

**ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ  
ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
ПРИ O- И X-НАГРЕВЕ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2**

**FEATURES OF ARTIFICIAL IONOSPHERE TURBULENCE  
INDUCED BY THE O- AND X-MODE  
HF HEATING NEAR THE F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY**

**Т.Д. Борисова** 

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия, borisova@aari.ru

**T.D. Borisova**

Arctic and Antarctic Research Institute,  
St. Petersburg, Russia, borisova@aari.ru

**Н.Ф. Благовещенская** 

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия, nataly@aari.ru

**N.F. Blagoveshchenskaya**

Arctic and Antarctic Research Institute,  
St. Petersburg, Russia, nataly@aari.ru

**А.С. Калишин** 

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru

**A.S. Kalishin**

Arctic and Antarctic Research Institute,  
St. Petersburg, Russia, askalishin@aari.ru

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований ориентированных вдоль внешнего магнитного поля крупномасштабных неоднородностей с повышенной плотностью электронов (дактов), температуры электронов и возбуждения продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) в F-области высокоширотной ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн обыкновенной (O-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризации. Эксперименты выполнялись на нагревном стенде EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия). Мощные КВ-радиоволны излучались в направлении магнитного зенита при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения на частотах  $f_H$  вблизи и ниже критической частоты слоя F2  $f_oF2$ . Диагностика эффектов модификации ионосферы проводилась на частоте 930 МГц радаром некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT, пространственно совмещенным с нагревным стендом. Выполнены расчеты напряженности электрического поля мощной КВ-радиоволны вблизи высоты отражения с учетом неотклоняющего поглощения на пути распространения. Определены условия генерации и пороговые (минимальные) значения электрического поля, необходимые для возрастания электронной концентрации в широком диапазоне высот, возбуждения плазменных (ленгмюровских) и ионно-акустических волн в условиях  $f_H \sim f_oF2$  и  $f_H < f_oF2$ . Обсуждаются возможные механизмы формирования интенсивных крупномасштабных вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей с повышенной плотностью электронов выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны O- и X-поляризации на сотни километров.

**Ключевые слова:** высокоширотная ионосфера, F-область, мощная КВ-радиоволна, электрическое поле, возрастание электронной концентрации, ленгмюровская волна, ионно-акустическая волна, радар некогерентного рассеяния радиоволн, EISCAT.

**Abstract.** We present experimental results from the studies of large-scale inhomogeneities along the external magnetic field with increased electron density, electron temperature, and excitation of elongated plasma waves (Langmuir and ion-acoustic), induced by the ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) HF heating near the F2-layer critical frequency, in the high-latitude ionospheric F-region. The experiments have been carried out at the EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway). Powerful HF radio waves radiated toward the magnetic zenith through a step change in the effective radiated power at frequencies  $f_H$  near and below the F2-layer critical frequency  $f_oF2$ . The EISCAT incoherent scatter radar (930 MHz), co-located with the EISCAT/Heating facility, was utilized for diagnostics of ionospheric modification effects. We calculated the electric field of a powerful HF radio wave near the reflection altitude, taking into account the non-deflective absorption along the propagation path. We determined the conditions for electric field generation and its threshold (minimum) values required for electron density enhancements in a wide altitude range, excitation of Langmuir and ion-acoustic plasma waves under  $f_H \sim f_oF2$  and  $f_H < f_oF2$ . The possible generation mechanisms for the electron density enhancements above the reflection altitude of the powerful HF radio wave of O- and X-polarization are discussed.

**Keywords:** high-latitude ionosphere, F-region, powerful HF radio wave, electric field, electron density enhancement, Langmuir wave, ion-acoustic wave, incoherent scatter radar, EISCAT.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжают интенсивные исследования процессов нелинейного взаимодействия мощной КВ-радиоволны с ионосферной плазмой. Модификации верхней (F-область) ионосферы мощными КВ-радиоволнами обыкновенной (O-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризации приводит к генерации искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждению плазменных волн, искусственного радиоизлучения ионосферы (широкополосного и узкополосного), оптического излучения и т. д. [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007; Blagoveshchenskaya, 2020; Robinson, 1989]. Эффективность воздействия излучения нагревного стенда на F-область ионосферы зависит от широты его расположения, эффективной мощности излучения (Effective Radiated Power, ERP), направления излучения относительно ориентации магнитного поля, частоты волны накачки  $f_H$  и ее поляризации, фоновых гелиофизических условий.

Согласно теоретическим представлениям только мощные КВ-радиоволны O-поляризации с частотой ниже критической частоты слоя F2 ( $f_H < f_oF2$ ) способны возбудить электростатические плазменные волны (ленгмюровские и верхнегибридные) в F-области ионосферы, поскольку радиоволны X-поляризации не достигают резонансных высот в ионосфере [Гуревич, 2007; Stubbe, Kopka, 1983; Robinson, 1989]. Вблизи высоты отражения мощной КВ-радиоволны в ионосфере возбуждаются параметрические распадные неустойчивости — периодическая стрикционная и аперидическая стрикционная, которые могут быть непосредственно идентифицированы в спектрах рассеянного сигнала, регистрируемого радаром (НР) радиоволн, как инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленные ионно-акустические линии (HF-enhanced ion lines, HFIL) [Kuo, 2001; Kuo, Lee, 2005; Stubbe, 1996; DuBois et al., 1990; Djuth, DuBois, 2015]. Появление HFIL и HFPL в спектрах рассеянного сигнала, регистрируемого радаром НР, является прямым доказательством возбуждения продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) и, следовательно, развития параметрических распадных стрикционных неустойчивостей.

При нагреве волнами обыкновенной поляризации (O-нагреве) HFPL и HFIL возбуждаются в начальный период времени (<200 мс) при включении нагревного стенда («эффект включения»), пороговые мощности их возбуждения на нагревном стенде EISCAT/Heating составляют порядка 25–40 МВт [Stubbe, 1996]. При низкой эффективной мощности излучения ( $ERP < 200$  МВт) возбуждение стрикционных параметрических неустойчивостей подавляется последующим развитием тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [Васьков, Гуревич, 1979; Грач и др., 1977; Stubbe, 1996], ответственной за генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль геомагнитного поля. В случае высокой эффективной мощности излучения нагревного стенда ( $ERP > 200$  МВт) возможно возобновление возбуждения HFIL и HFPL,

существующих одновременно с мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями [Борисова и др., 2017; Blagoveshchenskaya et al., 2020].

Необыкновенно поляризованная мощная КВ-радиоволна в ионосфере отражается на высоте, где локальная плазменная частота определяется как  $f_{pe}^2 = f_H(f_H - f_{ce})$ , где  $f_{ce}$  — гирочастота электронов, т. е. ниже высот возбуждения электростатических плазменных волн. Следовательно, мощные КВ-радиоволны X-поляризации не должны генерировать такие волны и, соответственно, вызывать искусственные плазменные турбулентности и сопутствующие им явления, поскольку необыкновенные волны не достигают высот ионосферных резонансов [Stubbe, Kopka, 1983; Robinson, 1989; Гуревич, 2007]. Результаты многочисленных экспериментов, выполненных на нагревном стенде EISCAT/Heating в режиме излучения КВ-радиоволн X-поляризации (X-нагрев) в F-область высокоширотной ионосферы в направлении магнитного зенита, продемонстрировали возможность разнообразных явлений в ионосферной плазме F-области. При этом эффекты, вызванные волной накачки с X-модой, могут быть намного сильнее, чем эффекты в случае нагрева волной с O-модой [Благовещенская и др., 2018, 2019; Blagoveshchenskaya, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2022]. Отметим такие явления, как генерация искусственных ионосферных неоднородностей, интенсивные ленгмюровские и усиленные нагревом ионные линии, сильные возрастания электронной концентрации в широком диапазоне высот (на 200–450 км выше максимума слоя F2). При X-нагреве на высоких частотах ( $f_H = 5.4–8$  МГц) при высоких эффективных мощностях излучения ( $ERP > 250$  МВт) сильные возрастания  $N_e$  регистрировались на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 [Blagoveshchenskaya et al., 2022]. Как показали результаты исследований на высокоширотном нагревном стенде EISCAT/Heating [Blagoveshchenskaya et al., 2022], возрастания  $N_e$  достигают 50–70 % относительно фоновых значений  $N_{e0}$ , образуя вдоль силовых линий магнитного поля каналы повышенной электронной плотности — дакты, что сопровождается сравнительно небольшими повышениями температуры электронов  $T_e$  (~20–30 % при нагреве на частотах  $f_H \leq f_oF2$  и до 40–50 % при нагреве на частотах  $f_H > f_oF2$ ) вследствие омического нагрева электронов. Возрастания  $N_e$  начинались после включения нагревного стенда и достигали максимальных значений через ~30–50 с. После выключения стенда возвращение  $N_e$  к фоновым значениям происходило через 2–5 мин.

В отличие от X-нагрева, при котором возрастание  $N_e$  в широком диапазоне высот является типичным явлением, при O-нагреве повышения электронной концентрации  $N_e$  в F-области высокоширотной ионосферы вплоть до высот 450–550 км возможны только в особых условиях. По данным наблюдений на радаре НР EISCAT, в этих условиях частота нагрева должна быть вблизи критической частоты слоя F2,  $f_H \sim f_oF2$ , и вблизи или выше частоты гиро-

гармоник электронов,  $f_H \geq n f_{ce}$ , где  $n$  — номер гармоники [Борисова и др., 2015]. По данным экспериментов на высокоширотном стенде HAARP (High-frequency Active Auroral Research Program) с использованием спутников DEMETER и DMSP были обнаружены каналы повышенной плотности плазмы (ионов атомарного кислорода  $O^+$  и электронов) на высотах 670–840 км при нагреве F-области высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами O-поляризации. Наиболее интенсивные дакты создавались на частотах нагрева вблизи критической частоты слоя F2 и второй гирогармоники электронов [Vartanyan et al., 2012; Milikh et al., 2012]. Результаты исследований [Рапопорт и др., 2007; Фролов и др., 2008], также выполненных с использованием спутников DEMETER и DMSP, продемонстрировали возможность формирования каналов повышенной плотности плазмы (ионов  $O^+$  и электронов) на высотах 660 и 840 км при модификации F2-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами O-поляризации с помощью среднеширотного нагревного стенда «Сура».

Целью настоящей работы является определение порогов возбуждения, т. е. минимальных значений напряженности электрического поля мощной КВ-радиоволны, необходимых для создания каналов повышенной электронной плотности и возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн при O- и X-нагреве F-области высокоширотной ионосферы. Исследования базируются на данных экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating и на результатах численных расчетов напряженности электрического поля  $E_{ion}$  волны накачки в ионосфере с учетом потерь мощной волны при распространении в нижележащих слоях.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты со ступенчатым изменением эффективной мощности излучения мощных КВ-радиоволн O- или X-поляризации проводились на высокоширотном нагревном стенде EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия) [Rietveld et al., 2016] 26 февраля 2013 г. с 12:30 до 13:30 UT и 20 октября 2012 г. с 13:30 до 14:30 UT. Двадцать шестого февраля 2013 г. мощная КВ-радиоволна излучалась на частоте  $f_H = 7.1$  МГц, близкой к критической частоте слоя F2 ( $f_H/f_oF2 \sim 0.99-1.05$ , далее в тексте обозначается как  $f_H/f_oF2 \sim 1$ ), которая была выше частоты пятой гирогармоники электронов на 0.26 МГц. Двадцатого октября 2012 г. излучение проводилось на частоте  $f_H = 7.953$  МГц, лежащей ниже  $f_oF2$  ( $f_H/f_oF2 \sim 0.89-0.94$ ) и ниже (на 0.187 МГц) частоты шестой гирогармоники электронов. В обоих экспериментах использовалась фазированная антенная решетка № 1 с шириной диаграммы направленности порядка  $5^\circ-6^\circ$  на уровне  $-3$  дБ, ориентированной в направлении магнитного зенита (наклон диаграммы направленности составлял  $12^\circ$  к югу от вертикали, азимут —  $185^\circ$ ). Излучение проводилось в течение 10 мин при ступенчатом изменении ERP каждую минуту, затем следовала пауза 5 мин. Поляризация мощной КВ-радиоволны изменялась в каждом цикле.

Двадцать шестого февраля 2013 г. в период 12:30–13:30 UT эффективная мощность излучения стенда EISCAT/Heating изменялась в цикле нагрева от 80 до 690 МВт. Рассчитанные значения ERP были приблизительно одинаковыми для каждого цикла нагрева (из четырех представленных) и составляли при ступенчатом изменении каждую минуту (с паузой 1 с между ступенями) 12, 27, 55, 77, 100, 100, 77, 55, 27, 12 % от максимальной эффективной мощности излучения  $ERP_{max} \sim 690$  МВт. Эксперимент проводился в дневное время в период средней солнечной активности (число Вольфа  $W=59$  [https://spaceweather.com]), в спокойных геомагнитных условиях ( $K_p=2-$  и  $A_p=6$  [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]).

Двадцатого октября 2012 г. с 13:30 до 14:30 UT ступенчатое изменение ERP осуществлялось в последовательности 10, 30, 50, 70, 100, 100, 70, 50, 30, 10 % от  $ERP_{max} \sim 585$  МВт.

Диагностика явлений в F-области высокоширотной ионосферы в периоды экспериментов проводилась радаром HP (Тромсё) на частоте 930 МГц, принадлежащим EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) [Rishbeth, van Eyken, 1993], который пространственно совмещен с нагревным стендом. Пространственный масштаб (длина волны) рассеивающих турбулентностей для радара HP EISCAT составляет  $l=0.16$  м ( $l=c/2f_{rad}$ , где  $c$  — скорость света). С помощью радара EISCAT определялись следующие параметры ионосферной плазмы: электронная концентрация  $N_e$  и температура  $T_e$ , интенсивности спектральных линий, инициированных нагревом (спектральные максимумы ленгмюровских  $S_{PL}$  и ионно-акустических  $S_{IL}$  волн), а также мощности рассеянного сигнала радара (первичные значения концентрации электронов)  $N_{raw}$ . В периоды экспериментов радар HP работал в диапазоне высот от 90 до 680 км с разрешением по высоте 3 км и по времени 5 с. Луч радара был совмещен с направлением излучения мощной КВ-радиоволны и ориентирован вдоль силовой линии магнитного поля Земли.

Состояние ионосферы и критические частоты слоя F2 контролировались с помощью ионозонда вертикального зондирования, расположенного в Тромсё.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В разделе по данным наблюдений на радаре HP EISCAT (930 МГц) рассмотрено поведение концентрации  $N_e$  и температуры  $T_e$  электронов, первичные значения электронной концентрации  $N_{raw}$  и интенсивности  $S_{PL}$  плазменных линий HFPL при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/Heating в периоды экспериментов 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г.

По данным  $N_{raw}$  с помощью унифицированного комплекса программ GUISDAP (англ. Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package system) [Lehtinen, Huuskonen, 1996] были рассчитаны параметры ионосферной плазмы:  $N_e$  и  $T_e$ . Распределения  $N_e$  и  $T_e$  в зависимости от времени  $t$  (UT) и высоты  $h$  получены с шагом интегрирования по времени 30 с и переменным шагом по высоте. При воз-

буждении продольных плазменных волн (ионно-акустических и ленгмюровских) в ионосфере происходит когерентное рассеяние сигнала радара. Теория некогерентного рассеяния, заложенная в программе GUIDAP, не позволяет достоверно определить параметры ионосферы на высотах возбуждения продольных плазменных волн, поэтому при анализе учитывались только достоверные данные, которые программно контролируются уровнем параметра  $Residual < 2.1$  [Lehtinen, Huuskonen, 1996]. По специализированной программе GUIDAP рассчитывались также интенсивности  $S_{PL}$  плазменных линий, измеренных около частоты нагрева  $f_H$  в интервале высот 128–302 км. Заметим, что в период экспериментов радар EISCAT в высокочастотном канале измерений регистрировал плазменные волны, сдвинутые вниз по частоте относительно частоты радара (на рисунках изменения частоты показаны со знаком минус). Графическое представление результатов интегрирования выполнено в средах MatLab или GUIDAP.

На рис. 1, 2 показаны результаты обработки данных радара HP, полученных во время нагревных экспериментов 26 февраля 2013 г. с 12:30 до 13:30 UT и 20 октября 2012 г. с 13:30 до 14:30 UT соответственно при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения. Панели *a*, *b* и *в* на рис. 1 и 2 характеризуют высотно-временные распределения  $N_e$ ,  $T_e$  и  $N_{raw}$ , характеризующей интенсивность усиленных нагревом ионно-акустических волн. На панелях *г* приведены спектрограммы  $S_{PL}$  (частотно-временные распределения) инициированных нагревом плазменных линий, измеренных около частоты нагрева  $f_H$  в диапазонах от  $-5.5$  до  $-8.1$  МГц 26 февраля 2013 г. и от  $-7.25$  до  $-9.2$  МГц 20 октября 2012 г. соответственно. Изменения во времени  $N_e$  и  $T_e$  на фиксированных высотах показаны на панелях *д* и *е*, а панели *ж* иллюстрируют поведение критических частот регулярного слоя F2 ( $f_oF2$ ) по данным станции вертикального зондирования Тромсё. Изменения эффективной мощности излучения ( $ERP$ ) нагревного стенда EISCAT/Heating и рассчитанные значения напряженности электрического поля ( $E_{ion}$ ) волны накачки в ионосфере приведены на панелях *з* черным и красным цветом соответственно. Методика расчета  $E_{ion}$  представлена в разделе 3.

Панели *a*, *д* рис. 1 наглядно демонстрируют, что 26 октября 2013 г. в условиях, когда частота нагрева  $f_H = 7.1$  МГц была близка к критической частоте слоя F2 и превышала (на 0.26 МГц) частоту пятой гирогармоники электронов, во всех четырех циклах как при X-, так и O-нагреве наблюдалось возрастание  $N_e$  на высотах выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны (вплоть до  $\sim 500$  км). Результаты определения  $N_e$  на фиксированных высотах при O-нагреве свидетельствуют, что повышение электронной концентрации относительно фоновых значений  $N_{e0}$  составляло  $\Delta N_e \sim 21$ –42 % и в цикле 12:31–12:41 UT начиналось при  $ERP = 186$  МВт, а в цикле 13:01–13:11 UT при  $ERP = 380$  МВт. Здесь и далее относительное повышение электронной концентрации  $\Delta N_e = (N_e - N_{e0}) / N_{e0}$ . При X-нагреве наблюдались более высокие значения  $\Delta N_e \sim 45$ –72 %. Повышение  $N_e$

начиналось при  $ERP = 186$  МВт в цикле 12:46–12:56 UT и  $ERP = 83$  МВт в цикле 13:16–13:26 UT. С увеличением высоты отмечался рост  $\Delta N_e$ . После выключения нагревного стенда при X-нагреве повышенный уровень  $N_e$  сохранялся в течение 1–2 мин.

Поведение электронной концентрации 20 октября 2012 г. при нагреве на частоте  $f_H = 7.953$  МГц, которая была ниже как критической частоты слоя F2, так и частоты шестой гирогармоники электронов (на 0.187 МГц), показано на рис. 2, *a*, *д*. Из приведенных данных видно, что, в отличие от события 26 февраля 2013 г., эффект возрастания  $N_e$  в циклах O-нагрева (13:31–13:41 UT и 14:01–14:11 UT) отсутствовал. При X-нагреве (циклы 13:46–13:56 и 14:16–14:26 UT), как и в эксперименте 26 февраля 2013 г., регистрировались сильные возрастания  $N_e$  в широком диапазоне высот, начиная с 250–280 км, что выше высоты отражения мощной КВ-радиоволны, и вплоть до 600 км. Относительное повышение электронной концентрации составляло  $\sim 48$ –82 % и начиналось при  $ERP = 59$  МВт.

Поведение температуры электронов  $T_e$  в период экспериментов 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г. имеет аналогичный характер (см. рис. 1, *б*, *е* и рис. 2, *б*, *е*). При O-нагреве наблюдались сильные возрастания температуры электронов, начиная с высот близких к высотам отражения и верхнего гибридного резонанса. Затем области повышенных значений  $T_e$  распространялись вдоль линий магнитного поля на высоты верхней ионосферы благодаря процессам продольного переноса теплопроводности в замагниченной плазме [Гуревич, 2007]. Температура электронов в циклах O-нагрева на высотах F-области достигала 2500–3500 К, превышая фоновые значения  $T_e$  на 1000–1500 К.

Возрастания  $T_e$  в циклах X-нагрева были существенно меньше, чем при O-нагреве, и не превышали 500–700 К относительно фоновых значений. Они происходили в сравнительно узком диапазоне высот вблизи высоты отражения мощной КВ-радиоволны вследствие омического нагрева электронов. Следует отметить, что как при O-, так и X-нагреве значения  $T_e$  увеличивались (уменьшались) по мере роста (спада) эффективной мощности излучения.

Высотно-временные распределения  $N_{raw}$  (см. рис. 1, *в* и рис. 2, *в*), характеризующие интенсивность  $S_{PL}$  усиленных нагревом ионных линий, демонстрируют усиления  $N_{raw}$  на один-два порядка относительно фона в циклах как O-, так и X-нагрева на высотах вблизи высоты отражения мощной КВ-радиоволны. Одновременно с возбуждением HFIL происходило возбуждение инициированных нагревом плазменных линий. Из спектрограмм, приведенных на рис. 1, *г* и рис. 2, *г*, следует, что в циклах нагрева HFPL формируют области повышенной  $S_{PL}$  вблизи частот нагрева  $f_H = 7.1$  МГц 26 февраля 2013 г. и  $f_H = 7.953$  МГц 20 октября 2012 г. соответственно. Интенсивность плазменных линий в циклах X-нагрева существенно превышала  $S_{PL}$  при O-нагреве. Следует отметить, что в циклах O-нагрева 26 февраля 2013 г., который выполнялся в особых условиях ( $f_H / f_oF2 \sim 1$  и  $f_H > 5f_{ce}$  на 0.26 МГц), наблюдались области повышенной  $S_{PL}$ , не только на  $f_H = 7.1$  МГц, но и на частотах  $f_{out}$ ,

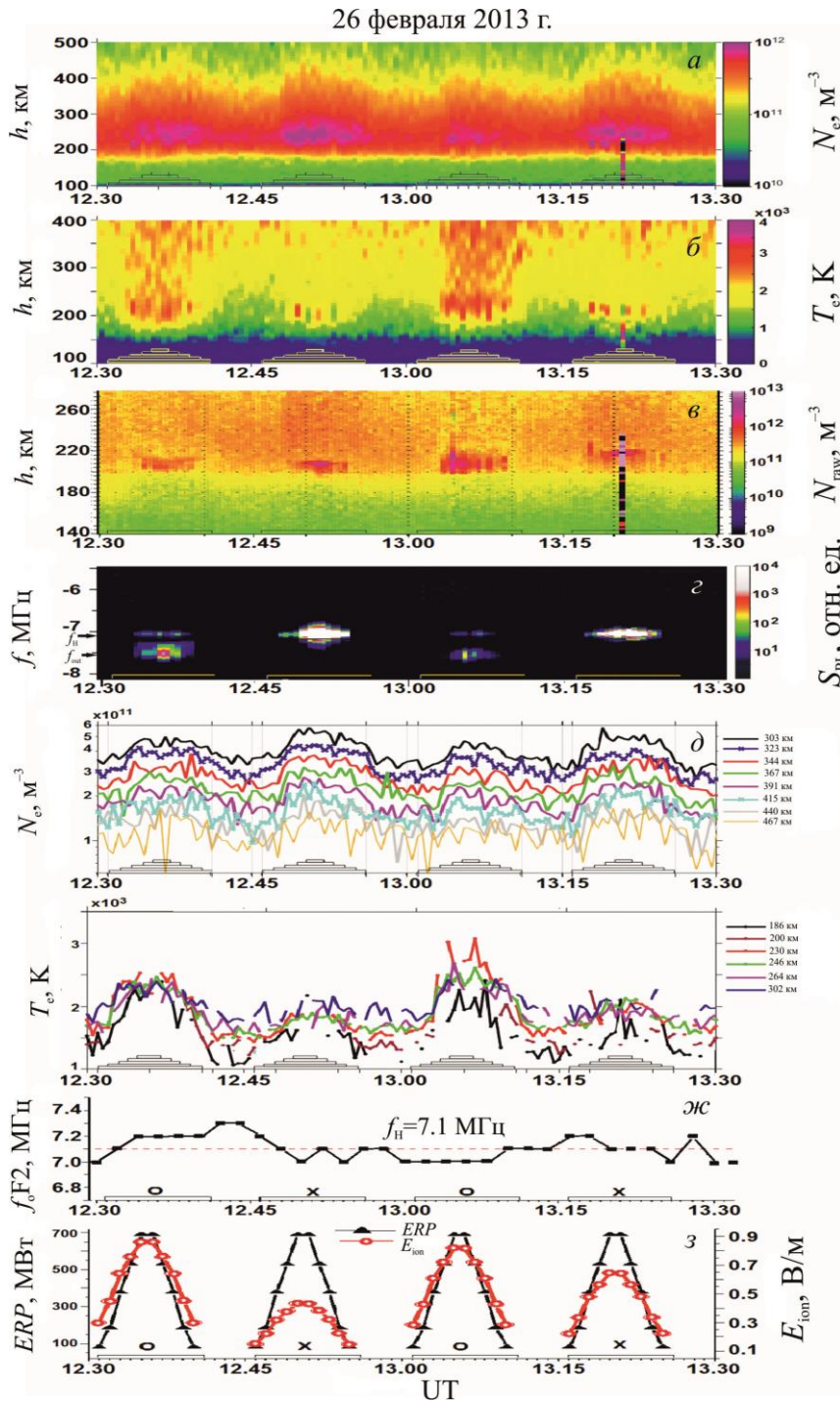


Рис. 1. Высотно-временные распределения  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $N_{raw}$  (а, б, в); спектрограмма  $S_{PL}$  (z); вариации во времени на фиксированных высотах ионосферы  $N_e$  и  $T_e$  (d, e) по данным радара HP EISCAT, полученным 26 февраля 2013 г.; вариации  $f_oF2$  (zh), а также ERP (черный цвет) и уровень электрического поля  $E_{ion}$  волны накачки, рассчитанный на ионосферных высотах (красный цвет) (z). КВ-радиоволна O/X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте  $f_H=7.1$  МГц при ступенчатом изменении ERP (80–680 МВт). Циклы нагрева показаны на осях времени

смещенных от  $f_H$  в сторону увеличения на  $\sim 0.40$  МГц ( $f_{out}$  отмечена на оси ординат). Двадцатого октября 2012 г. дополнительных областей повышенной  $S_{PL}$  на смещенных относительно  $f_H$  частотах не наблюдалось. Возбуждение плазменных линий на смещенных относительно  $f_H$  частотах при O-нагреве наблюдалось также в других экспериментах на стенде EISCAT/Heating в условиях близости частоты нагрева к критической частоте слоя F2 и гармоникам гиро-частоты электронов и объяснялось дисперсионными

свойствами ленгмюровской волны в плазме с конечной температурой электронов [Борисова и др., 2018; Isham et al., 1990; DuBois et al., 1990].

### 3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МОЩНОЙ КВ-РАДИОВОЛНЫ НА ВЫСОТАХ ИОНОСФЕРЫ $E_{ion}$

Напряженность электрического поля мощной КВ-радиоволны стенда EISCAT/Heating в свободном

20 октября 2012 г.

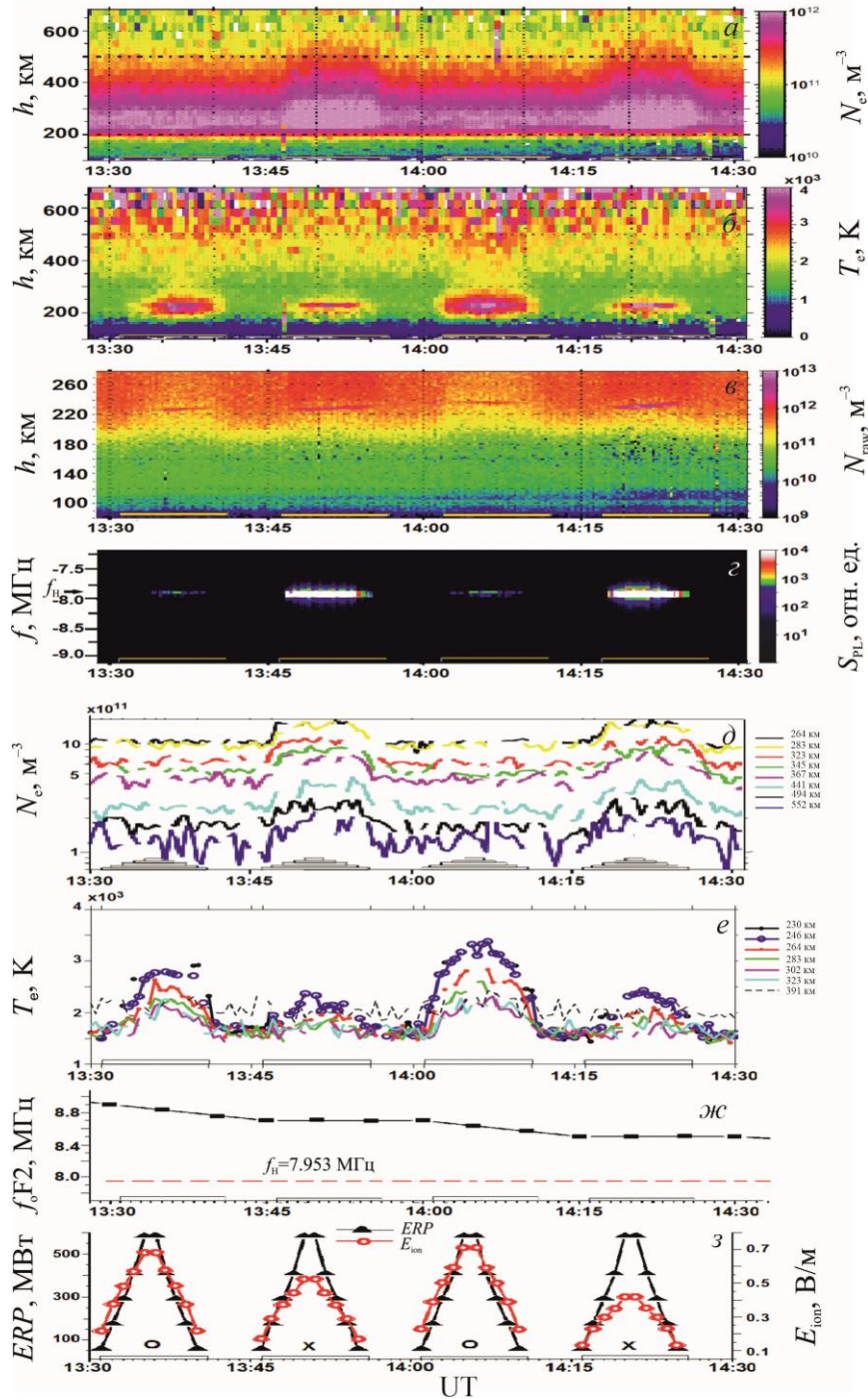


Рис. 2. Высотно-временные распределения  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $N_{raw}$  (а, б, б'); спектрограмма  $S_{PL}$  (z); вариации во времени на фиксированных высотах  $h$  ионосферы  $N_e$  и  $T_e$  (д, е) по данным радара HP EISCAT, полученным 20 октября 2012 г.; вариации  $f_oF2$  (ж), а также ERP (черный цвет) и уровень электрического поля  $E_{ion}$  волны накачки, рассчитанный на ионосферных высотах (красный цвет) (з). КВ-радиоволна O/X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте  $f_H=7.953$  МГц при ступенчатом изменении ERP (56–560 МВт). Циклы нагрева показаны на осях времени

пространстве определяется выражением [Robinson, 1989]

$$E_{ion} \left[ \frac{V}{m} \right] = \frac{0.25 \sqrt{ERP [кВт]}}{h [км]} \quad (1)$$

Распространение радиоволны в ионосфере сопровождается потерей части ее энергии, которая преимущественно переходит в тепловую. Следствием этих

потерь является затухание, т. е. уменьшение амплитуды поля волны, и выражение (1) приобретает вид

$$E_{ion} \left[ \frac{V}{m} \right] = \frac{0.25 \sqrt{ERP [кВт]}}{h [км]} e^{-A}, \quad (2)$$

где  $h$  — текущая высота в возмущенной области, на которой рассчитывается поле волны;  $A$  — потери напряженности радиоволны в децибеллах на пути

распространения  $s$ , которые рассчитываются как [Zawdie et al., 2017]

$$A = -8.68 \int \kappa ds. \quad (3)$$

В (3)  $ds$  — расстояние вдоль пути распространения;  $\kappa$  — мнимая часть волнового вектора  $\mathbf{k}$ :  $\mathbf{k} = \omega \cdot \mathbf{n} / c$ , где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота волны;  $n = (\mu + i\chi)$  — комплексный показатель преломления;  $\mu$  — действительная часть показателя преломления;  $\chi$  — мнимая часть показателя преломления;  $c$  — скорость света. Для  $\kappa$  используется приближенное выражение

$$\kappa = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_e c} \frac{1}{\mu} \frac{N_e v_e}{v_e^2 + (\omega \pm \omega_{ce} \cos \theta)^2}, \quad (4)$$

где  $e$ ,  $m_e$  — заряд и масса электрона;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость свободного пространства;  $v_e$  — частота столкновений электронов;  $\omega_{ce} = 2\pi f_{ce}$ ;  $f_{ce}$  — гирочастота электронов;  $\theta$  — угол между направлением распространения волны ( $\mathbf{k}$ ) и магнитным полем Земли. Знаки плюс/минус используются для обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации волн соответственно.

Численные оценки электрического поля мощной КВ-радиоволны на высотах отражения с учетом затухания на пути распространения волны в D-, E- и F-слоях ионосферы выполнены в приближении геометрической оптики для слоистой ионосферы и реализованы в среде MatLab. Поскольку мы рассматриваем распространение волны накачки до высоты отражения или до максимума слоя F2, упростим траекторные расчеты, используя закон Снеллиуса и теорему Брейта—Тьюва [Дэвис, 1973]. Вычисления показателя преломления выполнены с учетом влияния магнитного поля и частоты соударений электронов [Гинзбург, 1967]. В работе [Zawdie et al., 2017] показано, что для расчета ионосферного поглощения можно воспользоваться любым методом определения траекторий радиолуча, если корректно использовать частоты столкновений электронов  $v_e$ . При расчете затухания КВ-радиоволн следует учитывать вариации частот столкновений электронов с ионами  $v_{ei}$  и нейтральными молекулами  $v_{en}$  в зависимости от местного времени, сезона, широты и солнечного цикла (без учета соударений между электронами). Эти изменения при расчетах поглощения приводят к различиям порядка 30 % в общем ионосферном затухании.

Частота соударений электронов есть  $v = v_{ei} + v_{en}$ . Вариации  $v_{ei}$  определялись на основе выражения [Гинзбург, 1967]

$$v_{ei} = N_e \cdot 10^{-6} \left[ 59 + 4.18 \lg \left( \frac{T_e^3}{N_e} \right) \right] T_e^{-3/2}. \quad (5)$$

Значения  $v_{en}$  рассчитывались для трех основных компонент состава атмосферы: молекулярного азота ( $N_2$ ), молекулярного и атомарного кислорода ( $O_2$  и  $O$ ) — по формулам [Schunk, Nagy, 2000]:

$$v_{en} = v_{eN_2} + v_{eO_2} + v_{eO},$$

$$v_{eN_2} = 2.33 \cdot 10^{-11} N_{N_2} \left( 1 - 1.21 \cdot 10^{-4} T_e \right) T_e,$$

$$v_{eO_2} = 1.82 \cdot 10^{-11} N_{O_2} \left( 1 + 0.036 \sqrt{T_e} \right) \sqrt{T_e}, \quad (6)$$

$$v_{eO} = 8.9 \cdot 10^{-11} N_O \left( 1 + 5.7 \cdot 10^{-4} T_e \right) \sqrt{T_e}.$$

При расчете траекторий распространения и поглощения мощной КВ-радиоволны текущие значения параметров высотных профилей концентрации  $N_e(h)$  и температуры  $T_e(h)$  электронов для каждого нагревного цикла определялись по данным радара HP (разрешение по высоте 3 км). Вычисления частот соударений электронов  $v_e(h)$  выполнены с учетом выражений (5), (6), входными параметрами которых являлись текущие данные, измеренные с помощью радара HP и рассчитанные по модели MSIS [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis\_vit\_mo.php]. Вычисления значений электрического поля  $E_{ion}$  мощной КВ-радиоволны на высотах ионосферы проводились с учетом изменений  $ERP$  каждую минуту излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating.

В таблице для условий экспериментов 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г. для каждого цикла О- и Х-нагрева приведены результаты численных оценок поглощения мощной КВ-радиоволны  $A$  (в дБ), экспериментальные значения  $ERP$  (в МВт), при которых начинаются/прекращаются возрастание электронной концентрации  $N_e$  и возбуждение плазменных и ионных линий. В графах 4–6 приведены также рассчитанные с учетом неотклоняющего поглощения в ионосфере значения электрических полей мощной КВ-радиоволны  $E_{ionNe}$ ,  $E_{ionPL}$  и  $E_{ionIL}$  (в В/м), при которых начинаются/прекращаются возрастание  $N_e$  и возбуждение плазменных и ионных линий. В графе 4 дополнительно приведены диапазоны изменений относительных возрастных электронной концентрации  $\Delta N_e$  (в %) на высотах 250–600 км.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных, приведенных в таблице и на рис. 1 и 2, свидетельствует, что во всех циклах Х-нагрева как 26 февраля 2013 г. ( $f_H/f_o F2 \sim 1$  и  $f_H > 5f_{ce}$  на 0.26 МГц), так и 20 октября 2012 г. ( $f_H/f_o F2 < 1$  и  $f_H < 6f_{ce}$  на 0.187 МГц) на высотах  $\sim 300$ –600 км наблюдались сильные возрастания электронной концентрации:  $\Delta N_e = 45$ –82 %. Заметим, что возрастание электронной концентрации в широком диапазоне высот является типичным явлением при Х-нагреве, наблюдавшимся во всех наших ранее выполненных экспериментах на высокоширотном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (см., например, [Blagoveshchenskaya, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2022]). Рассчитанные с учетом затухания мощной КВ-радиоволны при ее распространении на ионосферные высоты минимальные (пороговые) значения электрических полей в ионосфере при Х-нагреве, при которых начинались возрастания  $N_e$ ,  $E_{ionNe} = 0.13$ –0.22 В/м, что ниже порогов возбуждения ленгмюровских ( $E_{ionPL} = 0.22$ –0.34 В/м) и ионно-акустических ( $E_{ionIL} = 0.29$ –0.34 В/м) плазменных волн (см. таблицу). При уменьшении эффективной мощности излучения  $ERP$  во второй половине циклов Х-нагрева исчезновение эффекта возрастания  $N_e$  происходило позже прекращения возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазмен-

Оценки поглощения  $A$  мощной КВ-радиоволны в ионосфере,  $ERP$  (в скобках) и наименьших уровней электрических полей в ионосфере, необходимых для возрастания электронной плотности ( $E_{ionNe}$ ) и возбуждения ленгмюровских ( $E_{ionPL}$ ) и ионно-акустических плазменных волн ( $E_{ionIL}$ ), для О- и Х-циклов нагрева 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г., а также диапазоны изменений относительных возрастных концентраций электронной концентрации  $\Delta N_e$  на высотах 250–600 км. Косая черта разделяет значения, при которых начинаются/прекращаются возрастание  $N_e$  и возбуждение плазменных и ионных линий

Поляризация, период цикла нагрева, УТ	$f_H/f_oF_2$	$A$ , дБ	$ERP$ , МВт $E_{ionNe}$ , В/м $\Delta N_e$ , %	$ERP$ , МВт $E_{ionPL}$ , В/м	$ERP$ , МВт $E_{ionIL}$ , В/м
1	2	3	4	5	6
26 февраля 2013г.					
О 12:31–12:41	0.99	1.0	(186/83) 0.45/0.3 24–42	(186/186) 0.45/0.45	(380/380) 0.64/0.64
Х 12:46–12:56	1.03	7.8	(186/83) 0.22/0.15 45–63	(186/186) 0.22/0.22	(380/380) 0.32/0.32
О 13:01–13:11	1.05	1.5	(380/186) 0.6/0.43 21–38	(186/83) 0.43/0.28	(380/186) 0.6/0.43
Х 13:16–13:26	0.99	3.5	(83/83) 0.22/0.22 45–72	(186/186) 0.34/0.34	(186/380) 0.34/0.48
20 октября 2012 г.					
О 13:31–13:41	0.89	1.5	нет	(410/176) 0.57/0.37	(585/585) 0.68/0.68
Х 13:46–13:56	0.91	3.8	(59/59) 0.17/0.17 48–64	(176/59) 0.29/0.17	(176/176) 0.29/0.29
О 14:01–14:11	0.91	1.0	нет	(176/176) 0.39/0.39	(293/293) 0.5/0.5
Х 14:16–14:26	0.94	5.7	(59/59) 0.13/0.13 52–82	(176/59) 0.22/0.13	(293/293) 0.29/0.29

ных волн. Следовательно, возрастание  $N_e$  началось раньше возбуждения плазменных волн и прекращалось после прекращения их возбуждения, т. е.  $E_{ionNe} < E_{ionPL}$  и  $E_{ionNe} < E_{ionIL}$ .

Как правило, при О-нагреве возрастания  $N_e$  не наблюдается, тем не менее в особых условиях нагрева ( $f_H/f_oF_2 \sim 1$  и  $f_H \geq nf_{ce}$ ) происходили повышения электронной концентрации в высокоширотной F-области ионосферы вплоть до высот 450–550 км [Борисова и др., 2015]. Такие условия были реализованы в эксперименте 26 февраля 2013 г., когда в циклах О-нагрева наблюдался эффект возрастания  $N_e$ . При сравнении эффектов возрастания  $N_e$  при О- и Х-нагреве были выявлены следующие различия. Во-первых, при О-нагреве относительные возрастания электронной концентрации  $\Delta N_e = 21–42\%$  были меньше, чем при Х-нагреве, а пороги их возбуждения  $E_{ionNe} = 0.45–0.60$  В/м превышали пороги  $E_{ionNe}$  при Х-нагреве. Во-вторых, возрастание  $N_e$  при О-нагреве наблюдалось только при наличии ленгмюровских волн, т. е. при  $E_{ionNe} \geq E_{ionPL}$ . При Х-нагреве возрастания  $N_e$  не зависят от поведения ленгмюровских волн.

На рис. 3 приведены высотные профили концентрации электронов  $N_e(h)$  в диапазоне высот 250–500 км 26 февраля 2013 г. при О- ( $a, a1$ ) и Х- ( $b, b1$ ) нагреве. Результаты измерений  $N_e(h)$  20 октября 2012 г. показаны на рис. 3,  $v, v1$  для циклов Х-нагрева.

Данные рис. 3 наглядно демонстрируют возрастание  $N_e$  на высотах выше максимума слоя F2. Разрывы на представленных профилях  $N_e(h)$  объясняются высокими значениями параметра *Residual*, когда не представляется возможным достоверно определить значения  $N_e$ .

Анализ поведения и характеристик каналов повышенных значений  $N_e$  позволил предположить, что воздействие мощной КВ-радиоволны Х-поляризации на F-область высокоширотной ионосферы в направлении магнитного зенита вызывает ускорение электронов [Blagoveshchenskaya et al., 2022]. Это обусловлено совпадением направления вращения электрического поля мощной волны с левосторонней круговой поляризацией (Х-мода) с гировращением электронов, что может привести к их ускорению. Ускорение электронов при Х-нагреве подтверждается также высоким отношением (0.35–0.5) интенсивностей свечения зеленой (557.7 нм) линии атомарного кислорода и красной (630 нм) линии оптического излучения, индуцированных мощной КВ-радиоволной Х-поляризации [Blagoveshchenskaya et al., 2014]. Согласно результатам, полученным в работах [Carlson et al., 1982, 2016; Carlson, Jensen, 2014; Mishin et al., 2016], поток ускоренных электронов может привести к увеличению ионизации ионосферы. В ряде работ представлены результаты теоретических и экспери-



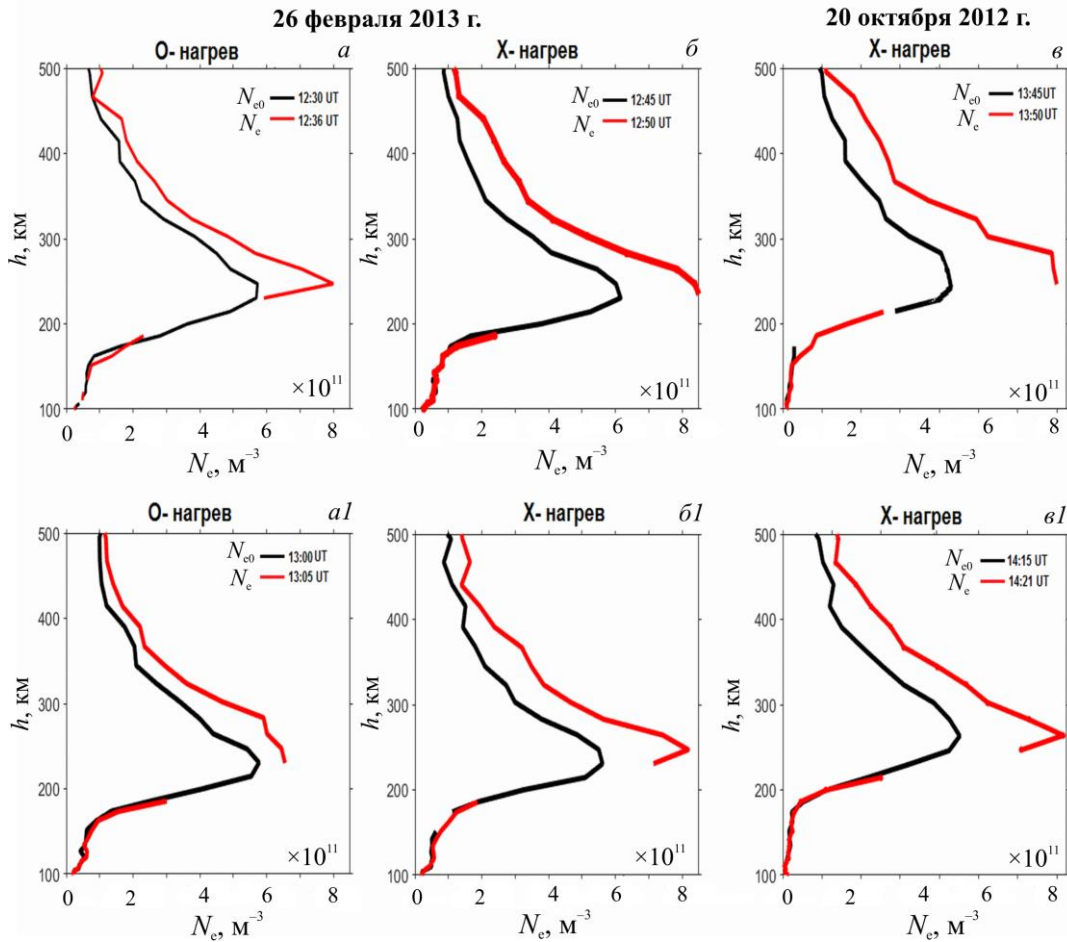


Рис. 3. Профили электронной концентрации в зависимости от высоты высокоширотной ионосферы по данным радара EISCAT перед началом циклов нагрева ( $N_{e0}$ , черный цвет) и в периоды нагрева с  $ERP$  100 % ( $N_e$ , красный цвет): 26 февраля 2013 г.,  $f_H/f_oF2 \sim 1$  для циклов О-нагрева 12:31–12:41 UT (а) и 13:01–13:11 UT (а1) и циклов Х-нагрева 12:46–12:56 UT (б) и 13:16–13:26 UT (б1); 20 октября 2012 г.,  $f_H/f_oF2 < 1$  для циклов Х-нагрева 13:46–13:56 UT (в) и 14:16–14:26 UT (в1) (возрастание  $N_e$  при О-нагреве не регистрировалось)

ментальных исследований дополнительной ионизации нейтральной компоненты ионосферы электронами, ускоренными плазменными волнами, при нагреве ионосферы мощными КВ-радиоволнами О-поляризации [Грач, 1999; Грач и др., 2016; Carlson, Jensen, 2014; Mishin et al., 2016; Carlson et al., 2016]. На основе этих исследований показано, что дополнительная ионизация электронами, ускоренными плазменной турбулентностью, наиболее выражена при нагреве на частотах вблизи или выше частоты гирогармоники электронов,  $f_H \geq n f_{ce}$ . При этом эффект повышения  $N_e$  усиливается при приближении частоты мощной волны к критической частоте слоя F2. Этим условиям удовлетворяет эксперимент 26 февраля 2013 г., когда мощная КВ-радиоволна О-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте  $f_H = 7.1$  МГц, близкой к  $f_oF2$  и незначительно превышающей частоту пятой гирогармоники электронов ( $f_H/f_oF2 \sim 1$  и  $f_H > 5f_{ce}$  на 0.26 МГц). При этом, как следует из таблицы, ленгмюровские волны возбуждались при  $E_{ionPL} \sim 0.43\text{--}0.45$  В/м, в то время как возрастание  $N_e$  начиналось при более высоких значениях  $E_{ionNe} \sim 0.45\text{--}0.60$  В/м. Следовательно, при О-нагреве возбуждение ленгмюровских волн (индуцированных плазменных линий на частоте нагрева в высокока-

стотном канале измерений радара HP EISCAT) начиналось раньше возрастания  $N_e$ . Таким образом возрастание  $N_e$  при О-нагреве в особых условиях ( $f_H \sim f_oF2$  и  $f_H \geq n f_{ce}$ ) может быть объяснено появлением потоков ускоренных электронов, вызванных возбуждением ленгмюровской турбулентности. Отсутствие эффекта возрастания  $N_e$  в циклах О-нагрева 20 октября 2012 г. может быть объяснено тем обстоятельством, что, с одной стороны, частота нагрева  $f_H = 7.953$  МГц была ниже частоты шестой гирогармоники электронов, а с другой — достаточной удаленностью  $f_H$  от  $f_oF2$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating 26 февраля 2013 г. ( $f_H/f_oF2 \sim 1$  и  $f_H > 5f_{ce}$  на 0.26 МГц) и 20 октября 2012 г. ( $f_H/f_oF2 < 1$  и  $f_H < 6f_{ce}$  на 0.187 МГц) при переменном О-/Х-нагреве F-области высокоширотной ионосферы в направлении магнитного зенита при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения. Диагностика эффектов, вызванных мощными КВ-радиоволнами, осуществлялась с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT (930 МГц), пространственно совмещенного с нагрев-

ным стендом. Выполнены оценки порогов возбуждения (минимальных значений напряженности электрического поля мощной КВ-радиоволны в ионосфере), необходимых для создания каналов повышенной плотности электронов и возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн при О- и Х-нагреве F-области высокоширотной ионосферы. Оценки выполнялись с учетом потерь мощной волны при распространении в нижележащих слоях.

Установлено, что при Х-нагреве на частотах как вблизи, так и ниже критической частоты слоя F2 ( $f_H/f_oF2 \sim 1$  и  $f_H/f_oF2 < 1$ ) возрастания электронной концентрации относительно фоновых значений составляли 45–82 % на высотах ~300–600 км. Возрастания  $N_e$  начинались при минимальных значениях электрического поля мощной КВ-радиоволны  $E_{ionNe} = 0.13–0.22$  В/м, которые ниже порогов возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн  $E_{ionPL} = 0.22–0.34$  и  $E_{ionL} = 0.32–0.50$  В/м соответственно. Следовательно, возрастание  $N_e$  начиналось раньше возбуждения плазменных волн, т. е.  $E_{ionNe} < E_{ionPL}$  и  $E_{ionNe} < E_{ionL}$ .

Показано, что при О-нагреве эффект возрастания  $N_e$  наблюдался только в особых условиях ( $f_H/f_oF2 \sim 1$  и  $f_H \geq nf_{ce}$ ). При этом относительные возрастания электронной концентрации (21–42 %) были меньше, чем при Х-нагреве, а пороги их возбуждения  $E_{ionNe} = 0.45–0.60$  В/м превышали пороги  $E_{ionNe}$  при Х-нагреве. Кроме того, эффект возрастания  $N_e$  при О-нагреве наблюдался только при наличии ленгмюровских волн, т. е. при  $E_{ionNe} \geq E_{ionPL}$ . При Х-нагреве возрастания  $N_e$  не зависят от поведения ленгмюровских волн.

Рассмотрены возможные механизмы, ответственные за возрастания электронной концентрации выше высоты отражения мощной волны. При Х-нагреве в направлении магнитного зенита совпадение вращения электрического поля мощной волны с левосторонней круговой поляризацией (Х-мода) с гиравращением электронов может вызвать ускорение электронов. Поток ускоренных электронов приводит к возрастанию электронной концентрации. При О-нагреве эффект возрастания  $N_e$  может быть объяснен появлением потоков ускоренных электронов, вызванных возбуждением ленгмюровской турбулентности в условиях  $f_H \sim f_oF2$  и  $f_H > nf_{ce}$ . Природа возрастания  $N_e$  при Х- и О-нагреве требует дальнейшего изучения.

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) и М.Т. Рьетвельда за выполненные расчеты реальных эффективных мощностей излучения нагревного стенда EISCAT/Heating в период экспериментов.

Конфликт интересов отсутствует.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. 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. 17–32. DOI: [10.7868/S002342061801003X](https://doi.org/10.7868/S002342061801003X).

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Характеристики мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2019. Т. 59, № 6. С. 759–773. DOI: [10.1134/S001679401906004X](https://doi.org/10.1134/S001679401906004X).

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M., Zagorskiy G.A. Disturbances of electron density in the high latitude upper F-region ionosphere induced by X-mode HF pumpwaves from EISCAT UHF radar observations. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68, № 3. С. 248–257. DOI: [10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257).

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. и др. Эффекты модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами на частотах вблизи пятой и шестой гирогармоник электронов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 8. С. 623–650.

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Йоман Т.К., Хагстром И. Влияние эффективной мощности излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating на возбуждение искусственных ионосферных турбулентностей в высокоширотной F-области ионосферы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 4. С. 305–325.

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Йоман Т.К., Хагстром И. Смещенные плазменные линии в нагревных экспериментах в высокоширотной ионосфере на частотах волны накачки вблизи гармоник гирорезонансов электронов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 10. С. 810–830.

Васьков В.В., Гуревич А.В. Самофокусировочная и резонансная неустойчивость в F-области ионосферы. *Тепловые нелинейные явления в плазме*. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 81–138.

Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука, 1967. 684 с.

Грач С.М. О кинетических эффектах в F-области ионосферы, возмущенной мощными радиоволнами. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1999. Т. 42, № 7. С. 651–667.

Грач С.М., Караштин А.Н., Митяков Н.А. и др. Параметрическое взаимодействие электромагнитного излучения с ионосферной плазмой. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1977. Т. 20. С. 1827–1833.

Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., Шиндин А.В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения. *УФН*. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189–1226. DOI: [10.3367/UFNr.2016.07.037868](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037868).

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. *УФН*. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145).

Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. 504 с.

Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П. и др. Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 8. С. 709–721.

Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым излучением. *УФН*. 2007. Т. 177, № 3. С. 330–340. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200703j.0330](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200703j.0330).

Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.Я. и др. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением. *Письма в ЖЭТФ*. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908–913.

Blagoveshchenskaya N.F. Perturbing the high-latitude upper ionosphere (F region) with powerful HF radio waves: A 25-year collaboration with EISCAT. *URSI Radio Science Bulletin*. 2020. Vol. 373. P. 40–55. DOI: [10.23919/URSIRSB.2020.9318436](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436).

- 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. Vol. 119. P. 10483–10498.
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Distinctive features of Langmuir and ion-acoustic turbulences induced by O- and X-mode HF pumping at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, e2020JA028203. DOI: [10.1029/2020JA028203](https://doi.org/10.1029/2020JA028203).
- Carlson H.C., Jensen J.B. HF accelerated electron fluxes, spectra, and ionization. *Earth, Moon, and Planets.* 2014. Vol. 116. P. 1–18. DOI: [10.1007/s11038-014-9454-6](https://doi.org/10.1007/s11038-014-9454-6).
- Carlson H.C., Wickwar V.B., Mantas G.P. Observations of fluxes of suprathermal electrons accelerated by HF excited instabilities. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982. Vol. 44. P. 1089–1100.
- Carlson H.C., Djuth F.T., Zhang L.D. Creating space plasma from the ground. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 122. P. 978–999. DOI: [10.1002/2016JA023880](https://doi.org/10.1002/2016JA023880).
- Djuth F.T., DuBois D.F. Temporal development of HF-excited Langmuir and ion turbulence at Arecibo. *Earth Moon Planets.* 2015. Vol. 116. P. 19–53. DOI: [10.1007/s11038-015-9458-x](https://doi.org/10.1007/s11038-015-9458-x).
- DuBois D.F., Rose H.A., Russell D. Excitation of strong Langmuir turbulence in plasmas near critical density: Application to HF heating of the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 21221–21272.
- Isham B., Kofman V., Hagfors T., et al. New phenomena observed by EISCAT during an RF ionospheric modification experiment. *Radio Sci.* 1990. Vol. 25, no. 3. P. 251–262.
- Kuo S.P. Cascade of the parametric decay instability in ionospheric heating experiments. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2001. Vol. 106. P. 5593–5597.
- Kuo S.P., Lee M.C. Cascade spectrum of HF enhanced plasma lines generated in HF heating experiments. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, iss. A1. P. A01309. DOI: [10.1029/2004JA010674](https://doi.org/10.1029/2004JA010674).
- Lehtinen M.S., Huuskonen A. General incoherent scatter analysis and GUIDAP. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. Vol. 58, no. 1-4. P. 435–452.
- Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A., et al. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating. *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, no. 10. L10102. DOI: [10.1029/2012GL051718](https://doi.org/10.1029/2012GL051718).
- Mishin E., Watkins B., Lehtinen N., et al. Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radiowaves: An assessment. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 3497–3524. DOI: [10.1002/2015JA021823](https://doi.org/10.1002/2015JA021823).
- Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Sci.* 2016. Vol. 51, no. 9. P. 1533–1546. DOI: [10.1002/2016RS006093](https://doi.org/10.1002/2016RS006093).
- Rishbeth H., van Eyken A.P. EISCAT — early history and the first ten years of operation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. Vol. 55, no. 4-5. P. 525–542.
- Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves. *Phys. Rep.* 1989. Vol. 179, no. 2-3. P. 79–209.
- Schunk R.W., Nagy A.F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 554 p.
- Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments in Tromsø. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. Vol. 58, no. 1-4. P. 349–386.
- Stubbe P., Kopka H. Summary of results obtained with the Tromsø heating facility. *Radio Sci.* 1983. Vol. 18, no. 6. P. 831–834. DOI: [10.1029/RS018i006p00831](https://doi.org/10.1029/RS018i006p00831).
- Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., et al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. A10307. DOI: [10.1029/2012JA017563](https://doi.org/10.1029/2012JA017563).
- Zawdie K.A., Drob D.P., Siskind D.E., Coker C. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere. *Radio Sci.* 2017. Vol. 52. P. 767–783. DOI: [10.1002/2017RS006256](https://doi.org/10.1002/2017RS006256). URL: <https://spaceweather.com> (дата обращения 1 марта 2023 г.). URL: [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php) (дата обращения 1 марта 2023 г.). URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

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. Т. 9, № 1. С. 22–32. DOI: [10.12737/szf-91202303](https://doi.org/10.12737/szf-91202303).