October 2013 from 12–14 UT. The alternative O-/X-mode heating was made towards the magnetic zenith at frequency $f_H = 7.953$ MHz with the alternative using Arrays A3 or A1. The heater-on cycles, polarization of the HF pump wave and type of Array (A3 or A1) are shown on the bottom panel

480 км. Регистрация рассеянных на МИИН сигналов осуществлялась в диапазоне «ворот» с 25 до 40, что соответствует дальностям от 855 до 1080 км.

Представляет интерес детально рассмотреть и сравнить характеристики МИИН при О- и Х-нагреве в условиях излучения мощной КВ радиоволны антеннами с широкой (А3) и узкой (А1) диаграммами направленности.

Из рис. 3 следует, что размер области, в которой сосредоточены МИИН, возбуждаемые мощной КВ радиоволной О-поляризации, составлял 90–105 км при ее излучении антенной А3 и 60–90 км при использовании антенны А1. Механизм возбуждения этих неоднородностей при О-нагреве объясняется в рамках теории тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [27, 28]. Размер области, в которой возбуждались МИИН при Х-нагреве, был существенно меньше и составлял 45–60 км при излучении мощной КВ радиоволны антенной А3 с широкой диаграммой и ~30 км при использовании антенны А1 с узкой диаграммой. Механизм возбуждения неоднородностей при Х-нагреве может быть объяснен в рамках теории неустойчивости Рэля–Тэйлора [29], развивающейся на горизонтальных градиентах дактов N_e в присутствии электрического поля мощной КВ радиоволны, ортогонального к магнитному полю.

Следует отметить, что как при О-, так и Х-нагреве интенсивность рассеянных на МИИН сигналов была больше при излучении мощных КВ радиоволн антенной с широкой диаграммой (А3). Это объясняется тем, что интенсивность рассеянных на МИИН сигналов при одинаковых условиях воздействия (частота, отношение плотности потока мощности падающей волны к рассеянной) определяется эффективной площадью рассеяния, зависящей от горизонтального размера искусственно возмущенной области (ИВО) ионосферы, который примерно в два раза больше при использовании антенны А3 по сравнению с А1.

Анализ результатов наблюдений

узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы

На рис. 4 приведены динамические спектры узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ), зарегистрированные на обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» вблизи Санкт-Петербурга (на расстоянии ~1200 км от нагревного стенда) в период эксперимента 27 октября 2013 г. с 12 до 14 UT. Альтернативный О/Х-нагрев производился в магнитный зенит на частоте $f_H = 7,953$ МГц антенными решетками А3 или А1, имеющими соответственно широкую (10–12°) или узкую (5–7°) диаграммы направленности. Из рис. 4 следует, что возбуждение дискретных компонент в спектре нагревного сигнала наблюдалось только при Х-нагреве и отсутствовало при О-нагреве. Из данных, приведенных на рис. 4, также следует, что возбуждение дискретных структур происходило при излучении мощной Х-волны как антенной А3, так и А1. Спектр УИРИ содержит ярко выраженные дискретные составляющие, упорядоченные по ионно-циклотронной частоте атомарного кислорода O^+ ($f_{ci} \approx 50$ Гц) с частотами $f_H \pm n \cdot f_{ci}$, где n — номер гармоники. Аналогичная реакция на альтернативный О/Х-нагрев имела место и в других наших экспериментах на стенде EISCAT/Heating, выполненных в широком диапазоне частот нагрева от 4,2 до 7,9 МГц [14, 17, 21, 30]. В качестве возможных механизмов генерации УИРИ при Х-нагреве, регистрируемого на значительном (~1200 км) удалении от КВ нагревного стенда, в [21, 30] были предложены: (1) многократный процесс стимулированного рассеяния Бриллюэна (Magnetized Stimulated Brillouin Scatter, MSBS) [31–33], когда

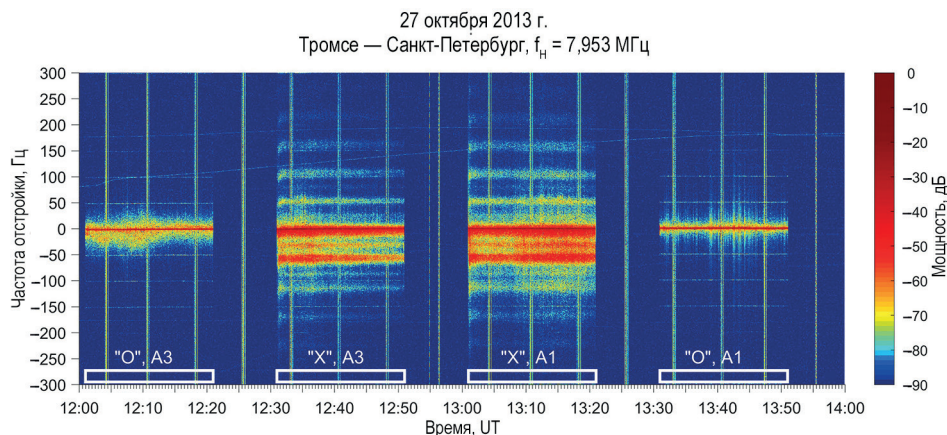


Рис. 4. Динамические спектры узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в полосе ± 300 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированные на обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» вблизи Санкт-Петербурга (на расстоянии ~ 1200 км от нагревного стенда), в период эксперимента 27 октября 2013 г. с 12 до 14 UT. Альтернативный O/X-нагрев производился в магнитный зенит на частоте $f_H = 7,953$ МГц антенными решетками А3 или А1. Циклы нагрева, поляризация мощной КВ радиоволны и тип используемой фазированной антенной решетки (А3 или А1) показаны на оси времени

Fig. 4. Spectrogram of the narrowband stimulated emission (NSEE) in the band of ± 300 Hz relative to the heater frequency recorded at the AARI “Gorkovskaya” observatory near St. Petersburg, located at a distance of ~ 1200 km away from the EISCAT/Heating facility, on 27 October from 12–14 UT. The alternative O/X-mode heating was made towards the magnetic zenith at frequency $f_H = 7.953$ MHz with the alternative using Arrays A3 or A1. The heater-on cycles, polarization of the HF pump wave and type of Array (A3 or A1) are shown on the time axis

мощная КВ радиоволна распадается на низкочастотную электростатическую волну и обратно рассеянную электромагнитную волну; (2) стимулированное рассеяние Бернштейна на ионах (Stimulated Ion Bernstein Scatter, SIBS) [34–36], при котором мощная КВ радиоволна распадается на электронную и ионную волны Бернштейна. При этом для обоих указанных механизмов МИИН играют ключевую роль в возможности регистрации УИРИ на большом расстоянии от нагревного стенда.

Обращает на себя внимание факт наличия интенсивной спектральной компоненты, смещенной вниз по частоте на (27–31) Гц (см. рис. 4). Происхождение этой спектральной компоненты было ассоциировано с электростатическими ионно-циклотронными волнами ионов NO^+ [17].

Сравним более детально спектры УИРИ при излучении мощной КВ радиоволны X-поляризации фазированными антенными решетками А3 и А1. На рис. 5 приведены спектры УИРИ в фиксированные моменты времени циклов X-нагрева при излучении мощной КВ радиоволны антеннами А3 и А1. Напомним, что во время эксперимента 27 октября 2013 г. в цикле нагрева 12:31–12:51 UT антенна А3 обеспечивала эффективную мощность излучения $\text{ERP} = 230$ МВт, а антенна А1 в цикле 13:01–13:21 UT — $\text{ERP} = 820$ МВт.

Из рис. 5 следует, что интенсивности всех дискретных компонент в спектрах УИРИ на 10–20 дБ больше при излучении мощной X-волны антенной А1, обеспе-

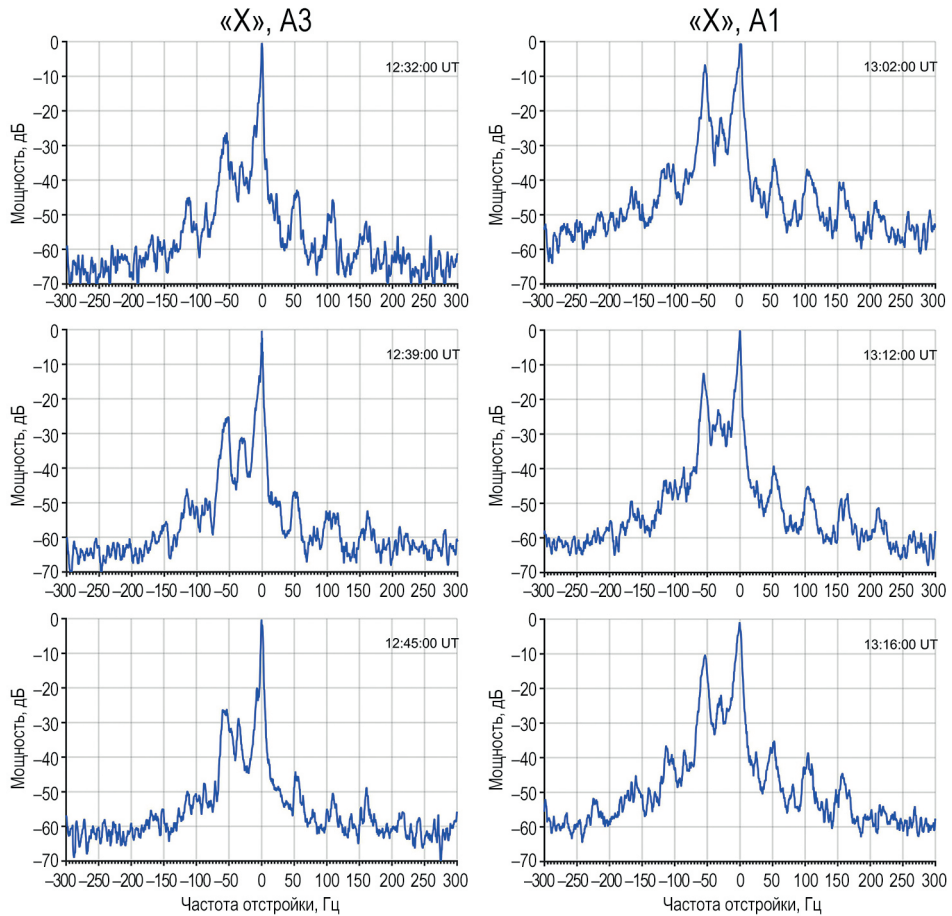


Рис. 5. Спектры УИРИ в полосе ± 300 Гц относительно частоты нагрева, полученные 27 октября 2013 г. в 12:32, 12:39 и 12:45 UT при излучении мощной X-волны антенной A3, а также в 13:02, 13:12 и 13:16 UT при излучении мощной X-волны антенной A1. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на частоте 7,953 МГц в магнитный зенит антенной A3 с 12:31 до 12:51 UT при ERP = 230 МВт и антенной A1 с 13:01 до 13:21 UT при ERP = 820 МВт

Fig. 5. Spectra of NSEE in the band of ± 300 Hz relative to the heater frequency on 27 October 2013 at 12:32, 12:39 and 12:45 UT, when the X-mode HF pump wave was radiated by Array A3, and at 13:02, 13:12 and 13:16 UT, when the X-mode HF pump wave was radiated by Array A1. The X-mode HF pump wave was radiated at a frequency of 7.953 MHz towards the magnetic zenith by Array A3 from 12:31–12:51 UT resulting ERP = 230 MW and by Array A1 from 13:01–13:21 UT under ERP = 820 MW

чивающей ERP = 820 МВт, по сравнению с излучением антенной A3, реализующей ERP = 230 МВт. Такое поведение спектральных компонент УИРИ свидетельствует, что для возбуждения УИРИ вполне достаточно эффективных мощностей излучения 230 МВт. Тем не менее процесс формирования УИРИ в этом случае не приводит к эффекту насыщения. Увеличение ERP до 820 МВт (при излучении мощной

X-волны антенной А1) сопровождается возрастанием интенсивностей дискретных спектральных компонент с частотой, кратной локальной гирочастоте ионов O^+ , и их гармоник на частотах $f_H \pm n$ (51–53) Гц, где n — номер гармоники, а также ростом количества гармоник как при отрицательных, так и положительных отстройках от частоты нагрева.

Заключение

Исследована пространственная структура и характеристики возмущений электронной концентрации и температуры (N_e и T_e) ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и узкополосного искусственного радиоизлучения (УИРИ) при воздействии мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы при их излучении фазированными антенными решетками с различной шириной диаграммы направленности (А3 с шириной диаграммы 10–12° и А1 с шириной диаграммы 5–6°).

Показано, что пространственная протяженность (в северо-южном направлении) дактов N_e , усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HFPL и HFIL), зависит от ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда и составляет 7° для антенны А3 и 4° — для А1, что примерно в два раза меньше ширины диаграммы антенн А3 и А1. Указанное обстоятельство свидетельствует о сильной фокусировке мощной X-волны в направлении магнитного поля. Наиболее интенсивные возмущения при X-нагреве возбуждаются в окрестности магнитного зенита.

Установлено, что интенсивности всех дискретных компонент в спектрах УИРИ на 10–20 дБ больше при излучении мощной X-волны антенной А1, обеспечивающей ERP = 820 МВт, по сравнению с излучением антенной А3, реализующей ERP = 230 МВт.

Выполнено сравнение влияния ширины диаграммы направленности антенн А1 и А3 на характеристики возмущений при O- и X-нагреве. Показано, что при O-нагреве дакты N_e и узкополосное искусственное радиоизлучение, на частотах ниже критической частоты слоя F2, не возбуждаются при излучении волны накачки как антенной А1, так и А3. При этом при O-нагреве возмущения температуры электронов, интенсивности МИИН и размер области, в которой возбуждаются МИИН, больше, чем при X-нагреве.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

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

Благодарности. Авторы благодарят международную научную ассоциацию EISCAT, которая поддерживается научными организациями Китая (CRIRP), Финляндии (SA), Японии (NIPR и STEL), Норвегии (NFR), Швеции (VR) и Великобритании (NERC). Авторы признательны проф. Т. Йоман за предоставление данных радара CUTLASS.

Competing interests. No conflict of interest involved.

Funding. The investigation was carried out within grant № 22-17-00020 from the Russian Scientific Foundation, <https://rscf.en/project/22-17-00020/>.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to EISCAT, which is an international scientific association supported by research organizations in China (CRIRP), Finland (SA), Japan (NIPR and STEL), Norway (NFR), Sweden (VR), and the United Kingdom (NERC). The authors are thankful to Prof. T. Yeoman for the CUTLASS radar data.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Егоров И.М., Загорский Г.А. Влияние ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating на характеристики искусственных возмущений в высокоширотной верхней ионосфере (F-область). В кн.: *Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, Муром, 27–29 июня 2023 г.* Муром: 2023. С. 75–82.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. *Успехи физических наук.* 2007; 177(11): 1145–1177. Gurevich A.V. Nonlinear effects in the ionosphere. *Physics-Uspokhi.* 2007; 50: 1091–1121.
3. Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, present and future of active radio frequency experiments in space. *Space Sci. Rev.* 2018; 214: 118. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
4. Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma. *Space Science Reviews.* 2001; 98: 223–328. <https://doi.org/10.1023/a:1013875603938>
5. Gurevich A.V., Carlson H.C., Medvedev Yu.V., Zybin K.R. Langmuir turbulence in ionospheric plasma. *Plasma Phys. Rep.* 2004; 30: 995–1005.
6. Kuo S. Ionospheric modifications in high frequency heating experiments. *Phys. Plasmas.* 2015; 22: 012901. <https://doi.org/10.1063/1.4905519>
7. Mishin E., Watkins B., Lehtinen N., Eliasson B., Pedersen T., Grach S. Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radiowaves: An assessment. *J. Geophys. Res.: Space Physics.* 2016; 121: 3497–3524. <https://doi.org/10.1002/2015JA021823>
8. Carlson H. C., Djuth F.T., Zhang L.D. Creating space plasma from the ground. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016; 122. <https://doi.org/10.1002/2016JA023380>
9. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., Kendall E., Mills T., Carlson H.C., Snyder A.L. Creation of artificial ionospheric layers using high-power HF waves. *Geophys. Res. Lett.* 2010; 37: L02106. <https://doi.org/10.1029/2009GL041895>
10. Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments at Tromso. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996; 58: 349–368.
11. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves. *Physics Reports.* 1989; 179: 79–209.
12. Blagoveshchenskaya N.F. Perturbating the high-latitude upper ionosphere (F region) with powerful HF radio waves: a 25-year collaboration with EISCAT. *Radio Science Bulletin.* 2020; 373(June 2020): 40–55. <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436>
13. 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.* 2011; 38: L08802. <https://doi.org/10.1029/2011GL046724>
14. 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; 135: 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.10.009>
15. 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 Phys.* 2014; 119: 10483–10498.
16. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Yeoman T.K., Häggström I. Distinctive features of Langmuir and ion-acoustic turbulences induced by O- and X-mode HF pumping at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020; 125(7). <https://doi.org/10.1029/2020JA028203>

17. Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Ion gyro-harmonic structures in stimulated emission excited by X-mode high power HF radio waves at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021; 126(8). <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
18. Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Sci.* 2016; 51(9): 1533–1546.
19. Rishbeth H., van Eyken T. EISCAT: Early history and the first ten years of operation. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1993; 55: 525–542.
20. Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., Crooks S., Davies J.A., McWilliams K., Milan S.E., Parsons M., Payne D., Thomas E.C., Thornhill J., Wade N.M., Yeoman T.K., Barnes R.J. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars. *Ann. Geophys.* 2004; 22: 459–473.
21. 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: 22–36.
Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D. Rogov D.D. Remote diagnostics of effects induced by high-latitude heating facilities. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021; 46: 231–240. <https://doi.org/10.3103/S1068373921040038>
22. Lehtinen M.S., Huuskonen A. General incoherent scatter analysis and GUISDAP. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1996; 58: 435–452.
23. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M. Artificial ducts created via high-power HF radio waves at EISCAT. *Remote Sens.* 2023; 15(9): 2300. <https://doi.org/10.3390/rs15092300>
24. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Особенности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности при O- и X-нагреве вблизи критической частоты слоя F2. *Солнечно-земная физика.* 2023; 9(1): 22–32. <https://doi.org/10.12737/szf-91202303>
Borisova T.D., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S. Features of artificial ionosphere turbulence induced by the O- and X-mode HF heating near the F2-layer critical frequency. *Solar-Terrestrial Physics.* 2023; 9(1): 21–30. <https://doi.org/10.12737/stp-91202303>
25. Rietveld M. T., Senior A. Ducting of incoherent scatter radar waves by field-aligned irregularities. *Ann. Geophys.* 2020; 38: 1101–1113.
26. Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, aurora and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: aspect angle dependence. *J. Geophys. Res.* 2003; 108(A4): 1141. <https://doi.org/10.1029/2002 JA 009543>
27. Грач С.М., Трахтенгерц В.Ю. О параметрическом возбуждении ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля. *Изв. вузов. Радиофизика.* 1975; 18(9): 1288–1296.
Grach S.M., Trakhtengerts V.Yu. Parametric excitation of ionospheric irregularities extended along the magnetic field. *Radiophys. Quantum Electron.* 1975; 18(9): 951–957.
28. Васьков В.В., Гуревич А.В. Нелинейная резонансная неустойчивость плазмы в поле обыкновенной электромагнитной волны. *ЖЭТФ.* 1975; 69(1): 176–178.
Vas'kov V.V., Gurevich A.V. Nonlinear resonance instability of plasma in the reflection region of ordinary electromagnetic wave. *Sov. Phys. JETP.* 1975; 42(1): 91–103.
29. Kelley M.C. *The Earth's ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics.* San Diego, CA, USA: Academic Press; 1989. 556 p.
30. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М. Сравнение спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы на частотах ниже и выше критической частоты X-компоненты слоя F2. *Метеорология и гидрология.* 2022; 12: 21–34. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-12-21-34>

- Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Egorov I. M. Comparison of spectral features of narrowband stimulated electromagnetic emission excited by an extraordinary pump wave in the high-latitude ionospheric F region at frequencies below and above the F2 layer X-component critical frequency. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022; 47(12): 921–930. <https://doi.org/10.3103/S1068373922120032>
31. Shukla P.K., Stenflo L. Stimulated Brillouin scattering of electromagnetic waves in magnetized plasmas. *Journal of Plasma Physics*. 2010; 76: 853–855. <https://doi.org/10.1017/S0022377810000504>
 32. Bernhardt P.A., Selcher C.A., Lehmborg R.H., Rodriguez S.P., Thomson J.F., Groves K.M., McCarrick M.J., Frazer G.J. Stimulated Brillouin Scatter in a magnetized ionospheric plasma. *Physics Review Letters*. 2010; 104(16): 165004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.165004>
 33. Mahmoudian A., Scales W.A., Bernhardt P.A., Fu H., Briczinski S.J., McCarrick M.J. Investigation of ionospheric stimulated Brillouin scatter generated at pump frequencies near electron gyroharmonics. *Radio Science*. 2013; 48: 685–697. <https://doi.org/10.1002/2013RS005189>
 34. Bernhardt P.A., Selcher C.A., Kowtha S. Electron and ion Bernstein waves excited in the ionosphere by high power EM waves at the second harmonic of the electron cyclotron frequency. *Geophysical Research Letters*. 2011; 38: L19107. <https://doi.org/10.1029/2011GL049390>
 35. Mahmoudian A., Scale, W.A., Bernhardt P.A., Samimi A., Kendall E., Ruohoniemi J.M., Isham B., Vega-Cancel O., Bordikar M. Ion gyro-harmonic structuring in the stimulated radiation spectrum and optical emissions during electron gyro-harmonic heating. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2013; 118: 1270–1287. <https://doi.org/10.1002/jgra.50167>
 36. Samimi A., Scales W. A., Bernhardt P. A., Briczinski S. J., McCarrick M. J. Ion gyroharmonic structures in stimulated radiation during second electron gyroharmonic heating: 2. Simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2014; 119: 462–478. <https://doi.org/10.1002/2013JA019341>